

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)

Системы автоматизированного проектирования в машиностроении

(направленность (профиль))

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

на тему **Повышение точности изготовления крупногабаритных днищ
получаемых листовой штамповкой на основе методов САЕ**

Студент	<u>Н. Е. Почекуев</u> (И.О. Фамилия)	_____	(личная подпись)
Научный руководитель	<u>Е. Н. Почекуев</u> (И.О. Фамилия)	_____	(личная подпись)
Консультанты	<u>П.А. Путеев</u> (И.О. Фамилия)	_____	(личная подпись)
	<u>П.Н. Шенбергер</u> (И.О. Фамилия)	_____	(личная подпись)

Руководитель программы
канд. техн. наук., доцент Е.Н. Почекуев
(ученая степень, звание, И.О. Фамилия) _____
(личная подпись)

« ____ » _____ 20 ____ г.

Допустить к защите

Заведующий кафедрой
д-р. техн. наук., профессор В.В. Ельцов
(ученая степень, звание, И.О. Фамилия) _____
(личная подпись)

« ____ » _____ 20 ____ г.

Тольятти 2017

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	Ошибка! Закладка не определена.
ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ.....	7
1. Обзор конструктивных особенностей и методов проектирования технологических процессов изготовления изделий типа «Днище»	7
1.1. Обзор использования и применения деталей типа днищ в промышленности.....	7
1.2. Классификация типов днищ	9
1.3. Технологические способы получения деталей типа днище.....	12
1.4. Выбор технологической схемы штамповки деталей типа днище	16
1.5. Обзор методов проектирования процессов листовой штамповки в САЕ.....	О
шибка! Закладка не определена.	
1.6. Задачи работы.....	21
2. Разработка методик экспериментальных исследований и испытание образцов.....	22
2.1. Физические, механические и реологические свойства материала АМгб.....	22
2.2. Образцы для исследования механических свойств сплава АМгбМ и построения диаграммы формуемости (FLD)	24
2.3. Оборудование и оснастка для проведения исследований.....	26
2.4. Результаты исследований	29
2.5. Выводы.....	34
3. Моделирование процесса и рабочих инструментов оснастки.....	35

3.1. Геометрическое моделирование формы, размеров инструмента и создание параметрических моделей изделия и инструментов для различных схем типовых процессов штамповки.....	35
3.2. Разработка стратегии моделирования. Расчет и определение формы и размеров первоначальной заготовки.....	40
3.3. Предварительный расчет процесса пружинения изделия «Днище».....	41
3.4. Анализ результатов предварительного моделирования процесса деформирования изделия «Днище».....	43
3.5. Анализ результатов предварительного моделирования пружинения изделия.....	46
3.6. Выводы.....	52
4. Статистический анализ процесса деформирования и разгрузки изделия «Днище» в САЕ AUTOFORM.....	53
4.1. Инженерный анализ чувствительности на основе статистики численных экспериментов процесса штамповки и разгрузки изделия «Днище» изготовленного по варианту вытяжки с перетяжным ребром.....	55
4.2. Инженерный анализ чувствительности на основе статистики численных экспериментов процесса штамповки и разгрузки изделия «Днище» изготовленного по варианту вытяжки с перетяжным порогом.....	86
4.3. Инженерный анализ чувствительности на основе статистики численных экспериментов процесса штамповки и разгрузки изделия «Днище» изготовленного по варианту вытяжки с цилиндрической стенкой.....	101
4.4. Выводы и результаты.....	115
5. Оптимизация технологического процесса изготовления изделия «Днище» в САЕ AUTOFORM.....	116

5.1. Оптимизация технологического процесса изготовления изделия «Днище» процесса штамповки и разгрузки изделия «Днище» изготовленного по варианту вытяжки с перетяжным ребром.....	117
5.2. Оптимизация технологического процесса изготовления изделия «Днище» процесса штамповки и разгрузки изделия «Днище» изготовленного по варианту вытяжки с перетяжным порогом.....	Ошибка! Закладка не определена.
5.3. Оптимизация технологического процесса изготовления изделия «Днище» процесса штамповки и разгрузки изделия «Днище» изготовленного по варианту вытяжки с цилиндрической стенкой.....	Ошибка! Закладка не определена.
5.4 Выводы и результаты.....	Ошибка! Закладка не определена.
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	Ошибка! Закладка не определена.
СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ.....	Ошибка! Закладка не определена.
Приложение 1. Графики регрессионных зависимостей чувствительности, диаграммы Паретто для 8 зон и вариаций параметров вытяжки с порогом....	148
Приложение 2. Графики регрессионных зависимостей чувствительности, диаграммы Паретто для 4-х зон и вариаций параметров вытяжки с бортиком.....	168

ВВЕДЕНИЕ

Тенденции развития современного машиностроения связаны с повышением качества изделий и машин, которые производятся на предприятиях и заводах. Важнейшей характеристикой изделия и машины является точность изготовления. Повышение точности снижает трудоемкость изготовления изделия и повышает его функциональные показатели.

Величина затрат возрастает при создании крупногабаритных изделий. Повышение точности крупногабаритных днищ приводит к увеличению эффективности производства в машиностроительной, судостроительной, авиационной, космической, химической, нефтеперерабатывающей, фармацевтической и пищевой промышленности.

Проектирование технологических процессов и оснастки листовой штамповки для изготовления днищ с заданными показателями качества и точности являются актуальной задачей.

Точность крупногабаритных изделий зависит от большого количества факторов и показателей. Они характеризуются механическими свойствами материала и их изменчивостью в процессе листовой штамповки, технологическими параметрами процесса вытяжки и обрезки, размерами штамповой оснастки и заготовки. Исследованию операции вытяжки, как основного процесса формообразования днищ посвящено большое количество работ различных авторов, как в России, так и за рубежом. Они в основном касаются определения энергосиловых параметров и предельных возможностей операции вытяжка. Значительно меньше работ посвящено изучению влияния технологической наследственности на показатели качества и точности получаемых изделий. Разработка методов управления процессами вытяжки крупногабаритных деталей важное направление совершенствования технологии холодной листовой штамповки.

Объектом исследования является разработка методов проектирования и управления технологическим процессом изготовления высокоточных крупногабаритных днищ с ограничениями по утонению и пружинению.

Реальные условия производства характеризуются отличием механических показателей материалов, параметров технологических процессов и величин размеров оснастки и заготовки от номинальных значений, полученных в процессе проектирования. Зачастую это может привести к получению бракованных изделий, качество и точность которых не удовлетворяет техническим требованиям. Изменение и отклонения показателей, параметров и размеров в процессе производства носит стохастический характер и не может быть учтено в детерминированных методах расчета и проектирования, которые используются на практике для разработки технологии и оснастки изготовления крупногабаритных днищ. Для выявления причинно-следственных связей таких явлений, которые определяют получение точных и качественных изделий необходимо использовать методы теории вероятности, статистики и стохастических процессов.

Предметом исследования в работе будет являться влияние случайных изменений показателей, параметров, размеров и свойств материалов процесса и оснастки на качество и точность получаемых крупногабаритных изделий.

К основным показателям качества при штамповке днищ будут относиться отсутствие разрывов, утонений, складкообразования, волнистости. Точность этих изделий будет характеризоваться предельными разбросами утонений стенки и отклонениями от номинальных размеров в результате пружинения.

Надежные результаты статистического исследования стохастических (случайных) процессов можно получить на основе репрезентативных выборок, характеристика достоверности которых определяется количеством экспериментов (испытаний). Для нестационарного, многофакторного, нелинейного процесса вытяжки листовых материалов решение такой задачи осуществимо только при использовании вычислительной техники в среде

САПР. Работа проводилась с помощью численного эксперимента на основе метода конечных элементов и статистики. Применялись методы поиска оптимальных решений для многокритериальных задач с ограничениями.

Научной новизной являлась разработка методики поиска оптимальных решений и нахождения способов управления вытяжки с учетом реальных свойств материалов на основе статистических закономерностей и чувствительности показателей качества и точности от параметров процесса.

Цель работы заключалась в повышении эффективности технологического процесса штамповки крупногабаритных высокоточных днищ, которое позволит сократить расходы на проектирование, изготовление, эксплуатацию технологической оснастки в условиях мелкосерийного производства за счет расчета оптимальных параметров процесса изготовления крупногабаритных, высокоточных днищ на основе современных методов численного анализа и САЕ.

Результатами работы являются разработанные в среде САПР оптимальные режимы изготовления высокоточных крупногабаритных изделий типа днище.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

1 Обзор конструктивных особенностей и методов проектирования технологических процессов изготовления изделий типа «Днище»

1.1. Область использования и применения деталей типа днищ в современной промышленности

Днищами называют детали, выполненные из листа, сферической, эллиптической, конической форм, высота которых не превышает габаритные размеры в плане. Детали типа днищ служат для создания баллонов, аппаратов, емкостей, котлов, резервуаров, цистерн, баков [1].

Днища необходимы во многих областях современной промышленности, таких как машиностроение, судостроительная, авиационная и космическая промышленности, химическая, нефтеперерабатывающая, фармацевтическая, пищевая промышленности, газовая и атомная промышленности, трубопроводы, станкостроение и энергомашиностроение.

Детали типа днищ применяются в условиях повышенного давления и в вакууме, в активных химических условиях, в качестве заглушек, крышек, глухих фланцев аппаратов, сосудов и цистерн, необходимых для хранения и перевозки газообразных, вязких, сыпучих и жидких веществ.

Геометрическая форма днищ минимизирует площадь поверхности сосуда при равном значении объема сосуда, что позволяет снизить материалоемкость изготовления. Днища подвергаются избыточным давлениям и воздействию активных сред, из-за чего в материале появляются растягивающие напряжения. Форма днища и толщина материала должны обеспечивать повышенную прочность, жесткость, равномерное распределение внутренних напряжений в детали.

Днища крепятся к сосуду или аппарату сваркой или с помощью фланцевого соединения болтами. В зависимости от условий применения днища дополнительно обрабатывают. В качестве примеров обработки выделяют шлифование, полирование, покрытие, обработку кромок, покраску, травление, защитную и пескоструйную обработки [1,2].

1.2. Классификация типов днищ

Детали типа днищ можно описать по набору геометрических параметров [1]. Для описания формы детали можно использовать классификацию, сведенную к морфологической таблице признаков геометрии формы детали (Табл. 1.1.).

Основные геометрические элементы формы днища определяются терминами борт и стенка (Рис 1.1). Нижняя часть поперечного сечения днища называется стенкой. Бортом называется криволинейный контур того же сечения, отличный по кривизне от стенки. Если кривизна сечения постоянная в любой точке, то считается, что днище борта не имеет.

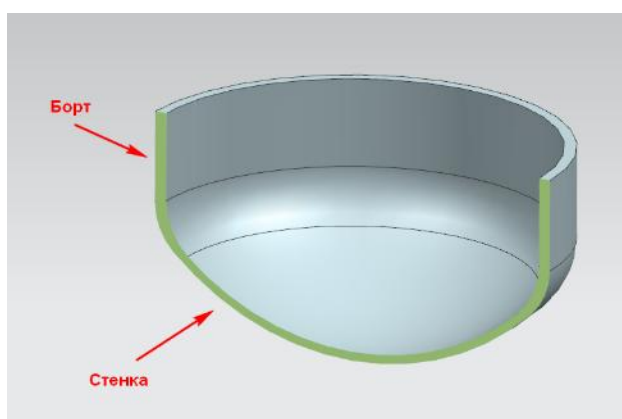


Рисунок 1. 1 – Элементы геометрии днища

Бортом одинарной кривизны называется борт, имеющий в поперечном сечении прямолинейную образующую (Рисунок 1.2, а). Борт одинарной кривизны можно называть прямолинейным.

Бортом двойной кривизны называется борт, кривизна поперечного сечения которого отличается от прямой линии (Рисунок 1.2, б). Борт двойной кривизны можно назвать криволинейным.

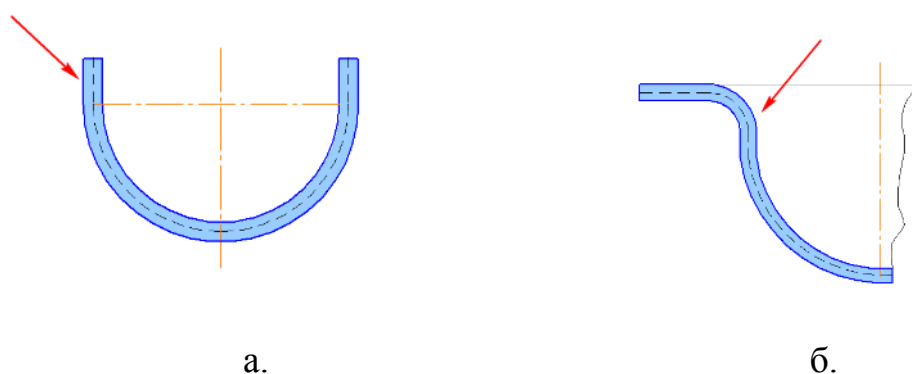


Рисунок 1.2

Бортом или стенкой однозначной кривизны называется борт или стенка, сечение которого имеет одинаковую кривизну. Пример борта и стенки однозначной кривизны в плане приведен на рис.1.3, а. Бортом или стенкой двузначной кривизны называется борт или стенка, кривизна сечение которого непостоянна (рис. 1.3, б).

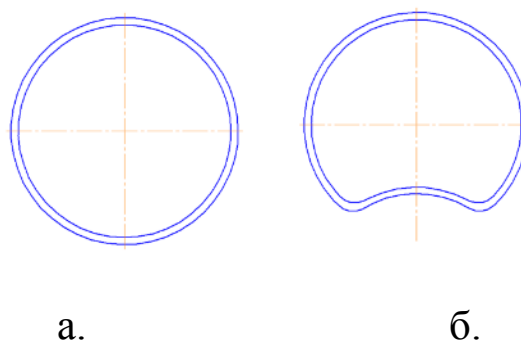


Рисунок 1.3

Параметр полноты контура характеризуется отношением высоты борта

Днище, x_0	
Признак,	Вид признака, обозначение

или стенки к его диаметру. Борт или стенка полного контура имеет отношение $H \geq 0,5D_h$, неполного контура $H < 0,5D_h$

Таблица 1.1.

обозначение					
Наличие борта, x_1	без борта, x_{11}		с бортом, x_{12}		
Кривизна борта в поперечном сечении, x_2	одной кривизны, x_{21}		двойной кривизны, x_{22}		
Полнота контура борта, x_3	неполного контура, x_{31}		полного контура, x_{32}		
Наличие рельефа борта, x_4	без рельефа, x_{41}		с рельефом, x_{42}		
Кривизна борта, x_5	однозначной кривизны, x_{51}		двузначной кривизны, x_{52}		
Форма стенки, x_6	с плоской стенкой, x_{61}		с криволинейной стенкой, x_{62}		
Параметр кривизны стенки, x_7	двузначной кривизны, x_{71}		однозначной кривизны, x_{72}		
Полнота контура стенки, x_8	неполного контура, x_{81}		полного контура, x_{82}		
Наличие отверстий, подштамповок, рельефов, x_9	глухие, x_{91}	с отверстиями, x_{92}	с отбортованными отверстиями, x_{93}	с рельефом, x_{94}	с сочетанием различных элементов, x_{95}

Морфологическая матрица детали типа днища составлена по конструктивно-геометрическим признакам на основе табл. 1.1:

$$x_0 = \begin{matrix} x_{11}x_{12} \\ x_{21}x_{22} \\ x_{31}x_{32} \\ x_{41}x_{42} \\ x_{51}x_{52} \\ x_{61}x_{62} \\ x_{71}x_{72} \\ x_{81}x_{82} \\ x_{91}x_{92}x_{93}x_{94}x_{95} \end{matrix}$$

1.3. Технологические способы получения деталей типа днище

В настоящее время днища получают с помощью следующих методов: холодная штамповка, горячая штамповка, сверхпластическая деформация и фланжирование (холодная раскатка) [1,2].

Для крупногабаритных толстостенных изделий можно использовать горячую штамповку. Для ряда алюминиевых, титановых и магниевых сплавов применяют сверхпластическую деформацию. Метод фланжирования выполняют на специальном оборудовании и часто используют для оформления фланцев и разнообразных бортиков.

Основные параметры технологических процессов холодной штамповки получения днищ сведены в морфологическую таблицу 1.2. Выбор схемы штамповки зависит от ряда параметров: материала, относительных размеров и геометрической формы днища, параметров оборудования, серийности производства. Следует отметить, что все методы штамповки с помощью эластичных, жидких и газообразных сред, предназначены для мелкосерийного и единичного производства. В случае использования жесткого пуансона и жесткой матрицы изготовление деталей возможно и при крупносерийном или массовом производстве.

Таблица 1.2.

Схема штамповки s_0			
Признак, обозначение	Вид признака, обозначение		
Материал пуансона, p_1	жесткий, p_{11}	эластичный, жидкостной, газовый, магнитное поле, p_{12}	смешанный, p_{13}
Материал матрицы, m_1	жесткий, m_{11}	эластичный, жидкостной, газовый, магнитное поле, m_{12}	смешанный, m_{13}

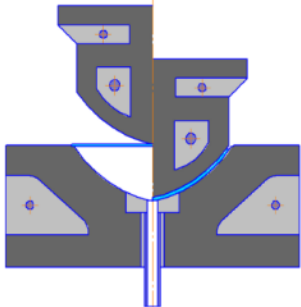
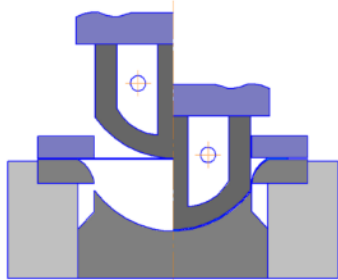
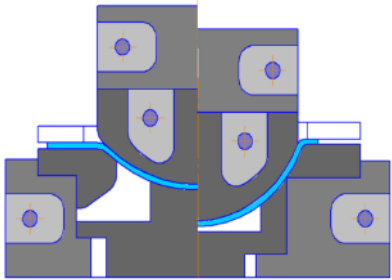
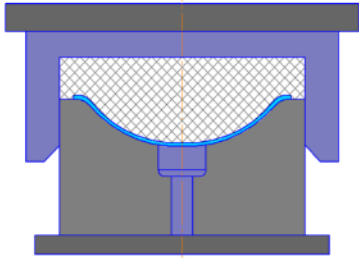
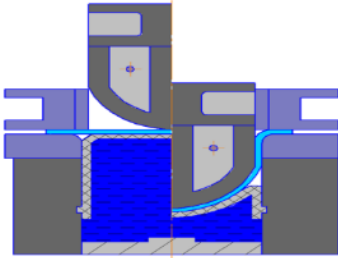
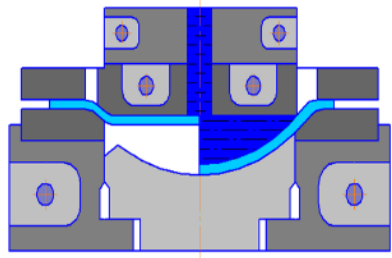
Операция, o_1	формовка, o_{11}	местная вытяжка, o_{12}	вытяжка , o_{13}	обжим, o_{14}	обтяжка, o_{15}
Количество операций, n_1	однопереходная, n_{11}			многoperеходная, n_{12}	
Термообработка, t_1	с окончательной термообработкой, t_{11}			без окончательной термообработки, t_{12}	
Промежуточная термообработка, tb_1	с промежуточной термообработкой, tb_{11}			без промежуточной термообработки, tb_{12}	
Тип вытяжки, fr_1	прямая, fr_{11}		реверсивная, fr_{12}	обратная, fr_{13}	
Наличие предварительного набора, pn_1	с предварительным набором металла, pn_{11}			без предварительного набора металла, pn_{12}	
Наличие прижима, bn_1	без прижима, bn_{11}			с прижимом, bn_{12}	
Характер прижима, f_1	с интенсивным перемещением фланца, f_{11}			с жестко заземленным фланцем, f_{12}	
Тип заготовки, bl_1	плоская, bl_{11}			предварительно штампованная, bl_{12}	
Воздействие на стенку, s_1	без подпора стенки, s_{11}			с подпором стенки, s_{12}	
Наличие последующей механической обработки, mo_1	с последующей механической обработкой, mo_{11}			без последующей механической обработки, mo_{12}	

Морфологическая матрица возможных технологических схем штамповки формируется на основе табл.1.2:

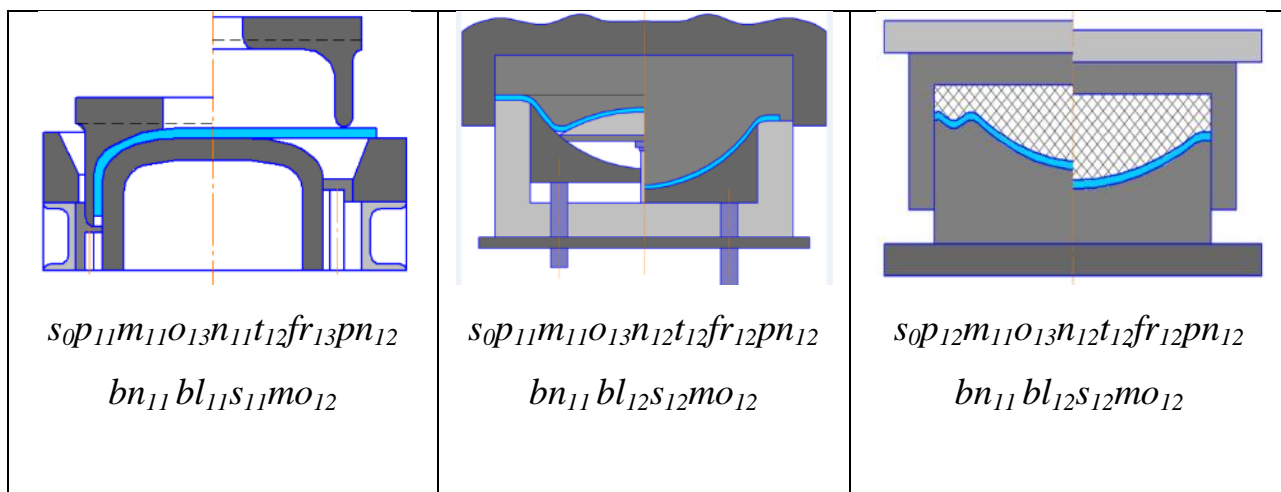
$$s_0 = \begin{matrix} p_{11}p_{12} \\ m_{11}m_{12} \\ o_{11}o_{12}o_{13}o_{14}o_{15} \\ n_{11}n_{12} \\ t_{11}t_{12} \\ tb_{11}tb_{12} \\ fr_{11}fr_{12}fr_{13} \\ pn_{11}pn_{12} \\ bn_{11}bn_{12} \\ f_{11}f_{12} \\ bl_{11}bl_{12} \\ s_{11}s_{12} \\ mo_{11}mo_{12} \end{matrix}$$

Примеры возможных схем технологических процессов штамповки днищ представлены в таблице 1.3

Таблица 1.3

 <p>$s_0p_{11}m_{11}o_{13}n_{11}t_{12}fr_{11}pn_{12}$ $bn_{11}bl_{11}s_{12}mo_{12}$</p>	 <p>$s_0p_{11}m_{11}o_{13}n_{11}t_{12}fr_{11}pn_{12}$ $bn_{12}bl_{11}s_{12}mo_{12}$</p>	 <p>$s_0p_{11}m_{11}o_{13}n_{12}t_{12}fr_{11}pn_{11}$ $bn_{12}bl_{12}s_{12}mo_{12}$</p>
 <p>$s_0p_{12}m_{11}o_{13}n_{11}t_{12}fr_{11}pn_{12}$ $bn_{12}bl_{11}s_{12}mo_{12}$</p>	 <p>$s_0p_{11}m_{12}o_{13}n_{11}t_{12}fr_{11}pn_{12}$ $bn_{12}bl_{11}s_{12}mo_{12}$</p>	 <p>$s_0p_{12}m_{11}o_{13}n_{12}t_{12}fr_{11}pn_{12}$ $bn_{12}bl_{12}s_{12}mo_{12}$</p>

Продолжение таблицы 1.3



Выше перечисленные методы обладают как преимуществами, так и недостатками.

Горячая листовая штамповка крупногабаритных днищ требует специального оборудования и оснастки. Она является трудоемкой и нуждается в значительных затратах энергии. Неравномерные поля деформаций и температур приводят к короблению детали. Она применяется обычно для штамповки толстостенных днищ.

Использование эффекта сверхпластичности позволяет снизить величину усилия штамповки, увеличить степень деформации. Однако деформация по толщине заготовки часто выходит за пределы допустимых значений.

Холодная раскатка днищ (фланжирование) производится на специальном оборудовании. Локальная деформация заготовки не требует приложения больших усилий. Однако этот способ весьма трудоемкий обычно используется для оформления стенок и фланцев.

Для предприятия обладающего мощным гидравлическим прессом двойного действия наиболее приемлемым является способ холодной штамповки днищ в традиционном инструментальном штампе. Он обладает простотой и управляемостью процессом в широком диапазоне, что обеспечит получение качественной детали в заданных пределах по разнотолщинности и пружинению.

1.4. Выбор технологической схемы штамповки деталей типа днище

Деталь представляет собой днище изготовленное из материала АМгбМ, толщиной 5,3 с допуском минус 0,2 мм. Основные геометрические параметры детали (рис. 1.4):

$$\frac{S_0}{D_d} 100 = 0,221$$

$$\frac{H}{D_d} = \frac{330}{2412} = 0,137,$$

где S_0 – толщина детали, D_d – диаметр детали, H – высота детали.

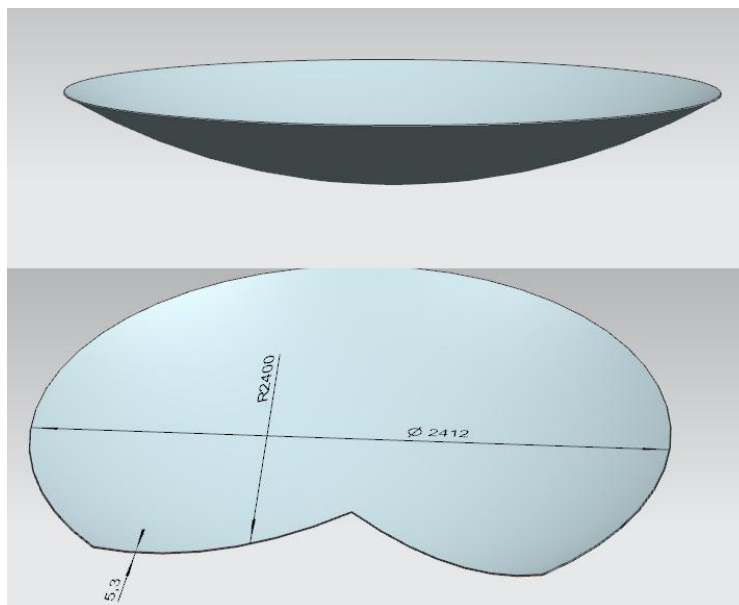


Рисунок 1.4

По приведенной выше классификации рассматриваемая деталь относится к типу «днище без борта с криволинейной стенкой однозначной кривизны неполного контура без отверстия»:

$$X_0 = X_{11}X_{62}X_{71}X_{81}X_{91} \quad (2)$$

Данная деталь относится к крупногабаритным ($D_d > 1000$ мм), тонкостенным, цельноштампованным деталям. В соответствии с приведёнными

в [1, табл. 1] величинами предельных параметров точности деталь относится к особо точным:

- допуск на диаметр $\pm 3,0$ мм;
- отклонение контура сечения детали до 3,0 мм;
- высота гофр до 1,0 мм;
- утонение до 5%.

Изготовление детали днище указанной конфигурации с удовлетворением указанным нормам точности целесообразно производить вытяжкой жёстким инструментом упор, т.к. вытяжка "на провал" даёт меньшую точность. Использование эластичного, жидкостного, газового и смешанного инструмента требует дополнительное специальное оборудование.

Операция обжима и раскатки применяется для получения днищ с бортом. Деталь днище борта не содержит, поэтому схемы обжима не будут рассматриваться в дальнейшем.

Операцией формовки получают детали преимущественно тонкостенные неглубокие, чей диаметр не превышает 2000 мм. Максимальный диаметр днища для радиуса сферы 2400 мм составляет

$$D_{\text{отр}} = \overline{R_{\text{сфер}} \cdot s_0} = 1322 \text{ мм} < 2412 \text{ мм}.$$

Следовательно, для изготовления указанного днища формовка не будет рассматриваться.

Местная вытяжка используется для получения деталей, у которых параметр $\frac{s}{D_0}$ меньше 0.1. Обратная вытяжка применяется для получения деталей с параметром и $\frac{s_0}{D_0} 100 = 1$. Параметры изучаемого днища $\frac{s_0}{D_0} 100 = 0,221$ и $\frac{s}{D_0} = 0,137$, следовательно, технологические схемы местной и обратной вытяжки рассматриваться не будут.

При изготовлении тонкостенных днищ сферической формы наблюдается интенсивное образование складок. Для предотвращения гофрообразования рекомендуется применять многoperеходную вытяжку или большое натяжение заготовки в процессе деформации (например при помощи перетяжных ребер и порогов) [3,4,5]. Однако, для алюминиевых сплавов характерно интенсивное упрочнение в процессе деформирования, что может потребовать межоперационную термообработку. [6,7,8]

Штамповка рассматриваемого днища будет выполняться на прессе двойного действия. Данное оборудование позволяет проводить как прямую, так и реверсивную вытяжку. На оборудовании такого типа возможно производство вытяжных переходов трех типов :

1. С фланцем ;
2. С бортом и фланцем ;
3. С порогами .

1.5. Обзор методов проектирования процессов листовой штамповки в САЕ

Современные методы проектирования и разработки процессов листовой штамповки основаны на интенсивном использовании программных продуктов САПР.

Обзор развития методов проектирования технологических процессов листовой штамповки в САПР показывает, что можно выделить три направления:

- 1) разработка технологии штамповки в системах CAD;
- 2) разработка технологии штамповки в системах CAE;
- 4) разработка технологии штамповки в системах CAD/CAE/

Системы САПР "высокого" уровня ориентируются на комплексные методы создания технологий листовой штамповки, которые используют как модели CAD, так и модели CAE на основе конечных элементов. К таким

система можно отнести NX Siemens PLM Software, CATIA Dassault Systèmes, CREO Parametric Technology Corporation [9].

Например, NX Siemens PLM Software позволяет создавать модели CAD заготовок и детали различных операций технологии листовой штамповки в приложениях Листовой металл, Моделирование, Сборки и Проектирование штампов, Мастер процессов проектирования штампов последовательного действия. В версии NX 9.0 для определения размеров заготовки, оценки полей распределения напряжений, деформаций и технологических параметров используются функционалы и приложения, основанные на методе конечных элементов - Одношаговый анализ формуемости, NX Advanced Simulation а также система CAE LS-DYNA. Такое сопряжение методов CAD и CAE позволяет повысить качество проектов и избежать на стадии проектирования возможных ошибок. Такой метод применения систем CAD и CAE является эффективным в случае совместной разработки технологического процесса штамповки, электронных моделей поверхностей оснастки, сборки конструкции штампа и разработки ЧПУ программ для их изготовления [10].

Однако полная разработка технологических процессов листовой штамповки невозможна без целенаправленного применения систем CAE.

Проектирование процессов листовой штамповки в коммерческих пакетах CAE таких как AutoForm Engineering GmbH, DYNAFORM ETA, PAM-STAMP, HyperForm Altair Engineering, LS-Dyna LSTC является наиболее популярной практикой создания техпроцессов изготовления деталей из листа в мире. Использование этих продуктов осуществляется на протяжении всего жизненного цикла изделия (концептуальное проектирование; проектирование изделия: техническая подготовка производства; разработка и изготовление штампов; наладка техпроцессов штамповки и штампов; производство изделий; реинжиниринг) [11].

Особенное место в развитии такого подхода к использованию CAE продуктов занимает оптимизация технологических процессов штамповки и определение их устойчивости и управляемости. Для нахождения оптимальных

параметров процесса штамповки, размеров штамповой оснастки, заготовки, повышения качества, точности изделий и робастности самого процесса используют модули и приложения: AutoForm Sigma, PAM-OPT, Altair HyperStudy and OptiStruct, LS-OPT. Обычно в этих приложениях для проверки и улучшения технических показателей изделий применяется метод названный RDO (Robust Design Optimization) и основанный на теории вероятности, статистики и оптимизации [11,12].

Сущность этого метода заключается в накоплении статистики значений целевой функции, проектных переменных и ограничений в результате многократного моделирования процесса штамповки с учетом варьирования и разброса исходных значений проектных переменных и ограничений. Характер их изменения может быть случайным или определяться планируемым экспериментом. Для получения достоверных результатов на основе вероятностных методов необходимо надлежащим образом определить случайный характер их варьирования [13,14,15,16].

Стратегия обработки полученных результатов начинается с оценки достоверности полученных данных с учетом колебания и неопределенности входных значений проектных переменных и ограничений. Далее с помощью анализа чувствительности проводят оценку значимости дисперсий и влияния переменных на процесс и на целевую функцию. На основании полученных оценок значимости переменных ограничивают число варьлируемых параметров, которые влияют на результат, что позволяет снизить число расчетных вариантов поиска экстремума и как следствие трудозатраты.

Последующим шагом является нахождение оптимума целевой функции в постановке детерминистской задачи. Если оптимальное значение не достигнуто, то процесс повторяется итерационно до тех пор, пока не будут достигнуты оптимальные параметры.

К негативным моментам использования RDO и этой стратегии являются большие трудозатраты и применение производительных вычислительных ресурсов, например кластеров или сети компьютеров.

1.6. Задачи работы

Для повышения качества изготовления крупногабаритных сферических днищ и обеспечения точности изделия необходимо выполнить следующие задачи:

1. Исследование механических свойства материала АМг6М и ресурсов пластичности алюминиевого сплава.
2. Создание в приложении Die Designer модели вытяжного перехода для изготовления крупногабаритного днища и выполнение номинальной симуляции процесса вытяжки в системе CAE Autoform.
3. Исследование робастности процесса вытяжки крупногабаритных днищ для трех типов вытяжных переходов.
4. Проведение на основе статистики численных экспериментов анализа чувствительности показателя разнотолщинности днища в зависимости от проектных параметров.
5. Анализ чувствительности показателя пружинения днища на основе статистики численных экспериментов в зависимости от проектных параметров.
6. Осуществление многокритериальной оптимизации качества технологического процесса вытяжки днища для трех типов вытяжного перехода.

2. Разработка методик экспериментальных исследований и проведение экспериментов.

2.1. Физические, механические и реологические свойства материала АМг6М

Объектом исследования является технологический процесс изготовления изделия «Днище». В соответствии с техническим заданием и чертежом изделия в качестве материала используется алюминиевый сплав АМг6М толщиной 5,5. Химический состав материала по ГОСТ 4789 – 97 [20] приведен в таблице 2.1, физические свойства представлены в таблице 2.2.

Таблица 2.1.

Массовая доля элементов, %									
Fe	Si	Mn	Ti	Al	Cu	Be	Mg	Zn	Примесей
до 0,4	до 0,4	0,5-0,8	0,02-0,1	91,1-93,68	до 0,1	0,0002-0,005	5,8 – 6,8	до 0,2	Прочие, каждая 0,05, всего 0,1

Таблица 2.2.

T	E 10 ⁻⁵	α 10 ⁶	l	r	C	R 10 ⁹
Град	МПа	1/Град	Вт/(м·град)	кг/м ³	Дж/(кг·град)	Ом·м
20	0,71			2640		67,3
100		24,7	122		922	

Малочисленные сведения, известные из литературных источников [6,7,8], которые определяют механические показатели сплава АМг6М, требуют проведения дальнейшего их изучения и нахождения. Известные показатели механических свойств сплава зависят от способа изготовления проката, термообработки и температуры. Механические свойства сплава АМГ6 для различного сортамента показаны в таблице 2.3.

Таблица 2.3.

Механические свойства при $T=20^{\circ}\text{C}$ материала АМгб

Сортамент	$\sigma_{\text{в}}$ МПа	$\sigma_{\text{т}}$ МПа	δ_5 %	Термообр.
Трубы, ГОСТ 18482-79	315	145	15	
Прутки, ГОСТ 21488-97	285...315	120...155	15	
Лента нагартован., ГОСТ 13726-97	375	275	6	Без отжига
Лента отожжен., ГОСТ 13726-97	305-315	145...155	15	Отжиг
Профили, ГОСТ 8617-81	314	157	15	
Плита, ГОСТ 17232-99	275...305	130...145	4...11	

Значения показателей механических свойств (Табл. 2.3.) изменяются в большом диапазоне. Для адекватного моделирования процесса изготовления изделия "Днище" необходимо произвести исследования механических свойств образцов из партии поставки материалов.

Определению подлежат величины, которые регламентируются ГОСТ 1497 – 84 Металлы. Методы испытаний на растяжение [21,22].

К ним относятся значения:

- предела пропорциональности $\sigma_{\text{пц}}$;
- модуля упругости E ;
- предела текучести физического $\sigma_{\text{т}}$ (σ_0 , σ_{45} , σ_{90}) для образцов под углом 0° , 45° , 90° к направлению прокатки;
- предела текучести условного $\sigma_{0,2}$ ($R_{0,2}$);
- временного сопротивления $\sigma_{\text{в}}$ (R_m);
- относительного равномерного удлинения ε_p (A_g);
- относительного удлинения после разрыва $\varepsilon_{\text{ш}}$;
- относительного сужения поперечного сечения после разрыва $\psi_{\text{ш}}$.

Для нахождения вышеуказанных величин необходимо проведение исследований механических испытаний образцов, которые регламентированы ГОСТ 1497 – 84 и ГОСТ 11701 – 84 [22]. Для получения показателей следует использовать данные машинной диаграммы и результаты показаний тензометров. Испытательные машины, тензометры штангенциркули и микрометры должны соответствовать ГОСТ – 28840, 18957, 166 и 6507.

Для оценки штампуемости алюминиевого сплава АМгбМ используется FLD диаграмма (диаграмма предельной штампуемости). Построение диаграммы предельной штампуемости производится на основании экспериментальных исследований полей главных деформаций ε_1 и ε_2 для плоского напряженного состояния. Неравномерные поля деформаций ε_1 и ε_2 создают с помощью различных способов. Наибольшую известность приобрели методы Nakazima, Marciniak, Hasek, Keeler, одноосного растяжения, гидравлической формовки и др.[6].

2.2. Образцы для исследования механических свойств сплава АМгбМ и построения диаграммы формовкости (FLD).

Образцы для испытаний рекомендуется изготавливать на металлорежущих станках. Глубина фрезерования на последнем проходе не должна превышать 0.3 мм. Следует принимать меры (охлаждение, соответствующие режимы механической обработки) предотвращающие изменения свойств, которые могут произойти при обработке образцов.

Вырезку заготовок образцов производят в соответствии со схемой рис. 2.1 относительно направления прокатки.

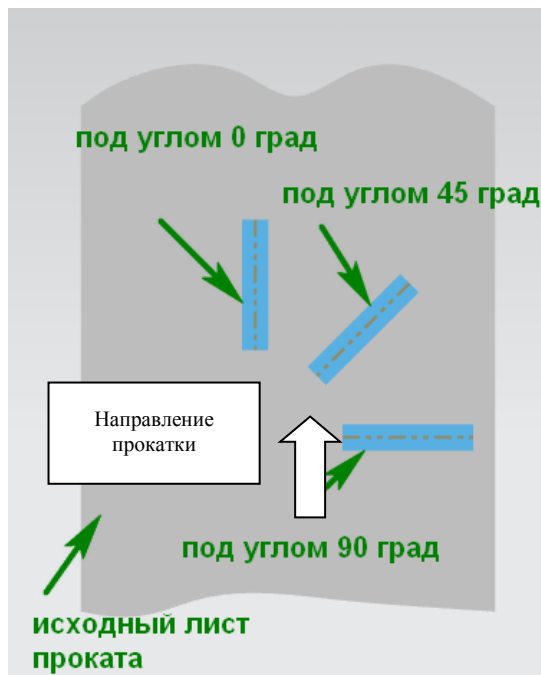


Рисунок 2.1 Схема вырезки образцов из листа проката.

Размеры образцов для определения механических показателей АМгбМ: $\sigma_{\text{шц}}$, E , σ_T (σ_0 , σ_{45} , σ_{90}), $\sigma_{0,2}$ ($R_{0,2}$), σ_B (R_m), ϵ_p (A_g), $\epsilon_{\text{ш}}$, $\psi_{\text{ш}}$ должны соответствовать ГОСТ 1497 – 84 и ГОСТ 11701 – 84 в зависимости от толщины листового проката. Модель образца вместе с размерами приведена на рис. 2.2.

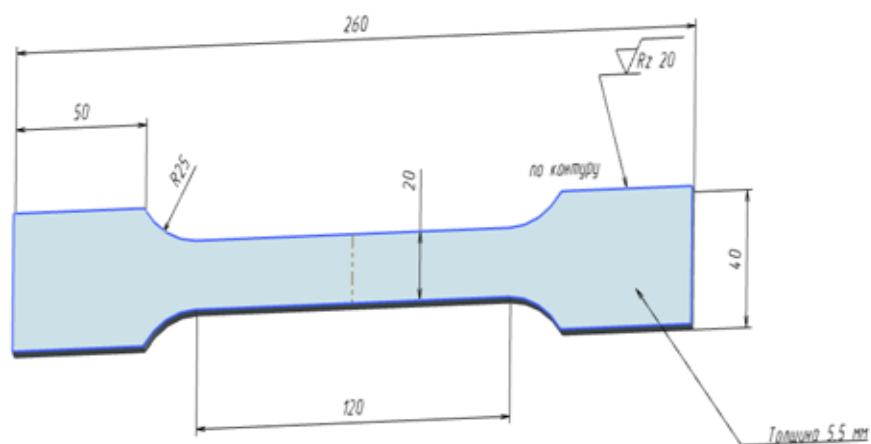


Рисунок 2.2. Образец для механических испытаний

в соответствии с ГОСТ 1497 – 84

Размеры образцов для построения FLD диаграмм по методике ОАО «АВТОВАЗ» показаны на рис. 2.3

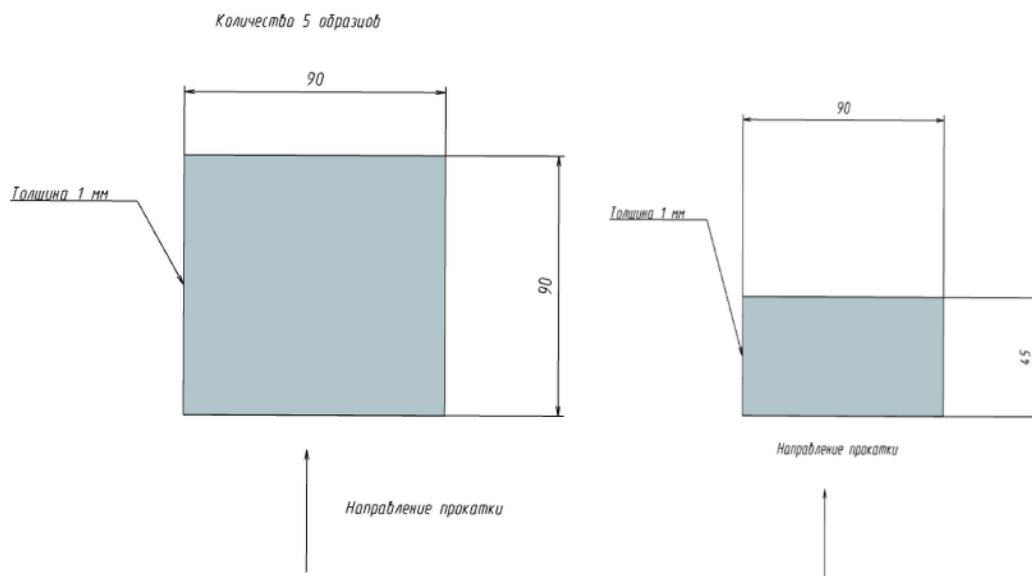


Рисунок 2.3. Образцы для построения FLD диаграмм.

2.3. Оборудование и оснастка для проведения исследований.

Для определения механических показателей материалов используют испытательные машины и тензометры.

Разрывные и универсальные испытательные машины должны соответствовать требованиям ГОСТ 7855 – 84 и

Испытания проводились на универсальной испытательной машине UTS – 100 (Германия) (рис. 2.4) с блоком измерения на основе тензометров и управления с помощью компьютера по типовой методике определений перемещений и усилий при растяжении стандартных образцов.

Основные характеристики испытательной машины UTS – 100.

Машина предназначена для испытаний стандартных образцов на растяжение, сжатие и изгиб, для тестирования материалов и конструктивных элементов.

Технические характеристики.

1. Усилие, кН.....	100000
2. Силоизмеритель, шт.....	2
3. Точность силоизмерителя, %.....	0.5
4. Диапазон силоизмерителя, кН	
первый.....	0 – 100000
второй.....	0 – 10000
5. Диапазон универсального датчика деформации, мм.....	1 – 500
6. Точность измерений универсального датчика деформаций, мкм.....	1
7. Диапазон датчика поперечной деформации, мм.....	0 – 10
8. Точность измерений датчика поперечных деформаций, мкм ...	1
9. Габаритные размеры машины, мм:	
длина.....	800
ширина.....	500
высота.....	1800



Рисунок 2.4. Испытательная машина UTS – 100

Построение диаграммы предельного деформирования (FLD диаграмм) производили на испытательной машине МТЛ – 10Г на оснастке, разработанной ОАО «АВТОВАЗ» (рис.2.5)

Испытательная машина МТЛ – 10Г предназначена для испытания листового металла на вытяжку сферической лунки и на глубокую вытяжку цилиндрическим пуансоном.

Технические характеристики.

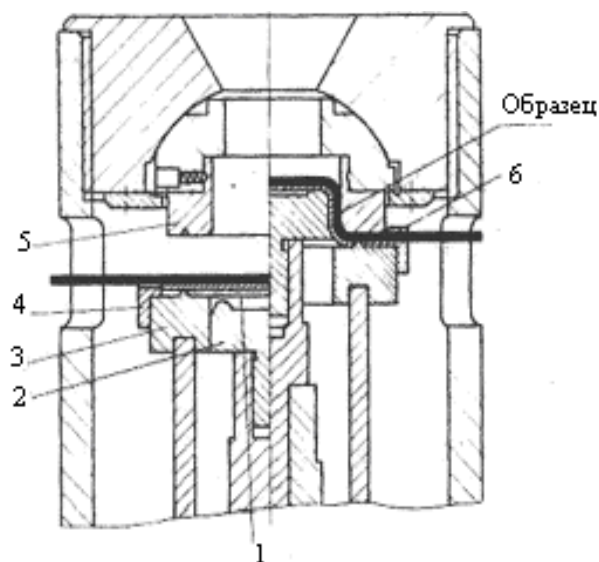
1. Наибольшая испытательная нагрузка (усилие вытяжки), кН.....	100000
2. Наибольшая нагрузка (усилие прижима), кН.....	20000
3. Допускаемая погрешность измерения глубины вытяжки на длине до 20мм, мм.....	0,1
4. Скорость рабочего хода пуансона (регулировка скорости плавная), мм/мин.....	10 – 100
5. Наибольший ход пуансона при испытании на глубокую вытяжку (величина хода не изменяется), мм, не менее.....	70
6. Мощность электродвигателя трехфазного переменного тока, кВт.....	1
7. Габаритные размеры машины, мм:	
длина.....	750
ширина.....	1020
высота.....	1400
8. Вес машины, кг.....	340

Технологические параметры.

1. Толщина испытуемого материала при испытании на вытяжку сферической лунки, мм.....	0,5 – 2
---	---------

2. Диаметры пуансонов для испытания на вытяжку
сферической лунки, мм20; 14; 8; 3
3. Толщина испытуемого материала при испытании на
глубокую вытяжку, мм.....0,2 – 2
4. Максимальный диаметр пуансона при испытании на
глубокую вытяжку, мм..... 32

Машина представляет собой гидравлический пресс двойного действия, управление которым автоматизировано.



1 – листовой полиэтилен; 2 – пуансон; 3 – прижим; 4 – направляющее кольцо; 5 – матрица – прижим; 6 – технологическая прокладка.

Рисунок 2.5 Оснастка к машине МТЛ – 10Г для испытаний листового металла и построения FLD диаграмм

2.4. Результаты исследования

При холодной штамповке изделий типа «Днище» реология материала в основном определяется упругой и пластической деформацией анизотропного материала, а также его упругой разгрузкой.

Реология такой модели определяется комбинацией упругих и пластических элементов с нелинейным модулем упрочнения.

Для описания кривой упрочнения подобных материалов при одноосной нагрузке могут использоваться следующие законы:

Холломона [23]

$$\sigma \varepsilon = C_1 \varepsilon^{C_2}$$

Людвика [24]

$$\sigma \varepsilon = C_1 + C_2 \varepsilon^{C_3}$$

Свифта [25]

$$\sigma \varepsilon = C_1 (C_2 \varepsilon)^{C_3}$$

Войса [26]

$$\sigma \varepsilon = C_1 + (C_2 - C_1) \exp(-C_3 \varepsilon)$$

Хоккета-Шерби [23]

$$\sigma \varepsilon = C_2 - (C_2 - C_1) \exp(-C_3 \varepsilon^{C_4})$$

Гоша [27]

$$\sigma \varepsilon = C_1 + C_2 (C_3 + \varepsilon)^{C_4}$$

и ряд других законов, которые встречаются не так часто.

Материал принимается несжимаемым, жесткопластическим, ортотропным, для которого справедливо условие текучести Мизеса – Хилла [17,18,19]:

$$2f \sigma_{ij} = F \sigma_y - \sigma_z^2 + G \sigma_z - \sigma_x^2 + H \sigma_x - \sigma_y^2 + \\ + 2L \sigma_{yz}^2 + 2M \sigma_{zx}^2 + + 2N \sigma_{xy}^2$$

Параметры анизотропии F, G, H, L, M, N связаны с величинами сопротивления материала пластическому деформированию следующими соотношениями [6,17]:

$$2F = \frac{1}{\sigma_{sy}^2} + \frac{1}{\sigma_{sz}^2} + \frac{1}{\sigma_{sx}^2}; \quad 2L = \frac{1}{\sigma_{syz}^2};$$

$$2F = \frac{1}{\sigma_{sz}^2} + \frac{1}{\sigma_{sx}^2} + \frac{1}{\sigma_{sy}^2}; \quad 2L = \frac{1}{\sigma_{szx}^2};$$

$$2H = \frac{1}{\sigma_{sx}^2} + \frac{1}{\sigma_{sy}^2} + \frac{1}{\sigma_{sz}^2}; \quad 2N = \frac{1}{\sigma_{sxy}^2}$$

По результатам измерения деформации образцов для углов $0^0, 45^0, 90^0$ по отношению к направлению прокатки находят коэффициенты анизотропии r_0, r_{45}, r_{90}

$$r_i = \frac{\varepsilon_{bi}}{\varepsilon_{si}} = \frac{\ln(b_{1i} b_{0i})}{\ln(b_{0i} l_{0i} / b_{1i} l_{1i})},$$

где i -величина угла по отношению к направлению прокатки $0^0, 45^0, 90^0$

ε_{bi} -деформация по ширине образца под углом i^0 к направлению прокатки;

ε_{si} -деформация по толщине образца под углом i^0 к направлению прокатки;

b_{0i}, b_{1i} -ширина образца под углом i^0 к направлению прокатки в начале и после разрыва

l_{0i}, l_{1i} -длина образца под углом i^0 к направлению прокатки в начале и после разрыва

Коэффициенты анизотропии для плоского напряженного состояния связаны параметрами анизотропии F, G, H зависимостями

$$r_0 = \frac{H_G}{H_F}, \quad r_{90} = \frac{H_F}{H_G}, \quad r_{45} = -0,5 + \frac{H_F}{1 + G_F}.$$

Часто анизотропию в плоскости листа оценивают средним значением плоскостной анизотропии r и нормальной анизотропии R , вычисленным по формулам:

$$r_0 = (r_0 + 2r_{45} + r_{90}) / 4,$$

$$R = (r_0 + r_{45} + r_{90}) / 3.$$

Результаты, полученные при растяжении образцов, компьютер испытательной машины выдает в виде файлов и графика машинной диаграммы для условных напряжений (рис. 2.6)

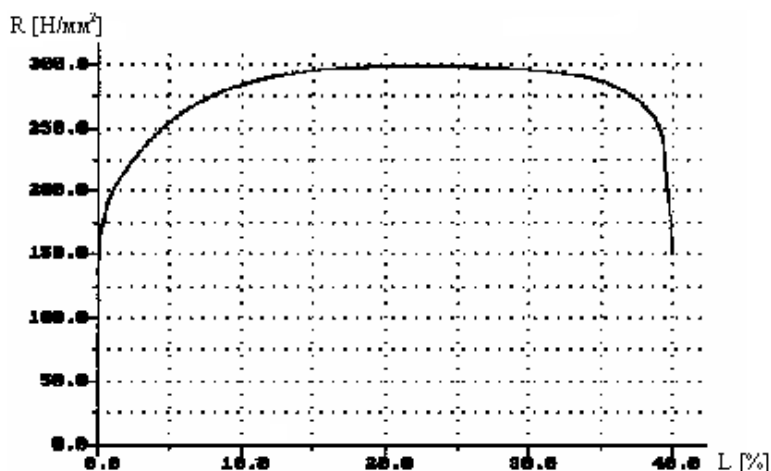


Рисунок 2.6 Машинная диаграмма растяжения образца из АМг6М

на испытательной машине UTS – 100

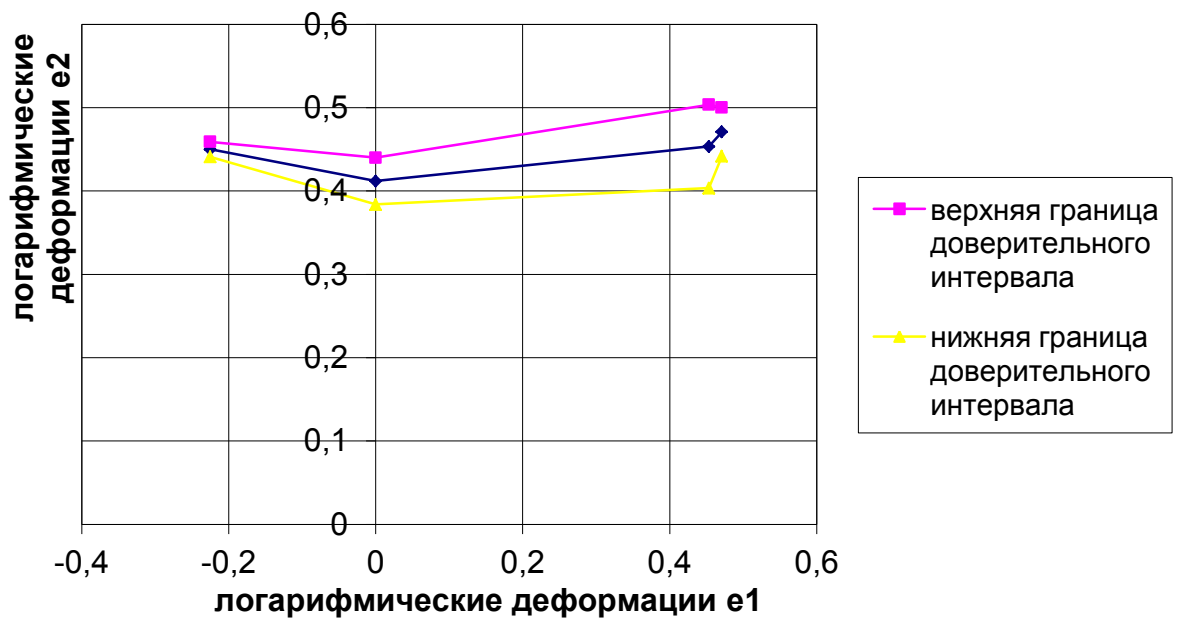
Обработка результатов испытаний механических свойств позволила получить с доверительной вероятностью 95% по критерию Стьюдента средние значения показателей анизотропии и механических свойств АМг6М.

Величина показателей анизотропии и пределы текучести σ_T представлены в таблице 2.4.

Таблица 2.4.

Показатели механических свойств	Углы продольной оси образца по отношению к направлению прокатки		
	0^0	45^0	90^0
σ_T МПа	172,3	162,1	171,9
r_0	0,73	-	-
r_{45}	-	0,83	-
r_{90}	-	-	0,67

FLD диаграмма, полученная для образцов (рис.2.5) толщиной 5,5 мм, показана на рис.2.7



2.5. Выводы

1. Разработана методика проведения экспериментальных исследований.
2. Определены механические характеристики с учетом анизотропии для материала АМг6М.
3. Построена диаграмма предельной формоустойчивости (FLD) для материала АМг6М толщиной 5,5 мм.
4. Создан файл механических свойств для материала АМг6М толщиной 5,5 мм в генераторе свойств материала Autoform.

3. Моделирование процесса и рабочих инструментов оснастки.

3.1. Геометрическое моделирование формы, размеров инструмента и создание параметрических моделей изделия и инструментов для различных схем типовых процессов штамповки

Моделирование геометрии изделия проводилось в системе CAD NX. Внешний вид детали «Днище» представлен на рис.3.1.

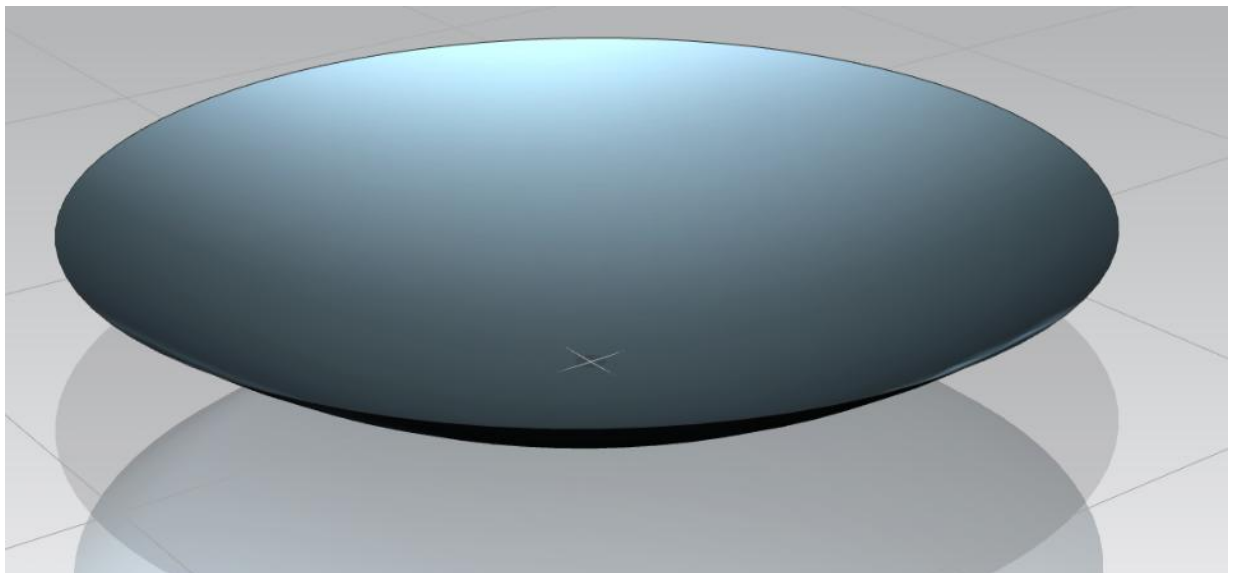


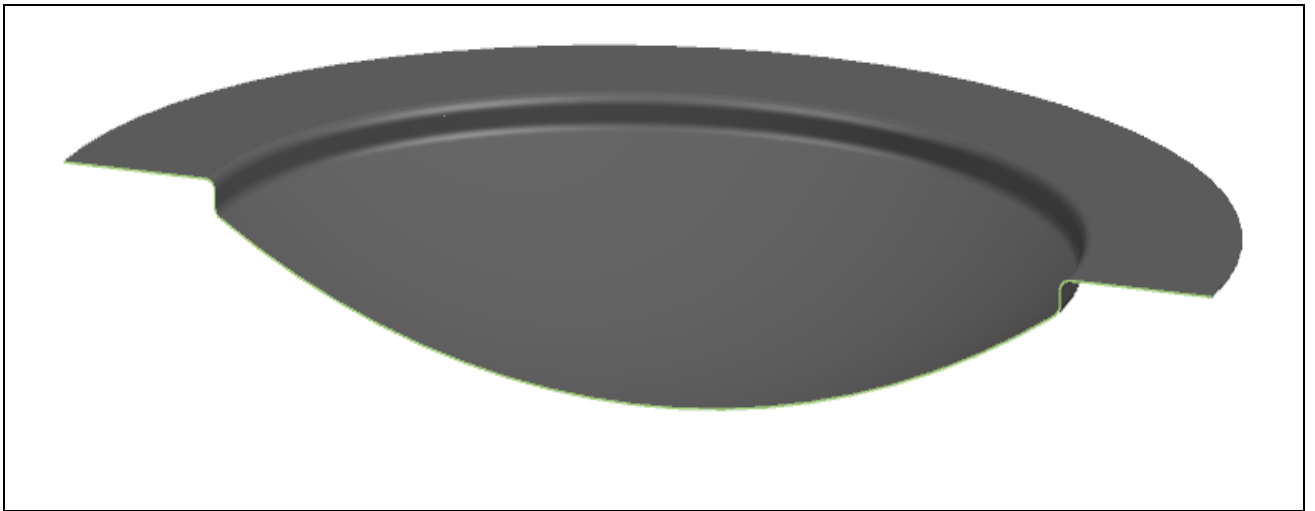


Рисунок 3.1. Модель изделия «Днище»

Разработку математической модели вытяжного перехода, а также линии обрезки можно создавать как в системе CAD, так и в системе CAE. Вид моделей первого, второго и третьего варианта геометрии в CAD вытяжного перехода, которые подлежат исследованию показаны в таблице 3.1.

Таблица 3.1

<p>Первый вариант</p>

<p>Второй вариант</p>

<p>Третий вариант</p>



Электронная модель перехода вытяжки, выполненная в AutoForm, представлена на рис. 3.2. Она состоит из прижимной поверхности, переходной поверхности (addendum) и электронной модели изделия. Голубым цветом показана линия границы заготовки. Коричневым цветом отображена линия обрезки. Зеленым цветом закрашена радиусная поверхность матрицы.

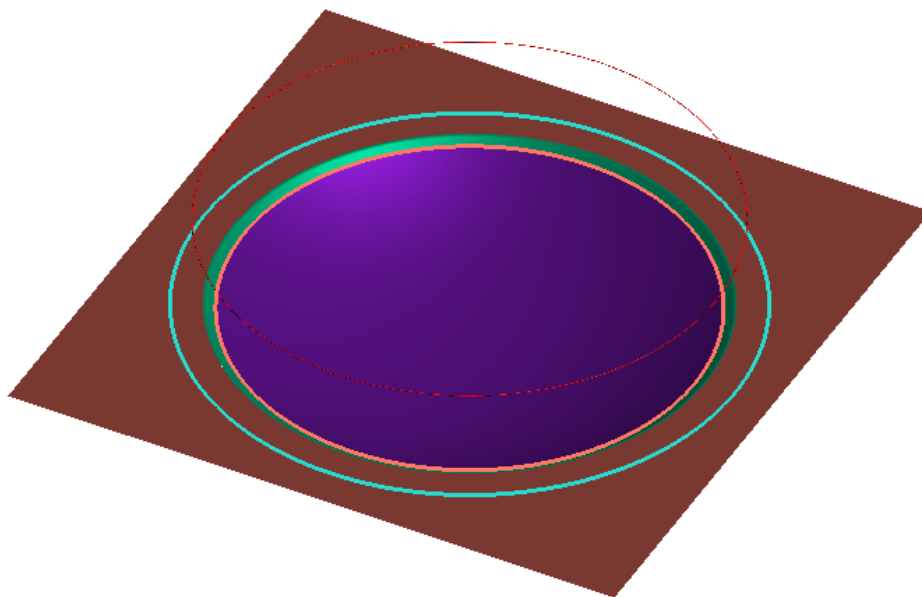


Рисунок 3.2. Модель вытяжного перехода для первого варианта в системе САЕ AutoForm

Аналогично разработаны электронные модели для второго, третьего и типа переходов вытяжки, которые выбраны для исследования. В САД системе NX параметризация изделия осуществлялась на основе эскизов, которые

использовались для построения электронных моделей (таб.3.1.) В САЕ Autoform параметризация связана с разработкой полигональной модели вытяжного перехода и установкой размеров прижима, припуска, матрицы и пуансона в Die Designer (рис. 3.3)

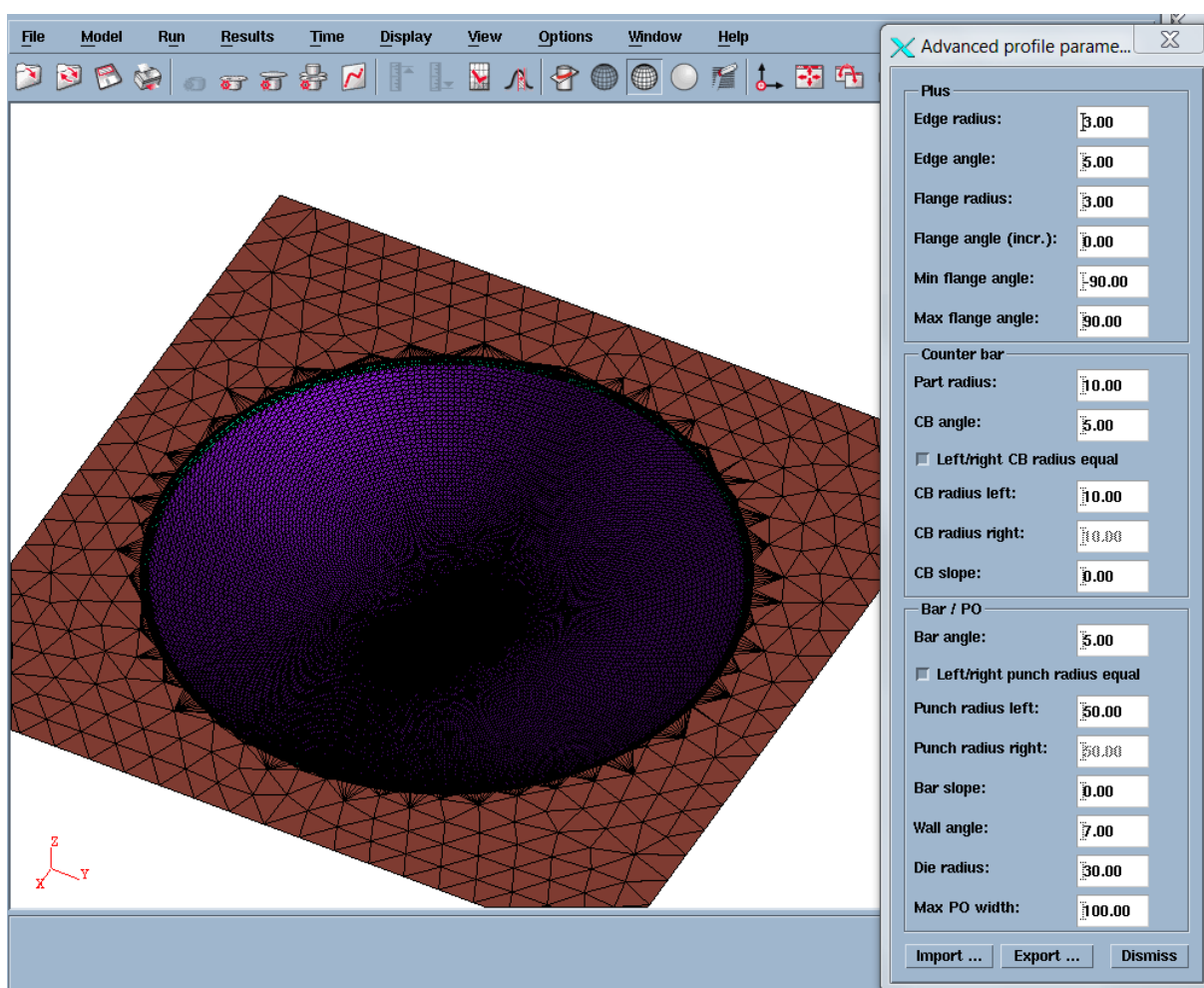


Рисунок 3.3. Окно Die Designer. Закладка параметризации создания переходной поверхности (Addendum)

А также и с выставлением значений параметров процесса в окне Process generator (рис. 3.4).

Закладки с правой стороны (рис. 3.4) окна показывают, какие процессы были созданы для моделирования изготовления детали «Днище». К ним относятся:

- Gravity (процесс воздействия силы тяжести на заготовку);
- Closing (процесс закрытия прижима при вытяжке изделия);
- Drawing (процесс вытяжки детали);
- Cutting (процесс разделительных операций);
- Springback (процесс упругой отдачи).

Возможно создание и других процессов как основных, так и вспомогательных операций получения изделий методами листовой штамповки.

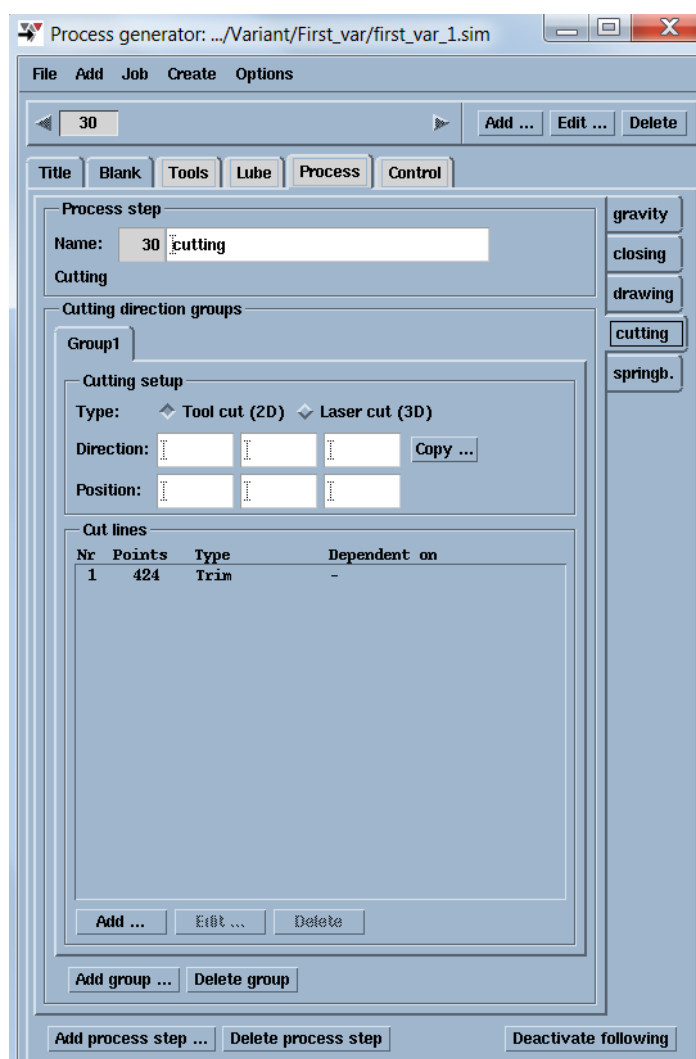


Рисунок 3.4. Окно Process Generator

Закладки с правой стороны (рис. 3.4) окна показывают, какие процессы были созданы для моделирования изготовления детали «Днище». К ним относятся:

- Gravity (процесс воздействия силы тяжести на заготовку);
- Closing (процесс закрытия прижима при вытяжке изделия);
- Drawing (процесс вытяжки детали);
- Cutting (процесс разделительных операций);
- Springback (процесс упругой отдачи).

Возможно создание и других процессов как основных, так и вспомогательных операций получения изделий методами листовой штамповки.

Задаются такие параметры, как усилие прижима, коэффициенты трения, величины перемещения инструмента, значения размеров перетяжных ребер, величина натяжения материала и др.

3.2 Разработка стратегии моделирования. Расчет и определение формы и размеров первоначальной заготовки

Моделирование технологических процессов изготовления детали «Днище» произведем для трех вариантов геометрии вытяжного перехода.

Основа стратегии будет заключаться в достижении целевой функции - величины минимума смещения изделия относительно формы номинальных размеров после разгрузки – пружинения.

$$\Delta x, \Delta y, \Delta z \rightarrow \min$$

В качестве ограничений выступает целый ряд параметров. К важнейшим ограничениям относятся следующие величины:

$$\begin{aligned} Q &\leq Q_{\text{пред}}; \\ \Delta S &\leq |0,1|, \\ |\epsilon_h| &\leq 0,037, \end{aligned}$$

где $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ - максимальные значения перемещений точек заготовки после разгрузки, относительно формы инструмента;
 Q - величина усилия прижима;
 $Q_{\text{пред}}$ - предельно допустимая величина прижима;
 ΔS - величина пружинения;
 ϵ_h - логарифмическая деформация утонения.

Окончательное построение формы инструмента будет выполняться с учетом химического фрезерования и последующего пружинения. Для построения окончательной геометрии будут использованы методы компенсации исходной геометрии инструмента с учетом упругой отдачи после обрезки и химического фрезерования.

Этому этапу работ будут предшествовать статистические исследования процесса моделирования процесса вытяжки детали «Днище» для определения факторов оказывающих наибольшее влияние на процесс вытяжки и пружинения после обрезки.

Дальнейшая оптимизация этих процессов буде выполнена с учетом результатов, статистических исследований чувствительности процесса вытяжки для определения параметров управления процессом.

Размеры моделей для вытяжных переходов найдем в соответствии с технологическими рекомендациями [1] и исходными размерами детали.

Величина технологического припуска на обрезку составит $(1,5 \dots 3,0) S_0$, где S_0 - первоначальная толщина заготовки. Значение высоты бортика для деталей третьего типа составит $H_6 = (2,0 \dots 5,0) S_0$. Радиус нейтрального слоя заготовки, который соответствует радиусу матрицы заготовки можно определить по формуле $R = (2 \dots 25) S_0$. Величину ширины фланца первоначальной заготовки необходимого для прижима фланца найдем по соотношению $b = (0,025 D_d + 17)$. Это значение и позволит вычислить конечное значение размеров заготовки.

3.3. Предварительный расчет процесса деформирования изделия «Днище»

Для начальной оценки процесса изготовления изделия «Днище», произведем моделирование процесса штамповки для первой схемы технологического процесса в двух вариантах. Основным фактором варьирования выберем натяжение заготовки при вытяжке. Для первого варианта перетяжное ребро отсутствует. Для второго варианта моделирования введено перетяжное ребро с силовым фактором натяжения 0,5. Такой фактор натяжения соответствует натяжению на ребре выше среднего. В обоих случаях моделирования выбрана одна заготовка диаметром 2535 мм из материала АМг6М толщиной 5,5 мм. Химический состав и механические свойства отвечают химическому составу АМг6М и механическим показателям АМг6М, которые заданы в созданном файле в Генераторе материалов Autoform [11]. Коэффициент трения на всех поверхностях примем постоянным и равным 0,15. Усилие прижима было назначено из условия не более 200 тс без учета наличия перетяжных ребер. Приведем результаты расчета процесса вытяжки за 5 мм до смыкания пуансона и матрицы.

Для первого варианта результат представлен на рис. 3.5.

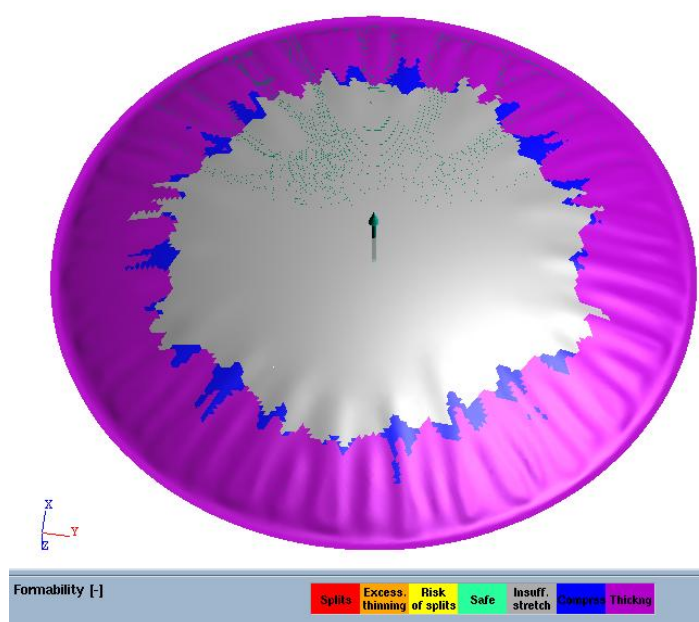


Рисунок 3.5. Тест на штампуемость без перетяжного ребра за 5 мм до смыкания матрицы и пуансона.

Второй вариант (рис.3.6.) свободен от дефектов на всей рабочей части детали. Для первого варианта (рис.3.5.) следует отметить, недостаточную деформацию всей поверхности и наличие складок на рабочей части изделия.

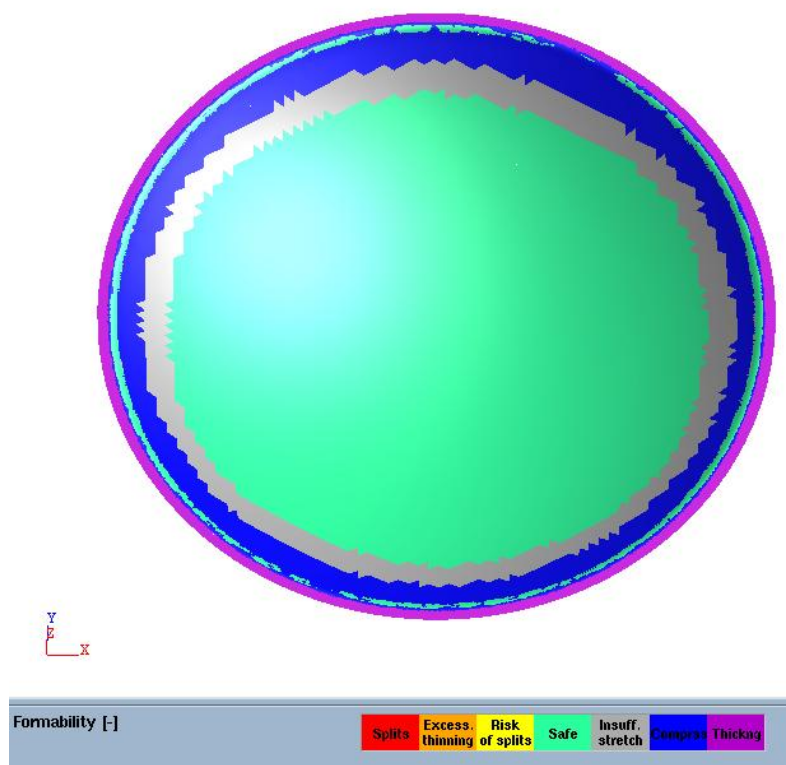


Рисунок 3.6. Тест на штампуемость с перетяжным ребром за 5 мм до смыкания матрицы и пуансона.

3.4. Анализ результатов предварительного моделирования процесса деформирования изделия «Днище».

Из многочисленных тестов, которые предлагает постпроцессор AutoForm, рассмотрим тест на изменение толщины заготовки и тест мониторинга усилий процесса штамповки «Днища». Эти проверки проведем в том же порядке, но для исключения результатов для фланца заготовки покажем изменение толщины после обрезки фланца. Отметим точки с максимальной и минимальной толщиной.

Для первого варианта без перетяжного ребра изменение толщины показано на рис. 3.7, а Графики усилий штамповки представлены на рис.3.8.

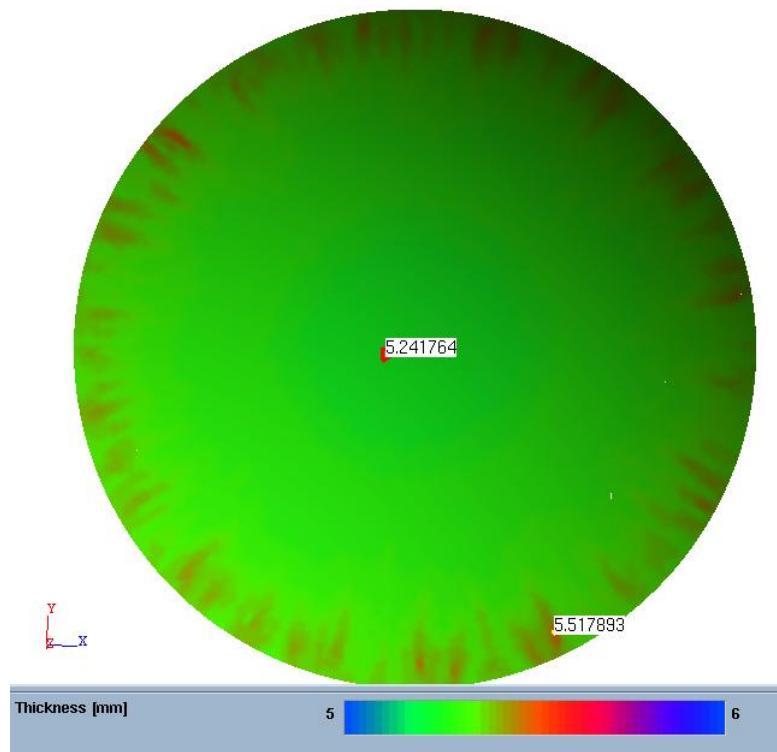


Рисунок 3.7. Толщина заготовки для штамповки без перетяжного ребра

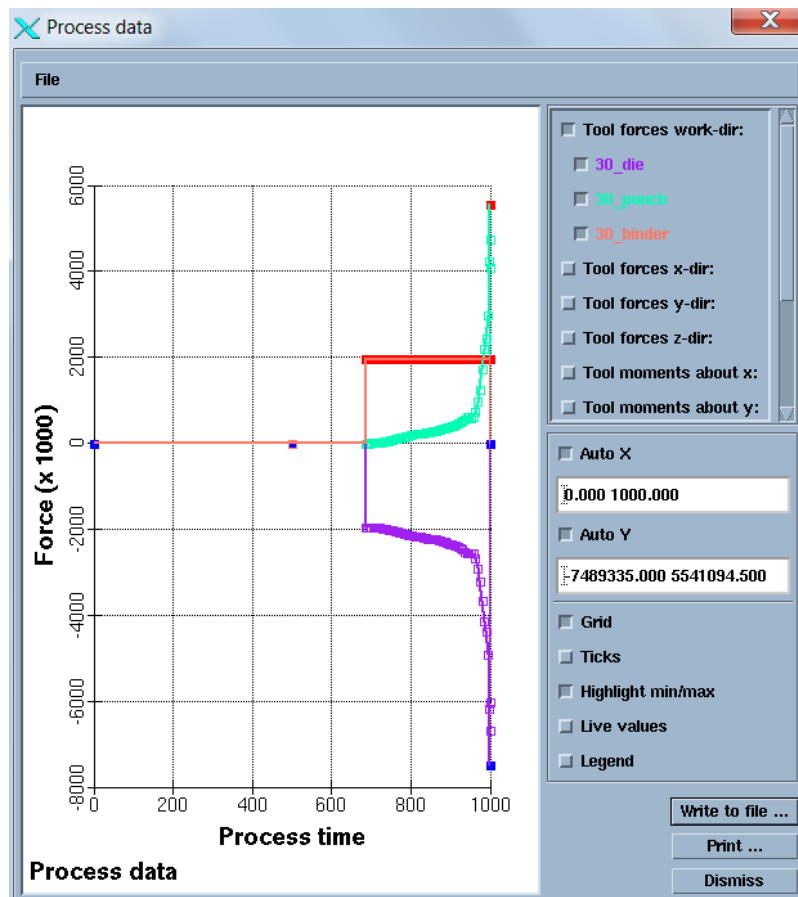


Рисунок 3.8. Графики изменения усилия штамповки при штамповке без перетяжного ребра.

Для второго варианта с перетяжным ребром изменение толщины показано на рис. 3.9, а графики усилий штамповки представлены на рис.3.10.

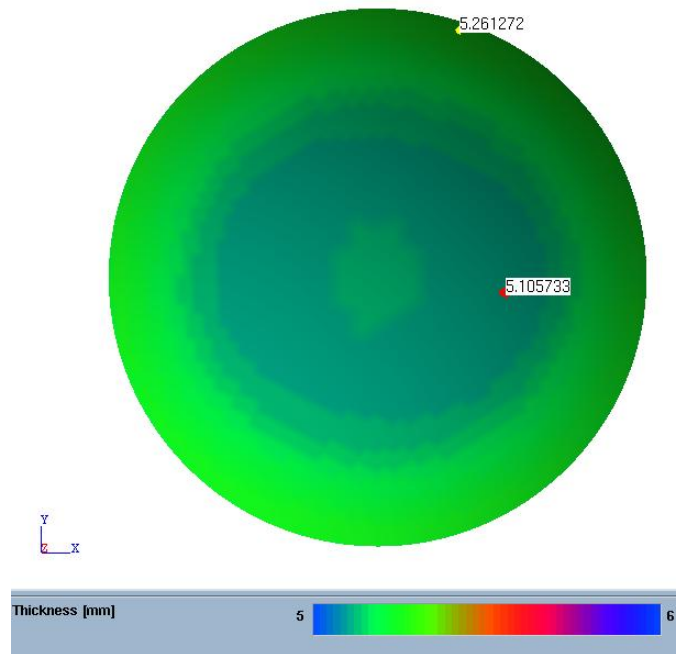


Рисунок 3.9. Толщина заготовки для штамповки с перетяжным ребром

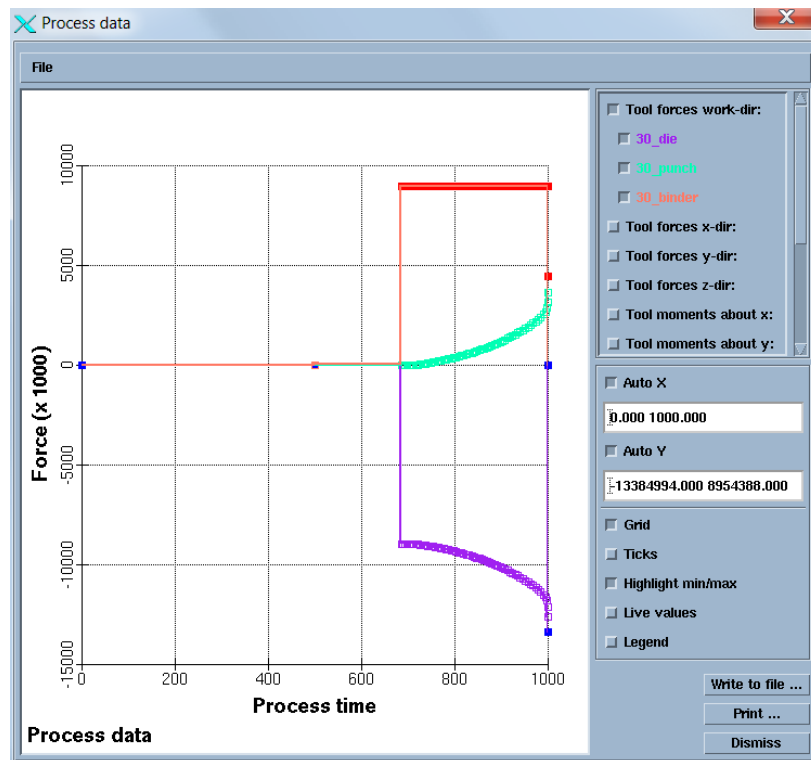


Рисунок 3.10. Графики изменения усилия штамповки при штамповке с перетяжным ребром.

Для варианта штамповки без перетяжного ребра предельное утонение наблюдается в центре заготовки и не составляет приблизительно 0,05 мм. На краю заготовки отмечено утолщение в результате возникновения складок. Величина усилия на пуансоне составляет 550 тс, а на прижиме 200 тс. Превышение усилия на пуансоне по сравнению со вторым вариантом связано с тем, что в конце хода пришлось разглаживать складки и преодолевать перемещение утолщения в 0,05 мм (практически выполнялась операция калибровки).

Анализ данных показывает, что для варианта с перетяжным ребром вся поверхность заготовки подвергнута утонению. Величина предельного утонения не превышает 0,2 мм. Величина усилия на пуансоне не превышает 500 тс, а значение усилия прижима достигает значения 850 тс.

3.5. Анализ результатов предварительного моделирования пружинения изделия.

Расчет пружинения проведем для обеих схем технологически процессов в свободном, незакрепленном состоянии. Положение заготовки после пружинения рассмотрим на виде сверху и снизу для штамповки без и с перетяжными ребрами. Для варианта без перетяжных ребер положение заготовки относительно поверхности матрицы покажем на рис. 3.11 и 3.12.

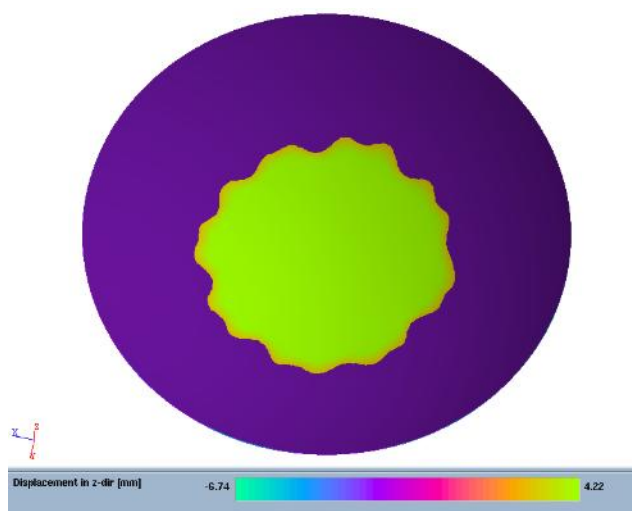


Рисунок 3.11. Положение заготовки после пружинения (вид сверху)

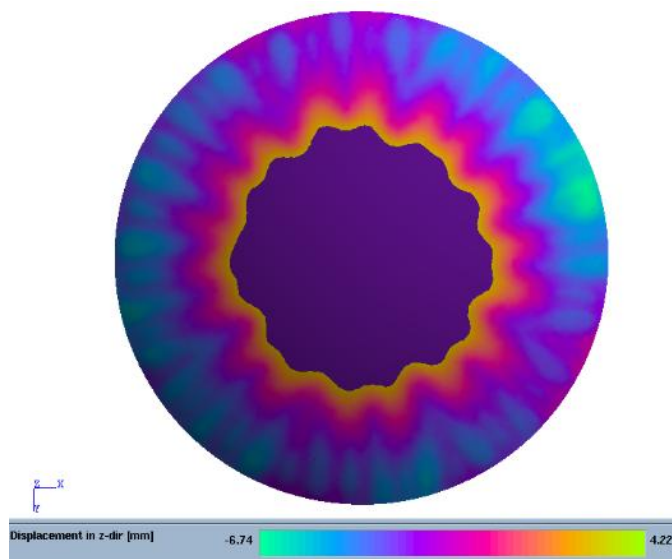


Рисунок 3.12. Положение заготовки после пружинения (вид снизу)

Для варианта с перетяжным ребром положение заготовки относительно поверхности матрицы покажем на рис. 3.13 и 3.14

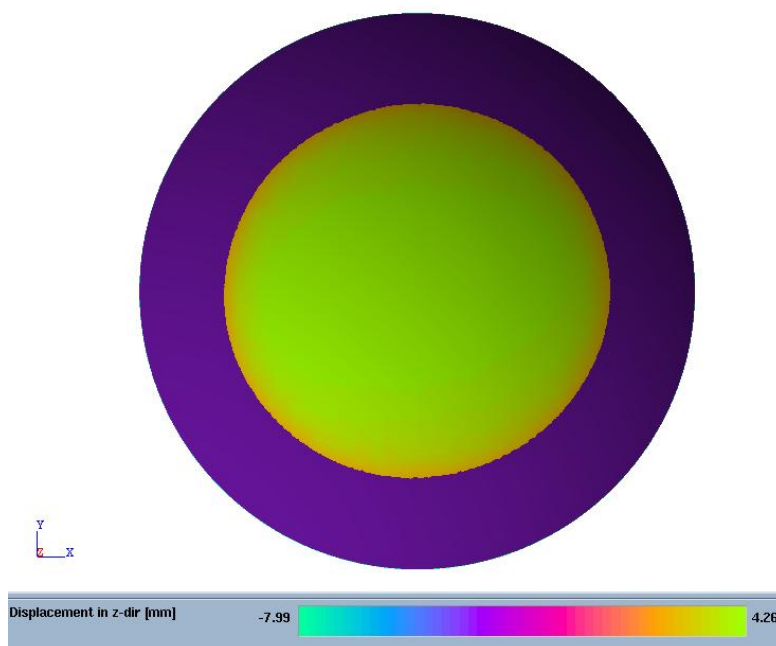


Рисунок 3.13. Положение заготовки после пружинения (вид сверху)

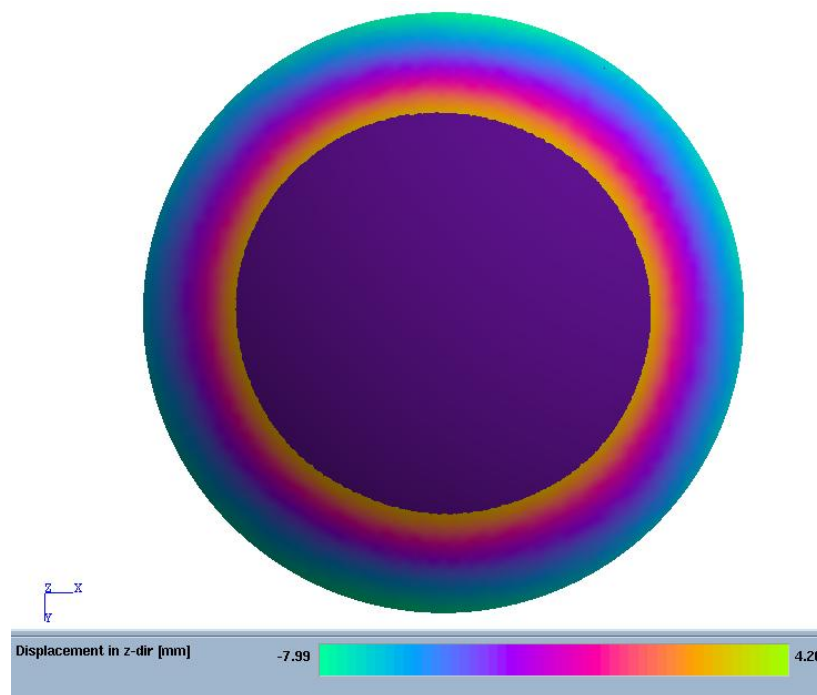


Рисунок 3.14. Положение заготовки после пружинения (вид снизу)

Анализ пружинения показывает, что края заготовки опускаются вниз, а центральная часть поднимается вверх, т.е. преобладающее влияние на пружинение оказывают изгибающие моменты (аналогично процессу двухугловой гибки).

Для первой схемы дефекты штамповки нашли отражение и в процессе упругой отдачи. Пружинение нерегулярно по контуру и краям заготовки.

Рассмотрим пружинение для экстремальных смещений точек изделия после операций вытяжки, обрезки и процесса разгрузки. Рассмотрим перемещения в направлениях z , x , y . Возможные отклонения от регулярных смещений по контуру изделия во первых связаны с недостаточным натяжением (первый вариант), а во вторых определяется анизотропией механических свойств листа после прокатки (первый и второй вариант).

Для схемы вытяжки без перетяжного ребра результаты представлены на рис. 3.15, 3.316 и 3.17.

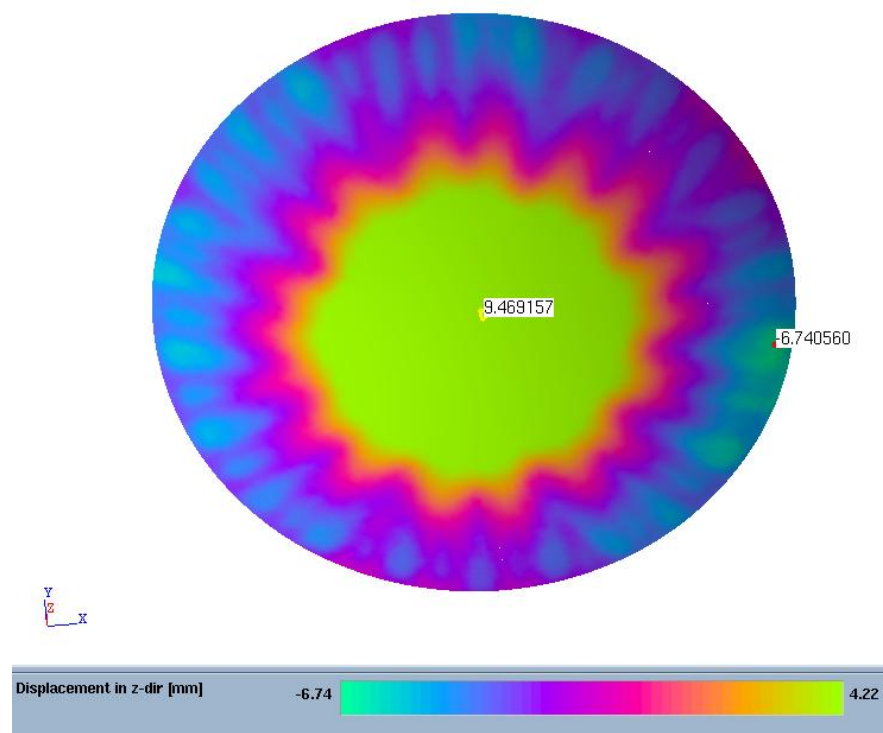


Рисунок 3.15. Пружинение в направлении оси z

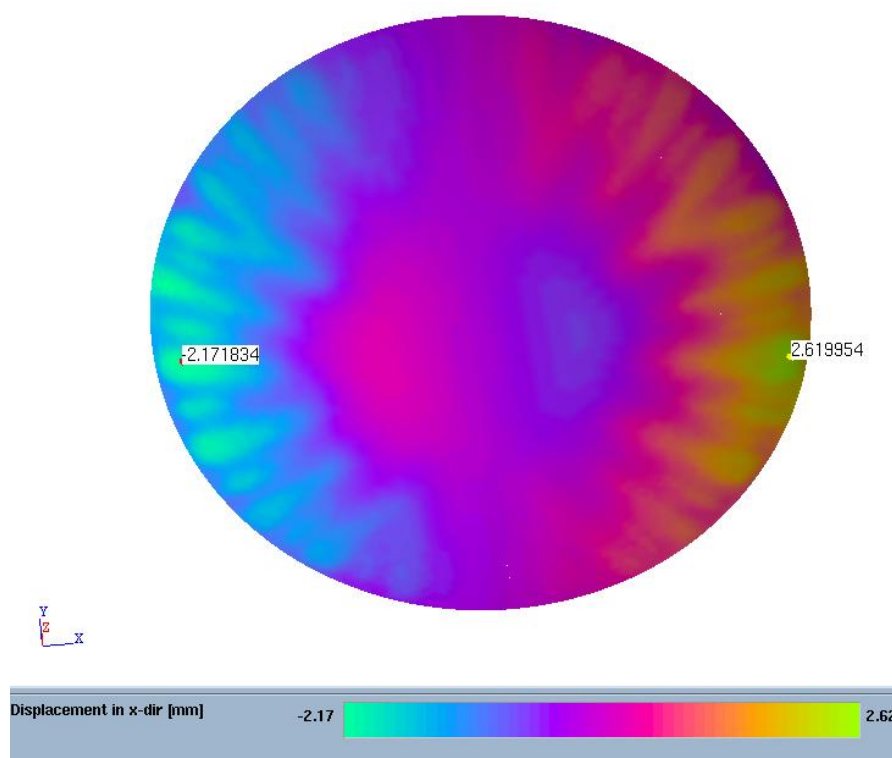


Рисунок 3.16. Пружинение в направлении оси x

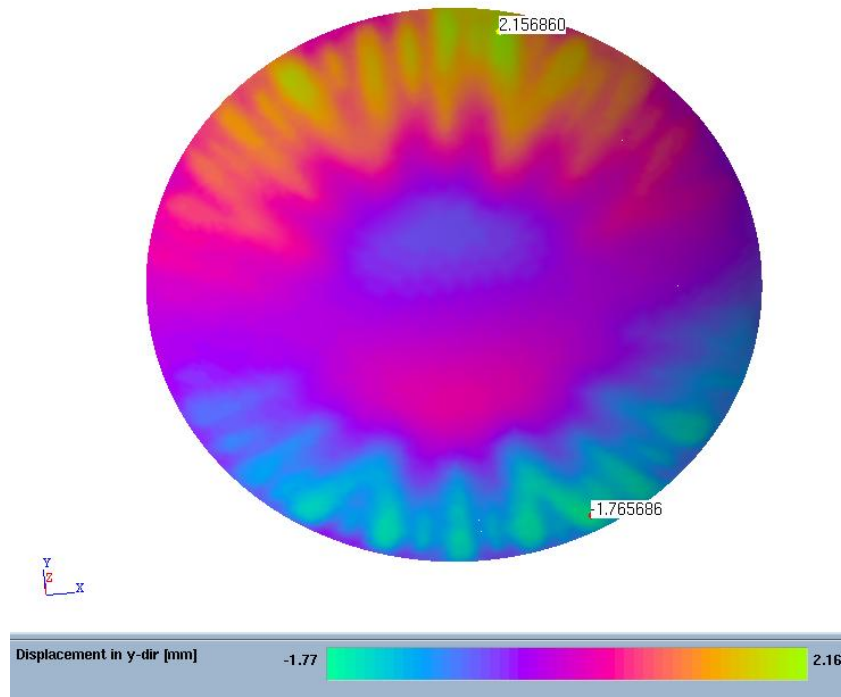


Рисунок 3.17. Пружинение в направлении оси y

Для схемы вытяжки с перетяжным ребром результаты представлены на рис. 3.18, 3.19 и 3.20.

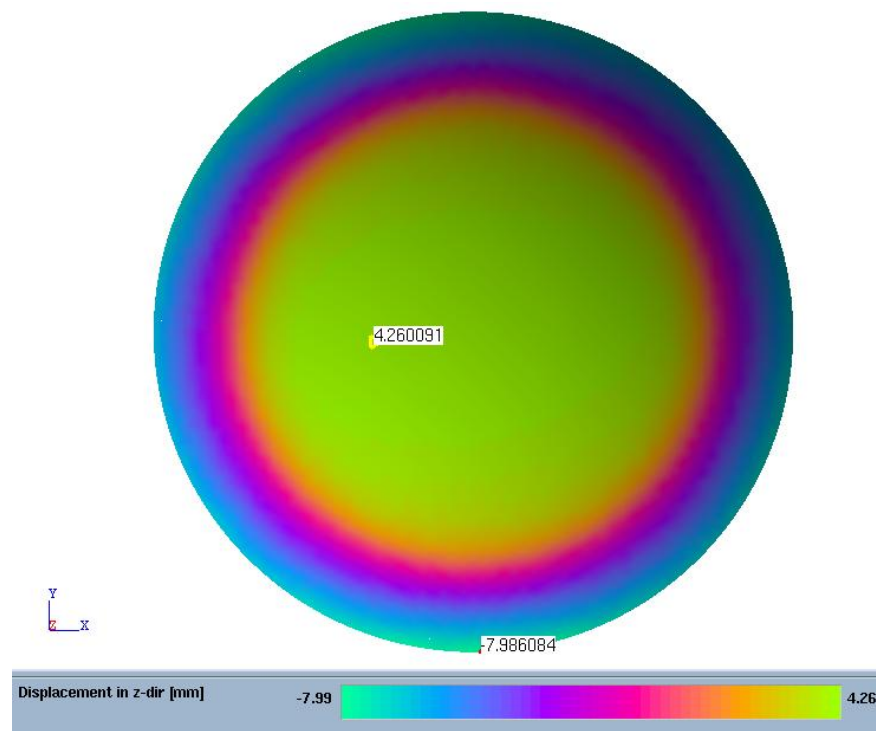


Рисунок 3.18. Пружинение в направлении оси z

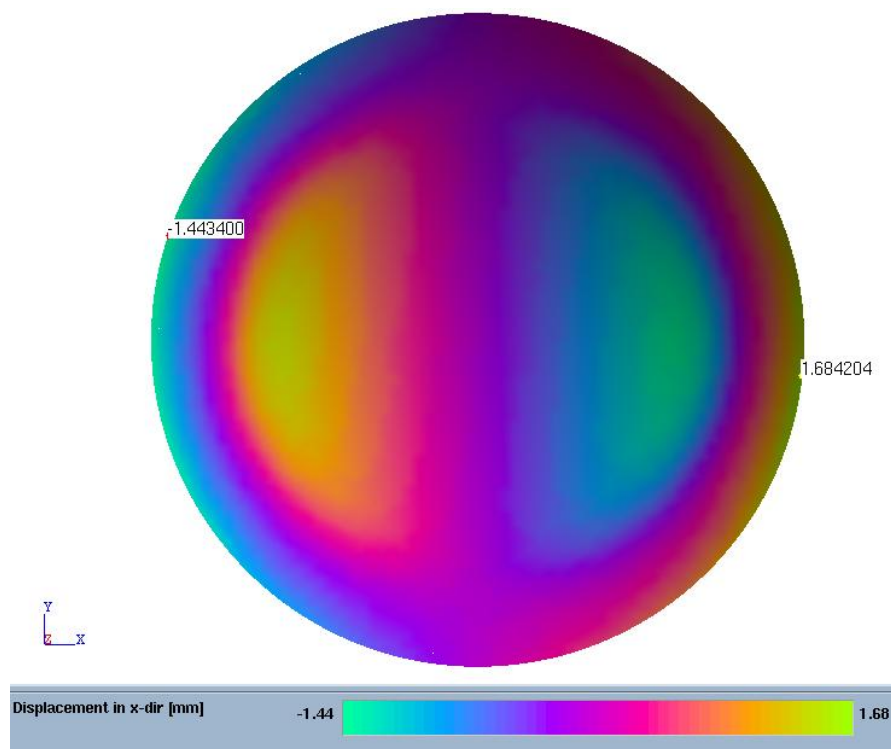


Рисунок 3.19. Пружинение в направлении оси x

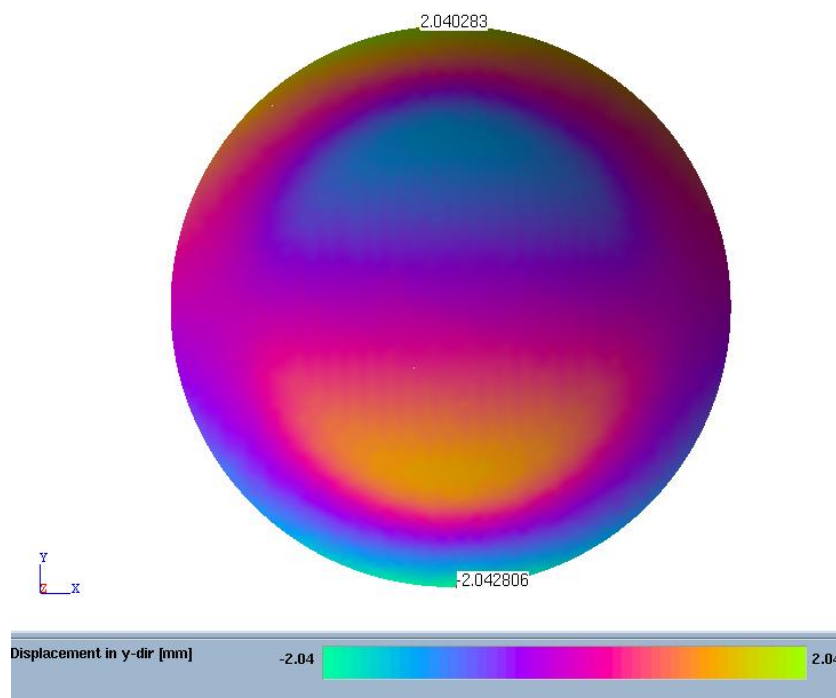


Рисунок 3.20. Пружинение в направлении оси y

3.6. Выводы

1. Точность изготовления и функциональная прочность изделий типа «Днище» определяется технологической наследственностью процесса изготовления.
2. С целью управления процессом изготовления «Днищ» необходимо проведение ранжирования по значимости факторов влияния на процесс штамповки, обрезки и химического фрезерования.
3. Для сокращения затрат и повышения качества изделий процессу проектирования и создания штамповой оснастки должны предшествовать исследование и оптимизация технологии изготовления на основе моделирования с помощью метода конечных элементов.
4. Адекватность полученных результатов моделирования будет определяться достоверными данными о свойствах реальных материалов используемых для штамповки.
5. Установлено, что натяжение заготовки в процессе вытяжки является одним из важнейших факторов управления процессом изготовления деталей типа «Днище».
6. Выявлено, что анизотропия определяет неравномерность смещения материала после разгрузки и упругой отдачи.
7. Для компенсации пружинения и повышения точности изделий необходима коррекция электронных моделей инструментов: матрицы и пуансона.
8. Оптимизация процесса вытяжки должна производиться учетом ограничений на параметры реального оборудования и материала.

4. Статистический анализ процесса деформирования и разгрузки изделия «Днище» в САЕ AUTOFORM

Для проведения статистических исследований, которые позволят определить робастность изготовления изделия «Днище» осуществим численное моделирование процессов вытяжки, разгрузки, обрезки и разгрузки для трех вариантов технологии изготовления детали:

- Вытяжка с использованием перетяжных ребер (табл.3.1 первый вариант);
- Вытяжка с использованием порогов (табл.3.1 второй вариант);
- Вытяжка детали со сферическим дном и цилиндрической стенкой с использованием перетяжных ребер (табл.3.1 третий вариант);

Для получения статистических наблюдений используются выборки, составленные с учетом варьируемых факторов технологии штамповки и конструкции оснастки.

К переменным факторам процесса изготовления детали «Днище» были отнесены величины указанные в табл. 4.1.

В зависимости от варьирования переменных указанных в таблице 4.1 производилась оценка утонения ϵ_h и упругой отдачи (пружинения) ΔS нормально поверхности изделия.

Т.е. в табличном виде определялись вариационные ряды $(\epsilon_h, D, f, P, R, k)$, $(\epsilon_h, D, f, P, R, r_u, r_d)$, $(\Delta S, D, f, P, R, k)$ и $(\Delta S, D, f, P, R, r_u, r_d)$

Для накопления статистики процесса изготовления изделия «Днище» для варьирования каждой из переменных устанавливалось не менее 20 испытаний. Поэтому общее число численных экспериментов для каждого из трех вариантов технологических переходов вытяжки составляло от 100 до 130 испытаний.

ПРОЕКТНЫЕ ПЕРЕМЕННЫЕ

Таблица 4.1.

	Вариант технологии					
	С перетяжными ребрами		С перетяжным порогом		С цилиндрической стенкой	
Факторы	Min	Max	Min	Max	Min	Max
Диаметр заготовки D	2600 мм	3000 мм	2600 мм	3000 мм	2600 мм	3000 мм
Коэффициент трения f	0,05	0,2	0,05	0,2	0,05	0,2
Усилие прижима P	1000000 Н	4000000 Н	1000000 Н	4000000 Н	1000000 Н	4000000 Н
Радиус матрицы R	10 мм	30 мм	10 мм	30 мм	10 мм	30 мм
Коэффициент натяжения на перетяжном ребре k	0,1	0,9	-	-	0,1	0,9
Верхний радиус перетяжного порога rp1	-	-	7 мм	40 мм	-	-
Нижний радиус перетяжного порога rp2	-	-	7 мм	40 мм	-	-

4.1. Инженерный анализ чувствительности на основе статистики численных экспериментов процесса штамповки и разгрузки изделия «Днище» изготовленного по варианту вытяжки с перетяжным ребром

Для выявления факторов процесса изготовления штамповкой изделий сферической формы, которые оказывают наибольшее влияние на показатели качества изготовления детали можно использовать теорию чувствительности. Однако комплексное аналитическое решение задач деформирования для изготовления подобных деталей не существует. Поэтому наиболее перспективным направлением применения теории чувствительности является использование регрессионных уравнений математической статистики, полученных на основе нелинейного многофакторного корреляционного и дисперсионного анализа [29,30]. Найденные регрессионные уравнения утонений (ε_h) $\varepsilon_h = f(D, f, P, R, k)$ и пружинений (ΔS) $\Delta S = f(D, f, P, R, k)$ позволяют вычислить коэффициенты (функции) чувствительности. Они являются частными производными от искомых показателей качества по заданной переменной

$$d\varepsilon_h = \frac{\partial \varepsilon_h}{\partial D} dD + \frac{\partial \varepsilon_h}{\partial k} dk + \frac{\partial \varepsilon_h}{\partial f} df + \frac{\partial \varepsilon_h}{\partial P} dP + \frac{\partial \varepsilon_h}{\partial R} dR$$

$$d(\Delta S) = \frac{\partial(\Delta S)}{\partial D} dD + \frac{\partial(\Delta S)}{\partial k} dk + \frac{\partial(\Delta S)}{\partial f} df + \frac{\partial(\Delta S)}{\partial P} dP + \frac{\partial(\Delta S)}{\partial R} dR,$$

где $\frac{\partial \varepsilon_h}{\partial D}, \frac{\partial \varepsilon_h}{\partial k}, \frac{\partial \varepsilon_h}{\partial f}, \frac{\partial \varepsilon_h}{\partial P}, \frac{\partial \varepsilon_h}{\partial R}$ - коэффициенты (функции)

чувствительности для утонения ε_h ;

$\frac{\partial(\Delta S)}{\partial D}, \frac{\partial(\Delta S)}{\partial k}, \frac{\partial(\Delta S)}{\partial f}, \frac{\partial(\Delta S)}{\partial P}, \frac{\partial(\Delta S)}{\partial R}$ - коэффициенты (функции)

чувствительности для пружинения ΔS ;

Для определения чувствительности показателей процесса деформирования и накопления статистики используем программный комплекс AutoForm.

Рассмотрим статистические ряды выборки варьирования переменных проектирования для выполненных 100 симуляций процесса вытяжки изделия «Днище» в AutoForm для первого варианта технологии (рис. 4.1.).



Рисунок.4.1. Распределение вариационных рядов переменных проектирования.

Закон распределения вероятности варьирования переменных проектирования для выборки из 100 симуляций представлен на рис. 4.1.

Данные, которые характеризуют особенности распределения вариационных рядов параметров, часто представляют в виде Boxplot with Whiskers (рис.4.2) в AutoForm [11] этот «ящик с усами» располагается горизонтально (рис.4.1).

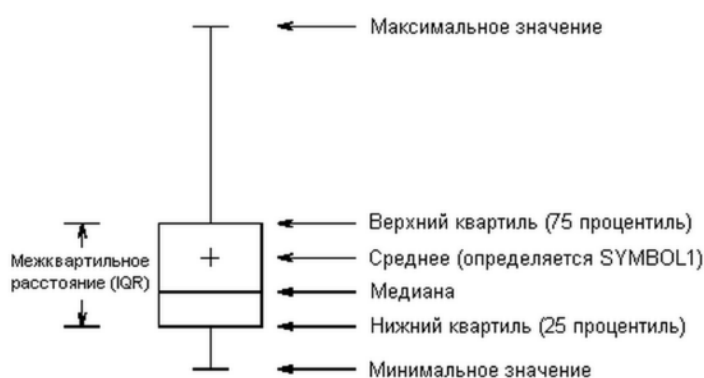


Рисунок 4.2. Оценка расположения данных в вариационных рядах с помощью Boxplot with Whiskers.

Характерные значения данных для статистики распределения переменных проектирования запишем в табл. 4.2.

Таблица 4.2.

Var.	Номин.	Медиана	Миним.	Макс.	Stand. IQR	Lower quantile	Upper quantile
ΔD мм	150	149,92	51,61	248,32	67,5	82,3612	217,442
k	0,5	0,5	0,11	0,89	0,27	0,230055	0,772551
f	0,12	0,12	0,05	0,2	0,05	0,0748981	0,175605
P H	2500000	2502728,92	1027586,14	3973535,65	1009451	1498000	3517200
R мм	20	20	10,19	29,99	6,78	13,2051	26,7621

Анализ чувствительности начнем с исследования статистики изменения утонения. Допустимые значения утонения в соответствии с техническими условиями изготовления должны находиться в пределах 0.2 мм. Абсолютная величина истинной логарифмической деформации по толщине

$$\varepsilon_h = \ln \frac{h}{h_0}$$

не должна превышать $|\varepsilon_h| \leq 0,037$.

В начале рассмотрим утонение заготовки в конце процесса штамповки после вытяжки, разгрузки, обрезки и разгрузки. Для номинального варианта, который в случае нормального закона распределения совпадает со средним и медианным вариантом значение максимального и минимального утонения представлены на рис. 4.3. Результаты показывают, что для заданных вариантов варьирования переменных представленных в табл. 4.1 с вероятностью более 50 процентов можно принять, что предельная величина утонения превышает допустимое значение $|\varepsilon_h| \leq 0,037$.

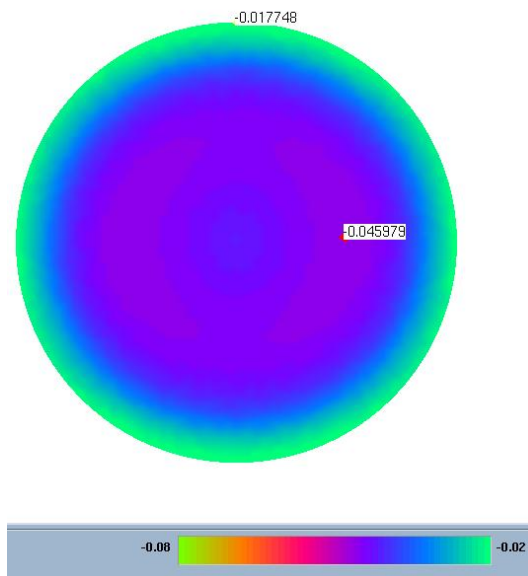


Рисунок 4.3. Величина утонения для номинального варианта.

Утонения для варианты медианы на рис 4.4 близки к данным номинального варианта (рис.4.3).

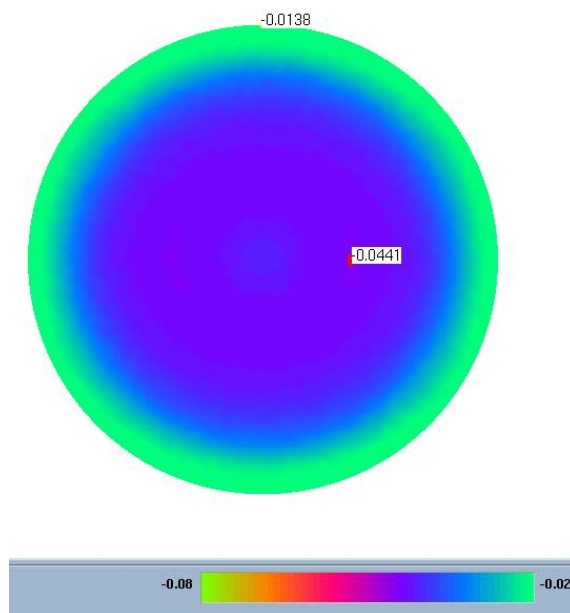


Рисунок 4.4. Величина утонения для варианта медианы.

Разница значений для этих вариантов представлена на рис.4.5. Величина разницы деформаций утонения очень мала. В центре заготовки и по ее краям отношение толщин заготовки по номиналу и по медиане практически равны единице.

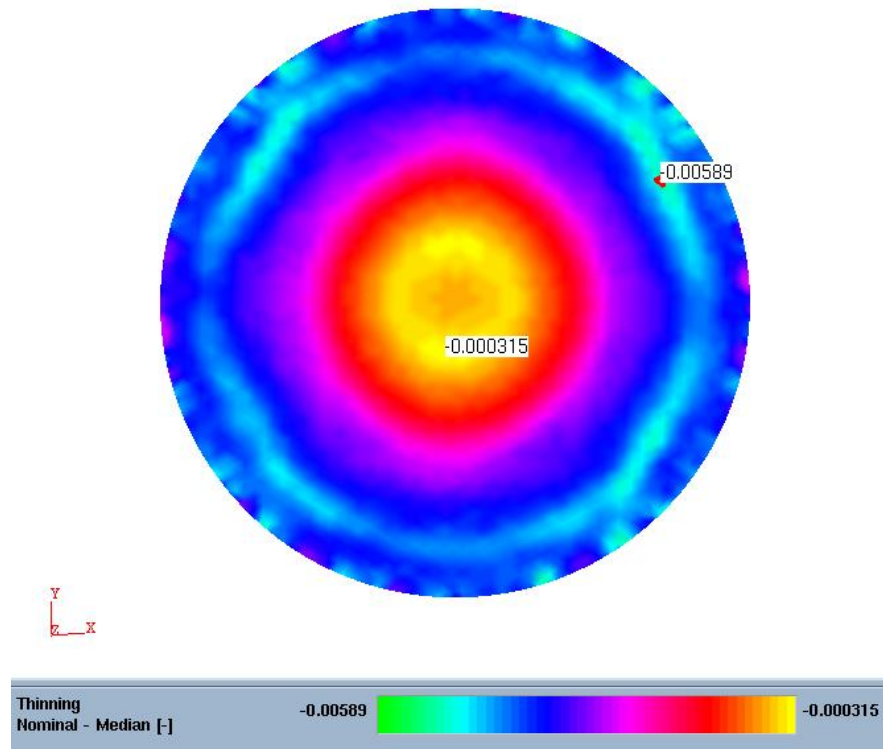


Рисунок 4.5. Разница величины деформации утонения для вариантов номинала и медианы.

Величина **IQR**, которая равна (рис.4.6.)

$$IQR = Q_3 - Q_1,$$

Где Q_1 - первая квартиль $Q_1 = P_{25}$;

Q_3 - третья квартиль $Q_3 = P_{75}$;

Q_2 - вторая квартиль $Q_2 = P_{50}$ является медианой.

Она является интерквартильным размахом или разбросом и характеризует разброс значений в выборке.

Значение **IQR** определяется для величины, которая изменяется в пределах интервала 50% вероятности, а стандартная величина **Standard IQR** оценивается для половины интервала $[-\sigma + \sigma]$ для нормального закона распределения (рис.4.6). Поэтому значение **Standard IQR** будет определяться для интервала 34,14% лежать в пределах **медиана \pm Std Dev** или **среднее $\pm \sigma$** для нормального закона распределения.

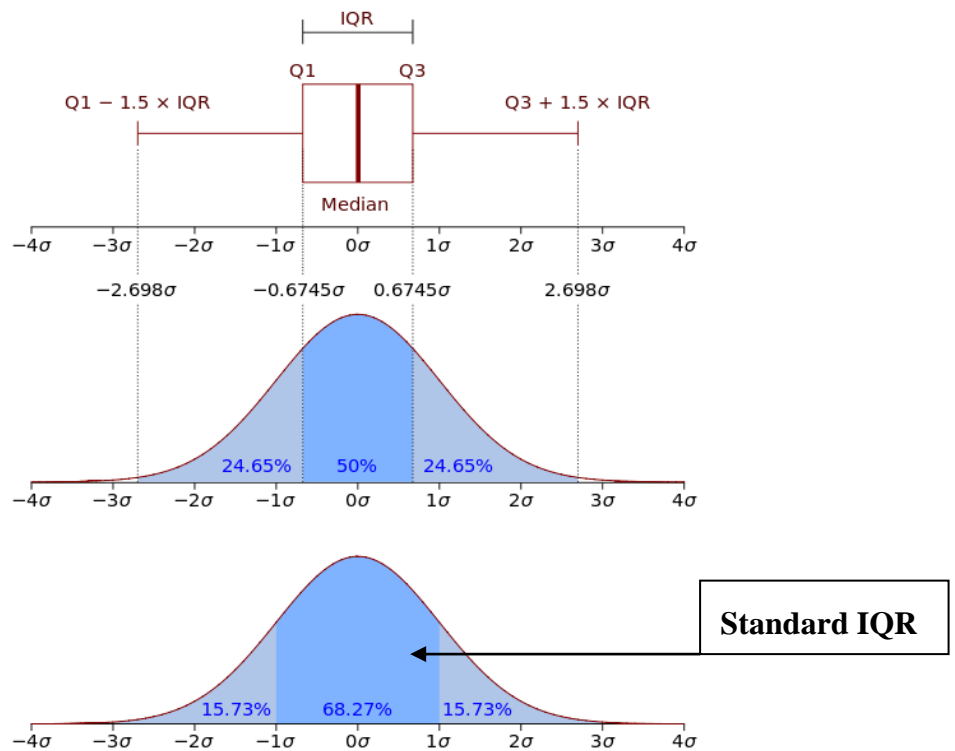


Рисунок 4.6. IQR и Standard IQR.

Значение отвечающие зоне **Standard IQR** для утонения заготовки показаны на рис.4.5.

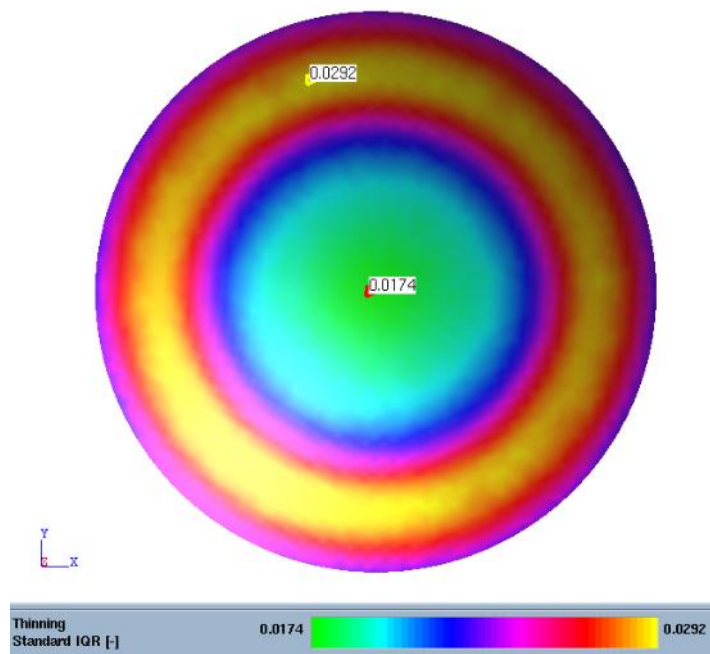


Рисунок 4.7. **Standard IQR** деформации утонения для первого варианта технологического процесса вытяжки.

Зоной наиболее подверженной утонению для 68,27% всех испытаний является «свободная» зона, которая не контролируется путем контакта с

инструментом (рис 4.7) в основное время вытяжки. Эта зона подкрашена в «желтый» цвет и для нее соответствует максимальная величина **Standard IQR** 0,0292.

Допустим, что точность выполненных численных экспериментов соответствует правилу $\pm 3\sigma$ и зона с решениями, которые выходят за пределы значения точности составляет 2,7%. Тогда поле допуска между нижней и верхней границей деформации по толщине ε_h для максимального и минимального изменения составит соответственно 0,0865 и 0,0536 (рис. 4.8).

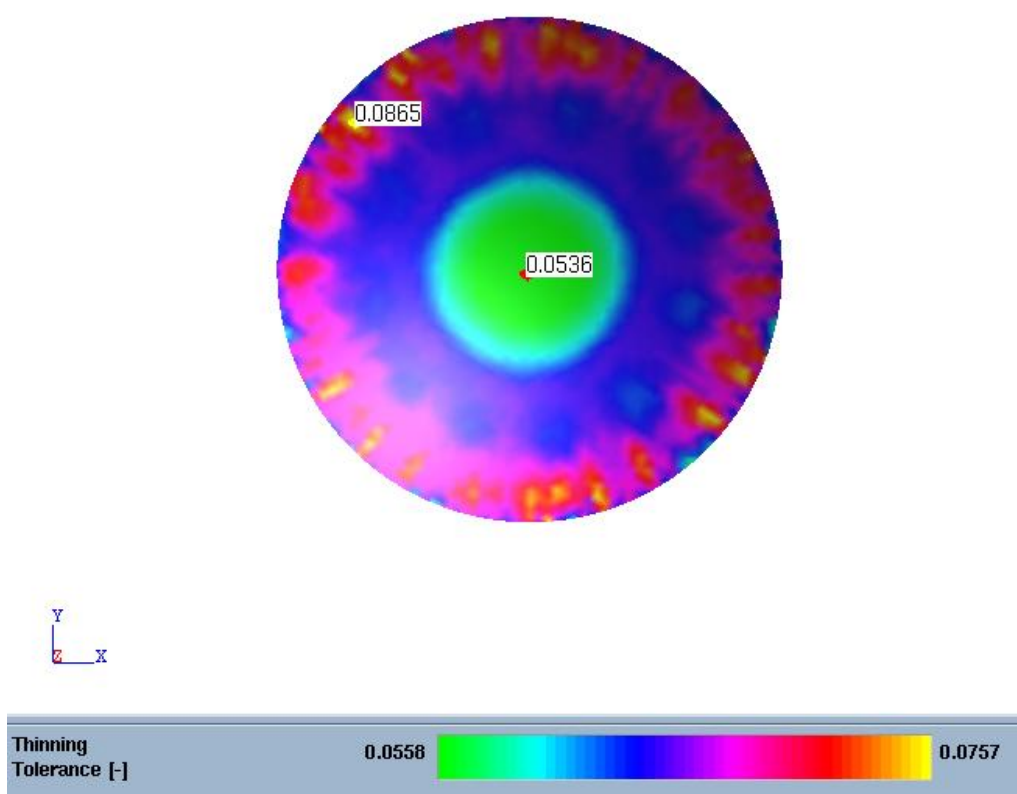


Рисунок 4.8. Диапазон максимальных и минимальных изменений толщины удовлетворяющих условию точности.

Зона с наименьшим изменением толщины (закрашена зеленым цветом) находится под пуансоном практически с начала процесса вытяжки.

Максимальные и минимальные величины ε_h для нижней границы диапазона точности ($\pm 3\sigma$) представлены на рис.4.9. Они свидетельствуют о том, что всё изделие испытывает деформацию утонения. Толщина детали «Днище» при этом наборе параметров управления (табл.4.1) будет изменяться от 5,15

мм до 5,23. Такой режим вытяжки не позволяет получить качественное изделие, т.к. толщина изделия будет меньше, чем 5,3 мм.

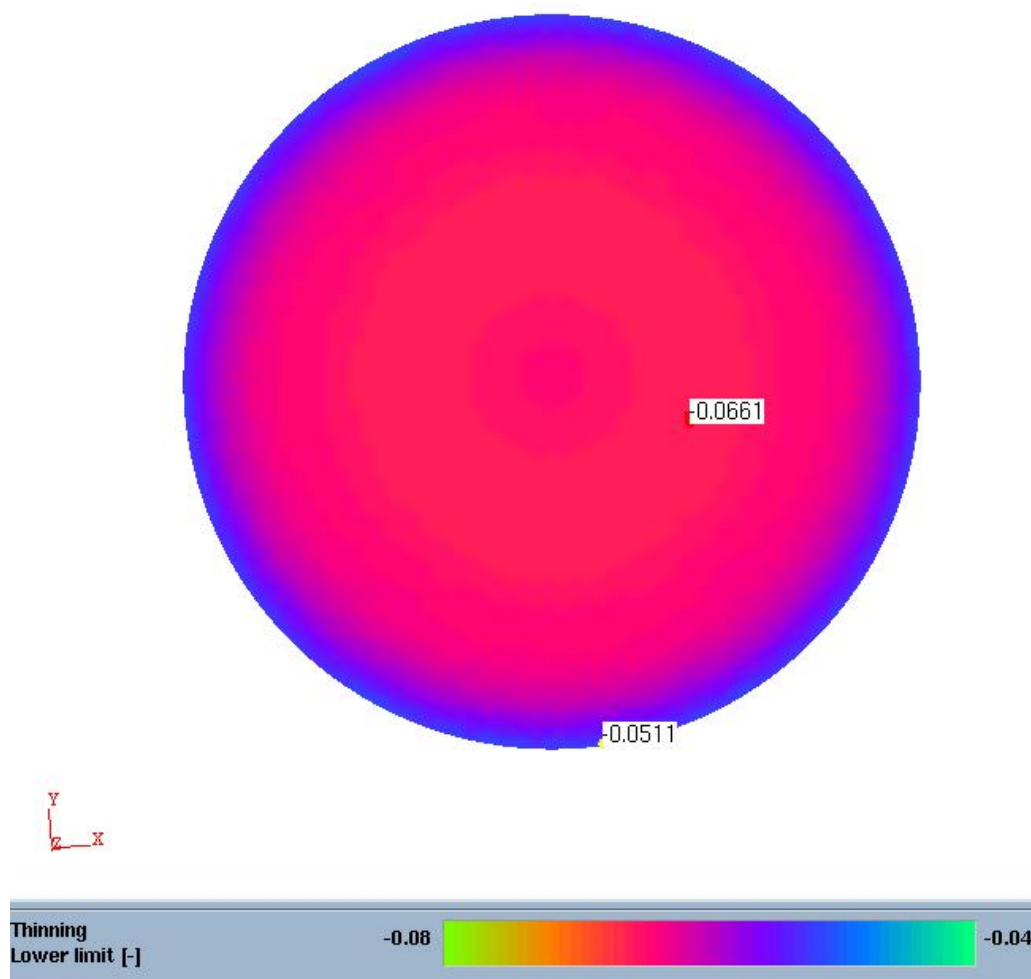


Рисунок 4.9. Поле деформаций утонения для нижней границы допуска точности

Максимальные и минимальные величины ϵ_h для верхней границы диапазона точности ($\pm 3\sigma$) представлены на рис.4.48. Они свидетельствуют о том, что часть изделия, которая находится ближе к проему матрицы, испытывает деформацию утолщения. Толщина детали «Днище» при этом наборе параметров управления (табл.4.1) будет изменяться от 5,44 мм до 5,68. Хотя изделие, будет находиться в заданном допуске по толщине, следует отметить, что в результате слабого натяжения утолщение заготовки будет способствовать складкообразованию и неустойчивости процесса вытяжки.

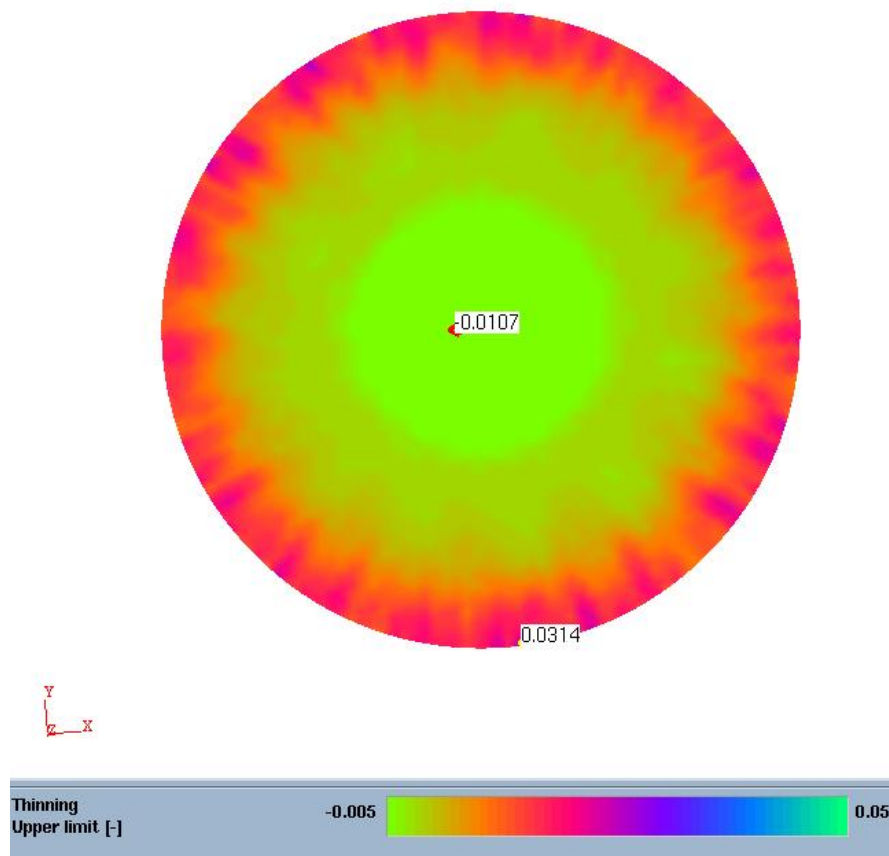


Рисунок 4. 10. Поле деформаций утонения для верхней границы допуска точности.

Исследование чувствительности величины деформации по толщине заготовки от принятых варьируемых параметров (табл.4.1.) начнем с определения наиболее значимого показателя (рис.4.11.). Из рис.4.11. следует, что доминантным параметром является натяжение заготовки с помощью перетяжного ребра, которое выражается величиной коэффициента натяжения (Force factor) k (табл. 4.1.). Вся поверхность заготовки при анализе утонения окрашена в «сиреневый» цвет, который соответствует коэффициенту натяжения k (рис.4.11.), следовательно, решающее влияние на утонение заготовки в процессе штамповки оказывает натяжение, которое определяется суммой факторов:

- размером заготовки D ;
- усилием прижима P ;

- размерами перетяжного ребра (Force Factor k);
- радиусом матрицы R .

Однако доминантное влияние для данных диапазонов изменения выше перечисленных факторов связано с натяжением за счет размеров перетяжного ребра (Force Factor k).

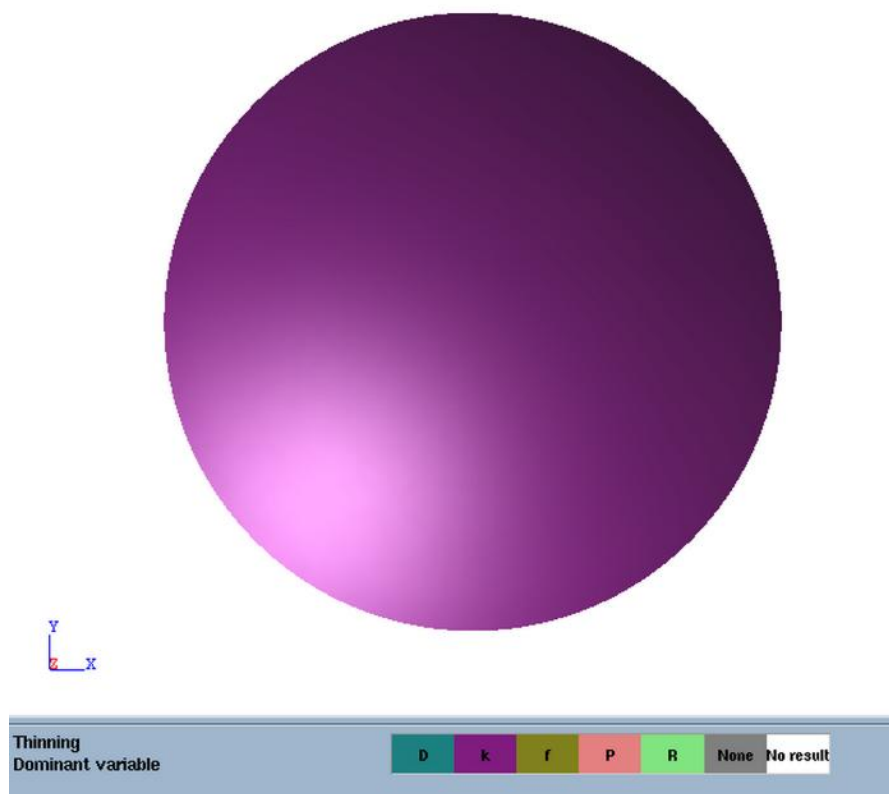


Рисунок 4.11. Зона влияния доминантной переменной проектирования.

Если существует полная корреляция между чувствительностью и параметром проектирования, то величина влияния будет равна 1. Наибольшее влияние параметра проектирования k (Force factor) на утонение (ϵ_h) достигается в зоне окрашенной в «желтый» цвет (рис. 4.12), там влияние максимально равно 0,948 и оно близко 1. Меньшее влияние параметра проектирования k (Force factor) на утонение (ϵ_h) наблюдается в зоне под пуансоном. Оно оценивается минимальным значением 0,895, которое также близко к единице.

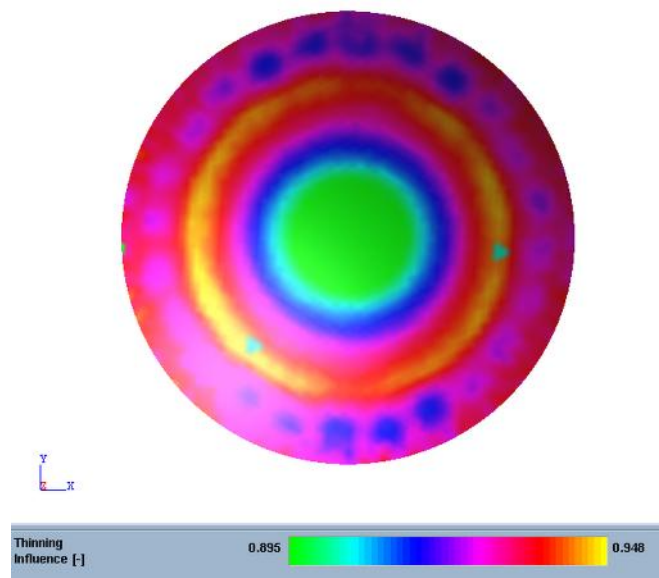


Рисунок 4.12. Величина влияния параметра k на зоны деформирования заготовки.

Для дальнейшей оценки чувствительности выделим центральную зону заготовки, которая испытывает по результатам численных экспериментов наибольшее утонение ε_h (рис. 4.13).

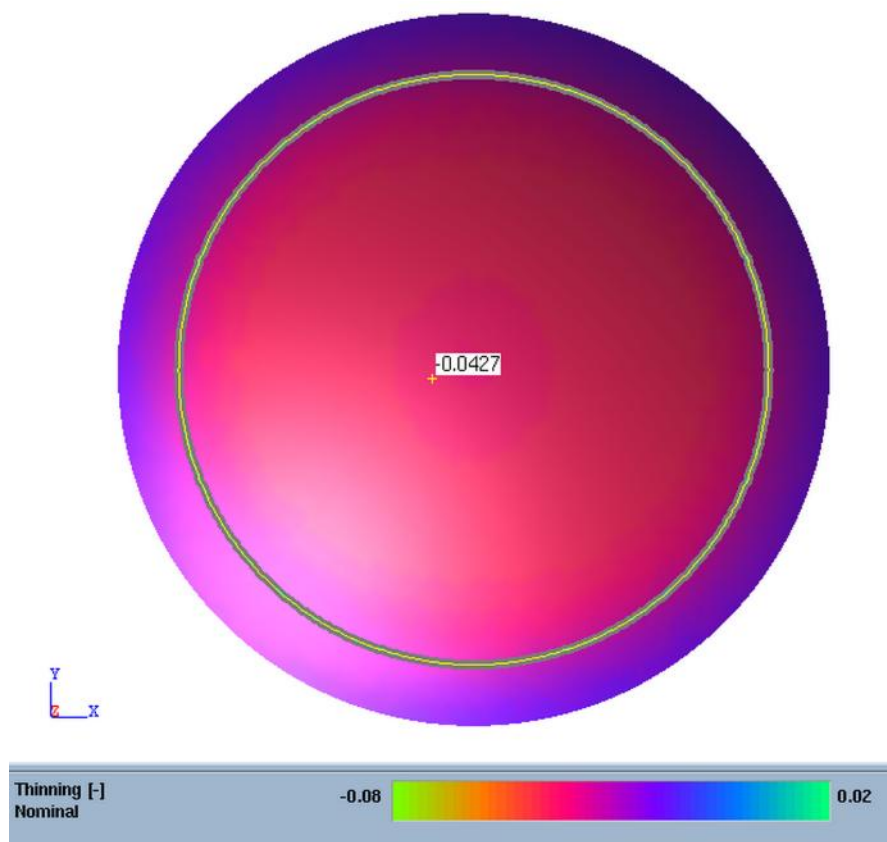


Рисунок 4.13. Зона анализа чувствительности утонения

Анализ показателей процесса штамповки для номинального варианта в выделенной зоне 2 представлен на рис. 4.14.

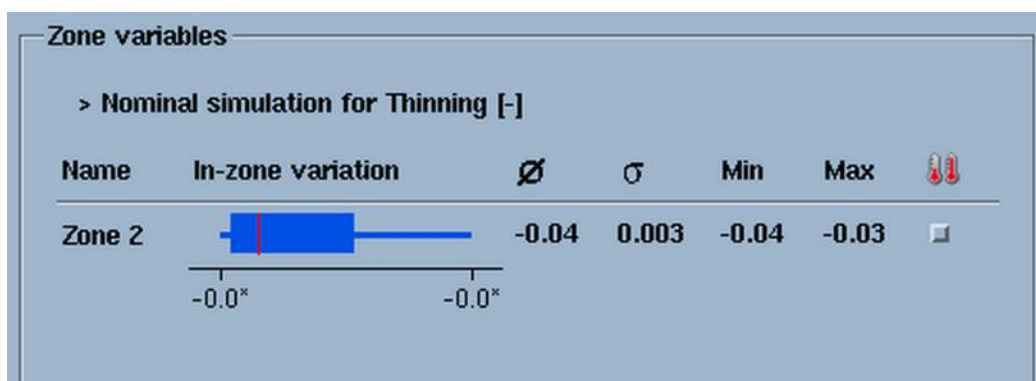


Рисунок 4.14. Распределение показателей статистики для номинального варианта для выделенной зоны.

Для этой зоны для номинального варианта значения среднего (mean) $\bar{x} = -0,044$, стандартное отклонение выборки (Standard deviation) $\sigma = 0,003$, минимальное и максимальных значения утонения в выделенной зоне $\text{Min} = -0,04$ и $\text{Max} = -0,03$. Все значения округлены до первого знака после запятой.

Влияние на чувствительность утонения заготовки для выделенной зоны можно показать на рис. 4.15

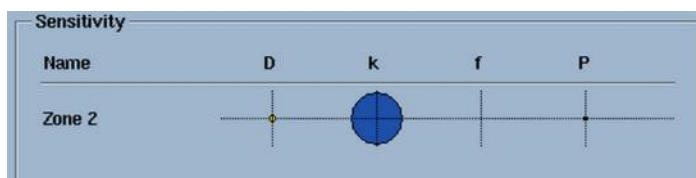


Рисунок 4.15. Влияние переменных проектирования на функцию чувствительности утонения заготовки для выделенной зоны.

Размер окружности переменной k говорит о наибольшем влиянии этой переменной проектирования на чувствительность ε_h . Синий цвет свидетельствует о том, что при увеличении k значение ε_h увеличивается по абсолютной величине при отрицательном знаке самого утонения. Желтый цвет D, P говорит о недостаточной информации о влиянии этих факторов.

Табличное представление значений утонения (ε_h) R_V от изменения натяжения (k) D_V для характерных значений «коробки с усами», а также поле разбросов для этих величин показано на рис.4.16.

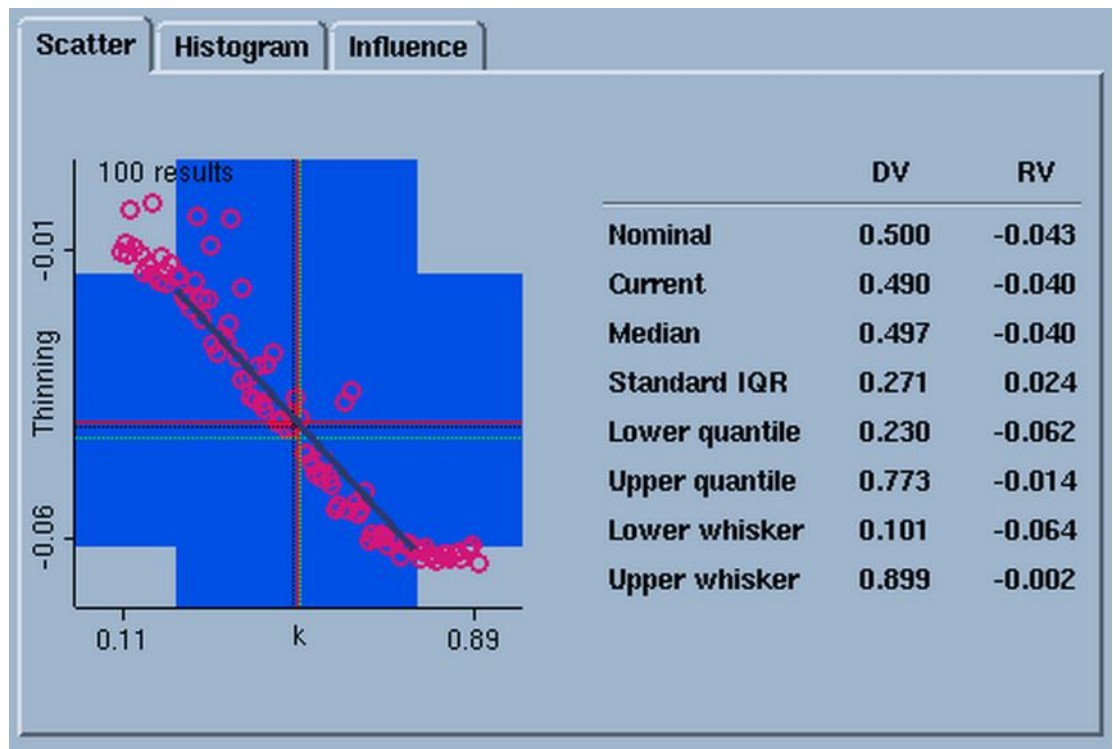


Рисунок 4.16. График разбросов соответствия величин натяжения k и деформации утонения для всех вариантов симуляций.

На рис. 4.16 видна явная взаимосвязь между величинами ε_h и k , которая говорит о выраженной их корреляционной и регрессионной взаимосвязи $\varepsilon_h = f(k)$.

Гистограмма распределения k соответствует закону равномерного распределения, а утонения гистограмма с правой асимметрией (рис.4.17)

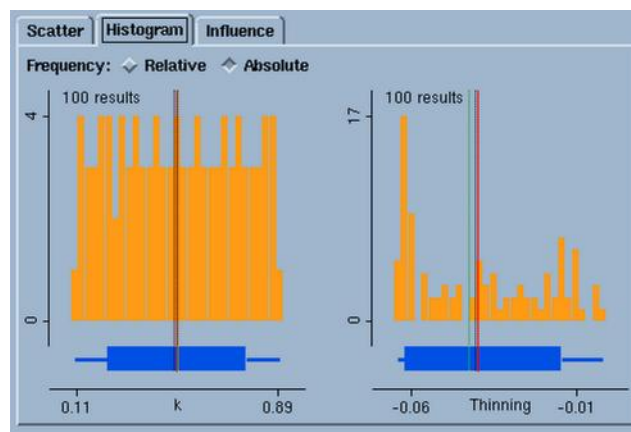


Рисунок 4.17. Гистограммы вариационных рядов переменной натяжения и функции утонения

Окончательным доказательством преимущественного влияния фактора натяжения на перетяжном ребре является диаграмма Парето, которая показывает, что (Force factor) контролирует 95,81% изменения утонения из всех возможных переменных проектирования. Все остальные переменные даже в своей сумме не перешагнули 4% барьер.

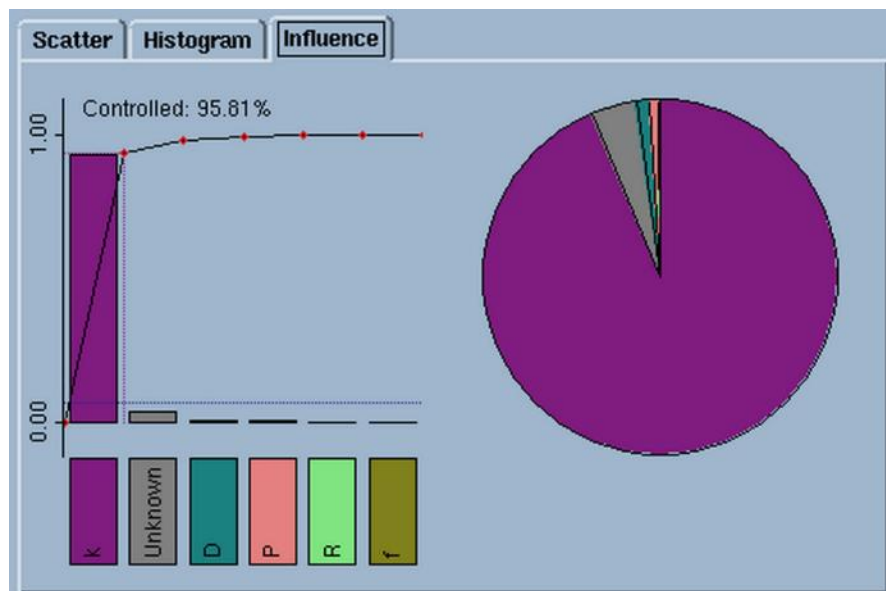


Рисунок 4.18. Диаграмма Парето контроля деформации утонения с помощью переменных проектирования.

Допустимые значения пружинения в соответствии с техническими условиями изготовления должны находиться в пределах ± 1 мм, или абсолютная величина нормального смещения нормально поверхности ΔS не должна превышать $|\Delta S| \leq 1$ мм.

Рассмотрим пружинение заготовки. Для номинального варианта процесса значение максимального и минимального пружинения представлены на рис. 4.19. Пружинение нормально поверхности изделия для нормального закона распределения статистики имеет качественное совпадение с тестами со средним и медианным вариантом (рис. 4.19). Результаты показывают, что для заданных вариантов варьирования переменных представленных в табл. 4.1 с вероятностью более 50 процентов можно принять, что предельная величина пружинения превышает допустимое значение $|\Delta S| \leq 1$ мм.

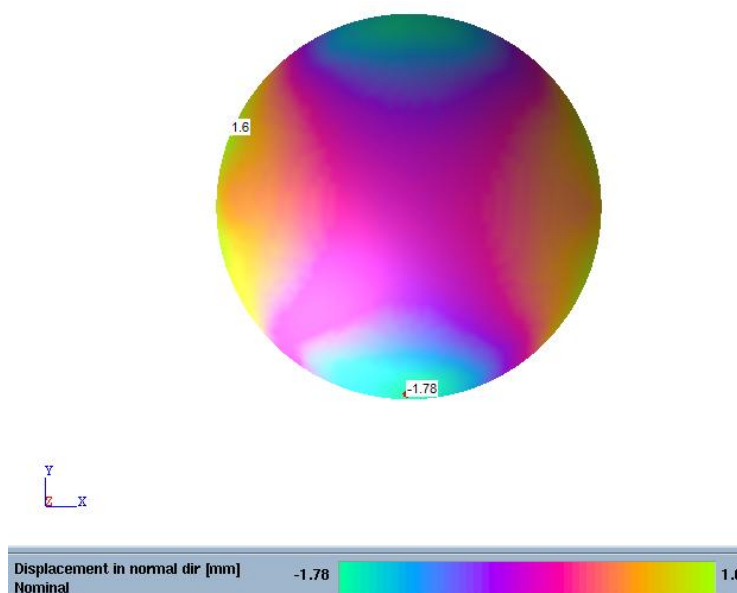


Рисунок 4.19. Величина пружинения для номинального варианта.

Пружинение для варианты медианы на рис 4.20 близки к данным номинального варианта (рис.4.19).

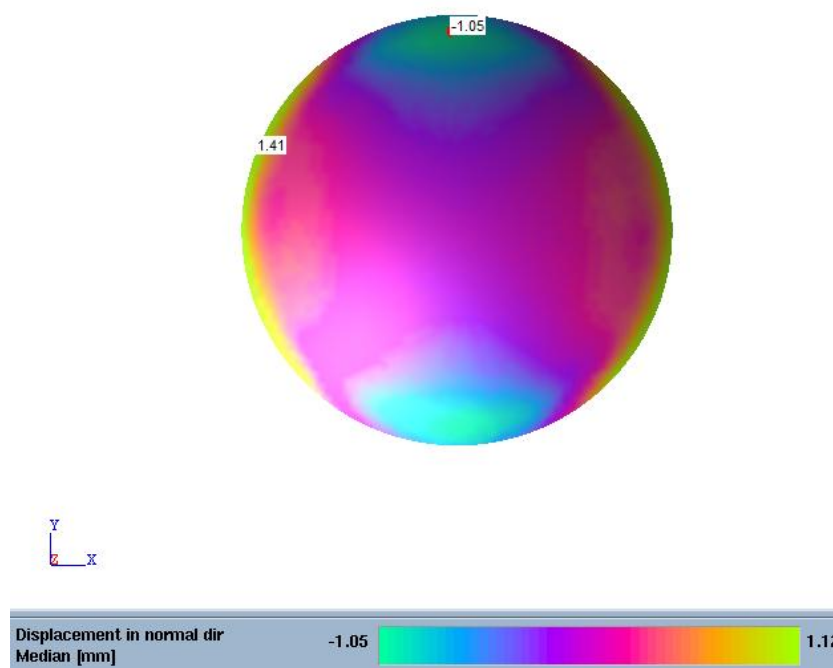


Рисунок 4.20. Величина пружинения для варианта медианы.

Разница значений для этих вариантов представлена на рис.4.21. Величина разницы пружинений находится в пределах $|\Delta S| \leq 1$ мм . В центре заготовки

пружинение отсутствует, а по ее краям по номиналу и по медиане меняется в пределах $-2 \leq \Delta S \leq 2$.

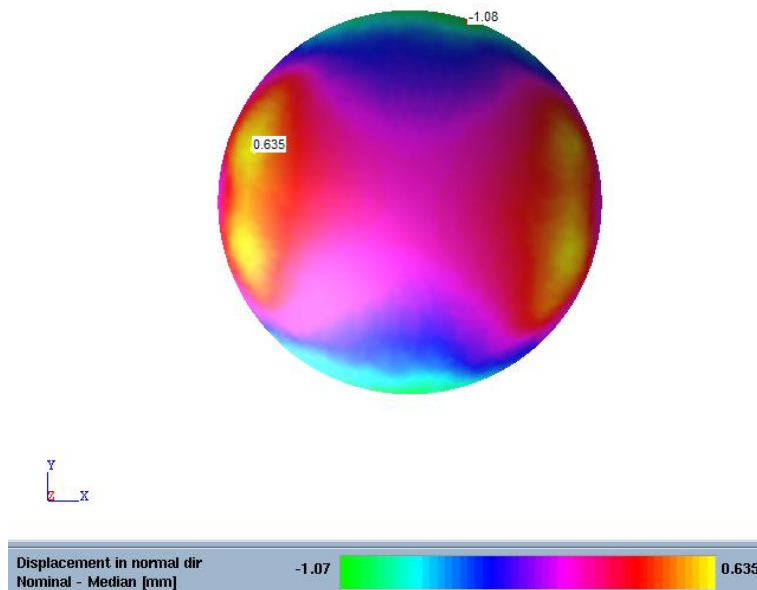


Рисунок 4.21. Разница величины деформации пружинения для вариантов номинала и медианы.

Значение отвечающие зоне **Standard IQR** для утонения заготовки показаны на рис.4.22.

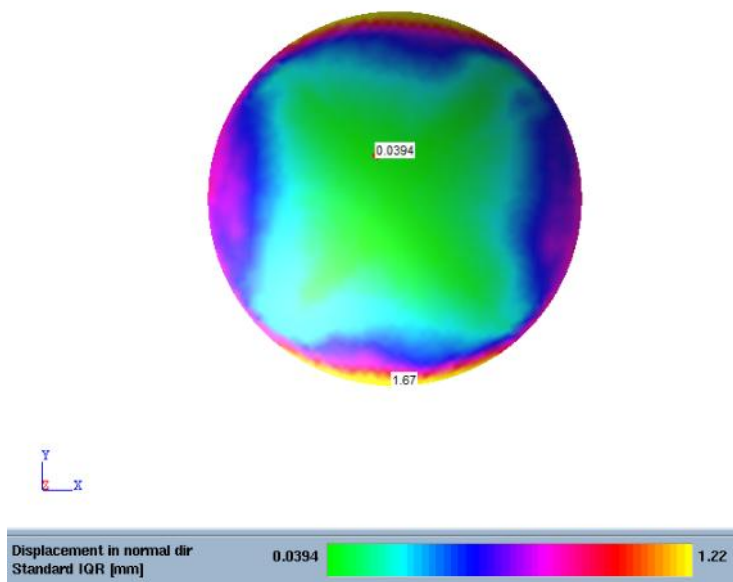


Рисунок 4.22. **Standard IQR** деформации пружинения для первого варианта технологического процесса вытяжки.

Зоной наиболее подверженной пружинению для 68,27% всех испытаний является зона края заготовки, которая испытала влияние изгибных моментов в

результате перехода через радиус матрицы (рис 4.22) в основное время вытяжки. Эта зона подкрашена в «желтый» цвет и для нее соответствует максимальная величина смещения **Standard IQR** - 1.67.

Допустим, что точность выполненных численных экспериментов соответствует правилу $\pm 3\sigma$ и зона с решениями, которые выходят за пределы значения точности составляет 2,7%. Тогда поле допуска нормального смещения поверхности заготовки ΔS между нижней и верхней границей пружинения для максимального и минимального изменения составит соответственно 19,9 и 0,236 (рис. 4.23).

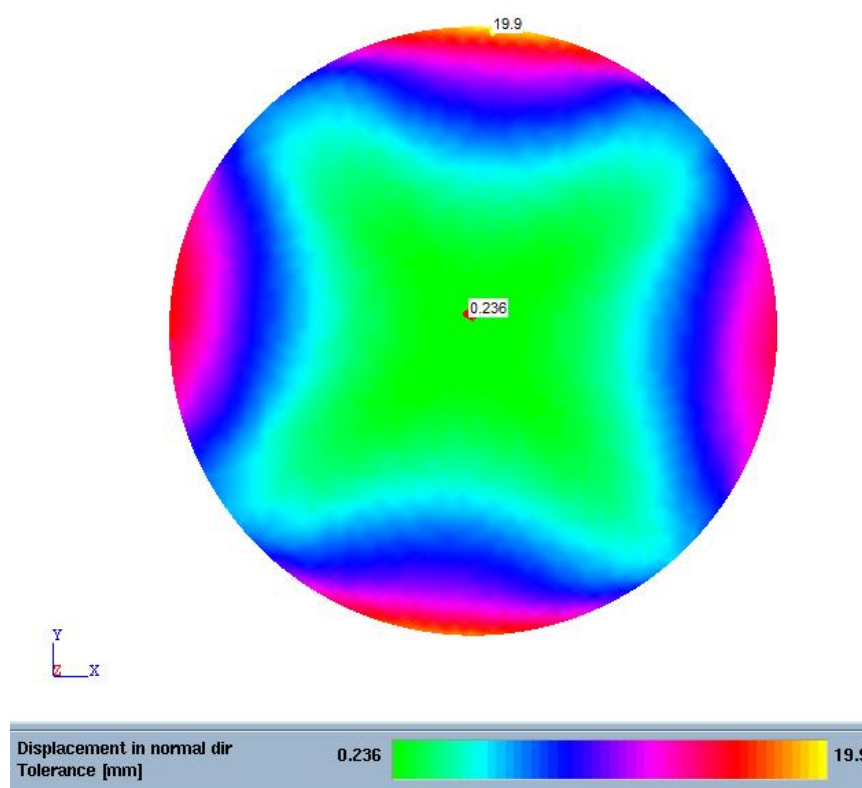


Рисунок 4.23. Диапазон максимальных и минимальных изменений пружинения удовлетворяющих условию точности.

Зона с наименьшим изменением пружинения (закрашена зеленым цветом) Она находится под пуансоном в процессе большей части времени вытяжки. «Крестообразный» характер зоны объясняется влиянием анизотропии. Наибольшая протяженность зоны соответствует материальным волокнам, которые расположены под углом 45° и 135° относительно направления вытяжки.

Максимальные и минимальные величины ΔS для нижней границы диапазона точности ($\pm 3\sigma$) представлены на рис.4.24. Они свидетельствуют о том, что всё изделие испытывает пружинение определяемое анизотропией. Для нижней границы диапазона (рис.4.24) определяющее значение имеет пружинение в отрицательном направлении нормали к детали. Такое пружинение $-\Delta S$ может достигать величины до $-12,4$ мм характерно для краевых зон в виде сегмента в направлении оси y . Такие режимы вытяжки не позволяют получать качественное изделие, т.к. пружинение изделия будет больше, чем $|\Delta S| \leq 1$ мм.

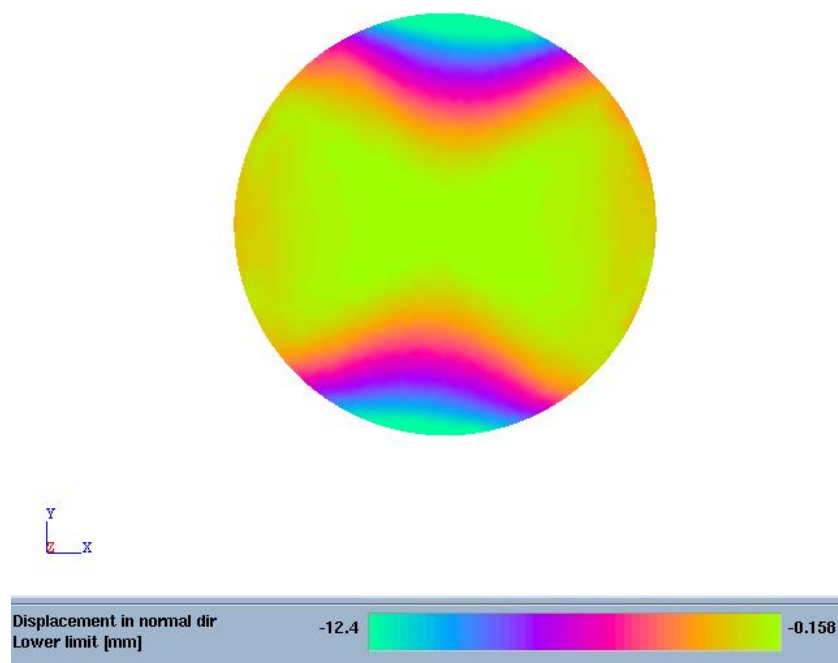


Рисунок 4.24. Поле деформаций пружинения для нижней границы допуска точности

Максимальные и минимальные величины ΔS для верхней границы диапазона точности ($\pm 3\sigma$) представлены на рис.4.25. Они свидетельствуют о том, что часть изделия, которая находится ближе к проему матрицы, испытывает деформацию пружинения. Пружинение явно зависит от анизотропии. Для ортотропной заготовки предельные случаи представлены на рис. 4.24 и 4.25. Для верхней границы диапазона (рис.4.24) определяющее значение имеет пружинение в положительном направлении нормали к детали.

Такое пружинение $-\Delta S$ может достигать величины до -12,8 мм характерно для краевых зон в виде сегмента в направлении оси x. Такие режимы вытяжки не позволяют получать качественное изделие, т.к. пружинение изделия будет больше, чем $|\Delta S| \leq 1$ мм.

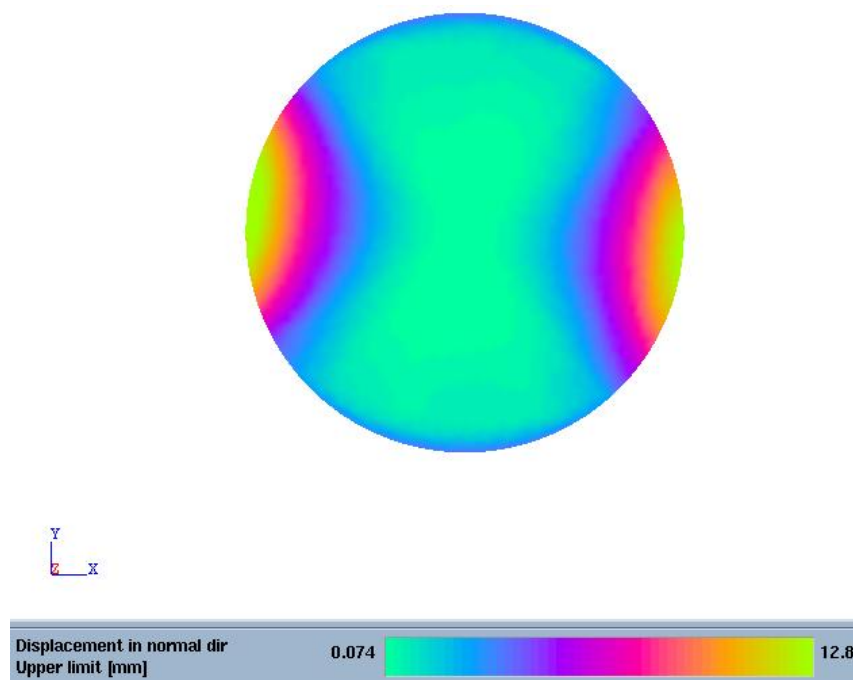


Рисунок 4.25. Поле деформаций пружинения для верхней границы допуска точности

Исследование чувствительности пружинения от принятых варьируемых параметров (табл.4.1.) начнем с определения наиболее значимого показателя (рис.4.26.). Из рис.4.26. следует, что доминантным параметром является натяжение заготовки с помощью перетяжного ребра, которое выражается величиной коэффициента натяжения (Force factor) k (табл. 4.1.). Почти вся поверхность заготовки при анализе пружинения закрашена в сиреневый цвет, который соответствует коэффициенту натяжения k (рис.4.26.). Однако меньшая часть поверхности вообще не закрашена. Это «белое» пятно может быть результатом неуказанных параметров (например, анизотропии) или недостаточным количеством проведенных численных экспериментов. Следовательно, решающее влияние на пружинение заготовки в процессе

штамповки оказывает из выбранных параметров натяжение, которое определяется суммой факторов:

- размером заготовки D ;
- усилием прижима P ;
- размерами перетяжного ребра (Force Factor k);
- радиусом матрицы R .

Однако доминантное влияние для данных диапазонов изменения выше перечисленных факторов связано с натяжением за счет размеров перетяжного ребра (Force Factor k).

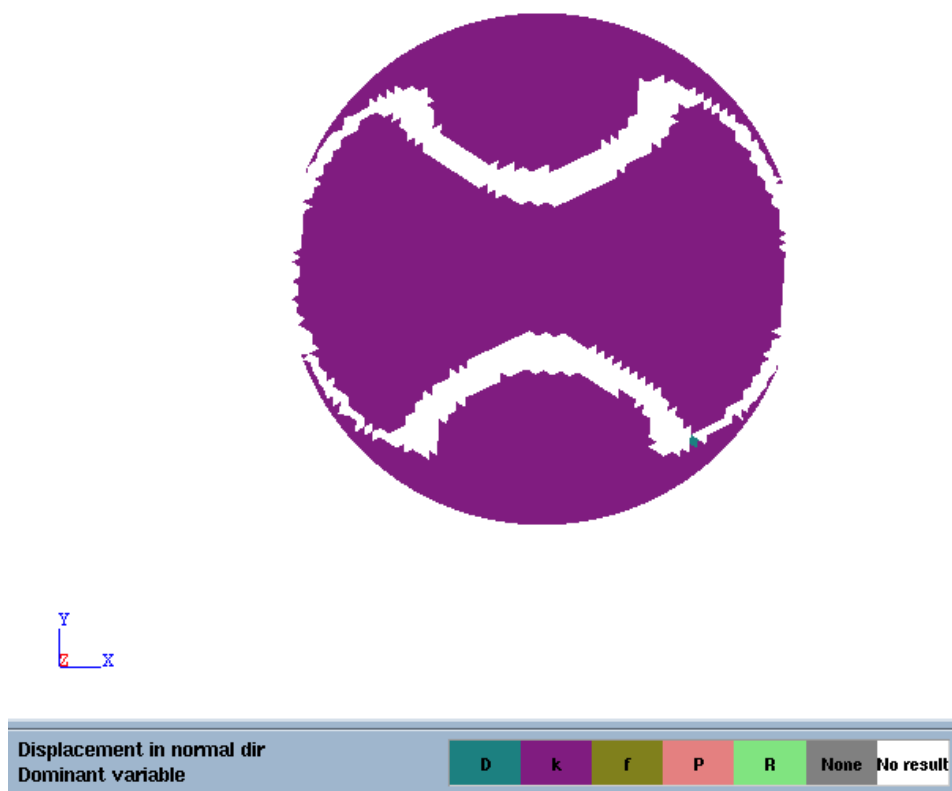


Рисунок 4.26. Зона влияния доминантной переменной проектирования.

Если существует полная корреляция между чувствительностью и параметром проектирования, то величина влияния будет равна 1. Наибольшее влияние параметра проектирования k (Force factor) на пружинение (ΔS) достигается в зоне окрашенной в «желтый» цвет (рис. 4.27), там влияние максимально равно 0,62 и оно близко 1. Меньшее влияние параметра проектирования k (Force factor) на пружинение (ΔS) наблюдается в зоне на границе с «белым» пятном. Оно оценивается минимальным значением 0,0721. Встречаются и конечные

элементы, окрашенные в зеленый цвет. Следует также обратить внимание на зоны по краям изделия, которые также имеют высокую чувствительность к натяжению заготовки 0,3...0,5. Ситуация с определением чувствительности является неоднозначной.

Для дальнейшего анализа чувствительности назначим несколько зон в соответствии с симметрией их положения.

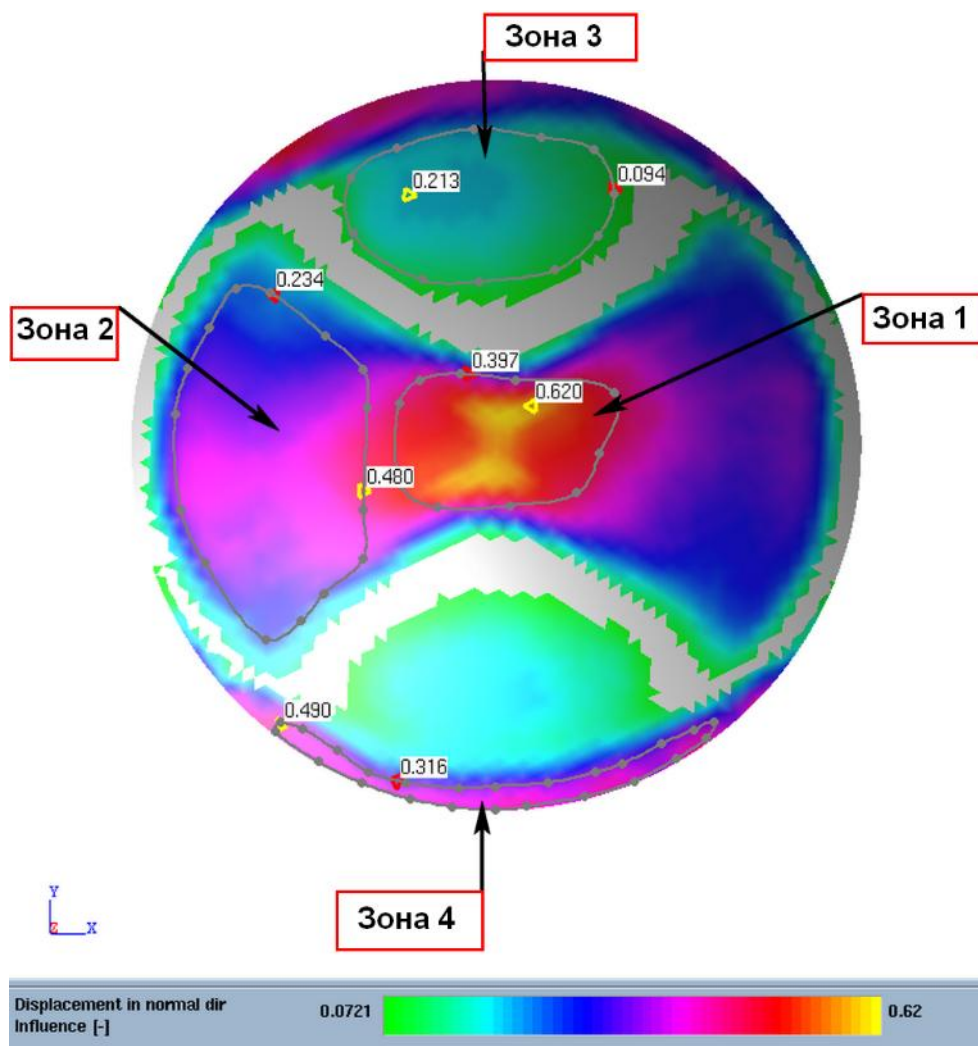


Рисунок 4.27. Величина влияния параметра k на зоны деформирования заготовки.

Для дальнейшей оценки чувствительности с учетом симметрии выделим четыре характерные зоны заготовки (рис.4.27):

- 1-Центр заготовки.
- 2-Центральная зона, смещенная к краю.
- 3-Промежуточная зона.

- 4-Край заготовки в направлении оси Y.

Величина коэффициента чувствительности пружинения $\frac{\partial(\Delta S)}{\partial k}$ от натяжения на перетяжном ребре представлена на рис. 4.28.

Анализ показателей процесса штамповки для номинального варианта в выделенных зонах представлен на рис. 4.28.

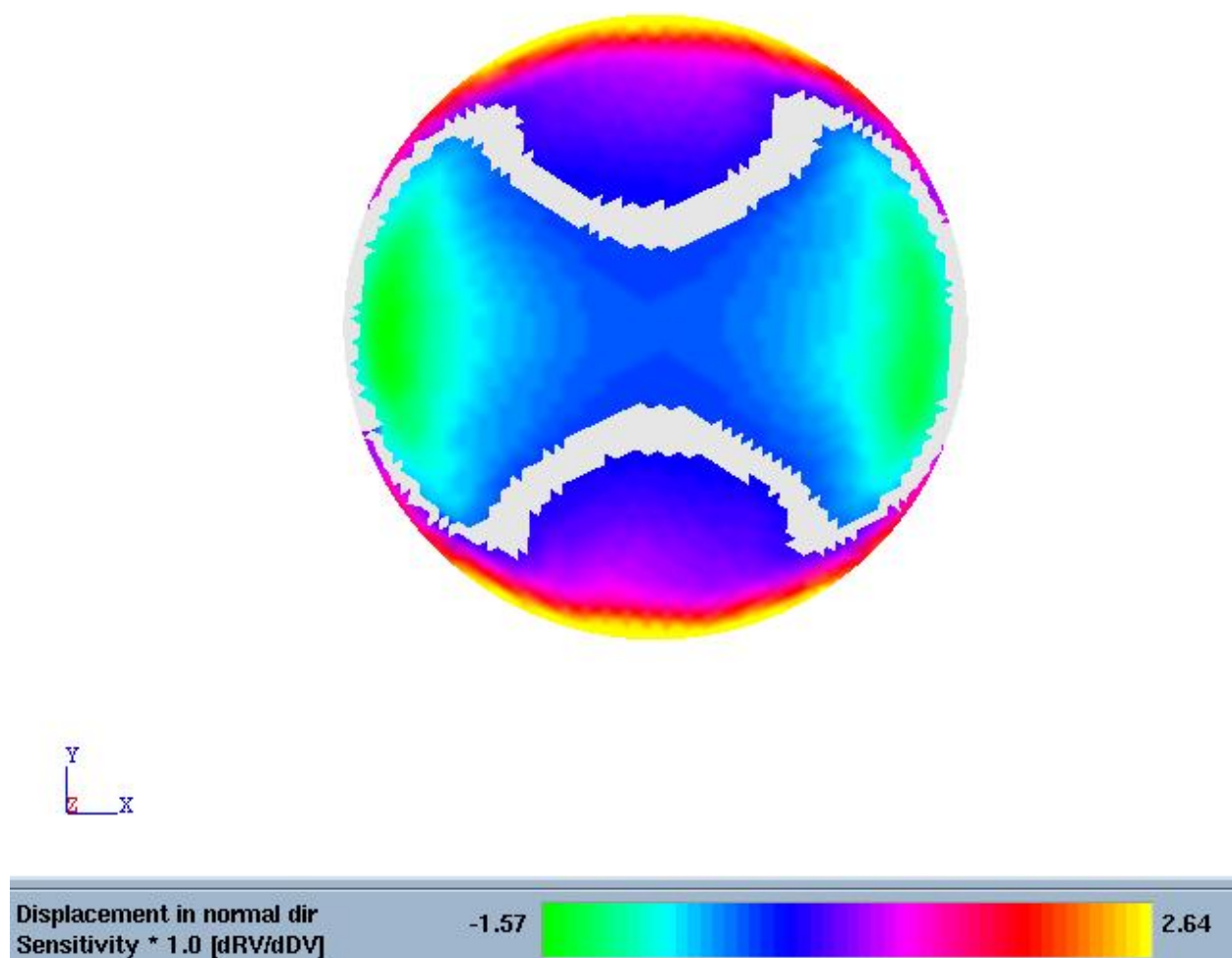


Рисунок 4.28. Распределение величины коэффициента чувствительности пружинения $\frac{\partial(\Delta S)}{\partial k}$.

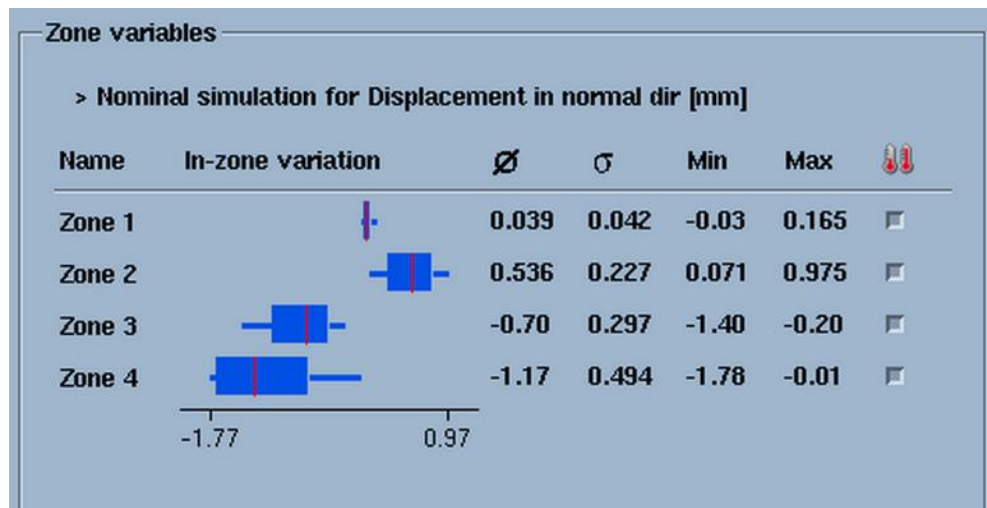


Рисунок 4.29. Распределение показателей статистики пружинения для номинального варианта для выделенных четырех зон.

Для этих зон для номинального варианта значения изменяются в пределах:

среднего пружинения (mean) $\bar{x} = 0,039 \dots -1,17$;

Стандартное отклонение

выборки (Standard deviation) $\sigma = 0,042 \dots 0,494$;

минимального пружинения Min = -1,78...0,071;

максимального пружинения Max = -0,01...0,975.

Все значения округлены до первого знака после запятой. Наибольшие значения пружинения по модулю наблюдаются в краевых зонах.

Чувствительность пружинения заготовки для выделенных зон в зависимости от параметров управления процессом показаны на рис. 4.15

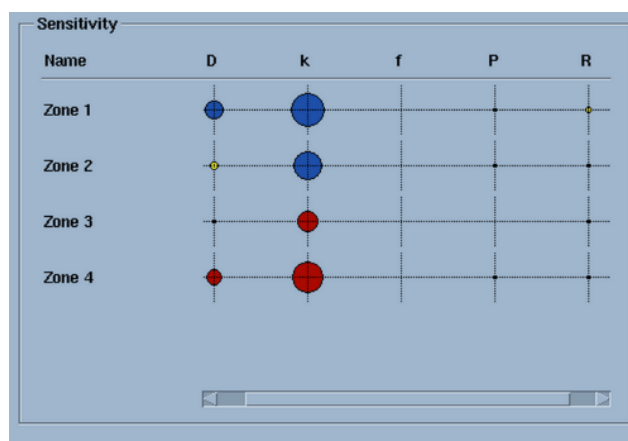


Рисунок 4.30. Влияние переменных проектирования на функцию чувствительности пружинения заготовки для выделенных зон.

Размер окружности переменной k говорит степени влияния этой переменной проектирования на чувствительность пружинения ΔS . Синий цвет свидетельствует о том, что при возрастании переменной проектирования значение ΔS увеличивается по абсолютной величине, но величина переменной проектирования уменьшается или наоборот ΔS уменьшается, а величина переменной проектирования возрастает (т.е. коэффициент чувствительности отрицательный). Желтый цвет D , P , K и малые диаметры окружностей говорит о недостаточной информации о влиянии этих факторов. Красный цвет указывает на то, что коэффициент чувствительности положителен. Для вытяжки изделия по первому варианту характерно, что материальные волокна ортотропной заготовки в направлении x , которое совпадает с направлением прокатки испытывают положительное пружинение. Материальные волокна перпендикулярные направлению прокатки прогибаются при разгрузке в противоположную сторону.

Табличное представление значений пружинения (ΔS) RV от изменения натяжения (k) и (D) DV для характерных значений «коробки с усами» для выделенных четырех зон, а также поля разбросов для этих величин показаны на рис. 4.31,4.32,4.33,4.34,4.35, 4.36,4.37,4.38,4.39.

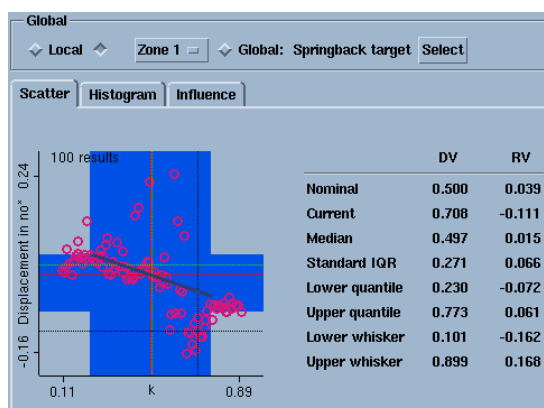


Рисунок 4.31. График функции чувствительности пружинения от натяжения k для зоны 1.

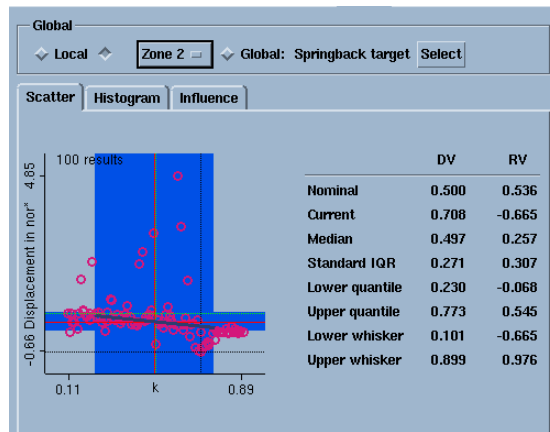


Рисунок 4.32. График функции чувствительности пружинения от натяжения k для зоны 2.

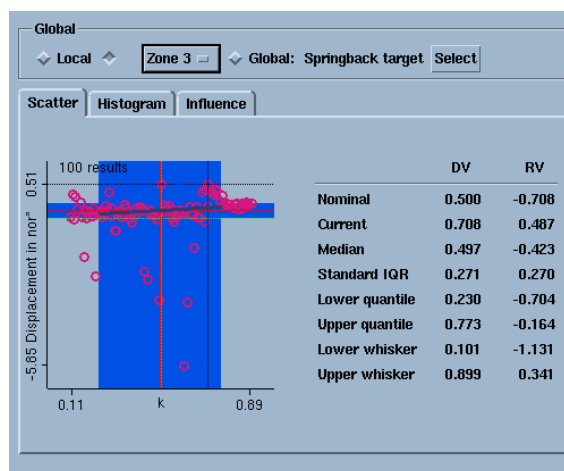


Рисунок 4.33. График функции чувствительности пружинения от натяжения k для зоны 3.

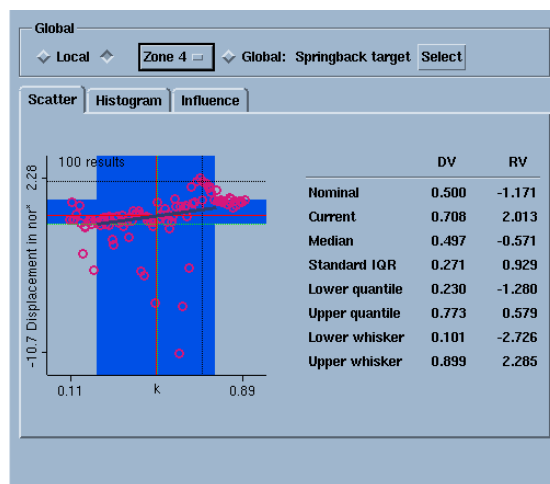


Рисунок 4.34. График функции чувствительности пружинения от натяжения k для зоны 4.

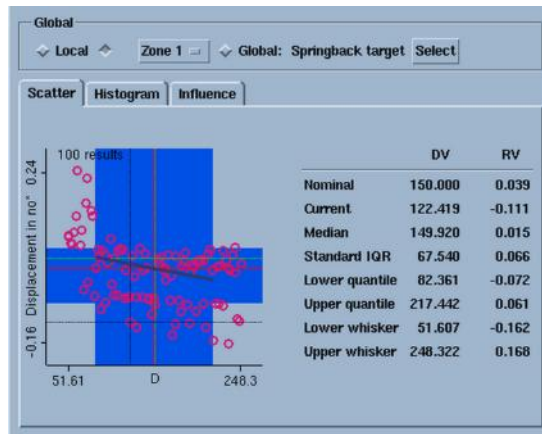


Рисунок 4.35. График функции чувствительности пружинения от диаметра заготовки D для зоны 1.

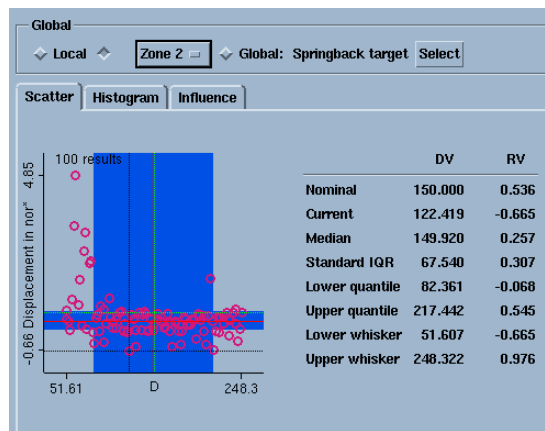


Рисунок 4.36. График функции чувствительности пружинения от диаметра заготовки D для зоны 2.

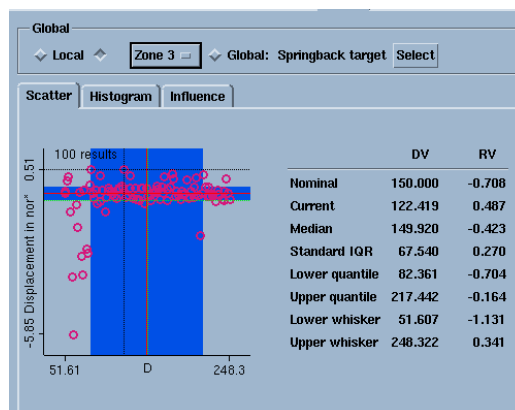


Рисунок 4.37. График функции чувствительности пружинения от диаметра заготовки D для зоны 3.

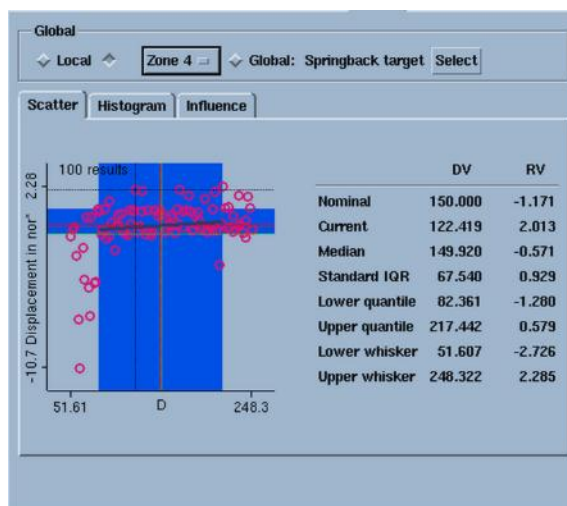


Рисунок 4.38. График функции чувствительности пружинения от диаметра заготовки D для зоны 4.

На рис. 4.31, 4.32, 4.33, 4.34, 4.35, 4.36, 4.37, 4.38, 4.39 видна явная взаимосвязь между величинами ΔS , k и D которая говорит о выраженной их корреляционной и регрессионной взаимосвязи $\Delta S = f(k)$ и $\Delta S = f(D)$.

Гистограммы распределения величин натяжения k , размеров D и соответствующие графики Парето влияния параметров проектирования на коэффициенты (функции чувствительности) $\frac{\partial(\Delta S)}{\partial k}$ и $\frac{\partial(\Delta S)}{\partial D}$ представлены в табл. 4.3 и 4.4.

Гистограммы k и D имеют равномерное распределение, поэтому одинаковы для всех зон. Гистограммы распределения нормального смещения поверхности после разгрузки различны для всех выбранных зон (табл. 4.3. и 4.4). Для зон 1 и 4 характерно «двугорбое» распределение пружинений, причем для зоны 4 явная правая асимметрия. Для зоны 2 распределение с левой асимметрией, для зоны 3 с правой асимметрией.

Изменение значений k и B соответствует интервалам варьирования заданным в табл. 4.1.

Таблица 4.3.

Зона	Гистограммы	График Парето
Гистограммы распределения k , ΔS и соответствующие графики Парето		
1		
2		
3		

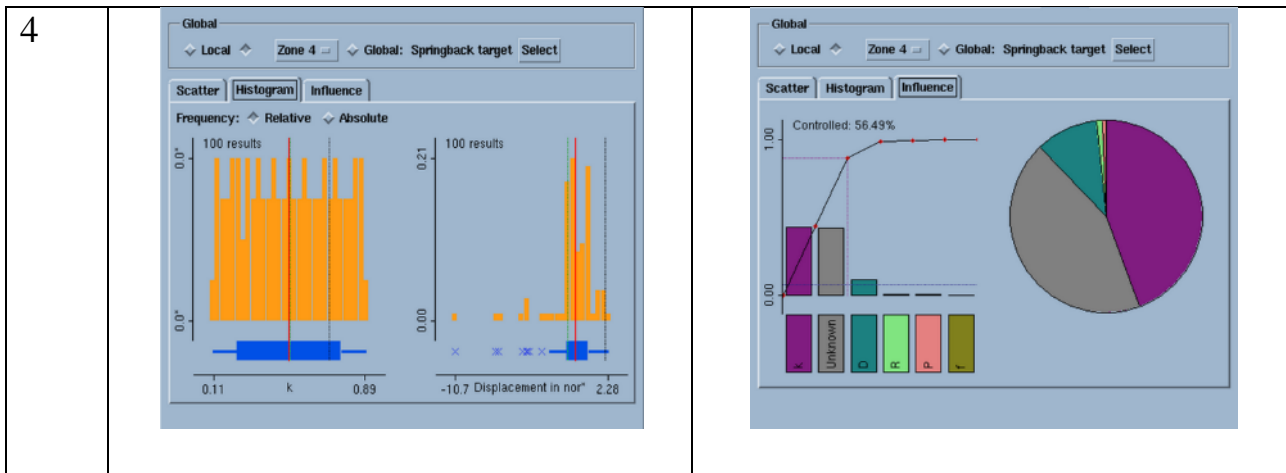
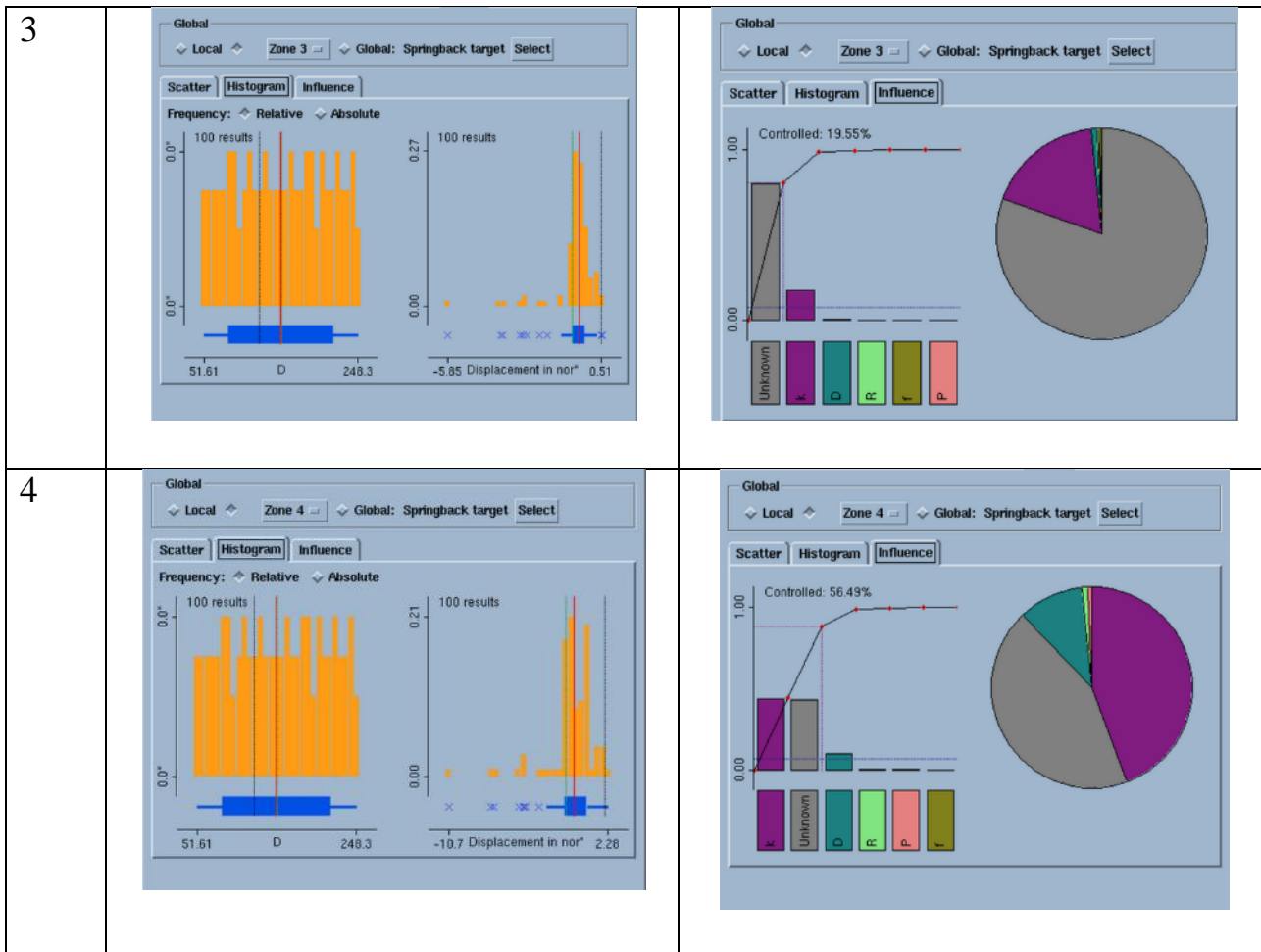


Таблица 4.4.

Зона	Гистограммы	График Парето
Гистограммы распределения D, ΔS и соответствующие графики Парето		
1		
2		



Изменение смещений нормально поверхности изделия после разгрузки (табл.4.3 и 4.4) существенно отличается как качественно, так и количественно для выделенных зон. Если рассматривать границы распределения для «левого уса» и «правого уса» «ящика с усами», то они захватывают область размером $(-2,698\sigma \dots +2,698\sigma)$. Для них по выделенным зонам значения пружинения составят интервалы (см. табл. 4.5):

Таблица 4.5.

Зоны	Величина пружинения мм	
	Граница «левого уса»	Граница «правого уса»
1	-0,18	0,18
2	-0,6	-0,9
3	-1,17	0,34
4	-3,2	2,3

Остальные значения пружинения выходящие за пределы (табл.4.5) по зонам отмечены синими крестиками и являются выбросами (т.е вероятность их появления выходит за пределы «ящика с усами» и составляет 0,7% см. рис. 4.6).

Окончательным доказательством преимущественного влияния фактора натяжения на перетяжном ребре k являются диаграммы Паретто, которая показывают (табл. 4.3, 4.4), что (Force factor) во всех зонах кроме второй он является доминантным. Во второй зоне преобладающим фактором является неизвестный фактор (unknown), таким фактором может являться ортотропная анизотропия, сформированная в процессе прокатки материала заготовки. Третьим фактором по значимости является размер заготовки (во всех зонах стоит на третьем месте).

Контроль пружинения за счет натяжения изменением k и D варьируется от 20% до 70 % зависимости в зависимости от выделенной зоны.

При оптимизации процесса изготовления изделия «Днище» по критериям утонения и пружинения для первого варианта штамповки в качестве переменных следует рекомендовать показатели определяющие натяжение заготовки k и D .

4.2. Инженерный анализ чувствительности на основе статистики численных экспериментов процесса штамповки и разгрузки изделия «Днище» изготовленного по варианту вытяжки с перетяжным порогом

Рассмотрим статистические ряды выборки варьирования переменных проектирования для выполненных 130 симуляций процесса вытяжки изделия «Днище» в AutoForm для четвертого варианта технологии (рис. 4.39.).

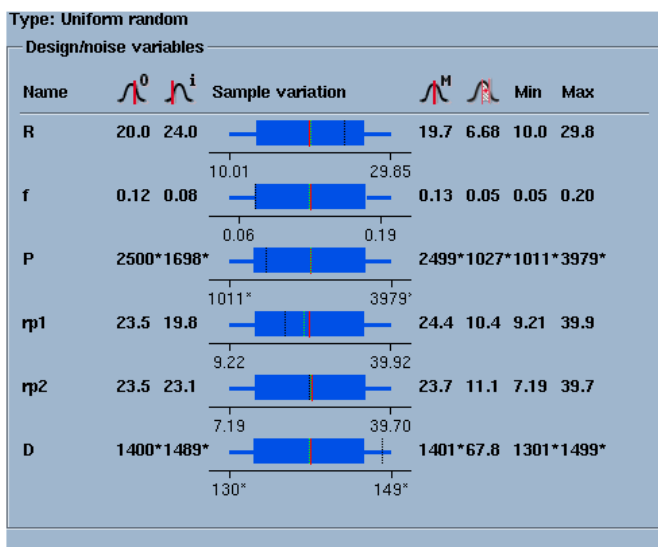


Рисунок 4.39. Распределение вариационных рядов переменных проектирования.

Характерные значения данных для закона равномерного распределения переменных проектирования запишем в табл. 4.6.

Таблица 4.6.

Var	Номинал	Медиана	Миним.	Макс.	Stand. IQR	Lower quantile	Upper quantile
D мм	1400	1401,40	1301,39	1499,37	67,8	1332,29	1468,01
rp1	23,5	24,4	9,21	39,9	10,4	14,0983	34,9455
rp2	23,5	23,7	7,19	39,9	11,1	12,454	34,6875
f	0,12	0,13	0,05	0,2	0,05	0,074898 1	0,17560 5
P Н	250000 0	2499463,0 8	1027586,1 4	3973535,6 5	101166 8	1468830	352436 0
R мм	20	19,7	10,0	29,8	6,68	13,3371	26,7034

Анализ чувствительности начнем с исследования статистики изменения утонения.

В начале рассмотрим утонение заготовки в конце процесса штамповки после вытяжки, разгрузки, обрезки и разгрузки. Для номинального варианта, который в случае нормального закона распределения совпадает со средним и медианным вариантами значение максимального и минимального утонения с вероятностью более 50 процентов можно принять, что предельная величина утонения превышает допустимое значение ε_n 0,037. Утонения для варианты медианы близки к данным номинального варианта. Разница значений для этих вариантов представлена. Величина разницы деформаций утонения очень мала. В центре заготовки и по ее краям отношение толщин заготовки по номиналу и по медиане практически равны единице. Значение **IQR** определяется для

величины, которая изменяется в пределах интервала 50% вероятности, а стандартная величина **Standard IQR** оценивается для половины интервала $[-\sigma + \sigma]$ для нормального закона распределения. Поэтому значение **Standard IQR** будет определяться для интервала 34,14% лежать в пределах **медиана \pm Std Dev** или **среднее \pm** для нормального закона распределения. Зоной наиболее подверженной утонению для 68,27% всех испытаний является «свободная» зона, которая не контролируется путем контакта с инструментом в основное время вытяжки. Допустим, что точность выполненных численных экспериментов соответствует правилу $\pm 3\sigma$ и зона с решениями, которые выходят за пределы значения точности составляет 2,7%. Тогда поле допуска между нижней и верхней границей деформации по толщине h для максимального и минимального изменения составит соответственно 0,0869 и 0,0287.

Зона с наименьшим изменением толщины (закрашена зеленым цветом) находится под пуансоном практически с начала процесса вытяжки. Максимальные и минимальные величины ε_h для нижней границы диапазона точности ($\pm 3\sigma$) представлены. Они свидетельствуют о том, что всё изделие испытывает деформацию утонения. Толщина детали «Днище» при этом наборе параметров управления (табл.4.1) будет изменяться от 4,79 мм до 5,24. Такой режим вытяжки не позволяет получить качественное изделие, т.к. толщина изделия будет меньше, чем 5,3 мм. Максимальные и минимальные величины ε_h свидетельствуют о том, что часть изделия, которая находится ближе к проему матрицы, испытывает деформацию утолщения. Толщина детали «Днище» при этом наборе параметров управления (табл.4.1) будет изменяться от 5,35 мм до 5,49. Хотя изделие, будет находиться в заданном допуске по толщине, следует отметить, что в результате слабого натяжения утолщение заготовки будет способствовать складкообразованию и неустойчивости процесса вытяжки.

Исследование чувствительности величины деформации по толщине заготовки от принятых варьируемых параметров (табл.4.1.) начнем с

определения наиболее значимого показателя (рис.4.40.). Из рис.4.40. следует, что доминантным параметром является коэффициент трения f на перетяжном пороге (табл. 4.1.). 90% поверхности заготовки при анализе утонения окрашена в «сиреневый» цвет, который соответствует коэффициенту трения f (рис.4.40.), и 10% (центральная часть) окрашено в зелёный, соответствующий радиусу порога $rp2$ следовательно, решающее влияние на утонение заготовки в процессе штамповки оказывает коэффициент трения.

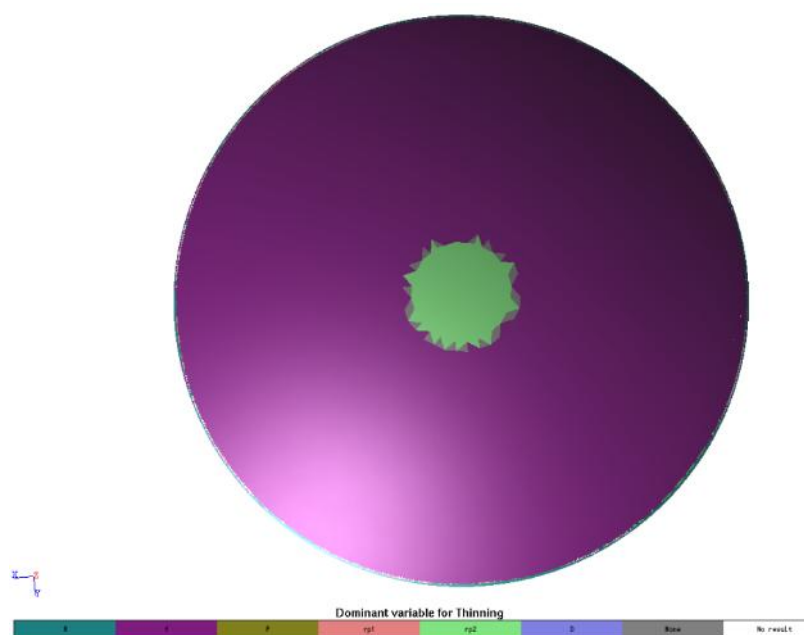


Рисунок 4.40. Зона влияния доминантной переменной проектирования.

Если существует полная корреляция между чувствительностью и параметром проектирования, то величина влияния будет равна 1. Наибольшее влияние параметра проектирования f на утонение (ϵ_h) достигается в зоне окрашенной в «желтый» цвет (рис. 4.41), там влияние максимально равно 0,61. Меньшее влияние параметра проектирования f на утонение (ϵ_h) наблюдается в зоне под пуансоном. Оно оценивается значением 0,06. Значительное влияние на утонение оказывают параметры $rp1$ и $rp2$

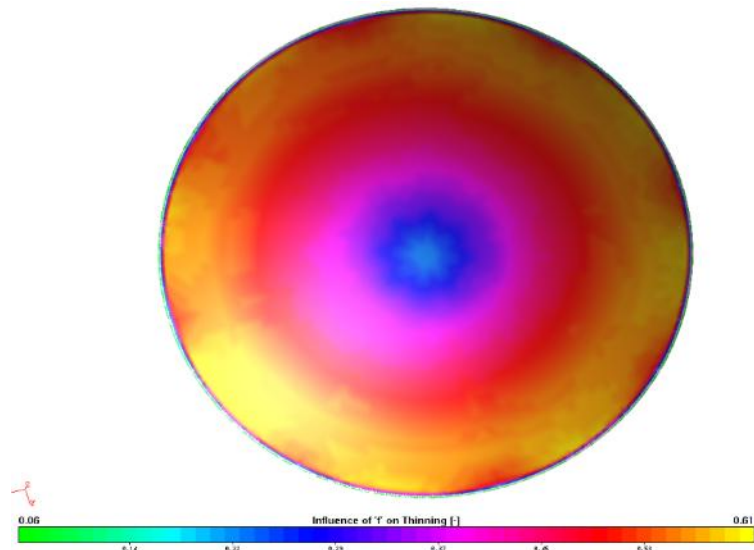


Рисунок 4.41. Величина влияния параметра f на зоны деформирования заготовки.

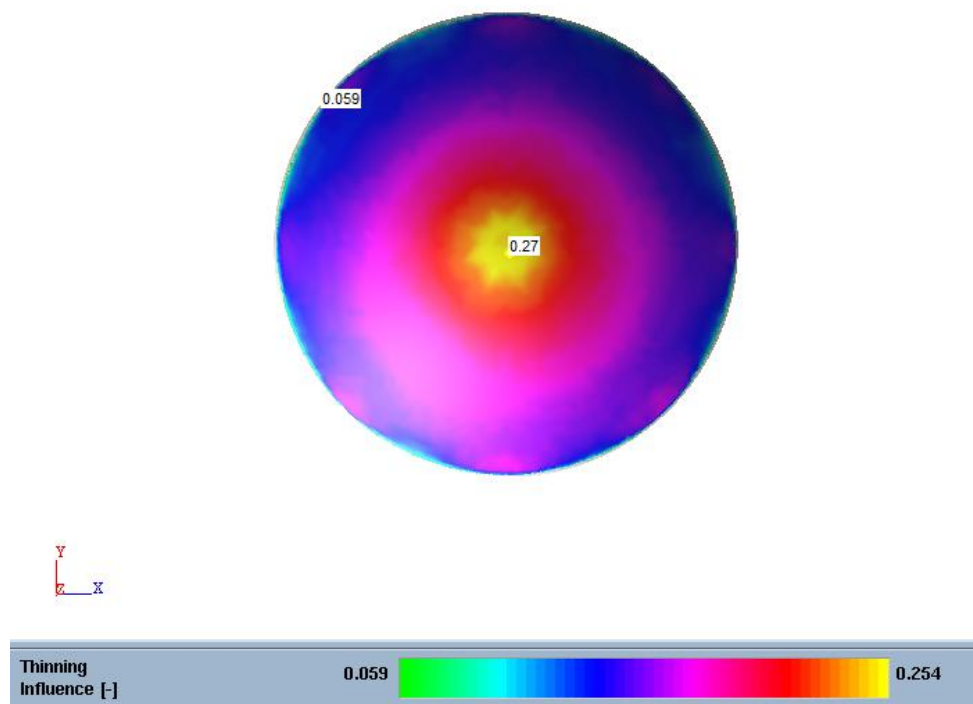


Рисунок 4.42. Величина влияния параметра r_1 на зоны деформирования заготовки.

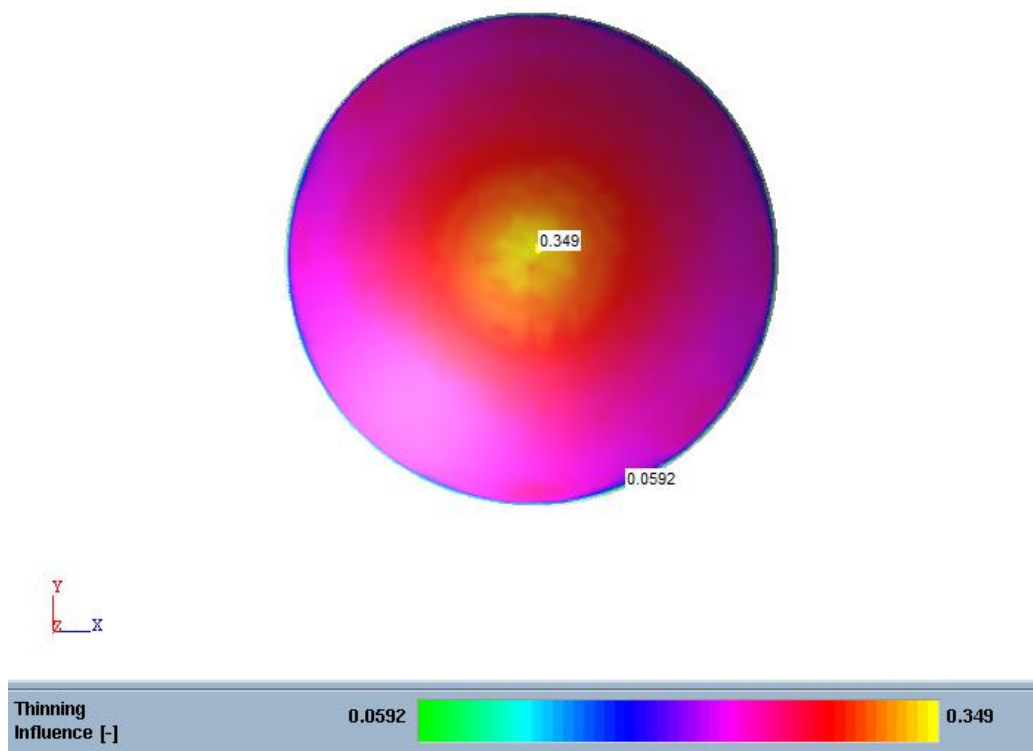


Рисунок 4.43. Величина влияния параметра r_2 на зоны деформирования заготовки.

Для дальнейшей оценки чувствительности выделим зону заготовки, которая испытывает по результатам численных экспериментов наибольшее утонение ϵ_h .

Анализ показателей процесса штамповки для номинального варианта в выделенной зоне представлен на рис. 4.44.

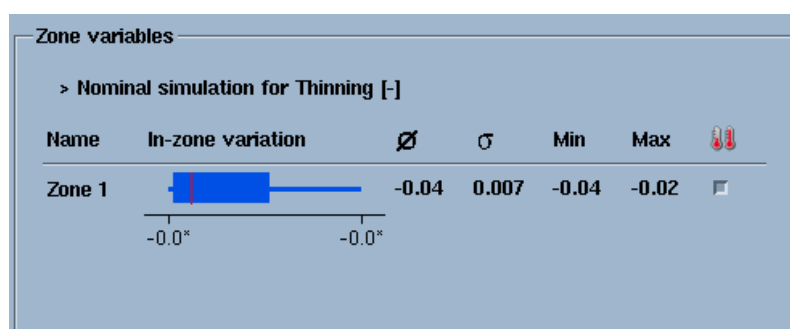


Рисунок 4.44. Распределение показателей статистики для номинального варианта для выделенной зоны.

Для этой зоны для номинального варианта значения среднего (mean) $\bar{X} = -0,04$, дисперсии выборки (Standard deviation) $\sigma = 0,007$, минимального и максимальных значений утонения в выделенной зоне $\text{Min} = -0,04$ и $\text{Max} = -0,02$. Все значения округлены до первого знака после запятой.

Влияние на чувствительность утонения заготовки для выделенной зоны можно показать на рис. 4.45

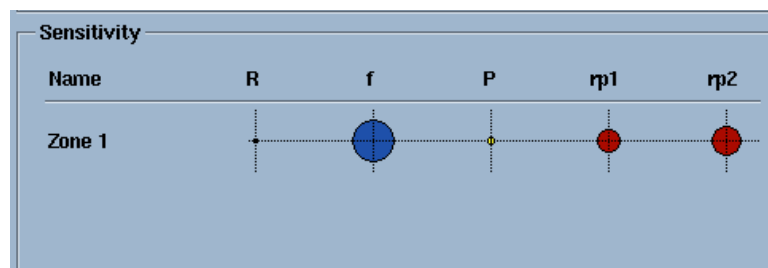


Рисунок 4.45. Влияние переменных проектирования на функцию чувствительности утонения заготовки для выделенной зоны.

Размер окружности переменной f говорит о наибольшем влиянии этой переменной проектирования на чувствительность ε_n . Синий цвет свидетельствует о том, что при уменьшении f значение ε_n увеличивается по величине при отрицательном знаке самого утонения. Желтый цвет P говорит о недостаточной информации о влиянии этих факторов, красный цвет показывает, что с уменьшением радиусов перетяжного порога абсолютная величина утонения возрастает.

Окончательным доказательством преимущественного влияния факторов коэффициента трения, верхнего и нижнего радиусов порога является диаграмма Парето (рис. 4.62), которая показывает, что эти факторы контролируют 96,87% изменения утонения из всех возможных переменных проектирования. Все остальные переменные даже в своей сумме не перешагнули 4% барьер.

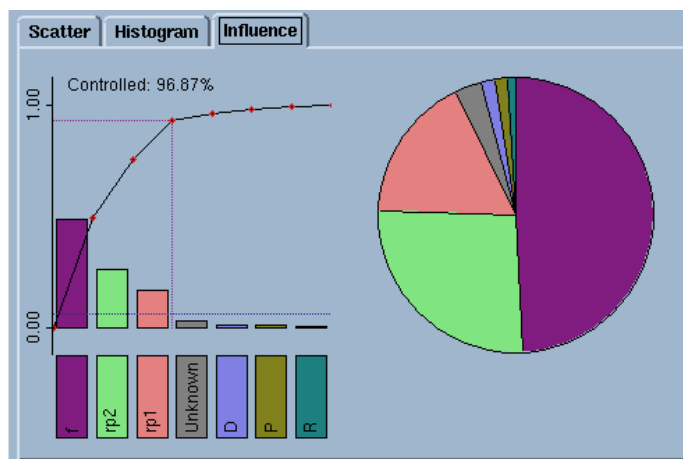


Рис.4.62. Диаграмма Парето контроля деформации утонения с помощью переменных проектирования.

Рассмотрим пружинение заготовки. Для номинального варианта значение максимального и минимального пружинения с вероятностью более 50 процентов не превышает допустимое значение $\Delta S \leq 2$ мм. Пружинение для варианта медианы на рис 4.64 близко к данным номинального варианта. Величина разницы пружинений находится в пределах 4,25 мм. В центре заготовки пружинение отсутствует, а по ее краям по номиналу и по медиане меняется в пределах 4,25 мм. Зоной наиболее подверженной пружинению для 68,27% всех испытаний является зона края заготовки, которая испытала влияние изгибных моментов в результате перехода через радиус матрицы (рис 4.66) во время вытяжки. Эта зона подкрашена в «фиолетовый» цвет и для нее соответствует максимальная величина Standard IQR 1,82. Допустим, что точность выполненных численных экспериментов соответствует правилу $\pm 3\sigma$ и зона с решениями, которые выходят за пределы значения точности составляет 2,7%. Тогда поле допуска между нижней и верхней границей пружинения ΔS для максимального и минимального изменения составит соответственно 9,83 и 0,403. Зона наименьшего по величине пружинения находится под пуансоном в процессе вытяжки.

Максимальные и минимальные величины ΔS для нижней границы диапазона точности ($\pm 3\sigma$) представлены. Они свидетельствуют о том, что всё изделие испытывает пружинение определяемое анизотропией. Для нижней границы диапазона определяющее значение имеет пружинение в отрицательном направлении нормали к детали. Такое пружинение может достигать величины до -4,56 мм. Оно характерно для краевых зон в виде сегмента в направлении оси y . Такие режимы вытяжки не позволяют получать качественное изделие, т.к. пружинение изделия будет больше, чем ± 1 мм.

Максимальные и минимальные величины ΔS для верхней границы диапазона точности ($\pm 3\sigma$) представлены. Они свидетельствуют о том, что часть изделия, которая находится ближе к проему матрицы, испытывает деформацию пружинения. Пружинение явно зависит от анизотропии. Для верхней границы диапазона определяющее значение имеет пружинение в положительном направлении нормали к детали. Такое пружинение может достигать величины до 8 мм характерно для краевых зон в виде сегмента в направлении оси x .

Исследование чувствительности величины деформации по толщине заготовки от принятых варьируемых параметров (табл.4.1.) начнем с определения наиболее значимого показателя (рис.4.63). Из рис. 4.63 следует, что несколько параметров относятся к доминантным параметрам. Это диаметр заготовки D , радиусы порога – верхний $rp1$ и нижний $rp2$ и коэффициент трения f . (табл. 4.1). Цвета «синий», «розовый», «зеленый» и «сиреневый» цвета соответствуют диаметру заготовки D , верхнему радиусу порога $rp1$, нижнему радиусу порога $rp2$ и коэффициенту трения f (рис.4.63).

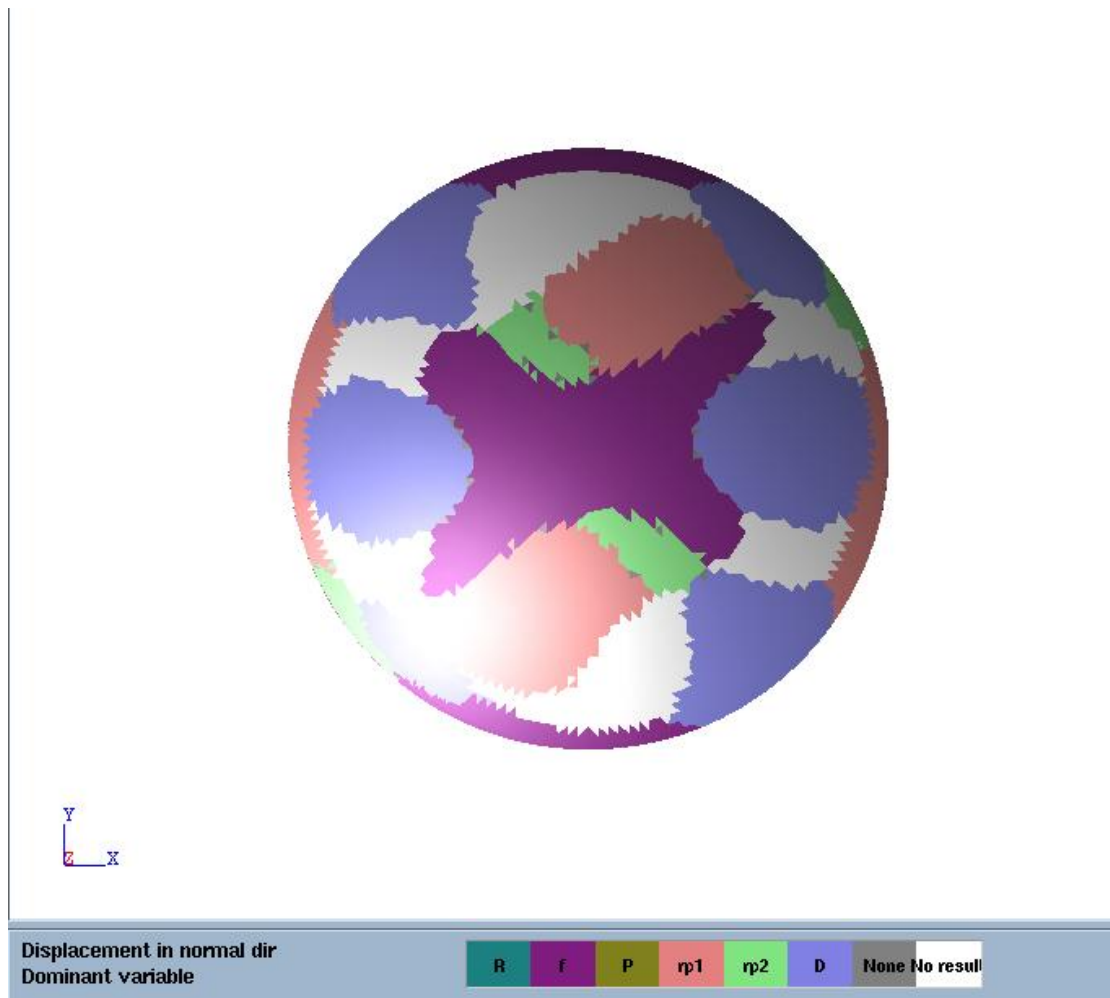


Рисунок 4.63. Зона влияния доминантных переменных проектирования.

Наибольшее влияние параметра проектирования **D** на пружинение ΔS достигается в зоне, окрашенной в «желтый» цвет (рис. 4.64), там влияние максимально и равно 0,403. Меньшее влияние параметра проектирования **D** на пружинение ΔS наблюдается в зоне, окрашенной в «зеленый цвет». Оно оценивается минимальным значением 0,059.

Наибольшее влияние параметра проектирования **rp1** на пружинение ΔS достигается в зоне, окрашенной в «желтый» цвет (рис. 4.65), там влияние максимально и равно 0,176. Меньшее влияние параметра проектирования **D** на пружинение ΔS аблюдается в зоне, окрашенной в «зеленый цвет». Оно оценивается минимальным значением 0,059.

Наибольшее влияние параметра проектирования **rp2** на пружинение ΔS достигается в зоне окрашенной в «желтый» цвет (рис. 4.66), там влияние

максимально и равно 0,24. Меньшее влияние параметра проектирования **D** (Force factor) на пружинение (ΔS) наблюдается в зоне окрашенной в «зеленый цвет». Оно оценивается минимальным значением 0,059.

Наибольшее влияние параметра проектирования **f** на пружинение ΔS достигается в зоне окрашенной в «желтый» цвет (рис. 4.67), там влияние максимально и равно 0,218. Меньшее влияние параметра проектирования **D** на пружинение ΔS наблюдается в зоне, окрашенной в «зеленый цвет». Оно оценивается минимальным значением 0,0596.

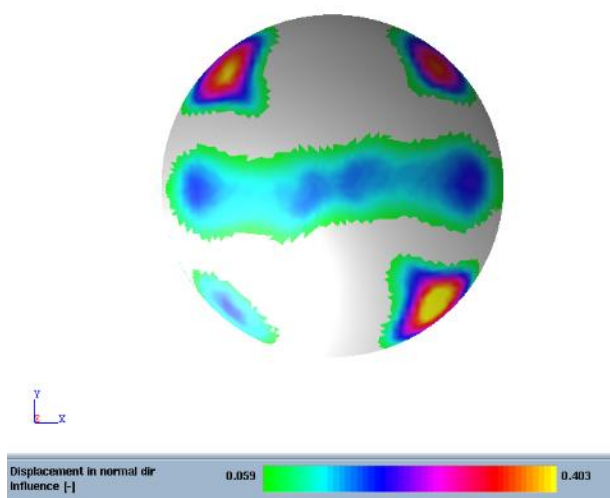


Рисунок 4.64. Величина влияния параметра **D** на зоны деформирования заготовки.

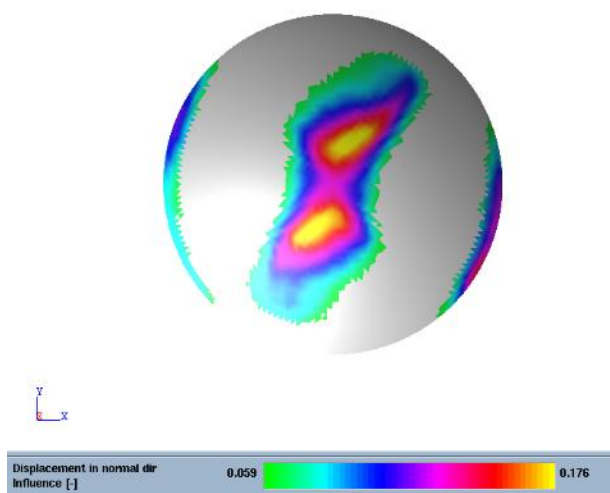


Рисунок 4.65. Величина влияния параметра **rp1** на зоны деформирования заготовки.

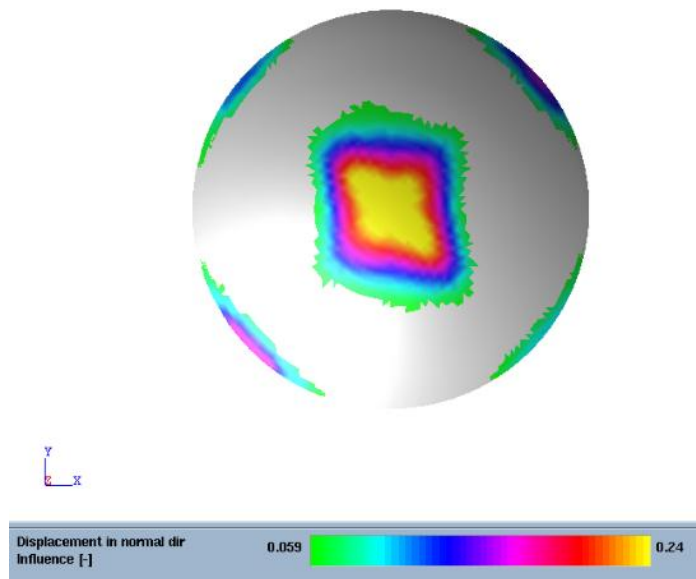


Рисунок 4.66. Величина влияния параметра $rp2$ на зоны деформирования заготовки

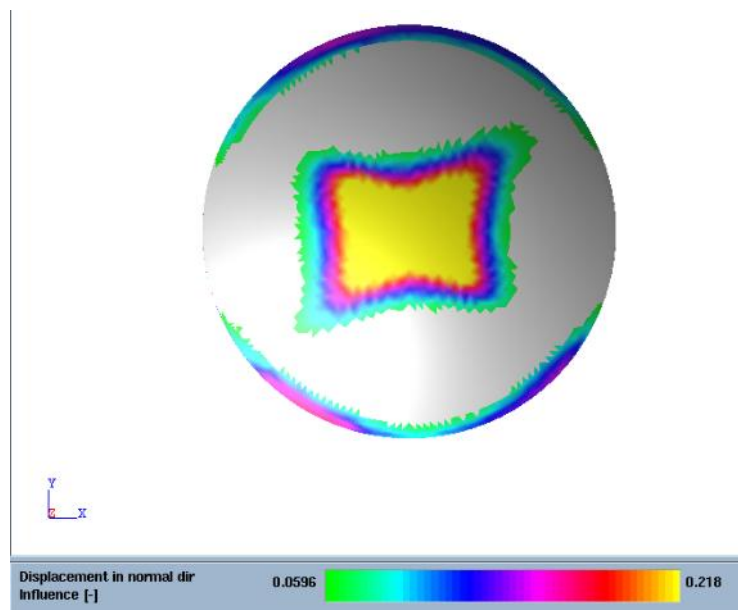


Рисунок 4.67. Величина влияния параметра f на зоны деформирования заготовки

Для дальнейшего анализа чувствительности назначим несколько зон (рис 4.68).

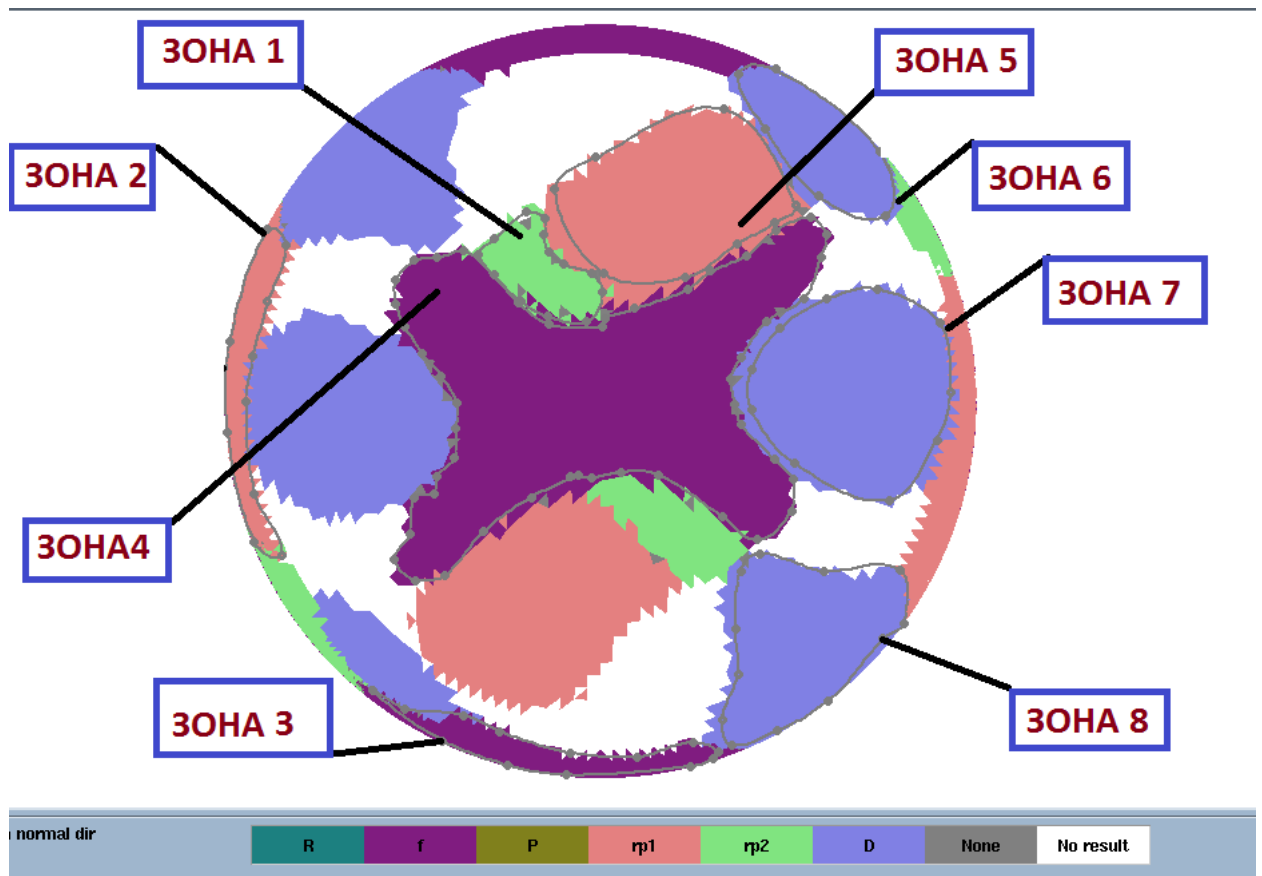


Рисунок 4.68. Расположение зон чувствительности.

- 1-Промежуточная зона.
- 2- Край заготовки в направлении оси X
- 3- Край заготовки в направлении оси Y.
- 4-Центральная зона с ответвлениями под 45 градусов
- 5-Промежуточная зона в направлении оси Y
- 6-Край заготовки в промежуточной зоне в 1 и 3 четвертях
- 7-промежуточная зона в направлении оси X
- 8-Край заготовки в промежуточной зоне 2 и 4 четвертях

Анализ показателей процесса штамповки для номинального варианта в выделенных зонах представлен на рис. 69.

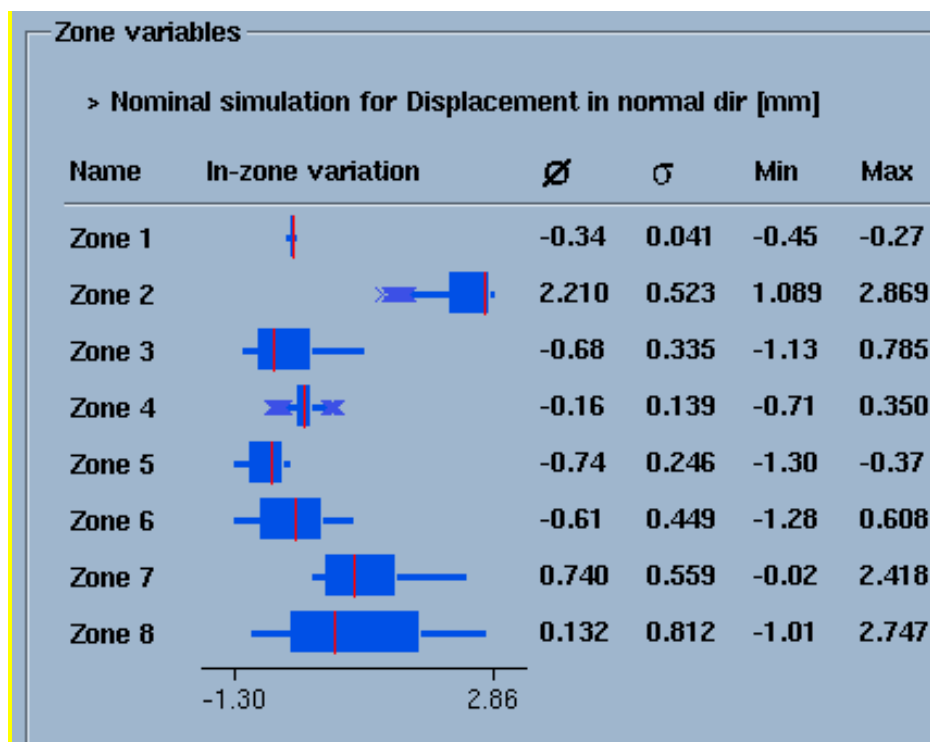


Рисунок 4.69. Распределение показателей статистики пружинения для номинального варианта для выделенных четырех зон.

Для этих зон для номинального варианта значения изменяются в пределах:

- среднего пружинения (mean) = -0,3...0,1;
- дисперсии выборки (Standard deviation) = 0,04...0,8;
- минимального пружинения Min = -0,6...-1;
- максимального пружинения Max = -0,3...2,7.

Все значения округлены до первого знака после запятой. Наибольшие значения пружинения по модулю наблюдаются в краевых зонах.

Табличное представление значений пружинения (ΔS) RV от изменения натяжения (f), (D), (rp1) и (rp2) DV для характерных значений «коробки с усами» для выделенных восьми зон, а также поля разбросов для этих величин представлены в приложении 1.

Установлена взаимосвязь между величинами ΔS , f , $rp1$, $rp2$ и D , которая говорит о выраженной их регрессионной взаимосвязи $\Delta S = f(f_{rp})$, $\Delta S = f(rp1)$, $\Delta S = f(rp2)$ и $\Delta S = f(D)$.

Гистограммы распределения величин натяжения f , размеров D , $rp1$, $rp2$ и соответствующие графики Паретто влияния параметров проектирования на коэффициенты (функции чувствительности) $\frac{\partial(\Delta S)}{\partial f}$, $\frac{\partial(\Delta S)}{\partial D}$, $\frac{\partial(\Delta S)}{\partial rp1}$ и $\frac{\partial(\Delta S)}{\partial rp2}$ представлены в табл. П.1.1, П.1.2, П.1., П 1.4.

Гистограммы f , $rp1$, $rp2$ и D имеют равномерное распределение, поэтому имеют одинаковый вид для всех зон. Гистограммы распределения нормального смещения поверхности после разгрузки различны для всех выбранных зон. Для зон 5,6,7 и 8 характерно распределение пружинений с правой асимметрией, а для зон 1,2,3 и 4 с левой асимметрией.

Изменение значений f , D , $rp1$ и $rp2$ соответствует интервалам варьирования заданным в табл.4.1.

Пружинения изделия после разгрузки для выделенных зон (табл. П.1.1, П.1.2, П.1.3, П 1.4.) существенно отличаются как качественно, так и количественно. Если рассматривать границы распределения для «левого уса» и «правого уса» «ящика с усами», то они захватывают область размером $\pm 2,971\sigma$. Для них по выделенным зонам значения пружинения составят интервалы (см. табл. 4.11). Анализ показывает, что наибольшие пружинения для номинального варианта расположены во взаимно перпендикулярных направлениях в зонах 2 и 3 (в направлении и поперек оси прокатки).

Таблица 4.7.

Зоны	Величина пружинения	
	мм	
	Граница «левого уса»	Граница «правого уса»
1	-0,789	0,0687
2	-0,94	4,44
3	-1,866	2,666
4	-0,4083	0,1137
5	-1.0372	0,4763
6	-0,9437	2,1039
7	-1,1729	1,3755
8	-0,9587	1,8456

4.3. Инженерный анализ чувствительности на основе статистики численных экспериментов процесса штамповки и разгрузки изделия «Днище» изготовленного по варианту вытяжки с цилиндрической стенкой

Рассмотрим статистические ряды выборки варьирования переменных проектирования для выполненных 100 симуляций процесса вытяжки изделия «Днище» в AutoForm для третьего варианта технологии (рис. 4.70.).

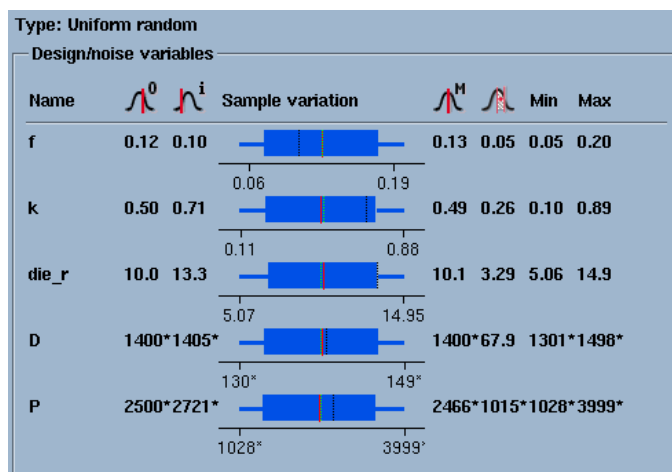


Рисунок 4.70. Распределение вариационных рядов переменных проектирования.

Закон распределения вероятности варьирования переменных проектирования для выборки из 100 симуляций является равномерным.

Характерные значения данных для закона равномерного распределения переменных проектирования запишем в табл. 4.8.

Таблица. 4.8.

Var.	Номин.	Медиана	Мин.	Макс.	Stand. IQR	Lower quantile	Upper quantile
D мм	1400	1400,53	1301,84	1498,24	67,9	1332,24	1468,19
k	0,5	0,49	0,10	0,89	0,26	0,228396	0,757722
f	0,12	0,13	0,05	0,2	0,05	0,0763753	0,176394
P Н	2500000	2466790,87	1028345,98	3999625,62	1015702	1470770	3502170
R мм	10	10,1	5,06	14,9	3,29	6,85139	13,4322

Рассмотрим утонение заготовки в конце процесса штамповки после вытяжки, разгрузки, обрезки и разгрузки. Для номинального варианта, вероятностью более 50 процентов можно принять, что предельная величина

утонения превышает допустимое значение $|\varepsilon_h| \leq 0,037$. Утонения для варианты медианы близки к данным номинального варианта. Величина разницы деформаций утонения очень мала. В центре заготовки и по ее краям отношение толщин заготовки по номиналу и по медиане практически равны единице.

Зоной наиболее подверженной утонению для 68,27% всех испытаний является «свободная» зона, которая не контролируется путем контакта с инструментом в основное время вытяжки. Этой зоне соответствует максимальная величина Standart IQR 0,0322.

Допустим, что точность выполненных численных экспериментов соответствует правилу $\pm 3\sigma$ и зона с решениями, которые выходят за пределы значения точности составляет 2,7%. Тогда поле допуска между нижней и верхней границей деформации по толщине ε_h для максимального и минимального изменения составит соответственно 0,0879 и 0,0566.

Зона с наименьшим изменением толщины находится под пуансоном практически с начала процесса вытяжки.

Максимальные и минимальные величины ε_h для нижней границы диапазона точности ($\pm 3\sigma$) свидетельствуют о том, что всё изделие испытывает деформацию утонения. Толщина детали «Днище» при этом наборе параметров управления (табл.4.1) будет изменяться от 5,09 мм до 5,16. Такой режим вытяжки не позволяет получить качественное изделие, т.к. толщина изделия будет меньше, чем 5,3 мм. Максимальные и минимальные величины ε_h для верхней границы диапазона точности ($\pm 3\sigma$) свидетельствуют о том, что часть изделия, которая находится ближе к проему матрицы, испытывает деформацию утолщения. Толщина детали «Днище» при этом наборе параметров управления (табл.4.1) будет изменяться от 5,42 мм до 5,63. Хотя изделие, будет находиться в заданном допуске по толщине, следует отметить, что в результате слабого натяжения утолщение заготовки возможно складкообразование и неустойчивость процесса вытяжки.

Исследование чувствительности величины деформации по толщине заготовки от принятых варьируемых параметров (табл.4.1.) начнем с определения наиболее значимого показателя (рис. 4.71.). Из рис. 4.71 следует, что доминантным параметром является натяжение заготовки с помощью перетяжного ребра, которое выражается величиной коэффициента натяжения (Force factor) k (табл. 4.1.). Вся поверхность заготовки при анализе утонения закрашена в сиреневый цвет, который соответствует коэффициенту натяжения k (рис. 4.122.), следовательно, решающее влияние на утонение заготовки в процессе штамповки оказывает натяжение, которое определяется суммой факторов:

- размером заготовки D ;
- усилием прижима P ;
- размерами перетяжного ребра (Force Factor k);
- радиусом матрицы R .

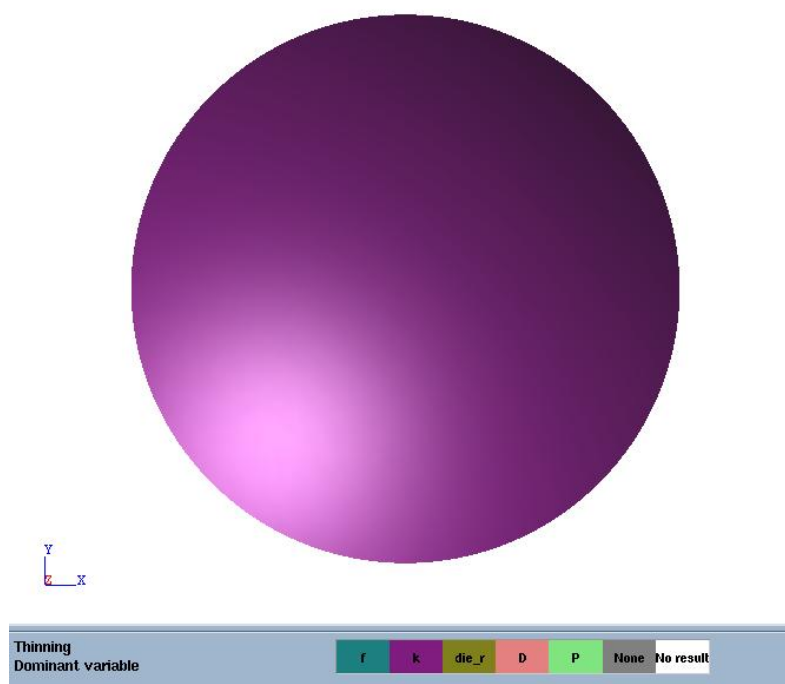


Рисунок 4.71. Зона влияния доминантной переменной проектирования.

Наибольшее влияние параметра проектирования k (Force factor) на утонение (ϵ_h) достигается в зоне, окрашенной в «желтый» цвет (рис. 4.71), там

влияние максимально равно 0,981 и оно близко 1. Меньшее влияние параметра проектирования k (Force factor) на утонение (ϵ_h) наблюдается по краю изделия и в зоне под пуансоном. Оно оценивается минимальным значением 0,948, которое также близко к единице.

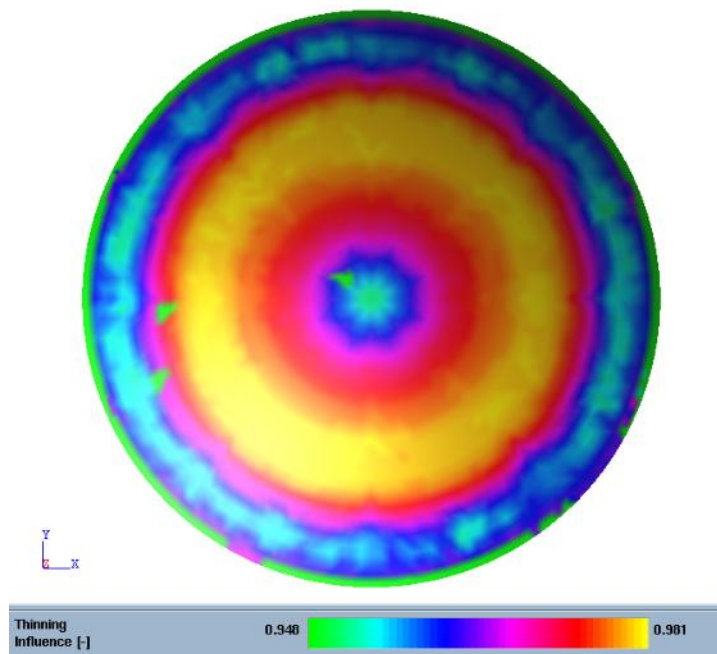


Рисунок. 4.71. Величина влияния параметра k на зоны деформирования заготовки.

Для дальнейшей оценки чувствительности выделим зону заготовки, которая испытывает по результатам численных экспериментов наибольшее утонение ϵ_h . Анализ показателей процесса штамповки для номинального варианта в выделенной зоне представлен на рис. 4.125.

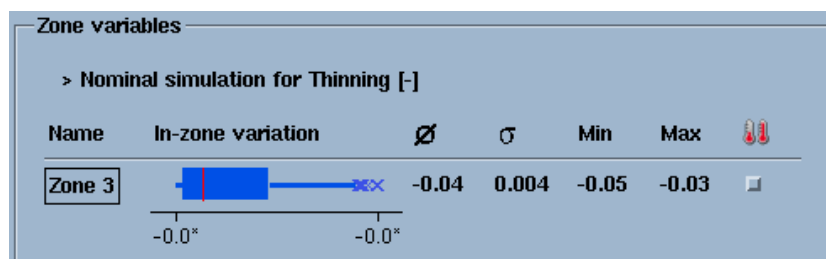


Рисунок. 4.72. Распределение показателей статистики для номинального варианта для выделенной зоны.

Для этой зоны для номинального варианта значения среднего (mean) $\bar{x} = 0,048$, дисперсии выборки (Standard deviation) $\sigma = 0,004$, минимального и максимальных значений утонения в выделенной зоне $\text{Min} = -0,05$ и $\text{Max} = -0,03$. Все значения округлены до первого знака после запятой.

Влияние на чувствительность утонения заготовки для выделенной зоны можно показать на рис. 4.72.

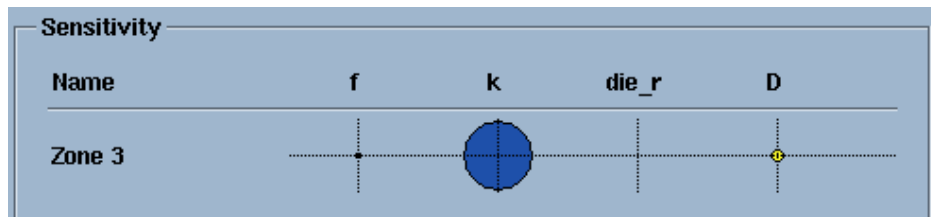


Рисунок. 4.72. Влияние переменных проектирования на функцию чувствительности утонения заготовки для выделенной зоны.

Размер окружности переменной k говорит о наибольшем влиянии этой переменной проектирования на чувствительность ε_h . Синий цвет свидетельствует о том, что при увеличении k значение ε_h увеличивается по абсолютной величине при отрицательном знаке самого утонения. Желтый цвет D , f говорит о недостаточной информации о влиянии этих факторов.

Табличное представление значений утонения (ε_h) DV от изменения натяжения (k) DV для характерных значений «коробки с усами», а также поле разбросов для этих величин показано на рис. 4.73.

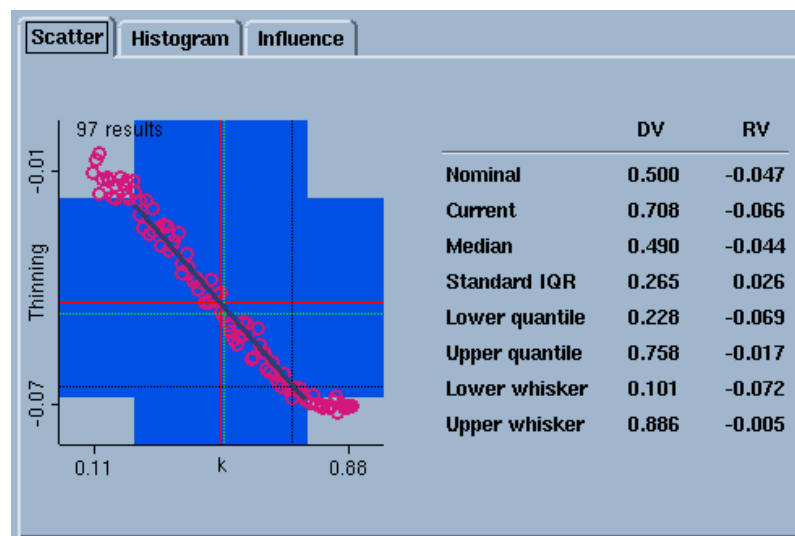


Рисунок. 4.73. График разбросов соответствия величин натяжения k и деформации утонения для всех вариантов симуляций.

На рис. 4.73 видна явная взаимосвязь между величинами ε_h и k , которая говорит о выраженной их регрессионной зависимости $\varepsilon_h = f(k)$.

Гистограмма распределения k соответствует закону равномерного распределения, а гистограмма утонения с правой асимметрией

Окончательным доказательством преимущественного влияния фактора натяжения на перетяжном ребре является диаграмма Парето (рис. 4.74.), которая показывает, что (Force factor) контролирует 102,83% изменения утонения из всех возможных переменных проектирования. Все остальные переменные даже в своей сумме не перешагнули 4% барьер.

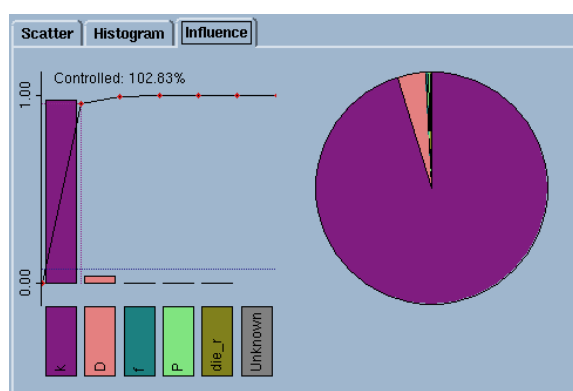


Рисунок. 4.74. Диаграмма Парето контроля деформации утонения с помощью переменных проектирования.

Допустимые значения пружинения в соответствии с техническими условиями изготовления должны находиться в пределах ± 1 мм и $|\Delta S| \leq 2$ мм.

Рассмотрим пружинение заготовки. Для номинального варианта который в случае нормального закона распределения совпадает со средним и медианным вариантом, значение максимального и минимального пружинения представлены на рис. 4.75. Результаты показывают, что для заданных вариантов варьирования переменных представленных в табл. 4.1, с вероятностью более 50

процентов можно принять, что предельная величина пружинения превышает допустимое значение $|\Delta S| \leq 2$ мм.

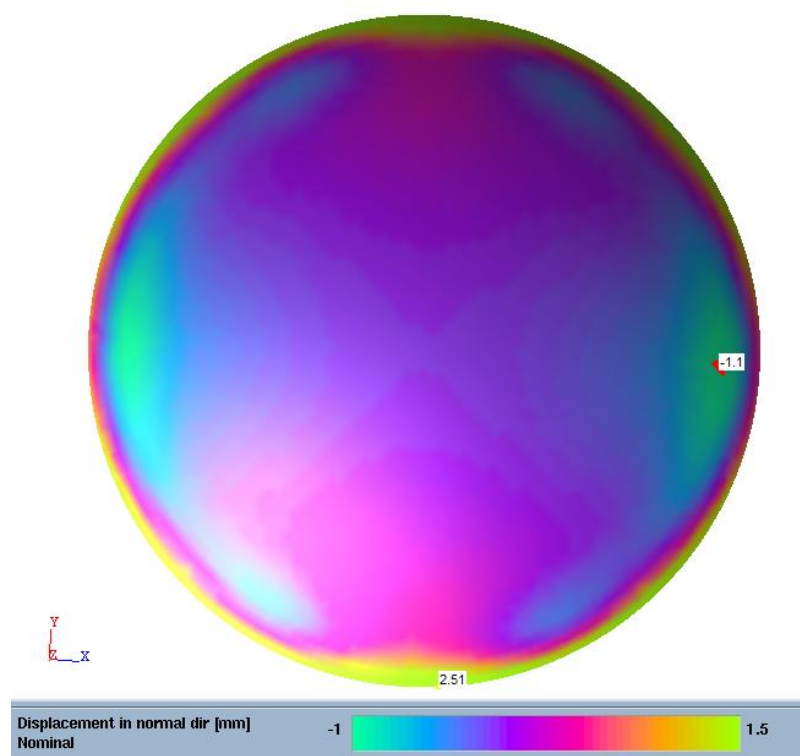


Рисунок. 4.75. Величина пружинения для номинального варианта.

Пружинение для варианта медианы на рис 4.131 близки к данным номинального варианта. Разница значений для этих вариантов представлена на рис. 4.132. Величина разницы пружинений находится в пределах 1 мм. В центре заготовки пружинение отсутствует, а по ее краям по номиналу и по медиане меняется в пределах 3.

Зоной наиболее подверженной пружинению для 68,27% всех испытаний является зона края заготовки, которая испытала влияние изгибных моментов в результате перехода через радиус матрицы в основное время вытяжки. Эта зона и для нее соответствует максимальная величина Standard IQR 1,96.

Допустим, что точность выполненных численных экспериментов соответствует правилу $\pm 3\sigma$ и зона с решениями, которые выходят за пределы значения точности составляет 2,7%. Тогда поле допуска между нижней и

верхней границей пружинения ΔS для максимального и минимального изменения составит соответственно 32,2 и 0,254.

Максимальные и минимальные величины ΔS для нижней границы диапазона точности ($\pm 3\sigma$) свидетельствуют о том, что всё изделие испытывает пружинение определяемое анизотропией. Для нижней границы диапазона (рис. 4.135) определяющее значение имеет пружинение в отрицательном направлении нормали к детали. Такое пружинение может достигать величины до -28,5 мм характерно для краевых зон в виде сегмента в направлении оси y . Такие режимы вытяжки не позволяют получать качественное изделие, т.к. пружинение изделия будет больше, чем 1 мм.

Максимальные и минимальные величины ΔS для верхней границы диапазона точности ($\pm 3\sigma$) свидетельствуют о том, что часть изделия, которая находится ближе к проему матрицы, испытывает деформацию пружинения. Пружинение явно зависит от анизотропии. Для верхней границы диапазона определяющее значение имеет пружинение в положительном направлении нормали к детали. Такое пружинение может достигать величины до 23 мм характерно для краевых зон в виде сегмента в направлении оси x . Такие режимы вытяжки не позволяют получать качественное изделие, т.к. пружинение изделия будет больше, чем 1 мм.

Исследование чувствительности величины деформации по толщине заготовки от принятых варьируемых параметров (табл.4.1.) начнем с определения наиболее значимого показателя (рис. 4.76.). Из рис. 4.76. следует, что несколько параметров являются доминантными. Это диаметр заготовки D , радиус матрицы **die_r** и натяжение заготовки с помощью перетяжного ребра, которое выражается величиной коэффициента натяжения **k** (табл. 4.1). Поверхность заготовки при анализе пружинения закрашена в «розовый», «зеленый» и «сиреневый» цвета, которые соответствуют диаметру заготовки D , радиусу матрицы **die_r** и коэффициенту натяжения **k** (рис. 4.76).

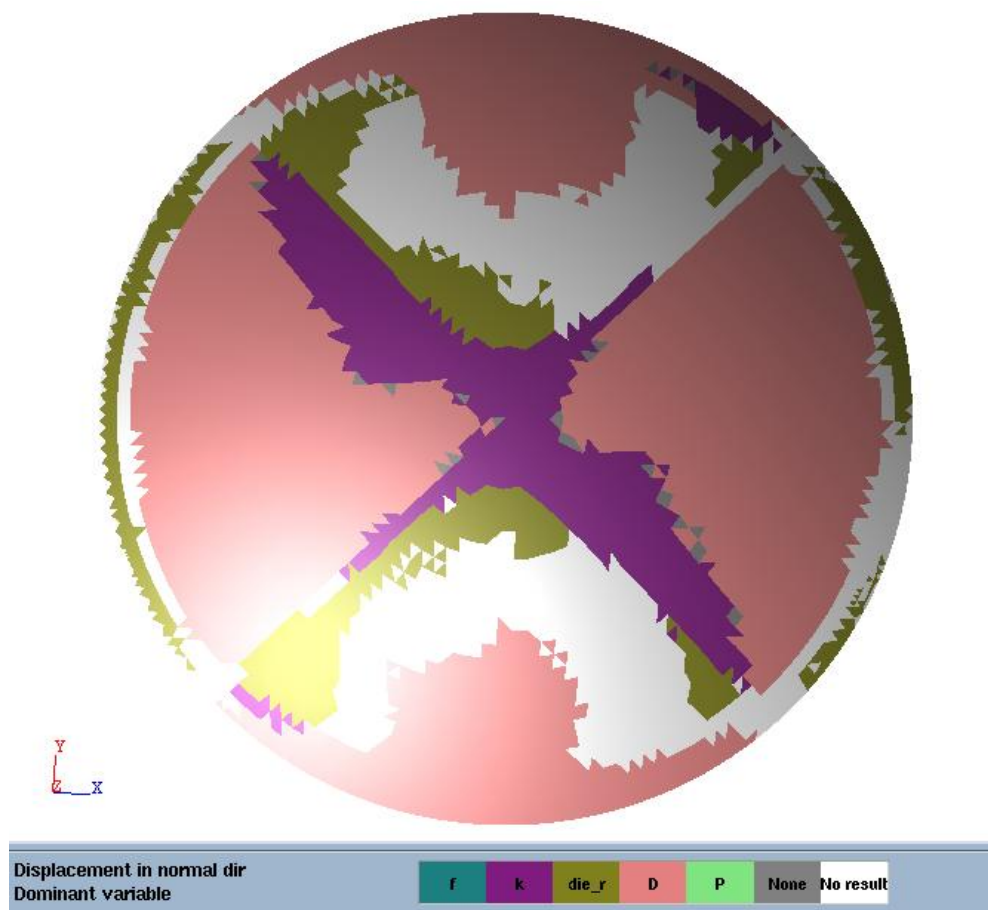


Рисунок 4.76. Зона влияния доминантных переменных проектирования.

Наибольшее влияние параметра проектирования D (Force factor) на пружинение (ΔS) достигается в зоне, окрашенной в «оранжевый» цвет (рис. 4.76). Наибольшее влияние параметра проектирования die_r (Force factor) на пружинение (ΔS) достигается в зоне, окрашенной в «зеленый» цвет. Наибольшее влияние параметра проектирования k (Force factor) на пружинение (ΔS) достигается в зоне, окрашенной в «фиолетовый» цвет. Встречаются конечные элементы, окрашенные в зеленый цвет.

Для дальнейшего анализа чувствительности назначим несколько зон (рис 4.77).

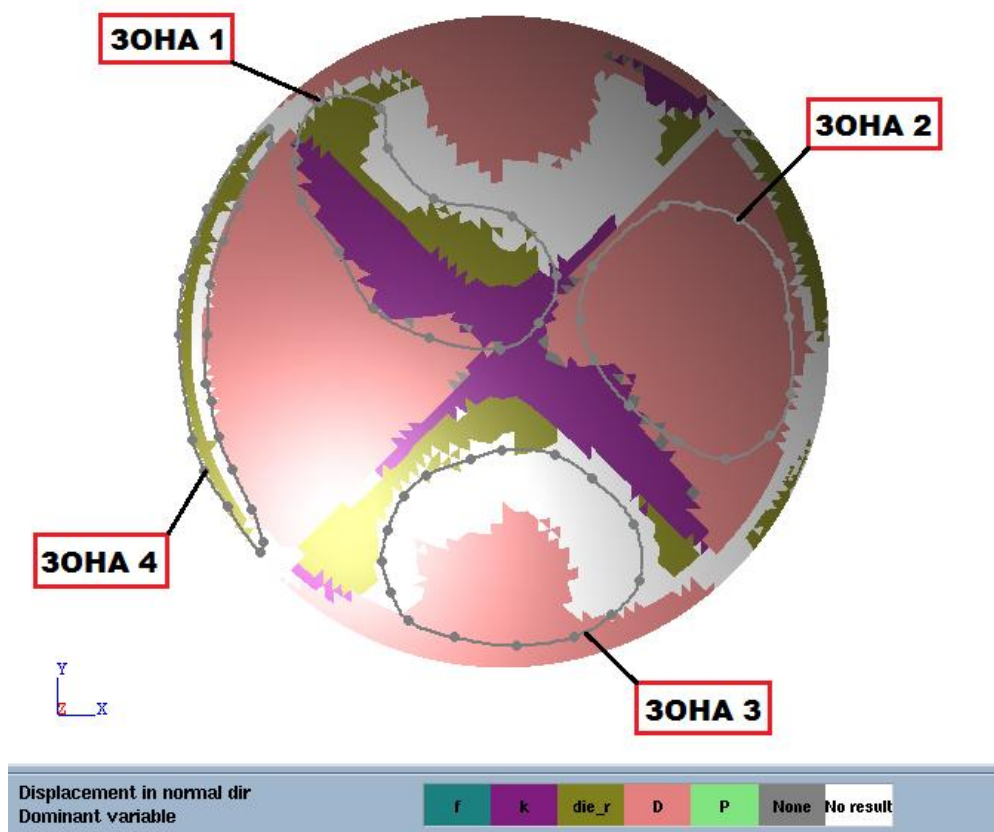


Рисунок. 4.77. Расположение зон чувствительности.

Для дальнейшей оценки чувствительности с учетом симметрии выделим четыре характерные зоны заготовки (рис.4.77.):

- 1-Промежуточная зона.
- 2-Центральная зона, смещенная к краю по оси X.
- 3-Центральная зона, смещенная к краю по оси Y.
- 4-Край заготовки в направлении оси X.

Анализ показателей процесса штамповки для номинального варианта в выделенных зонах представлен на рис. 4.78.

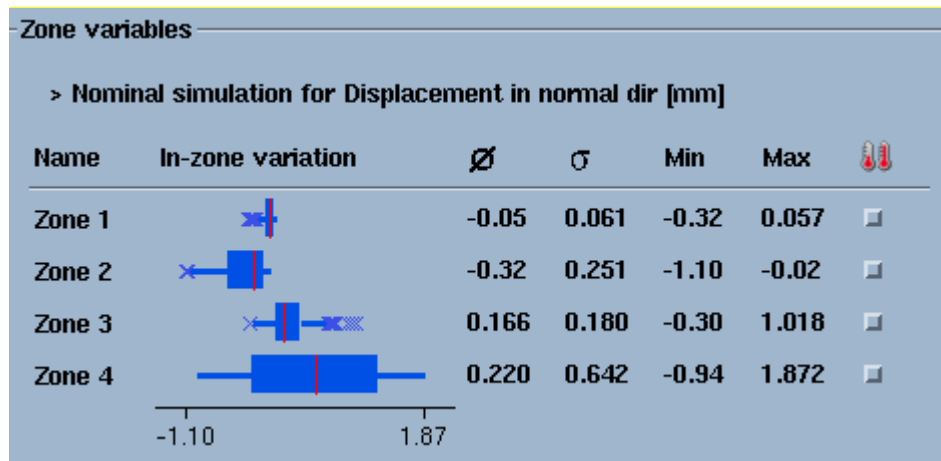


Рисунок 4.78. Распределение показателей статистики пружинения для номинального варианта для выделенных четырех зон.

Для этих зон для номинального варианта значения изменяются в пределах:

среднего пружинения (mean) = -0,05...-0,22;

дисперсии выборки (Standard deviation) = 0,061...0,642;

минимального пружинения Min = -0,3...-1,1;

максимального пружинения Max = -0,02...1,872.

Все значения округлены до первого знака после запятой. Наибольшие значения пружинения по модулю наблюдаются в краевых зонах.

Чувствительность пружинения заготовки для выделенных зон в зависимости от параметров управления процессом вытяжки можно показать на рис. 4.79

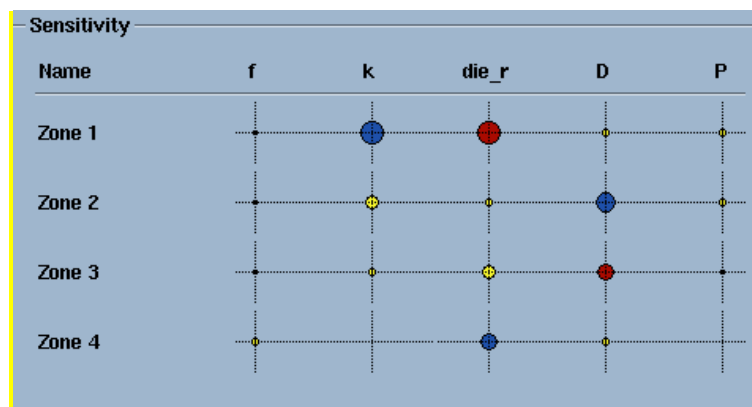


Рисунок. 4.79. Влияние переменных проектирования на функцию чувствительности пружинения заготовки для выделенных зон.

Размер окружности переменных говорит степени влияния той или иной переменной проектирования на чувствительность пружинения ΔS . Синий цвет свидетельствует о том, что при увеличении переменной проектирования значение ΔS увеличивается по абсолютной величине, но величина переменной проектирования уменьшается или наоборот ΔS уменьшается, а величина переменной проектирования возрастает (т.е. коэффициент чувствительности отрицательный). Желтый цвет и малые диаметры окружностей говорит о недостаточной информации о тех или иных факторов. Красный цвет указывает на то, что коэффициент чувствительности положителен. Для вытяжки изделия с цилиндрической стенкой характерно, что материальные волокна ортотропной заготовки в направлении x , которое совпадает с направлением прокатки испытывают положительное пружинение. Материальные волокна перпендикулярные направлению прокатки прогибаются при разгрузке в противоположную сторону.

Табличное представление значений пружинения (ΔS) RV от изменения натяжения (k), (D) и (die_r) DV для характерных значений «коробки с усами» для выделенных четырех зон, а также поля разбросов для этих величин представлены в Приложении 2.

На рис. П.2.1... П.2.11. видна взаимосвязь между величинами ΔS , k , die_r и D , которая говорит о выраженной их регрессионной связи $\Delta S = f(k)$, $\Delta S = f(die_r)$ и $\Delta S = f(D)$.

Гистограммы распределения величин натяжения k , размеров D , die_r и соответствующие графики Парето влияния параметров проектирования на коэффициенты (функции чувствительности) $\frac{\partial(\Delta S)}{\partial k}$, $\frac{\partial(\Delta S)}{\partial D}$ и $\frac{\partial(\Delta S)}{\partial die_r}$ представлены в табл. П.2.1, П.2.2 и П.2.3.

Гистограммы k , die_r и D имеют равномерное распределение, поэтому одинаковы для всех зон. Гистограммы распределения нормального смещения поверхности после разгрузки различны для всех выбранных зон (табл. П.2.1,

П.2.2 и П.2.3). Для зон 1 и 3 характерно распределение пружинений с правой асимметрией, а для зон 2 и 4 с левой асимметрией.

Изменение значений k , D и die_r соответствует интервалам варьирования заданным в табл.4.1.

Изменение смещений нормально поверхности изделия после разгрузки (табл. П.2.1, П.2.2 и П.2.3) существенно отличается как качественно, так и количественно для выделенных зон. Если рассматривать границы распределения для «левого уса» и «правого уса» «ящика с усами», то они захватывают область размером $\pm 2,971$. Для них по выделенным зонам значения пружинения составят интервалы (см. табл. 4.9).

Таблица 4.9.

Зоны	Величина пружинения	
	мм	
	Граница «левого уса»	Граница «правого уса»
1	-0,209	0,2127
2	-0,06078	1,33
3	-1,828	0,464
4	-0,5095	4,400

4.4. Выводы и результаты.

1. Проведено статистическое моделирование влияния технологических и конструктивных параметров процесса на точность изготовления крупногабаритных сферических днищ с помощью нелинейного многофакторного корреляционного и дисперсионного анализа.
2. Найдены показатели статистики (медиана, квартили, дисперсии, среднеквадратические отклонения, законы и эксцессы распределений) параметров геометрии, процесса изготовления днищ и показателей точности.
3. Установлены корреляционные взаимосвязи величин точности полученного изделия с рядом параметров технологии, конструкции оснастки.
4. Получены уравнения регрессии взаимосвязи для однофакторных соотношений величин точности изделия (деформации утонения ϵ_n и величины пружинения ΔS) и величин натяжения k на перетяжном ребре, размеров заготовки D , усилия прижима P , коэффициента трения f , радиуса матрицы die_r , радиуса порога $gr1$ и $gr2$ для трех вариантов технологических схем вытяжки.
5. Выявлены зоны заготовок, которые подвержены доминантному влиянию одной из проектных переменных и определены коэффициенты чувствительности процесса от доминантных величин.
6. Построены диаграммы Парето, устанавливающие степень влияния проектных переменных на показатели точности.
7. Установлено, что существенное влияние на показатели точности имеет ортотропная анизотропия заготовки.
8. Выявлено, что величина пружинения максимальна на краях изделия и имеет положительное значение в направлениях 0° и 180° , отрицательна в направлении 90° и 270° по отношению к оси прокатки для вариантов с перетяжным ребром и порогом и противоположна по знаку для варианта с буртиком.

5. Оптимизация технологического процесса изготовления изделия «Днище»

Процедура оптимизации предполагает создание математической модели, т.е. разработку целевой функции и ограничений, которые определяются технологией, оборудованием, физическими и механическими параметрами материала заготовки и многими другими факторами. Сама целевая функция определяется рядом показателей качества, поэтому задача оптимизации является многокритериальной. Ограничения и условия оптимизации могут быть равенствами и неравенствами, а также иметь сложный функциональный характер, который определяется как конечными, так и дифференциальными уравнениями. Аналитическое решение таких проблем представляет большие трудности и поэтому нахождение алгоритмов определения экстремумов подобных задач является объектом для многочисленных научных работ. С развитием вычислительной техники большее внимание уделяется численным методам нахождения решения.

Для нахождения решения конкретной задачи оптимизации изготовления изделия «Днище» используем два метода.

Первый метод основан на численных экспериментах, исследования чувствительности технологии производства изделий и дальнейшей последовательной сортировке полученных результатов в Microsoft Excel в соответствии с удовлетворением критериям утонения и пружинения. Он используется в первом методе.

Второй метод основан на статистическом алгоритме определения экстремума комплексной многокритериальной целевой функции с весовыми коэффициентами и технологическими условиями, записанными в виде конечных соотношений, который предложен в пакете Autoform.

5.1. Оптимизация технологического процесса изготовления изделия «Днище» процесса штамповки и разгрузки изделия «Днище» изготовленного по варианту вытяжки с перетяжным ребром

Первый метод оптимизации осуществим на основе численных экспериментов чувствительности процесса вытяжки к проектным переменным, которые были проведены в Autoform и описаны в предыдущем разделе. Изменение параметров проектирования соответствовало статистике равномерного распределения. Диапазоны изменения этих величин представлены в таблице 4.1. Общее количество численных экспериментов составило 100 тестов. Их число было определено из условия репрезентативной выборки и отвечало рекомендациям фирмы Autoform.

Для определения вариантов моделирования, которые удовлетворяют техническим условиям $|\varepsilon_h| \leq 0,037$ и $|\Delta S| \leq 1$ мм и позволяют получить качественное изделие без разрушения, утонения и складок применялся следующий порядок сортировки и отбора допустимых вариантов:

1. Из полученных 100 численных экспериментов для первого варианта техпроцесса отбирались такие варианты, которые отвечали условию функциональной прочности детали «Днище» $\varepsilon_h \geq -0,037$;
2. Оставшиеся тесты численных экспериментов сортировались по критерию допустимого пружинения $|\Delta S| \leq 1$ мм.
3. Варианты, прошедшие отбор по критериям утонения и пружинения проходили проверку на такие показатели качества, как отсутствие разрывов, утонений и складок.
4. Полученные в порядке отбора тесты, удовлетворяющие выставленным критериям, анализировались на соответствие режимов штамповки и техническим характеристикам и возможностям оборудования и материалов.
5. По результатам полученных действий выбирался техпроцесс, который прошел все проверки.

Варианты, которые удовлетворяют целевой функции по утонению и пружинению с учетом допуска $|1|$ мм представлены в табл. 5.1.

Таблица 5.1.

Simulation number	5	9	18	19	71	72	77	78	79	86	94
Var											
Size_blank ΔD мм	9,68E+01	2,34E+02	1,04E+02	1,12E+02	2,11E+02	1,74E+02	2,02E+02	1,86E+02	1,83E+02	2,21E+02	2,28E+02
Rest_drawb k	4,08E-01	3,19E-01	3,42E-01	2,28E-01	2,47E-01	2,56E-01	2,85E-01	2,05E-01	3,35E-01	3,10E-01	1,88E-01
Range_lub f	1,28E-01	1,74E-01	7,93E-02	1,86E-01	6,70E-02	8,33E-02	9,09E-02	1,87E-01	7,73E-02	1,19E-01	1,59E-01
Binder_P P H	3,85E+06	2,05E+06	2,18E+06	1,23E+06	1,48E+06	3,35E+06	2,79E+06	1,58E+06	2,42E+06	3,41E+06	1,34E+06
Die_Rad R мм	1,44E+01	1,38E+01	1,60E+01	3,00E+01	2,47E+01	1,24E+01	2,44E+01	1,13E+01	1,64E+01	1,78E+01	2,83E+01
Function											
Eh max	-0,00358	-0,00396	-0,00209	-0,000118	-0,000813	-0,000767	-0,00154	-0,000281	-0,00295	-0,00274	-0,000164
Eh min	-0,00551	-0,0328	-0,0307	-0,0232	-0,0279	-0,0269	-0,0299	-0,0239	-0,0326	-0,0315	-0,0235
ΔS max	1,1	1,55	1,14	1,31	1,21	0,563	1,02	0,741	1,32	1,55	1,27
ΔS min	-1,16	-1,25	-1,21	-1,75	-1,63	-1,21	-1,17	-1,28	-1,5	-1,55	-1,73

Проанализируем полученные 11 вариантов на удовлетворение результатов моделирования критериям качества процесса штамповки.

Проведенная проверка показала, что все варианты симуляции позволяют получить допустимое качество изделий. Тесты на качество имеют одну и ту же картину, но с различной шириной зон (рис. 5.1.)

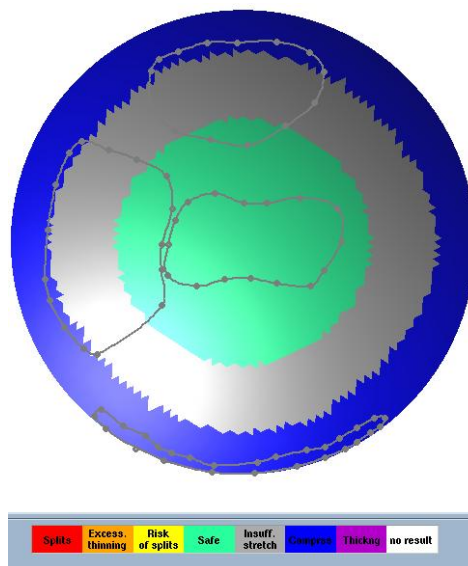


Рисунок 5.1. Тест на качество получаемого изделия.

Наименьшие размеры зон с тенденцией к утолщению (синий цвет) и недостаточной деформацией (серый цвет) имеют варианты симуляций 5,79

и 86 (см. табл.5.1), а из указанных трех вариант 5.

Наименьшая величина пружинения, практически совпадающая с технически требованиями к изделию также соответствует пятому варианту.

График изменения усилий на инструментах штампа в течении процесса изготовления изделия для пятой симуляции приведен на рис. 5.2.

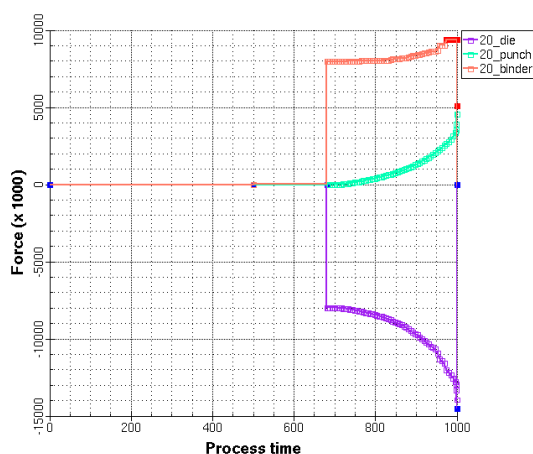


Рисунок 5.2. График изменения усилий на инструментах штампа

Оптимальный вариант, найденный первым способом может быть реализован при следующих параметрах процесса (см. табл.5.2).

Таблица 5.2.

Факторы	Значение
Диаметр заготовки D	2622 мм
Коэффициент трения f	0,128
Усилие прижима P	9000000 Н
Радиус матрицы R	15 мм
Коэффициент натяжения на перетяжном ребре k	0,408

Величина усилия прижима также учитывает усилие, которое необходимо прижиму для преодоления сопротивления материала при вдавливании перетяжного ребра. Размеры ребра представлены на рис.5.3.

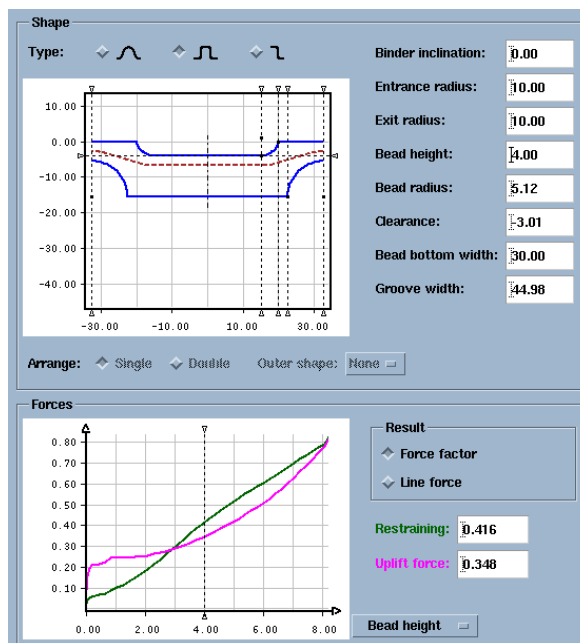


Рисунок 5.3. Конструктивные размеры перетяжного ребра для пятого варианта симуляции

Второй способ оптимизации позволяет произвести определение параметров процесса с помощью Autoform.

После проведения исследования чувствительности возможно сокращение числа параметров, которые могут оказывать существенное влияние на оптимизацию. Выберем два параметра, которые оказывают наибольшее влияние. К ним принадлежат переменные k натяжения на перетяжном ребре и D диаметр заготовки.

Design variables				
Name	Current	Start	Min	Max
● Size_blank	150	150	50	250
● Restr_drawb	0.525	0.525	0.15	0.9

Рисунок 5.4. Переменные проектирования для оптимизации процесса ВЫТЯЖКИ

Целевая функция оптимизации в Autoformе будет многокритериальной (рис.5.5):

$$y = \alpha_1 x_1 + \alpha_2 x_2 + \alpha_3 x_3$$

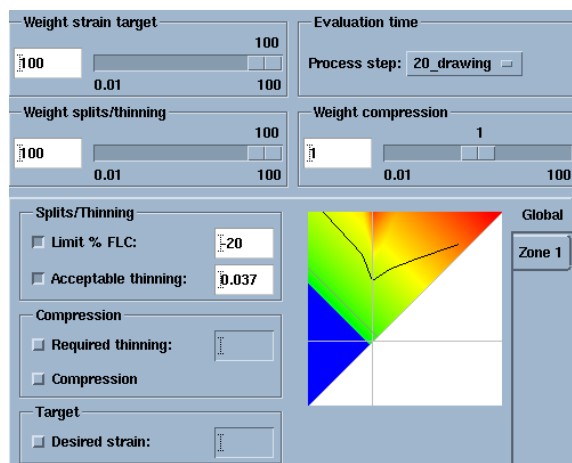


Рисунок 5.5. Ввод целевой функции и ограничений

Где $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ - весовые коэффициенты;

x_1 - критерий качества – отсутствие разрушения;

x_2 - критерий качества – отсутствие утонения;

x_3 - критерий качества – отсутствие складок.

Условиями ограничения будут:

$$\varepsilon_h \geq -0,037$$

и (рис.5.6.)

$$|\Delta S| \leq 1 \text{ мм.}$$

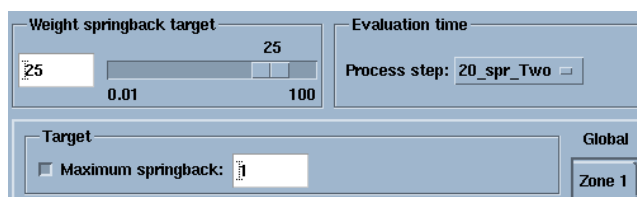


Рисунок 5.6. Ввод ограничения на пружинение

Задача оптимизации была решена за 25 симуляций. Монитор оптимизации указывает, что 18 симуляция процесса вытяжки обладает наиболее оптимальным вариантом по пружинению и удовлетворяет ограничению по максимальному утонению (рис. 5.7).

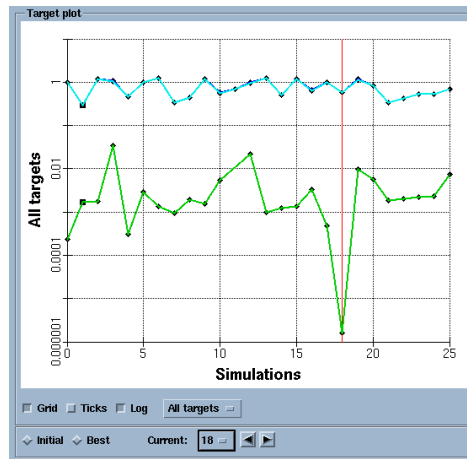


Рисунок 5.7. Монитор оптимизации.

Изделие для этого варианта удовлетворяет критериям качества: отсутствуют трещины утонение, складки (рис. 5.8, 5.9)

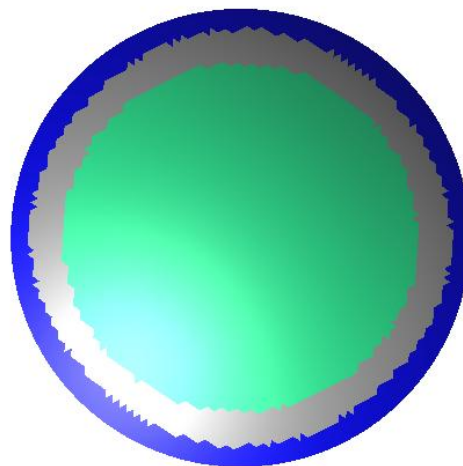


Рисунок 5.8. Тест на штампуемость

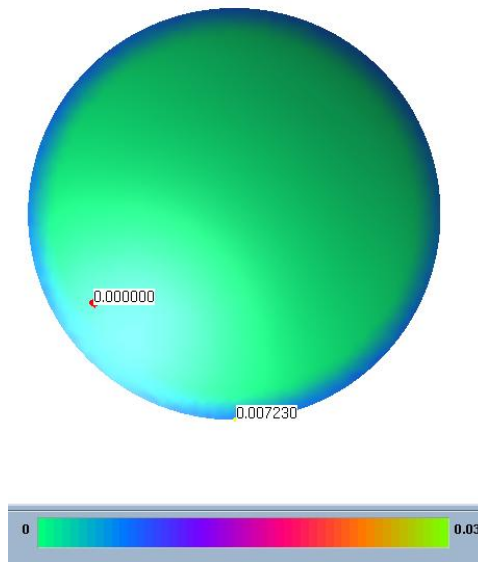


Рисунок 5.9. Критерий гофрообразования.

Значения максимального и минимального утонения показаны на рис.5.10.. Они находятся в допустимых пределах.

Величина пружинения также соответствует техническим условиям и попадает в допуск $|\Delta S| \leq 1$ мм (рис. 5.11).

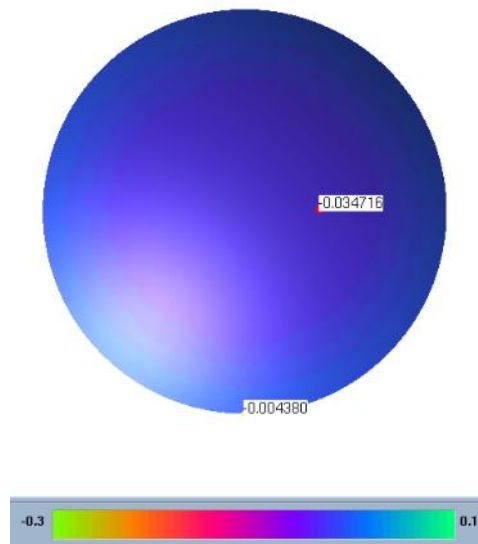


Рисунок 5.10. Поле утонений для симуляции №18

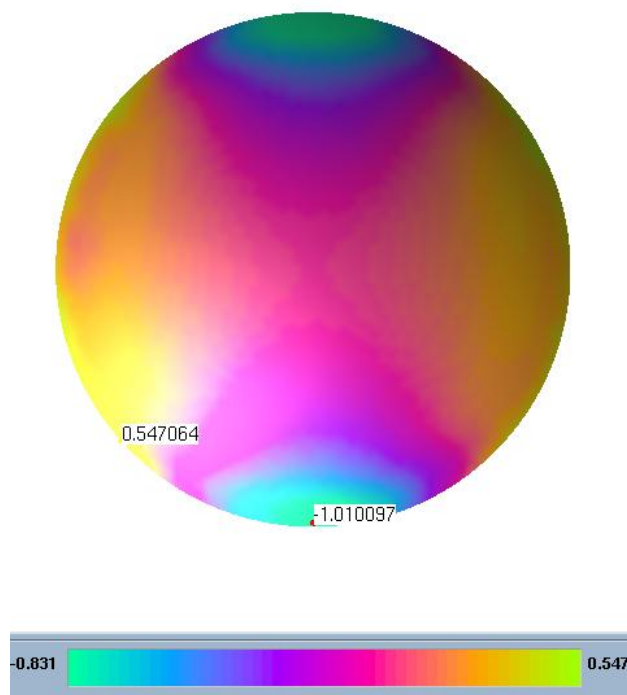


Рисунок 5.11. Поле пружинений для симуляции №18

Оптимальный вариант, найденный вторым способом может быть реализован при следующих параметрах процесса (см. табл.5.3).

Табл.5.3.

Факторы	Значение
Диаметр заготовки D	2829 мм
Коэффициент трения f	0,125
Усилие прижима P	12000000 Н
Радиус матрицы R	30 мм
Коэффициент натяжения на перетяжном ребре k	0,271

Величина усилия прижима также учитывает усилие, которое необходимо прижиму для преодоления сопротивления материала при вдавливании перетяжного ребра. Размеры ребра представлены на рис.5.12.

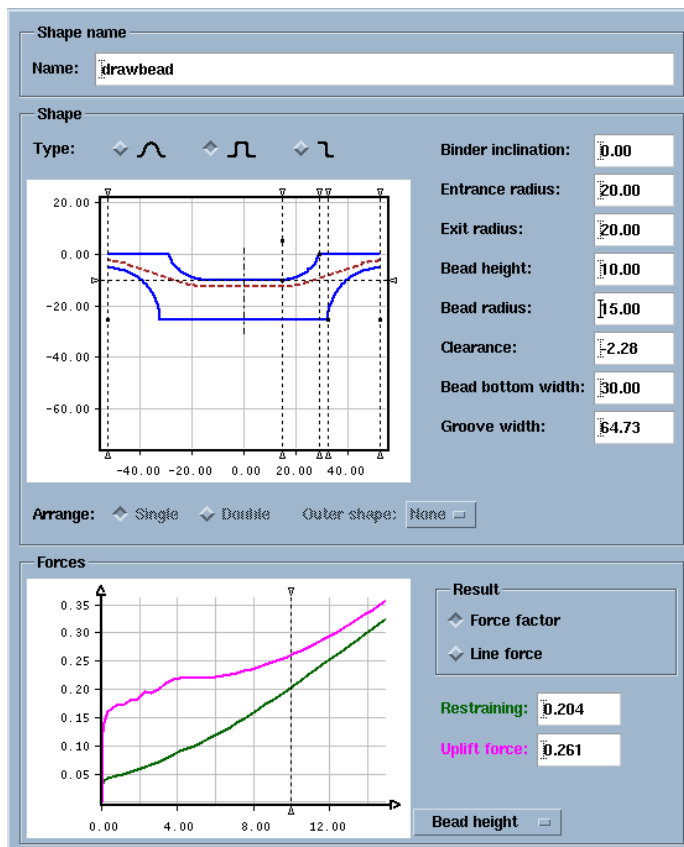


Рисунок 5.12. Геометрия ребра для второго варианта оптимизации.

5.2. Оптимизация технологического процесса изготовления изделия «Днище» процесса штамповки и разгрузки изделия «Днище» изготовленного по варианту вытяжки с порогами.

Первый метод оптимизации проведем на основе численных экспериментов чувствительности процесса вытяжки к проектным переменным, которые были проведены в Autoform и описаны в предыдущем разделе. Изменение параметров проектирования соответствовало статистике равномерного проектирования. Диапазон изменения этих величин представлен в таблице 4.1. Общее количество численных экспериментов составило 130 тестов. Их число было определено из условия репрезентативной выборки и отвечало рекомендациям фирмы Autoform.

Для определения вариантов моделирования, которые удовлетворяют техническим условиям $\varepsilon_h \leq -0,037$ и $|\Delta S| \leq 1$ мм и позволяют получить

качественное изделие без разрушения, утонения и складок применялся следующий порядок сортировки и отбора допустимых вариантов:

- Из полученных 130 численных экспериментов для первого варианта техпроцесса отбирались такие варианты, которые отвечали условию функциональной прочности детали «Днище» $\varepsilon_h - 0,037$;
- Оставшиеся тесты численных экспериментов сортировались по критерию допустимого пружинения $|\Delta S| \leq 1$ мм.
- Варианты, прошедшие отбор по критериям утонения и пружинения проходили проверку на такие показатели качества, как отсутствие разрывов, утонений и складок.
- Полученные в порядке отбора тесты, удовлетворяющие выставленным критериям, анализировались на соответствие режимов штамповки и техническим характеристикам и возможностям оборудования и материалов.
- По результатам полученных действий выбирался техпроцесс, который прошел все проверки.

Варианты, которые удовлетворяют целевой функции по утонению и пружинению с учетом допуска на пружинение $|1|$ мм представлены в табл. 5.4.

Таблица 5.4.

A	B	C	D
Simulation number	120	15	121
R	2,89E+01	2,79E+01	1,65E+01
f	7,76E-02	8,94E-02	1,84E-01
P	3,47E+06	1,91E+06	2,90E+06
rp1	3,84E+01	1,45E+01	3,89E+01
rp2	2,19E+01	1,85E+01	3,13E+01
D	1,39E+03	1,36E+03	1,31E+03
Максимальное пружинение	1,03	2,03	2,34
Минимальное пружинение	-0,229	-0,638	-0,887
Минимальное утонение	-0,00316	-0,0147	-0,0172
Максимальное утонение	-0,0381	-0,0501	-0,0502

Проанализируем полученные 3 варианта на удовлетворение результатов моделирования критериям качества процесса штамповки.

Проведенная проверка показала, что только один вариант симуляции (120) близок к условиям получения допустимого качества изделий. Величина утонения ε_h больше по модулю, чем 0.037. Тест на штампуемость показал зоны различной ширины (рис. 5.13.)

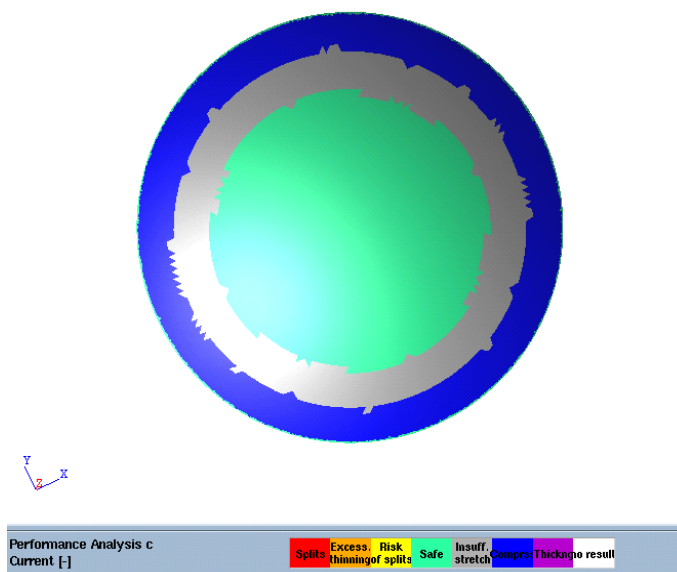


Рисунок 5.13. Тест на качество получаемого изделия.

Наименьший размер зоны с тенденцией к утолщению (синий цвет) и недостаточной деформацией (серый цвет), симуляция 120 также проходит по техническому требованию по пружинению. График изменения усилий на инструментах штампа в течении процесса изготовления изделия для пятой симуляции приведен на рис. 5.14.

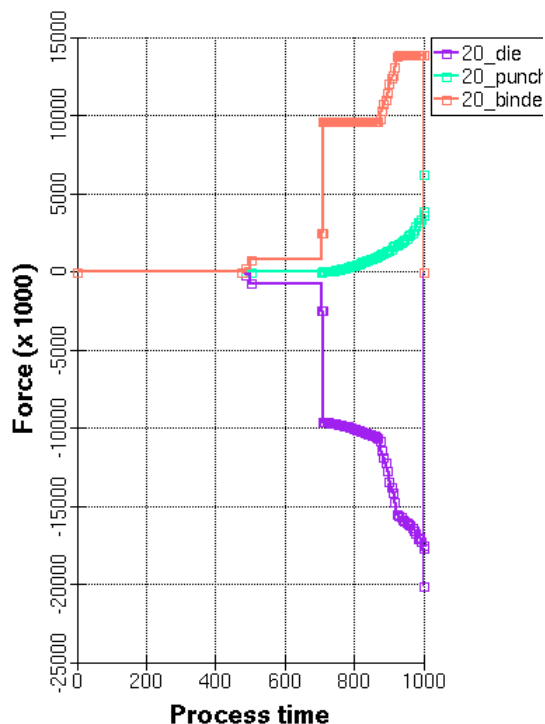


Рисунок 5.14. График изменения усилий на инструментах штампа

Оптимальный вариант, найденный первым способом может быть реализован при следующих параметрах процесса (см. табл.5.5).

Таблица 5.5.

Факторы	Значение
Диаметр заготовки D	2772 мм
Коэффициент трения f	0,078
Усилие прижима P	3467000 Н
Радиус матрицы R	29 мм
Верхний радиус порога	38,5
Нижний радиус порога	22

Второй способ оптимизации позволяет произвести определение параметров процесса с помощью Autoform.

После проведения исследования чувствительности возможно сокращение числа параметров, которые могут оказывать существенное влияние на оптимизацию. Выберем четыре параметра, которые оказывают наибольшее влияние. К ним принадлежат переменные f коэффициент трения, D диаметр заготовки, и верхний и нижний радиусы порога.

Design variables				
Name	Current	Start	Min	Max
● f	0.125	0.125	0.05	0.2
● $rp1$	23.5	23.5	7	40
● $rp2$	23.5	23.5	7	40
● D	1.4e+03	1.4e+03	1.3e+03	1.5e+03

Рисунок 5.15. Переменные проектирования для оптимизации процесса
ВЫТЯЖКИ

Целевая функция оптимизации в Autoformе будет многокритериальной (рис.5.5):

$$y = \alpha_1 x_1 + \alpha_2 x_2 + \alpha_3 x_3$$

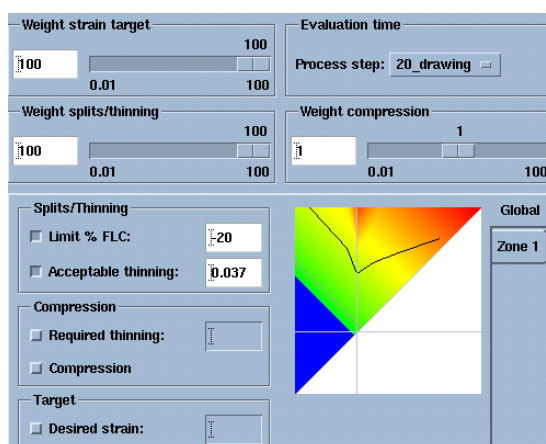


Рисунок 5.16. Ввод целевой функции и ограничений

где $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ - весовые коэффициенты;

x_1 - критерий качества – отсутствие разрушения;

x_2 - критерий качества – отсутствие утонения;

x_3 - критерий качества – отсутствие складок.

Условиями ограничения будут:

$$\varepsilon_h \geq -0,037$$

и (рис.5.6.)

$$|\Delta S| \leq 1 \text{ мм.}$$

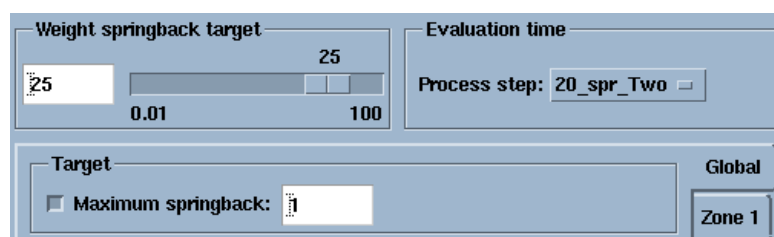


Рисунок 5.17. Ввод ограничения на пружинение

Задача оптимизации была решена за 100 симуляций. Монитор оптимизации указывает, что 6 симуляция процесса вытяжки обладает наиболее оптимальным вариантом по пружинению и удовлетворяет ограничению по максимальному утонению (рис. 5.7).

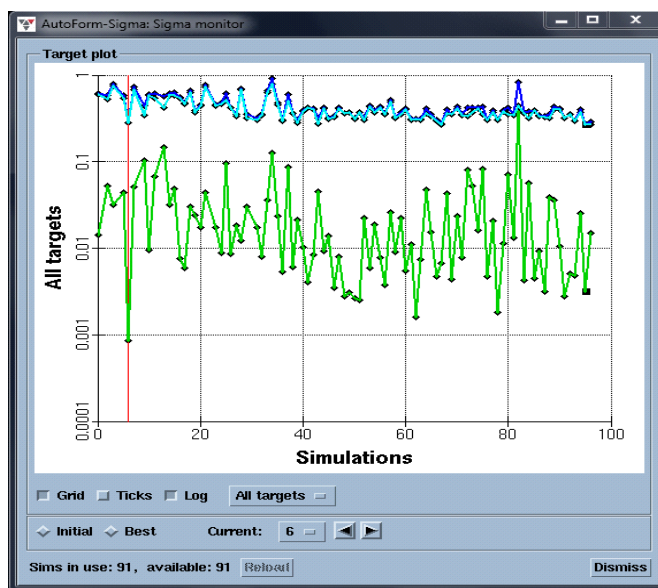


Рисунок 5.18. Монитор оптимизации.

Критерии качества: отсутствуют трещины, утонение, складки (рис. 5.8, 5.9)

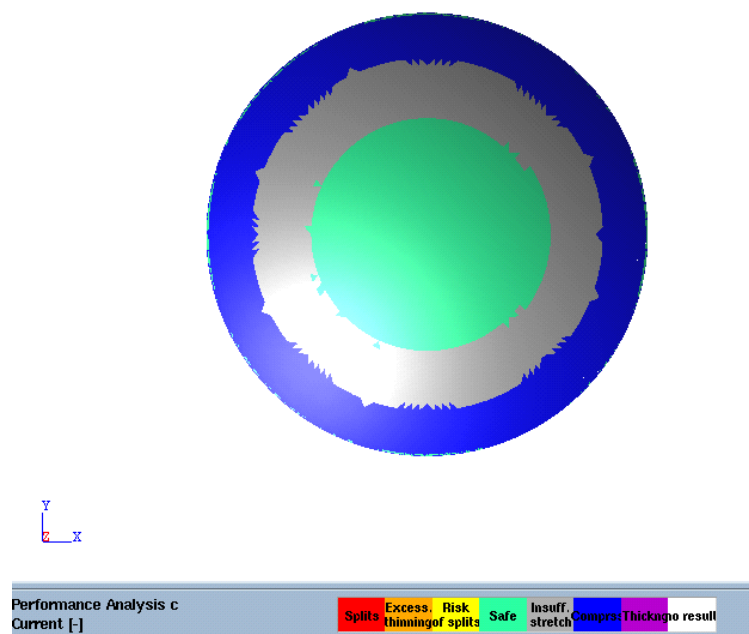


Рисунок 5.19. Тест на штампуемость

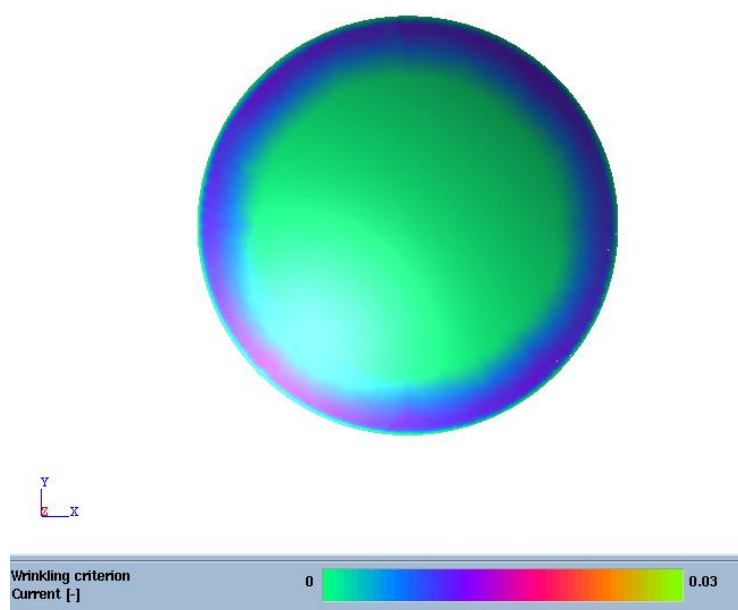


Рисунок 5.20. Критерий гофрообразования.

Значения максимального и минимального утонения показаны на рис.5.21.. Они находятся в допустимых пределах.

Величина пружинения не соответствует техническим условиям (рис. 5.22).

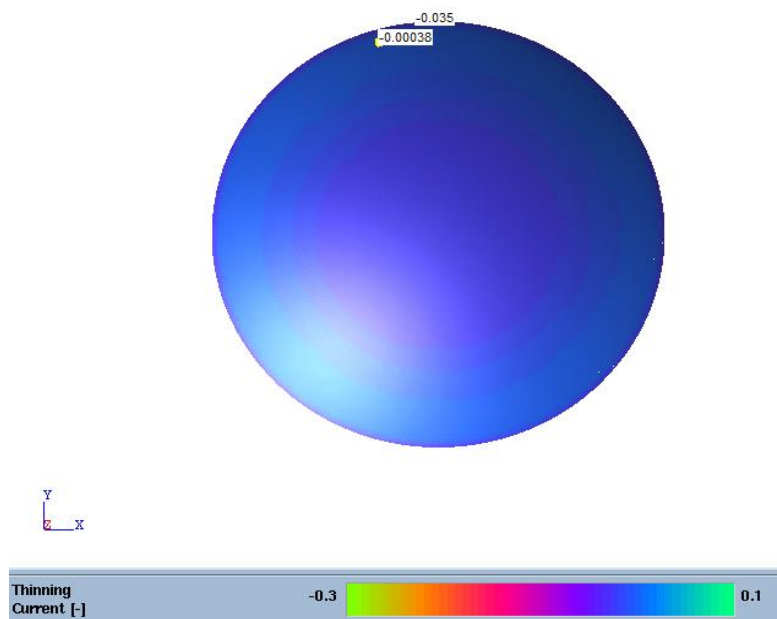


Рисунок 5.21. Поле утонений для симуляции №18

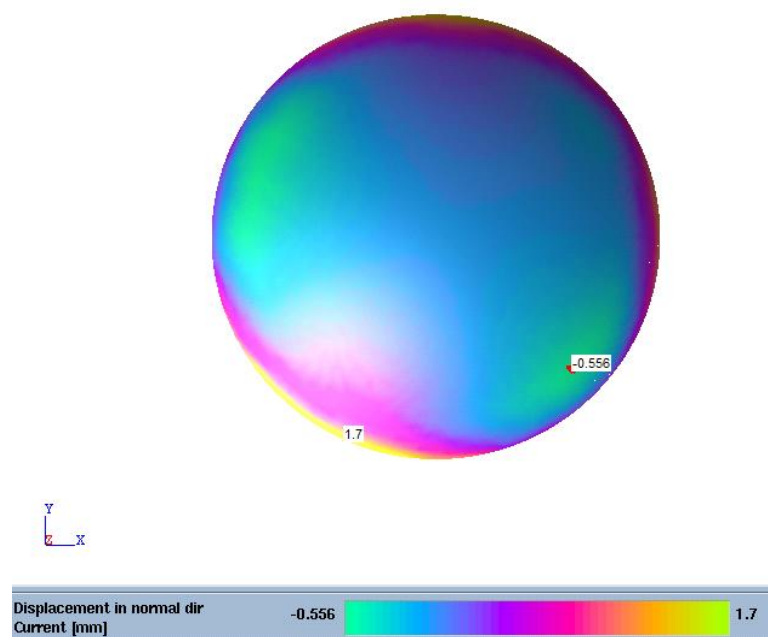


Рисунок 5.22. Поле пружинений для симуляции №18

Параметры процесса наилучшего варианта после оптимизации (см. табл.5.6).

Таблица 5.6.

Факторы	Значение
Диаметр заготовки D	2630 мм
Коэффициент трения f	0,05
Верхний радиус порога	37,1
Нижний радиус порога	34,5

Величина усилия прижима также учитывает усилие, которое необходимо для преодоления сопротивления материала при вдавливании порога. Размеры порога представлены на рис.5.23.

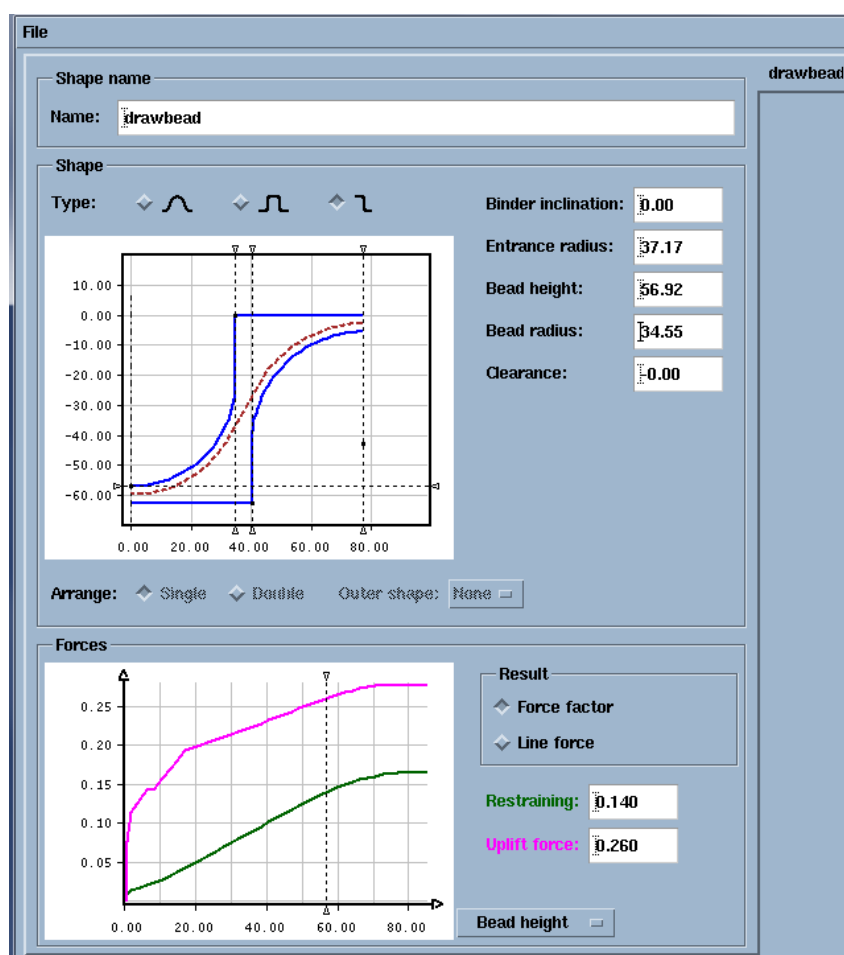


Рисунок 5.23. Геометрия ребра для второго варианта оптимизации.

Для варианта с плоским фланцем и перетяжным порогом в процессе оптимизации не определяется вариант с заданной точностью. Величина пружинения в краевых зонах изделия достигает 1,7 мм, что не удовлетворяет техническим условиям.

5.3. Оптимизация технологического процесса изготовления изделия «Днище» процесса штамповки и разгрузки изделия «Днище» изготовленного по варианту вытяжки с перетяжным ребром и цилиндрической стенкой

Первый способ оптимизации осуществим на основе численных экспериментов, которые были проведены в разделе 4. Изменение параметров проектирования соответствует статистике равномерного проектирования. Диапазон изменения этих величин представлен в таблице 4.1. Общее количество численных экспериментов составило 100 тестов. Их число было определено из условия репрезентативной выборки и отвечало рекомендациям программы Autoform.

Для определения вариантов моделирования, которые удовлетворяют техническим условиям $|\varepsilon_h| \leq 0,037$ и $|\Delta S| \leq 1$ мм и позволяют получить качественное изделие без разрушения, утонения и складок применялся следующий порядок сортировки и отбора допустимых вариантов:

- Из полученных 100 численных экспериментов для первого варианта техпроцесса отбирались такие варианты, которые отвечали условию функциональной прочности детали «Днище» $\varepsilon_h \geq -0,037$;
- Оставшиеся тесты численных экспериментов сортировались по критерию допустимого пружинения $|\Delta S| \leq 1$ мм.
- Варианты, прошедшие отбор по критериям утонения и пружинения проходили проверку на такие показатели качества, как отсутствие разрывов, утонений и складок.

- Полученные в порядке отбора тесты, удовлетворяющие выставленным критериям, анализировались на соответствие режимов штамповки и техническим характеристикам и возможностям оборудования и материалов.
- По результатам полученных действий выбирался техпроцесс, который прошел все проверки.

Варианты, которые удовлетворяют целевой функции по утонению и пружинению с учетом допуска на пружинение $|1|$ мм представлены в табл. 5.7.

Таблица 5.7.

Simulation number		70	93	63	16	17
Var						
Range_lub	f	0,07183	0,1121	0,1939	0,05639	0,1368
Rest_drawb	k	0,2125	0,2039	0,1719	0,3032	0,3282
Die_Rad	R	13,64	13,73	10,54	14,64	9,089
Size_blank	D	2958	2936	2962	2996	2692
Binder_P	P	3965000	3275000	3648000	1219000	3708000
Function						
eh max		-0,00049	-0,00057	-0,00034	-0,00309	-0,0021
eh min		-0,0277	-0,0265	-0,0257	-0,0346	-0,0324
DS normal max		0,318	0,391	0,564	1,03	1,21
DS normal min		-0,749	-0,639	-0,79	-1,23	-1,05

Проанализируем полученные 5 вариантов результатов моделирования на соответствие критериям качества процесса штамповки.

Проведенная проверка показала, что все варианты симуляции позволяют получить допустимое качество изделий. Тесты на качество имеют одну и ту же картину, но с различной шириной зон (рис. 5.24)

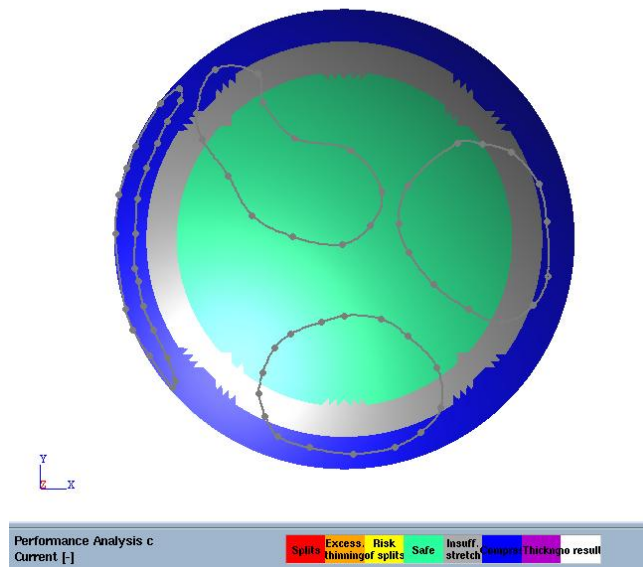


Рисунок 5.24. Тест на качество получаемого изделия.

Наименьшие размеры зон с тенденцией к утолщению (синий цвет) и недостаточной деформацией (серый цвет) имеют варианты симуляций 16, 17 и 93 (см. табл.5.7), а из указанных трех вариант 16.

Наименьшая величина пружинения, практически совпадающая с технически требованиями к изделию соответствует шестнадцатому варианту.

График изменения усилий на инструментах штампа в течении процесса изготовления изделия для пятой симуляции приведен на рис. 5.25.

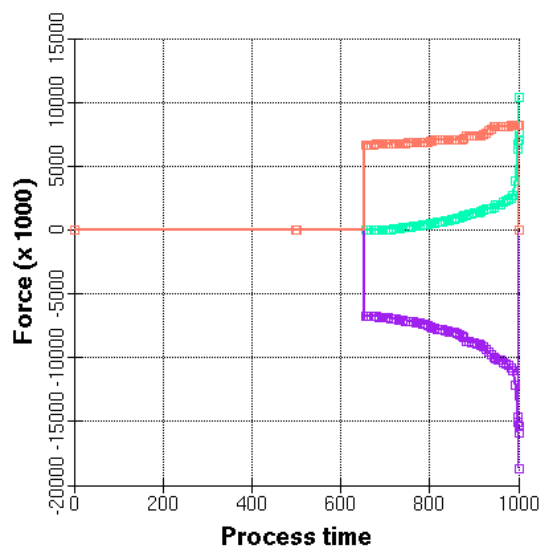


Рисунок 5.25. График изменения усилий на инструментах штампа

Оптимальный вариант, найденный первым способом может быть реализован при следующих параметрах процесса (см. табл.5.8).

Табл.5.8.

Факторы	Значение
Диаметр заготовки D	2996 мм
Коэффициент трения f	0,05639
Усилие прижима P	1219000 Н
Радиус матрицы R	14,64 мм
Коэффициент натяжения на перетяжном ребре k	0,3032

Величина усилия прижима также учитывает усилие, которое необходимо прижиму для преодоления сопротивления материала при вдавливании перетяжного ребра. Размеры ребра представлены на рис.5.26.

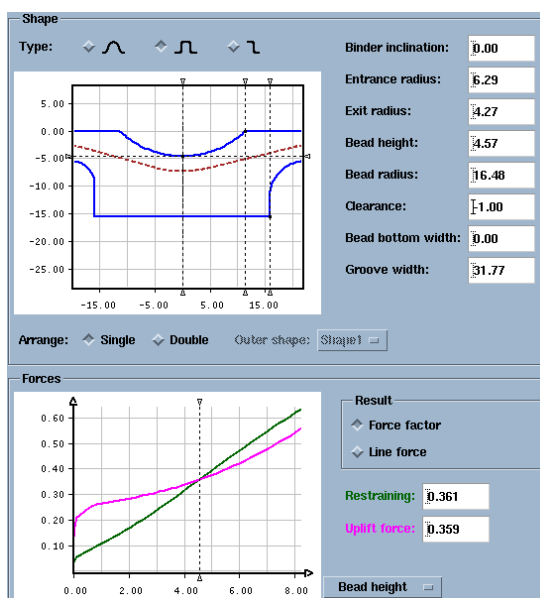


Рисунок 5.26. Конструктивные размеры перетяжного ребра для пятого варианта симуляции

Второй способ оптимизации позволяет произвести определение параметров процесса с помощью Autoform.

После проведения исследования чувствительности возможно сокращение числа параметров, которые могут оказывать существенное влияние на оптимизацию. Выберем три параметра, которые оказывают наибольшее влияние. К ним принадлежат переменные k натяжения на перетяжном ребре, D диаметр заготовки и die_r радиус матрицы (рис. 5.4.4).

Design variables				
Name	Current	Start	Min	Max
<input checked="" type="checkbox"/> k	0.5	0.5	0.1	0.9
<input checked="" type="checkbox"/> die_r	10	10	5	15
<input checked="" type="checkbox"/> D	1.4e+03	1.4e+03	1.3e+03	1.5e+03

Рисунок 5.27. Переменные проектирования для оптимизации процесса
ВЫТЯЖКИ

Целевая функция оптимизации в Autoform будет многокритериальной (рис.5.28.):

$$y = \alpha_1 x_1 + \alpha_2 x_2 + \alpha_3 x_3,$$

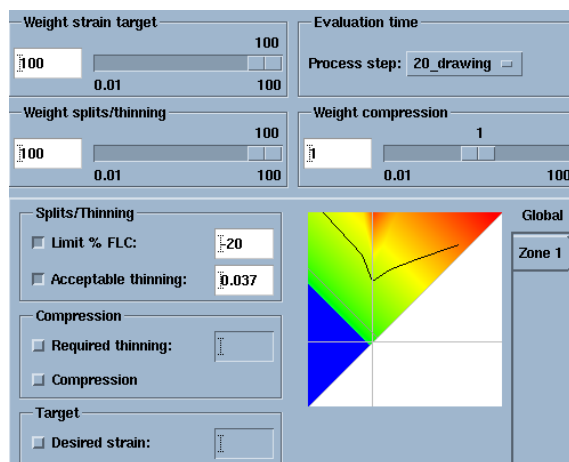


Рисунок 5.28. Ввод целевой функции и ограничений

где $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ - весовые коэффициенты;

x_1 - критерий качества – отсутствие разрушения;

x_2 - критерий качества – отсутствие утонения;

x_3 - критерий качества – отсутствие складок.

Условиями ограничения будут:

$$\varepsilon_h \geq -0,037$$

и (рис.5.4.6.)

$$|\Delta S| \leq 1 \text{ мм.}$$

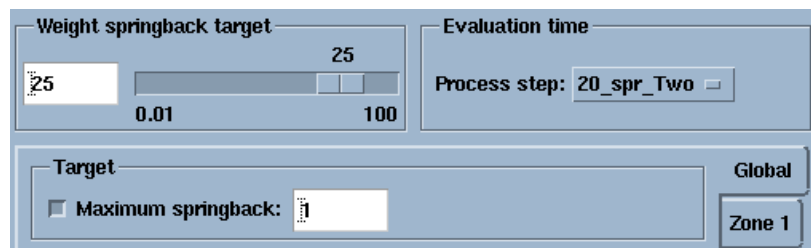


Рисунок 5.29. Ввод ограничения на пружинение.

Задача оптимизации была решена за 100 симуляций. Монитор оптимизации указывает, что 85-ая симуляция процесса вытяжки обладает наиболее оптимальным вариантом по пружинению и удовлетворяет ограничению по максимальному утонению (рис. 5.4.7).

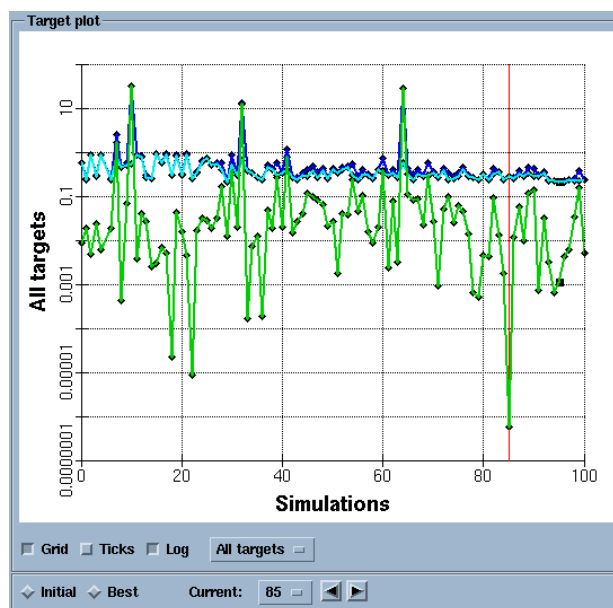


Рисунок 5.30. Монитор оптимизации.

Изделие для этого варианта удовлетворяет критериям качества: отсутствуют трещины, утонение, складки (рис. 5.31, 5.32).

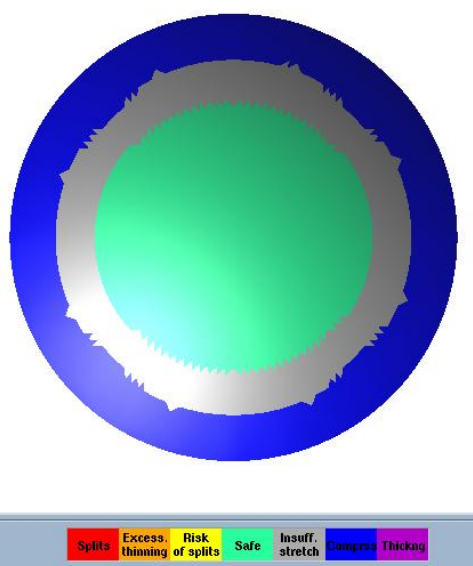


Рисунок 5.31. Тест на штампуемость

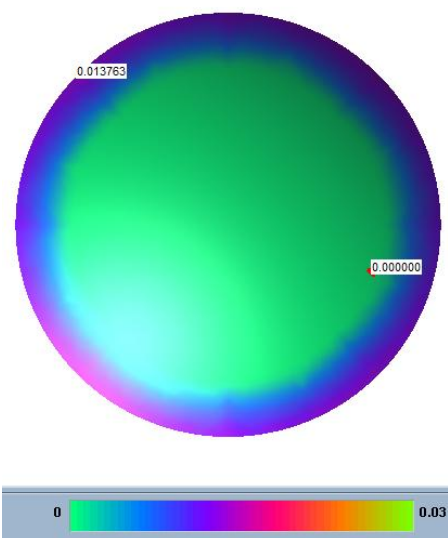


Рисунок 5.32. Критерий гофрообразования.

Значения максимального и минимального утонения показаны на рис.5.33. Они находятся в допустимых пределах.

Величина пружинения также соответствует техническим условиям и попадает в допуск $|\Delta S| \leq 1$ мм (рис. 5.4.11).

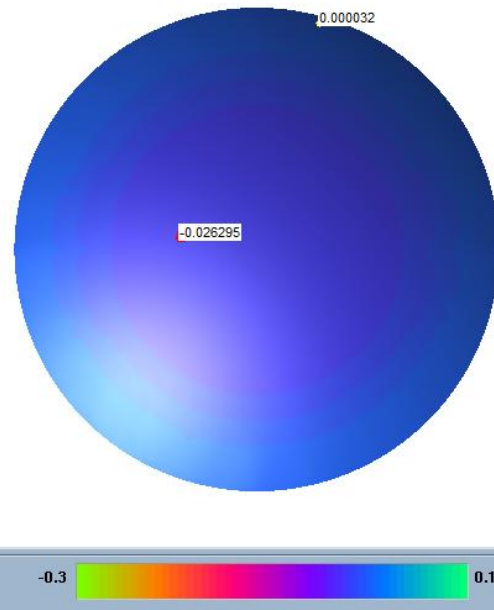


Рисунок 5.33. Поле утонений для симуляции №85

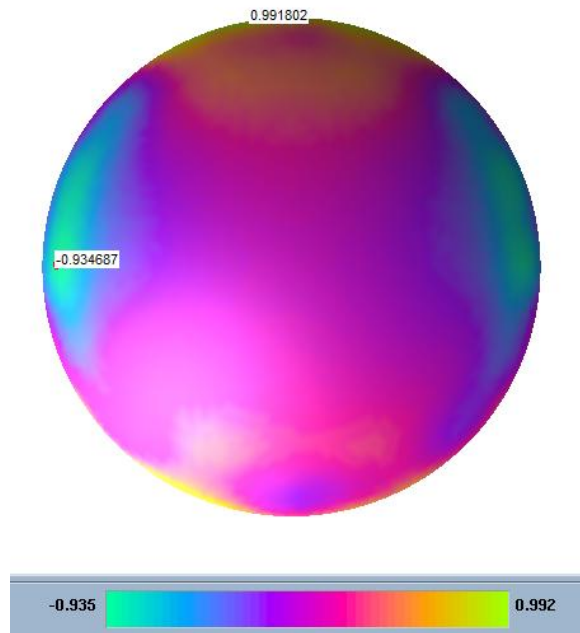


Рисунок 5.34. Поле пружинений для симуляции №85

Оптимальный вариант, найденный вторым способом может быть реализован при следующих параметрах процесса (см. табл.5.9).

Таблица 5.9.

Факторы	Значение
Диаметр заготовки D	2786 мм
Коэффициент трения f	0,0774
Усилие прижима P	2055000 Н
Радиус матрицы R	12,5 мм
Коэффициент натяжения на перетяжном ребре k	0,1939

Величина усилия прижима также учитывает усилие, которое необходимо прижиму для преодоления сопротивления материала при вдавливании перетяжного ребра. Размеры ребра представлены на рис.5.35.

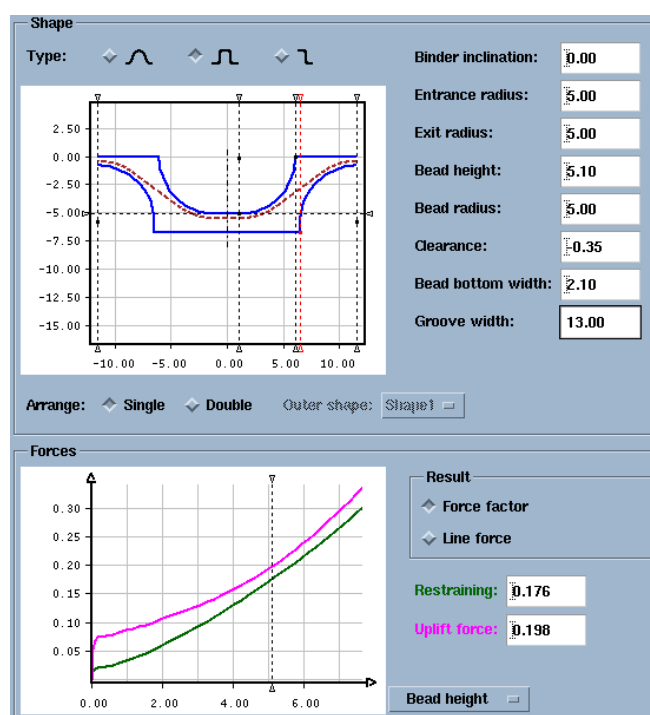


Рисунок 5.35. Геометрия ребра для восьмидесят пятого варианта симуляции.

5.4. Выводы и результаты

1. Предложена методика определения оптимальных решений, которые соответствуют целевой функции, ограничениям и проектным данным на основе статистического исследования показателей точности днищ.
2. Показано, что результаты оптимизации, которые были получены в приложении Autuform Sigma, соответствуют параметрам предложенной методики оптимизации.
3. Установлено, что для второго варианта штамповки с перетяжным порогом не удастся достичь заданных значений показателей качества. Величина утонения превышает допустимое утонение.
4. Определены оптимальные значения проектных переменных для заданной целевой функции и ограничений для вариантов с перетяжным ребром и с бортиком.
5. Установлено, что одинаковые значения целевой функции могут быть достигнуты при различных величинах проектных переменных. Оптимизация процессов изготовления крупногабаритных днищ имеет неоднозначное решение для заданного набора проектных переменных, т.к. часть переменных взаимно зависимы

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Проведенный патентный обзор позволил определить основные тенденции развития изготовления изделия типа «Днище». Для холодной штамповки крупногабаритных изделий наибольшее применение находят три способа штамповки: первый способ - с плоским и коническим прижимом, второй способ - с перетяжным порогом, третий способ – с цилиндрической стенкой.
2. На основе численных экспериментов выявлено, что наибольшее влияние на технологический процесс вытяжки из факторов управления оказывает натяжение заготовки.
3. Пружинение заготовки зависит от анизотропии и имеет для углов 0° и 90° к направлению прокатки противоположные значения.
4. Выявлено, что наибольшими ресурсами управления процесса вытяжки для обеспечения заданного утонения и пружинения является схема вытяжки с плоским прижимом и перетяжным ребром по контуру заготовки.
5. Моделирование процесса изготовления крупногабаритных изделий типа «Днище» показало, что наиболее эффективно влияет на процесс вытяжки перетяжное ребро.
6. Проведенная оптимизация процесса по критериям допустимого утонения и пружинения позволила установить энергосиловые параметры вытяжки (усилие штамповки, усилие прижима), геометрические параметры инструмента (матрицы, пуансона, прижима, перетяжного ребра), которые позволяют получить заданные показатели процесса.
7. Величина усилия прижима заготовки с учетом ее деформирования на перетяжном ребре зависит от его размеров и может превышать номинальные значения усилий, указанных в технических характеристиках прессы. Уменьшение усилий прижима меньше оптимальных значений может привести к складкообразованию и значительному пружинению.

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мельников Э.Л. Холодная штамповка днищ / Э. Л. Мельников. - Москва : Машиностроение, 1976. - 183 с. : ил. - Библиогр.: с. 179-182.
2. Заготовительно-штамповочные работы в самолетостроении / А.И. Грошиков, Ю.А. Заславский, Н.И. Горбенко – М. :Оборонгиз,1961. – 556с.
3. Романовский В.Н. Справочник по холодной штамповке / В. П. Романовский. - 6-е изд., перераб. и доп. - Ленинград : Машиностроение, 1979. - 520 с. : ил. - Библиогр.: с. 512-516. - Предм. указ.: с. 517-518..
4. Справочник конструктора штампов : Листовая штамповка / под общ. ред. Л. И. Рудмана. - Москва : Машиностроение, 1988. - 495 с. : ил. - (Библиотека конструктора). - Библиогр.: с. 487-489. - Предм. указ.: с. 491-495.
5. Нефедов А.П. Конструирование и изготовление штампов : Из опыта Горьковского автомобильного завода / А. П. Нефедов. - Москва : Машиностроение, 1973. - 408 с. : ил. - Библиогр.: с. 406.
6. Гречников Ф.В. Деформирование анизотропных материалов (Резервы интенсификации)/ Ф.В. Гречников – М.:Машиностроение,1998. – 448 с.
7. Арышенский Ю.М. Получение рациональной анизотропии в листах/ Ю.М. Арышенский, Ф.В.Гречников, В.Ю. Арышенский – М.:Металлургия,1987.- 141с.
8. Яковлев С. П. Штамповка анизотропных заготовок / С. П. Яковлев, В. Д. Кухарь. - Москва : Машиностроение, 1986. - 136 с. : ил. - Библиогр.: с. 135.
9. Ли Л. Основы САПР: CAD/CAM/CAE = Principles of CAD/CAM/CAE Systems / К. Ли ; [пер. с англ. А. Вахитова и др.]. - Санкт-Петербург : Питер, 2004. - 559 с. : ил. - Библиогр.: с. 541. - Алф. указ.: с. 551-559. - ISBN 5-94723-770-9 : 106-36.
10. Чиж, О. Проектирование штампов для корпусных деталей автомобилей в Unigraphics / О. Чиж // САПР и графика. – 2000. – № 10. С. 51 – 53.

11. User Manual. Workshop AutoForm R3.1.
12. Галлагер Р. Метод конечных элементов-М.:Мир,1984.-428 с.
13. Подиновский В. В. Парето-оптимальные решения многокритериальных задач / В. В. Подиновский, В. Д. Ногин. - Москва : Наука, 1982. - 254 с. : ил. - (Экономико-математическая библиотека). - Библиогр.: с. 236-251. - Предм. указ.: с. 252-254.
14. Gitman M.B., Trusov P.V. and Fedoseev S.A. On the stochastic optimization problems of plastic metal working processes under stochastic initial conditions // The Korean Journal of Computational @ Applied Mathematics (KJCAM). – 1999. Vol.6. – № 1. – P.111–125.
15. T.L. Becker Jr., R.M. Cannon , R.O. Ritchie An approximate method for residual stress calculation in functionally graded materials // Mechanics of Materials 32 (2000) P.85-97/
16. Gitman M.B., Trusov P.V. and Fedoseev S.A. On optimization of metal forming with adaptable characteristics // The Korean Journal of Computational @ Applied Mathematics (KJCAM). – Vol.7. – 2000. – P. 387–396.
17. Джонсон У Теория пластичности для инженеров / У. Джонсон, П. Меллор ; пер. с англ. А. Г. Овчинникова. - Москва : Машиностроение, 1979. - 567 с. : ил.
18. Качанов Л. М Основы теории пластичности : учеб. пособие / Л. М. Качанов. - 2-е изд., перераб. и доп. - Москва : Наука, 1969. - 420 с. : ил. - Библиогр.: с. 409-416. - Предм. указ.: с. 417-420.
19. Сторожев М. В. Теория обработки металлов давлением : учеб. для вузов / М. В. Сторожев, Е. А. Попов. - Изд. 4-е, перераб. и доп. - Москва : Машиностроение, 1977. - 423 с. : ил. - Библиогр.: с. 413-417. - Имен. указ.: с. 418-419. - Предм. указ.: с. 420-421.
20. ГОСТ 4789-97 Алюминий и сплавы алюминиевые деформируемые. Марки : Взамен ГОСТ 4784-74. - Изд. офиц. ; введ. 01.07.2000. - Минск : Изд-во стандартов, 2001. - 11 с. - (Межгосударственный стандарт). - 403-29

21. ГОСТ 1497-84 – Металлы. Методы испытаний на растяжение. - Изд. офиц. ; введ. 01.07.2000. - Минск : Изд-во стандартов, 2001. - 11 с. - (Межгосударственный стандарт). - 403-29
22. ГОСТ 11701-84 – Металлы. Методы испытаний на растяжение тонких листов и лент. Взамен ГОСТ 11701-84 ; введ. с 01.01.86 до 01.01.91. - Москва : Изд-во стандартов, 1984. - 13 с. : ил. - (Межгосударственный стандарт. Государственный стандарт). - Прил.: с. 5-13. - Группа В 09. - 220-00.
23. Hollomon, J.H.: Tensile deformations. Trans. Metall. Soc. AIME 162 (1945) P. 268-290.
24. Ludwik, P.: Elemente der technologischen Mechanik. Springer Verlag Berlin (1909).
25. Swift, M.W.: Plastic instability under plane stress. J. Mech. Phys. Solid, 1 (1952) P.1-18.
26. Voce, E.: The relationship between stress and strain for homogeneous deformation J. Int. Metals, 74 (1948) P. 537-562.
27. Hockett, J.E.; Sherby, O.D.: Large strain deformation of polycrystalline metals at low homologous temperatures. J. Mech. Phys. Solid, 23-2 (1975) P. 87-98.
28. Gosh, A.K.: Tensile instability and necking in materials with strain hardening and strain-rate hardening. Acta Met., 25 (1977) pp. 1413-1424.
29. Liu Wei, Yang Yuying Multi-objective optimization of sheet metal forming process using Pareto-based genetic algorithm // Journal of materials processing technology 208 (2008) P. 499–506
30. Chaboche, J.L., On the modifications of kinematic hardening to improve the description of Ratchetting effects. Int. J. Plasticity 7, 1991. P 661-685.

Приложение 1

Графики регрессионных зависимостей чувствительности и диаграммы Паретто для 8 зон и вариаций параметров вытяжки с порогом

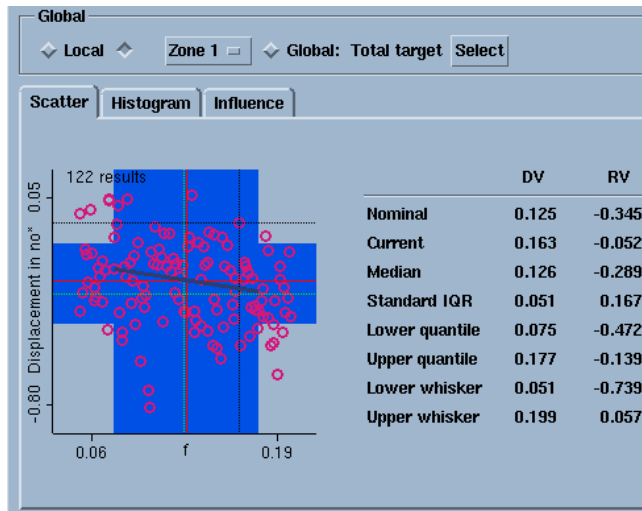


Рисунок П1.1. График функции чувствительности пружинения от натяжения f для зоны 1.

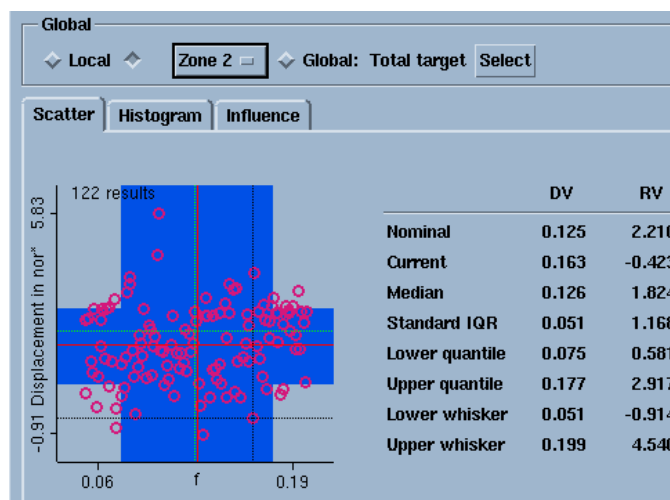


Рисунок П1.2. График функции чувствительности пружинения от натяжения f для зоны 2.

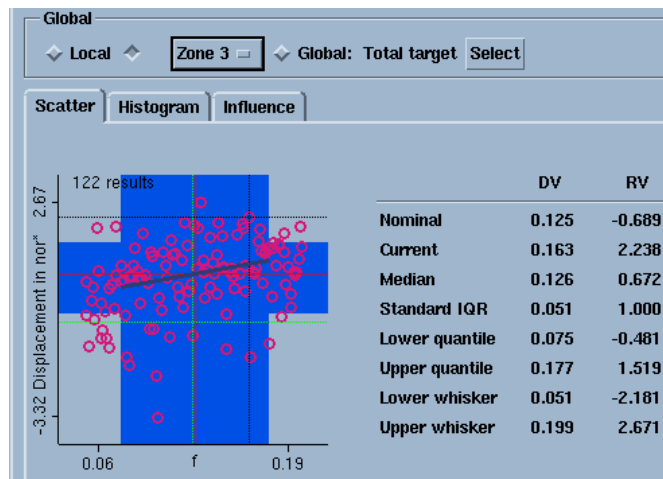


Рисунок П1.3. График функции чувствительности пружинения от натяжения f для зоны 3.

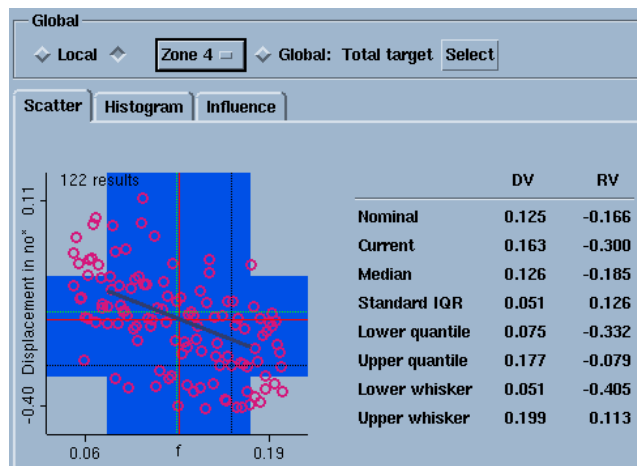


Рисунок П1.4. График функции чувствительности пружинения от натяжения f для зоны 4.

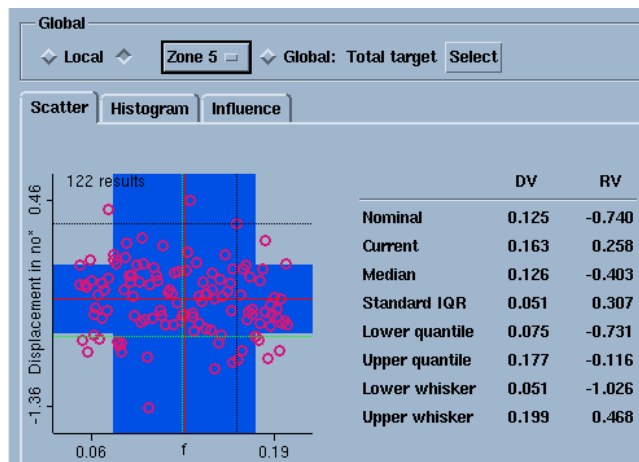


Рисунок П1.5. График функции чувствительности пружинения от натяжения f для зоны 5.

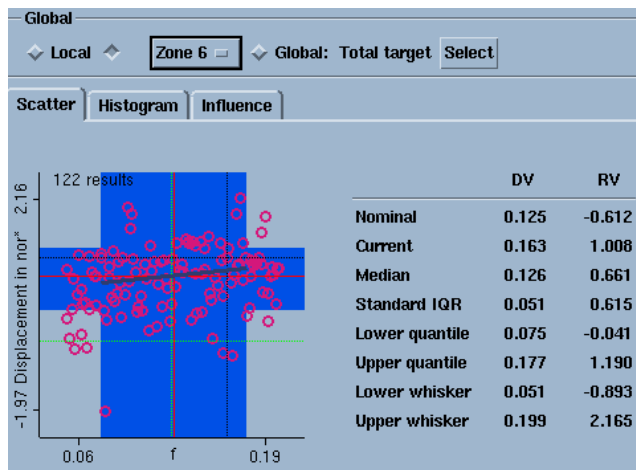


Рисунок П1.6. График функции чувствительности пружинения от натяжения f для зоны 6.

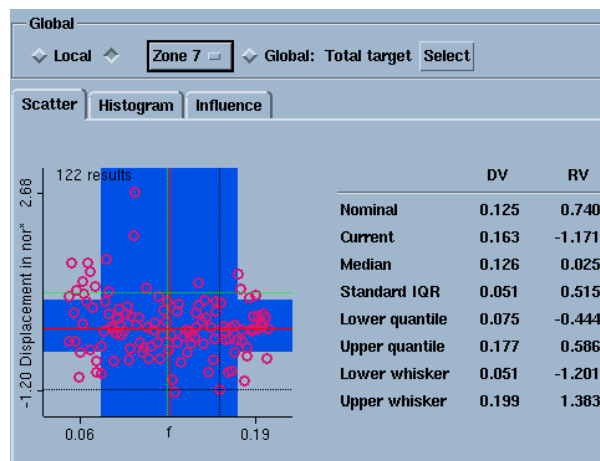


Рисунок П1.7. График функции чувствительности пружинения от натяжения f для зоны 7.

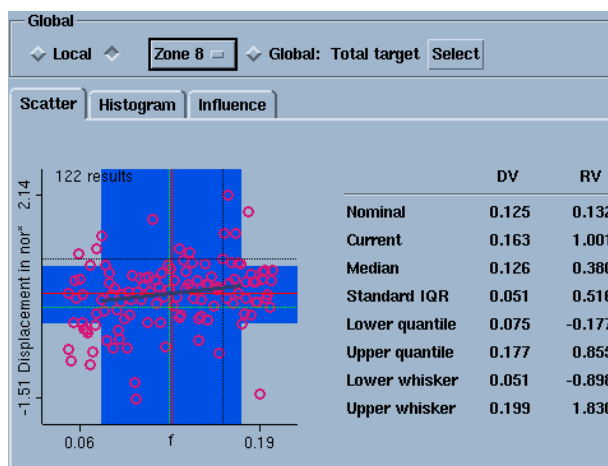


Рисунок П1.8. График функции чувствительности пружинения от натяжения f для зоны 8.

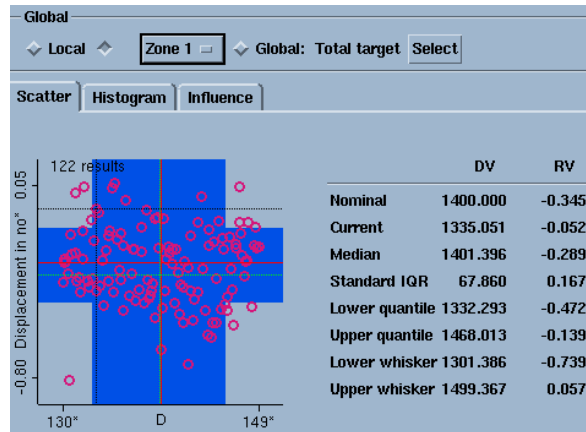


Рисунок П1.9. График функции чувствительности пружинения от диаметра заготовки D для зоны 1.

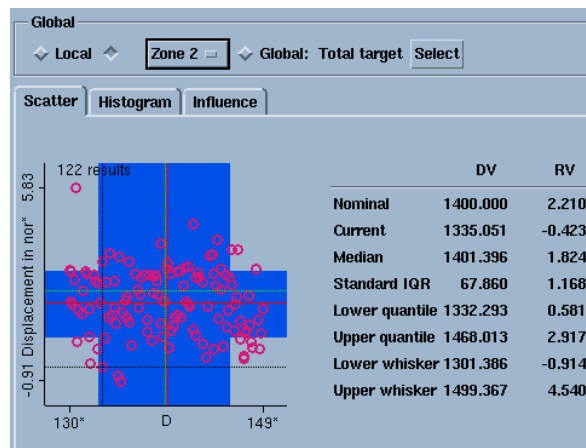


Рисунок П1.10. График функции чувствительности пружинения от диаметра заготовки D для зоны 2.

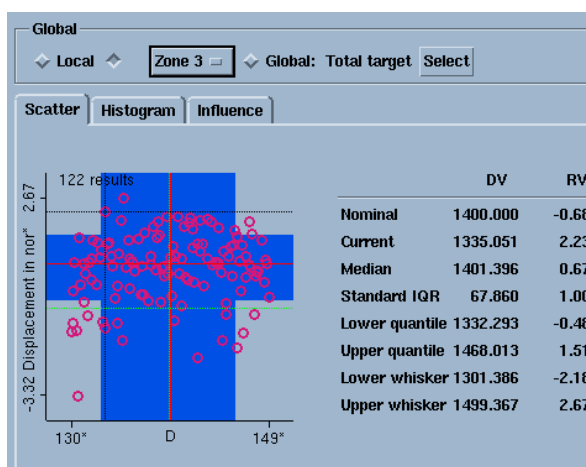


Рисунок П1.11. График функции чувствительности пружинения от диаметра заготовки D для зоны 3.

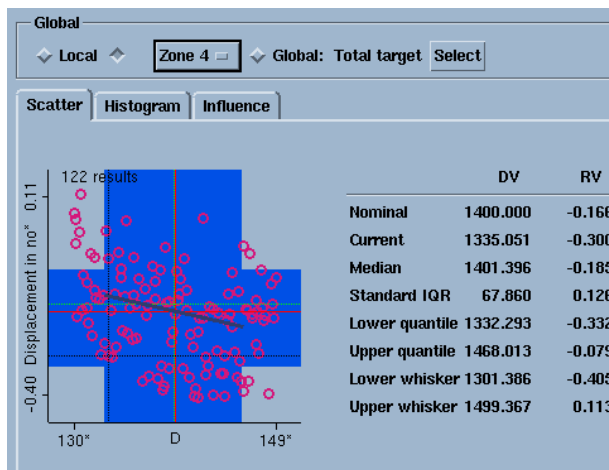


Рисунок П1.12. График функции чувствительности пружинения от диаметра заготовки D для зоны 4.

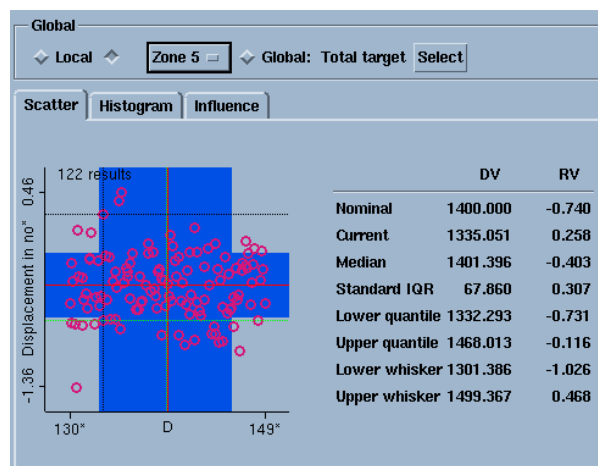


Рисунок П1.13. График функции чувствительности пружинения от диаметра заготовки D для зоны 5.

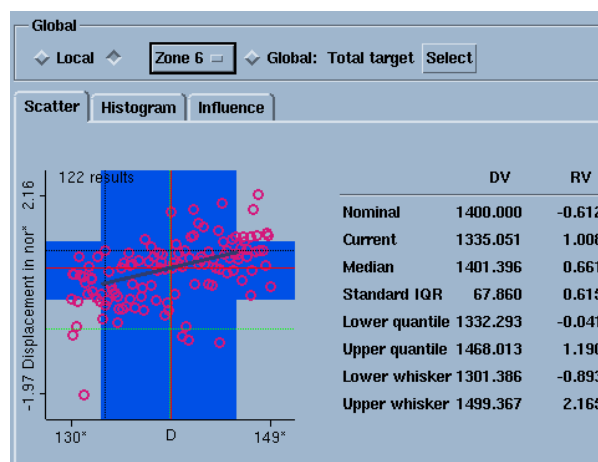


Рисунок П1.14. График функции чувствительности пружинения от диаметра заготовки D для зоны 6.

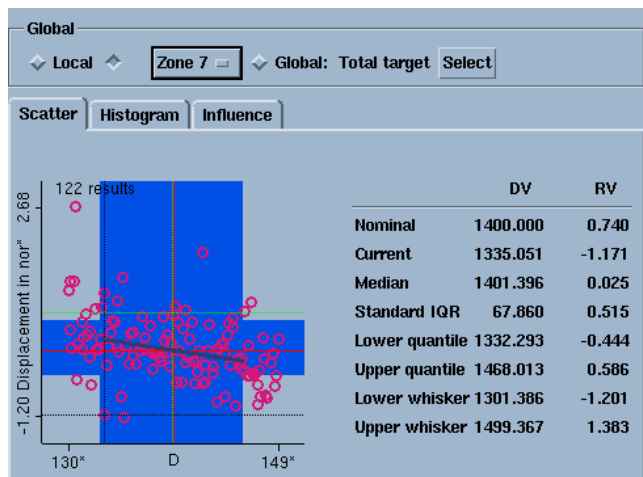


Рисунок П1.15. График функции чувствительности пружинения от диаметра заготовки D для зоны 7.

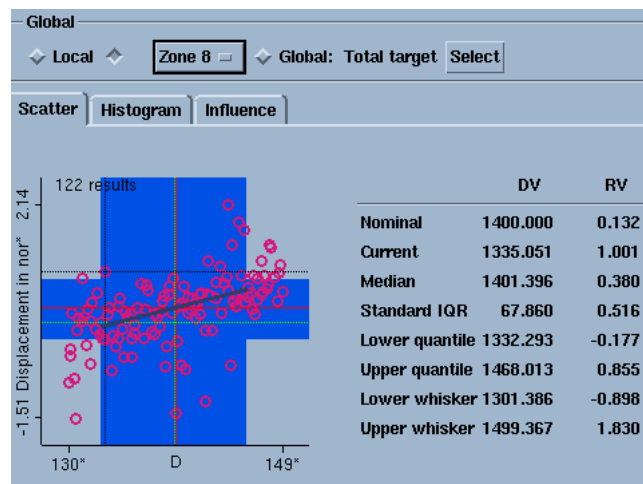


Рисунок П1.16. График функции чувствительности пружинения от диаметра заготовки D для зоны 8.

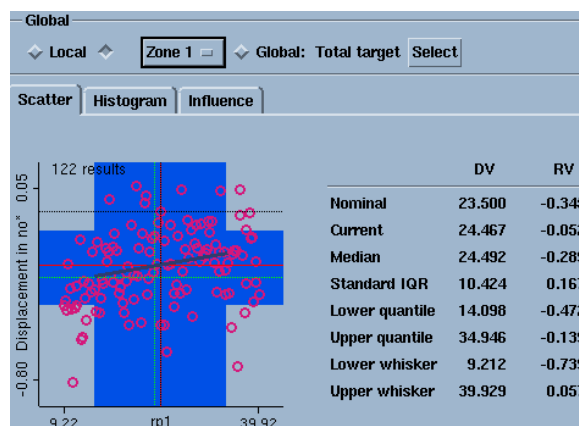


Рисунок П1.17. График функции чувствительности пружинения от радиуса матрицы rp1 для зоны 1

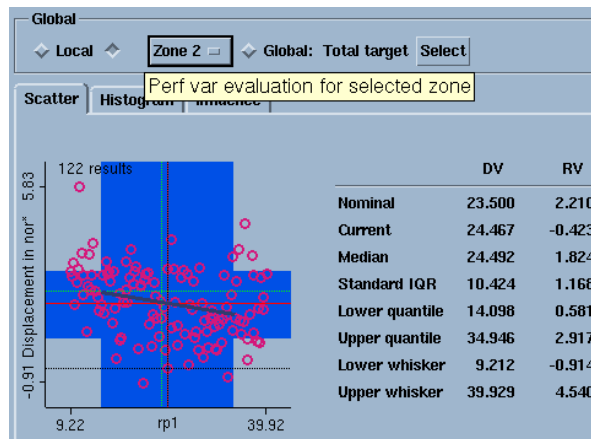


Рисунок П1.18. График функции чувствительности пружинения от радиуса матрицы rp1 для зоны 2.

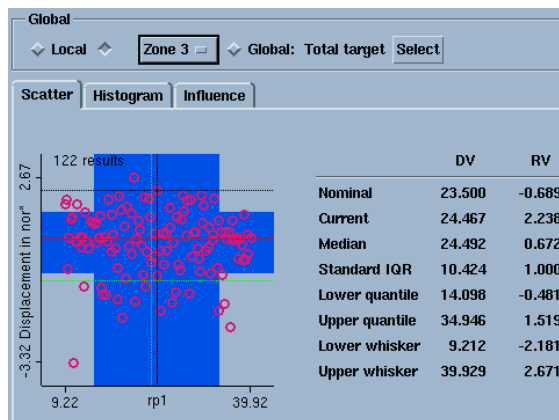


Рисунок П1.19. График функции чувствительности пружинения от радиуса матрицы rp1 для зоны 3.

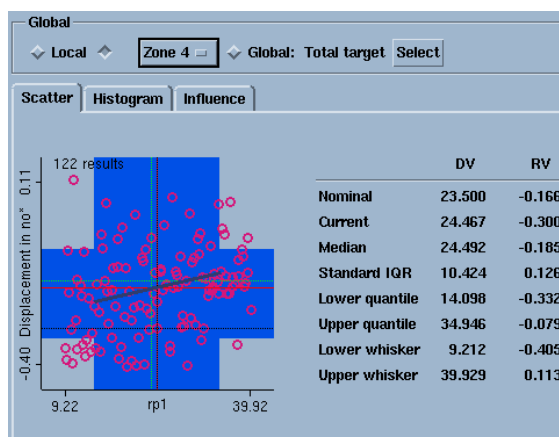


Рисунок П1.20. График функции чувствительности пружинения от радиуса матрицы rp1 для зоны 4.

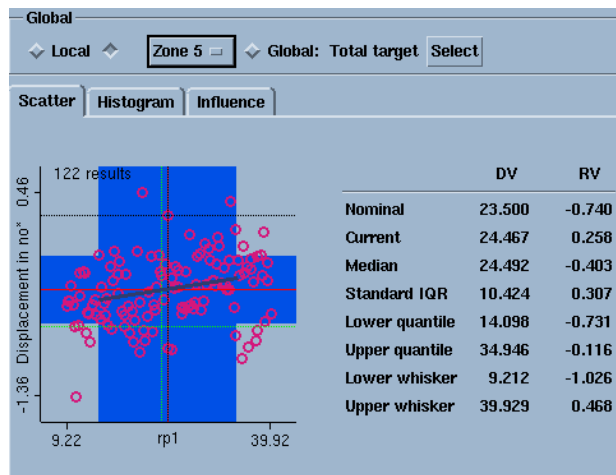


Рисунок П1.21. График функции чувствительности пружинения от радиуса матрицы rp1 для зоны 5.

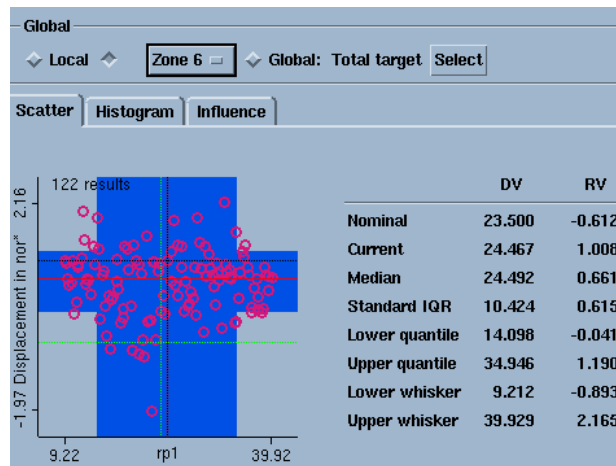


Рисунок П1.22. График функции чувствительности пружинения от радиуса матрицы rp1 для зоны 6.

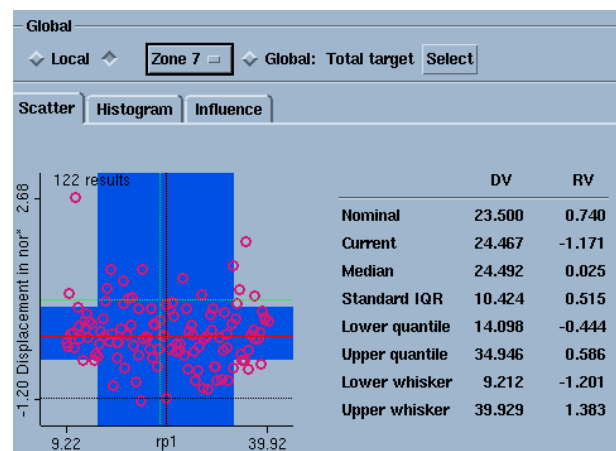


Рисунок П1.23. График функции чувствительности пружинения от радиуса матрицы rp1 для зоны 7.

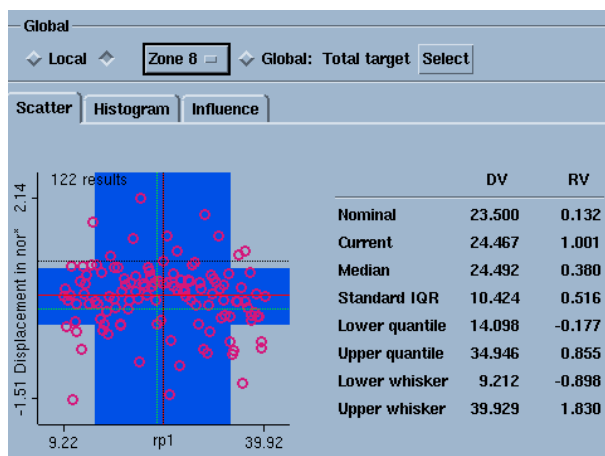


Рисунок П1.24. График функции чувствительности пружинения от радиуса матрицы rp1 для зоны

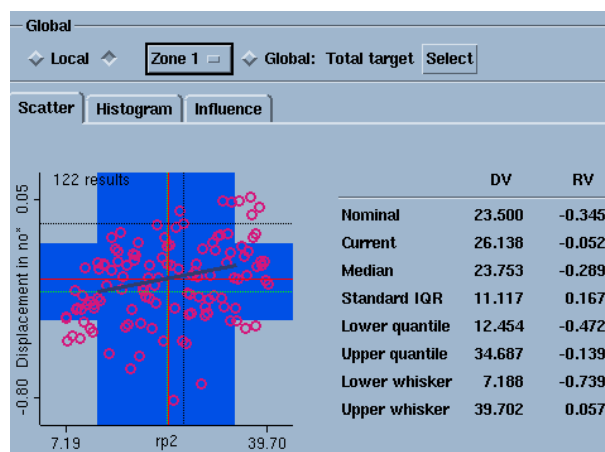


Рисунок П1.25. График функции чувствительности пружинения от радиуса матрицы rp2 для зоны 1.

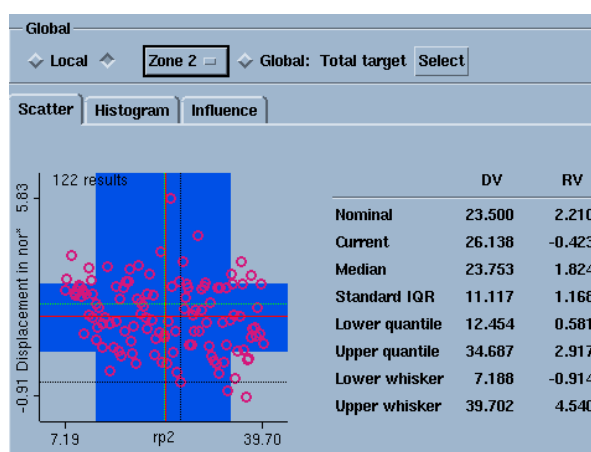


Рисунок П1.26. График функции чувствительности пружинения от радиуса матрицы rp2 для зоны 2.

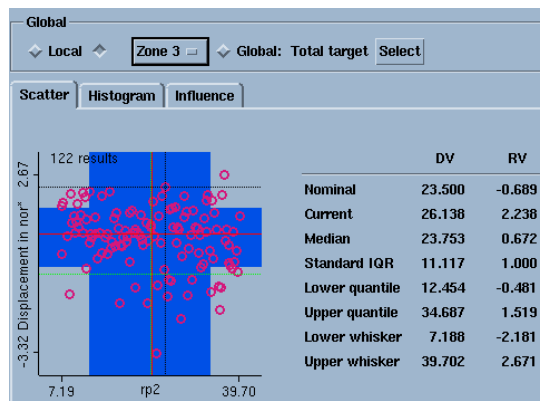


Рисунок П1.27. График функции чувствительности пружинения от радиуса матрицы $rp2$ для зоны 3.

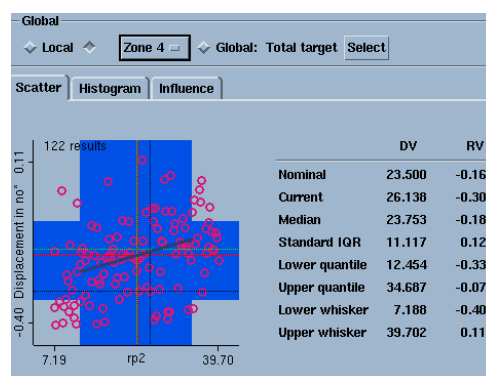


Рисунок П1.28. График функции чувствительности пружинения от радиуса матрицы $rp2$ для зоны 4.

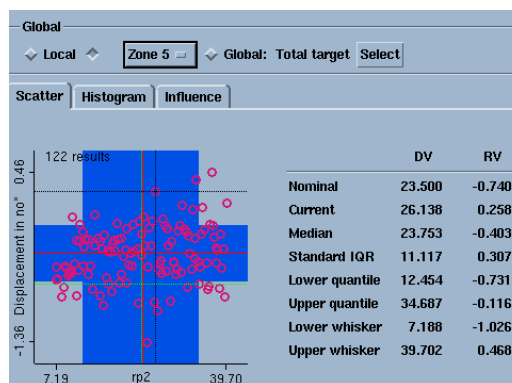


Рисунок П1.29. График функции чувствительности пружинения от радиуса матрицы $rp2$ для зоны 5.

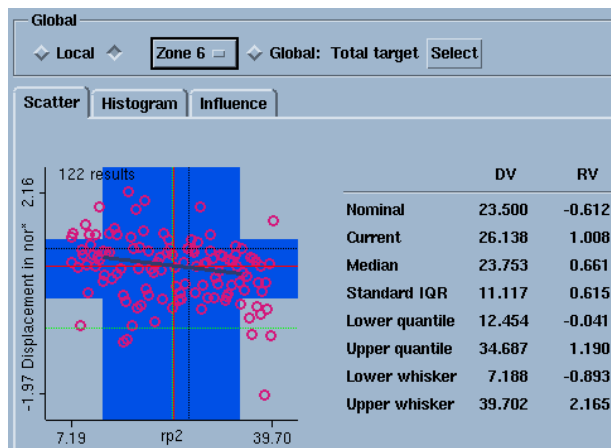


Рисунок П1.30. График функции чувствительности пружинения от радиуса матрицы rp2 для зоны 6.

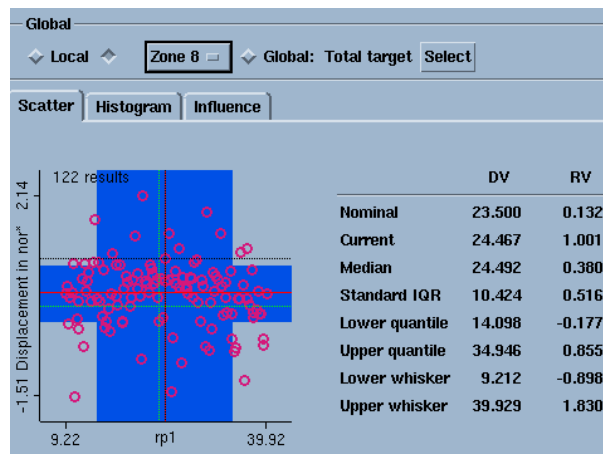


Рисунок П1.31. График функции чувствительности пружинения от радиуса матрицы rp2 для зоны 7.

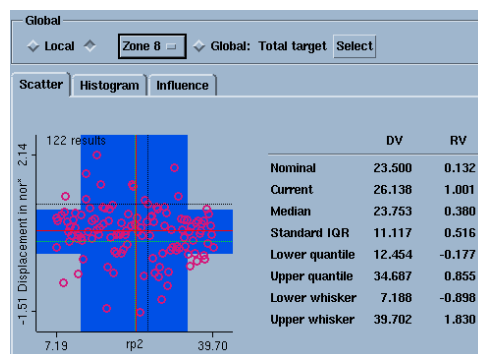


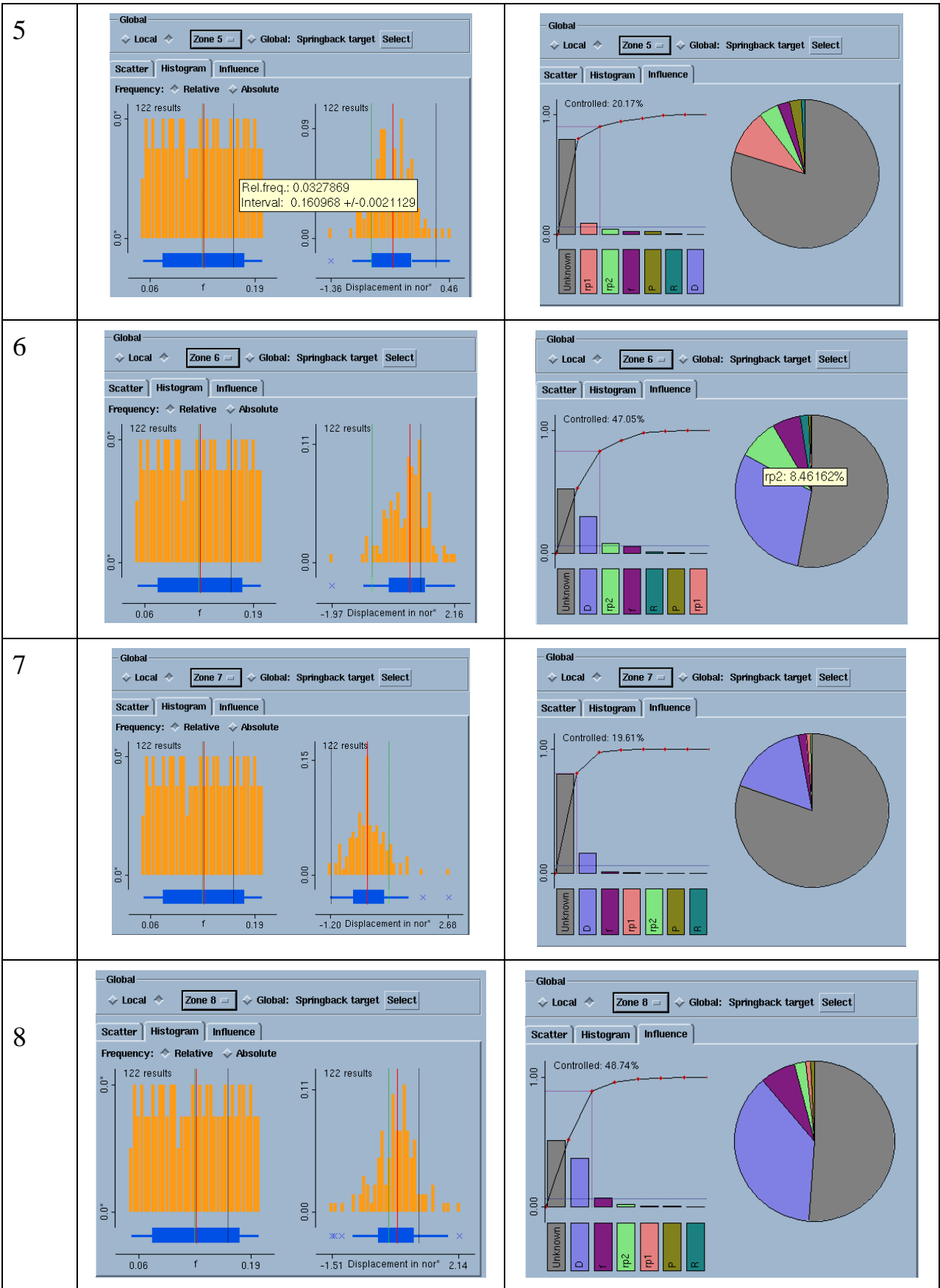
Рисунок П1.32. График функции чувствительности пружинения от радиуса матрицы rp2 для зоны 8.

Таблица П1.1.

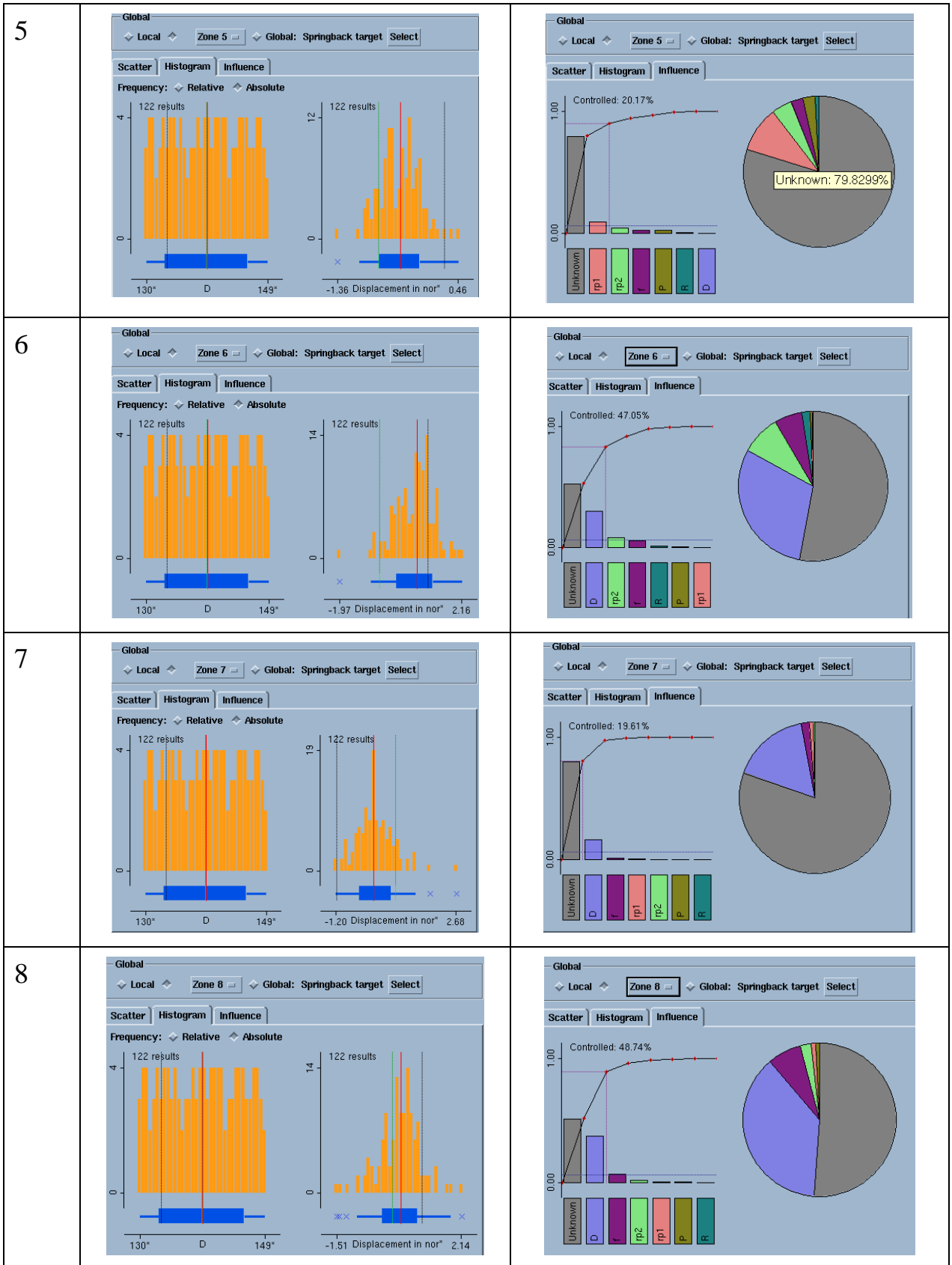
Зона	Гистограммы	График Парето
------	-------------	---------------

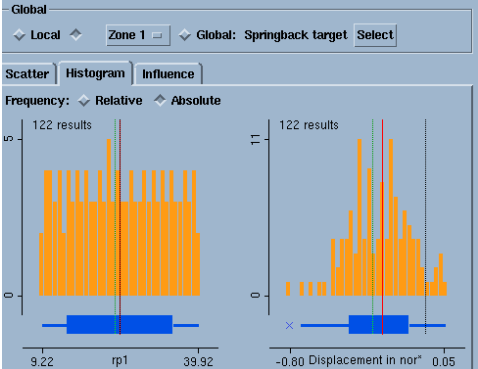
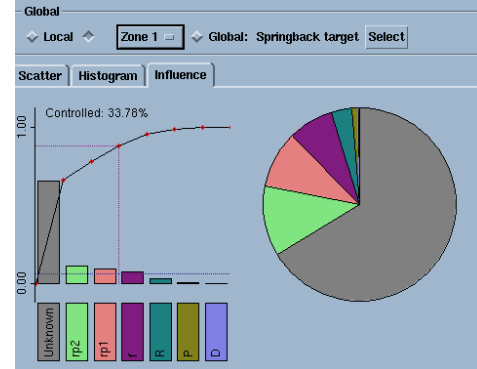
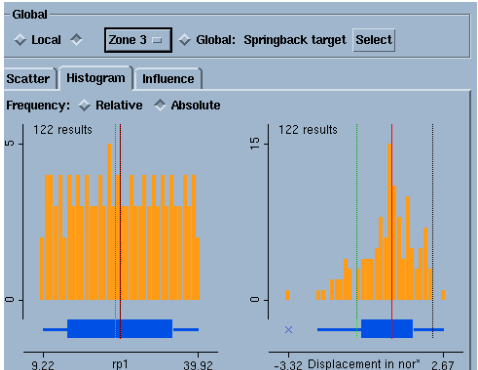
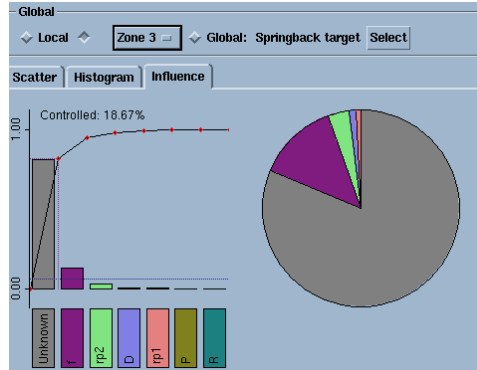
Гистограммы распределения f , ΔS и соответствующие графики Парето

1		
2		
3		
4		



Зона	Гистограммы	График Парето
Гистограммы распределения D, ΔS и соответствующие графики Парето		
1		
2		
3		
4		



Зона	Гистограммы	График Парето
Гистограммы распределения $rp1$, ΔS и соответствующие графики Парето		
1	 <p>Global Local Zone 1 Global: Springback target Select</p> <p>Scatter Histogram Influence</p> <p>Frequency: Relative Absolute</p> <p>122 results</p> <p>122 results</p> <p>9.22 rp1 39.92</p> <p>-0.80 Displacement in nor* 0.05</p>	 <p>Global Local Zone 1 Global: Springback target Select</p> <p>Scatter Histogram Influence</p> <p>Controlled: 33.78%</p> <p>Unknown rp2 rp1 r P D</p>
2	 <p>Global Local Global: Springback target Select</p> <p>Scatter Histogram Influence</p> <p>Frequency: Relative Absolute</p> <p>122 results</p> <p>122 results</p> <p>9.22 rp1 39.92</p> <p>-0.91 Displacement in nor* 5.83</p>	 <p>Global Local Zone 2 Global: Springback target Select</p> <p>Scatter Histogram Influence</p> <p>Controlled: 23.54%</p> <p>Unknown rp1 rp2 r P D</p>
3	 <p>Global Local Zone 3 Global: Springback target Select</p> <p>Scatter Histogram Influence</p> <p>Frequency: Relative Absolute</p> <p>122 results</p> <p>122 results</p> <p>9.22 rp1 39.92</p> <p>-3.32 Displacement in nor* 2.67</p>	 <p>Global Local Zone 3 Global: Springback target Select</p> <p>Scatter Histogram Influence</p> <p>Controlled: 18.67%</p> <p>Unknown r D rp1 P R</p>
4	 <p>Global Local Zone 4 Global: Springback target Select</p> <p>Scatter Histogram Influence</p> <p>Frequency: Relative Absolute</p> <p>122 results</p> <p>122 results</p> <p>9.22 rp1 39.92</p> <p>-0.40 Displacement in no* 0.11</p>	 <p>Global Local Zone 4 Global: Springback target Select</p> <p>Scatter Histogram Influence</p> <p>Controlled: 68.35%</p> <p>Unknown r rp2 D rp1 P R</p>

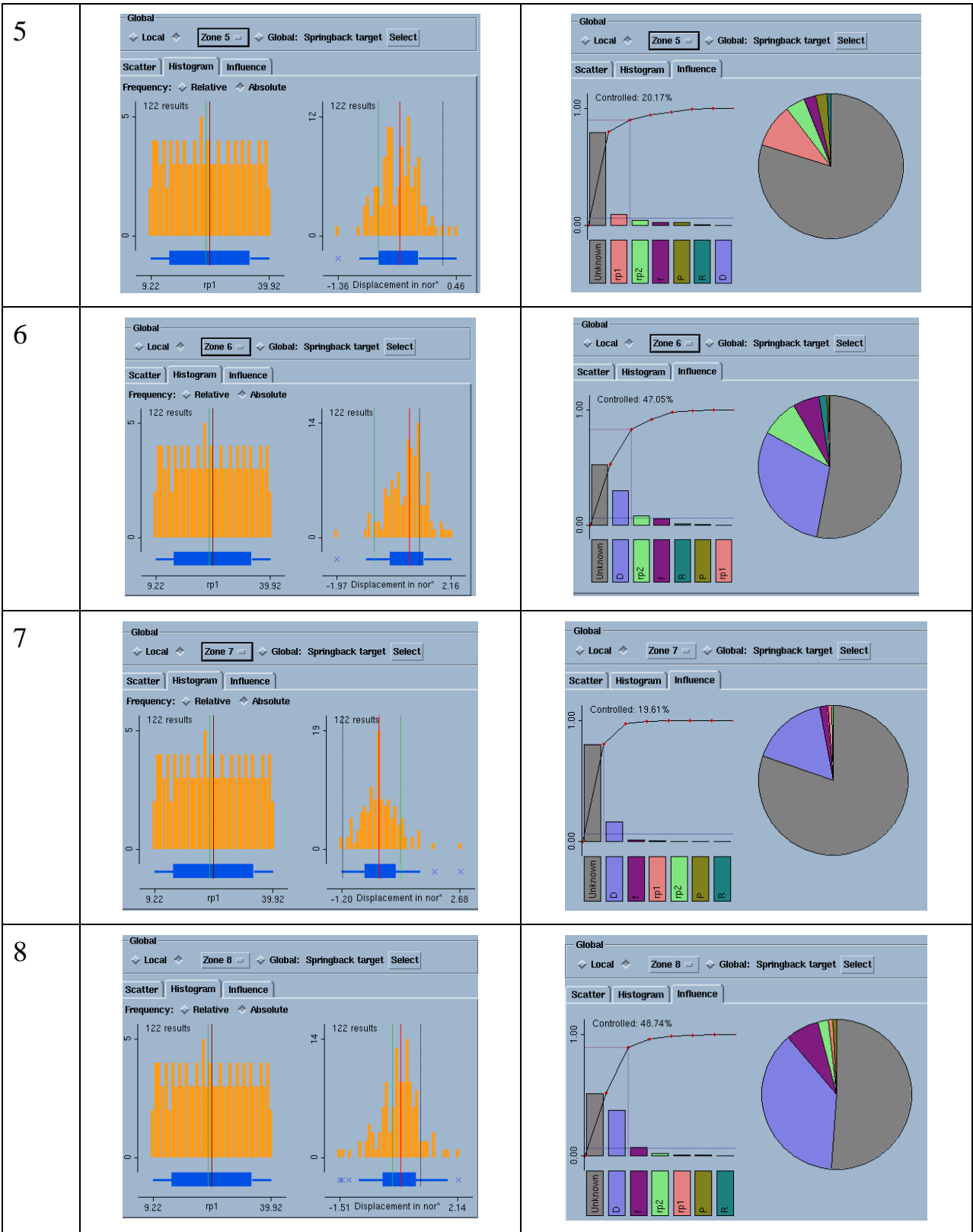
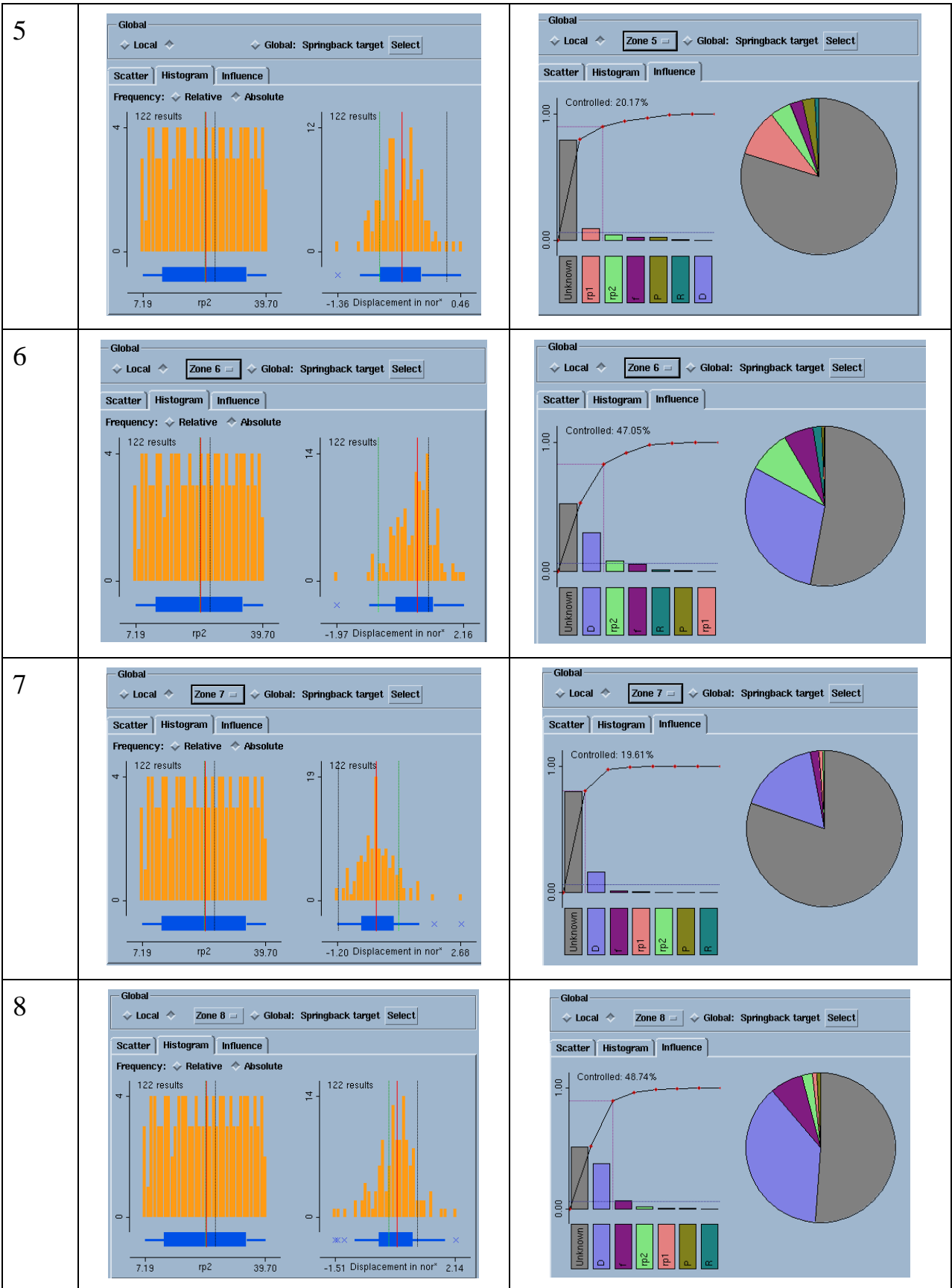


Таблица П1.4.

Зона	Гистограммы	График Парето
Гистограммы распределения $rp2$, ΔS и соответствующие графики Парето		
1	<p>Global Local Zone 1 Global: Springback target Select</p> <p>Scatter Histogram Influence</p> <p>Frequency: Relative Absolute</p> <p>122 results</p> <p>7.19 rp2 39.70</p> <p>-0.80 Displacement in nor* 0.05</p>	<p>Global Local Zone 1 Global: Springback target Select</p> <p>Scatter Histogram Influence</p> <p>Controlled: 33.78%</p> <p>Unknown rp2 rp1 L R P D</p>
2	<p>Global Local Zone 2 Global: Springback target Select</p> <p>Scatter Histogram Influence</p> <p>Frequency: Relative Absolute</p> <p>122 results</p> <p>7.19 rp2 39.70</p> <p>-0.91 Displacement in nor* 5.63</p>	<p>Global Local Zone 2 Global: Springback target Select</p> <p>Scatter Histogram Influence</p> <p>Controlled: 23.54%</p> <p>Unknown rp1 rp2 L R P D</p>
3	<p>Global Local Zone 3 Global: Springback target Select</p> <p>Scatter Histogram Influence</p> <p>Frequency: Relative Absolute</p> <p>122 results</p> <p>7.19 rp2 39.70</p> <p>-3.32 Displacement in nor* 2.67</p>	<p>Global Local Zone 3 Global: Springback target Select</p> <p>Scatter Histogram Influence</p> <p>Controlled: 18.67%</p> <p>Unknown L rp2 D rp1 R P</p>
4	<p>Global Local Global: Springback target Select</p> <p>Scatter Histogram Influence</p> <p>Frequency: Relative Absolute</p> <p>122 results</p> <p>7.19 rp2 39.70</p> <p>-0.40 Displacement in nor* 0.11</p>	<p>Global Local Zone 4 Global: Springback target Select</p> <p>Scatter Histogram Influence</p> <p>Controlled: 68.35%</p> <p>Unknown L rp2 D rp1 R P</p>



Приложение 2

Графики регрессионных зависимостей чувствительности и диаграммы Паретто для 4-х зон и вариаций параметров вытяжки с бортиком

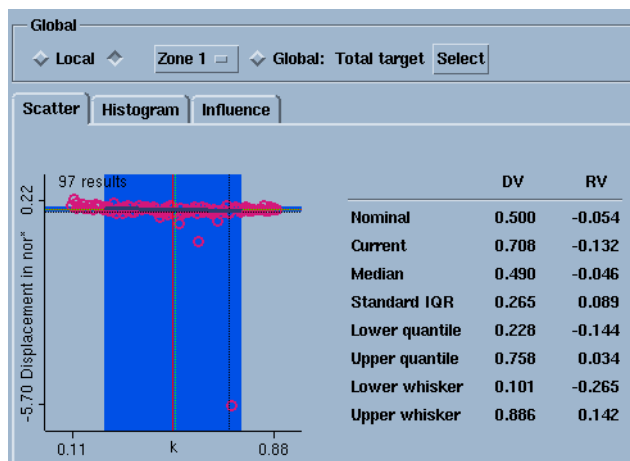


Рисунок П2.1. График функции чувствительности пружинения от натяжения k для зоны 1.

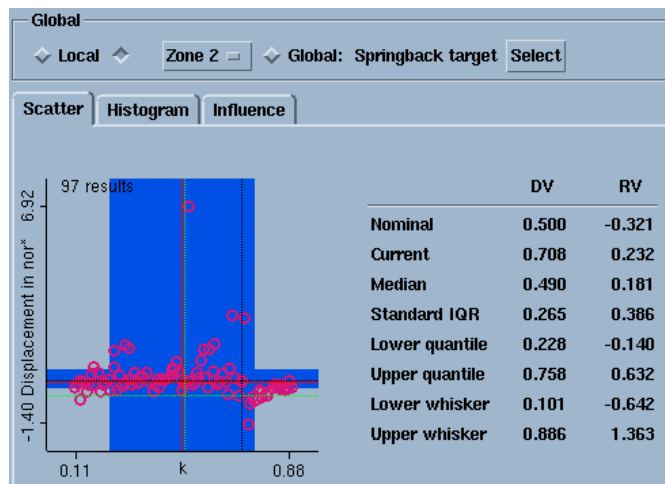


Рисунок П2.2. График функции чувствительности пружинения от натяжения k для зоны 2.

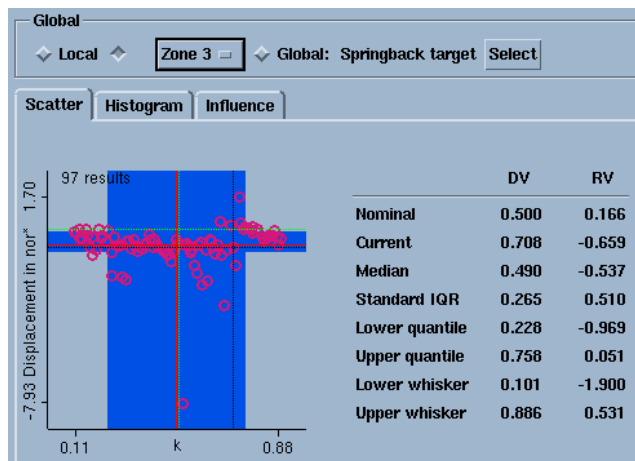


Рисунок П2.3. График функции чувствительности пружинения от натяжения k для зоны 3.

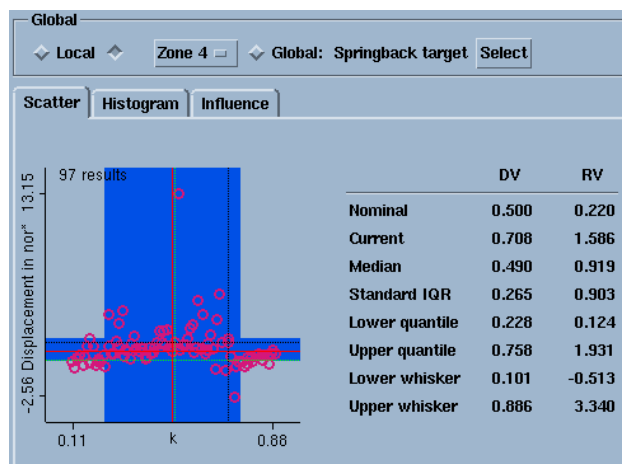


Рисунок П2.4. График функции чувствительности пружинения от натяжения k для зоны 4.

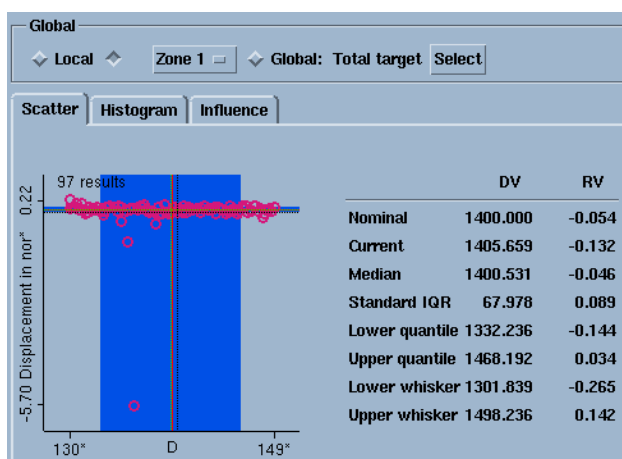


Рисунок П2.5. График функции чувствительности пружинения от диаметра заготовки D для зоны 1.

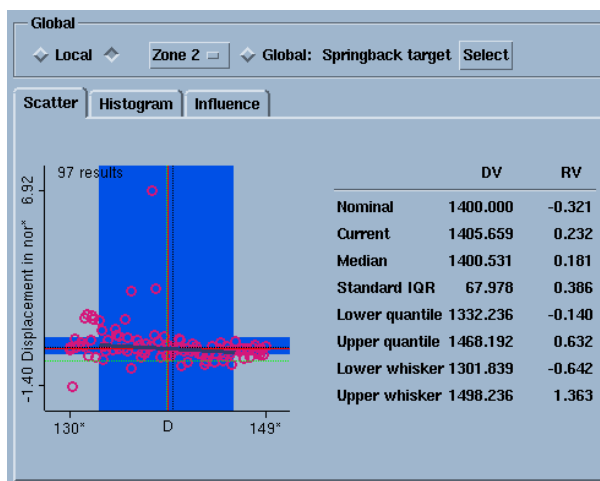


Рисунок П2.6. График функции чувствительности пружинения от диаметра заготовки D для зоны 2.

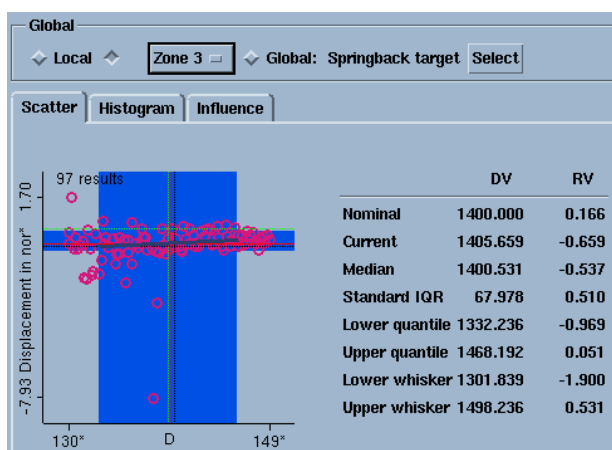


Рисунок П2.7. График функции чувствительности пружинения от диаметра заготовки D для зоны 3.

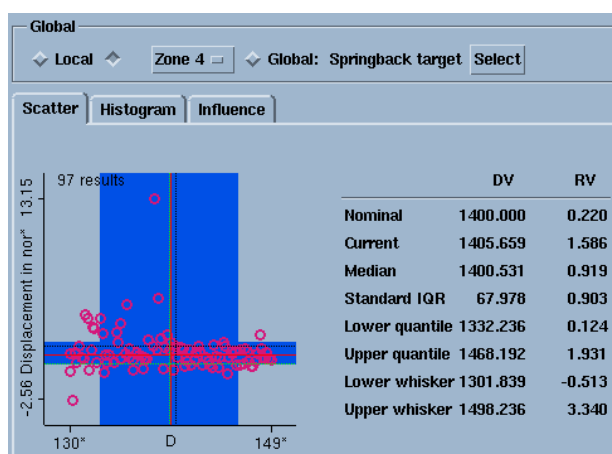


Рисунок П2.8. График функции чувствительности пружинения от диаметра заготовки D для зоны 4.

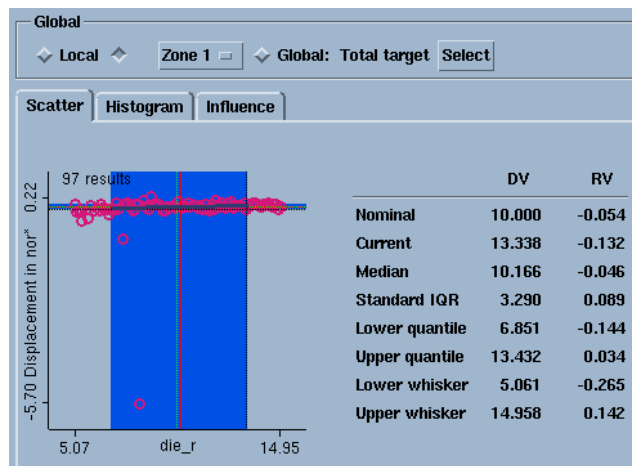


Рисунок П2.9. График функции чувствительности пружинения от радиуса матрицы die_r для зоны 1.

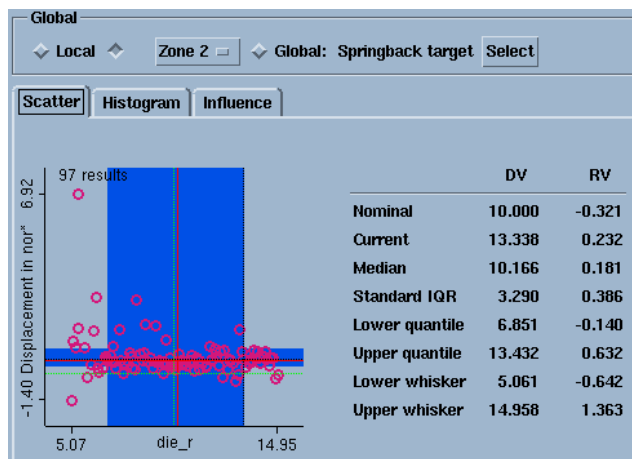


Рисунок П2.10. График функции чувствительности пружинения от радиуса матрицы die_r для зоны 2.

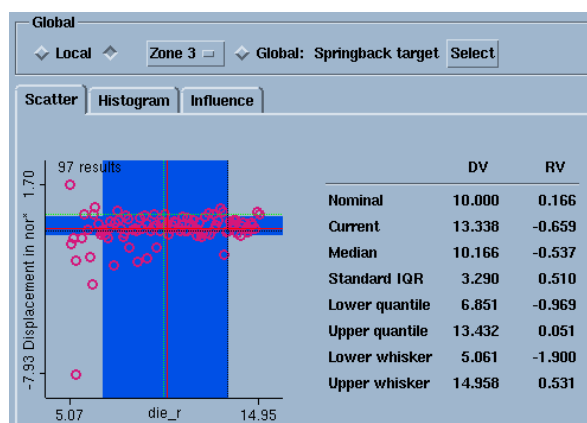


Рисунок П2.11. График функции чувствительности пружинения от радиуса матрицы die_r для зоны 3.

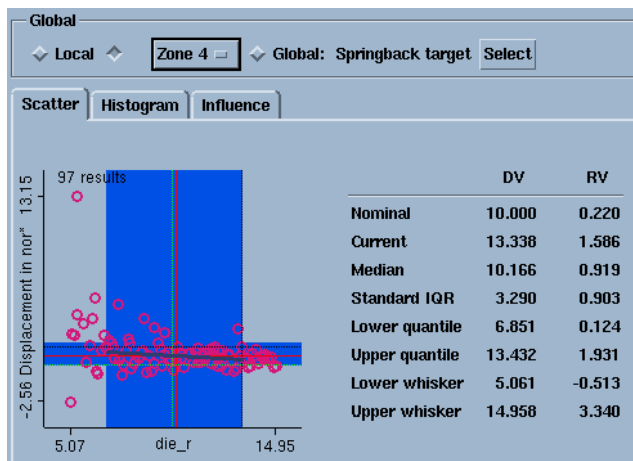


Рисунок П2.12. График функции чувствительности пружинения от радиуса матрицы die_r для зоны 4.

Таблица П2.1.

Зона	Гистограммы	График Парето
Гистограммы распределения k, ΔS и соответствующие графики Парето		
1		
2		

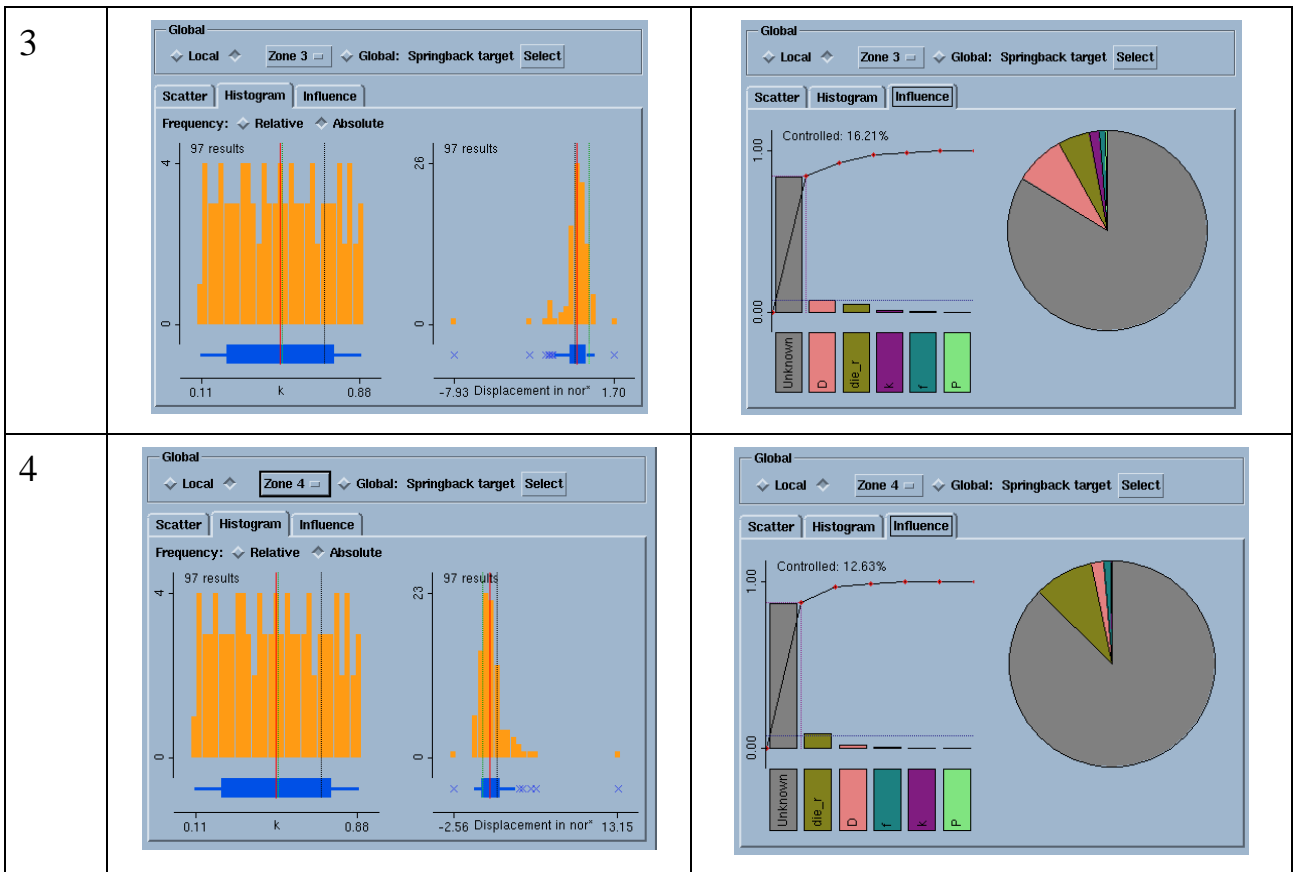
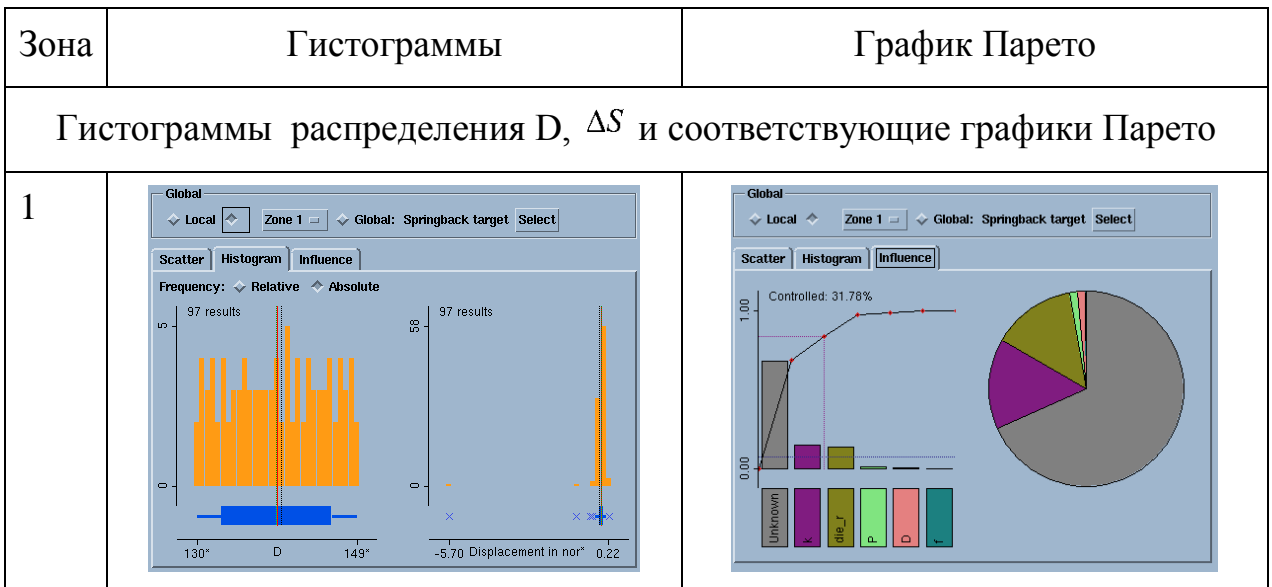


Таблица П2.2.



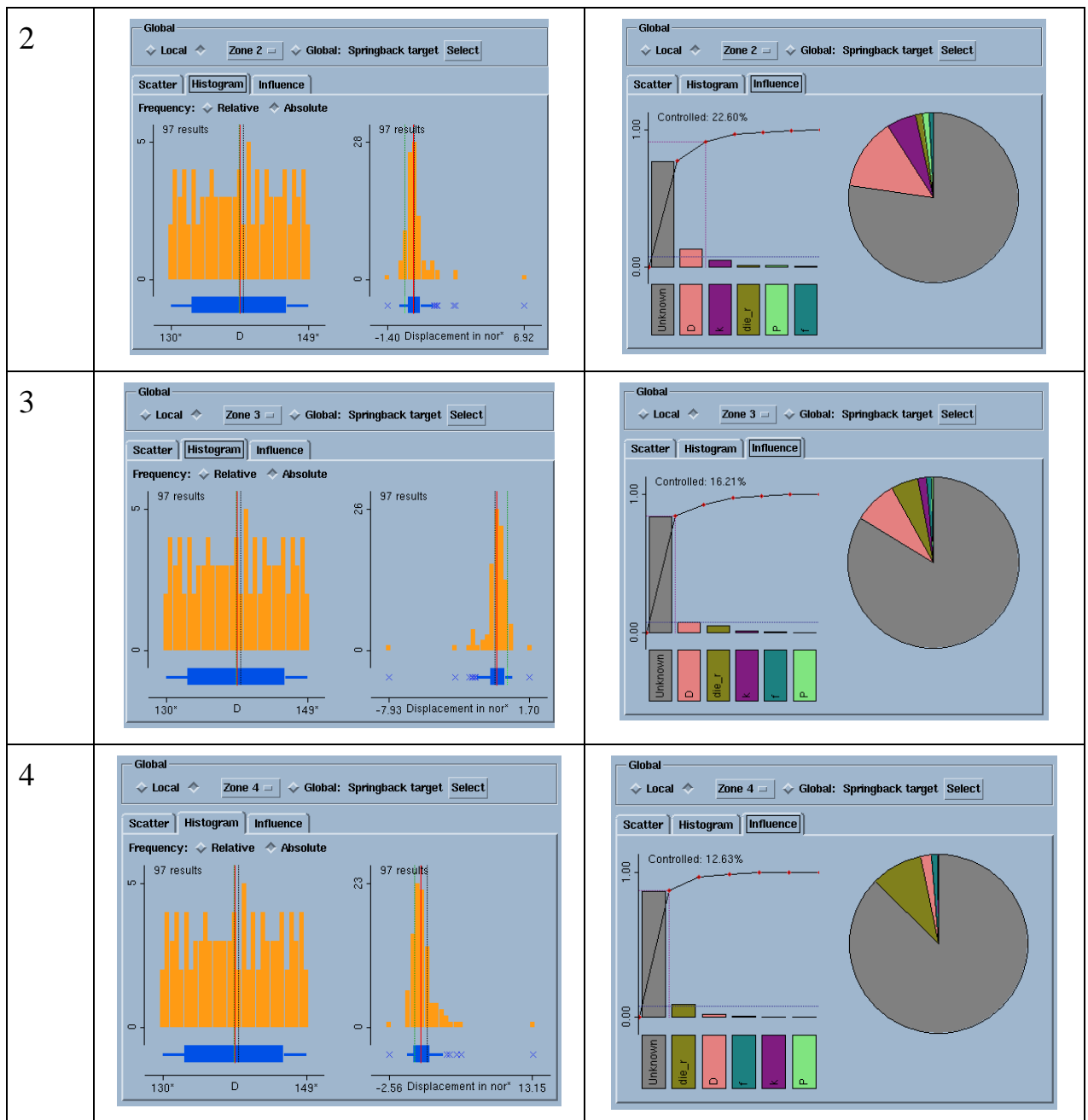


Таблица П2.3.

Зона	Гистограммы	График Парето
Гистограммы распределения die_r, ΔS и соответствующие графики Парето		

