

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

ИНСТИТУТ МАШИНОСТРОЕНИЯ  
Кафедра «Сварка, обработка материалов давлением и родственные процессы»

15.04.01 Машиностроение

(код и наименование направления подготовки, специальности)

Системы автоматизированного проектирования в машиностроении

(профиль)

**МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ**

на тему: Разработка метода многокритериальной оптимизации процессов листовой штамповки в САЕ.

Студент(ка)

Груньюшкин А.Н.

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

Научный

Почекуев Е.Н.

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

руководитель

Руководитель программы к.т.н., доцент Е.Н. Почекуев

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

« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20 \_\_\_\_\_ г.

**Допустить к защите**

Заведующий кафедрой д.т.н., профессор В.В. Ельцов

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

« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20 \_\_\_\_\_ г.

Тольятти 2018

# СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ.....	7
1 Анализ методов оптимизации .....	7
1.1 Постановка задачи оптимизации .....	7
1.1.1 Критерий оптимальности и целевая функция .....	8
1.1.2 Переменные проектирования и ограничения.....	9
1.1.3 Математическая постановка задачи оптимизации .....	10
1.1.4 Типы задач оптимизации.....	13
1.2 Классификация методов оптимизации.....	15
1.3 Численные методы оптимизации.....	16
1.3.1 Методы одномерной оптимизации.....	19
1.3.2 Методы многомерной оптимизации.....	21
1.4 Методы решения многокритериальных задач оптимизации .....	22
1.5 Выводы .....	25
2 Постановка задачи оптимизации процессов листовой штамповки .....	26
2.1 Жизненный цикл изделий ОМД.....	26
2.2 Моделирование задач оптимизации .....	30
2.3 Решение оптимизационных задач.....	32
2.4 Критерии оптимальности и целевые функции .....	35
2.5 Переменные проектирования .....	37
2.6 Ограничения переменных проектирования .....	39
2.7 Детерминированные и стохастические задачи оптимизации .....	40
2.8. Выводы .....	44
3 Оптимизация технологических процессов в LS-OPT .....	46
3.1 Оптимизация на основе RSM .....	46
3.2 Методы работы с использованием поверхностей отклика .....	49
3.2.1 Подготовка к проектированию .....	49
3.2.2 Поэтапная оптимизация конструкции.....	51

3.3	Рекомендованный алгоритм проверки .....	54
3.4	Проблемы оптимизации систем .....	55
3.4.1	Глобальная оптимальность .....	55
3.4.2	Шумы.....	56
3.4.3	Неробастные проектные решения .....	56
3.4.4	Ложные проектные решения.....	57
3.4.5	Неоднозначные проектные решения.....	57
3.5	Этапы работы в программе LS-ОПТ .....	58
3.5.1	Графический интерфейс пользователя .....	58
3.5.2	Инициализация задачи оптимизации .....	60
3.5.3.	Определение этапов .....	67
3.5.4.	Задание переменных проектирования.....	69
3.5.5.	Проведение выборки и построение метамоделей.....	72
3.5.6.	Выбор целевой функции и неявных ограничений .....	73
3.5.7.	Критерии завершения .....	74
3.5.8.	Запуск оптимизации.....	75
3.5.9.	Просмотр результатов.....	75
3.6.	Выводы .....	76
4	Разработка метода оптимизации процесса ЛШ в LS-ОПТ .....	77
4.1	Подготовка к моделированию.....	77
4.2	Создание базового технологического процесса.....	81
4.3	Анализ результатов базового моделирования.....	87
4.4	Выбор критерия оптимальности и постановка целевой функции.....	90
4.5	Определение переменных проектирования и ограничений.....	92
4.6	Моделирование задачи оптимизации в LS-ОПТ .....	93
4.7	Анализ результатов оптимизации.....	101
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....		109
СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ.....		110
ПРИЛОЖЕНИЕ А .....		113



## ВВЕДЕНИЕ

Листовая штамповка является одним из важнейших производственных процессов, реализуемых в автомобильной промышленности. Жесткая конкуренция ставит перед автопроизводителями по всему миру два важнейших требования: сокращение производственных затрат и повышение надежности, качества продукции. Применение компьютерного моделирования поведения объектов и процессов их изготовления способствует достижению этих требований.

Численное моделирование, с помощью метода конечных элементов (МКЭ), используются для решения широкого спектра инженерных задач, в том числе и в процессах ОМД. Конечно-элементное моделирование позволяет точно спрогнозировать производственные процессы, что значительно снижает сроки и затраты на их разработку.

Современная тенденция в области ОМД – это сочетание CAE-систем, использующих МКЭ с методами оптимизации. Такой подход имеет огромный потенциал по улучшению качества продукции и снижению затрат.

В настоящее время продолжают научные исследования в области оптимизации процессов ОМД с использованием МКЭ. Однако большинство исследований до сих пор фокусируются на решающей части оптимизации, т. е. на выборе и применении подходящего алгоритма оптимизации. Моделирование в основном осуществляется произвольным образом, обращаясь только к конкретной задаче рассматриваемого процесса. Кроме того, выбор алгоритма оптимизации также в основном связан с конкретной задачей.

Большинство результатов оптимизации впечатляют, что стимулирует широкое применение методов оптимизации к процессам ОМД. Тем не менее, моделирование задачи оптимизации, выбор подходящего алгоритма оптимизации и правильное применение этого алгоритма к конкретному процессу ОМД требует большого опыта в области математической оптимизации. К

сожалению, у большинства специалистов этот опыт отсутствует, что является препятствием для реализации всего потенциала оптимизации процессов ОМД.

Актуальность диссертации связана с потребностью в разработке стратегии оптимизации процессов ОМД, которая поможет специалистам моделировать и решать различные задачи листовой штамповки металла, независимо от типа задачи, продукта или процесса, с которыми они сталкиваются.

Цель работы заключается в разработке метода проектирования оптимальных технологических процессов листовой штамповки в САЕ-системах.

Научной новизной является создание методики решения многокритериальной задачи оптимизации многоэтапного процесса листовой штамповки типовой детали кузова легкового автомобиля.

Для решения поставленной цели необходимо выполнить следующие задачи:

1. Анализ методов решения задач оптимизации в процессах ОМД.
2. Анализ целевых функций, переменных проектирования и ограничений для проектирования оптимальных процессов листовой штамповки в САЕ.
3. Разработка метода решения многокритериальной задачи оптимизации процесса листовой штамповки детали кузова автомобиля в программе LS-OPT.

Практическая ценность работы заключается в том, что разработанный метод при внедрении в производство позволит повысить эффективность разрабатываемых технологических процессов листовой штамповки, снизить затраты и улучшить качество продукции.

Магистерская диссертация состоит из введения, четырех основных глав, заключения, а также списка использованных источников. На основе настоящей магистерской диссертации докладывались две работы на научно-практических конференциях «Дни науки ТГУ» (Тольятти, ТГУ, 2017-2018 гг.).

# ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

## 1 Анализ методов оптимизации

В традиционном методе проектирования конструкция улучшается путем внесения в нее изменений на основании опыта или интуиции. Такой подход не всегда приводит к желаемому результату. Системный метод проектирования основан на оптимизации процесса или объекта.

Оптимизация в широком смысле слова находит применение в науке, технике и в любой другой области человеческой деятельности. Человек часто сталкивается с ситуацией, когда ему из совокупности альтернативных решений в какой-либо области деятельности, необходимо выбрать одно наилучшее решение. Если такой выбор проводится путем сравнения различных альтернатив по некоторому количественному критерию, то говорят о необходимости решения задачи оптимизации (лат. *optimus* — наилучший) [7].

По содержанию задачи оптимизации весьма разнообразны. Они могут быть связаны с проектированием технических устройств и технологических процессов, с распределением ограниченных ресурсов и планированием работы предприятий, наконец, с решением проблем, возникающих в повседневной жизни человека.

Различные устройства, процессы и ситуации, применительно к которым предстоит решать задачу оптимизации, объединяют под общим названием объект оптимизации.

### 1.1 Постановка задачи оптимизации

Алгоритм оптимизации представляет собой строгую последовательность математических операций. Задача оптимизации записывается на математическом языке, т.е. составляется математическая модель объекта оптимизации. Математическая модель описывает объект при помощи соотношений между величинами, которые адекватно отражают свойства и

поведение исследуемого объекта. Обычно часть значений этих величин можно регулировать в некоторых пределах, что и порождает множество альтернатив, среди которых и предстоит выбрать наилучшую [4].

Выявление зависимости между элементами математической модели, такими как целевая функция, ограничения и переменные проектирования, является предпосылкой к успешному решению задачи оптимизации.

При постановке задач оптимизации необходимо [6]:

1. Наличие объекта оптимизации и цели оптимизации;
2. Возможность выбора некоторых параметров оптимизируемого объекта;
3. Возможность количественной оценки оптимизируемой величины;
4. Учет ограничений.

#### 1.1.1 Критерий оптимальности и целевая функция

Для решения задачи оптимизации прежде всего необходимо сформулировать критерий оптимальности, т.е. количественную оценку оптимизируемого качества объекта. Критериями оптимальности, к примеру, могут служить капитальные затраты, качество изделия, производительность штамповочной операции, масса конструкции и т.д.

К критерию оптимальности предъявляется ряд требований [7]:

1. Критерий оптимальности должен выражаться количественно;
2. Критерий оптимальности по возможности должен быть единственным (однокритериальная оптимизация);
3. Критерий оптимальности должен отражать наиболее существенные стороны процесса.
4. Желательно чтобы критерий оптимальности имел ясный физический смысл и легко рассчитывался.

На основании выбранного критерия оптимальности составляется целевая функция, представляющая собой зависимость критерия оптимальности от



управляющих параметров (переменных проектирования) и позволяющая найти его экстремальное значение. Целевая функция в зависимости от количества переменных проектирования бывает одномерной или многомерной (рисунок 1).

Целевые функции могут быть заданы в явной аналитической зависимости  $F = F(x)$ , в виде алгоритма, в форме уравнения, решением которого является функция  $F(x)$  и т.д.

Целевые функции должны содержать только те элементы выбранного критерия, которые могут быть представлены в функции переменными.

Если целевая функция единственная, то задачу оптимизации называют однокритериальной (задача математического программирования), однако в большинстве случаев целевая функция задается несколькими функциями  $F_1(x), \dots, F_n(x)$  – многокритериальная (векторная) оптимизации [4].

Вид критерия оптимальности или целевой функции определяется конкретной задачей оптимизации.

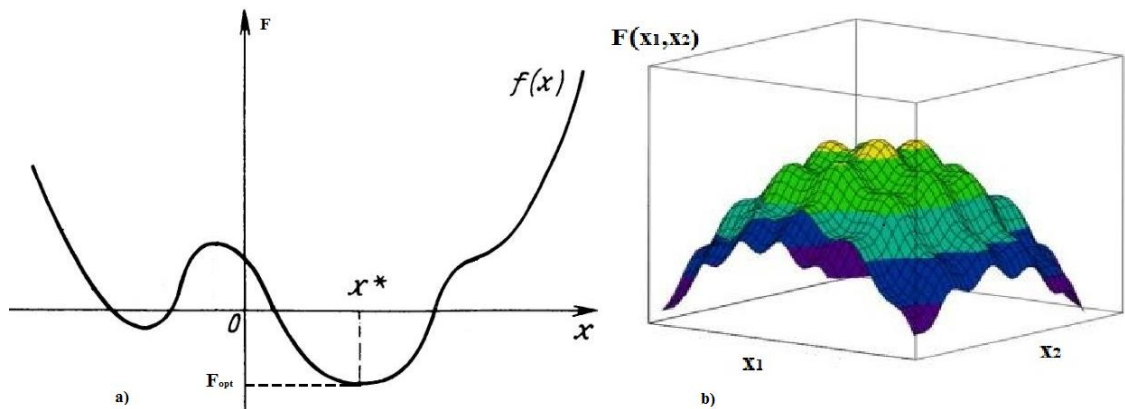


Рисунок 1 – Виды целевой функции [4]

### 1.1.2 Переменные проектирования и ограничения

Изменяемые при оптимизации величины, входящие в математическую модель объекта оптимизации, называют переменными проектирования, а соотношения, устанавливающие пределы возможного изменения этих переменных, — ограничениями. Эти ограничения могут быть заданы в форме

равенств или неравенств. Их называют соответственно ограничениями типа равенства или ограничениями типа неравенства [11].

Если целевая функция и ограничения являются линейными относительно переменных проектирования, то имеет место задача линейного программирования, а при нелинейной зависимости – задача нелинейного программирования.

### 1.1.3 Математическая постановка задачи оптимизации

Математическую формулировку общей задачи математического программирования обычно записывают в соответствии с формулой (1) [2]:

$$\begin{aligned} f_0(x) \rightarrow \min(\max), \quad x \in \Omega \\ \text{при условиях} \\ g(x) \geq 0 \\ h(x) = 0 \end{aligned} \tag{1}$$

где  $f_0(x)$  – целевая функция, количественно выражающая некоторый критерий оптимальности и зависящая от координат  $x_j = \overline{1, n}$  (переменные проектирования), точки  $x \in R^n$ ,

$\Omega \in R^n$  – множество возможных альтернатив, рассматриваемых при поиске решения задачи,

$g(x), h(x)$  – вектора ограничений, накладываемые на переменные проектирования.

В формализованном виде задача оптимального проектирования в общей постановке заключается в определении переменных проектирования, при которых целевая функция, являющаяся линейной или нелинейной, примет экстремальное значение, при условии выполнения ограничений.

Любую точку  $x \in \Omega$  допустимым решением задачи математического программирования, а само множество - множеством допустимых решений. Точку  $x^* \in \Omega$  в которой функция  $f_0(x)$  достигает своего экстремального значения, называют оптимальным решением задачи.

Обычно на практике решают задачу минимизации целевой функции. Однако если необходимо найти максимум, достаточно заменить знак целевой функции, т.е. решить задачу минимизации  $f_0^*(x) = -f_0(x)$  (рисунок 2). Для нахождения максимума и минимума можно использовать один и тот же алгоритм [4].

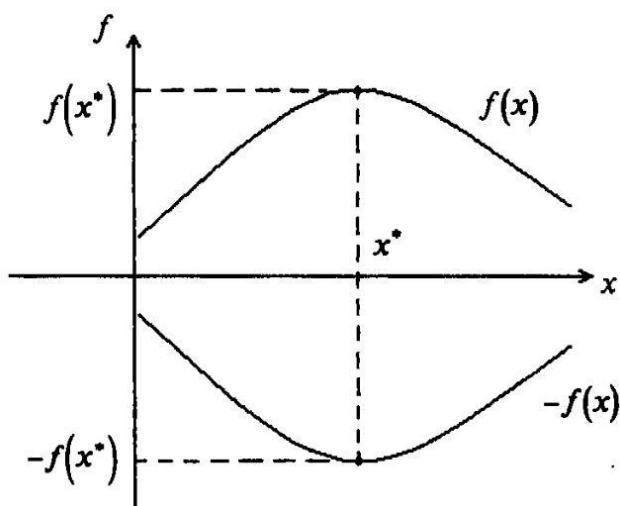


Рисунок 2 – Приведение задачи на максимум к задаче на минимум [4]

Рассматривают несколько типов минимума функции. Прежде всего, минимум может быть локальным или глобальным (абсолютным) (рисунок 3). Под глобальным оптимумом понимают оптимальное решение для всего пространства проектирования, а под локальным – в какой-либо точке. Многие алгоритмы приспособлены только к поиску локальных минимумов. Задача поиска глобального минимума сложна, и требует большего числа вычислений целевой функции [3].

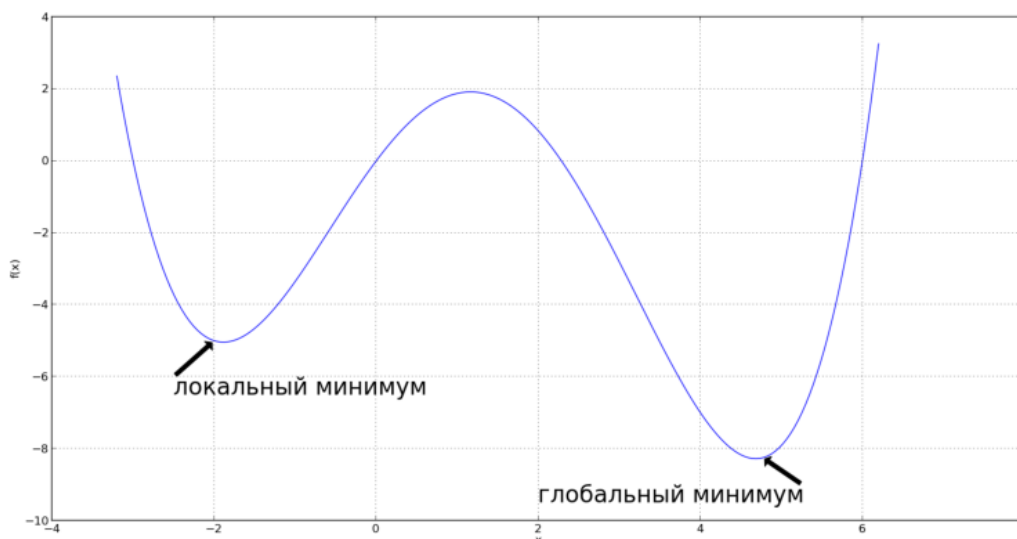
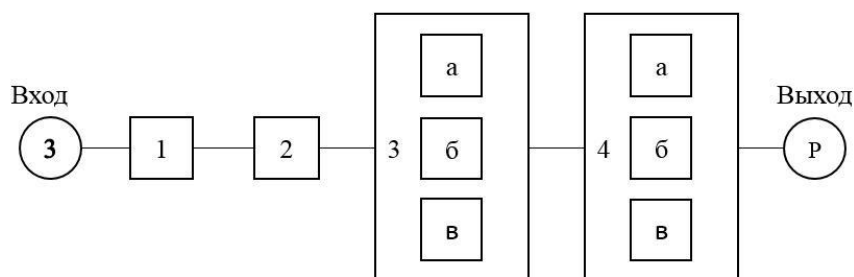


Рисунок 3 – Локальный и глобальный оптимумы [4]

На рисунке 4 приведены основные этапы решения оптимизационных задач.



3 – текст поставленной задачи; 1 – исходные данные; 2 – расчетная модель включая параметры оптимизации; 3 – математическая модель: а – критерии оптимальности; б – целевые функции; в – ограничения в виде равенств или неравенств; 4 – математический аппарат оптимизации: а – метод оптимизации; б – схема алгоритма; в – реализация алгоритма (программа и ее реализация); Р – результат (оптимальное инженерное решение)

Рисунок 4 – Схема решения оптимизационных задач [4]

Итак, для решения задачи оптимизации необходимо:

- составить математическую модель объекта оптимизации;
- выбрать критерий оптимальности и составить целевую функцию;

- установить возможные ограничения, которые должны накладываться на переменные проектирования;
- выбрать метод оптимизации, который позволит найти экстремальные значения искомым величин.

#### 1.1.4 Типы задач оптимизации

Одна и та же прикладная задача может приводить к разным задачам оптимизации в зависимости от того, какая математическая модель используется при рассмотрении реального объекта оптимизации. Желательно применять более простые модели, но в то же время достаточно полно отражающие свойства объекта, существенные с точки зрения поставленной цели, выраженной в критерии оптимальности. Поэтому при выборе либо разработке математической модели или же при обосновании ее упрощения необходимо достаточно четко представлять, к какому классу будет относиться поставленная задача оптимизации и какие методы применимы для ее решения (рисунок 5) [23].



Рисунок 5 – Общая классификация задач оптимизации

Все задачи оптимизации также можно разделить на две группы:

- задачи безусловной оптимизации;

- задачи условной оптимизации.

К первой группе относят задачи, в которых отсутствуют ограничения и необходимо оптимизировать целевую функцию на множестве ее определения. В постановке задач условной оптимизации присутствуют ограничения, и требуется оптимизировать целевую функцию на множестве допустимых решений, заданных системой ограничений.

Помимо этого, задачи оптимизации можно классифицировать по типу аргументов на:

- дискретные (компоненты вектора  $x$  принимают дискретные или целочисленные значения);

- непрерывные (компоненты вектора  $x$  непрерывны).

Дискретные задачи требуют совершенно специфических методов оптимизации и используются редко.

Задачи оптимизации можно также классифицировать по виду целевой функции, ограничений и по размерности вектора  $x$ . Задачи без ограничений, в которых  $x$  представляет собой одномерный вектор, называются задачами с одной переменной. Задачи условной оптимизации, в которых ограничения  $h$  и  $g$  являются линейными, носят название задач с линейными ограничениями. В таких задачах целевые функции могут быть либо линейными, либо нелинейными. Задачи, которые содержат только линейные функции вектора непрерывных переменных  $x$ , называются задачами линейного программирования; в задачах целочисленного программирования компоненты вектора  $x$  должны принимать только целые значения. Задачи с нелинейной целевой функцией и линейными ограничениями иногда называют задачами нелинейного программирования с линейными ограничениями. Оптимизационные задачи такого рода можно классифицировать на основе структурных особенностей нелинейных целевых функций. Если  $f_0(x)$  – квадратичная функция, то мы имеем дело с задачей квадратичного программирования; если  $f_0(x)$  есть отношение линейных функций, то

соответствующая задача носит название задачи дробно-линейного программирования, и т.д [28].

Кроме того, оптимизация может быть однокритериальной (скалярной) и многокритериальной (векторной). Однокритериальная оптимизация основана на определении экстремума функции с помощью классических методов. Многокритериальная оптимизация позволяет получить наилучшее значение для заданного множества характеристик рассматриваемого объекта. Наиболее часто встречающийся на практике вид задач.

Деление оптимизационных задач на эти классы представляют значительный интерес, поскольку специфические особенности тех или иных задач играют важную роль при разработке методов их решения.

## 1.2 Классификация методов оптимизации

Метод оптимизации – это стратегия поиска оптимального проектного решения. Классификацию методов оптимизации можно производить по различным критериям.

Основой любого из них является математический аппарат. В зависимости от используемого математического аппарата различают следующие методы оптимизации:

- классические, неитерационные методы глобальной оптимизации (аналитические);
- алгоритмические или методы математического программирования (итерационные);
- графические методы.

К классическим относятся методы: наименьших квадратов, дифференциального исчисления, принцип минимакса Л.С. Понтрягина. Определение экстремума функции классическими методами возможно при условии, что математическая модель характеризуется непрерывными и

дифференцируемыми аналитическими функциями и что задача не содержит ограничений на функции управления и другие переменные.

Методами математического программирования являются линейное, нелинейное, динамическое, дискретное и стохастическое программирования.

Эти методы подразумевают численное или приближенное решение уравнений в экстремальных задачах с помощью ЭВМ, т.е. машинную реализацию алгоритма.

Численные методы поиска экстремума функций многих переменных лежат в основе алгоритмов конструирования физически реализуемых операторов и поэтому являются ключевыми для решения задач оптимального синтеза технических систем.

Для правильной постановки и решения задач оптимального проектирования конструкций необходимо знать:

- принцип действия методов оптимизации;
- класс задач, к которым применим тот или иной метод;
- формулировку задачи синтеза конструкции как технической системы в терминах теории оптимизации;
- наиболее эффективный метод ее решения.

### 1.3 Численные методы оптимизации

Для решения задач оптимизации, как правило, используют итерационные (численные) методы. Их сущность заключается в многократном повторении одного и того же алгоритма, который дает результат, постепенно приближающийся к точному решению.

Итерации начинаются с задания начального приближенного решения. Затем начальные значения переменных постепенно изменяются, пока не достигается заданная точность решения. Быстрота сходимости итерационного метода в значительной мере зависит от степени точности начальной аппроксимации. Любой итерационный метод требует задание начального



приближенного решения, которое может быть получено любым разумным способом. Очевидно, чем ближе исходное приближение к решению, тем меньше итераций необходимо для его получения.

Любой численный метод (алгоритм) решения задачи оптимизации основан на точном или приближенном вычислении ее характеристик (значений целевой функции, функций, задающих допустимое множество, а также их производных). На основании полученной информации строится приближение к решению задачи —искомой точке минимума  $x^*$  или, если такая точка не единственна, — к множеству точек минимума [29].

Алгоритмы, использующие лишь информацию о значениях минимизируемой функции, называются алгоритмами нулевого порядка; алгоритмы, использующие также информацию о значениях первых производных, - алгоритмами первого порядка; алгоритмы, использующие, кроме того, информацию о вторых производных, - алгоритмами второго порядка.

Работа алгоритма состоит из двух этапов. На первом этапе вычисляются предусмотренные алгоритмом характеристики задачи. На втором этапе по полученной информации строится приближение к решению.

Если все точки выбираются одновременно до начала вычислений, то алгоритм минимизации называется пассивным. Однако для решения большинства задач точки вычисления выбираются поочередно, т.е. точка  $x^{i+1}$  выбирается, когда уже выбраны точки предыдущих вычислений  $x^1, \dots, x^i$  и в каждой из них произведены предусмотренные алгоритмом вычисления. Такие алгоритмы называются последовательными [29].

Трудность решения задачи оптимизации определяется числом ее переменных, видом целевой функции, а также видом и числом ограничений. При этом часто методы, разработанные для решения того или иного типа задач, оказываются полезными для решения более сложных задач. Так, например, алгоритмы одномерной оптимизации широко применяются при решении многомерных задач; многие алгоритмы условной оптимизации используют

методы безусловной оптимизации или являются их модификацией; методы решения задачи линейного программирования используются при решении задач нелинейного программирования и т.д.

Среди методов минимизации можно условно выделить конечношаговые и бесконечношаговые методы. Конечношаговыми, или конечными, называются методы, гарантирующие отыскание решения задачи за конечное число шагов. Конечношаговые методы удается построить лишь для некоторых специальных типов задач оптимизации, например задач линейного и квадратичного программирования. Для бесконечношаговых методов достижение решения гарантируется лишь в пределе.

На рисунке 6 приведена классификация численных методов оптимизации в зависимости от числа переменных проектирования.



Рисунок 6 – Классификация численных методов оптимизации [4]

### 1.3.1 Методы одномерной оптимизации

Для решения задачи оптимизации, в которых целевая функция зависит от одной переменной, можно использовать различные методы одномерного поиска (рисунок 7).

Оптимизация функции одной переменной – наиболее простой тип оптимизационных задач. Тем не менее она занимает важное место в теории оптимизации.



Рисунок 7 – Классификация методов одномерного поиска [4]

Методы оптимизации функции одной переменной, в которых используют значения функции в точках рассматриваемого промежутка и не используют значения ее производных, называют интервальными методами. Они основаны на последовательном сужении интервала, в котором находится экстремум функции [11].

Методы полиномиальной аппроксимации более сложные и имеют небольшую систематическую погрешность, так как аппроксимирующая кривая отличается от истинной кривой.

Дифференциальные методы основаны на положении, что необходимым условием существования локального минимума в некоторой точке  $x$  является

обращение в нуль первой производной функции в этой точке, т.е.  
 $f'(x) = df/dx = 0$

При использовании метода наименьших квадратов отыскиваются такие коэффициенты функциональной зависимости, при которых сумма квадратов отклонений полученного выражения от значений табличной зависимости по всем точкам  $j$  таблицы ( $j = \overline{1, k}$ ) была минимальной.

Более эффективные методы можно построить, если допустить, что исследуемая функция в рассматриваемом интервале только один минимум. Пусть в интервале  $[a, b]$  имеется единственное значение  $x^*$  такое, что  $f(x^*)$  – минимум  $f(x)$  на  $[a, b]$  и что  $f(x)$  строго убывает для  $x \leq x^*$  и строго возрастает для  $x \geq x^*$ . Такая функция называется унимодальной (рисунок 8). Она необязательно должна быть гладкой или даже непрерывной [9].

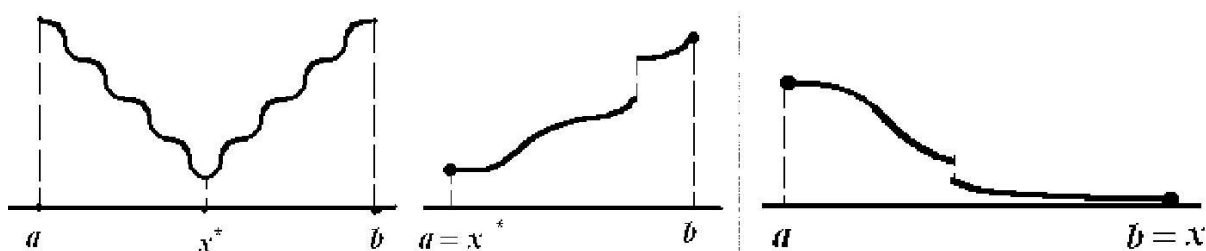


Рисунок 8 – Унимодальные функции [9]

Так как в прикладных задачах вычисление каждого значения функции может быть достаточно трудоемким, выбирается такую стратегию поиска, чтобы значение целевой функции  $f(x^*)$  было найдено с заданной точностью наиболее экономным путем.

Считается, что стратегия поиска определена, если:

- определен алгоритм выбора точек  $x_1$ ,
- определено условие прекращения поиска, т.е. условие, при выполнении которого значение  $f(x^*)$  считают найденным с заданной точностью.

### 1.3.2 Методы многомерной оптимизации

Качество численного метода характеризуется многими факторами: скоростью сходимости, временем выполнения одной итерации, объемом памяти ЭВМ, необходимым для реализации метода, классом решаемых задач и т.д. Разумное сочетание разнообразных методов и учет их свойств позволяет с наибольшей эффективностью решать поставленные задачи. Многомерный способ решения весьма удобен в диалоговом режиме работы с ЭВМ. Для успешной работы очень важно знать основные свойства и специфику методов оптимизации. Это обеспечивает способность правильно ориентироваться в различных ситуациях, возникающих в процессе расчетов, и наилучшим образом решить задачу [5].

Детерминированные алгоритмы безусловной оптимизации делятся на классы в зависимости от вида используемой информации (рисунок 9).



Рисунок 9 – Классификация методов многомерного поиска [4]

В методах нулевого порядка для определения направления спуска не требуется вычислять производные целевой функции. Направление минимизации

в данном случае полностью определяется последовательными вычислениями значений функций.

Определение производных с помощью различных численных методов осуществляется с ошибками, которые могут ограничить применение таких методов. Кроме того, на практике встречаются задачи, решение которых возможно лишь с помощью методов нулевого порядка, например задачи минимизации функций с разрывными первыми производными.

Под линейным программированием понимают направление математического программирования, изучающее методы экстремальных задач, которые характеризуются линейной зависимостью между переменным и линейным критерием.

Симплекс метод является наиболее употребительным численным методом решения задач линейного программирования. Сущность метода заключается в последовательном поиске вершины многогранника, к которой всех выходящих из нее ребер функция возрастает (убывает).

Для решения задач оптимизации многостадийных процессов применяется метод динамического программирования.

Динамическое программирование придерживается двух подходов к решению задач [20]:

- нисходящее динамическое программирование: задача разбивается на подзадачи меньшего размера, они решаются и затем комбинируются для решения исходной задачи.
- восходящее динамическое программирование: все подзадачи, которые впоследствии понадобятся для решения исходной задачи просчитываются заранее и затем используются для построения решения исходной задачи.

#### 1.4 Методы решения многокритериальных задач оптимизации

В практической деятельности инженеру наиболее часто приходится решать задачи многокритериальной оптимизации. Это объясняется большим

количеством технических требований, предъявляемым к проектируемому изделию в зависимости от условий и режимов его работы, а также сложностью самого изделия. Многокритериальная оптимизация позволяет получить наилучшее значение для заданного множества характеристик рассматриваемого объекта [10].

Существует несколько методов решения задач данного типа [20]:

1) Традиционный способ проектирования. Конструктор вводит изменения в некоторую пробную модель и находит компромиссное решение. Это окончательное решение дает слабое представление о том, насколько один критерий зависит от другого. Кроме того, полученная модель, как правило, далека от оптимальной и возможно ее дальнейшее улучшение.

2) Второй способ заключается в упорядочении (ранжировке) критериев  $\Phi_i(\bar{x}), i = \overline{1, m}$  по степени их важности в рассматриваемой задаче.

Затем, используя какой-либо алгоритм оптимизации, минимизируется самый важный из них  $\Phi_1(\mu)$ , без учета влияния других, в результате получается  $\Phi_1^*$ . После этого минимизируется второй критерий, не учитывая критерии с номерами 3, 4 и т.д. Так продолжается до тех пор, пока не будут минимизированы все критерии. По сравнению с первым методом конструктор непосредственно участвует в оптимизации технической системы и приобретает глубокое понимание существа задачи.

3) При третьем способе по определенному правилу составляют новую интегральную (обобщенную) целевую функцию, например, в виде средневзвешенной суммы локальных (частных) целевых функций в соответствии с формулой (2):

$$\Phi(\mu) = \sum_{i=1}^m \omega_i \Phi_i(\mu), \omega_i \in [0,1], \quad (2)$$

где  $\omega_i$  - неотрицательные весовые коэффициенты (множители), отражающие важность соответствующего критерия.

Интегральный минимаксный критерий минимизируется известными методами в соответствии с формулой (3):

$$\Phi(\mu) = \min[\max \omega_i \Phi_i(\mu)], 1 \leq i \leq m \quad (3)$$

Преимущество способа состоит в том, что рассматривают ряд возможных моделей, однако при его использовании необходимо обосновывать выбор весовых коэффициентов, что сделать объективно достаточно сложно.

4) Этот способ основан на том, что среди частных функций  $\Phi_i(\mu)$  выбирают одну, считая ее итоговой. Остальные частные функции на основании тщательного изучения задачи (методов реализации, технологического выполнения, условий эксплуатации, экономических показателей и т.п.) выводят в ограничения, т.е. задача сводится к однокритериальной с ограничениями.

В рассмотренных выше четырех способах решения многокритериальной задачи ее сводили в однокритериальную, что связано с ее огрублением.

5) Пятый способ заключается в построении компромиссной кривой – кривой допустимого выбора конструктивных решений. Этот способ может быть применен к двум задачам.

Первая задача – минимизация двух противоречивых целевых функций с двумя конструктивными параметрами  $f_1(u_1, u_2)$  и  $f_2(u_1, u_2)$  без ограничений.

Вторая задача – минимизация двух противоречивых целевых функций с двумя конструктивными параметрами  $f_1(u_1, u_2)$  и  $f_2(u_1, u_2)$  при ограничениях  $\Phi(u_1, u_2) \leq 0$  (другие параметры принимаются постоянными).



## 1.5 Выводы

1. Оптимизация – это выбор наилучшего варианта при наличии множества альтернатив.
2. Целевая функция, представляет собой зависимость критерия оптимальности от переменных проектирования и позволяет найти его экстремальное значение.
3. В формализованном виде задача оптимального проектирования в общей постановке заключается в определении переменных проектирования, при которых целевая функция примет экстремальное значение, при условии выполнения ограничений.
4. Классификацию методов оптимизации можно производить по различным критериям. Основой любого из них является математический аппарат.
5. Для решения задач оптимизации, как правило, используют итерационные (численные) методы.
6. В зависимости от числа целевых функций задачи оптимизации делятся на однокритериальные и многокритериальные.
7. Применяемые в настоящее время методы решения многокритериальных задач сводят их к однокритериальным.

## 2 Постановка задачи оптимизации процессов листовой штамповки

### 2.1 Жизненный цикл изделий ОМД

В течение последних нескольких десятилетий моделирование процессов ОМД методом конечных элементов (МКЭ) стало важным инструментом для проектирования осуществимых производственных процессов. Развитие в последние годы сочетания МКЭ-моделирования с методами математической оптимизации обусловлено, главным образом, необходимостью решения задачи разработки оптимальных процессов ОМД (более качественная продукция и низкие затраты).

Основная концепция математической оптимизации представлена на рисунке 10. В ее основе лежат два основных этапа: моделирование и решение задачи оптимизации. Этап моделирования состоит из [17]:

1. Выбор некоторого количества переменных проектирования, значениями которых пользователь может управлять.
2. Выбор целевой функции, т.е. цели оптимизации.

Этап решения включает применение соответствующего алгоритма оптимизации к моделируемой задаче оптимизации.

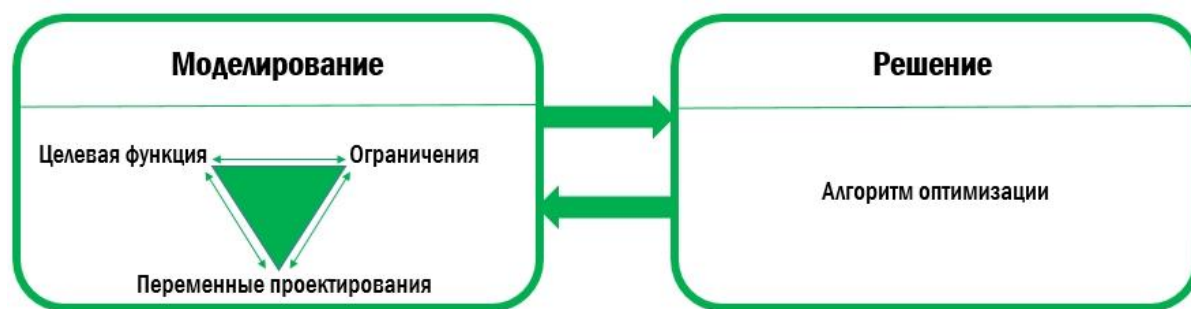


Рисунок 10 - Основная концепция оптимизации: моделирование и решение [17]

Стрелки между моделированием и решением означают что оба этапа не могут рассматриваться отдельно друг от друга. Необходимо подобрать

правильный алгоритм оптимизации для определенной моделируемой задачи оптимизации, и четко сформулировать задачу оптимизации. Если модель оптимизации не соответствует алгоритму, вполне вероятно, что задача оптимизации не будет решена эффективно или не будет решена вообще.

Основой структурной методологии моделирования задач оптимизации для производственных процессов ОМД является цикл разработки продукта, который является частью жизненного цикла продукта. Схема жизненного цикла продукта представлена на рисунке 11.

Функциональные требования - это свойства продукта, которые имеют определяющее значение для удовлетворения потребителя и функционирования продукта. Параметры проектирования определяют проектирование продукции (рисунок 12). Переменные процесса - это параметры процесса, необходимые для производства продукции (рисунок 13).

Цикл разработки продукта, является основой для методологии моделирования задач оптимизации процессов ОМД, которая состоит из следующих этапов [18]:

1. Определение подходящей оптимизируемой ситуации.
2. Выбор необходимых выходных параметров (откликов).
3. Выбор одного отклика в качестве целевой функции, а других в качестве неявных ограничений.
4. Определение целевой функции и неявных ограничений.
5. Выбор возможных переменных проектирования.
6. Определение границ изменения переменных проектирования.
7. Определение явных ограничений.



Рисунок 11 - Жизненный цикл продукта в ОМД [18]

Выделяют четыре ситуации, в которых может быть реализована задача оптимизации металлических изделий и их производственных процессов [21]:

1. Проектирование изделий, где цель заключается в оптимизации функциональных требований продуктов ОМД путем определения параметров проектирования.

2. Проектирование процесса типа 1, где цель заключается в нахождении параметров проектирования, заданных конструктором детали, путем определения переменных процесса. В качестве альтернативы можно попытаться изготовить продукт без дефектов или свести к минимуму производственные затраты путем определения переменных процесса.



Рисунок 12 - Параметры проектирования деталей ОМД [21]

3. Проектирование процесса типа 2, где цель заключается в оптимизации функциональных требований путем определения переменных процесса. Параметры проектирования, дефекты и стоимость могут по-прежнему рассматриваться параллельно с функциональными требованиями.

4. Производство, где методы оптимизации могут быть использованы для решения производственных проблем.



Рисунок 13 - Переменные процесса для процессов ОМД [21]

Для задачи проектирования 1 типа целевыми функциями и неявными ограничениями являются параметры проектирования, дефекты и стоимость,

тогда как переменные проектирования связаны с переменными процесса (рисунок 14).



Рисунок 14 - Модель входные данные – отклик для МКЭ в процессе проектирования 1 типа [17]

## 2.2 Моделирование задач оптимизации

Рассматриваются два аспекта моделирования: влияние произвольного моделирования на оптимизационные результаты и связь между оптимизационным моделированием и симуляцией МКЭ.

Оптимизационное моделирование включает определение целевой функции, ограничений и переменных проектирования. Эти три элемента тесно связаны друг с другом. Как целевая функция, так и ограничения должны быть количественно определены переменными проектирования. Целевая функция и ограничения также связаны друг с другом в том смысле, что они часто взаимозаменяемы. При производстве продукции ОМД, как правило, рассматриваются два свойства - это качество продукции и затраты. При этом могут быть использованы два подхода: либо максимизировать качество, при этом устанавливая определенный предел на допустимые производственные затраты, или минимизировать затраты при одновременном обеспечении определенного минимального уровня качества продукции. В первом случае качество, безусловно, является целью оптимизации, а затраты - это ограничения, тогда как в последнем случае все наоборот. Какое свойство выбрать в качестве целевой функции, а какое в качестве ограничения является принципиальным вопросом, поскольку оно сильно влияет на окончательный результат

оптимизации. Более того, случайный пропуск существенного свойства, которое необходимо учитывать, может иметь серьезные последствия для оптимизационных результатов: минимизация затрат при сохранении качества в приведенном выше примере даст очень дешевый, но очень плохой продукт в отношении качества [25].

Связь между оптимизацией и моделированием МКЭ схематично представлена на рисунке 15. Запуск моделирования МКЭ можно рассматривать в качестве связующего компонента между сигналом и откликом. Нет необходимости запускать расчет МКЭ для оценки заранее определенных величин. Этими величинами могут быть начальные значения параметров проектирования, а также ограничения, явно зависящие от переменных проектирования. Эти ограничения называются явными ограничениями. В случае процессов ОМД явные ограничения связаны с недеформированным продуктом, например, ограничение исходной формы заготовки.

Величины, зависящие от отклика, требуют моделирования МКЭ для их оценки: они неявно зависят от переменных проектирования. Целевая функция обычно представляет собой неявную величину и также может иметь неявные ограничения. Неявные ограничения связаны с деформированным продуктом, например, утонение не должно превышать указанный предел.



Рисунок 15 - МКЭ в модели входные данные – отклик [17]

### 2.3 Решение оптимизационных задач

После этапа моделирования, второй этап математической оптимизации решает поставленную задачу. Он заключается в применение алгоритма оптимизации к моделируемой задаче оптимизации.

Для оптимизации с использованием моделирования МКЭ процессов ОМД в основном используются четыре основные группы алгоритмов [17]:

- Итерационные алгоритмы
- Эволюционные и генетический алгоритмы
- Аппроксимационные алгоритмы оптимизации
- Адаптивные алгоритмы оптимизации

Одним из способов оптимизации процессов ОМД является использование классических итерационных алгоритмов оптимизации (сопряженный градиент, алгоритм Бroyдена-Флетчера-Гольдфарба-Шанно и т. д.). При использовании этих итерационных алгоритмов существует прямая связь между программным обеспечением МКЭ и алгоритмом оптимизации (рисунок 16): каждое вычисление функции алгоритма означает выполнение вычисления МКЭ.



Рисунок 16 - Прямая оптимизация [17]

Во-первых, для процессов ОМД расчеты МКЭ могут быть чрезвычайно трудоемкими и должны проводиться последовательно. Во-вторых, многие классические алгоритмы требуют анализа чувствительности, поэтому эффективный расчет для моделирования МКЭ является затруднительным. В-третьих, в отношении итеративных алгоритмов есть риск оказаться в «ловушке» локальных оптимумов. Преимущества итеративных алгоритмов заключаются в том, что они хорошо известны и широко распространены. Кроме того,



сходимость к локальному оптимуму обычно требует относительно немного итераций и, следовательно, классические алгоритмы эффективны.

Эволюционный или генетический алгоритмы – это вторая группа алгоритмов оптимизации, для которых существует прямая связь между алгоритмом и программным обеспечением МКЭ. Генетические и эволюционные алгоритмы выглядят весьма перспективными, потому что они имеют тенденцию к нахождению глобального оптимума и возможность параллельных вычислений. Кроме того, они с легкостью обеспечивают выполнение анализа чувствительности. Однако довольно большое количество вычислений функций, которое, как ожидается, будет необходимо с использованием этих алгоритмов, рассматривается как серьезный недостаток [17].

Третий способ оптимизации в сочетании с времязатратными расчетами функций - это использование аппроксимированных (приближенных) алгоритмов оптимизации, из которых хорошо известным представителем является методология поверхности отклика (RSM) (рисунок 17).

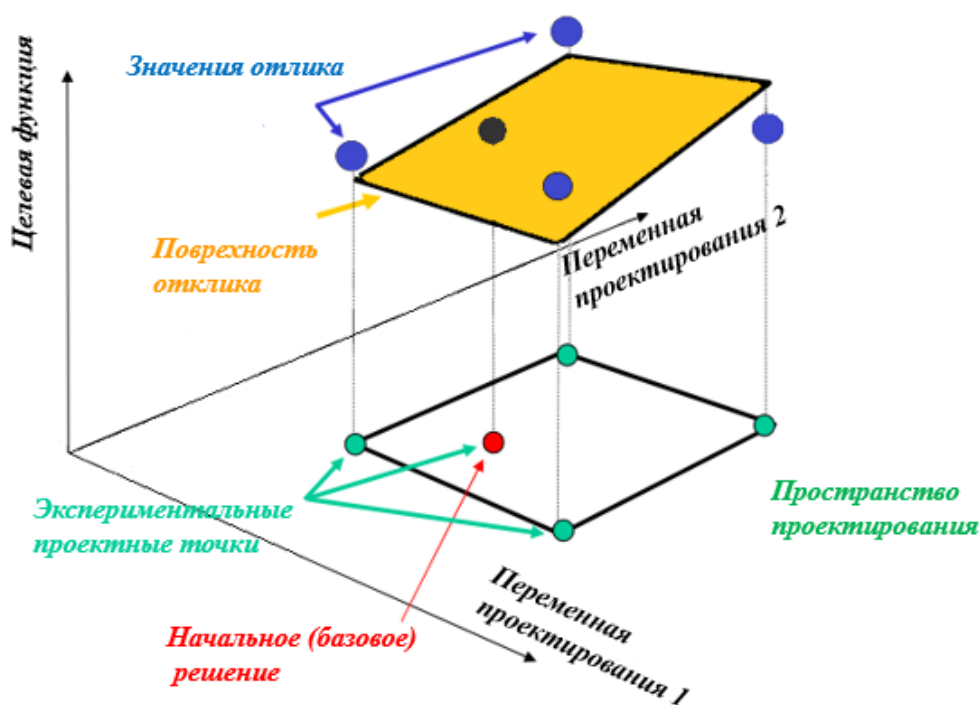


Рисунок 17 – Метод поверхности отклика [27]

Метод основан на проведение полинома низших порядков метамодели через точки отклика, которые получаются путем запуска вычислений МКЭ для тщательно выбранных переменных проектирования и, наконец, оптимизации этой метамодели. Следовательно, для аппроксимированной поверхности отклика удаляется прямая связь между алгоритмом оптимизации и вычислениями МКЭ, метамодель помещается между ними (рисунок 18). Метамодели иногда также упоминаются как модели поверхности отклика от или суррогатные модели. Наряду с методологией поверхности отклика, применяются другие методы, например: кригинг (или проектирование и анализ компьютерных экспериментов) и нейронные сети. Возможность параллельных вычислений и отсутствие необходимости анализа чувствительности делают аппроксимационную оптимизацию привлекательной для процессов ОМД.



Рисунок 18 - Аппроксимационная оптимизация [17]

Недостатки метода:

- получение лишь приближенного оптимума, а не реального глобального оптимума;
- в зависимость от размерности проектного множества (эти алгоритмы, как правило, становятся очень трудоемкими, если присутствует множество переменных проектирования).

Четвертая группа представлена так называемыми адаптивными алгоритмами. Адаптивные алгоритмы не связаны с МКЭ в отличии от трех

других групп алгоритмов. Адаптивные алгоритмы включены в код МКЭ и обычно оптимизируют зависящую от времени направленную нагрузку процессов ОМД во время каждого шага расчета МКЭ. Преимущество методов заключается в том, что оптимальный результат достигается только при одном моделировании МКЭ. Тем не менее, необходим доступ к исходному коду программного обеспечения МКЭ и могут учитываться только зависящие от времени переменные проектирования. Эти недостатки серьезно ограничивают общую применимость этих видов алгоритмов [12].

В настоящее время, конкретные задачи конкретных процессов ОМД моделируются зачастую произвольно и впоследствии решаются с использованием алгоритма, подходящего для конкретного случая. Общеприменимой стратегии оптимизации для моделирования и решения задач оптимизации в задачах ОМД на сегодняшний день не существует. Как следствие, существует необходимость в стратегии оптимизации, которая может применяться для моделирования и решения всех видов задач оптимизации для всех видов процессов ОМД с использованием любого кода моделирования.

#### 2.4 Критерии оптимальности и целевые функции

Неотъемлемой частью алгоритма оптимизации является критерий оптимальности – количественная мера оптимизируемого качества объекта.

Зависимость критерия оптимальности от переменных проектирования выражается целевой функцией. Таким образом, задача оптимизации сводится к нахождению целевой функции.

Как правило, критерий оптимальности, в зависимости от конкретной задачи оптимизации, описывает различные свойства системы. Нельзя одним критерием описать все количественные характеристики, присущие оптимизируемой системе. При использовании нескольких критериев оптимальности, постановка задачи оптимизации становится ошибочной и неразрешимой, так как зачастую приходится отыскивать оптимум величин,

противоречащих друг другу по своей сути. Практически невозможно обеспечить одновременно минимальную себестоимость и максимальное качество при одновременно максимальной производительности. Например, при уменьшении толщины детали себестоимость уменьшается, но это приводит к появлению разрывов на детали и соответственно браку. Правильной постановкой задачи оптимизации в данном случае может быть:

а) получить максимальную производительность при заданных себестоимости и качестве;

б) получить минимальную себестоимость при заданных производительности и качестве;

в) получить максимальное качество при заданной себестоимости и производительности.

В первом случае критерий оптимизации – производительность, во втором – себестоимость, в третьем – качество.

Главный критерий является целевой функцией оптимизации, а остальные принимаются вторичными. Вторичные критерии формируют ограничения задачи. Другим наиболее применяемым способом достижения цели оптимизации является использование весовых коэффициентов целевых функций, отражающих важность того или иного критерия. С их помощью определяется комплексный критерий, соответствующий нескольким целям оптимизации.

Выбор критерия оптимизации зависит от задачи оптимизации. Наиболее часто задача оптимизации носит экономический характер, критериями оптимизации в этом случае могут быть себестоимость изделия, капитальные затраты, раскрой детали, прибыль и т.д.

Если, к примеру целью оптимизации процессов ОМД является увеличение производительности, критериями оптимальности могут являться условия автоматизации процесса, скорость движения ползуна прессы, сокращения количества штамповочных переходов и т.д. (рисунок 19).



Рисунок 19 – Критерии оптимальности и целевые функции процессов ЛШ

Одной из важнейших задач промышленного производства, в частности в отрасли ОМД, является получение качественной продукции. Качество продукции является важным аспектом в процессах ОМД, особенно в связи с постоянно растущей конкуренцией в отрасли, совершенствованием процессов и снижением производственных затрат. Качество закладывается на ранних стадиях проектирования и разработки технологии процесса штамповки.

В данной работе именно качество продукции принимается в алгоритме оптимизации в качестве критерия оптимальности. Целевой функцией в данном случае может быть отсутствие дефектов (утонений, гофров, упругого пружинения). Таким образом, будет решаться многокритериальная задача оптимизации.

## 2.5 Переменные проектирования

Все входные данные технологического процесса можно условно разделить на контролируемые факторы, или переменные проектирования (усилие прижима заготовки, скорость вытяжки), которые можно варьировать, сигнал - параметры которые фиксированы внешними условия технологического процесса (температура, влажность, постоянные установки процесса или фиксированный

радиус инструмента). Помимо этого, на объект оптимизации оказывают влияние случайные, неконтролируемые воздействия (шумы), вносящие неопределенность в оптимизируемую систему (рисунок 20).



Рисунок 20 - Оптимизируемый объект

Как уже отмечалось выше, задача оптимизации состоит в определении величин переменных проектирования, которым соответствует оптимальное решение, в условиях максимальной стабильности и чувствительности процесса.

Необходимо отметить, что параметры и управляемые переменные могут быть взаимозаменяемы и по-разному влиять на технологический процесс. Так в одних случаях одни параметры можно считать постоянными, в других – переменными. Размеры штамповой оснастки, в случае незначительного износа можно считать постоянными параметрами, а в случае значительного износа оснастки, приводящего к изменению размеров штампуемой детали, эти величины являются переменными. И наоборот, усилие прижима заготовки величина как правило варьируемая, однако в случаях, связанных с характеристиками прессового оборудования она будет являться фиксированным параметром.

В качестве переменных шума могут выступать такие характеристики материала, как пределы прочности и текучести, коэффициенты анизотропии, толщина листа, а также параметры процесса: положение заготовки, усилие прижима, коэффициент трения.

Чаще всего, количество переменных проектирования стремятся сделать как можно меньше, чтобы четко знать влияние каждой величины на процесс оптимизации. Эти меры позволяют существенно сократить время процесса оптимизации, но при этом сужают границы рассматриваемого объекта оптимизации.

Переменными проектирования, в случае если оптимизируемым критерием является качество продукции, могут быть геометрические размеры детали и штамповой оснастки, материал, а также параметры технологического процесса (усилие прижима, смазка, зазоры) (рисунок 21).



Рисунок 21 – Переменные проектирования процессов ЛШ

Процедура решения задачи оптимизации обязательно включает, помимо выбора переменных проектирования, еще и установление ограничений на них. Ограничения могут накладываться как по технологическим, так и по экономическим соображениям.

## 2.6 Ограничения переменных проектирования

Управление технологическим процессом всегда выполняется в пределах, определяемых ограничивающими переменными. К таким переменным относятся материальные ресурсы, мощности производства, капитальные затраты, характеристики оборудования.

При составлении математической модели объекта оптимизации все ограничения записываются в виде равенств и неравенств, множеств и систем, представляющие собой границы изменения переменных проектирования. Совокупность всех ограничений и определяет область допустимых решений задачи оптимизации.

Известно, что прессовое оборудование имеет определённые характеристики, которые могут изменяться в строго определенном диапазоне. К этим характеристикам относятся давление прижима, скорость ползуна, размеры штамповой оснастки и т.п. Размеры штамповой оснастки зависят от стола прессы и от размеров заготовки, штампуемой на данном оборудовании.

Сортамент листового проката также является ограничением переменных проектирования в задаче оптимизации, так как сорт листового проката и его габаритные размеры (ширина и толщина листа) строго регламентированы.

Свойства металлопроката и ширина рулона от партии к партии изменяются незначительно, в пределах допусков, принятых в ходе технологии получения на металлургическом комбинате. Вследствие этого эти переменные не учитываются в задаче оптимизации.

Разнотолщинность листового металла от рулона к рулону, вследствие отклонений по зазорам между прокатными валками, существенно влияет на устойчивость технологического процесса штамповки и должна быть учтена при его разработке.

## 2.7 Детерминированные и стохастические задачи оптимизации

Методы численного (компьютерного) моделирования, такой как метод конечных элементов, в основном используются для решения широкого спектра инженерных задач, в том числе и в процессах обработки металлов давлением. Конечно-элементное моделирование позволяет точно спрогнозировать поведение процессов ОМД и конечных изделий, что может значительно уменьшить требуемое время на разработку и ее стоимость [23].



В случае, если оптимизируемый объект не испытывает влияния случайных переменных, т.е. при многократных вычислениях в одной и той же точке целевая функция и все ограничения никогда не изменяют своих значений, то говорят о необходимости решения детерминированной задачи оптимизации.

Для глубокой вытяжки (рисунок 22) переменной, которая влияет на качество изделия является усилие прижима заготовки. Опытным путем в заводских условиях на основе метода проб и ошибок находят усилие прижима, при котором получается качественная деталь (без складок и разрывов). Возможная целевая функция состоит в том, чтобы максимально увеличить высоту детали, находя при этом оптимальные значения усилия прижима заготовки, а также диаметра заготовки и размеры рабочих инструментов.

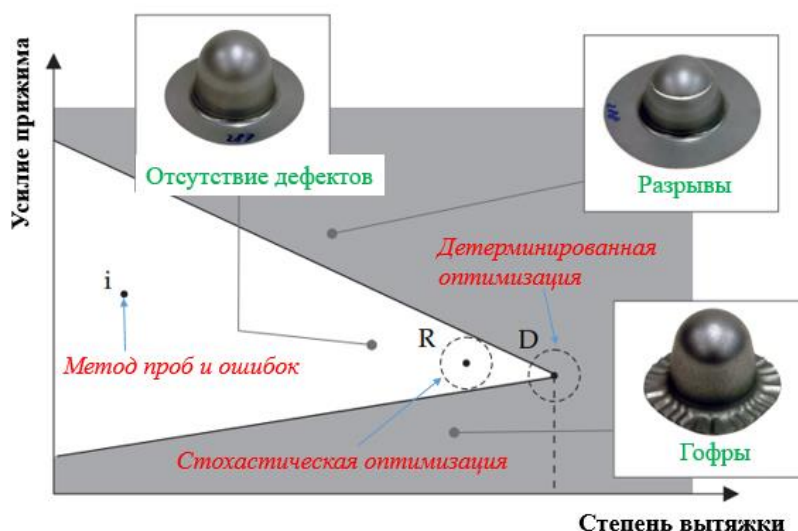


Рисунок 22 – Оптимальные решения в процессе глубокой вытяжки [2]

Оптимальное решение, полученное в результате детерминированной оптимизации процесса глубокой вытяжки, обозначается на рисунке 22 точкой «D». Оно определяется точкой пересечения границ получения детали без разрывов и складок. Она соответствует коэффициенту предельной степени вытяжки. В этой точке, изделия могут быть получены с оптимальным использованием материала. Очевидно, что совокупность МКЭ с методами оптимизации будет способствовать дальнейшему совершенствованию

рассматриваемого процесса путем более эффективного использования материальных и технологических возможностей.

Принципы детерминированной оптимизации не работают в реальном производстве. В реальных процессах обработки металлов давлением входные параметры проявляют изменчивость и случайный характер. Значения целевой функции и переменных проектирования в большинстве случаев может быть выражена средним значением или соответствующим законом распределения. Характеристики материала различаются от рулона к рулону, и даже в пределах одного рулона материал в центре будет отличаться от материала на концах. Стандарты для различных характеристик материала задают диапазон значений, а не одно число. Даже если задается одно число, то это не означает, что его можно с точностью выдержать. В процессе производства в некоторых пределах случайным образом варьируются толщина листа, коэффициент трения, усилие прижима, положение заготовки в штампе и многие другие параметры. Это естественно и неизбежно [3]. Методы оптимизации, учитывающие случайный характер (неопределенность) входных параметров процесса, называются стохастическими.

В численном методе оптимизации для реальных условий неопределенность должна быть использована для моделирования вероятностной природы переменных проектирования. На рисунке 22 решение, полученное методом стохастической оптимизации, обозначается областью ограниченной радиусом «R», для которой значение усилия прижима является оптимальным с учетом наличия неопределенности (разброса, «шума»). Такой процесс по сравнению с детерминированной оптимальной подготовкой производства характеризуется гораздо меньшим количеством бракованной продукции (схематичное изображение изменения отклика не нарушает границы ограничений). Для этой области становятся обоснованными и реальными требования к качеству изделия [2].

Процесс обработки металлов давлением может быть схематично представлен диаграммой процесса, где показан нормальный закон распределения полученных значений для сигнала и отклика (рисунок 23). Отклик  $f$  процесса находится под влиянием переменных проектирования  $x$  и переменных шума  $z$ . Изменение сигнала впоследствии разброса значений переводится в количество откликов, которое отображает характер распределения вместо детерминированного значения [18].



Рисунок 23 – Схема процесса [18]

Решение таких задач может быть найдено, если таким неопределенным переменным подобрать вероятностную модель. Моделью стохастической переменной может быть, как определение конечного набора сценариев с назначением некоторых вероятностей каждому, так и непрерывная функция распределения.

В современных методах детерминированной оптимизации принимают во внимание неопределенность проектных переменных в явном виде, что позволяет количественно оценить и оптимизировать процесс, подверженный неопределенности, однако их точность и применимость остаются ограниченными.

Для удовлетворения требований, предъявляемыми к производителям в области качества, контроль качества играет важную роль в большинстве

промышленных процессов. Метод, который использует статистические способы для мониторинга и контроля качества продукта называется статистическим управлением процессами (SPC). Как правило SPC-программы включают три основные задачи в следующей последовательности:

- 1) мониторинг процесса;
- 2) диагностирование отклонения процесса;
- 3) принятие мер по исправлению.

По мере движения к среде компьютерно-интегрированного производства, компьютерные программы должны обеспечивать реализацию различных задач SPC автоматически. Способность точно прогнозировать эффективность процесса обработки металлов давлением при отклонении различных входных параметров имеет в этом случае решающее значение. Неопределенность в методе оптимизации следует принимать во внимание в явном виде, для предотвращения дефектов продукции, таких как складки, разрывы в материале, дефекты формы, например из-за упругого пружинения и т.д.

Для учета неопределенностей в задачах оптимизации был введен коэффициенты запаса, компенсирующие изменчивость рабочих параметров, вызванных изменениями в системе, но он абсолютно не гарантирует надежность и удовлетворительную эффективность. Несколько пакетов МКЭ уже сочетают методы статистического управления технологическими процессами с моделированием методом конечных элементов для количественной оценки устойчивости, например, AutoForm-Sigma и LS-Opt.

## 2.8. Выводы

1. Установлено, что критерий оптимальности зависит от конкретной задачи и должен явно или наиболее полно отражать цель оптимизации.
2. Показано, что качество продукции является важнейшей целью оптимизации технологических процессов ОМД.

3. Выявлено, что все входные данные объекта оптимизации можно разделить на: фиксированные параметры, переменные проектирования и переменные шума.

4. Переменными проектирования, влияющими на получение качественной детали, являются геометрические размеры детали и штамповой оснастки, материал, параметры технологического процесса.

5. Совокупность всех ограничений, накладываемых на переменные проектирования, образуют границу области допустимых решений оптимизационной задачи.

6. В зависимости от влияния случайных переменных на рассматриваемую систему выделяют два вида задач оптимизации: детерминированная и стохастическая, для решения которых используются специальные алгоритмы оптимизации.

### 3 Оптимизация технологических процессов в LS-OPT

Программа LS-OPT, графический инструмент оптимизации, который взаимодействует с LS-DYNA и позволяет пользователю структурировать процесс проектирования, исследовать пространство проектирования и находить оптимальные проектные решения в соответствии с заданными ограничениями и целевыми функциями. Программа также подходит для решения проблем идентификации системы и стохастического анализа. Графический инструмент LS-OPT вместе с LS-DYNA предоставляет пользователю среду для решения задач оптимизации, контроля и управления [24].

#### 3.1 Оптимизация на основе RSM

Среди нескольких методологий, доступных для решения задачи оптимизации в среде проектирования, в последние годы получила известность метод поверхности отклика (RSM), статистический метод построения гладких аппроксимаций к функциям в многомерном пространстве. Метод поверхности отклика выбирает проектные параметры, которые распределены по всему пространству решений для построения аппроксимированной поверхности или получения «расчетных формул». Локальный эффект, вызванный «шумом», ослабляется, и метод RSM пытается найти представление отклика проектных параметров в ограниченном пространстве проектных решений или меньшей области исследования. Это извлечение комплексной информации позволяет конструктору исследовать пространство проектных решений, используя альтернативные представления конструкции. Конструктор может также принять решение ограничить отклик на ударопрочность при минимизации или максимизации любых других критериев, таких как масса, критерий комфорта в поездке и т. д. Эти критерии в зависимости от важности могут быть по-разному оценены и, следовательно, пространство проектных решений необходимо изучить более широко [1].

Одной из трудностей при разработке проектно-конструкторских программ является то, что конструкторы не всегда способны четко определить свою задачу проектирования. В некоторых случаях критерии проектирования могут регулироваться коэффициентами безопасности или другими факторами, и поэтому отклик должен быть ограничен определенным значением. Эти значения могут быть легко определены как математические уравнения ограничений. При проектировании транспортных средств, к примеру, ударопрочность может быть ограничена в следствие регулирования, в то время как другие параметры, такие как масса, стоимость и удобство поездки, можно рассматривать как целевые функции, которые необходимо включить в задачу многокритериальной оптимизации. Поскольку относительная важность различных критериев может быть субъективной, важна способность отчетливо представлять себе компромиссные свойства одного отклика в сравнении с другим.

Кривые, полученные при компромиссном выборе параметров – это визуальные инструменты, используемые для отображения компромиссных свойств, когда в одной проектируемой системе задействованы несколько важных параметров отклика. Они играют чрезвычайно важную роль в современном проектировании, где корректировка проекта должна выполняться точно и быстро. Параметры отклика строятся по принципу оптимальности Парето. В результате будут представлены только те проектируемые системы, в которых достигается улучшение одного выбранного отклика, что может привести к ухудшению любого другого. В этом смысле дальнейшее совершенствование оптимальной системы по Парето не может быть достигнуто: это наилучшее компромиссное решение. У конструктора все еще остается выбор проектных решений, но оставшийся фактор является субъективным выбором того, какая функция или критерий важнее другого. Несмотря на то что, выбор в конечном итоге должен быть сделан конструктором, эти кривые могут быть полезны, ограничивая количество возможных решений. Примером в

проектировании транспортных средств является компромисс между массой (или энергоэффективностью) и безопасностью [1].

Проектирование механических систем действительно является сложным процессом, включающим множество инструментов моделирования и анализа. Чтобы облегчить этот процесс и позволить конструктору сосредоточиться на творческих способностях и усовершенствовании, важно предоставить подходящие интерфейсные утилиты для интеграции этих инструментов проектирования. Проектируемые системы вынуждены становиться более сложными из-за законодательств по безопасности и энергоэффективности, а также торговой конкуренции. Поэтому вполне вероятно, что в будущем все большее число дисциплин необходимо будет интегрировать в конкретную проектируемую систему. Такой подход многодисциплинарного проектирования-многокритериальной оптимизации требует от конструктора не менее двух запусков программного расчета, часто использующего более одного типа решателя. Например, при проектировании транспортного средства может потребоваться рассмотрение ударопрочности, комфортности езды, уровня шума, а также долговечности. Поэтому вполне вероятно, что по мере того, как компьютеры становятся более мощными, интеграция инструментов проектирования будет становиться более распространенной и требовать междисциплинарного интерфейса проектирования [1].

Современные архитектуры компьютеров часто имеют несколько процессоров, и все указывает на то, что спрос на распределенные вычисления в будущем будет крепнуть. Это является причиной революции в вычислительной технике, поскольку отдельные расчеты, которые требовали в недавнем прошлом несколько дней, теперь можно сделать в течение нескольких часов. Оптимизация и RSM, в частности, хорошо зарекомендовали себя в распределенных вычислительных средах из-за низкого уровня передачи сообщений. Результаты оптимизации, основанные на поверхности оклика эффективно обрабатывается, поскольку каждая проектируемая система может анализироваться независимо в



течение той или иной итерации. Разумеется, последовательные методы поиска имеют меньшее преимущество в распределенных вычислительных средах, чем глобальные методы поиска, такие как RSM.

Характерной особенностью LS-ОПТ также является наличие схем выбора базовых точек Монте-Карло и методов оптимизации.

## 3.2 Методы работы с использованием поверхностей отклика

### 3.2.1 Подготовка к проектированию

Поскольку процесс оптимизации проектирования требует больших затрат, конструктору следует избегать обнаружения серьезных недостатков в модели или процессе на поздней стадии проектирования. Поэтому процедура должна быть тщательно спланирована, и конструктор должен заранее ознакомиться с моделью, процедурой и инструментами проектирования. Важными являются следующие моменты [14]:

1. Пользователь должен быть осведомлен и уверен в точности модели (например, конечноэлементной модели), используемой при проектировании. Без надежной модели проектирование практически не имеет смысла.

2. Для формулирования проектируемой системы выбираются соответствующие критерии. Отклики, представленные в критериях, должны быть составлены путем аналитических расчетов и доступны для понимания LS-ОПТ.

3. Запрашиваются необходимые выходные данные из программы анализа и устанавливаются соответствующие временные интервалы для изменяемых во времени выходных данных. Следует избегать ненужных выходных данных, так как высокая скорость вывода быстро истощает доступное пространство для хранения.

4. Необходимо выполнить хотя бы одну симуляцию с использованием LS-ОПТ (базовое проектирование). Чтобы сэкономить время, время окончания моделирования может быть существенно уменьшено. Эта функция проверит

команды извлечения отклика и различные другие параметры. Доступна автоматическая проверка отклика, но рекомендуется по-прежнему ручная проверка.

5. Как и в случае традиционного моделирования, рекомендуется удалять файлы перезапуска для длительных симуляций. LS-OPT автоматически перезапустит моделирование проектируемой системы, если будет доступен файл перезапуска. При использовании LS-DYNA в качестве решателя для этой цели требуется «runrsf» файл.

6. Определяются подходящие переменные проектирования. Вначале важно выбрать большое количество, а не несколько переменных проектирования. Если в проекте задействовано более одной дисциплины, требуется некоторое междисциплинарное обсуждение в отношении выбора переменных проектирования.

7. Определяются подходящие начальные значения для параметров проектирования. Начальные значения - это предварительная оценка оптимальной конструкции. Эти значения могут быть получены из существующей конструкции, если она существует. Начальная конструкция станет центральной точкой первой области исследования.

8. Выбирается пространство проектирования. Оно представлено абсолютными пределами переменных, которые вы выбрали. Отклики также могут быть ограничены, если доступна предыдущая информация о функциональных откликах. Даже простая аппроксимация отклика проектируемой системы может быть полезна для определения границ аппроксимированной функции при проведении анализа.

9. Выбирается подходящий начальный диапазон проектирования для параметров проектирования. Диапазон не должен быть ни слишком маленьким, ни слишком большим. Небольшая область проектирования консервативна, но может потребовать большого количества итераций для схождения в одной точке или может вообще не допустить сходимости проектируемой системы. Она может

быть слишком мала, чтобы фиксировать изменчивость отклика из-за доминирования шума. Она также может быть слишком большой, что приводит к большой ошибке моделирования. Это обычно менее серьезная проблема, так как область интереса постепенно уменьшается во время процесса оптимизации.

10. Если у пользователя возникли проблемы с выбором размера начального диапазона, его следует опустить. В этом случае выбирается все пространство проектирования.

11. Выбирается подходящий порядок для аппроксимирования проектируемой системы при использовании полиномиальных поверхностей отклика (по умолчанию). Хорошим начальным приближением является линейное, поскольку оно требует наименьшего количества аналитических расчетов для построения. Однако оно также является наименее точным. Поэтому выбор также зависит от имеющихся ресурсов. Тем не менее, линейные экспериментальные конструкции могут быть легко дополнены, включением членов высшего порядка.

### 3.2.2 Поэтапная оптимизация конструкции

После соответствующей подготовки может быть начат процесс оптимизации. На этом этапе пользователь должен решить использовать ли автоматическую итерационную процедуру или же сначала выполнить отбор параметров (через анализ дисперсии или глобальный анализ чувствительности) на основе одной или нескольких итераций. Отбор параметров важен для уменьшения числа переменных проектирования, и, следовательно, общего вычислительного времени.

Автоматическая итерационная процедура может быть проведена с любым выбором аппроксимирующей функции. Она автоматически регулирует размер субрегиона и автоматически прекращается всякий раз, когда выполняется критерий остановки. Функция, уменьшающая размер субрегиона, также может быть переопределена пользователем, чтобы точки последовательно добавлялись

в полное пространство проектирования. Это становится необходимым, если пользователь хочет исследовать пространство проектирования, как например при построении оптимального фронта Парето. Если требуется одна оптимальная точка, то, вероятно, лучше всего использовать метод последовательной линейной аппроксимации с уменьшением пространство проектирования, особенно если имеется большое количество переменных проектирования.

Поэтапная полуавтоматическая процедура может быть столь же полезна, поскольку позволяет конструктору работать более изобретательно. Компьютерное время с помощью итерационных методов может быть потрачено впустую, особенно если обращаться с ними нерасчетливо. В большинстве случаев пауза после первой итерации позволяет проверить правильность параметров, формулировку проекта и просмотреть результаты. Во многих случаях для достижения разумной оптимальной конструкции требуется всего две-три итерации. Улучшение конструкции обычно достигается за одну итерацию [1].

1. Определяется количество точек необходимых для построения линейной аппроксимации. Точность линейной аппроксимации оценивается с использованием любого из параметров ошибки. Глядя на результаты анализа дисперсии ANOVA и глобальной чувствительности GSA просматриваются основные эффекты. Это позволит выделить маловажные переменные, которые могут быть удалены из задачи оптимизации. ANOVA / GSA - это не что иное как один итерационный прогон, как правило использующий линейную поверхность отклика для исследования основных и / или эффектов взаимодействия. Результаты ANOVA и GSA можно просмотреть в постпроцессоре LS-OPT.

2. Если линейная аппроксимация недостаточно точна, добавляется необходимое количество точек, позволяющих построить квадратичную аппроксимацию. Оценивается точность квадратичной аппроксимации. Могут быть добавлены промежуточные этапы для оценки точности взаимодействия и / или эллиптических аппроксимаций. Радиальные базисные функции также могут

использоваться как более гибкие функции высшего порядка (они не требуют минимального количества точек).

3. Если приближение более высокого порядка недостаточно точное, проблема может быть в двух вещах:

- Имеет место значительный «шум» в проектном отклике;
- Существует ошибка моделирования, т. е. функция слишком нелинейна, а субрегион слишком велик, чтобы обеспечить точное квадратичное приближение.

В случае значительного «шума» могут быть применены различные подходы. Во-первых, пользователь должен попытаться определить источник «шума». Например, проверить была ли выполнена обработка при рассмотрении откликов, связанных с ускорением? Хватает ли имеющихся значащих разрядов для отклика при извлечении базы данных (при использовании LS-DYNA проблемы не возникает, поскольку данные извлекаются из двоичной базы данных)? Является ли адаптивность сетки правильной? Во-вторых, если «шум» не может быть отнесен к конкретному числовому источнику, моделируемый процесс, может быть хаотичным или случайным, что приводит к «шуму». В этом случае пользователь может реализовать методы оптимального проектирования на основе их надежности. В-третьих, другие менее «шумовые» переменные, но все же имеющие отношение к откликам проектируемой системы, могут рассматриваться как альтернативные целевые или функции ограничений при формулировании задачи оптимизации [1]. В случае ошибки моделирования субрегион может быть уменьшен.

В большинстве случаев источник несоответствия не может быть идентифицирован, поэтому в любом случае требуется дополнительная итерация для определения того, можно ли улучшить проектируемую систему.

Решение будет находиться либо внутри, либо на границе субрегиона. Если приближенное решение находится внутри области, решение может быть достаточно приемлемым, особенно если оно близко расположено к начальной точке. Рекомендуется анализировать оптимизируемую проектируемую систему

для проверки ее точности. Если точность любой из функций в текущей подзадаче неудовлетворительна, требуется другая итерация с уменьшенным размером субрегиона.

Если решение находится на границе субрегиона, искомое решение, вероятно, выходит за пределы области. Поэтому, если пользователь хочет более подробно исследовать пространство проектирования, необходимо построить новое приближение. Точность текущих поверхностей отклика может быть использована в качестве индикатора того следует ли уменьшать размер новой области [1].

Затем весь алгоритм может быть повторен для нового субрегиона и повторяется автоматически при выборе большего количества итераций в начальной стадии проектирования.

### 3.3 Рекомендованный алгоритм проверки

Выполнение полной оптимизации может быть очень дорогостоящим процессом. Прежде чем приступить к запуску полного расчета, необходимо проверить и удостовериться в правильности настройки процесса оптимизации LS-OPT. Безусловно, большую часть времени следует потратить на проверку того, что программные прогоны процесса оптимизации принесут положительные результаты. Часто проведение проверки корректности проектируемой системы, приводит к тому что некоторые прогоны решателя прерываются из-за ошибочных параметров, которые могут вызвать искажение сетки, контакт деталей или появление неопределяемой геометрии.

По этой причине рекомендуется использовать следующий общий алгоритм [1]:

1. Проверить корректность аналитической модели путем запуска несколько (возможно, двух или трех) симуляций в крайних углах выбранного пространства проектирования. Запускать эти симуляции до их полного окончания по времени (в случае анализа, зависящего от времени). Двумя

важными расчетами являются те, у которых все переменные проектирования заданы с минимальными и максимальными значениями. Начальное проектирование можно запустить, выбрав «Baseline Run» в меню «Run» панели управления.

2. Изменить входные параметры, чтобы определить экспериментальную схему для полного анализа.

3. Для анализа, зависящего от времени или нелинейного анализа, необходимо значительно сократить время окончания или нагрузку, чтобы проверить математическую логику, особенность задачи и метод решения.

4. Выполнить оптимизацию LS-OPT для точно определенной, полноценной задачи и контролировать процесс.

### 3.4 Проблемы оптимизации систем

#### 3.4.1 Глобальная оптимальность

Условия Каруша-Куна-Такера определяют точку локального оптимума. Однако в пространстве проектных решений может быть более одного оптимума. Эта ситуация типична для большинства конструкций, и даже самая простая задача проектирования (например, общеизвестная проблема калибровки 10-стержневой фермы с 10 параметрами проектирования) может иметь более одного оптимума. Задача, конечно же, состоит в том, чтобы найти глобальный оптимум. Было разработано множество методов, основанных на градиенте, а также дискретных методов оптимального проектирования для обеспечения глобальной оптимальности, но поскольку не существует математического критерия, предусмотренного для глобальной оптимальности, ничто другое кроме метода перебора, не может определить, оптимален ли проект или нет. Большинство методов глобальной оптимизации требуют большого количества вычислений функций (симуляций). В LS-OPT глобальная оптимальность рассматривается на уровне приближенной подзадачи с помощью мултистартовых методов, во всех экспериментальных расчетных точках. Если пользователь может позволить

себе выполнить прямую процедуру оптимизации, можно использовать генетический алгоритм [30].

### 3.4.2 Шумы

Несмотря на то, что шум может вызывать те же проблемы, что и глобальная оптимальность, термин относится скорее часто повторяющемуся, случайному отклику ступенчатого характера, чем к волнообразному. Это может быть в значительной степени обусловлено численным округлением и (или) хаотическим поведением. Даже при том, что применение аналитической или полуаналитической чувствительности конструкций для проблем «шума» в настоящее время активно исследуется, подходящие градиентные методы оптимизации, которые могут быть применены к задачам ударного воздействия и обработки металлов давлением, с большой долей вероятности не появятся. Это главным образом связано с требованиями непрерывности алгоритмов оптимизации и увеличением расходов на анализ чувствительности. Хотя требуется меньшее количество вычислений функций, аналитический анализ чувствительности дорогостоящее внедрение и, возможно, еще более дорогостоящее при параллельном выполнении [30].

### 3.4.3 Неробастные проектные решения

Поскольку метод анализа на поверхности отклика является методом глобальной аппроксимации, экспериментальное проектирование может содержать решения в отдаленных угловых точках области исследования, склонные к ошибкам в ходе моделирования (если не считать того, что конструктор может и не быть сколько-нибудь заинтересованным в этих решениях). Примером является идентификация параметров монотонной кривой нагрузки, которая при некоторых множествах параметров, предложенных экспериментальным проектированием, может быть немонотонной. Это может привести к неожиданному поведению и возможным ошибкам в процессе



моделирования. Это почти всегда указывает на то, что сформулированная задача проектирования не является робастной. В большинстве случаев неудовлетворительно сформулированная задача проектирования может быть решена путем обеспечения подходящих ограничений для этой проблемы и использования их для граничных значений будущих проектов в «разумном» пространстве проектирования [30].

#### 3.4.4 Ложные проектные решения

Множество невозможных проектных решений представляют собой «дырки» в пространстве проектирования. Простым примером является конструкция двухстержневой фермы, в которой каждому элементу фермы присваивается параметр длины. Невозможное проектное решение возникает тогда, когда параметры проектирования таковы, что сумма длин становится меньше, чем измеренное базовое значение, и ферма становится не собираемой. Это также может произойти, если пространство проектирования нарушено, что приводит к необоснованным переменным, таким как неположительные размеры элементов или углов вне диапазона функционирования. В сложных структурах может быть сложно сформулировать явные границы невозможных областей проектных решений или «дырок» [30].

#### 3.4.5 Неоднозначные проектные решения

В некоторых случаях множественные решения будут давать одинаковые или сходные значения для целевой функции. Это явление часто возникает при неопределённых проблемах идентификации параметров. Основная проблема заключается в том, что система сингулярных уравнений имеет более одного решения. Признаки неоднозначности:

- Найдены различные решения с одинаковыми значениями целевой функции;

- Доверительный интервал для задачи нелинейной регрессии очень велик, сигнализируя о сингулярной системе.

Для нелинейных регрессионных задач пользователь должен убедиться, что результаты теста целевого объекта адекватны. Не исключено, что набор данных может быть велик, но некоторые из параметров нечувствительны к функциям, соответствующим этим данным. Примером является определение модуля Юнга (E) материала, который имеет контрольные точки только в пластическом диапазоне деформации. В этом случае, функции отклика нечувствительны к E и будут показывать очень высокий доверительный интервал для E. Разница между неробастным (неустойчивым) проектным решением и невозможным (ложным) заключается в том, что неробастное проектное решение может вызвать неожиданное поведение, в результате чего процесс моделирования прерывается, а невозможное проектное решение вообще не может быть синтезировано [1]. Невозможные проектные решения распространены при проектировании механизмов и машин.

### 3.5 Этапы работы в программе LS-OPT

#### 3.5.1 Графический интерфейс пользователя

В Windows пользовательский интерфейс программы запускается с использованием исполняемого `lsoptui.exe`. После запуска программы, в стартовом диалоговом окне пользователь может открыть существующий проект или же создать новый (рисунок 24). При создании нового проекта необходимо выбрать рабочий каталог для хранения основного и других командных файлов, файлов с входными данными, а также файла с результатами выполнения программы LS-OPT. Затем задаются имя основного файла, имеющего расширение «`lsopt`». По желанию, в соответствующих полях, может быть дано краткое описание задачи оптимизации и указан автор работы. Обязательными для заполнения являются поля с начальным именем выборки и этапа. После

заполнения всех необходимых полей нажимается кнопка создать и открывается главное окно графического интерфейса пользователя (рисунок 25).



Рисунок 24 - Стартовое диалоговое окно LS-OPT [1]

Основной графический интерфейс отображает последовательность процесса выполнения выбранной задачи оптимизации. Графический интерфейс LS-OPT позволяет пользователю строить процесс моделирования, посредством блок-схем, определяющих взаимозависимости этапов. Затем процесс может быть подвергнут любой из доступных задач анализа, таких как моделирование, оптимизация, анализ методом Монте-Карло и т. д. Строка состояния и светодиоды предоставляет пользователю информацию о ходе выполнения каждого шага оптимизации и этапов моделирования [1].

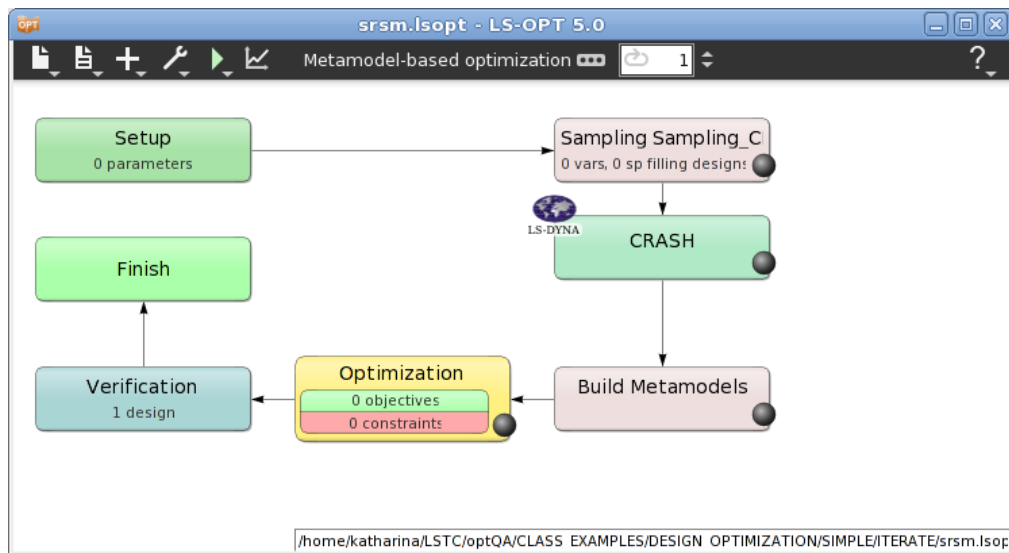


Рисунок 25 - Главное окно графического интерфейса пользователя LS-OPT [1]

Блок-схема в основном графическом интерфейсе LS-OPT визуализирует процесс оптимизации выбранной задачи, начиная с общих параметров, посредством выборки, цепочку процессов моделирования, определяемой этапами и зависимостями, построения метамоделей, оптимизацию метамоделей, проверку и сокращения интервала в одном или нескольких циклах и, наконец, выполнение проверки для последовательной оптимизации на основе метамоделей. При выборе блока открывается соответствующее диалоговое окно. Блок этапа можно свободно перемещать, используя левую кнопку мыши [1].

### 3.5.2 Инициализация задачи оптимизации

Диалоговое окно задач оптимизации открывается при выборе соответствующего значка на панели управления. Оно позволяет выбрать задачу, а для задачи оптимизации - стратегию оптимизации. Двумя основными типами являются задачи на основе метамоделей и прямого моделирования (генетический алгоритм) (рисунок 26). Описание доступных задач и стратегий представлено в таблице 1.

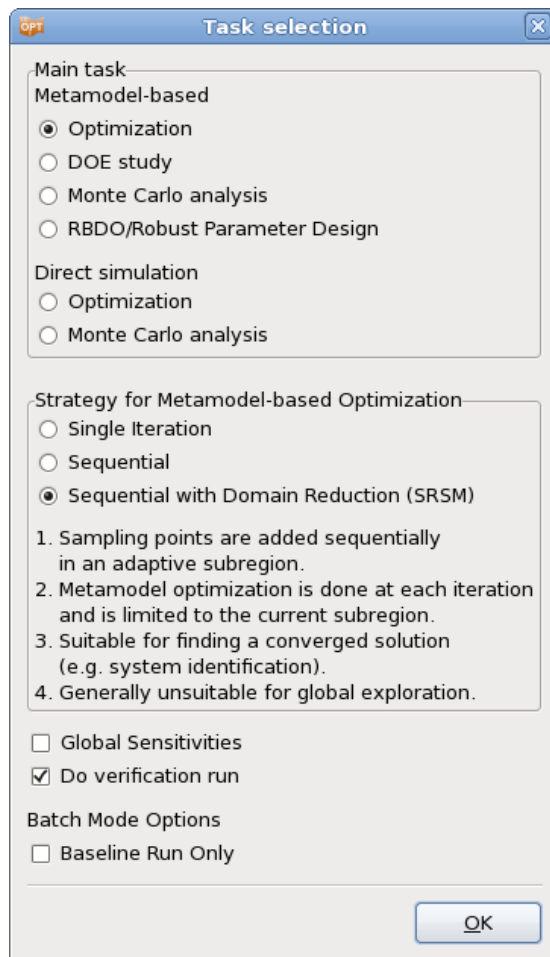


Рисунок 26 - Диалоговое окно выбора задач и стратегии оптимизации [1]

Таблица 1 – Типы задач и стратегий оптимизации

Параметр		Описание
Metamodel based	(1) Optimization	Оптимизация с использованием метамоделей
	(2) DOE-study	Исследование пространства проектных решений с использованием метамоделей, позволяющее построить поверхность отклика. Иногда упоминается как схема выбора точек

Продолжение таблицы 1

Параметр		Описание
	(3) Monte Carlo analysis	Анализ Монте-Карло с использованием метамоделей
	(4) RBDO	Оптимизация проектирования на основе устойчивости с использованием метамоделей
Direct simulation	(5) Optimization	Прямая оптимизация с использованием генетического алгоритма
	(6) Monte Carlo analysis	Прямой анализ Монте-Карло
Strategy for Metamodel based optimization (доступен для основной задачи 1 и 4)	Single Iteration	Выборка и оптимизация выполняются за одну итерацию. Подходит для глобального исследования проектирования.
	Sequential	Выборочные точки добавляются последовательно в полном пространстве проектных решений. Подходит для глобального исследования проектирования.
	Sequential with Domain Reduction	Выборочные точки последовательно добавляются в адаптивную подобласть. Метамоделли затем строятся с использованием текущих итерационных выборок (в подобласти) или с использованием всех выборочных совокупностей. Оптимальное решение находится на

Продолжение таблицы 1

Параметр		Описание
		основе метамоделей. Подходит для нахождение конвергентного решения. В целом не подходит для глобальных исследований.
Доступен для основной задачи 1,2,3,4	Global Sensitivities	Опция для расчёта глобальной чувствительности по метамодели.
Доступен для основной задачи 1 и 4	Do verification run	Запускается дополнительное моделирование, используя значения параметров прогнозируемого оптимума. Можно выполнить несколько симуляций для задач многокритериальной оптимизации.
	Import metamodel	Автоматический импорт метамодели при запуске, вместо импорта вручную
Доступен для многокритериальной общей стратегии	Create Pareto Optimal Front	Опция для многокритериальных задач оптимизации, создание оптимальных решений Парето вместо одиночного оптимума.
	Baseline Run Only	Опция пакетного режима для запуска только Baseline Run

Оптимизация на основе метамодели используется для создания и оптимизации приближенной (аппроксимационной) модели проекта вместо оптимизации проекта путем прямого моделирования. Таким образом, метамоделю создается как простая и недорогая замена фактического проекта.

После создания метамоделей ее можно использовать для поиска оптимального или, в случае нескольких целевых функций, оптимального фронта Парето.

Основные этапы выглядят следующим образом:

1. Выбор точки;
2. Запуск симуляций;
3. Построение метамоделей;
4. Выполнение оптимизации метамоделей.

Планирование эксперимента (DOE) также является методом на основе метамоделей, используемым для изучения пространства проектных решений или для расчета чувствительности. Исследование состоит из трех этапов:

1. Выбор точки;
2. Запуск симуляций;
3. Построение метамоделей.

Прямая оптимизация использует только результаты моделирования, чтобы найти оптимальные значения с использованием генетического алгоритма. Выбор прямой оптимизации (прямой генетический алгоритм) может потребовать большого количества симуляций [1].

Категория вероятностных задач посвящена изучению влияния неопределенностей переменных проектирования на отклики. Цель состоит в том, чтобы получить статистику изменений отклика, вызванных неопределенностями в данном проекте, а также вероятность отказов для этого проекта. Любая вероятностная задача требует определения случайных величин, связанных с обобщенными функциями. Схема отбора точек для вероятностного анализа зависит от того, является ли он прямым или метамоделным. В настоящее время доступны две задачи вероятностного анализа в LS-OPT - прямой анализ методом Монте-Карло и анализ методом Монте-Карло на основе метамоделей.

Оптимизация проектирования на основе устойчивости (RBDO) позволяет выполнить оптимизацию под влиянием неопределенностей. Учет неопределенностей, позволяет избежать непредвиденного отказа конструкции



или возникновение дефектов из-за изменений условий загрузки, производственного процесса и т. д. В оптимизации проектирования на основе устойчивости определяется прогнозируемая вероятность сбоя (как правило, малая) для ограничений, гарантирующих, что оптимальная конструкция не может иметь более высокую вероятность сбоя. В робастном проектировании выполняется поиск оптимальной конструкции таким образом, что она нечувствительна к неопределенностям при определенных переменных проектирования. Разница с детерминированной оптимизацией заключается в определении переменных, которые связаны с вероятностными распределениями, а также в определении целевой функции и ограничений [1].

Стратегия оптимизации зависит главным образом от того, хочет ли пользователь построить метамоделю, которые могут быть использованы для глобального исследования, или же он заинтересован только в поиске оптимального набора параметров. Важным критерием для выбора стратегии также является, хочет ли пользователь построить метамоделю и решить проблему итерационно или у него есть "бюджет моделирования", то есть определенное количество симуляций, и он просто хочет использовать бюджет так же эффективно, как возможность построить метамоделю для улучшения проектируемой системы и получения как можно больше информации о ней [1]. Существует три доступные стратегии для автоматизации процедуры оптимизации на основе метамоделю. Эти стратегии применимы только к задачам оптимизации на основе метамоделю и проектирования на основе устойчивости. В графическом интерфейсе стратегии выбираются в диалоговом окне задач. Доступные стратегии оптимизации (рисунок 27):

1. Одношаговая
2. Последовательная
3. Последовательная с уменьшением пространства проектирования (SRSM).

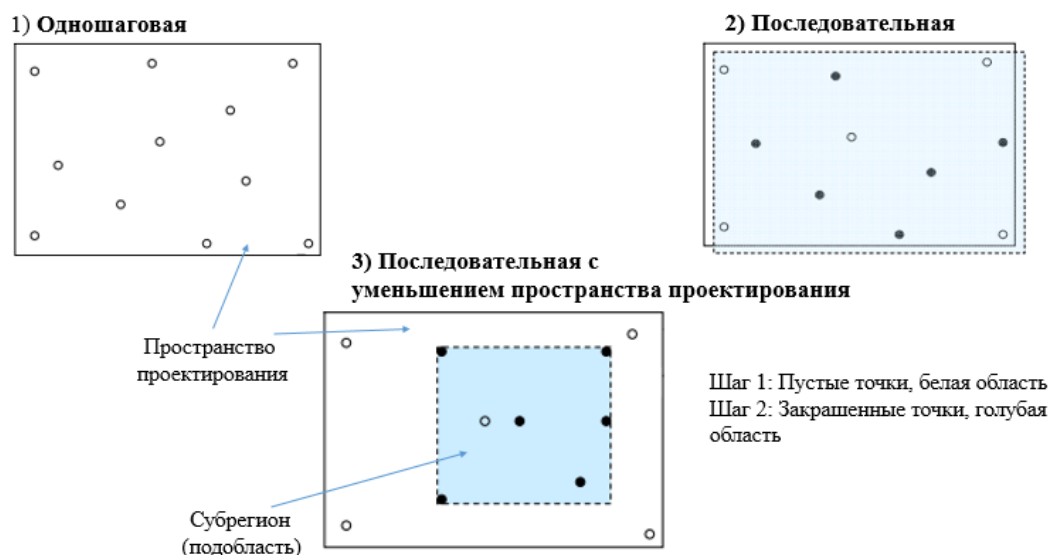


Рисунок 27 - Стратегии оптимизации на основе метамоделей [1]

В случае одношаговой стратегии экспериментальное проектирование для выбора точек выполняется только один раз. Схема выборки точек по умолчанию для этой стратегии оптимизации – сеть радиально-базисных функций с заполнение пространства проектирования.

При последовательной стратегии выборка выполняется последовательно. Для каждой итерации обычно выбирается небольшое количество точек, а в диалоговом окне «Termination Criteria» можно запросить несколько итераций. Преимущество подхода состоит в том, что итерационный процесс можно остановить, как только метамоделей или оптимальные точки достигнут достаточной точности. Ниже приведены параметры по умолчанию для выборки:

1. Сети радиальных базисных функций
2. Заполнение выборочного пространства
3. Первая итерация является D-оптимальной

Последовательная стратегия с уменьшением пространства проектирования – это такой же подход и приведенный выше, но для ускорения конвергенции используется адаптивная стратегия сокращения интервала для уменьшения размера субрегиона. Во время конкретной итерации новые точки расположены в пределах субрегиона пространства проектных решений. Эта стратегия обычно

используется только для оптимизации, в которой пользователю интересна только конечная оптимальная точка, а не какое-либо глобальное исследование проектируемой системы. Например, этот метод часто используется при идентификации параметров. Этот метод в настоящее время не может быть использован для построения оптимального фронта Парето [1].

По умолчанию метод сокращения интервала – это последовательный метод поверхности отклика (SRSM), который является исходной стратегией автоматизации проектирования LS-OPT. По умолчанию используется линейная поверхность отклика, а точки, принадлежащие предыдущим итерациям, игнорируются.

Настройки по умолчанию для выборки линейный полином приведены ниже:

1. D-оптимальная выборка
2. Число точек выборки по умолчанию в зависимости от количества переменных проектирования.

Параметр создания оптимального Парето-фронта доступен только в том случае, если определены несколько целевых функций. Вместо одного оптимального расчета рассчитываются несколько оптимальных решений Парето. Если используется метод на основе метамоделей, доступные варианты стратегий ограничены глобальными стратегиями: одношаговая и последовательная. Выбор опции «Create Pareto Optimal Front» сбрасывает алгоритм оптимизации, используемый в метамоделей на генетический алгоритм, потому что это единственный алгоритм, который позволяет вычислять оптимальные решения Парето.

### 3.5.3. Определение этапов

Для решения задачи оптимизации необходимо настроить схему процесса в графическом окне. Основными составляющими элементами схемы оптимизации являются блоки с этапами. В простейшем случае требуется один этап для

взаимодействия с решателем, например, LS-DYNA. В более сложных случаях могут быть добавлены дополнительные этапы, например, для пре- или постпроцессора. Этапы могут добавляться в схему оптимизации с помощью соответствующей команды в панели инструментов. После выбора уже доступной блок-стадии, в окне этапа указывается имя пакета решателя, команда решателя и параметризованный входной файл (рисунок 28).

Поскольку исполняемая программа считается ключевой частью определения этапа, ее часто просто называют решателем. Поэтому, в дополнение к своему нормальному значению в качестве программы, например, для решения физической задачи, она также может ссылаться на пре-или постпроцессор, или любую другую исполняемую программу, или скриптом, который необходим для выполнения или управления шагом внутри процесса моделирования.

На вкладке «Parameters» можно проверить входные параметры, найденные во входном файле решателя (рисунок 29). Затем на вкладке «Responses» необходимо определить результаты, которые должны быть извлечены из базы выходных данных решателя (для использования в качестве целевых функций или ограничений на этапе оптимизации) (рисунок 30).

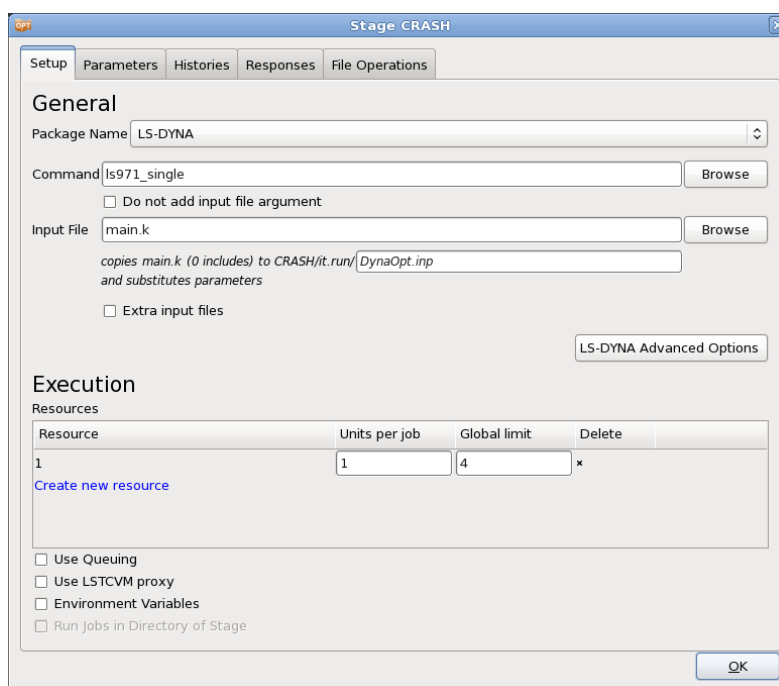


Рисунок 28 - Диалоговое окно этапа [1]

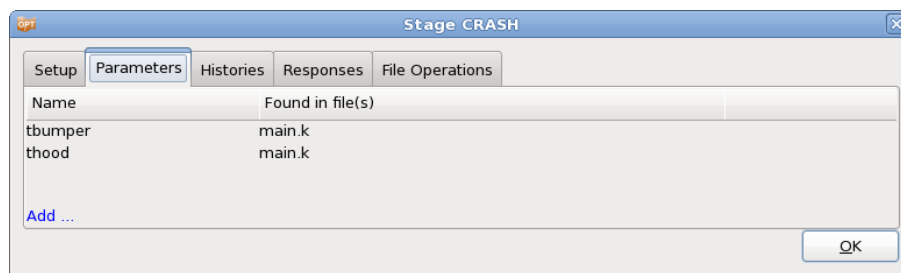


Рисунок 29 - Диалоговое окно этапа - вкладка «Parameters» [1]

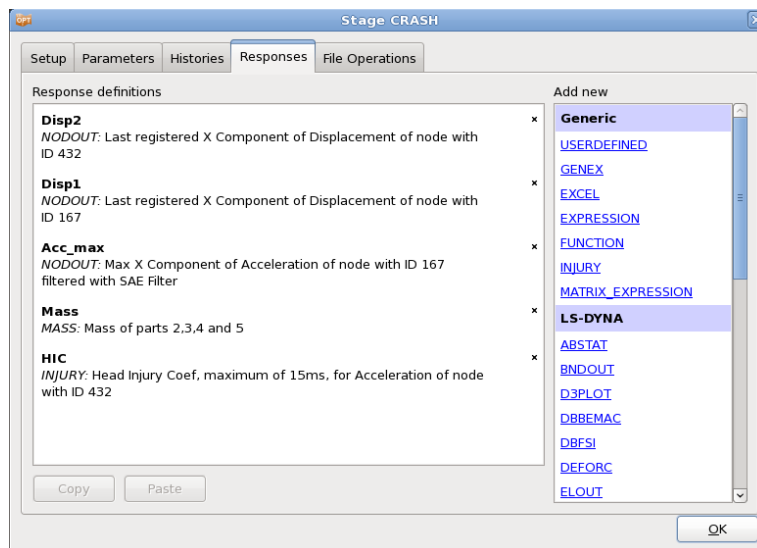


Рисунок 30 - Диалоговое окно этапа – вкладка «Responses» [1]

#### 3.5.4. Задание переменных проектирования

Переменные проектирования определяются во входных файлах с помощью ключевого слова **\*PARAMETER** и автоматически отображаются в списке параметров графического интерфейса пользователя после указания имени входного файла (рисунок 31). Имена этих переменных не редактируются и их нельзя удалить, на что указывает значок замка, отображаемым в столбце «Delete». Если в входном файле этапа указаны только имя и значение, по умолчанию для параметра устанавливается тип постоянный.

Затем необходимо выбрать требуемый тип переменных (таблица 2). В большинстве случаев используются непрерывные переменные. Для них вводятся запрошенные значения, например, начальное, минимальное и максимальное значения, определяющие пространство проектирования. Начальное

пространство проектирования определяется как [начальное значение - диапазон / 2, начальное значение + диапазон / 2].

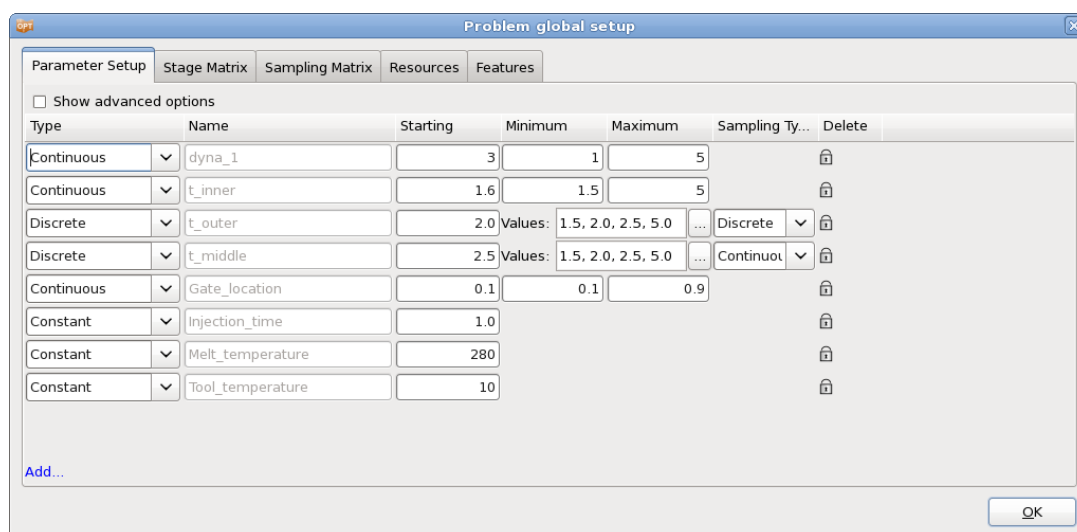


Рисунок 31 - Диалоговое окно настройки параметров [1]

Таблица 2 - Описание настроек входных параметров

Параметр	Описание	
Type	Continuous	Непрерывная переменная
	Constant	Постоянная величина
	Dependent	Параметр, зависящий от других параметров
	Discrete	Дискретная переменная
	String	Дискретная переменная с использованием строковых значений
	String Constant	Константа с использованием строковых значений
	Transfer Variable	Параметр, рассматриваемый как переменная на верхнем уровне и постоянная на более низком уровне (многоуровневая оптимизация)

Продолжение таблицы 2

Параметр	Описание	
	Transfer String Variable	Передаваемая переменная с использованием строковых значений
	Response Variable	Переменная, которая наследует значение отклика
	Noise	Случайная переменная, описываемая статистическим распределением
Name	Имя параметра. Если параметр импортируется из входного файла этапа, имя не редактируется	
Starting	Начальное значение переменной, используемой в базовой симуляции	
Minimum	Нижняя граница пространства проектных решений	
Maximum	Верхняя граница пространства проектных решений	
Values	Список допустимых значений для дискретной и строковой переменных	
Definition	Математическое выражение, определяющее зависимый параметр	
Distribution	Статистическое распределение, используемое для определения случайной переменной	
Sampling Type	Тип выборки для дискретной переменной: непрерывная или дискретная	
Edit Input Parameter References	Установите отношение передаваемой переменной с другой переменной	

### 3.5.5. Проведение выборки и построение метамоделей

Пользователю, в случае оптимизации на основе метамоделей, необходимо будет выбрать тип метамоделей и схему выбора точек. Данная процедура выполняется при выборе блока «Sampling» в главном графическом окне. Пользователь может выбрать один из типов метамоделей, показанных на рисунке 32. Выбор по умолчанию для типа метамоделей и схемы выбора точек зависит от выбора задачи и стратегии оптимизации.

Блок «Build Metamodels» связан с тем же диалоговым окном, что и блок «Sampling». Он отображается в конце процесса для корректного представления процесса оптимизации. Поэтому блок «Build Metamodels» может быть пропущен.

Для последовательной стратегии поверхности отклика (SRSM) по умолчанию выбирается метод полиномиальной поверхности отклика (RSM), где поверхности откликов соответствуют результату в измеренных точках с использованием полиномов. Для глобальных приближений, соответствующие одношаговой и последовательной стратегиям, в качестве метамоделей по умолчанию используется сеть радиально базовых функций. Для всех стратегий также доступна нейронная сеть с обратной связью, кригинг, регрессия опорных векторов и пользовательские модели аппроксимации. Данные по чувствительности (аналитические или численные) также могут использоваться для оптимизации. Этот метод наиболее подходит для решателей линейного анализа.



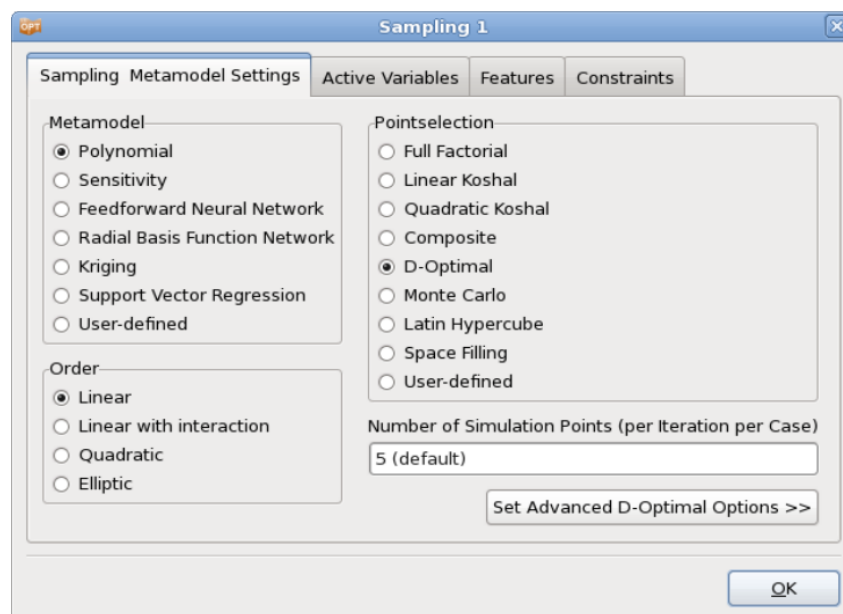


Рисунок 32 - Диалоговое окно задания метамоделли и схемы выбора точек [1]

### 3.5.6. Выбор целевой функции и неявных ограничений

В блоке «Optimization» из ранее определенных откликов пользователь выбирает целевую функцию (рисунок 33) и неявные ограничения.

Для неявных ограничений необходимо указать нижнюю и верхнюю границы, соответственно (рисунок 34). Настройки алгоритма принимаются по умолчанию.

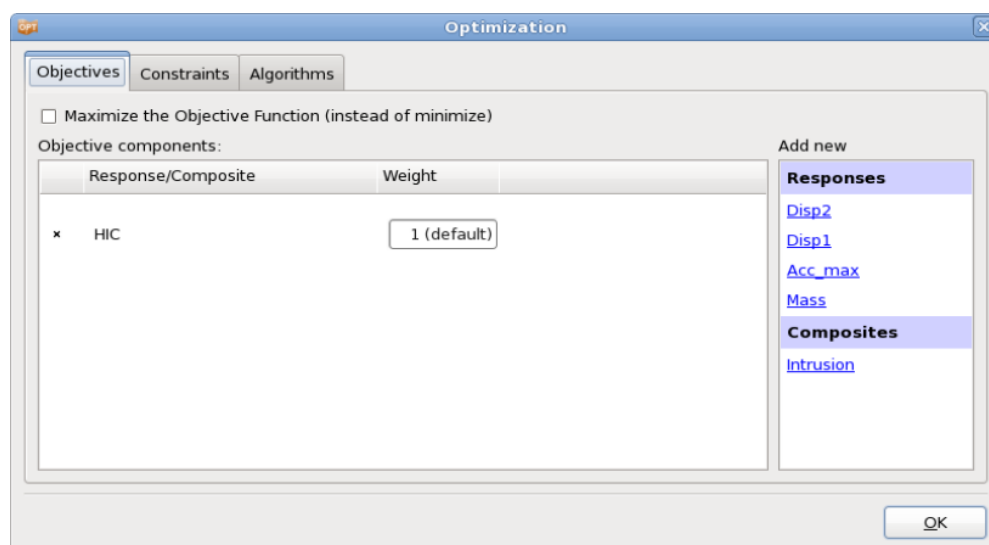


Рисунок 33 - Выбор целевой функции [1]

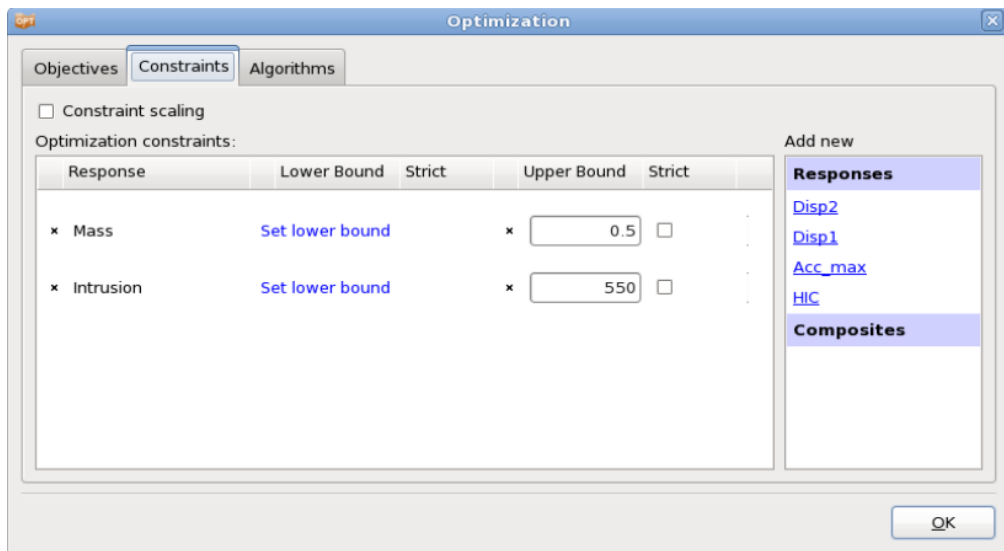


Рисунок 34 - Задание неявных ограничений [1]

### 3.5.7. Критерии завершения

В зависимости от задачи и стратегии оптимизации пользователь может указывать допуски на изменение переменных проектирования ( $\Delta x_i$ ), изменение целевой функции ( $\Delta f$ ) или точность метамоделей. Пользователь также может указать, будет ли завершаться расчет, если выполняется какое-либо из условий или все условия сразу. В этом же окне указывается максимальное количество итераций. Для других параметров используются значения по умолчанию (рисунок 35).

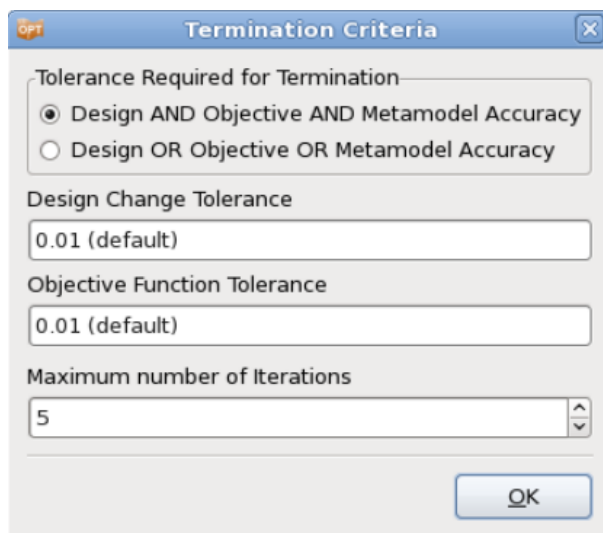


Рисунок 35 - Диалоговое окно критерия завершения [1]

### 3.5.8. Запуск оптимизации

После настройки задачи, процесс оптимизация запускается с помощью опции на панели управления в меню «Run». Сначала рекомендуется запускать «Baseline Run», чтобы проверить, правильно ли работает цепочка этапов процесса, и результаты извлекаются как ожидалось. Затем уже можно запускать полную задачу, используя опцию «Normal Run».

### 3.5.9. Просмотр результатов

Для использования средства просмотра, чтобы оценить результаты, на панели управления основного окна графического интерфейса пользователя выбирается соответствующий значок. Средство просмотра предоставляет функции отображения метамоделей, графического изображения результатов моделирования и оптимизации (рисунок 36). В зависимости от задачи оптимизации, выбранных параметров и доступности базы данных, конкретные графики и диаграммы включены или отключены.

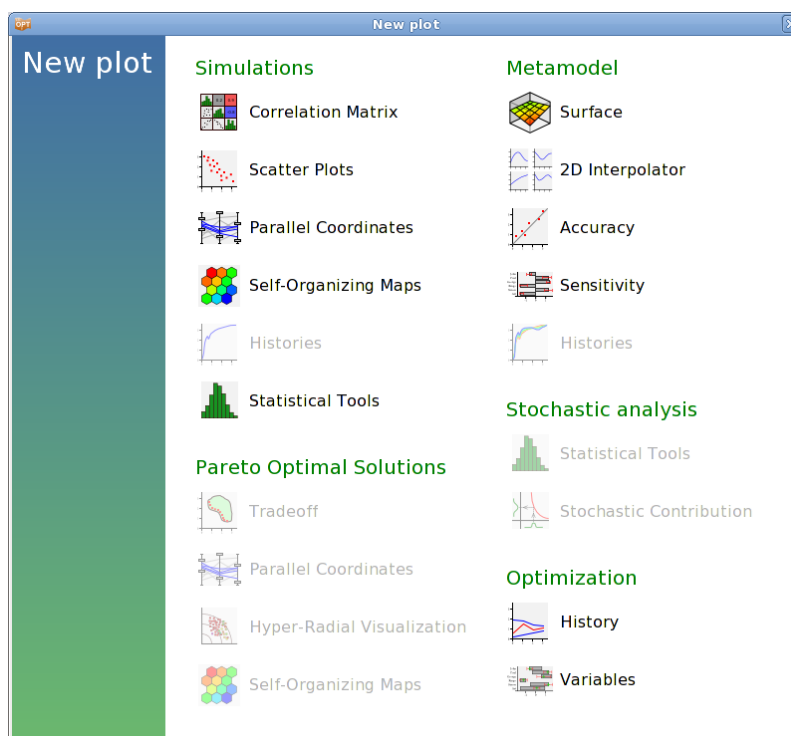


Рисунок 36 - Просмотр результатов оптимизации [1]

### 3.6. Выводы

1. САЕ-программа LS-OPT мощный графический инструмент оптимизации, использующий математический аппарат LS-DYNA и позволяющий пользователю структурировать процесс проектирования, исследовать пространство проектирования и находить оптимальные проектные решения в соответствии с заданными ограничениями и целевыми функциями.

2. В LS-OPT реализовано два основных подхода к решению задач оптимизации: на основе метамоделей и прямой (генетический) алгоритм.

3. Оптимизация на основе метамоделей основывается на методологии поверхности отклика (RSM).

4. Стратегия последовательного сокращения интервала метода поверхности отклика (SRSM) является исходной стратегией автоматизации проектирования в LS-OPT.

5. Последовательность процесса оптимизации визуально представляется в графическом окне LS-OPT в виде блок-схем.

## 4 Разработка метода оптимизации процесса ЛШ в LS-OPT

В работе будет рассмотрена оптимизация технологического процесса штамповки детали «Лонжерон пола передний» (рисунок 37). Деталь является типовой коробчатой деталью группы деталей силового каркаса кузова автомобиля «лонжероны».



Рисунок 37 - Лонжерон пола передний

### 4.1 Подготовка к моделированию

Технологический процесс штамповки детали «Лонжерон пола передний» состоит из следующих операций:

05. Вырубка заготовки

10. Вытяжка

20. Обрезка и пробивка 2-х отверстий

Лонжерон пола передний является силовым элементом кузова автомобиля и представляет собой несложную симметричную деталь коробчатой формы с фланцем. Острые углы в плане и у дна детали отсутствуют. Фланец детали не плоский и имеет скругление радиусом 200 мм, ширина фланца – 15 мм. Диаметр пробиваемых отверстий - 15 мм. Максимальная глубина вытяжки небольшая и составляет порядка 40 мм. Радиус закругления у фланца составляет 3 мм, у дна детали 5 мм, что является несколько не технологичным решением, однако

вполне допустимым. В целом можно сказать что деталь технологична. Среди потенциальных рисков при штамповке данной детали можно отметить большие величины упругой деформации у конечной детали, что может вызвать серьезные трудности при сварке кузова.

Материал данной детали - оцинкованная сталь IF группы HX220YD толщиной 1,5 мм. Химический состав (таблица 3) и механические свойства проката HX220YD (таблица 4) определяются стандартом EN10346 [13].

Таблица 3 – Химический состав, %

C, max	Si, max	Mn, max	S, max	P, max	Al, total	Nb, max	Ti, max
0,01	0,20	0,90	0,025	0,08	≤0,01	0,09	0,12

Таблица 4 – Механические свойства

Условные предел текучести, <i>МПа</i>	Предел прочности на разрыв, <i>МПа</i>	Относительное удлинение, %	Показатель деформационного упрочнения n	Коэффициент нормальной анизотропии r
220-280	340-420	32	0,17	1,5

В CAD-системе CATIA V5 согласно чертежу, была создана электронная модель детали (рисунок 38).

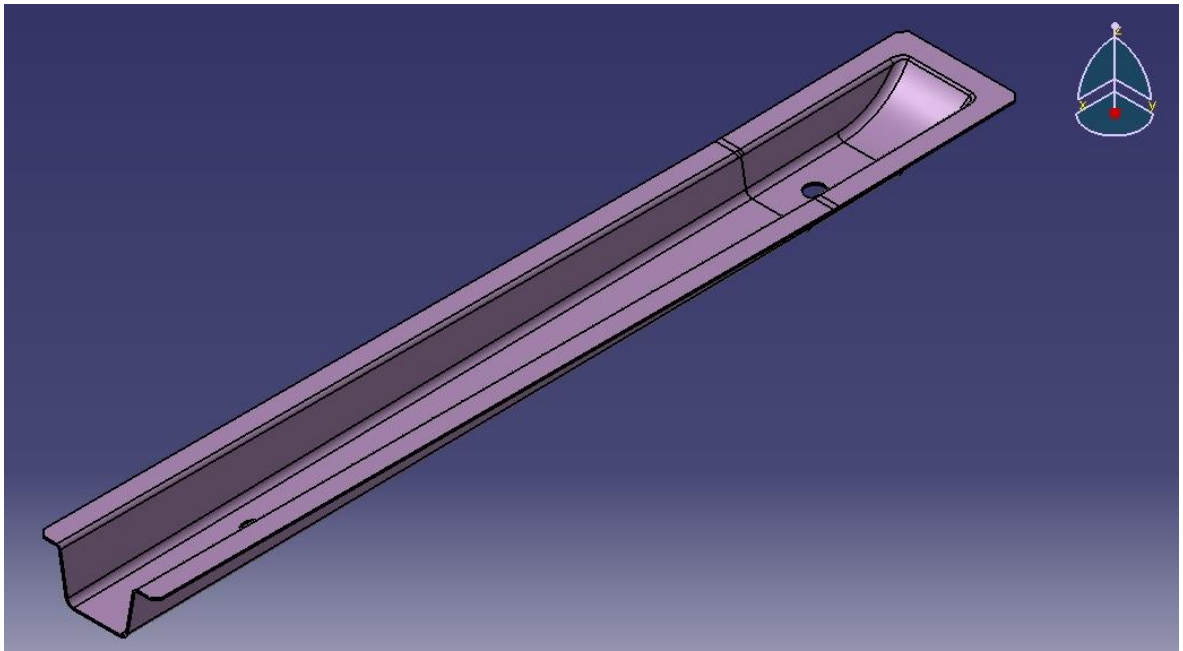


Рисунок 38 - Электронная модель детали «Лонжерон пола передний»

Для выполнения моделирования вытяжной операции в САЕ-системе на основе электронной модели детали в CATIA V5 была созданы электронные модели поверхностей вытяжного перехода (рисунок 39), рабочих инструментов (пуансон, матрица, прижим) (рисунок 40), а также контуры обрезки и пробивки (рисунок 41).

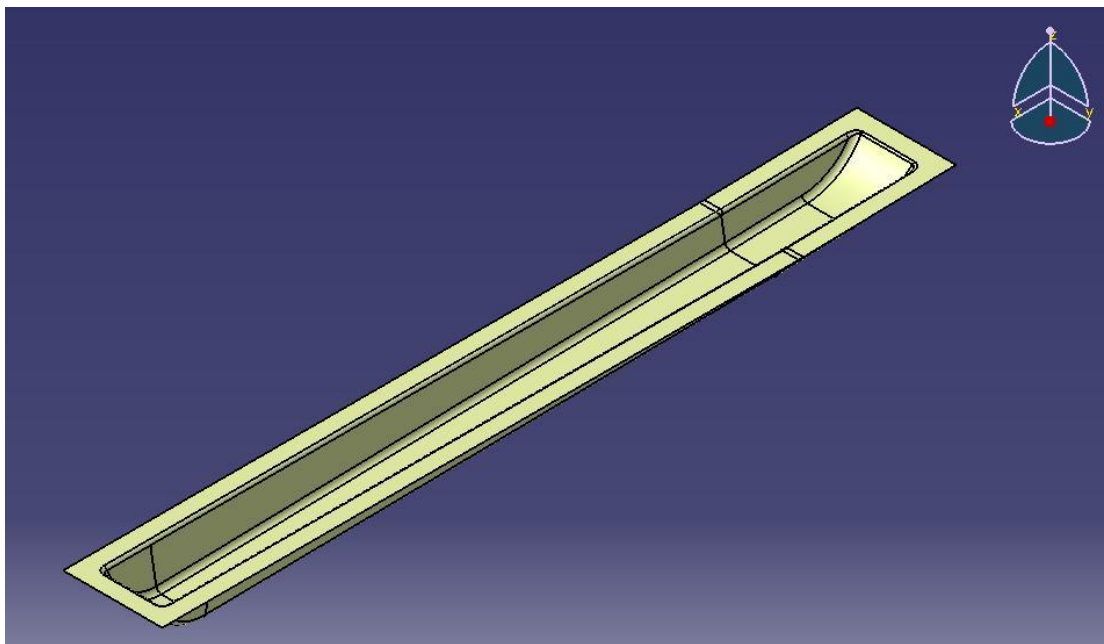


Рисунок 39 – Вытяжной переход

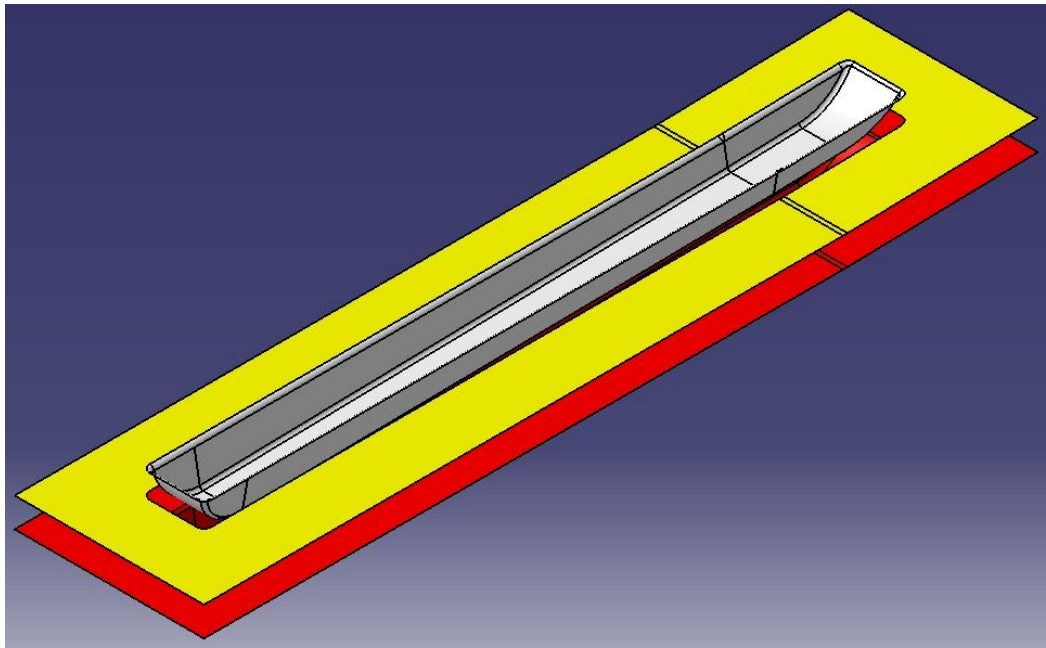


Рисунок 40 – Электронные модели рабочих инструментов (пунсон, матрица, прижим)

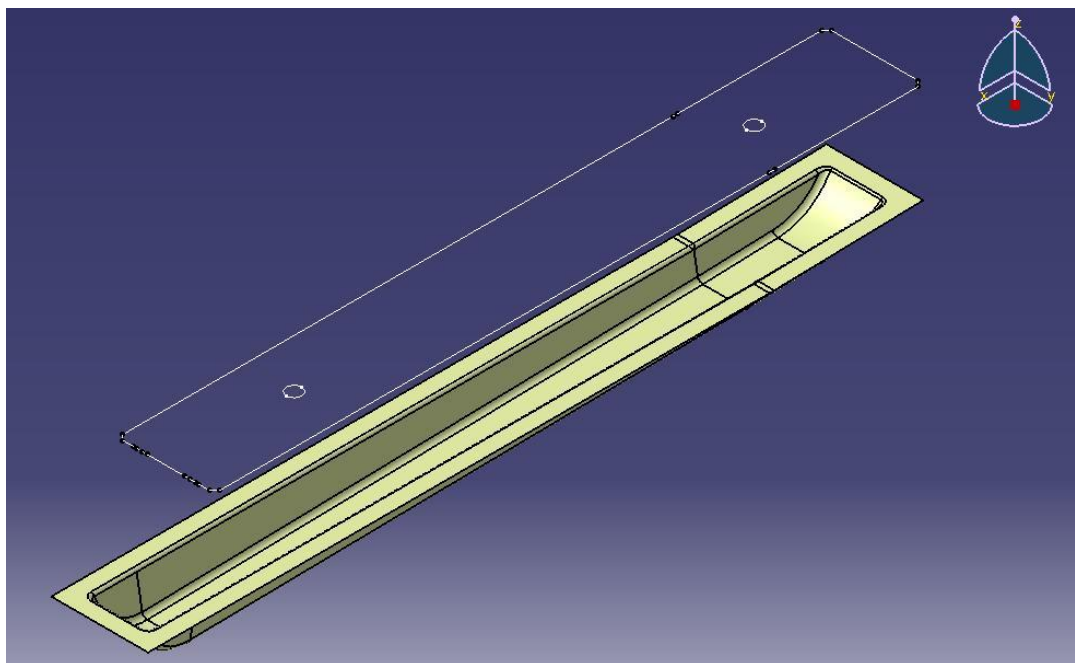


Рисунок 41 – Плоские контуры обрезки и пробивки

С помощью опции «Развертывание» в CATIA V5 была получена приближенная электронная модель заготовки с учетом припуска на обрезку (рисунок 42).



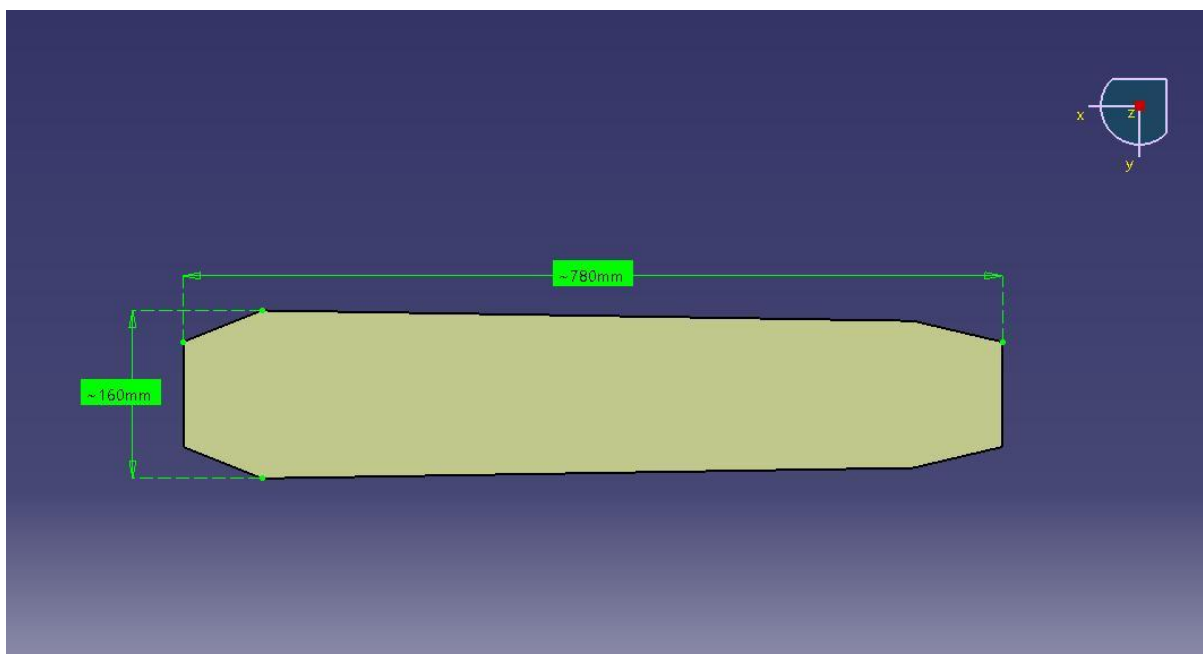


Рисунок 42 - Электронная модель заготовки

#### 4.2 Создание базового технологического процесса

Моделирование технологического процесса штамповки детали «Лонжерон пола передний» проводится в САЕ-программе eta/DynaForm, которая является специализированным программным продуктом, ориентированным на конечно-элементное моделирование технологических процессов ОМД в автомобильной промышленности и использует в качестве ядра математический аппарат LS-DYNA.

Полученные в САД электронные модели в формате «IGS» импортируются в препроцессор eta/DynaForm. Дальнейший процесс моделирования проходит в специальном модуле «Sheet forming» (рисунок 43), который по заданным пользователем настройкам автоматически создает текстовый файл со структурированными данными в формате карт (ключевых слов), обрабатываемый LS-DYNA [15].

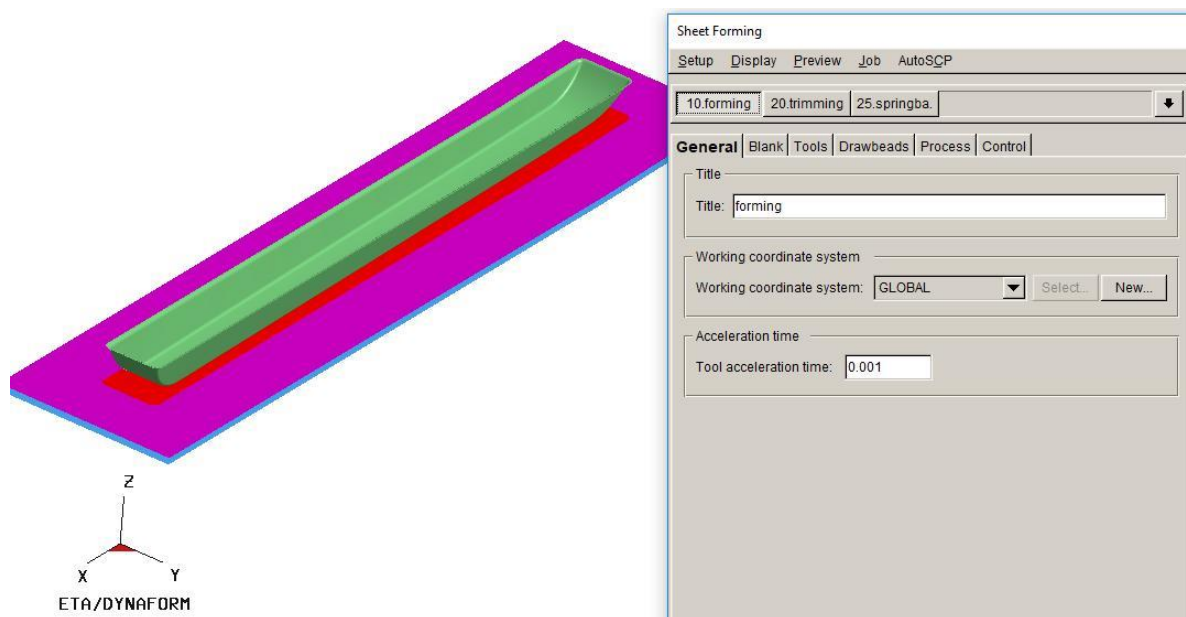


Рисунок 43 - Окно модуля «Sheet Forming»

Данный модуль позволяет в одном окне создать весь технологический процесс штамповки, который состоит из операций вытяжки, совмещенной обрезки-пробивки, а также упругого пружинения конечной детали в зажимах калибра.

Для операции вытяжки должна быть выбрана соответствующая геометрия заготовки, рабочего инструмента и построена КЭ-сетка на моделях. Выбирается материал заготовки, его толщина и тип оболочечного элемента. Толщина заготовки 1,5 мм, тип оболочечного элемента - используется по умолчанию элемент Бельчико-Цая. Файл с расширением «mat», содержащий параметры материала, может быть выбран из базы материалов eta/DynaForm, создан новый – вручную, или же импортирован ранее созданный. Требуемый материал HX220YD уже имеется в базе материалов.

Для каждого материала, имеющегося в базе материалов, доступен выбор четырех типов материалов – 18, 24, 36, 37. Наиболее применяемыми моделями материалов в листовой штамповке являются анизотропно пластические 36 и 37. Изотропно пластические 18 и 24 применяются реже. В качестве типа материала

для HX220YD был выбран трансверсально-анизотропный упруго-пластический материал 37 (рисунок 44).

Материал 37 предназначен для моделирования поведения анизотропных материалов в процессах листовой штамповки. Эта модель является итерационной и применяется только для оболочечных элементов. Также существует возможность задания кривой, определяющую произвольную зависимость между напряжением и деформацией [14].

Property	Value
Type	37*MAT_TRANSVERSELY_ANISOTROPIC_EL
Material Name	HX220YD+Z
Remark	
Mass Density	7.68e-009
Young's Modulus	210000.0
Poisson's Ratio	0.3
Yield Stress (SIGY)	233.0
Hardening Modulus (ETAN)	676.8
Anisotropic Param (R)	1.54
Strain-Stress Curve	<Valid>
Forming Limit Curve	<Valid>
Formability index	<input checked="" type="checkbox"/>

Рисунок 44 - Параметры HX220YD в DynaForm

Для данного материала на основе экспоненциального закона была построена аппроксимированная кривая упрочнения (рисунок 45).

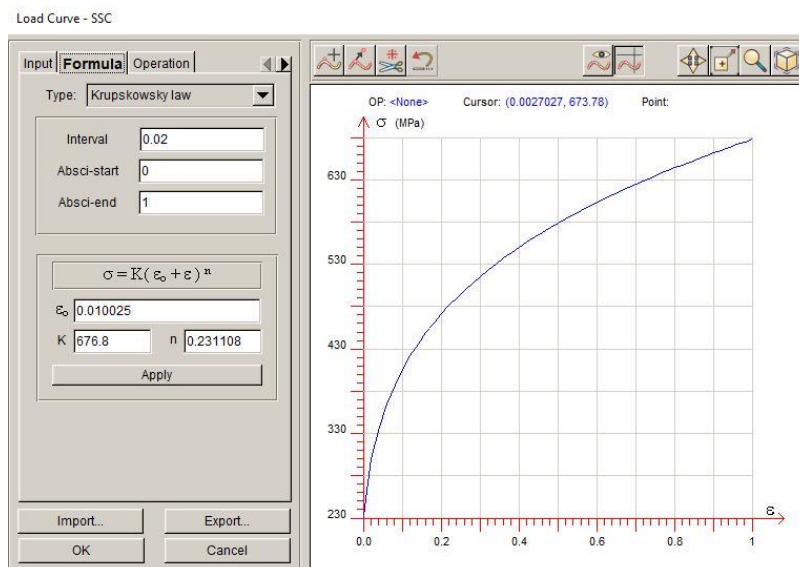


Рисунок 45 - Кривая упрочнения

На основе значений коэффициента деформационного упрочнения и толщины материала была построена кривая предельных деформаций по Келеру (рисунок 46).

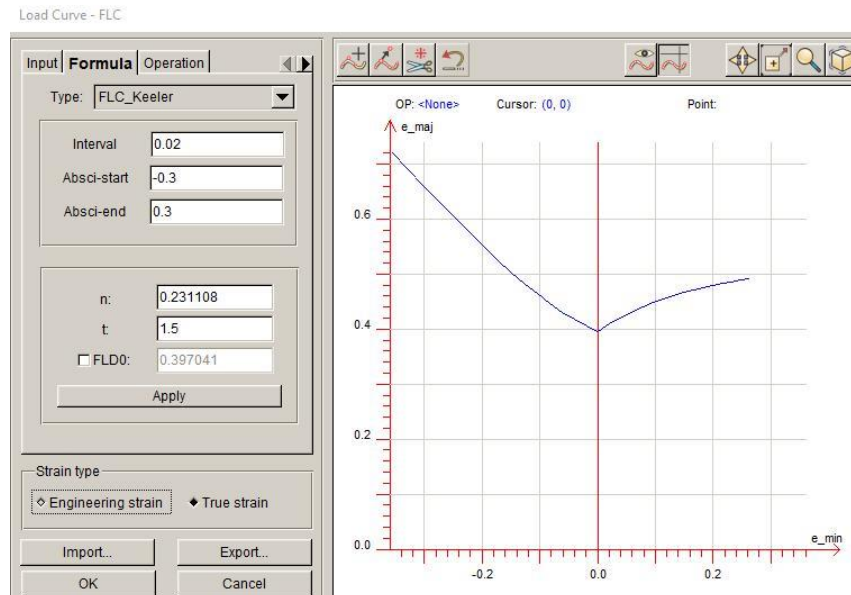


Рисунок 46 - Кривая предельных деформаций

Помимо свойств материала, для операции вытяжки задаются коэффициенты трения между заготовкой и деталями штампа, направления и

скорости перемещения. Величина усилия прижима принимается по умолчанию и составляет 500 кН.

Для операции обрезки-пробивки используются три плоских контура: один контур обрезки и два контура пробиваемых отверстий. Эти контуры были распределены в две группы. Их направление и позиции выставляются вручную относительно матрицы. Зазор между матрицей и пуансоном принимается по умолчанию 0,25 мм (рисунок 47).

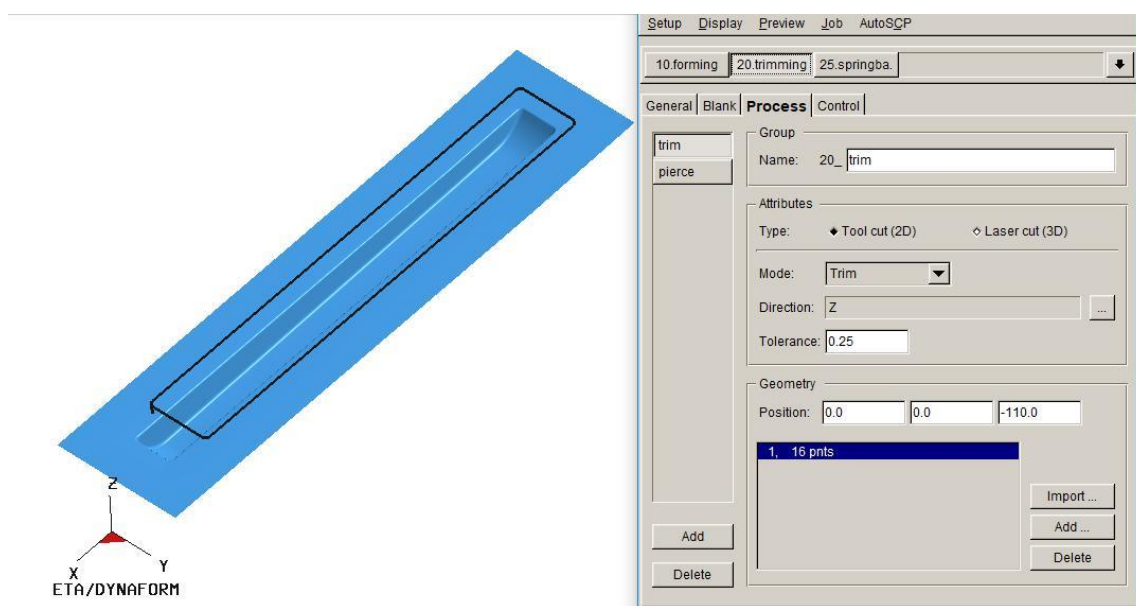


Рисунок 47 - Операция обрезка-пробивка

Помимо моделирования технологических операций получения детали «лонжерон пола передний» - вытяжки и обрезки – пробивки, было решено провести моделирование упругого пружинения готовой детали. Упругое пружинение возникает в детали вследствие повышенного уровня упругих деформаций, набранных деталью в процессе изготовления, в результате чего при разгрузке она упруго деформируется, существенно отклоняясь от требуемых размеров и формы заложенных конструктором [22]. Для оценки величины этих отклонений в производственных условиях используют контрольно-измерительные устройства. Отклонения не должны превышать заданную

величину допуска. В случае с данной деталью, величина допуска составляет  $\pm 1$  мм.

Для моделирования процесса упругого пружинения в программе eta/DynaForm, на полученную после операции обрезки – пробивки деталь были наложены ограничения в точках, соответствующих координатам зажимов и направляющих калибра. Ограничения были наложены на 12 точек готовой детали. Из них 4 точки расположены на фланце детали и ограничивают его перемещение в направлении оси Z, имитируя зажим фланца. Оставшиеся 8 точек расположены вокруг пробиваемых отверстий и ограничивают перемещение детали в направлениях X и Y, имитируя ее размещение на цилиндрических направляющих (рисунок 48).



Рисунок 48 - Задание ограничений для анализа упругого пружинения

После подготовки всех необходимых данных моделирования по всем операциям, программой eta/DynaForm формируются выходные текстовые дун - файлы. Данные файлы содержат информацию для расчета в решателе LS-DYNA, представленную в формате карт (ключевых слов), в которых вводятся команды и параметры для них (рисунок 49) [15].

```

$ ETA/DYNAFORM : LS-DYNA(971R5+) INPUT DECK
$ DATE : May 29, 2018 at 19:35:09
$ VERSION : eta/DYNAFORM 5.9.3, built on Jun 28 2017
$ EXPORTER : AUTO-SETUP
$
$ VIEWING INFORMATION
$ -768.698852 1120.968872 -409.273498 511.7960205
$ -0.57361912 0.78357631 0.238682404
$ -0.21034427 -0.42246797 0.881632626
$ 0.791673005 0.455478251 0.407177299
$
$ UNIT SYSTEM : MM, TON, SEC, N
$
$ SIMULATION : SHEET FORMING
$ RCMD-SOLVER : SINGLE
$
$-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8
$
$ *KEYWORD
$
$-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8
$
$ (1) TITLE CARD
$
$-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8
$ *TITLE
forming / untitled
$-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8
$
$ (2) DEFINE PARAMETERS
$
$-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8
$ *PARAMETER
$ PRMR1 VAL1 PRMR2 VAL2 PRMR3 VAL3 PRMR4 VAL4
R FORCE 5.E5
$-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8
$

```

Рисунок 49 - Дун-файл для решателя LS-DYNA

### 4.3 Анализ результатов базового моделирования

Анализ результатов моделирования выполняется в постпроцессоре etaPostProcessor 2.0.

На основе распределения точек КЭ-модели на диаграмме предельных деформаций в процессе вытяжки можно отметить, что недопустимых утонений и разрывов деталь не имеет. Плоское дно недостаточно продеформировано (серая область). Хорошая степень деформации (зеленая область) наблюдается на стенках – одноосное растяжение и в углах на радиусах у дна – двухосное растяжение. Ввиду больших сжимающих напряжений при втягивании фланца в вытяжной проем, на фланце и его радиусах в углах детали происходит интенсивное складкообразование (синяя и фиолетовая области) (рисунок 50).

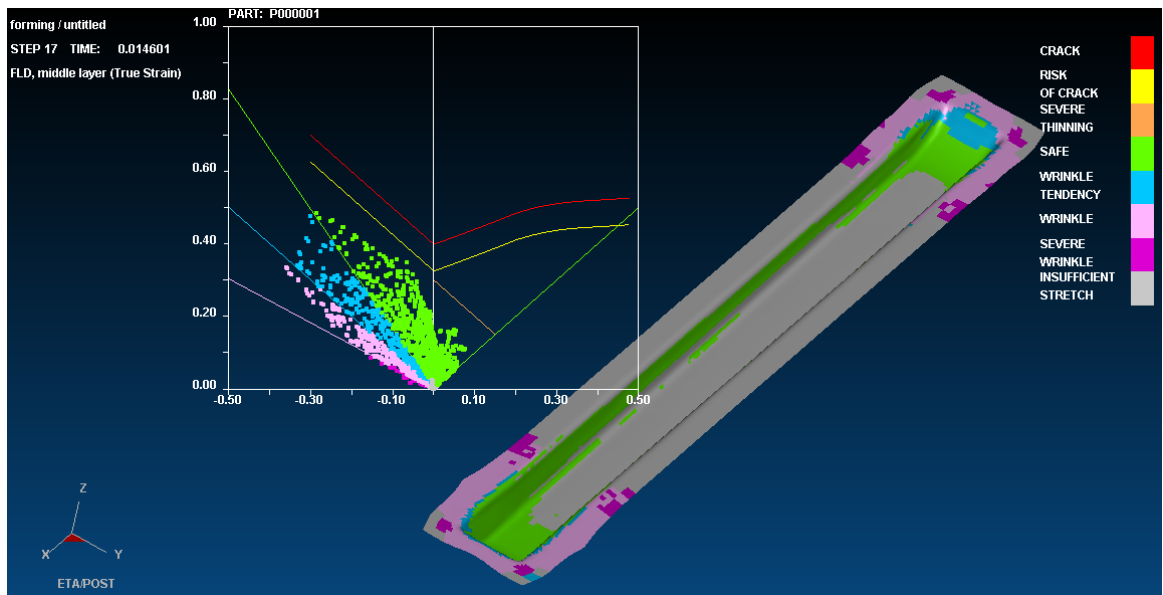


Рисунок 50 - Диаграмма предельных деформаций

Наибольшие значения утонения наблюдаются в угловых зонах - на радиусных частях и плоских стенках. Максимальное значение утонения не превышает 21.5% (рисунок 51). Распределение наибольших главных деформации представлено на рисунке 52.

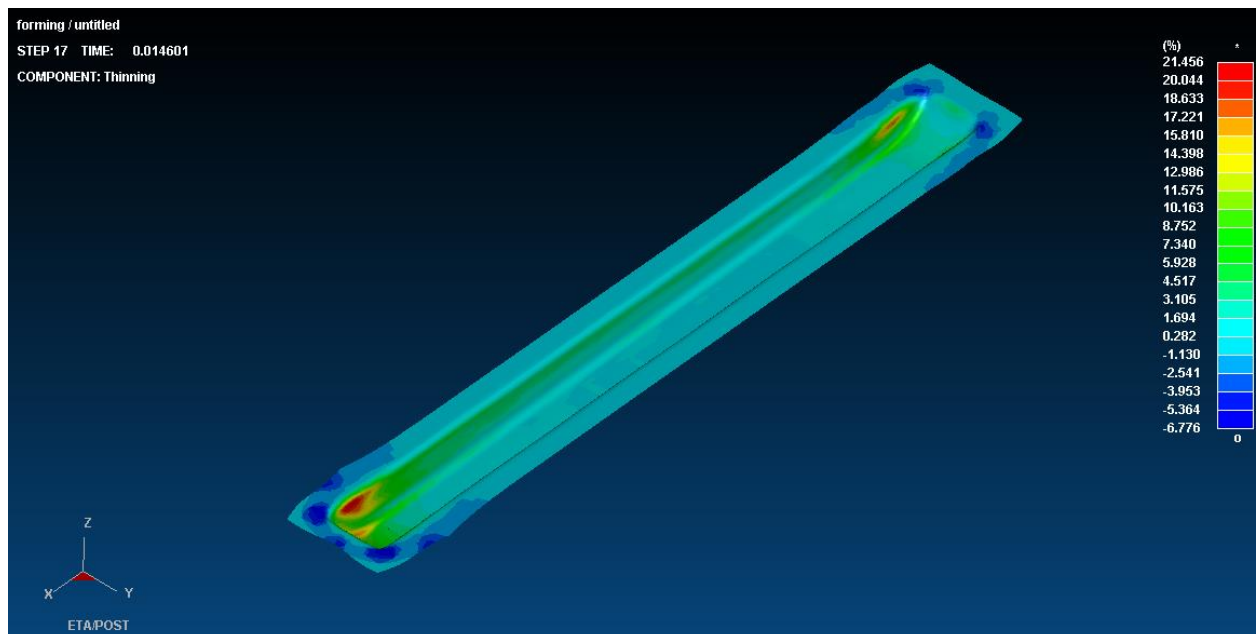


Рисунок 51 - Утонение



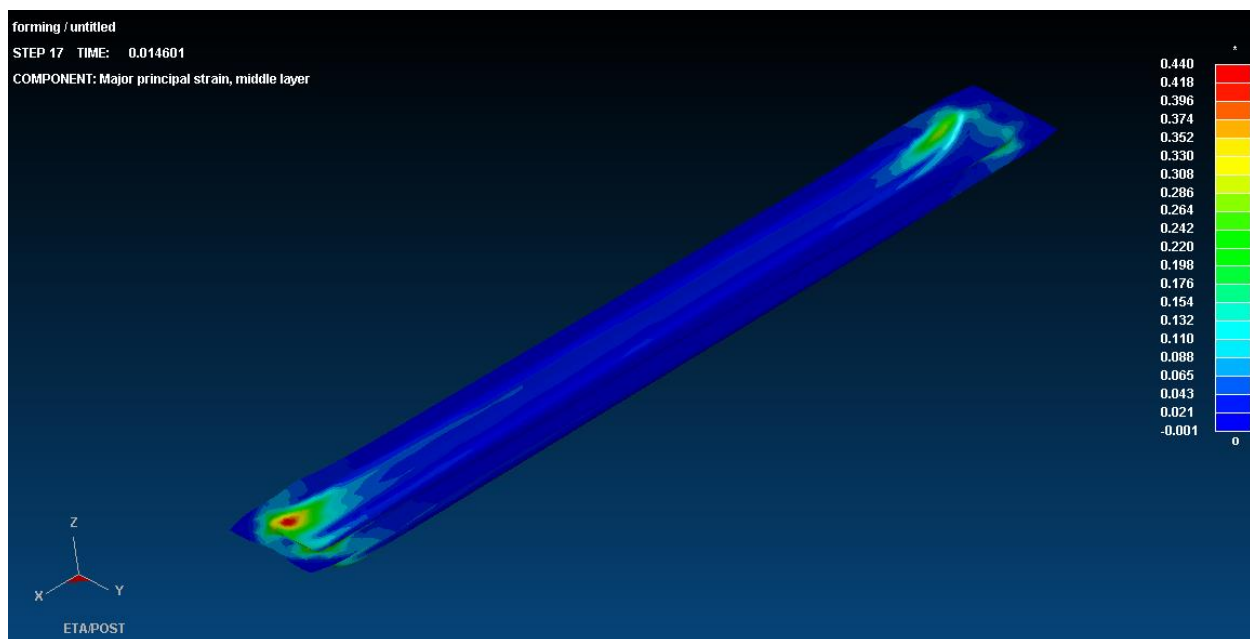


Рисунок 52 - Наибольшая главная деформация

После операции вытяжки были смоделированы операции обрезки – пробивки и упругое пружинение конечной детали (рисунок 53).

Величина упругого пружинения конечной детали составила 1,398 мм, что не укладывается в границы допуска  $\pm 1$  мм и, следовательно, полученное изделие является дефектным.

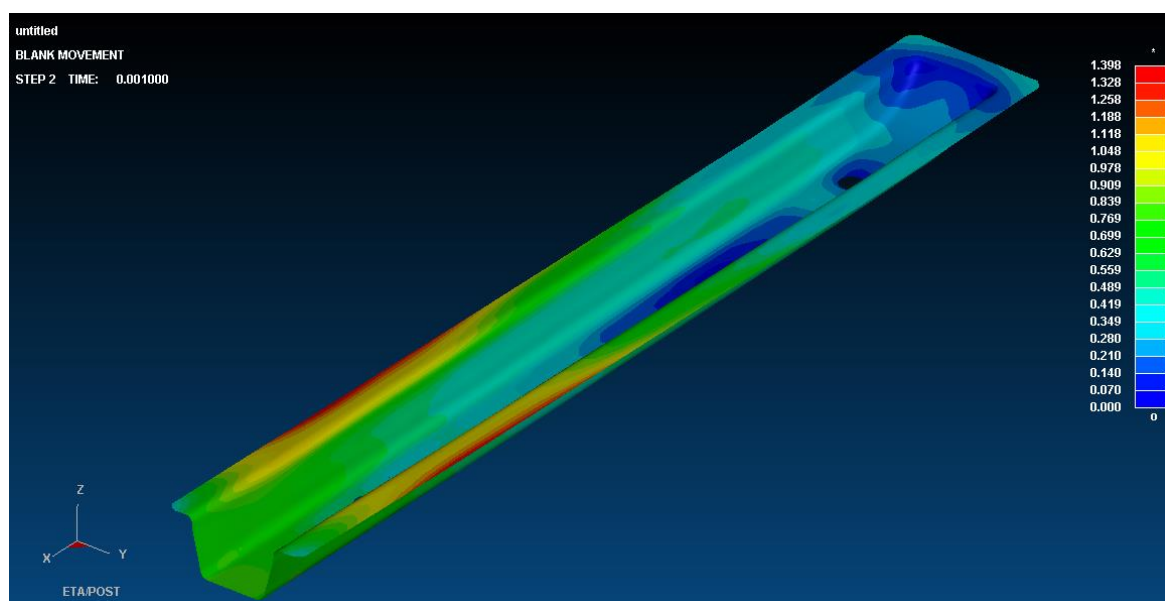


Рисунок 53 - Упругое пружинение детали

Основной причиной проявления этого дефекта является недостаточная пластическая деформация материала НХ220УД и ее неоднородность прежде всего по толщине. В процессе штамповки накапливаются упругие деформации в результате чего после снятия нагрузки деталь упруго деформируется и отклоняется от требуемой формы. Этот дефект особенно характерен для высокопрочных сталей, использование которых в современном автомобиле увеличивается, что обусловлено жесткими требованиями по вопросам безопасности и снижению вредных выбросов. Удовлетворение этих требований видится в повышении прочности кузова и снижения массы автомобиля, а применение высокопрочных сталей позволяет делать изделия тоньше, при этом сохраняя требуемые прочные характеристики [3].

Таким образом на основании результатов базового моделирования возникает необходимость постановки и решения задачи оптимизации с целью компенсации величины упругого пружинения за счет подбора оптимальных параметров процесса штамповки.

#### 4.4 Выбор критерия оптимальности и постановка целевой функции

Качество продукции является важнейшей задачей в производстве металлических деталей, и в частности в процессах ОМД. Следовательно, качество продукции следует рассматривать как главный критерий оптимальности задач оптимизации процессов листовой штамповки. В этом случае целевыми функциями являются отсутствие дефектов (утонений, гофров, упругого пружинения), т.е. задача оптимизации качества процессов штамповки является многокритериальной.

Математически целевую функцию оптимизации качества изделия можно представить по формуле (4):

$$F = F(f_1, f_2, f_3) \rightarrow \max \quad (4)$$

где  $f_1$  – целевая функция получения детали без утонений (разрывов),

$f_2$  – целевая функция получения детали без гофров,

$f_3$  – целевая функция получения детали с допустимым пружинением.

Основным методом решения многокритериальных задач является метод редукции. Выбирается основная целевая функции, а остальные целевые функции переводятся в неявные ограничения. Таким образом многокритериальная задача оптимизации сводится к однокритериальной с ограничениями.

В случае детали «Лонжерон пола передний» основная целевая функции качества – упругое пружинение. Однако оптимизировать величину упругого пружинения при наличии на детали разрывов и утонений было бы не логичным. При наличии разрывов и утонений деталь однозначно считается бракованной. Поэтому целевую функцию получения детали без разрывов следует перевести в ограничения целевой функции. Максимально допустимая величина утонения материала, которая является верхней границей получения детали без разрывов, составляет 25%.

Таким образом, математическая постановка задачи оптимизации процесса штамповки детали «Лонжерон пола передний» в соответствии с формулой (5):

$$\begin{aligned} f_3(x) &\rightarrow \min \\ \Delta t &< 25\% \end{aligned} \tag{5}$$

где  $f_3$  – целевая функция минимизации упругого пружинения,

$\Delta t$  – утонение детали.

Под переменной  $x$  подразумевают переменные проектирования от которых зависит целевая функция. Следующим шагом в алгоритме оптимизации является определении переменных проектирования и явных ограничений.

#### 4.5 Определение переменных проектирования и ограничений

Для листовой штамповки в случае оптимизации качества изделий переменные проектирования связаны с переменными процесса. Изменение переменных процесса подразумевают изменение геометрических параметров, материала или самого процесса.

Изменение геометрии в свою очередь может заключаться в изменении самой конструкции детали, так и штамповой оснастки. Это очень сложный процесс, требующий больших финансовых вложений. Изменение геометрии детали возможно в задачах топологической оптимизации, которая в контексте данной работы не рассматривается.

При изменении материала, требуется проведение дополнительных лабораторных испытаний, так как существует риск появления непредвиденных дефектов.

Изменение параметров процесса, например, температуры (заготовки, окружающей среды) или характеристик оборудования (скорость, перемещение кривошипа) либо затратно с экономической точки зрения, либо трудоемко по наладке. Единственным параметром, которым легко можно управлять – это усилие прижима заготовки.

В базовой симуляции усилие прижима заготовки выбиралось по умолчанию и составляло 500 кН. Установим границы изменения усилия прижима от 200 кН до 1200 кН. Эти границы будут являться явными ограничениями задачи оптимизации и определять пространство проектирования. Таким образом, задача оптимизации процесса штамповки детали «Лонжерон пола передний» заключается в нахождении оптимальной величины усилия прижима в границах 200 кН – 1200 кН, при которой обеспечивается минимальная величина упругого пружинения с учетом ограничения максимально допустимого утонения в 25%. Математически задача оптимизации записывается в виде формулы (6):

$$\text{Min } f(\text{Force}) \rightarrow \text{result\_springback} \quad (6)$$

$$200 \text{ кН} < \text{Force} < 1200 \text{ кН}$$

$$\Delta t < 25\%$$

В качестве ограничений в задаче оптимизации следует выделить размеры заготовки, а также свойства материала, так размеры проката и свойства материала, из которого он сделан, строго регламентированы металлургическим комбинатом. Выбор размера заготовки зависит от имеющегося оборудования, параметры которого также являются ограничениями. К этим параметрам относятся размерные величины оборудования (размер стола пресса, закрытая высота, ход пневмотолкателей и т.д.). В случае решаемой задачи оптимизации, ограничениями будут являться геометрия заготовки и штамповой оснастки, а также свойства материала.

Далее необходимо смоделировать и найти решение поставленной задачи оптимизации в программном продукте LS-OPT 5.2.1.

#### 4.6 Моделирование задачи оптимизации в LS-OPT

Файлы базового моделирования операций вытяжки, обрезки-пробивки и упругого пружинения, полученные в eta/DynaForm, помещаются в один рабочий каталог. В стартовом диалоговом окне LS-OPT указывается рабочий каталог, имя проектного файла, название выборки и первоначального этапа – вытяжки.

После указания всех необходимых входных данных открывается главное окно графического интерфейса пользователя, в котором в виде блок-схемы представлен алгоритм оптимизации, выполняемый LS-OPT. В этой блок-схеме первоначально присутствует лишь один этап «Forming» соответствующий процессу вытяжки. Добавляются еще два этапа: «Trimming» и «Springback», соответствующие процессам обрезки-пробивки и упругого пружинения (рисунок 54).

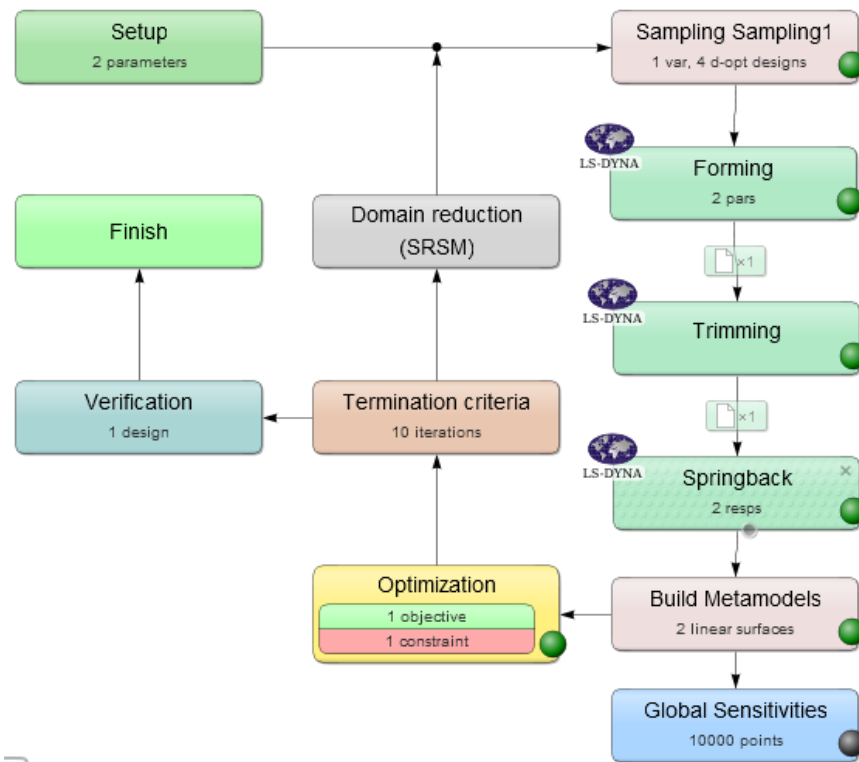


Рисунок 54 - Блок-схема алгоритма оптимизации

В каждом из этапов в блок-схеме оптимизации выбирается тип решателя LS-DYNA, указывается путь к исполняемому файлу решателя, а также входной дун-файл. Число параллельно ведущихся программой расчетов - 5 (рисунок 55). Каждый последующий этап моделирования после вытяжки, использует результат предыдущего. Между этапами указывается передаваемый с этапа на этап выходной файл с геометрией детали – dynain.

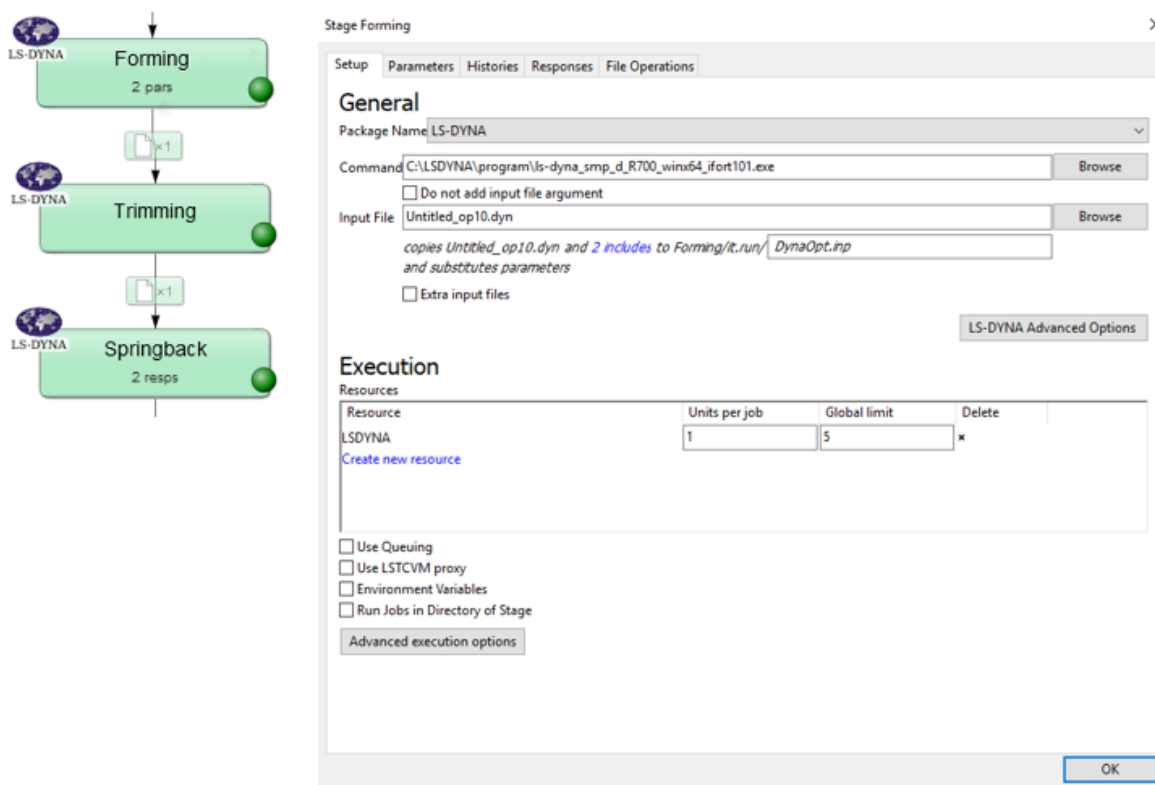


Рисунок 55 - Задание параметров

Важным шагом являлся выбор типа задачи и стратегии оптимизации. В качестве типа задачи выбрана оптимизация на основе метамоделей, как наиболее быстрый и надежный способ нахождения оптимального решения. В качестве стратегии выбрана последовательная оптимизация на основе поверхности отклика с сокращением пространства проектирования. Эта стратегия является исходной для метода поверхности отклика и хорошо подходит для нахождения конкретной оптимальной точки в условиях широкого пространства проектирования, заданного переменными проектирования (рисунок 56).

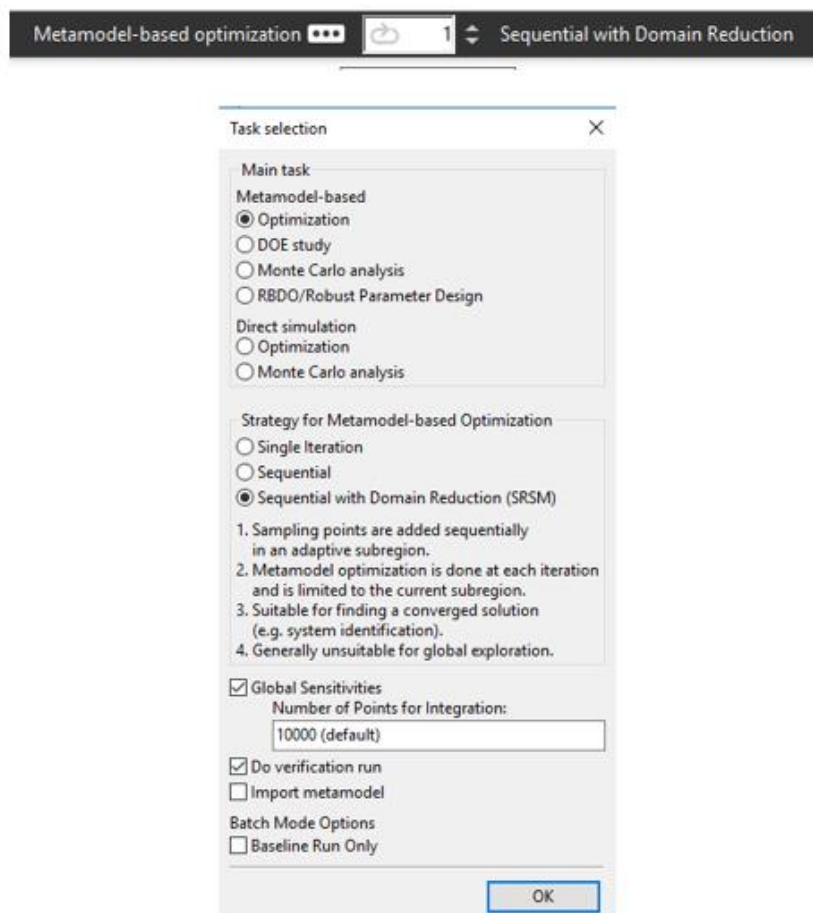


Рисунок 56 - Выбор задачи и стратегии оптимизации

Переменная проектирования решаемой задачи оптимизации (усилие прижима заготовки) задается в дун-файле процесса вытяжки, в ключевом слове \*PARAMETER (рисунок 57). Эта переменная FORCE как константа со значение 500 кН автоматически отображается в блоке «Setup, при указание входного файла.

```

$                (2) DEFINE PARAMETERS
$
$-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8
*PARAMETER
$   PRMR1      VAL1      PRMR2      VAL2      PRMR3      VAL3      PRMR4      VAL4
$   R  FORCE      5.E6
$-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8
$

```

Рисунок 57 - Задание переменной проектирования в дун-файле



Для задания границ изменения переменной проектирования FORCE, выбирается непрерывный тип переменной и в соответствующих ячейках указываются начальное - 500 кН, минимальное – 250 кН, максимальное – 1200 кН (рисунок 58).

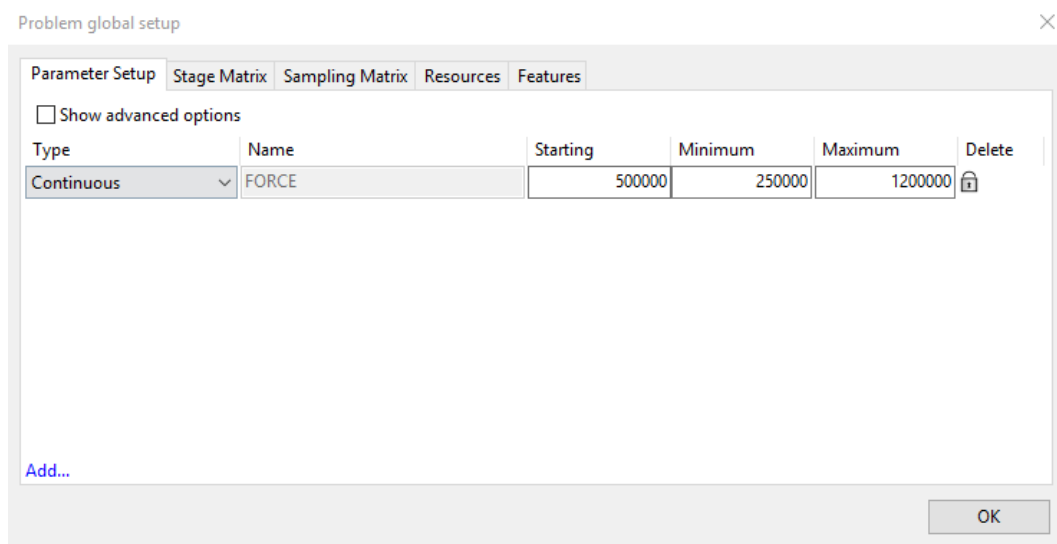


Рисунок 58 - Задание переменных проектирования

В качестве типа метамоделли и схемы выбора точек программа предлагает пользователю выбрать оптимальные в зависимости от выбранной задачи и стратегии оптимизации. По умолчанию мета модель будет представлять собой линейный полином, проведенный через точки отклика. Для линейного полинома схема выбора точек по умолчанию – D-оптимальная (рисунок 59). Число точек выборки зависит от количества переменных проектирования. Количество точек за итерацию для линейного приближения вычисляется по формуле (7):

$$(1.5 (n + 1) + 1) = (1.5 (1 + 1) + 1) = 4, \quad (7)$$

где n - число переменных проектирования

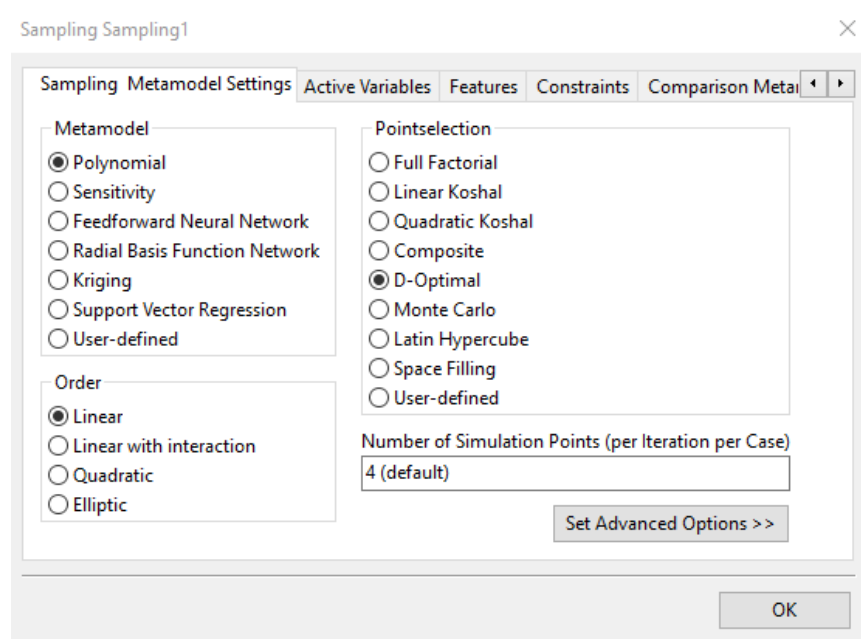


Рисунок 59 - Выбор типа метамоделли и схемы выбора точек

Выходные данные (отклики) задаются на последнем этапе – упругое пружинение на вкладке «Response». Эти отклики извлекаются из базы данных LS-DYNA. Выбираются отклики: максимальное результирующее смещение конечной детали и максимальное утонение конечной детали в процентах (рисунок 60).

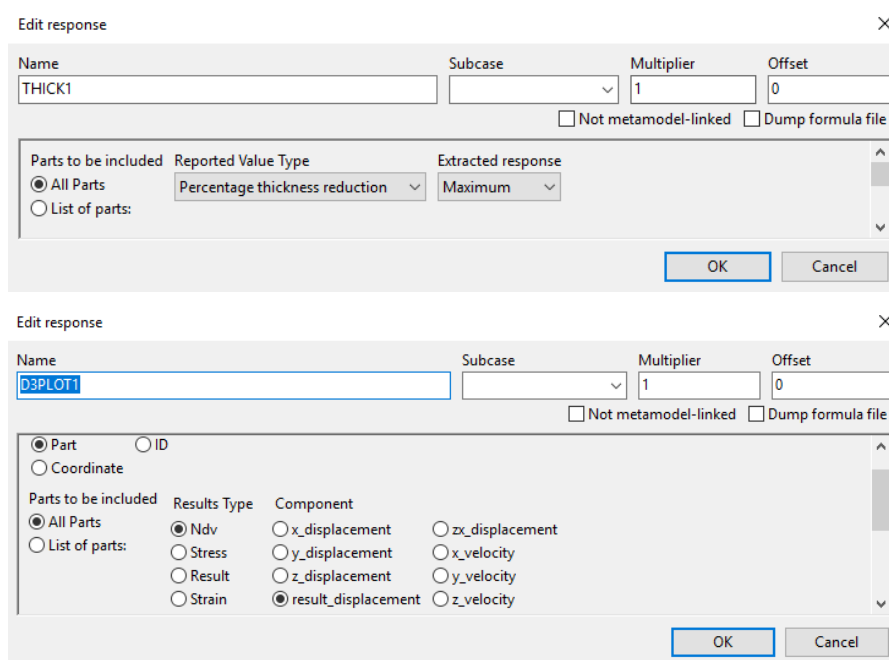


Рисунок 60 - Выбор откликов

В блоке «Optimization» из выбранных ранее откликов выбирается целевая функция – упругое пружинение с весовым коэффициентом 1 и ограничение – утонение детали. Для ограничений необходимо задать границы. Ограничение утонение детали имеет верхнюю границу в 25% (рисунок 61).

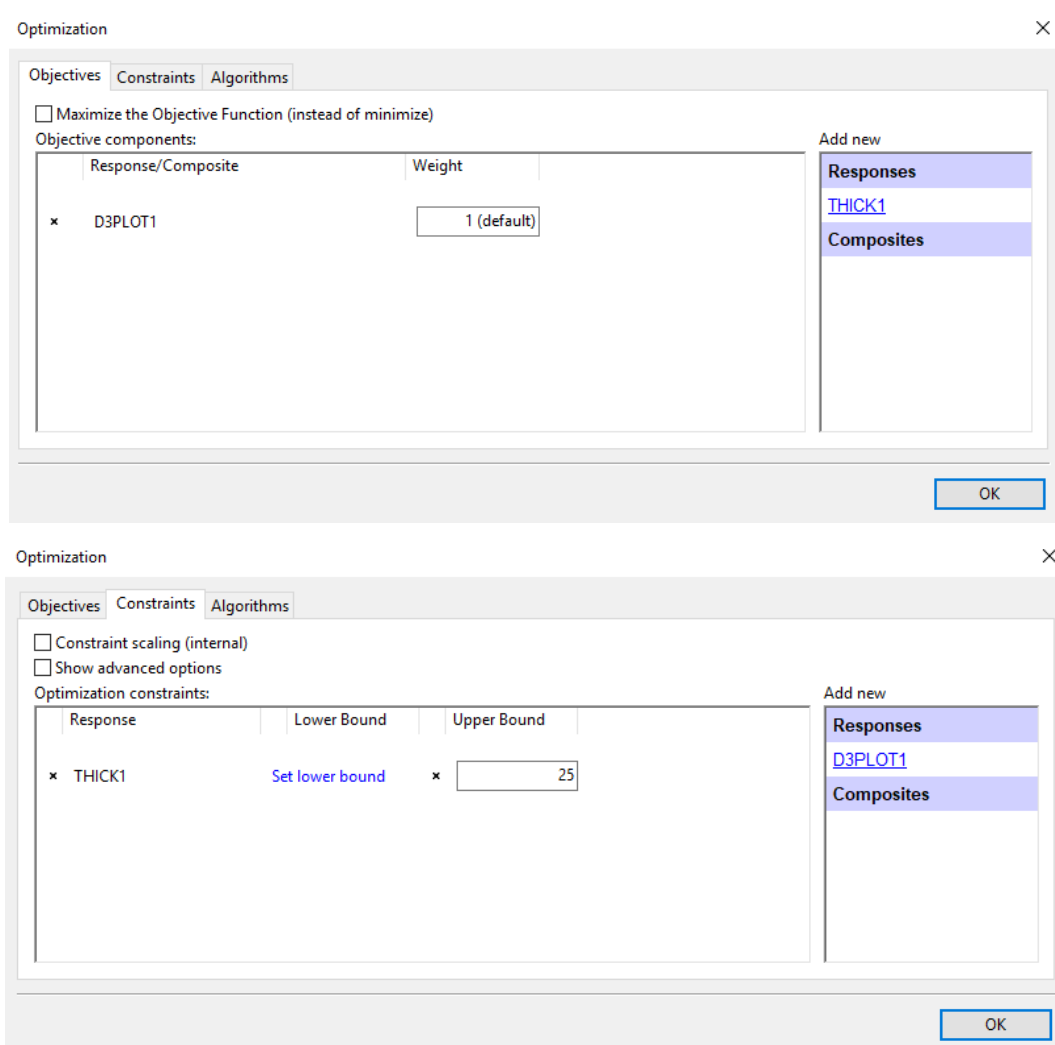


Рисунок 61 - Задание целевой функции и ограничения

Для последовательных методов оптимизации в схеме оптимизации появляется блок «Termination criteria», в котором указывается максимальное количество итераций и необходимая величина точности метамоделли или целевой функции, при которых расчет прекращается (рисунок 62). Для рассматриваемой задачи количество итераций устанавливается 10.

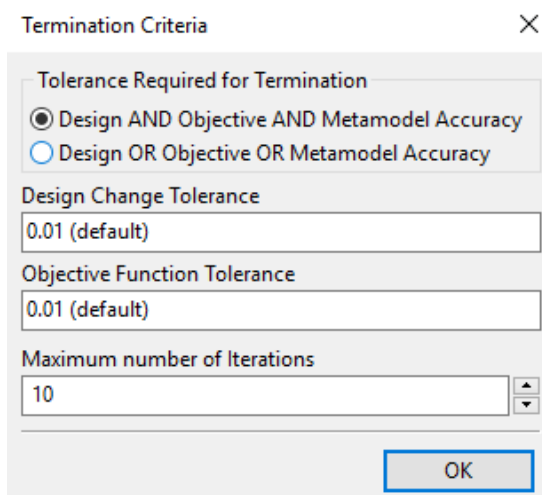


Рисунок 62 - Критерии остановки оптимизации

После указания всех необходимых параметров, приведенных выше, осуществляется запуск решения поставленной задачи. Процесс решения по шагам можно наблюдать по зеленым индикаторам выполнения (рисунок 63). После завершения процедуры оптимизации появляется окно об успешном окончании решения поставленной задачи.

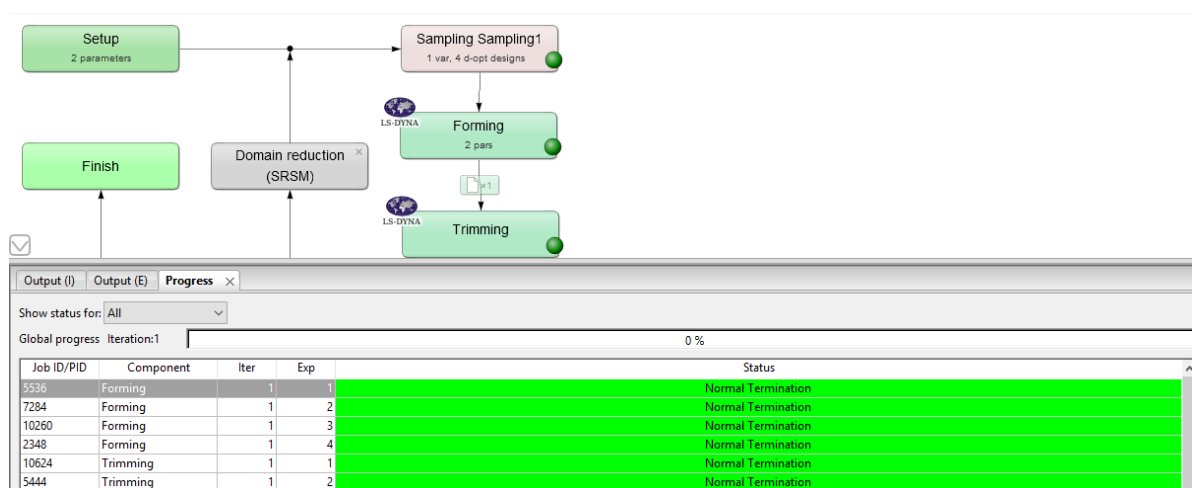


Рисунок 63 - Процесс оптимизации в LS-OPT

## 4.7 Анализ результатов оптимизации

Программа LS-ОПТ нашла решение поставленной задачи за 9 итераций, т.е. было выполнено 36 реализаций проекта.

Просмотр результатов оптимизации осуществляется в окне «New plot» в пяти различных категориях, в котором отображаются графические результаты моделирования и оптимизации (рисунок 64).

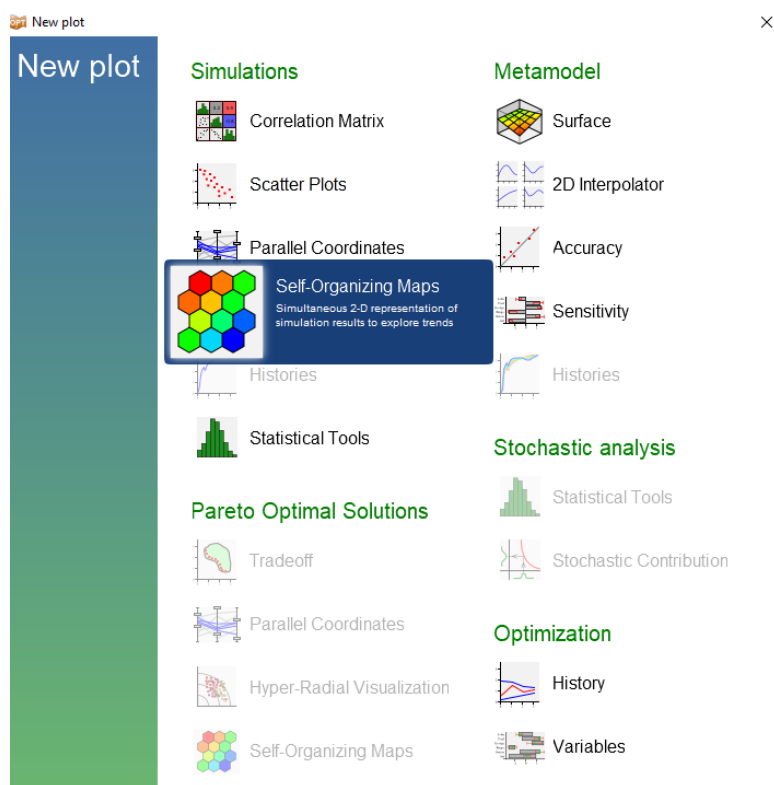


Рисунок 64 - Окно просмотра результатов

На вкладке «History» просматриваются графики изменения переменной проектирования (рисунок 65), целевой функции (рисунок 66) и ограничения (рисунок 67) по итерациям. Из графиков видно, что оптимальное значение усилия прижима, полученное на 9 итерации, составляет 915,744 кН. Минимальное значение упругого пружинения при данном усилии прижима и максимально возможном утонении в 25%, составляет – 0.832 мм.

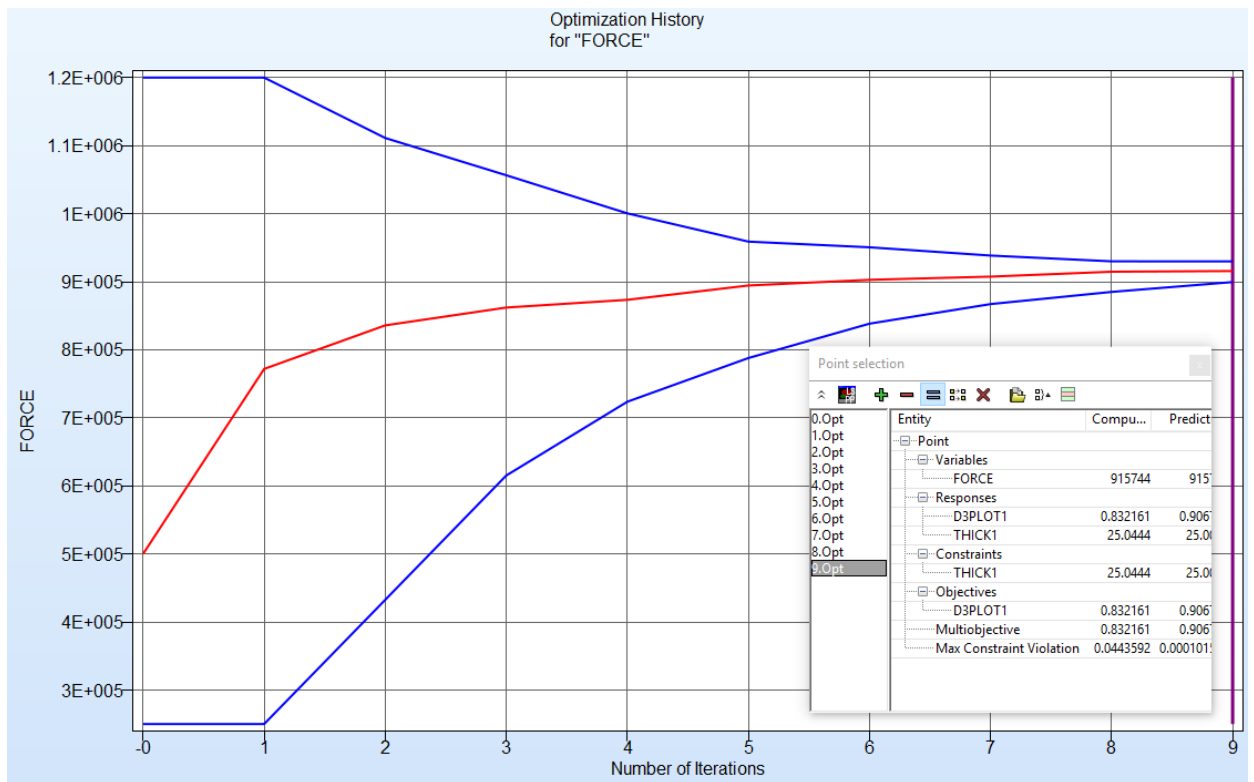


Рисунок 65 - Величина усилия прижима заготовки

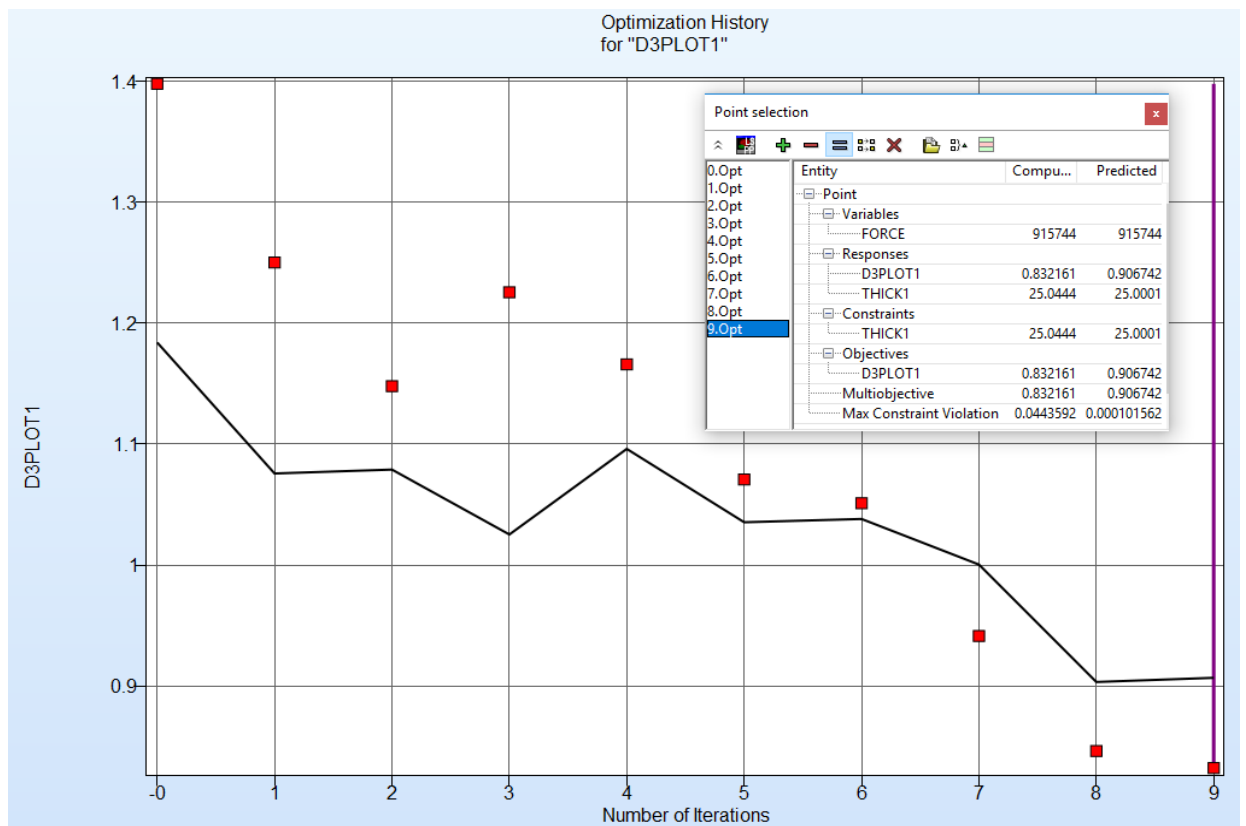


Рисунок 66 - Величина упругого пружинения

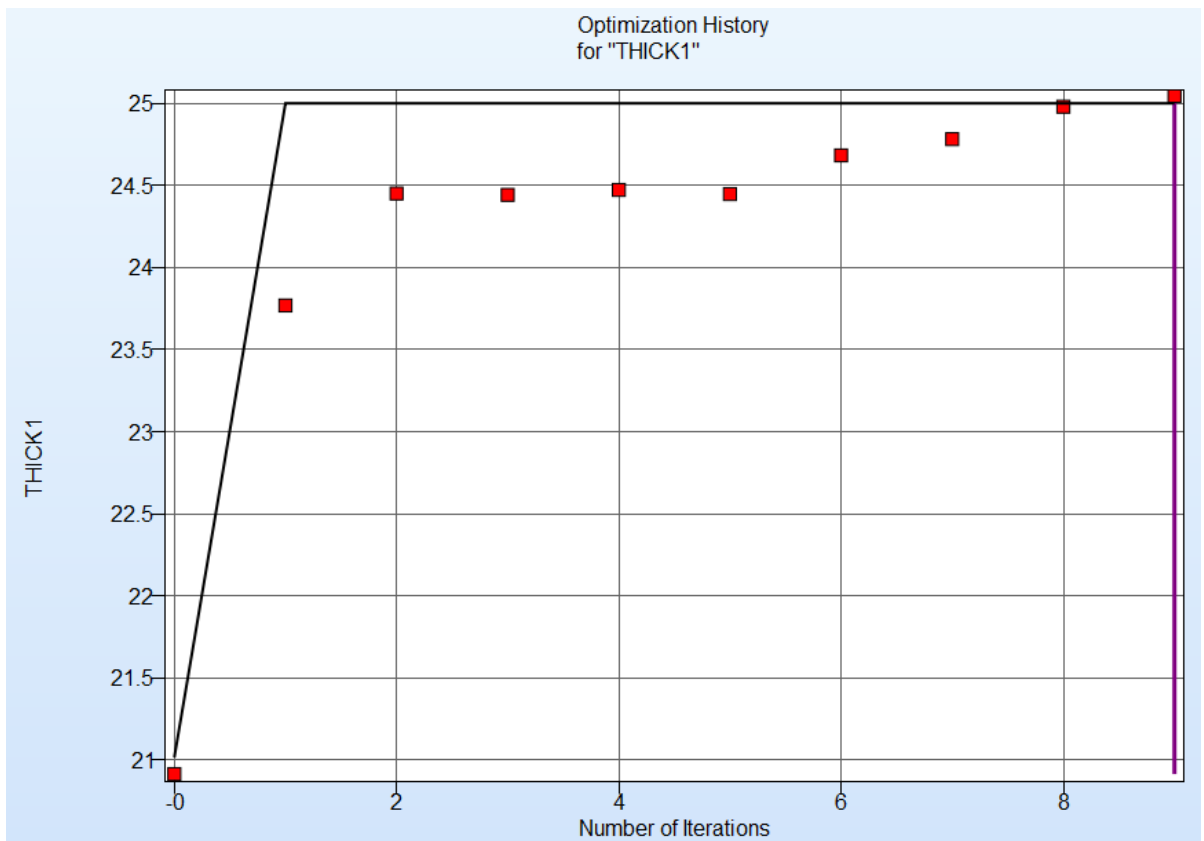


Рисунок 67 - Величина утонения

Опция просмотра «Variables» показывает оптимальное значение усилия прижима на шкале пространства проектирования (рисунок 68). Рассчитанное оптимальное значение усилия прижима заготовки составляет 915,744 кН.

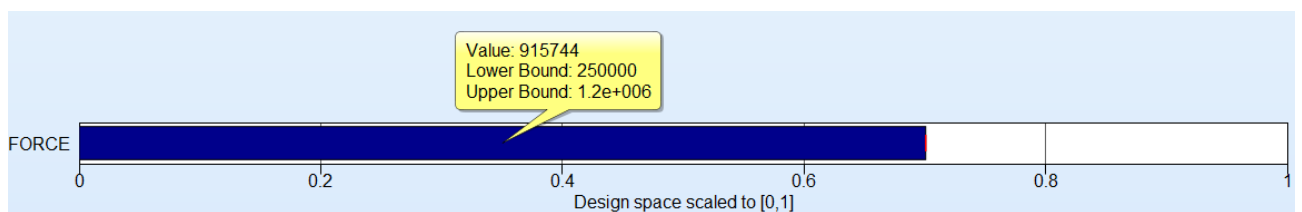


Рисунок 68 - Оптимальное значение усилия прижима заготовки

Опция «Scatter Plots» отображает полученные значения откликов, переменной проектирования для выбранных итераций в виде точек на графике рассеяния. Каждая точка этого графика соответствует значению двух рассматриваемых параметров. По характеру расположения этих точек можно судить о наличии или отсутствии корреляционной зависимости между двумя

величинами. Графики рассеяния, а также гистограммы и коэффициенты линейной корреляции для откликов и переменной проектирования отражает матрица корреляции, опция «Correlation Matrix» (рисунок 69).

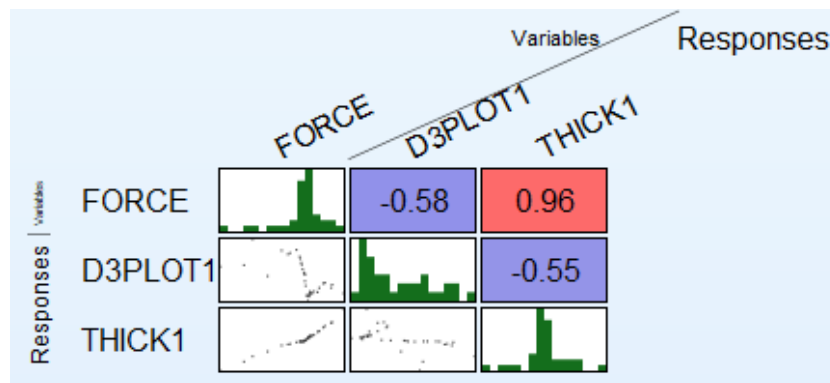


Рисунок 69 - Матрица корреляции

Коэффициенты корреляции имеют цветовое кодирование от синего до красного. Синий цвет указывает на сильную отрицательную корреляцию, красный - сильную положительную корреляцию, тогда как серый указывает на почти отсутствие корреляции.

Из матрицы корреляций видно, что между усилием прижима и упругим пружинением существует слабая отрицательная корреляционная связь ( $k = -0.58$ ), т.е. при увеличении усилия прижима заготовки упругое пружинение конечной детали уменьшается. Данный вывод наглядно подтверждается на графике рассеяния значений этих двух параметров (рисунок 70). Зеленые цвет точек на графиках означает, что данное решение удовлетворяет ограничению по утонению, а красный цвет - соответственно нет. Сильная положительная корреляционная связь ( $k = 0.96$ ) наблюдается между усилием прижима заготовки и величиной утонения конечной детали (рисунок 71), т.е. при увеличении усилия прижима величина утонения увеличивается. В свою очередь между утонением и упругим пружинением просматривается слабая отрицательная корреляционная зависимость ( $k = -0.55$ ), т.е. при увеличении усилия прижима заготовки утонение конечной детали увеличивается (рисунок 72).



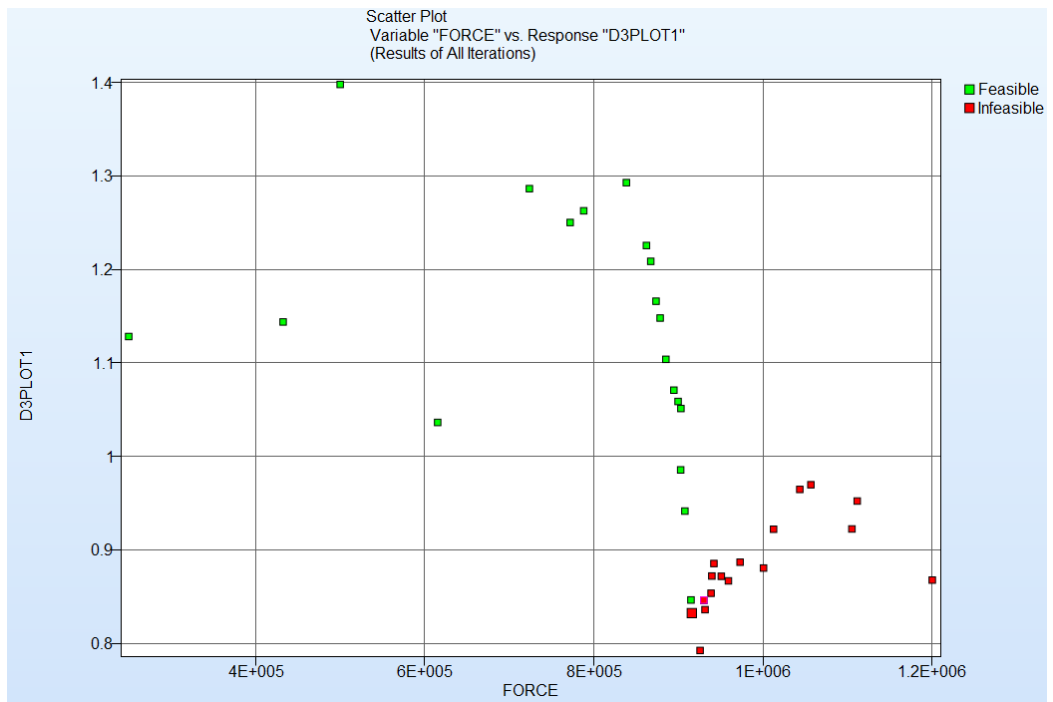


Рисунок 70 - Зависимость между усилием прижима и упругим пружинением

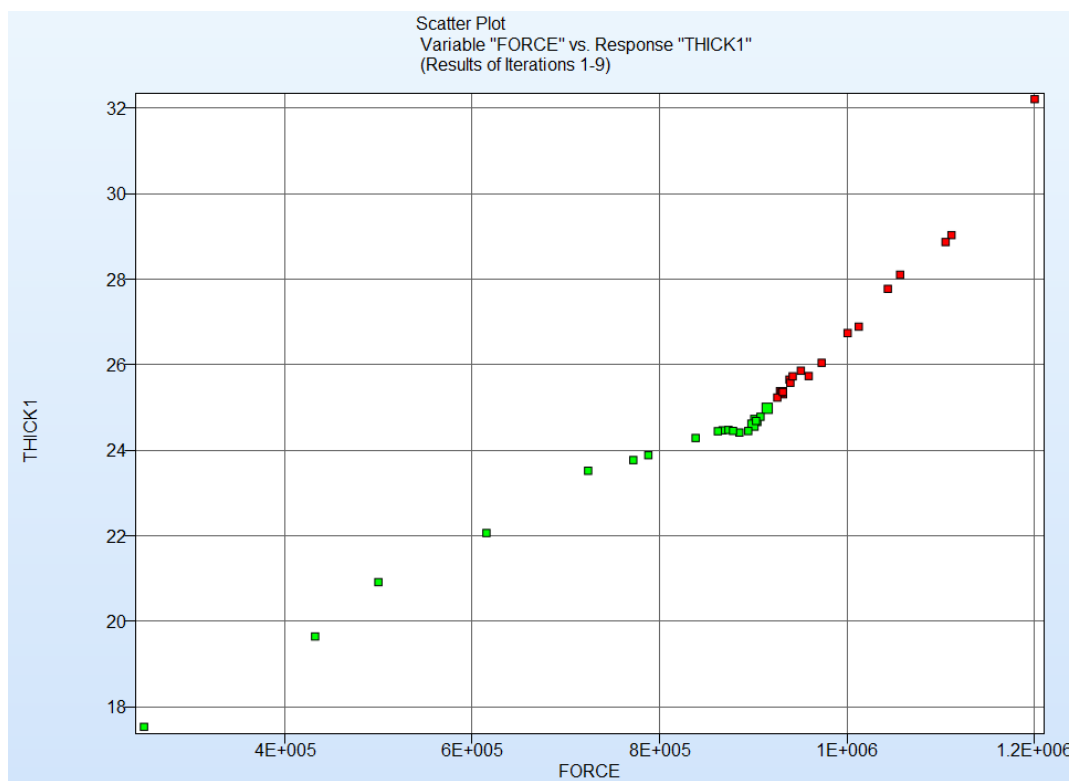


Рисунок 71 - Зависимость между усилием прижима и утонением

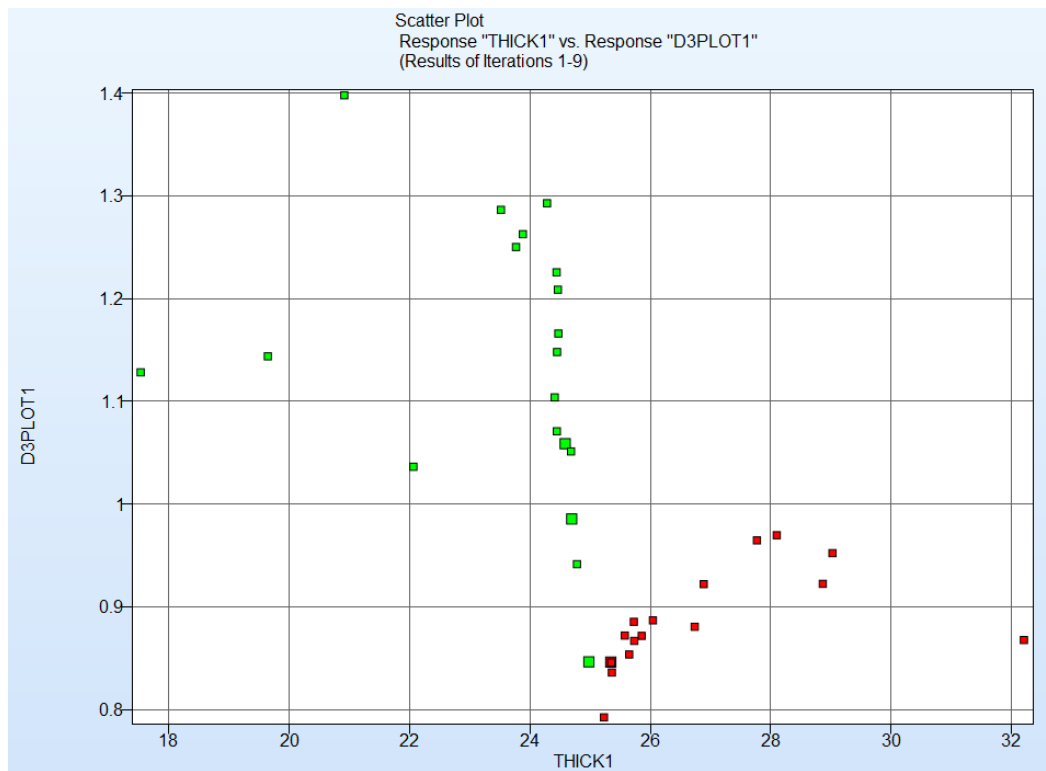


Рисунок 72 - Зависимость между утонение и упругим пружинение

Точки рассеяния, помимо изображения в 2D графиках, могут быть представлены в трехмерном кубе, стороны которого осями соответствующих параметров оптимизации (рисунок 73).

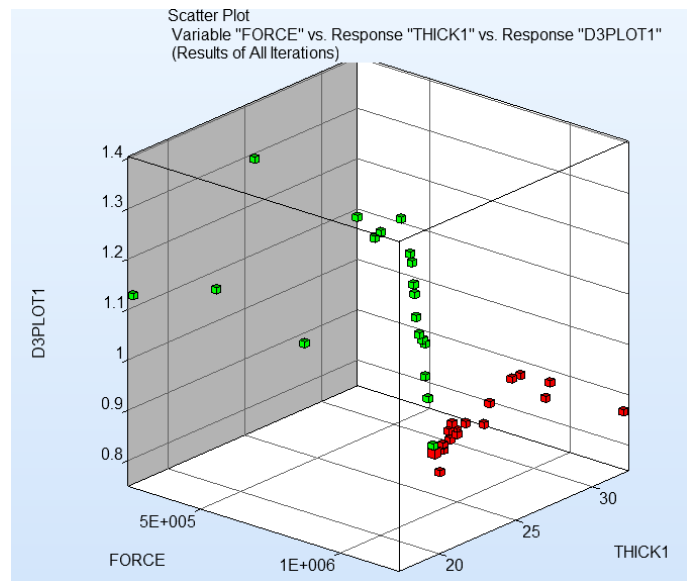


Рисунок 73 - Точки рассеяния в 3D

В отличие от графика рассеяния, с помощью параллельного координатного графика можно визуализировать все полученные результаты. Каждое измерение визуализируется на вертикальной оси, и каждая точка данных показана в виде полилинии, соединяющей соответствующие значения по вертикальной оси (рисунок 74). Границы изменения параметров могут быть изменены с помощью ползунков на концах каждой вертикальной оси. Точки попавшие в указанные границы окрашиваются в синий цвет, а не попавшие - в серый цвет. При выборе точки или полилинии через нее проходящую, они окрашиваются в фиолетовый цвет и отображаются соответствующие значения для каждого объекта, изображенного на графике.

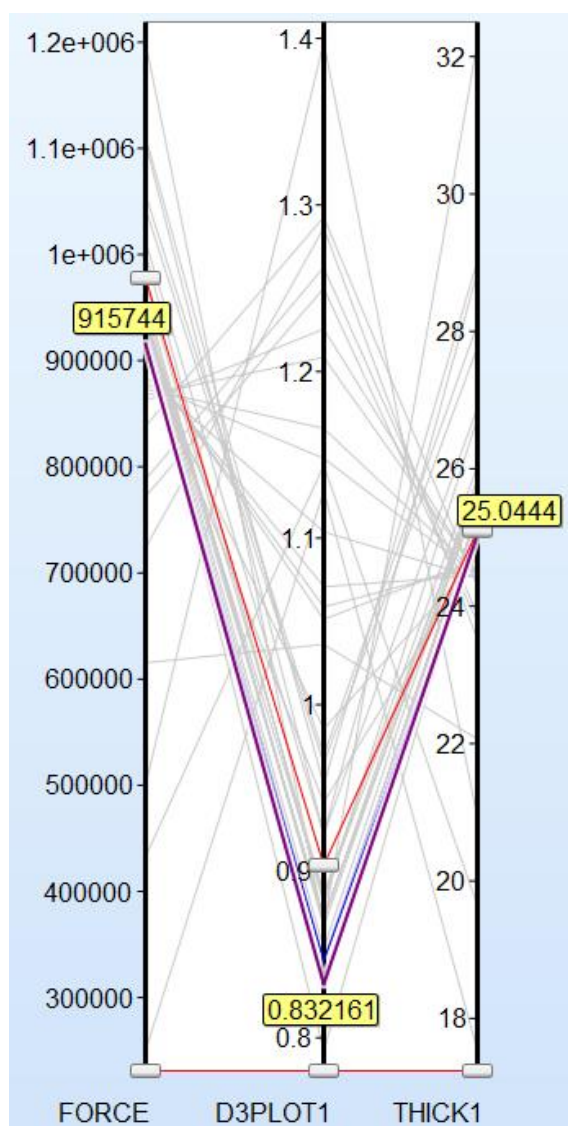


Рисунок 74 - Оптимальное решение на параллельном графике

Результаты моделирования каждой из 36 реализаций могут быть просмотрены в etaPostProcessor 2.0. Анализ на упругое пружинение при оптимальном значении усилия прижима представлен на рисунке 75.

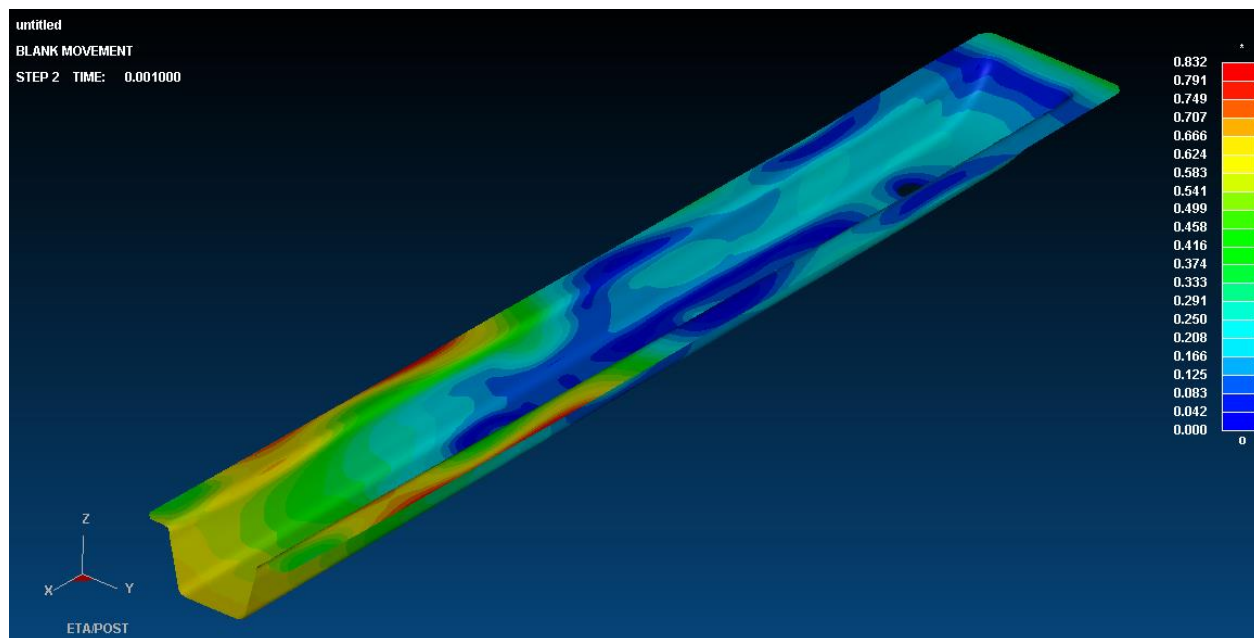


Рисунок 75 – Величина упругого пружинения после оптимизации

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Разработана математическая модель оптимизации (целевая функция, переменная проектирования и ограничения) процесса штамповки кузовной детали автомобиля «Лонжерон пола передний».
2. Для конкретного технологического процесса разработан метод решения многокритериальных задач оптимизации процессов листовой штамповки.
3. Разработанный метод был применен при постановке задачи оптимизации в CAE - программе LS-OPT.
4. Подробно описана методика подготовки данных процесса оптимизации и анализа результатов в LS-OPT.
5. В результате процесса оптимизации была получена годная деталь «Лонжерон пола передний», отвечающая требованиям качества по величине упругого пружинения.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. LS-OPT User's Manual. A design optimization and probabilistic analysis tool for the engineering analyst/N.Stander, W.Roux, T.Goel, T.Eggleston, K.Craig. – Livermore Software Technology Corporation, 2012 – 601 с.
2. Wiebenga, J. H. Robust design and optimization of forming processes / J.H. Wiebenga. – University of Twente, Enschede, The Netherlands, 2014 – 210 с.
3. Бузлаев, Д. Проблемы и решения в моделировании листовой штамповки современных сталей и сплавов/Д.Бузлаев. – САПР и графика, апрель 2014 – 6 с.
4. Учаев, П.Н. Оптимизация инженерных решений в примерах и задачах: учебное пособие / П.Н. Учаев, С.А. Чевычелов, С.П. Учаева; под общ. ред. проф. П.Н. Учаева. – Старый Оскол: ТНТ, 2013. – 176 с.
5. Корнеенко, В.П. Методы оптимизации: Учебник / В.П. Корнеенко. – М.: Высш. шк., 2007. – 664 с.: ил.
6. Аттетков, А.В. Методы оптимизации: Учеб. для вузов / А.В. Аттетков, С.В. Галкин, В.С. Зарубин; под ред. В.С. Зарубина, А.П. Крищенко. - 2-е изд., стереотип. - М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2003. -440 с.
7. Рейзлин, В.И. Численные методы оптимизации: учебное пособие / В.И. Рейзлин; Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского государственного университета, 2011 – 105 с.
8. Wiebenga, J. H. Optimization under uncertainty of metal forming processes - an overview: Literature report / J.H. Wiebenga, June 2010.
9. Пантелеев, А.В. Методы оптимизации в примерах и задачах: Учеб. пособие / А.В. Пантелеев, Т.А. Летова. – 2-е изд., исправл. – М.: Высш. шк., 2005. – 544 с: ил.
10. Назаренко, А.М. Эффективный алгоритм многокритериальной суррогатной оптимизации: выпуск. квал. работа на степень магистра. – Москва, 2013. – 48 с.: ил.

11. Методы одномерной оптимизации: методические указания и задания к выполнению лабораторных работ по дисциплине «Методы оптимизации»/ сост. Т. М. Попова. – Хабаровск: Изд-во Тихоокеан. гос. ун-та, 2011. – 26 с.
12. Wiebenga, J.H. Efficient Robust Optimization of Metal Forming Processes using a Sequential Metamodel Based Strategy / J.H. Wiebenga, G. Klaseboer, A.H. van den Boogaard. – University of Twente, P.O. Box 217, 7500 AE, Enschede, The Netherlands. – 8 с
13. EN 10346. Continuously hot-dip coated steel flat products - Technical delivery conditions. – Approve on 31 January 2009. – 37 с.
14. LS-DYNA. Руководство пользователя. Часть 1 / Перевод Б.Г. Рубцов. – Livermore Software Technology Corporation, 2001. – 1421 с.
15. eta/DYNAFORM User's Manual Version 5.5. – Engineering Technology Associates, 2006. – 521 с.
16. Stander, N. Springback compensation in sheet metal forming using a successive response surface method / N. Stander, M. Burger, X. Zhu and B. Maker. - Livermore Software Technology Corporation, Livermore, CA, 2002. – 10 с.
17. Bonte, M.H.A. An optimisation strategy for industrial metal forming processes: modelling, screening and solving of optimisation problems in metal forming / M. H. A. Bonte, A. H. van den Boogaard, J. Huétink. - University of Twente, Enschede, The Netherlands, 18 March 2008 – 16 с.
18. Lafon, P. Multi-objective optimization under uncertainty for sheet metal forming / P. Lafon, P. A. Adragna, V.D. Nguyen. - MATEC Web of Conferences, 2016 – 5 с.
19. Ларин, Р.М., Плясунов А. В., Пяткин А. В. Методы оптимизации. Примеры и задачи: Учеб. пособие / Новосиб. Ун-т. Новосибирск, 2003 – 115 с.
20. Коган, Д.И. Динамическое программирование и дискретная многокритериальная оптимизация: Учеб. пособие. Нижний Новгород: Изд-во ННГУ, 2004 - 255 с.

21. Singh, C.P. Study of Deep Drawing Process Parameters: A Review / C. P. Singh, G. Agnihotri International Journal of Scientific and Research Publications, Volume 5, Issue 2, February 2015 – 15 с.
22. Swiatoniowski, A. Compensation of springback deformation in sheet metal forming analysis / A. Swiatoniowski, P. Balon. - Journal of KONES Powertrain and Transport, Vol. 19, № 3 2012 – 10 с.
23. Карманов, В.Г. Математическое программирование: Учеб. пособие. – 5-е изд., стереотип. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004. – 264 с.
24. Metal Forming Optimization [Электронный ресурс]: LS-OPT Support. – Режим доступа: <https://www.lsoptsupport.com/examples/optimization/metal-forming>.
25. Yoshida, T. Springback Problems in Forming of High-Strength Steel Sheets and Countermeasures / T. Yoshida, K. Sato, E. Isogai, K. Hashimoto. – Nippon Steel Technical Report № 103 May 2013 – 10 с.
26. Романовский, В.П. Справочник по холодной штамповке / В.П. Романовский - Л. :«Машиностроение». 1979 г.- 520 с.
27. Padmanabhan, R. Influence of process parameters on the deep drawing of stainless steel, R. Padmanabhan, M.C. Oliveira, J.L. Alves, L.F. Menezes. - Finite Elements in Analysis and Design 43 (2007) 1062–1067.
28. Банди, Б. Методы оптимизации. Вводный курс: Пер. с англ. – М.: Радио и связь, 1988. – 128 с: ил.
29. Банди, Б. Основы линейного программирования: Пер. с англ. – М.: Радио и связь, 1989. – 176 с: ил.
30. Ferrero, S. Sheet metal forming optimization using ANSA and LS-DYNA / 1 S. Ferrero, C. Tribuzi, F. DiNatale. - 6 th BETA CAE International Conference - 15 с.



## ПРИЛОЖЕНИЕ А

### Результаты базового моделирования процесса штамповки в DynaForm

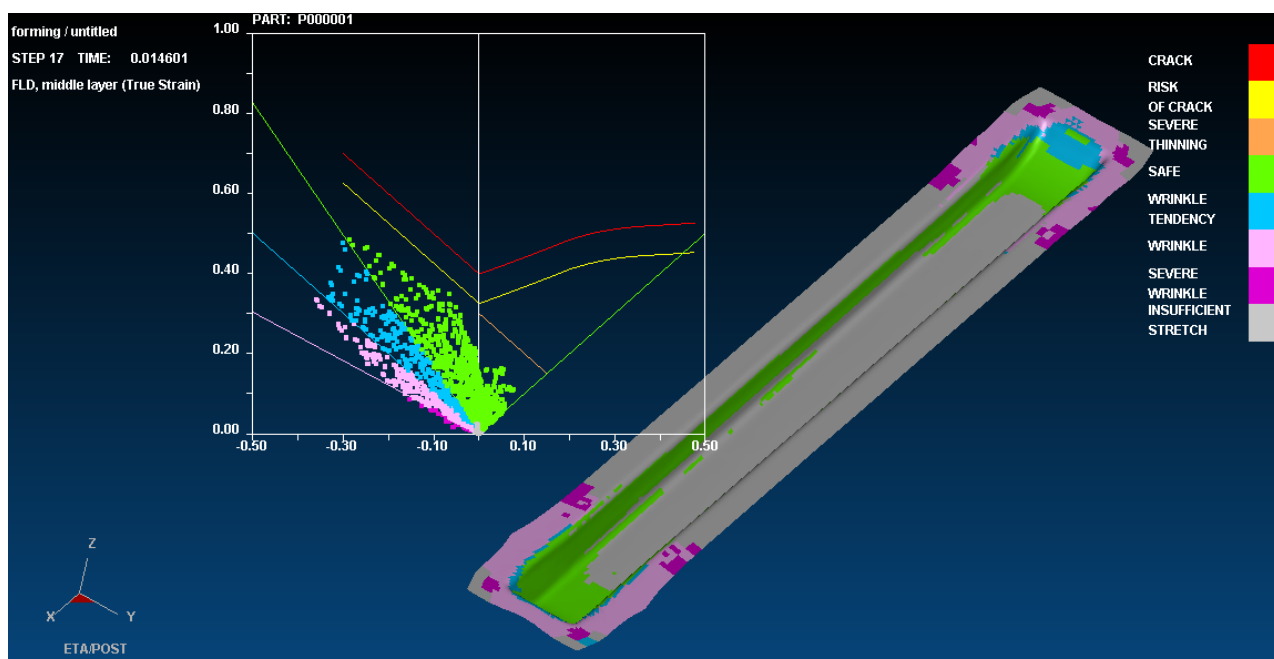


Рисунок А.1 – Анализ формуемости

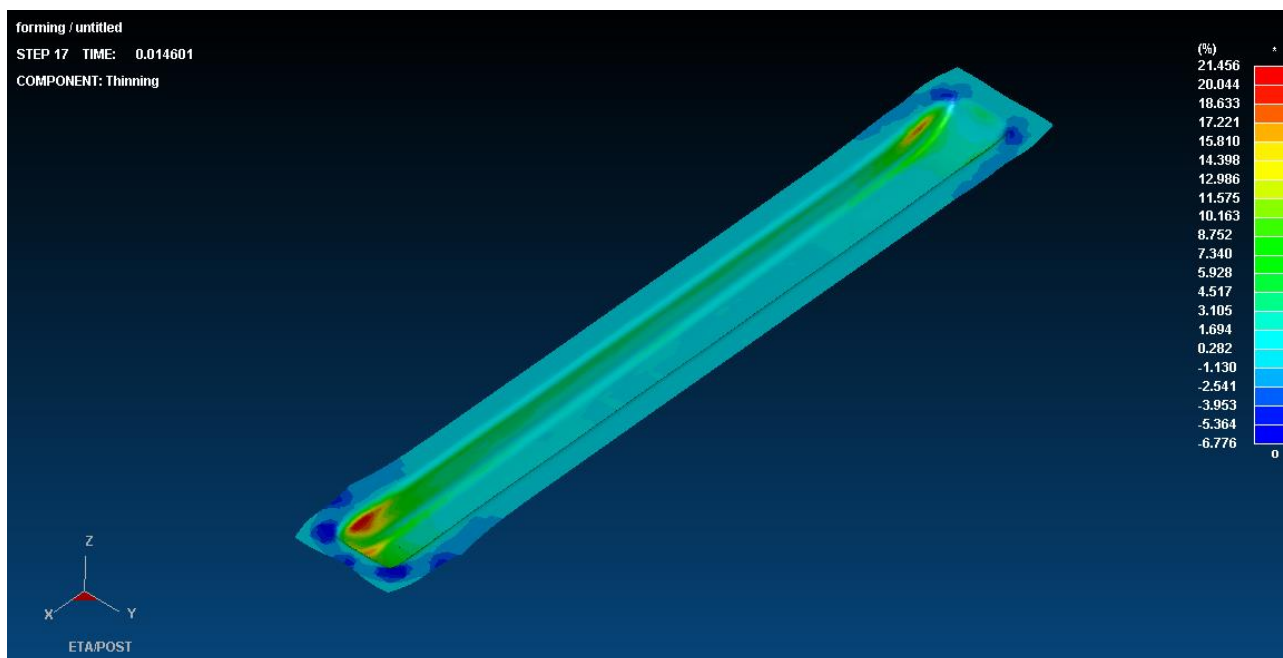


Рисунок А.2 – Утонение

## ПРИЛОЖЕНИЕ А

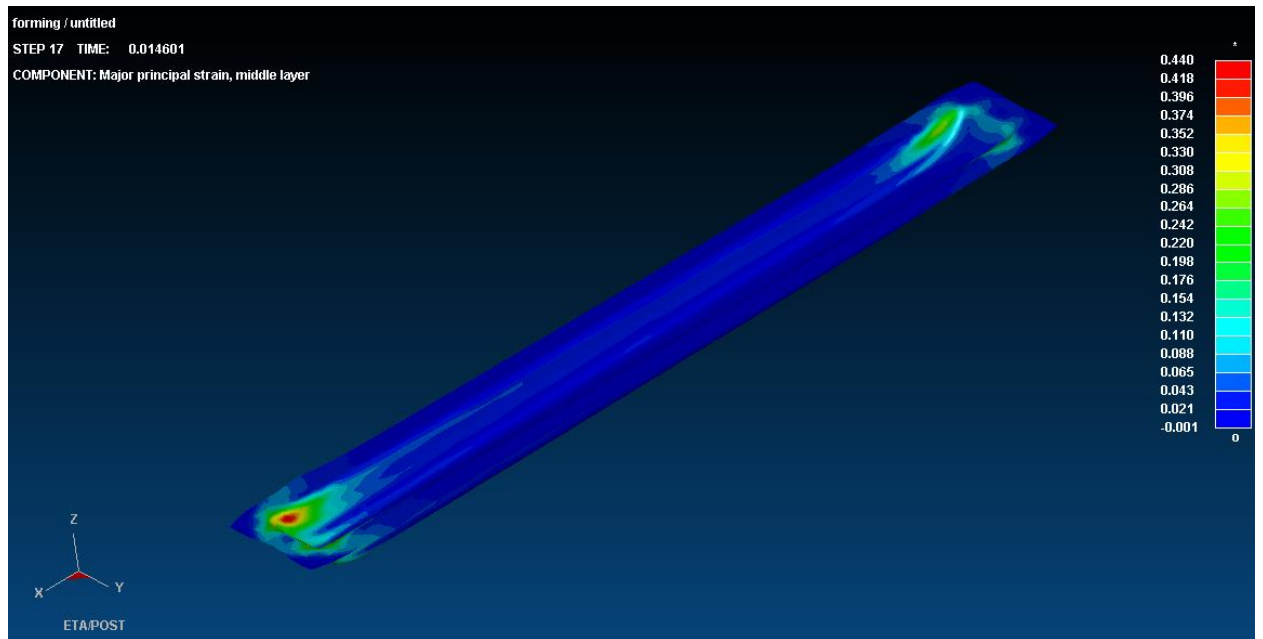


Рисунок А.3 – Наибольшая главная деформация

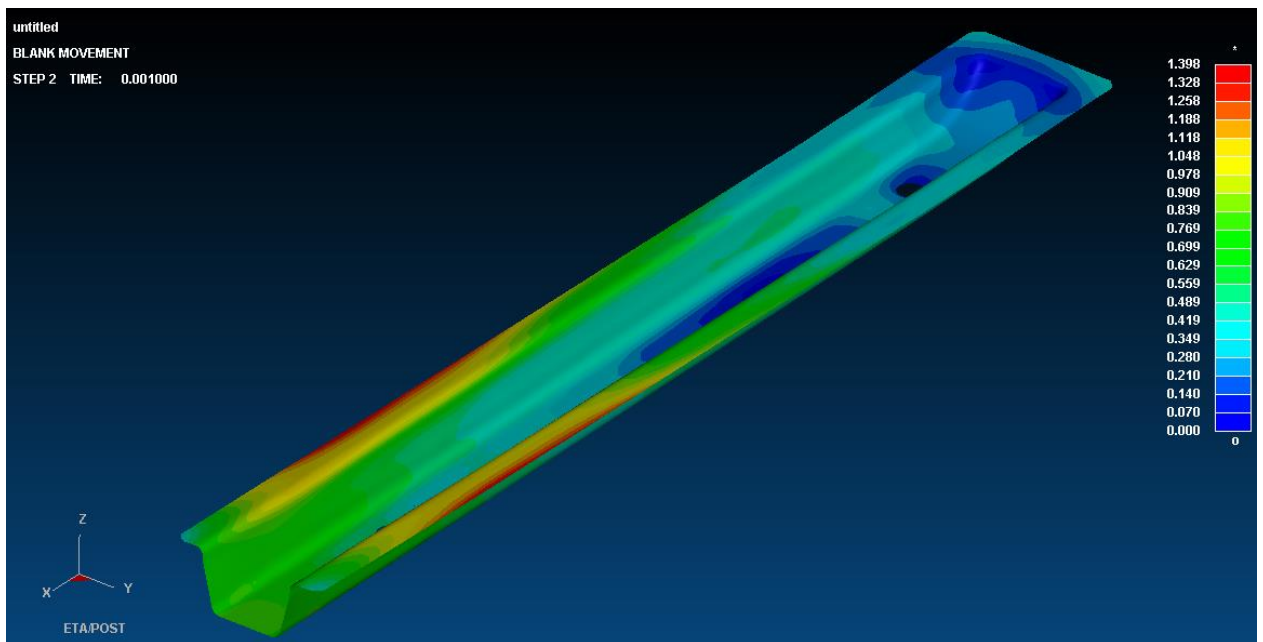


Рисунок А.4 – Упругое пружинение

# ПРИЛОЖЕНИЕ Б

## Результаты оптимизации

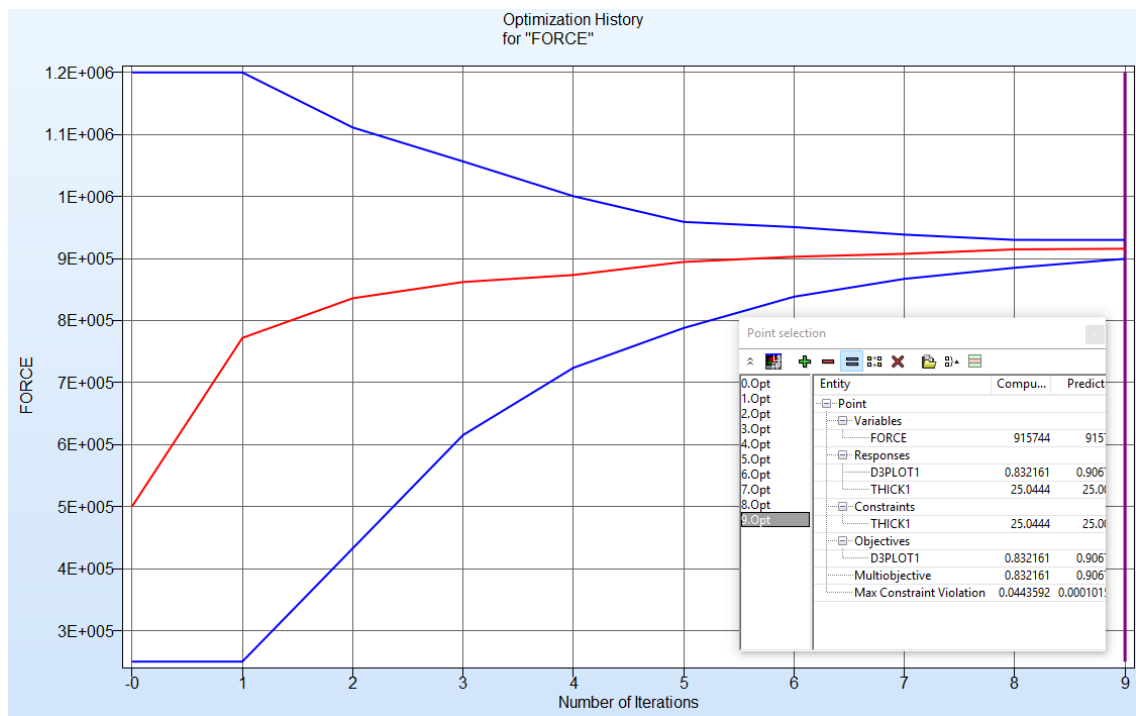


Рисунок Б.1 – Усилие прижима

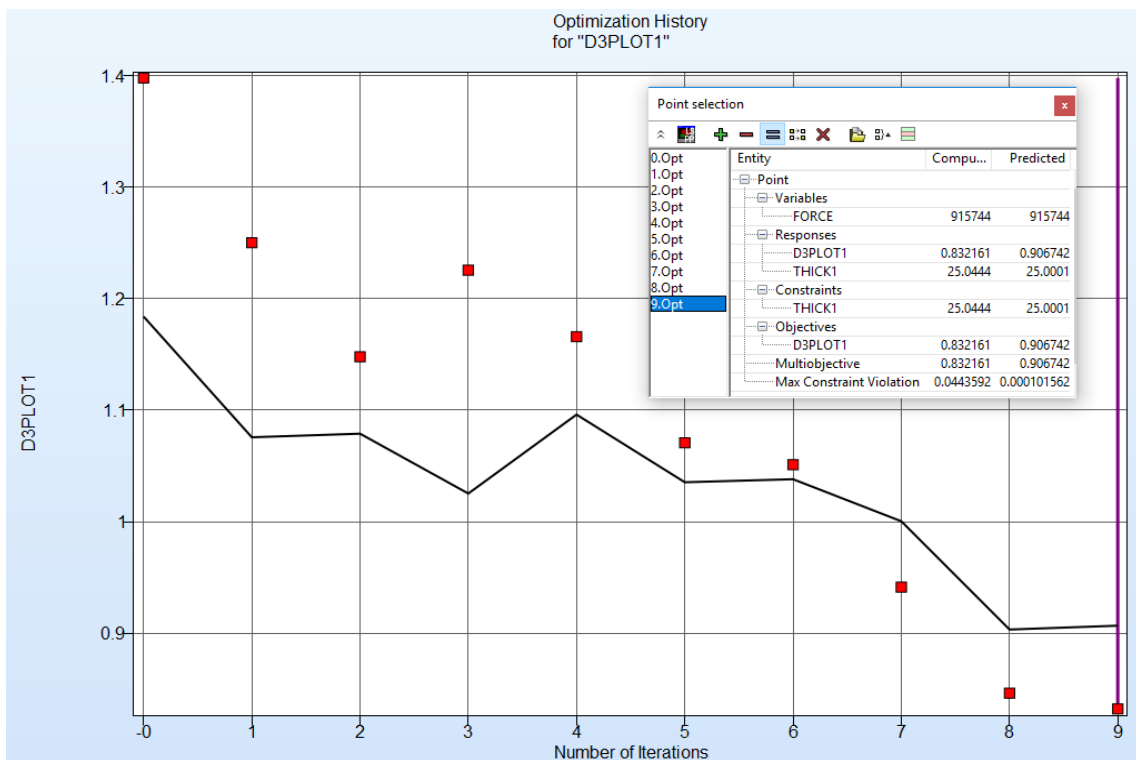


Рисунок Б.2 – Упругое пружинение

## ПРИЛОЖЕНИЕ Б

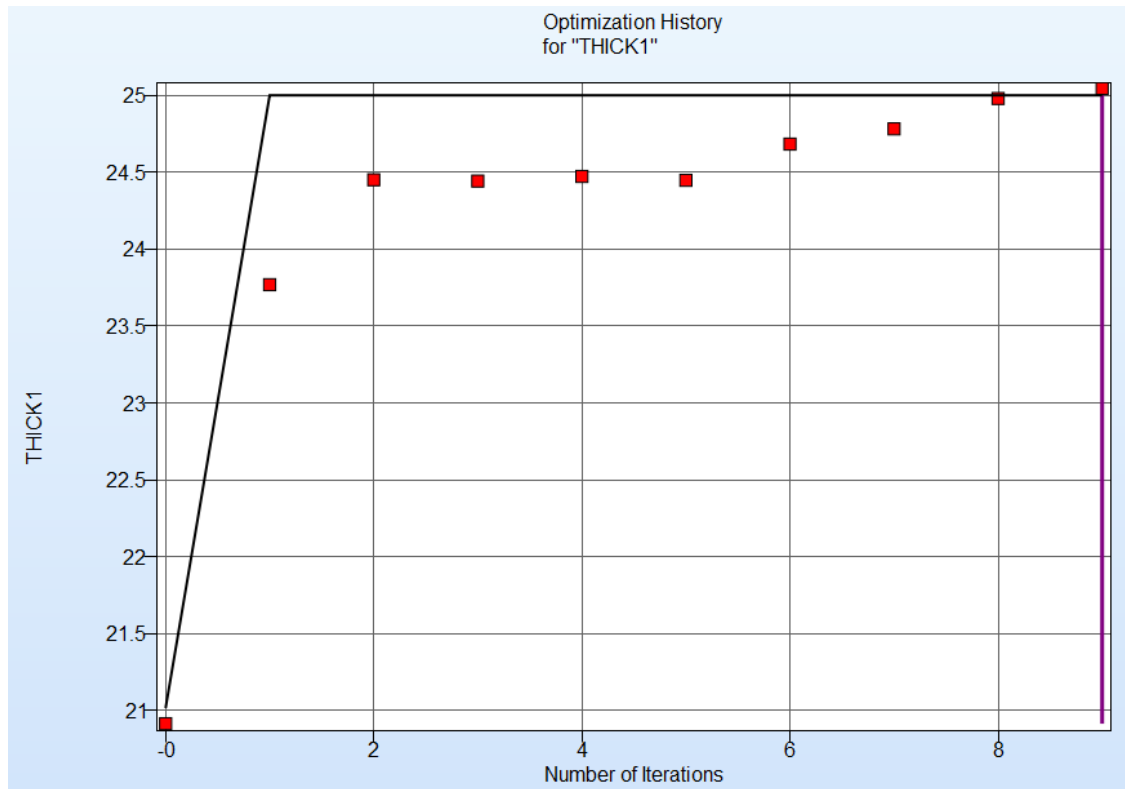


Рисунок Б.3 – Утонение

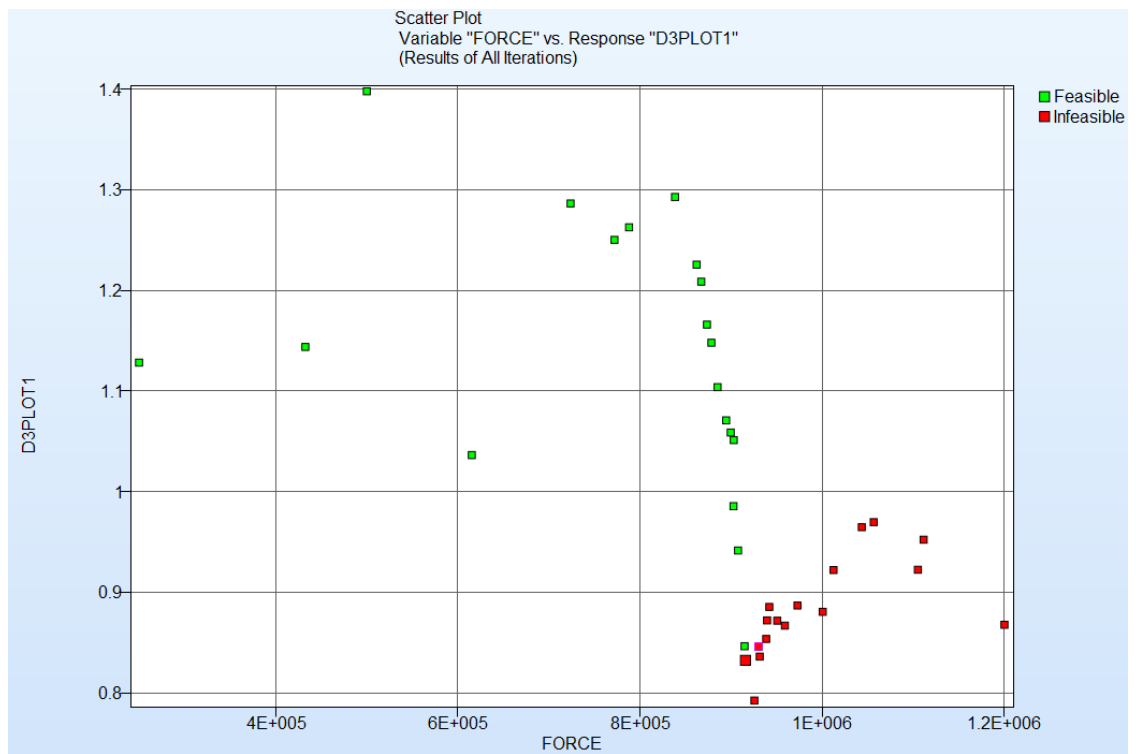


Рисунок Б.4 – Зависимость между усилием прижима и упругим пружинением

## ПРИЛОЖЕНИЕ Б

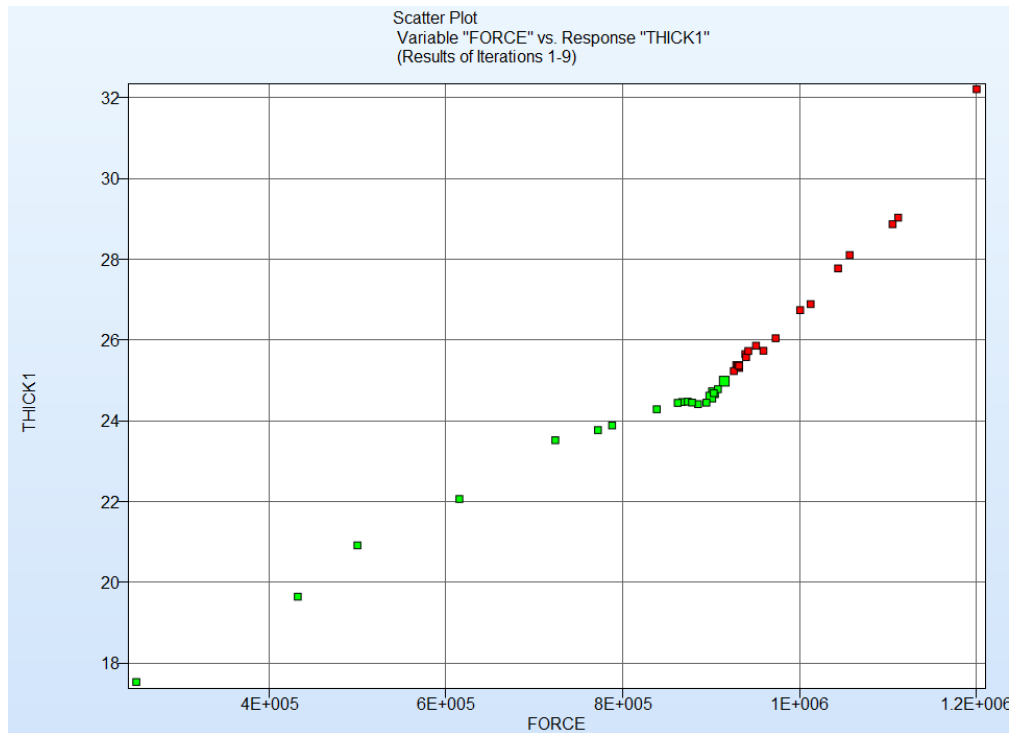


Рисунок Б.5 – Зависимость между усилием прижима и утонением

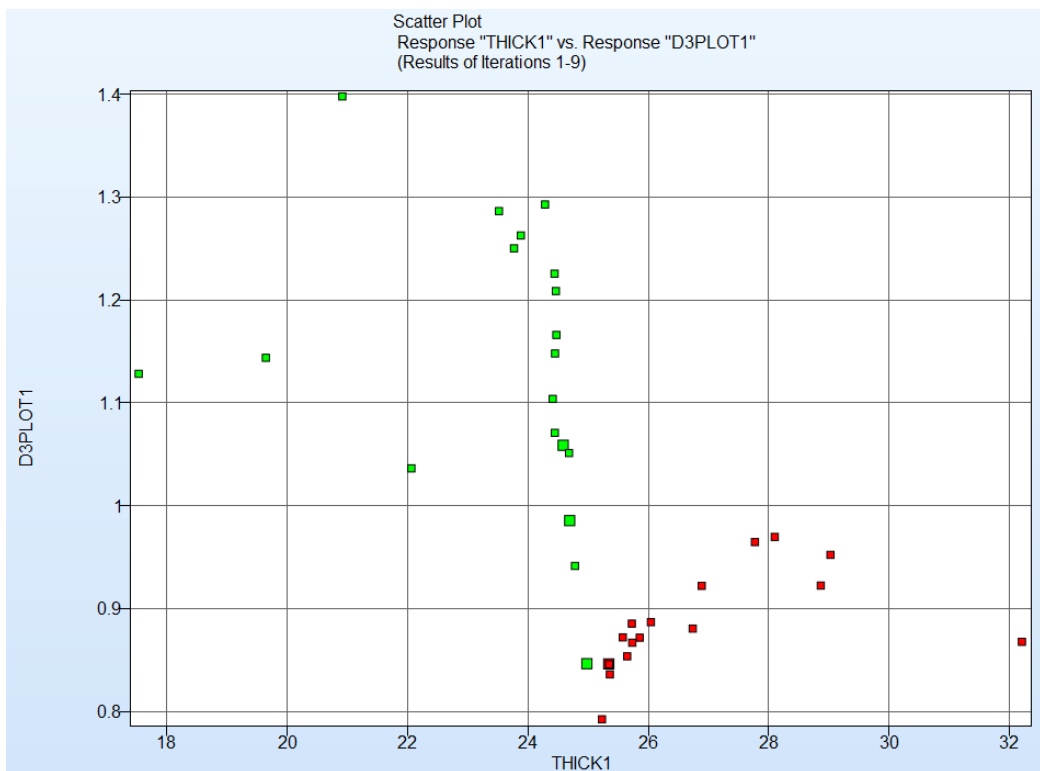


Рисунок Б.6 – Зависимость между утонением и упругим пружинением

## ПРИЛОЖЕНИЕ Б

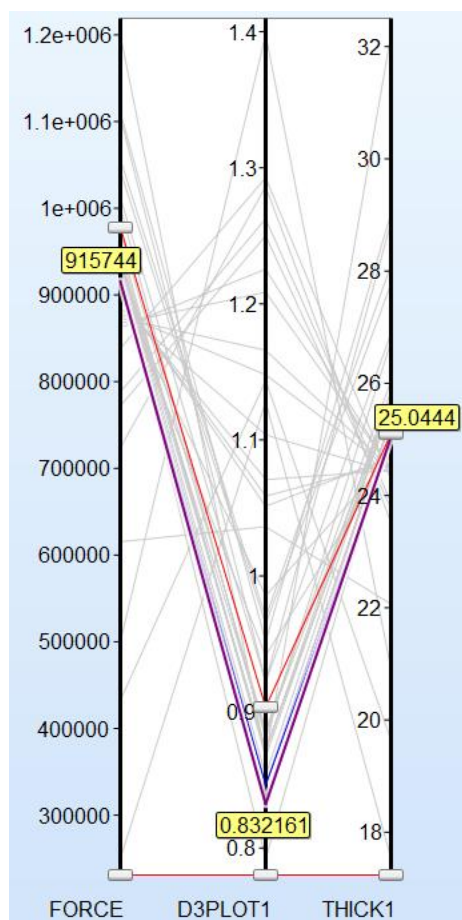


Рисунок Б.7 – Параллельный график

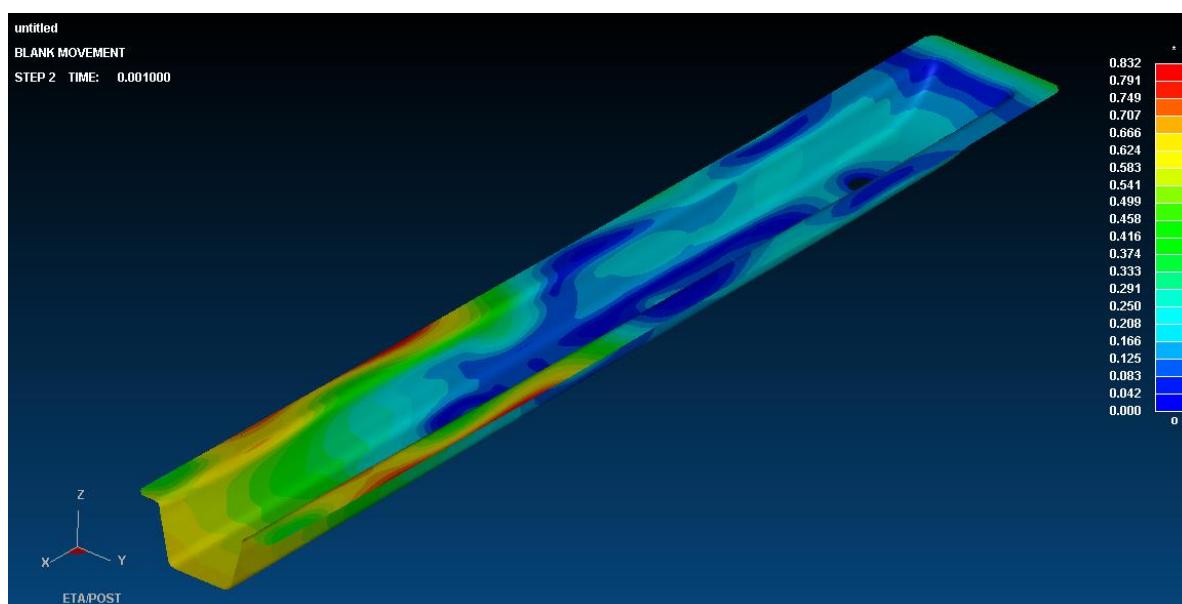


Рисунок Б.8 – Упругое пружинение