

Содержание

Введение	4
1. Анализ существующих методов оптимального проектирования технологических процессов листовой штамповки на основе систем инженерного анализа (CAE)	8
1.1. Оптимизация процессов листовой штамповки деталей автомобиля	8
1.2. Математические методы оптимизации процессов листовой штамповки	13
1.3. Анализ влияния различных параметров процесса штамповки на критерии оптимальности получения изделий в системах CAE	17
1.4. Выводы.....	20
2. Разработка критериев оптимальности и ограничений для проектирования процессов листовой штамповки в CAE.....	22
2.1. Стратегия выбора критерия оптимальности	22
2.2. Выбор параметров ограничения размеров заготовки	26
2.3. Определение параметров ограничения размеров штамповой оснастки	31
2.4. Определение величин управления технологическим процессом	34
2.5. Выбор параметров варьирования показателей материалов	36
2.6. Выводы.....	39
3. Разработка методики процесса оптимизации процессов листовой штамповки на основе численных экспериментов в программе CAE AutoForm-Sigma ^{plus}	40
3.1. Оценка процесса для базовой технологии штамповки в AutoForm-Sigma.....	41
3.2. Определение чувствительности процесса штамповки к назначенным переменным ограничениям	46
3.3. Редуцирование числа ограничений на основе критерия чувствительности процесса.....	58
3.4. Разработка алгоритма оптимизации в AutoForm-Sigma ^{plus}	62
3.5. Выводы.....	63
4. Разработка методики оптимизации процесса листовой штамповки на стадии концептуального проектирования технологии изготовления автомобиля	64

4.1. Выбор типового представителя класса изделий кузова автомобиля	64
4.2. Разработка целевой функции и ограничений для типовой детали	68
4.3. Разработка методики подготовки данных в препроцессоре AutoForm-Sigma ^{plus}	72
4.4 Анализ полученных результатов в постпроцессоре AutoForm-Sigma ^{plus}	78
5. Заключение	Ошибка! Закладка не определена.
Список используемой литературы	83

Введение

Требования сокращения сроков проектирования, требования оставаться конкурентоспособными в российской среде, которая постоянно насыщается новыми, причем самыми современными автомобилями, приводит к тому, что меняется сама структура инженерной работы. Сейчас все в большей степени уделяется внимание ранним стадиям проектирования, где отработка автомобиля на виртуальных моделях позволяет существенно сократить сроки и материальные затраты¹.

В настоящее время существует множество методик, позволяющих автоматизировать проектирование технологических процессов (ТП) листовой штамповки. При этом в существующих методиках уделяется недостаточное внимание определению чувствительности процесса в связи со сложностью проведения численных экспериментов и формализации назначения целевой функции с возможными переменными ограничения.

Во многих случаях неоптимизированный ТП может привести к:

- увеличению сроков наладки штампов
- увеличению затрат на наладку штампов
- увеличению процента конечного брака в производстве
- перепроектированию технологии штамповки и перепроектированию штампов, переносу сроков запуска автомобиля в массовое производство на несколько месяцев.

Анализ CAE систем, представленных на международном рынке, показал, что в современных САПР имеются достаточно мощные средства для решения задач по оптимизации ТП. При этом используя данные программные продукты решают также задачи синтеза ограничивающих параметров штамповки, различных критериев технологических процессов и решают данную задачу системно, сокращая при это время на проектирование и затраты на капитальные вложения при проведении экспериментов на реальных моделях.

¹ Е.Н. Шмелев «Высокой мысли пламень. Ч.3», НТЦ, ВАЗ // Тольятти: 2008. – С. 803

Таким образом, задача синтеза входных параметров и их варьирование позволяет выполнить структурную и наиболее полную оптимизацию ТП на ранней стадии проектирования, провести анализ большого количества численных экспериментов, что приведет к сокращению как материальных, так и трудовых затрат, а также сроков внедрения оснастки в производстве.

Целью магистерской работы является разработка методики проектирования техпроцессов листовой штамповки изделий автомобиля в системе САЕ на ранней стадии проектирования.

Научной новизной является приведение многокритериальной задачи к однокритериальной, назначение проектных переменных и ограничений для типового класса деталей типа «Коробка».

Задачами работы являются:

1. разработка критериев оптимальности и ограничений для проектирования процессов листовой штамповки в САЕ,
2. разработка методики решения задач в AutoForm,
3. проведение статистического анализа на основе численных экспериментов с учетом чувствительности процесса.

Практическая ценность работы заключается в том, что разработанная методика при внедрении в производство позволит повысить эффективность разработки технологических процессов получения деталей за счёт возможности прогнозирования поведения деталей в процессе технологического процесса. Разработанные алгоритмы и программы обеспечивают технолога необходимыми прикладными инструментами для назначения технологических условий обработки типовых деталей.

Диссертация выполнена на кафедре «Компьютерные технологии и обработка материалов давлением» Тольяттинского государственного университета и состоит из введения, четырёх основных глав и общих выводов.

В первой главе проводится анализ существующих методов оптимального проектирования технологических процессов листовой штамповки на основе систем инженерного анализа (САЕ). Рассматриваются теоретические основы по

оптимизации процессов листовой штамповки деталей автомобиля. Определяются задачи по оптимизации технологического процесса. Анализируются существующие математические методы оптимизации процессов листовой штамповки. Приводится современная классификация методов оптимизации процессов ЛШ. Сформулированы требования искомого параметра оптимизации. Анализируются влияния различных параметров процесса штамповки на критерии оптимальности получения изделий в системах CAE.

Вторая глава посвящена разработке критериев оптимальности и ограничений для проектирования процессов листовой штамповки в CAE. Разработана стратегия выбора критерия оптимальности. Определен порядок выбора параметров ограничения размеров заготовки, штамповой оснастки, варьирования показателей материалов и величин управления технологическим процессом.

В третьей главе приведена последовательность разработки методики процесса оптимизации процессов листовой штамповки на основе численных экспериментов в программе CAE AutoForm Sigma. Проведены численные эксперименты по статистической оценке процесса штамповки в AutoForm Sigma. Разработан оптимальный технологический процесс изготовления детали. Определены критерии чувствительности процесса штамповки к назначенным переменным ограничениям. Произведено редуцирование числа ограничений на основе критерия чувствительности процесса. Разработан алгоритм оптимизации в AutoForm Sigma.

В четвертой главе разработана методика оптимизации процесса листовой штамповки на стадии концептуального проектирования технологии изготовления автомобиля. Проведена классификация свойств типового представителя изделия автомобиля типа «Коробка». Разработана целевая функция оптимизации и ограничений для данной типовой детали. Разработана методика подготовки данных в препроцессоре AutoForm Sigma и анализ результатов в постпроцессоре AutoForm Sigma.

Материалы представлены в виде методических и практических рекомендаций по построению технологического процесса и его дальнейшей оптимизации в системе CAE. Представлены математические модели симуляций штампуемости и переходов в программе AutoForm. Разработанная методика

успешно внедрена для проектирования оптимальных технологических процессов листовой штамповки на ОАО «АВТОВАЗ».

На основе настоящей магистерской диссертации докладывались две работы на научно-практических конференциях «Дни науки ТГУ» (Тольятти, ТГУ, 2015-2016 гг.)

1. Анализ существующих методов оптимального проектирования технологических процессов листовой штамповки на основе систем инженерного анализа (САЕ)

1.1. Оптимизация процессов листовой штамповки деталей автомобиля

Оптимизация – выбор наилучшего варианта решения. Математическая теория оптимизации состоит из численных методов, которые позволяют находить самый лучший вариант из множества других без их полного перебора и сравнения.

Для использования результатов по оптимизации процесса на практике, необходимо сформулировать задачу на математическом языке, то есть построить математическую модель объекта оптимизации и, как следствие, определить полное описание исследуемого процесса.

Как правило, дать исчерпывающее представление системы оптимизации невозможно, так как затруднительно описать все взаимосвязи внутри системы и с внешним миром. Поэтому при построении математической модели оптимизации выделяют только те параметры, которые непосредственно влияют на оптимизируемую систему. При этом неучтенные входные параметры не должны существенно влиять на результат процесса оптимизации².

Математическая модель должна быть адекватна реальному объекту и достаточно полно его описывать. В противном случае, данные полученные при математическом проектировании процесса в САЕ могут быть как минимум никому не нужны, или их применение может даже навредить производству.

Основная задача исследования при планировании эксперимента - оптимизация, заключающаяся в нахождении совокупности варьируемых факторов, при которых выбранная целевая функция (параметр оптимизации) принимает экстремальное значение, решается оптимальным образом. При этом осуществляется минимальное число опытов, позволяющее произвести на каждом

² Лесин В.В., Лисовец Ю.П. «Основы методов оптимизации», МАИ // Москва: 1998. – с. 340

этапе надежную статистическую оценку. Даже при неполном знании механизма изучаемого процесса направленным экспериментом можно получить математическую модель, включающую наиболее значимые факторы технологического процесса независимо от их физической природы. Такая модель может быть с успехом применена для нахождения необходимых режимов работы процесса и управления им³.

Задача по оптимизации процесса, как правило, состоит из 7 этапов⁴:

1. Постановка проблемы по оптимизации процесса
2. Выбор необходимых решений по оптимизации
3. Выделение целевой функции оптимизации и множество неявных ограничений
4. Количественное определение целевой функции и неявных ограничений
5. Выбор возможных переменных проектирования
6. Определение диапазона изменения переменных проектирования
7. Определение явных ограничений

Задачу оптимизации в математическом виде можно записать так:

$$f(x) \rightarrow \min (\max), x \in U,$$

где U – допустимое множество точек, заданное ограничениями на управляемые параметры, $f(x)$ - целевая функция оптимизации.

Минимизацией (максимизацией) целевой функции понимают нахождение хотя бы одной из точек экстремума этой функции на множестве U .

Целью работы является задача по оптимизации детали «Поперечина панели задка», жизненный цикл которого представлен на рис. 1.1:

³РДМУ 109-77 «Методика выбора и оптимизации контролируемых параметров технологических процессов», Гф ВНИИНМАШ) // Москва: 1987. – с. 49

⁴J. Hu'etink, A.H. van den Boogaard, M.A. Masen «Optimisation of a deep drawing process with experimental validation» // University of Twente, 2007. – С. 5-26

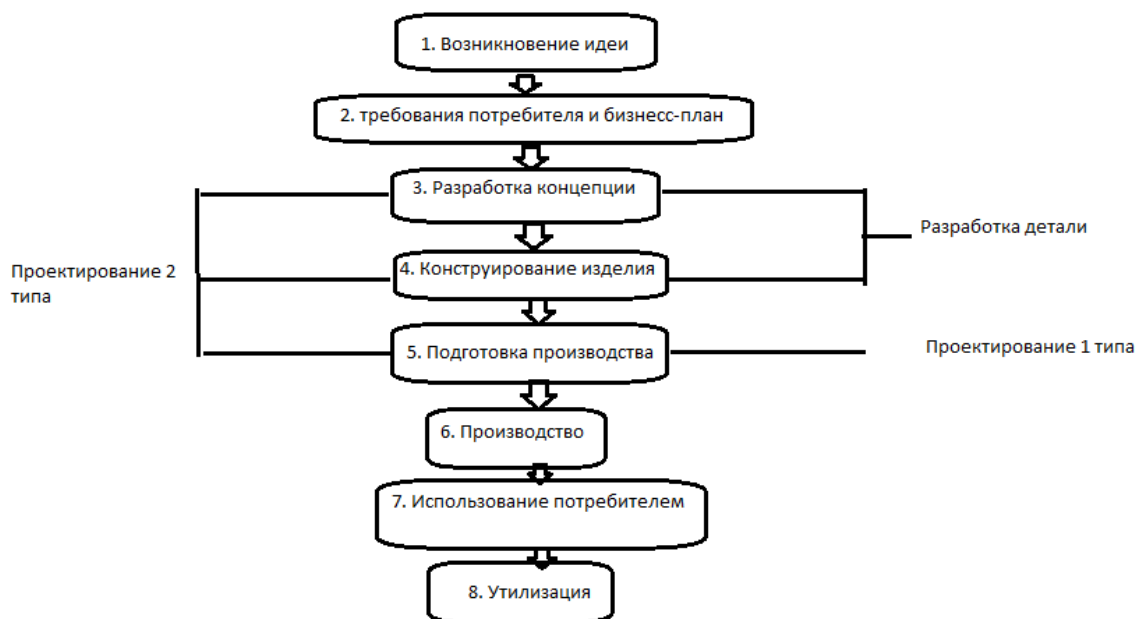


Рисунок 1.1 - Жизненный цикл изделия в ОМД

Условно процессы оптимизации от стадии внедрения детали в производстве можно разделить на 2 типа проектирования. Входными параметрами при оптимизации уже действующей технологии в производстве являются только переменные процесса штамповки детали. Это делает рациональным и экономически оправданным процесс оптимизации. К тому же, это сокращает количество переменных ограничения (рис. 1.2):

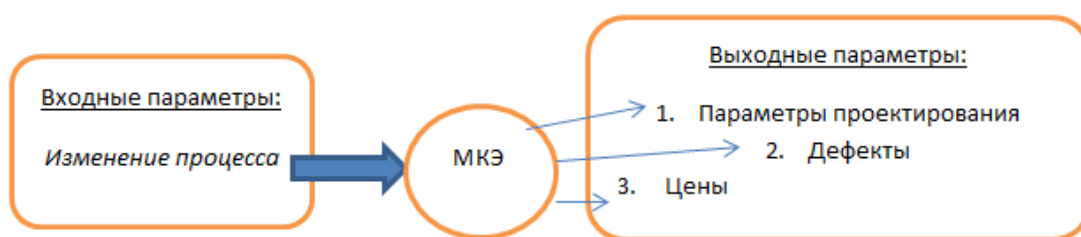


Рисунок 1.2 - Выбор параметров оптимизации

Параметры проектирования могут изменяться как заданием изменения геометрии детали (линейных размеров, радиусов на детали), так и изменением свойств материала (сорт проката, химический состав стали) (рис. 1.3):

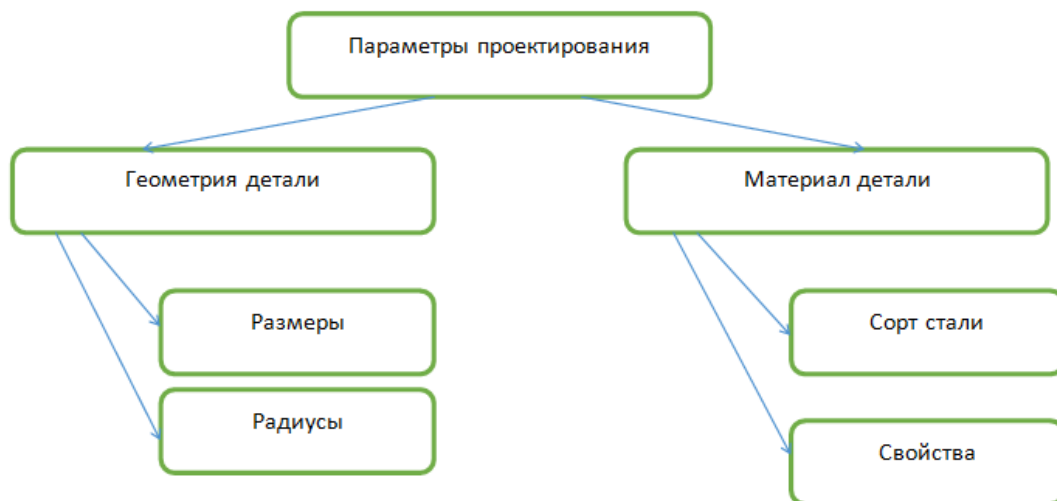


Рисунок 1.3 Параметры проектирования

Стоит отметить, что зачастую задание изменения свойства материала не рассматриваются в качестве переменных ограничения, так как не всегда имеются исходные данные по химическому составу от металлургического комбината.

Вторым возможным параметром (в данном случае, критерием оптимальности) является количественная оценка вида дефектов, принимаемых в модели оптимизации (утонения, гофры, большая деформация) (рис. 1.4):

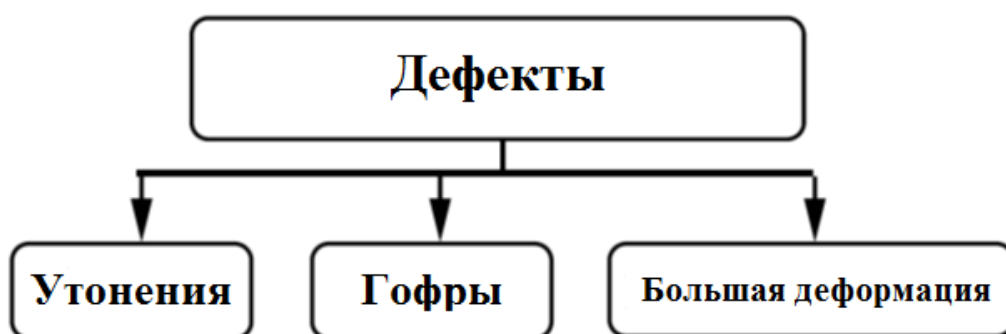


Рисунок 1.4 - Дефекты

Третьим возможным параметром является задание стоимостных параметров, таких как затраты на материал, на технологический процесс и затраты на инструменты (рис. 1.5):

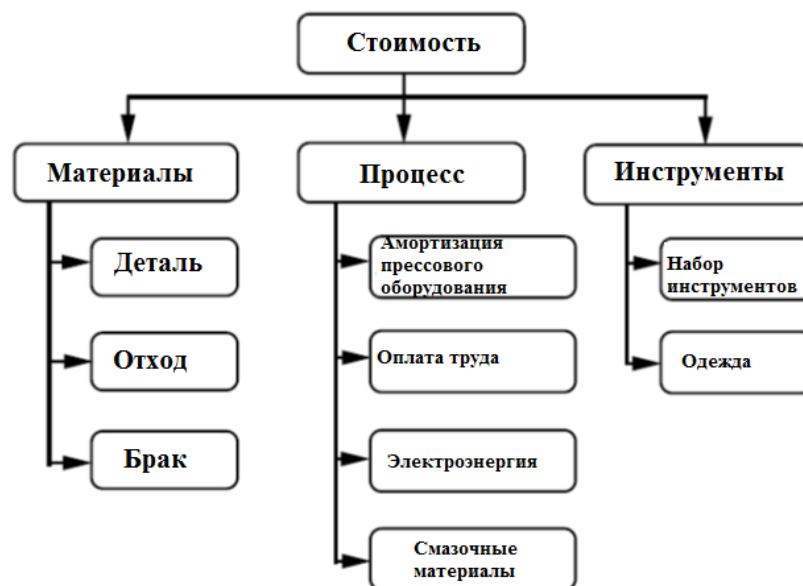


Рисунок 1.5 - Стоимость

В свою очередь стоимость материала складывается из стоимости самой детали и цены отхода. Стоимость технологического процесса состоит из амортизационной стоимости пресса, стоимости труда рабочих, стоимости электричества и смазки.

В данной задаче по оптимизации экономический критерий оптимальности не является определяющим, и рассматриваться не будет.

Делая вывод, можно сформулировать требования искомого параметра оптимизации:

1. Параметр должен измеряться при любом изменении (комбинации) режима технологического процесса, т.е. показатель параметра должен находиться опытным путем в виде некоторого числа принятых для данной величины единиц измерения;
2. Параметр должен быть статистически эффективным, т.е. измеряться с наибольшей точностью, что позволяет сократить до минимума дублирование опытов;
3. Параметр должен быть информационным, т.е. всесторонне характеризовать технологический процесс;

4. Параметр должен иметь физический смысл, т.е. должна быть возможность достижения полезных результатов определенного свойства детали, сборочной единицы в соответствующих условиях процесса;

5. Параметр должен быть однозначным, т.е. должно максимизировать либо минимизировать только одно свойство детали, сборочной единицы или процесса.

1.2. Математические методы оптимизации процессов листовой штамповки

В основе деятельности инженера-проектировщика лежит процесс проектирования, под которым в общем случае понимают выбор некоторого способа действия, направленного на составление описания, необходимого для создания в определенных условиях еще не существующего объекта с возможной оптимизацией заданных его характеристик. Внедрение вычислительной техники в инженерную деятельность потребовало строго формального подхода к процессу проектирования сложных технических объектов, к которым относятся технологические процессы в машиностроении⁵.

Различают три этапа алгоритма процессов проектирования модели оптимизации в САПР (рис. 1.6):

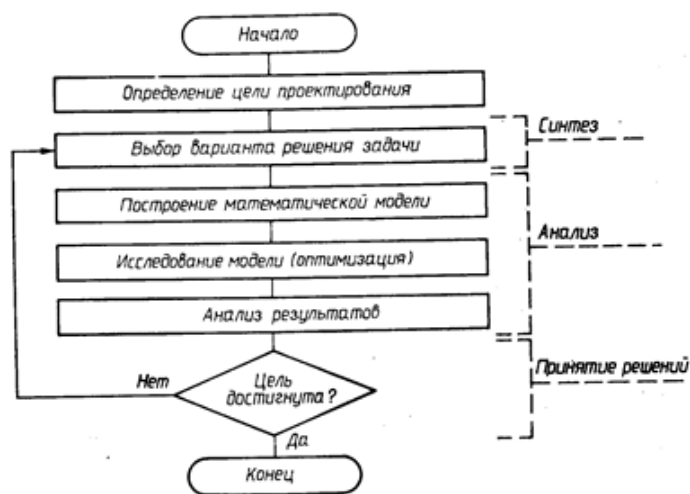


Рисунок 1.6 - Схема алгоритма проектирования в САПР

⁵П.М. Попов, Ф.Е. Ляшко «Оптимальное управление в ходе эволюционного развития процессов и систем: Учебное пособие. - Ульяновск: УлГТУ, 2000. - 148 с. - С. 106

Подход проектирования включает в себя синтез, анализ и шаг принятия решения.

После определения цели оптимизации технологического процесса необходимо сгенерировать варианты решения проектной задачи (синтез).

На следующем этапе инженерного анализа обычно намечаются конкретные варианты решения, назначаются входные данные и определяются ограничивающие параметры. Особенностью этапа является использование ПО, моделирование объекта в системах CAD/CAE, определение функциональных свойств.

Заключительным этапом является шаг принятия решения, то есть выбор единственного решения из множества возможных.

Основным этапом в вышеописанном алгоритме является этап анализа (оптимизации).

Как было показано, оптимизация (от лат. *optimum* – наилучший) – это процесс нахождения экстремума некоторой количественной величины (параметра) проектируемого объекта, представляемой в виде функции (функционала). Если эта функция характеризует положительное свойство объекта, то ищется максимальное ее значение, если отрицательное – то минимальное⁶.

Теория оптимизации в современном представлении включает совокупность фундаментальных математических результатов и численных методов, ориентированных на нахождение наилучших вариантов из множества альтернатив и позволяющих избежать полного перебора и сравнения возможных вариантов⁷.

Как уже отмечалось, процесс оптимизации направлен на проектирование более надежных и менее дорогостоящих технологических процессов и связан с синтезом и анализом множества состояний технологического процесса в CAE.

⁶Попов П.М., Попов С.П. «Верификационные методы анализа оптимального управления процессами и системами» - Ульяновск: УлГТУ, 2001.- С. 72

⁷П.М. Попов, Ф.Е. Ляшко «Оптимальное управление в ходе эволюционного развития процессов и систем: Учебное пособие. - Ульяновск: УлГТУ, 2000. - 148 с. - С. 106

Главным требованием к математической модели любого объекта, в том числе и технологического процесса листовой штамповки, является адекватное отражение действительности и соотношение с реальным технологическим процессом в производстве.

При решении задачи оптимизации используются различные виды математических моделей и методов процесса оптимизации (рис. 1.7 и 1.8):

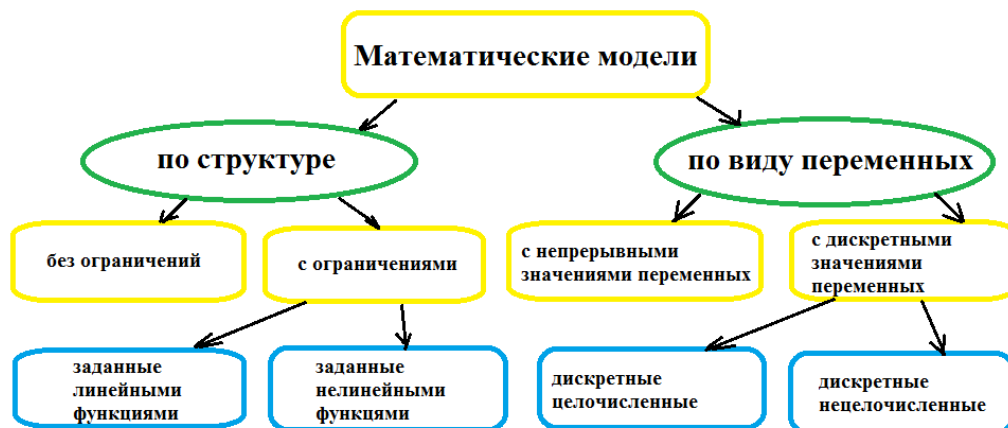


Рис. 1.7 – Классификация математических моделей

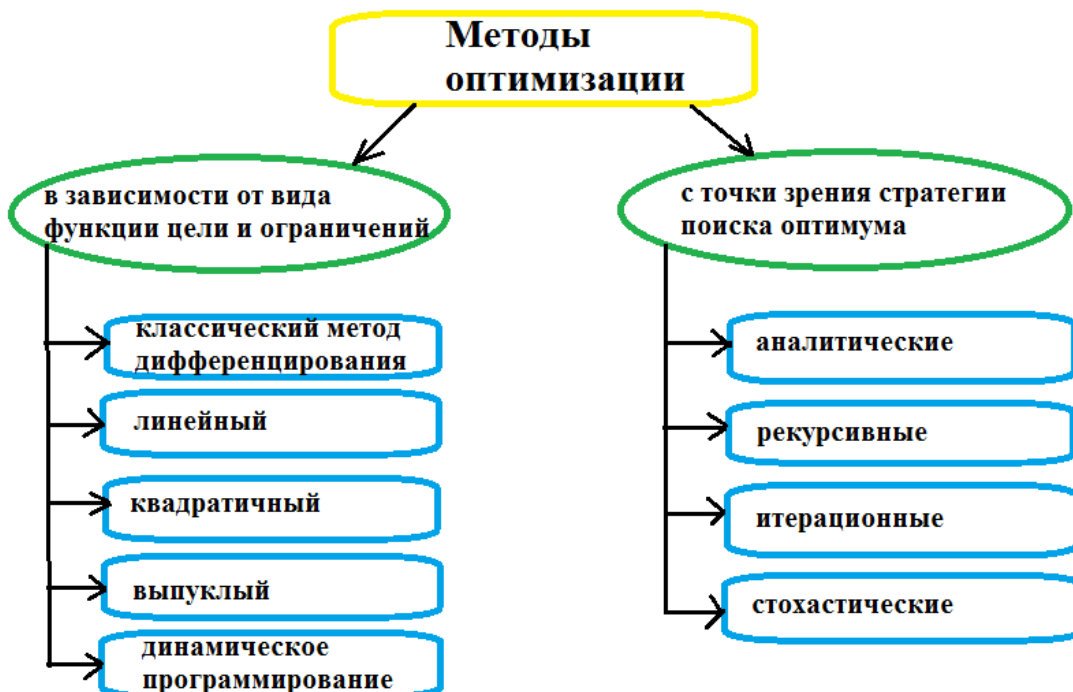


Рисунок 1.8 - Классификация методов оптимизации процессов ЛШ

Аналитический метод применяется при решении простых задач с явными ограничениями в виде уравнений. Если ограничений нет, то исследуется производная от функции, находится экстремум функции (максимум). Например, для расчета режимов резания, параметров штамповой оснастки, режущего инструмента и т.д.

Рекурсивный метод применяется достаточно редко и представляет собой поочередное определение переменных за одну расчетную операцию. Используется для моделирования маршрутных технологических процессов. Особенно эффективным является метод динамического программирования при небольшом числе ограничений.

Итерационный метод представляет собой способ расчета целевой функции в одной или нескольких вероятностных точках для нахождения оптимума. Расчет выполняется до тех пор, пока удовлетворяющая точка не приблизится к назначенному критерию на расстояние, меньше заданного допустимого значения.

Итерационный метод делятся на два класса методов программирования – линейного и нелинейного.

Первый метод применяется для решения линейных задач, где функция цели задана линейно, а все ограничивающие переменные – непрерывными функциями. Точка оптимума расположена в одной из вершин выпуклого многогранника, который определяет область возможных решений (симплекс-метод)

Второй метод разделяется на две группы – метод, базирующихся на расчетах градиентов (наискорейшего спуска) и основанный на отыскании оптимум вдоль произвольного направления (Фибоначчи)

Все методы непосредственного поиска оптимума включают операции выбора направления поиска и длины шага.

Стохастический метод (методы случайного поиска решений) включает процедуры накопления и обработки информации, в которые сознательно вводится элемент случайности. Преимущество этого метода заключается в их простоте, надежности, достаточной точности и легкости программирования. В результате

методы случайного поиска стали одними из наиболее эффективных методов оптимизации.

Стохастические методы оптимизации применяются для различных задач технологического проектирования процессов изготовления деталей при наличии большого числа случайных факторов, которые не представляется возможным описать в традиционной математической форме.

1.3. Анализ влияния различных параметров процесса штамповки на критерии оптимальности получения изделий в системах САЕ

1.3.1. Определение границ объекта.

Учесть влияние всех параметров в реальных процессах листовой штамповки, как было сказано выше, затруднительно. Поэтому выделяются главные переменные, параметры и ограничения, которыми можно с большой вероятностью описать математическую модель процесса и, таким образом, упростить ее.

Например, изменение температуры окружающей среды в прессовом производстве может влиять на технологический процесс листовой штамповки. Но учитывать его в описываемой модели процесса оптимизации практически невозможно и не нужно, так как влияние изменения температуры на технологический процесс не существенно.

Также, влияние особенности закладки готовой детали в тару, функционирования цехов, логистической службы выходят за рамки выбранной изолированной системы процесса. Хотя деталь при укладке, транспортировке до автосборочного поста может стать даже непригодной в результате брака.

При определении границ ограничения оптимизируемой системы может оказаться, что первоначально выбранные ограничивающие параметры выбраны не удачно. Например, выясняется, что при анализе системы и сравнении ее с реальной ситуацией на производстве часть ограничивающих параметров слабо влияет на технологический процесс, а другие, наоборот, оказались не учтены.

Тогда границы оптимизируемой системы в одних случаях следует сузить, а в других их расширить.

К примеру, влияние изменения сорта и качества металлопроката должно быть учтено при описании системы, так как это влияет на изменение физических характеристик материала, а это, в свою очередь, напрямую влияет на особенности технологии штамповки.

А вот зачастую изменения химического состава и качества смазки в допустимых пределах, произошедшее при смене поставщика, не сильно влияет на процесс, поэтому иногда этим изменением необходимо пренебречь.

В любом случае, следует максимально упрощать сложные системы, подлежащие оптимизации, до более простой, если есть уверенность в стабильности процесса.

Для этого в математическом моделировании применяют различные CAE системы. В данной работе для определения и анализа влияния параметров ограничения использовалось зарекомендовавшее себя в инженерной сфере специализированное приложение AutoForm Sigma.

1.3.2. Выбор управляемых переменных.

Все входные данные технологического процесса можно условно разделить на переменные, которыми можно варьировать, и постоянными, которые фиксированы какими-либо внешними факторами.

Как уже отмечалось, задача оптимизации состоит в определении нахождения тех управляемых переменных, которым соответствует наилучшая (то есть оптимальная) ситуация, при этом обеспечивается максимальная стабильность и чувствительность процесса.

Одни и те же величины параметров ограничения в зависимости от уровня детализации процесса оптимизации могут в различной степени влиять на технологический процесс. Также в одних случаях одни параметры можно считать постоянными, в других – переменными. Например, износ штамповой оснастки в результате работы приводит к изменению размеров оснастки и, как следствие,

детали. Но если программа небольшая и оснастка не изношена, то эти параметры можно считать постоянными.

Тот же случай с объемами поставляемого проката в цех. Как правило, его величину следует считать постоянной. Хотя в других случаях и более высокой детализации она будет являться регулируемой величиной и ею можно управлять.

В любом случае, количество управляемых переменных следует сделать минимальным, а также изучить влияние каждой величины на процесс оптимизации штамповки.

1.3.3. Определение ограничений управляемых переменных.

Технологический процесс является управляемой системой с ограничивающими переменными. К таким переменным относятся все виды ресурсов, мощности производства, а также другие величины.

При построении оптимизируемой модели все управляемые переменные записываются в виде равенств и неравенств, множества и систем, которые составляют разбросы управляемых величин. Совокупность всех ограничений и составляет допустимое множество задачи оптимизации.

Известно, что оборудование прессового производства имеет определённые характеристики, которые могут в определенном диапазоне изменяться. К этим величинам относятся давление прижима, скорость ползуна, размеры штамповой оснастки и другие. При этом давление прижима является переменной величиной, оказывающей существенное влияние на процесс штамповки, нежели скорость процесса. Размеры же штамповой оснастки зависят от стола прессы и учитывают размеры заготовки, закрепляемой за данным типом оборудования.

Управляемыми ограничениями переменных в задаче по оптимизации следует считать и сортамент сырья, то есть сорт листового проката и его габаритные размеры, такие как толщина листа и его ширина.

Свойства металла в рулоне изменяются вследствие допущений при технологии получения проката на металлургическом комбинате. Ширина проката изменяется в пределах допусков и влияет только на раскрой листа, поэтому эта переменная не учитывается в задаче по оптимизации.

Изменение же толщины листа от рулона к рулону влияет на технологию процесса штамповки, а именно на его робастность, и связано с изменением в зазорах между прокатными валками при протяжке металла через них. Эти величины известны из накладных документов, которые приходят на предприятие при отгрузке рулонов.

1.3.4. Выбор целевой функции.

Обязательной частью математической модели процесса оптимизации является числовой критерий, который описывает наилучший вариант процесса. Величина этого критерия называется целевой функцией и определяется выбранными значениями управляемых переменных.

Во многих случаях целевой функцией может описываться совокупность разнородных целей. Очень сложно поставить один критерий для описания всех количественных характеристик. При этом сам критерий оптимальности становится не явным и даже в некоторых случаях противоречивым. Практически невозможно найти критерий, обеспечивающий одновременно минимальные затраты и максимальную надежность с одновременной реализацией максимальной производительности. Например, при уменьшении толщины детали себестоимость уменьшается, но это может привести к разрыву на детали и последующему браку.

Поэтому зачастую выбирается основной критерий оптимизации, характеризующий явную цель оптимизации, а остальные считаются второстепенными. Когда основная цель оптимизации достигнута, ведут работу с другими управляемыми критериями в разумных пределах, то есть в приемлемых значениях заданного диапазона основного критерия.

Другим способом выбора пути оптимизации является применение весовых коэффициентов целевых функций, то есть комплексного критерия, который сразу соответствует нескольким целям.

Выбор критерия оптимизации зависит от целей оптимизации. Если целью оптимизации стоит сокращение затрат, то критериями оптимизации могут быть такие, как себестоимость изделия, капитальные затраты, раскрой детали и т.д.

Например, если целью является увеличение производительности, одними из критериев могут быть выбраны скорость движения ползуна, сокращения количества штамповочных переходов и т.д.

Если же целью оптимизации является совершенствование технологического процесса, в том числе снижения брака в цеху, то параметрами системы могут являться все физические и механические параметры технологического процесса, такие как усилие прижима на заготовку, условия смазки, положение заготовки и т.д.

1.4. Выводы

1. Оптимизация процесса – выбор наилучшего варианта технологического процесса. Рассмотрены различные математические методы по оптимизации процесса листовой штамповки.

2. Наибольшее влияние на предмет оптимизации оказывают параметры проектирования, такие как геометрия детали и инструмента, так и показатели материала.

3. Для оптимизации технологических процессов листовой штамповки в САПР необходимо определить целевую функцию оптимизации. За целевую функцию процесса оптимизации можно принять как отсутствие дефектов (утонений, гофров, больших деформаций), так и стоимостные показатели.

4. Стратегия оптимизации состоит из семи этапов и представляет собой комплекс аналитических мероприятий, одним из которых является анализ влияния различных параметров процесса штамповки на критерии оптимальности получения изделий в системах CAE.

Задачами магистерской диссертации являются:

1. Разработка критериев оптимальности и ограничений для проектирования процессов листовой штамповки в CAE.

2. Разработка методики процесса оптимизации процессов листовой штамповки на основе численных экспериментов в программе CAE AutoForm-Sigma.

3. Разработка методики оптимизации процесса листовой штамповки на стадии концептуального проектирования технологии изготовления автомобиля

2. Разработка критериев оптимальности и ограничений для проектирования процессов листовой штамповки в САЕ

2.1. Стратегия выбора критерия оптимальности

Под оптимизацией процесса в широком смысле понимается процесс нахождения наилучшего варианта из множества возможных.

Определим основные этапы стратегии выбора критерия оптимизации процесса штамповки детали «Поперечина панели задка» (Рис. 2.1):

1. Постановка задачи оптимизации процесса;
2. Выбор наиболее значимых ограничивающих параметров технологического процесса;
3. Решение задачи по оптимизации.

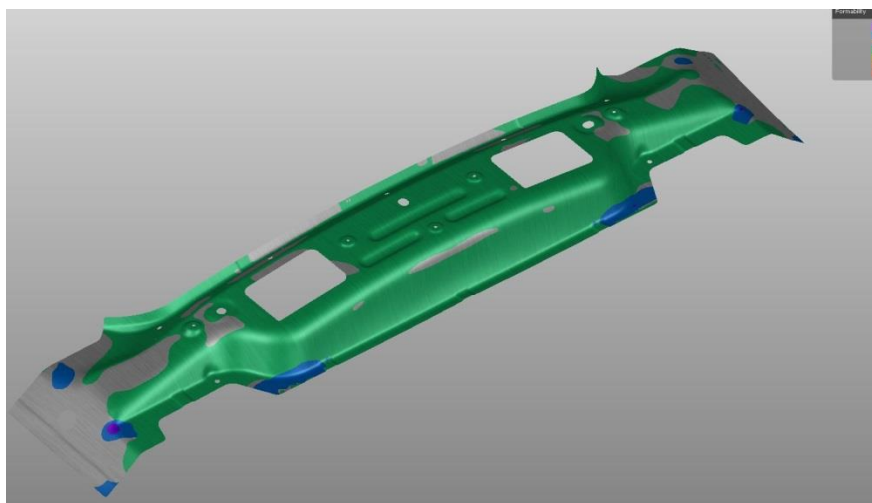


Рисунок 2.1 - Поперечина панели задка

Задача оптимизации технологического процесса штамповки является многокритериальной.

Например, целевая функция оптимизации качества изделия:

$$F = F(f_1, f_2) \rightarrow \max,$$

где f_1 – целевая функция получения детали без разрывов,

f_2 – целевая функция получения детали без складок (гофров).

Наибольшую значимость имеет целевая функция f_1 —получение детали без разрывов, так как при наличии гофров деталь может быть вполне приемлема по нормам качества. Наличие на детали разрывов всегда будет являться браком.

Проектными параметрами, влияющими на получение качественной детали, являются:

- а) геометрия детали,
- б) механические свойства материала,
- с) технология штамповки (рис. 2.2).

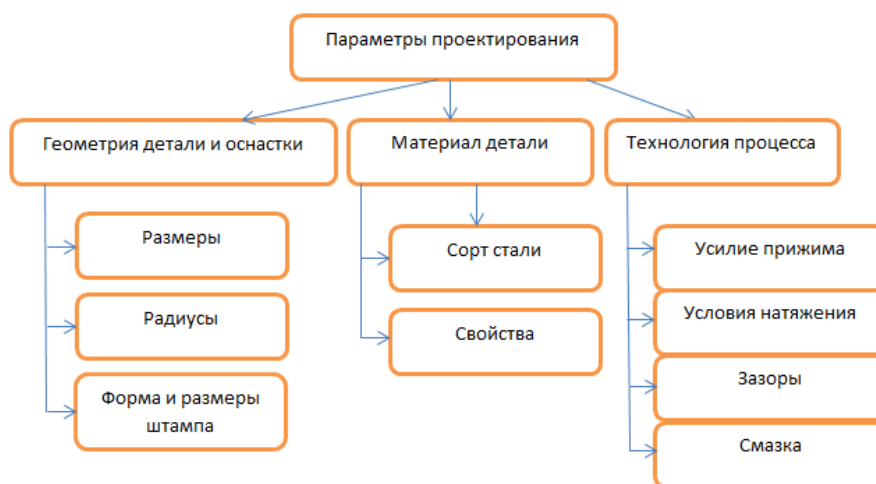


Рисунок 2.2 - Параметры проектирования

Оптимизация процесса может состоять как в изменении геометрии материала (как детали, так и инструмента), так и в изменении техпроцесса.

Изменение геометрии, в свою очередь, подразделяется на изменение геометрии детали и изменение геометрии штампов (наладка). Изменение геометрии детали приводит к большим затратам и является трудоемким. Наладка штампов включает в себя изменение геометрии перетяжных ребер, геометрии прижима заготовки, что является менее затратным способом для производства.

Изменение типа материала и его толщины может привести к изменению прочностных свойств конструкции детали.

В процессе оптимизации также возможно учесть и влияние разброса свойств материала.

Примем для проведения расчетов в AutoForm Sigma величины разброса свойств входных параметров на величину от -15% до +5% (рис. 2.3):

▼ Design/Noise Variables					
Name	Corr	Type	Min	Max	StdDev
restrainingForceF...		Noise	-15.00 %	15.00 %	5.00 %
restrainingForceF...		Noise	-15.00 %	15.00 %	5.00 %
constantForce		Noise	-15.00 %	15.00 %	5.00 %
xRotationCenter		Noise	-3 mm	3 mm	1 mm
yRotationCenter		Noise	-3 mm	3 mm	1 mm
thickness		Noise	-15.00 %	5.00 %	3.33 %
tensileStrength		Noise	-10.00 %	10.00 %	3.33 %
yieldStress	0,9	Noise	-10.00 %	10.00 %	3.33 %

Рисунок 2.3 - Входные параметры

Для подготовки моделирования с целью оптимизации техпроцесса изготовления детали был проведен тестовый анализ штампуемости детали в ПО AutoForm R6. Анализ полученных результатов выполнен по диаграмме предельных деформаций (ДПД) и по данным теста на складкообразование. С большой вероятностью можно предсказать появление и утонений, и гофров (рис. 2.4):

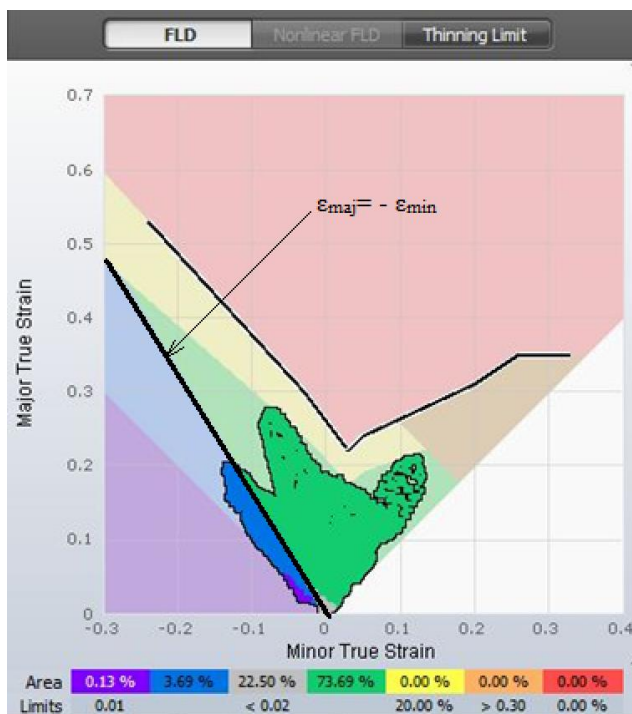


Рисунок 2.4 - Диаграмма предельных деформаций

На ДПД проходит кривая, которая определяет границу, выше которой материал перестает быть «стабильным», то есть границу предельного утонения и разрыва.

При этом области возникновения гофров на детали определены достаточно приближенно, так как при данном методе расчета процесса листовой штамповки задается минимальная величина прижима заготовки (рис. 2.5):

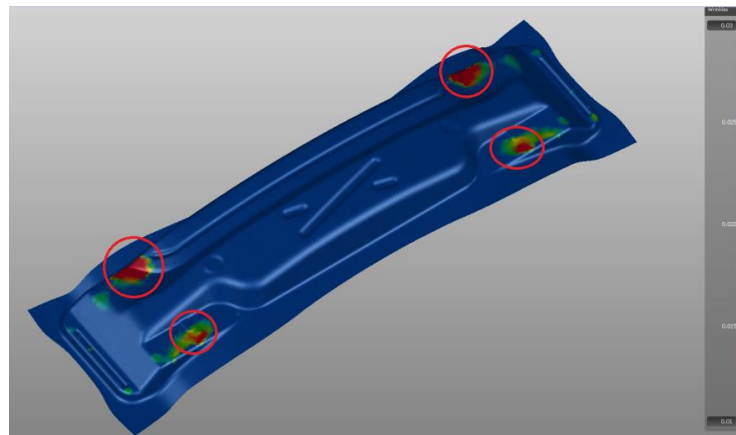


Рисунок 2.5 - Гофры

При этом область с максимальным критерием складок будет соответствовать точкам на ДПД, которые будут располагаться левее и ниже кривой складок ($\epsilon_{maj} = -\epsilon_{min}$). Это свидетельствует об утолщении в вытяжном переходе поперечины панели задка (рис. 2.6).

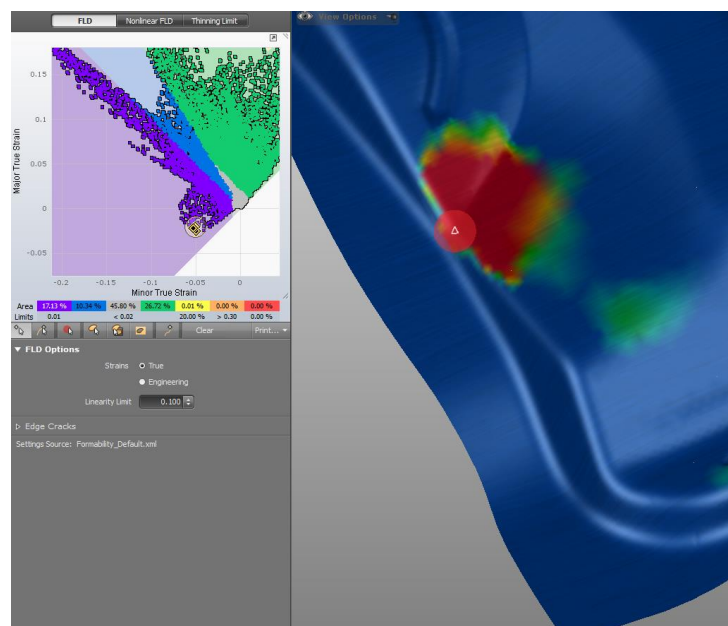


Рисунок 2.6 - Зона складок с максимальным значением критерия складкообразования

Условиями ограничений на ДПД можно выделить область для поиска целевой функции. Эту зону характеризуют максимальное удаление точек в диаграмме ДПД от зоны утонения при условии, что точки должны располагаться выше линии образования складок.

Измерив расстояние для точек конечно-элементной сетки и обозначая соответствующие им главные деформации на ДПД, получим значение точек, входящих в область оптимальных деформаций без образования разрывов и гофров:

$$x_{\text{dist2flc}} = \varepsilon_{\text{maj}}(\varepsilon_{\text{min}}) - \varepsilon_{\text{flc}}(\varepsilon_{\text{min}})$$

2.2. Выбор параметров ограничения размеров заготовки

В условиях серийного производства одной из главных задач является выбор наилучшего технологического процесса, т. е. определение такого технически допустимого сочетания технологических параметров или технологических процессов, которые отвечали бы заданным требованиям выполнения производственной программы с наименьшими затратами труда, материалов, рациональным использованием оборудования и т. д. Особенностью этапа принятия решения об оптимальном методе получения заготовки, является наличие большого числа вариантов. Сравнительную оценку возможных вариантов получения заготовки необходимо производить по определенному показателю — критерию.⁸

Выбор параметров ограничения размеров заготовки рассмотрим на примере анализа объекта данной диссертационной работы.

Существуют следующие этапы анализа:

1. Определение габаритов входных данных – математической модели готовой детали. Приблизительные габариты детали, мм – 1450*318*160 (рис. 2.7):

⁸ Рахмилевич Е. Г. Выбор рациональных методов получения заготовки при моделировании конструкторско-технологических вариантов изготовления детали // Технические науки - от теории к практике: сб. ст. по матер. XI междунар. науч.-практ. конф. – Новосибирск: СибАК, 2012.

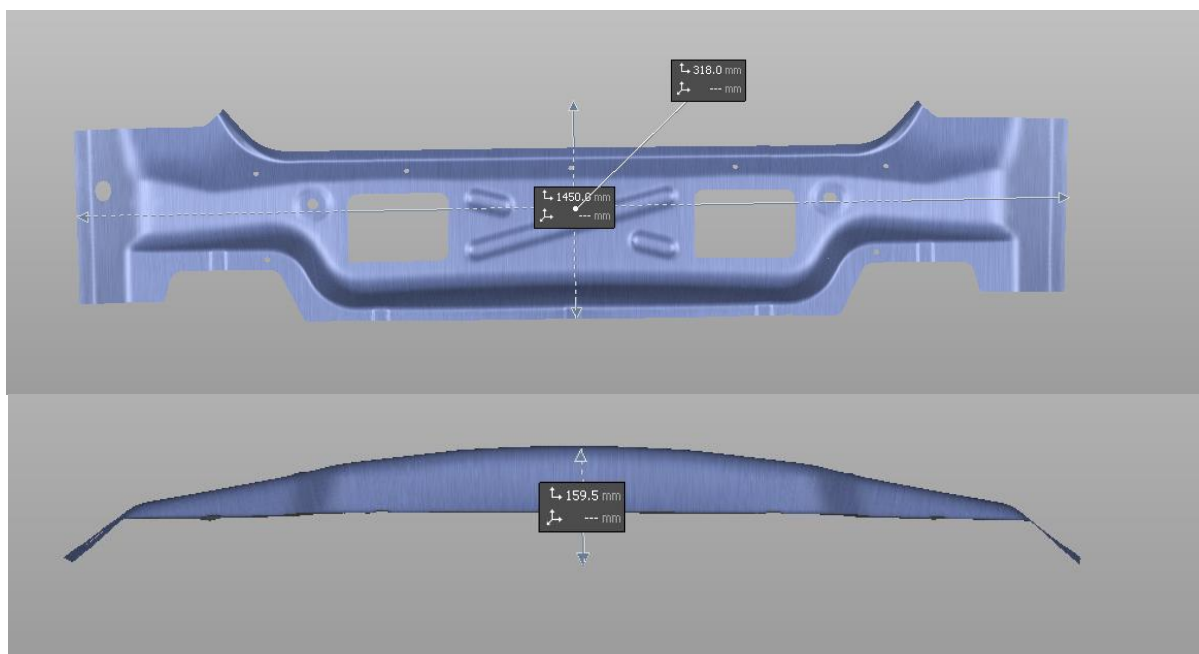


Рисунок 2.7 – Габариты детали «Поперечина панели задка»

2. Определение раскроя.

После загрузки математической детали в AutoForm перейдем к разделу Blank. Одношаговый модуль в AutoForm достаточно точно определяет развертку детали на листе проката, а также позволяет определить шаг подачи, весовые, экономические показатели, в т.ч. КИМ (48%) (рис. 2.8):

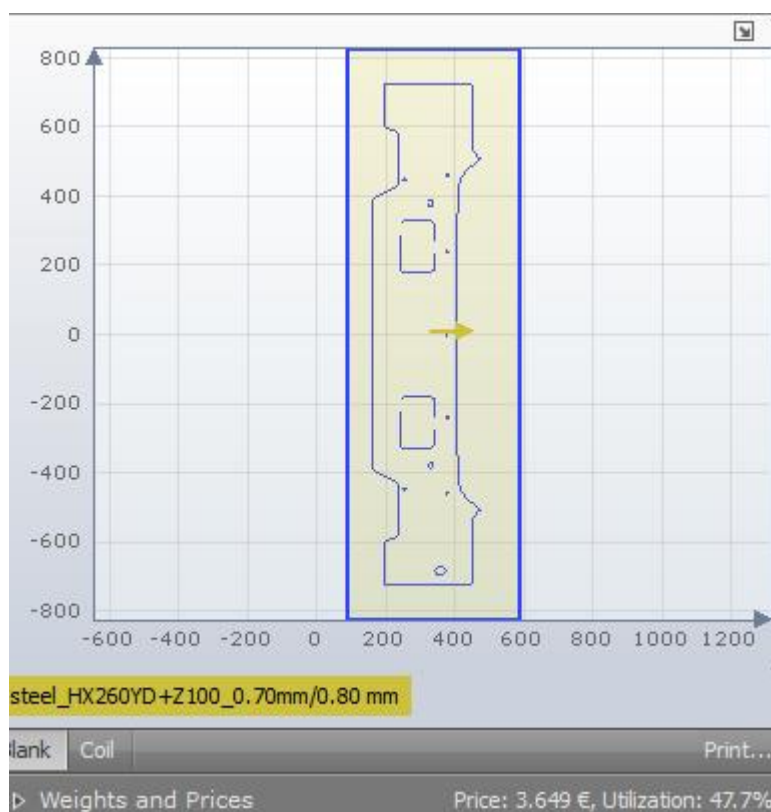


Рисунок 2.8 – Выбор заготовки и КИМ

3. Выбор параметров оборудования.

Выбор размера заготовки во многом зависит от имеющегося в производстве оборудования. Ограничения по размерам имеет как заготовительные станки (пресса), так и штамповочные пресса.

Выделим основные лимитирующие параметры:

- Минимальный и максимальный размер рулона.

Рулон доставляют на предприятие из металлургических комбинатов. Причем, размер рулона всегда стандартизован в целях его массовости и экономии. К этим параметрам относятся как ширина рулона, так и толщина проката, которая задается зазором между прокатными станами.

Все величины имеют и свои отклонения, которые должны быть в дальнейшем учтены в «шумах» при моделировании процесса в AutoForm Sigma.

Итак, размер полученного раскроя должен быть в допустимых пределах. Как правило, всегда есть возможность повернуть деталь в плане раскроя или получать сразу несколько заготовок за удар. Но для этого нужно перепроверить и направление подачи листа, влияющим на коэффициенты анизотропии при задании в AutoForm.

- Максимальный и минимальный размер заготовки для заготовительной операции

При вырубке на ножницах или в прессе эти параметры зависят от характеристик оборудования. Это могут быть габаритные размеры стола, размеры оснастки, расстояние между стойками, проемами. То есть технологу необходимо знать характеристики производства, для которого разрабатывается техпроцесс. Как правило, мощности ПрП ВАЗа практически полностью способны получить заготовки для всех крупных и средних деталей кузова автомобиля действующей номенклатуры.

- Максимальный и минимальный размер заготовки для формовочных и остальных операций

Эти размеры зависят от характеристик оборудования. Здесь влияют размеры стола, размеры между захватами в автоматах, габариты моечной, правильных машин, механизмов переноса и т.д.

Кроме того, величина максимального реза очень важна при резки металла на станках с ЧПУ, так как максимальный рез ограничивается параметрами станка.

- Толщина рулона

Чем толще металл, тем большее усилие нужно приложить на операции вытяжки. При этом очень толстый металл может привести к разрушению штампа или элементов прессы.

Кроме того, вес заготовки при ручной или трансферной подаче может иметь негативное влияние на дефекты при переносе, прогибе и провисании заготовки, а также при логистической транспортировке до склада.

4. Определение изменчивости геометрических параметров заготовки.

На раскройных линиях всегда существуют допуски реза, которые могут изменить геометрические параметры заготовки.

Существенным отклонением от технологии является также неправильная укладка детали в штамповое пространство.

Для учета всех возможных отклонений и выбора параметров ограничения размеров заготовки, представим линейные размеры заготовки как некую изменяющуюся величину. Величины изменения этих параметров могут быть использованы при статистическом анализе в AutoForm Sigma как величины производственного «шума».

Величину отклонений можно задать двумя способами – как величину изменений сторон прямоугольной заготовки и углов реза, так и только величинами изменений сторон.

Воспользуемся 2 способом задания и зададим все величины численно, а центр заготовки оставим в абсолютных координатах.

Базовый размер заготовки 1650*500 (рис. 2.9):

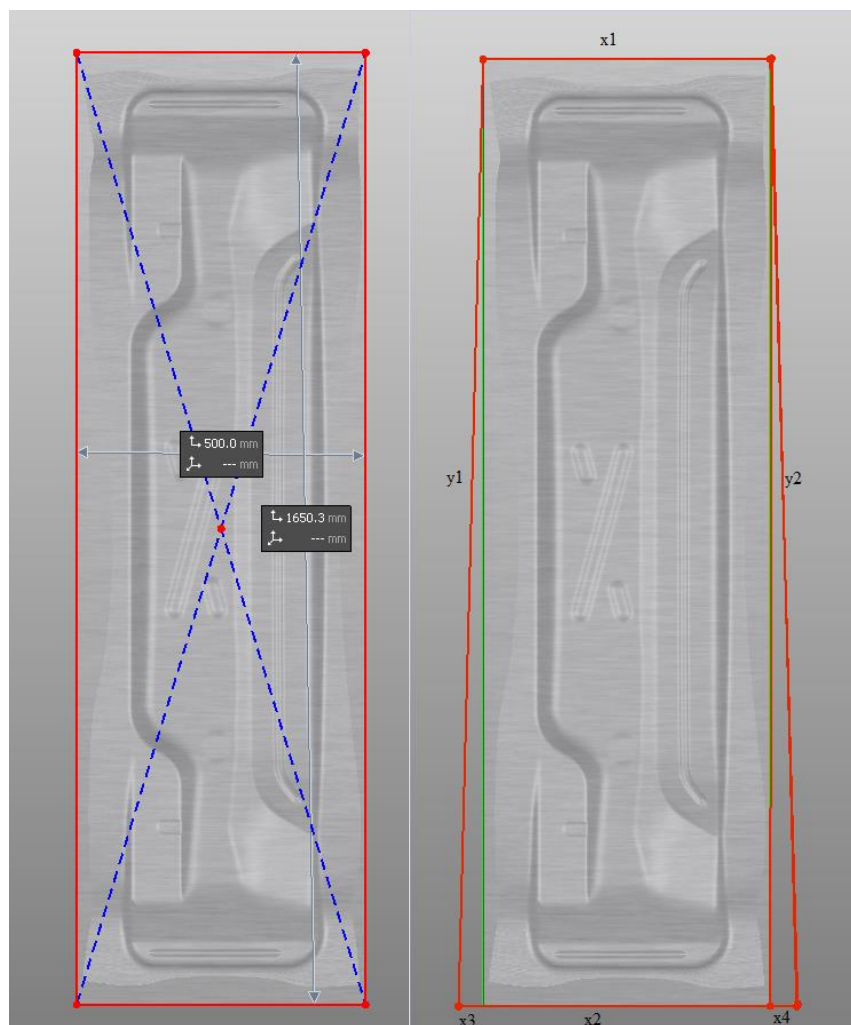


Рисунок 2.9 - Заготовка

Следует учесть, что величины приращений x_3 и x_4 могут быть как положительными, так и отрицательными и задают угол реза.

Величина x_1 как положительной, так и отрицательной и задают изменение шага раскроя.

Величина x_2 только положительной и задает базовое значение размера.

Математически данную модель можно представить в виде системы уравнений:

$$\text{Min} \leq \text{Линейный размер} \leq \text{Max, mm}$$

$$-2 \leq x_1 \leq 2$$

$$0 \leq x_2 \leq 2$$

$$-1 \leq x_3 \leq 1$$

$$-1 \leq x_4 \leq 1$$

Величины y_1 и y_2 в данном случае зависят от ширины рулона и допустимого их изменение в пределах полей допусков.

Эти величины могут применяться при задании входных данных в AutoForm Sigma при задании размеров заготовки.

Автор не видит целесообразным для данного типового представителя класса задание именно этого критерия изменчивости.

Ведь изменение размеров заготовки влияет, прежде всего, на усилие прижима. Сами же размеры все равно в реальном техпроцессе контролируются пилотами, а вытяжка жестко «сидит» на ребрах.

Поэтому целесообразным является задание именно изменение величины значения усилия прижима как величину производственного «шума» в AutoForm Sigma (более подробно будет рассмотрено в Главе 3).

2.3. Определение параметров ограничения размеров штамповой оснастки

Параметры ограничения размеров штамповой оснастки определяются как параметры технологического процесса, а их количественные значения должны быть заданы как ограничивающие параметры при определении задачи по оптимизации. То есть они, в первую очередь, зависят от того технологического оборудования, которое будет выбрано инженером-технологом при разработке технологического процесса.

Параметры, ограничивающие линейные размеры при проектировании технологического процесса по принадлежности к объекту можно условно разделить на:

1. Характеристики оборудования

К первой группе параметров ограничения можно выделить размерные величины оборудования, то есть характеристики прессы, так и штамповой оснастки. К ним относятся размеры стола прессы, минимальная закрытая высота, расстояние между позициями в пресс-автоматах, ход маркетной подушки и др.

2. Параметры штамповой оснастки

Ко второй группе ограничивающих параметров могут относиться габаритные размеры штамповой оснастки, габаритные размеры средств автоматизации и

механизации (например, расстояние между грейферными захватами), ход маркетной шпильки и др.

При этом в задаче по выбору оптимального технологического процесса необходимо учитывать данные параметры как совместную и зависимую друг от друга систему, так как размеры штамповой оснастки определяются, прежде всего, характеристиками прессы.

Выбор же прессы для технологического процесса является опытной задачей технолога, решаемой на этапе создания математической модели технологического процесса в AutoForm (MasterPlan).

Например, размеры штамповой оснастки ограничиваются размерами стола прессы. Глубина вытяжки зависит от рекомендуемой закрытой высоты прессы. В то же время для габаритной детали при ограниченном количестве операций на штамповочной линии не всегда является возможным задание клиновой операции из-за отсутствия в штампе мест для монтажа клиновых ползушек.

Исходя из габаритов детали (рис. 2.10) и усилия прижима, полученные при симуляции в системе AutoForm (рис. 2.11), для моделирования технологического процесса были выбраны характеристики оборудования Инноченти 650+400 тс (рис. 2.12):

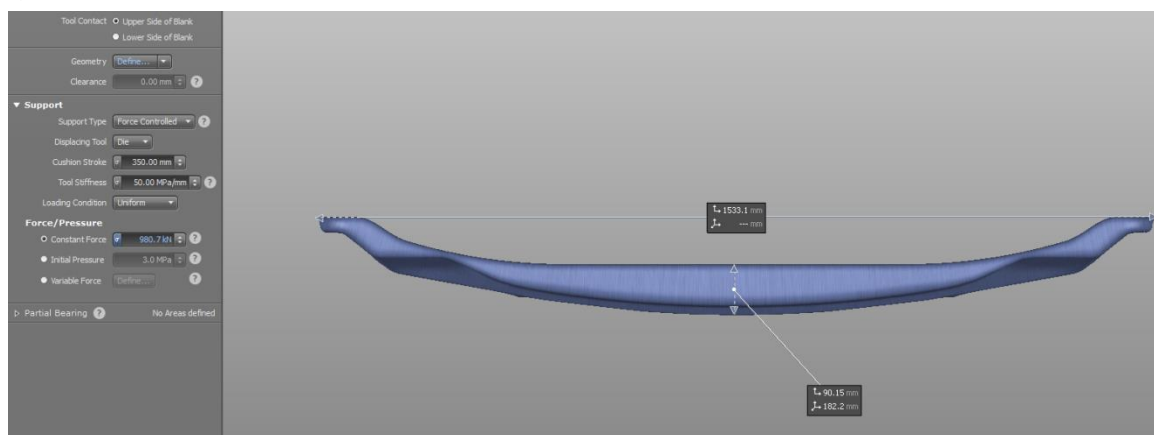


Рисунок 2.10 - Глубина вытяжки

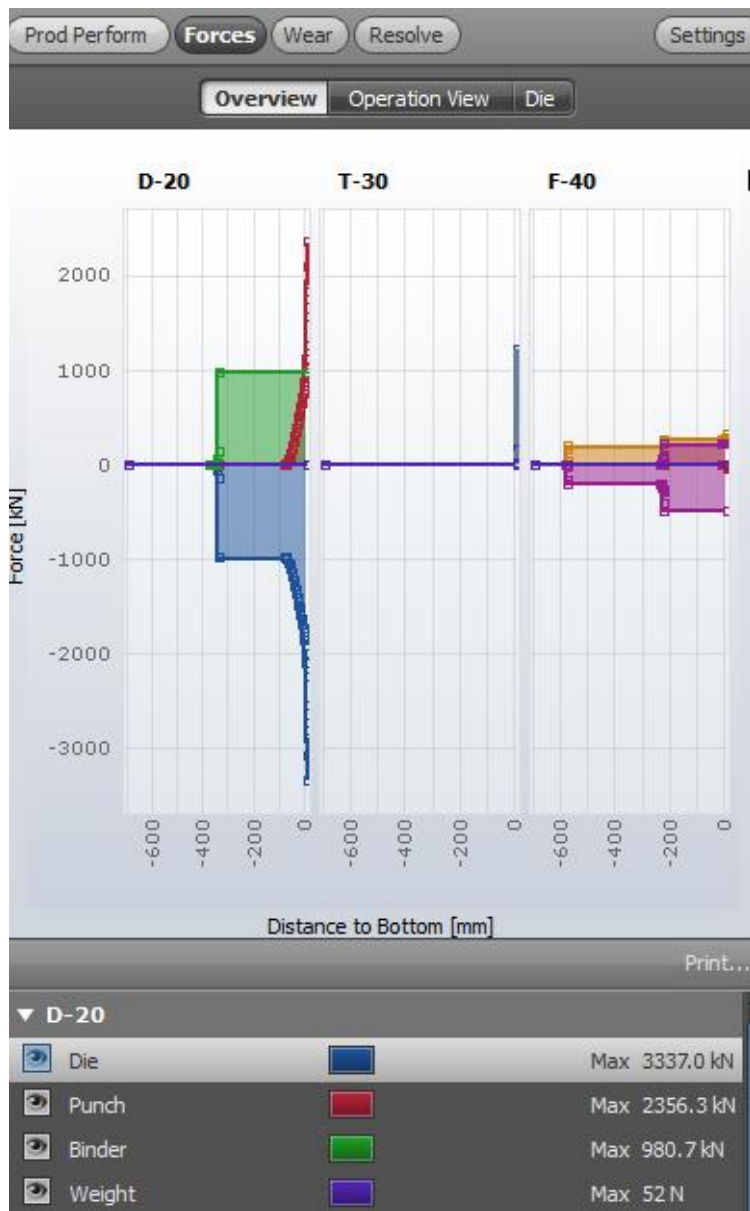


Рисунок 2.11 – Величина усилия для операций штамповки

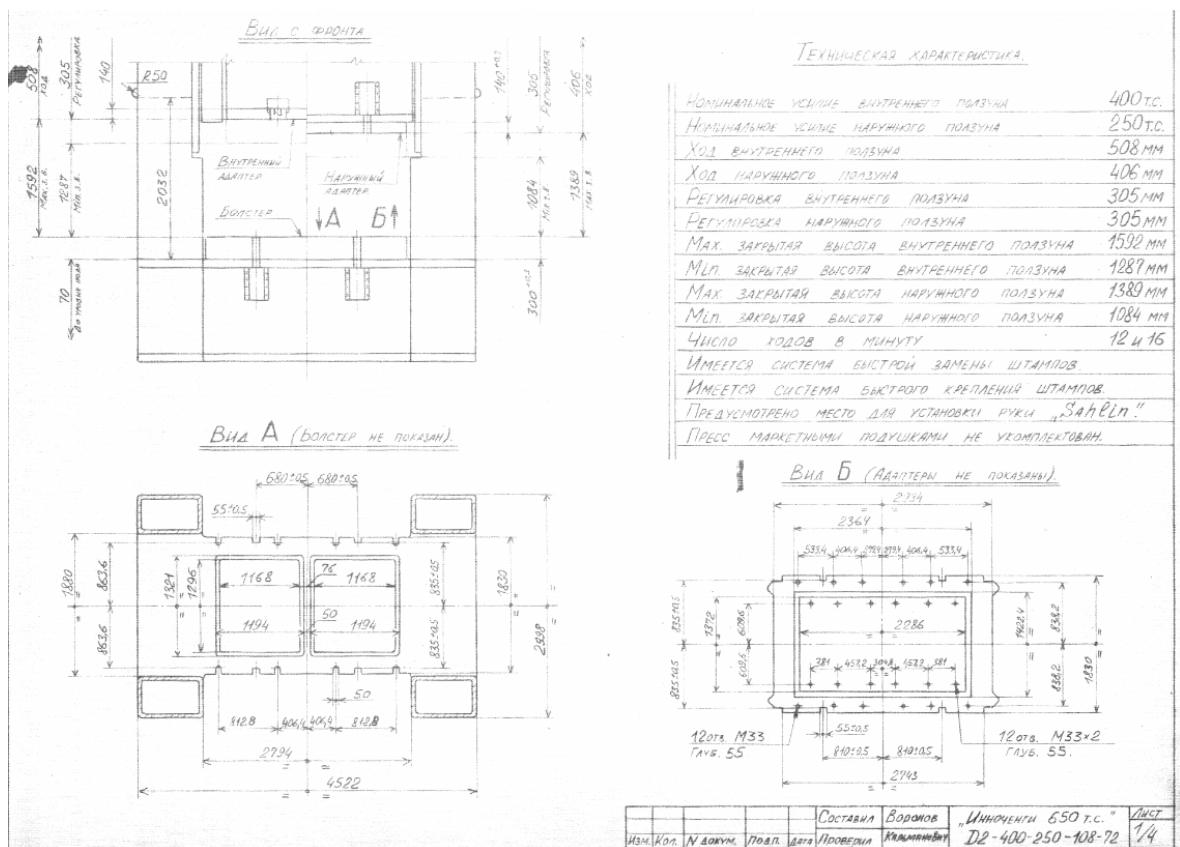


Рисунок 2.12 – Характеристики оборудования пресса Инноченти 650 (выдержка)

Для вывод, в конечном счете, инженеру-технологу для задания оптимального процесса в совершенстве необходимо знать характеристики реального оборудования прессового производства и учесть это в задании «рабочих» технологических процессов в системах САЕ.

2.4. Определение величин управления технологическим процессом

Известно, что оптимизация процесса может быть получена как изменением геометрических параметров, так и изменением характеристик металла и самого процесса (рис.2.13):

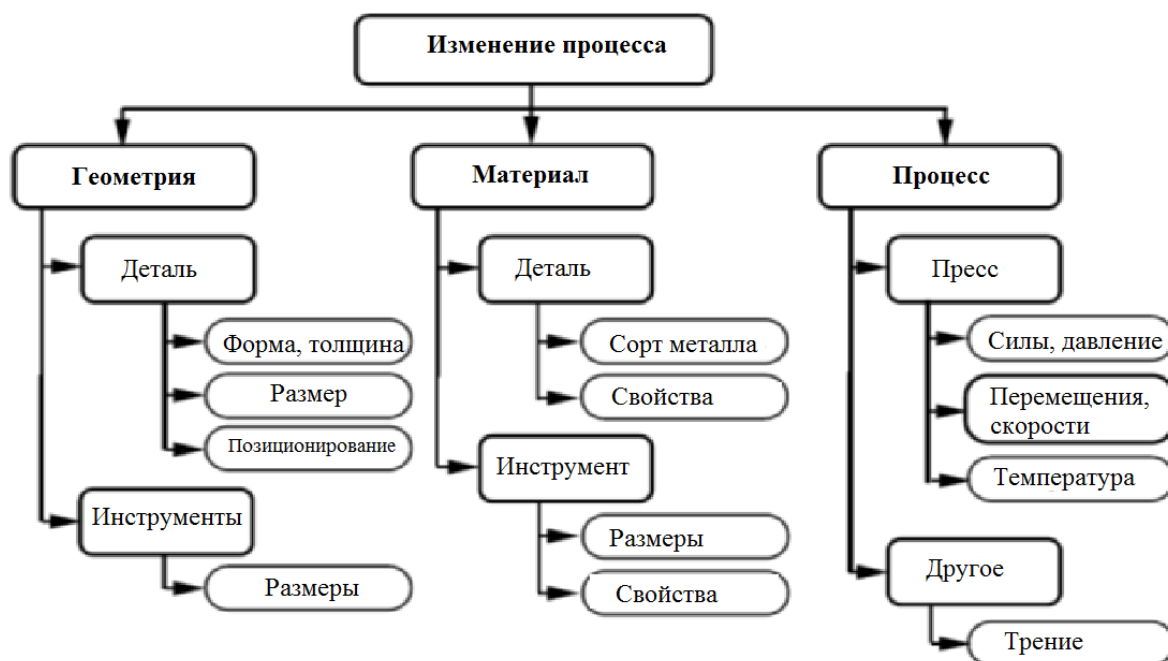


Рисунок 2.13 Возможные критерии изменения процесса

Процесс изменения геометрии подразделяется на изменение самой конструкции детали, так и наладкой штамповой оснастки в производстве. Это достаточно затратный процесс, требующий большой трудоемкости и финансовых вложений.

Если же говорить про изменения, связанные с материалом, то не можем поменять его толщину, так как можем ухудшить прочностные характеристики детали. Также обстоит дело и с сортом проката – для этого потребуются провести дополнительные лабораторные испытания. Кроме того, закладывая более прочный металл, есть большая вероятность получить разрывы при глубокой вытяжке даже там, где их не было.

Если рассмотреть параметры процесса, то изменение таких параметров, как температура (заготовки, окружающей среды) или характеристик пресса (например, скорость кривошипа) либо затратно с экономической точки зрения, либо очень трудоемко по наладке процесса. Единственный параметр, которым мы можем оперировать - это давление прижима заготовки.

Также достаточно простыми параметрами для изменения являются изменение положения заготовки и коэффициента трения. Для данной детали

процесс штамповки происходит вручную. Оператор рукой кладет заготовку в штамповое пространство пресса, при этой наносит смазку только через каждую n деталь с определенной последовательностью. При этом может происходить неточность позиционирования при загрузке заготовки, а также наблюдаются значительные изменения коэффициента трения в процессе смазки, которые могут рассматриваться в процессе штамповки как переменные шума.

2.5. Выбор параметров варьирования показателей материалов

Параметры варьирования показателей материалов могут быть заданы в редакторе материалов программы AutoForm – Material Editor. Изменения полей значений этих показателей отмечаются символом «сигма», а цвет текста в поле ввода закрашивается в синий цвет.

Для данного материала по результатам испытаний был создан .mat файл, который описывает его физические и прочностные свойства. Материал детали – НХ260YD с цинковым покрытием Z100 толщиной 0.8 мм (рис. 2.15):

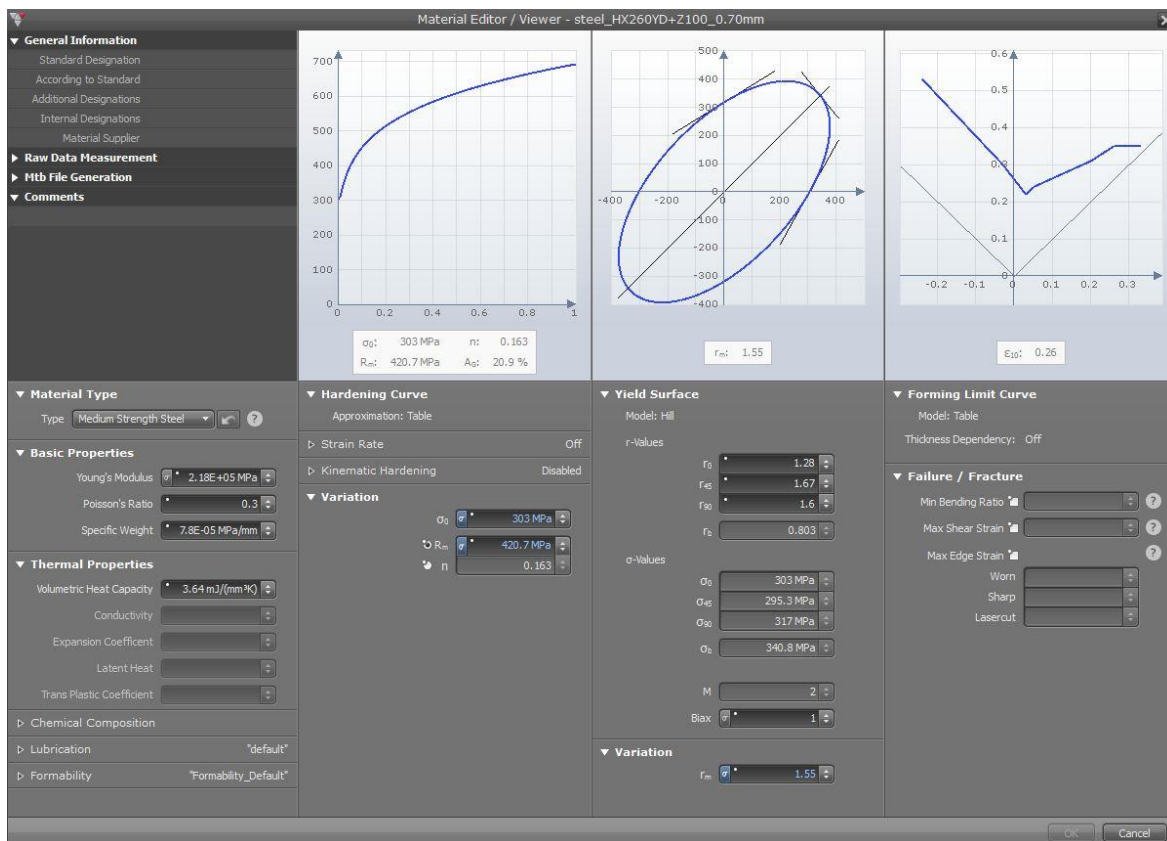


Рисунок 2.15 – Редактор материалов AutoForm

В результате численного эксперимента была введена изменчивость следующих показателей материала:

1. Предел текучести. Для материала НХ260УД максимальное значение предела прочности равно 303 Мпа, разброс -10%/+10%, среднее квадратичное отклонение 3.33% (рис. 2.16):

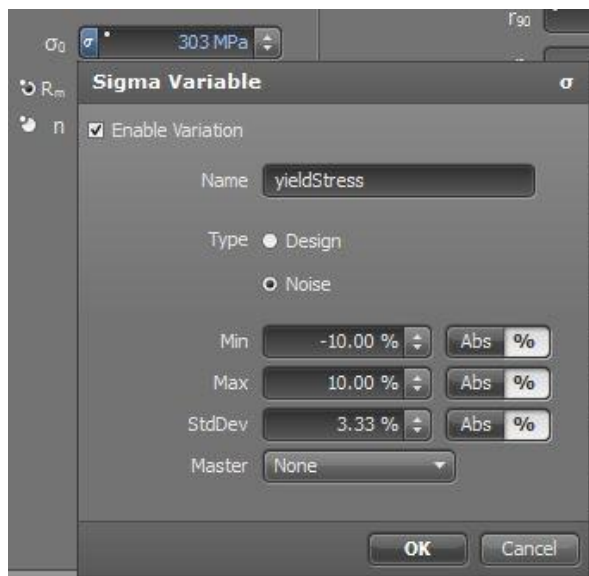


Рисунок 2.16 – Предел текучести

2. Предел прочности. Для материала НХ260УД максимальное значение предела прочности равно 303 Мпа, разброс -10%/+10%, среднее квадратичное отклонение 3.33% (рис. 2.17):

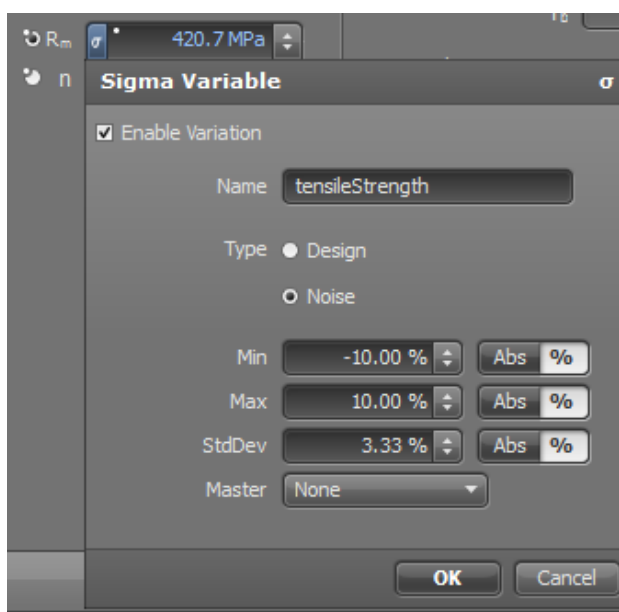


Рисунок 2.17 – Предел прочности

3. Значение среднего коэффициента анизотропии. Задается значениями анизотропии в трех направлениях. Его значение равно 1.55. Разброс в пределах +20%/-20%, среднее квадратичное отклонение 6.66% (рис. 2.18):

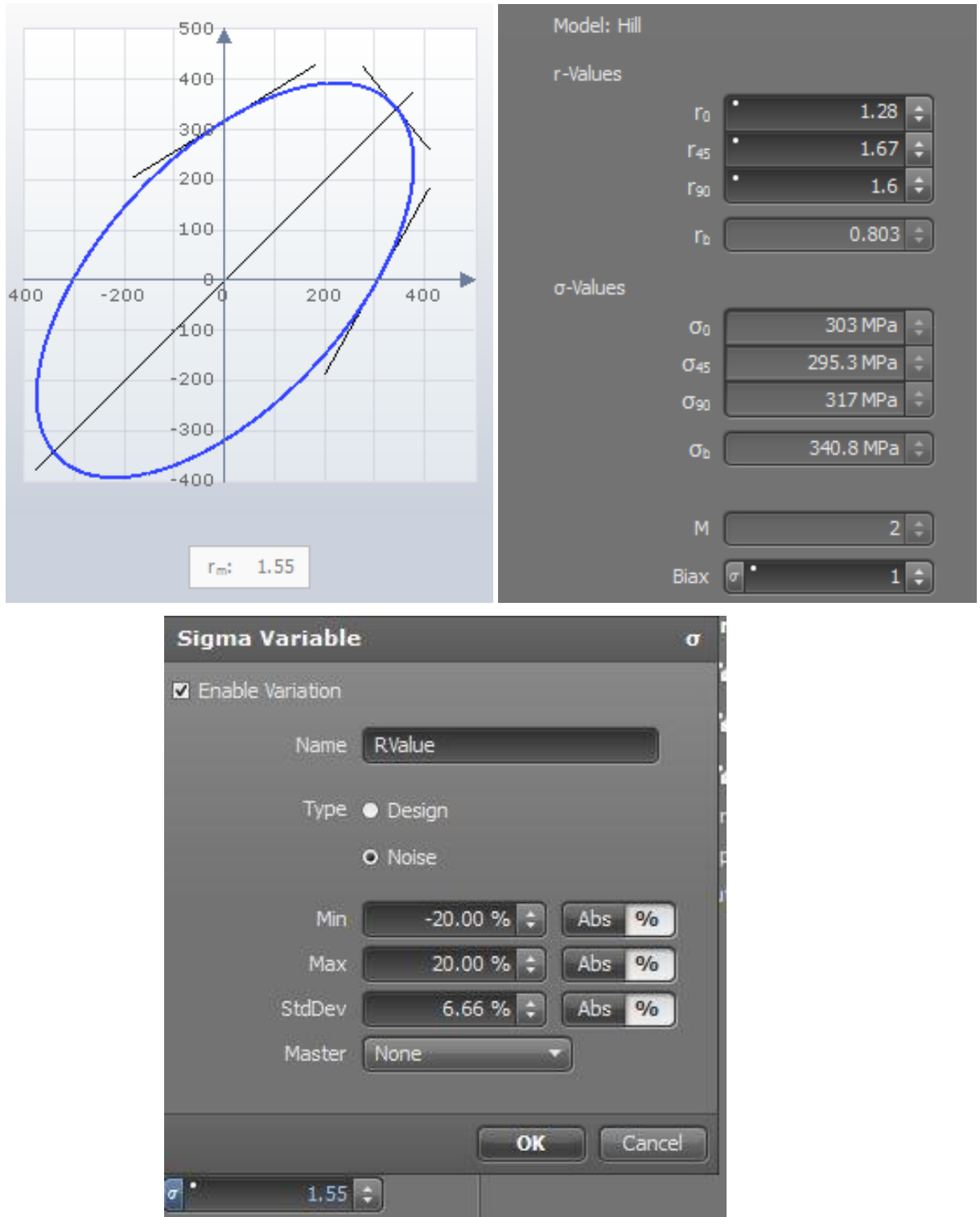


Рисунок 2.18 – Среднее значение коэффициента анизотропии

4. Изменение толщины. Данный материал задан толщиной 0.8 мм.

Разброс величин может быть как положительным, так и отрицательным, но всегда лежит в пределах допусков⁹ и согласован с заводом-потребителем. Значение разброса взято «с запасом» из собственного опыта и не превышает пределов +5%/-15%, среднее квадратичное отклонение 3.33% (рис. 2.19):

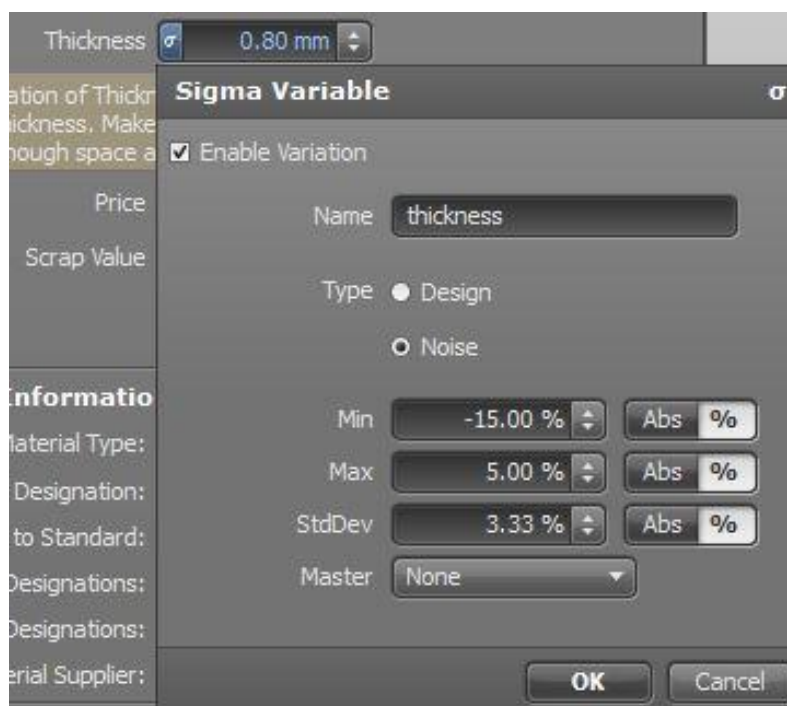


Рисунок 2.19 Толщина

Значение показателей характеристик материала получены экспериментами в лаборатории ИЦ ВАЗ.

Значения разброса толщины проката меняется от партии к партии в пределах допуска. Изменение зависит от изменчивости технологии изготовления проката на комбинате.

Более подробно влияние варьирования показателей материалов на робастность технологического процесса будет рассмотрено в следующей Главе 3.

⁹ ГОСТ 19903-74 - Прокат листовой горячекатаный. Сортамент: 2008

2.5. Выводы

1. Сформулирована задача многокритериальной оптимизации для изготовления изделия «Поперечина панели задка»
2. Определена область оптимальных главных деформаций.
3. Составлены уравнения для определения зоны оптимальных решений
4. Проведен выбор параметров ограничения размеров заготовки, штамповой оснастки, оборудования.

3. Разработка методики процесса оптимизации процессов листовой штамповки на основе численных экспериментов в программе CAE AutoForm-Sigma^{plus}

Данный модуль применяется всеми ведущими автомобилестроительными фирмами для улучшения качества продукта и устойчивости технологического процесса при штамповке деталей кузова автомобиля.

Использование модуля AutoForm Sigma на ранних стадиях проектирования кузова для оптимизации процессов листовой штамповки на основе численных экспериментов в программе CAE AutoForm Sigma и обеспечивает устойчивость конечного продукта к изменениям, происходящим в реальных условиях производства:

- изменение толщины металла от партии к партии согласно ТУ;
- изменение механических свойств металла от партии к партии согласно ТУ;
- изменение условий трения;
- изменение геометрии вследствие износа инструментов;
- оптимизация размеров заготовки, нацеленная на увеличение КИМ и т.д.

С помощью AutoForm Sigma, продукты и процессы могут разрабатываться так, что получающиеся производственные процессы будут наиболее эффективны и стабильны при достижении желаемого качества. Можно легко проанализировать влияние параметров процесса и чувствительность к ним, что ведет к лучшему пониманию процесса и сокращению времени на подготовку

производства. Кроме того, методы статистического контроля процессов могут быть применены уже на стадии проектирования, принимая во внимание неотъемлемые статистический «шум» и изменчивость технологических процессов.¹⁰

3.1. Оценка процесса для базовой технологии штамповки в AutoForm-Sigma^{plus}

Одной из областей применения AutoForm Sigma является определение устойчивости технологического процесса (Robustness).

Это инструмент предназначен для инженеров-технологов по холодной листовой штамповке для определения, оценки и обеспечения стабильных условий производства, обеспечивающий заданные цели требований по качеству. В основе работы модуля используются методы статического управления процессами, описанные в ГОСТ Р 51814.3-2001.

Устойчивость технологического процесса (Robustness) описывает инженерный подход, где влияние различных вариаций непреднамеренных параметров (шум - Noise) в процессе штамповки, систематически анализируются и в случае определения неустойчивости технологического процесса, предлагаются потенциальные контрмеры которые могут исправить ситуацию.

В процессе штамповки имеются как фиксированные параметры (геометрия рабочих частей, конструкция детали и т.д.) так и меняющиеся параметры имеющие "естественное" рассеивание технологического процесса, такие как:

- Усилие прижима
- Положение заготовки
- Условия трения
- Толщина и механические свойства материала

Изменение (нестабильность) этих параметров, как правило, неизбежно в реальном процессе производства. Такие нестабильные условия производства могут, например, вызвать неожиданные проблемы со штампуемостью,

¹⁰Официальный сайт ПО AutoForm. Точка доступа: <http://www.autoform.com/ru/products/autoform-sigma-plus/>

гофрообразованием и пружинением во время работы на программу автомобиля, ведущих к затратам по переделке и наладке штампов.

Для обеспечения стабильного производственного процесса с заданными целями требований по качеству, подход по устойчивости технологического процесса (Robustness), наиболее эффективно применять на стадии проектирования технологического процесса прежде, чем проект утвержден и начата механическая обработка рабочих частей штампов.

Основной принцип работы AutoForm Sigma заключается в том, что формируется не один набор исходных данных, а целая серия, в которой варьируются те или иные параметры. Для каждого параметра задается возможный разброс его значений. Процесс реагирует на изменение входных параметров, и с помощью статистических методов анализируется его отклик. В качестве отклика может быть выбран тот или иной критерий качества, например утонение детали или же перемещение пружинения. Статистический анализ результатов многих симуляций позволяет определить, к каким параметрам процесс чувствителен более всего, а какие имеют лишь второстепенное значение¹¹.

Определение чувствительности процесса рассмотрим на примере детали «Поперечина панели задка» (Рис. 3.1):

¹¹ Д.В.Бузлаев, А.Н.Антонец, В.В.Калаев, А.В.Рянянский «Новые методы оценки устойчивости и производительности технологических процессов» // «САПР и Графика, № 4/2006» Эл. доступ: <http://www.sapr.ru/article.aspx?id=15744&iid=745>

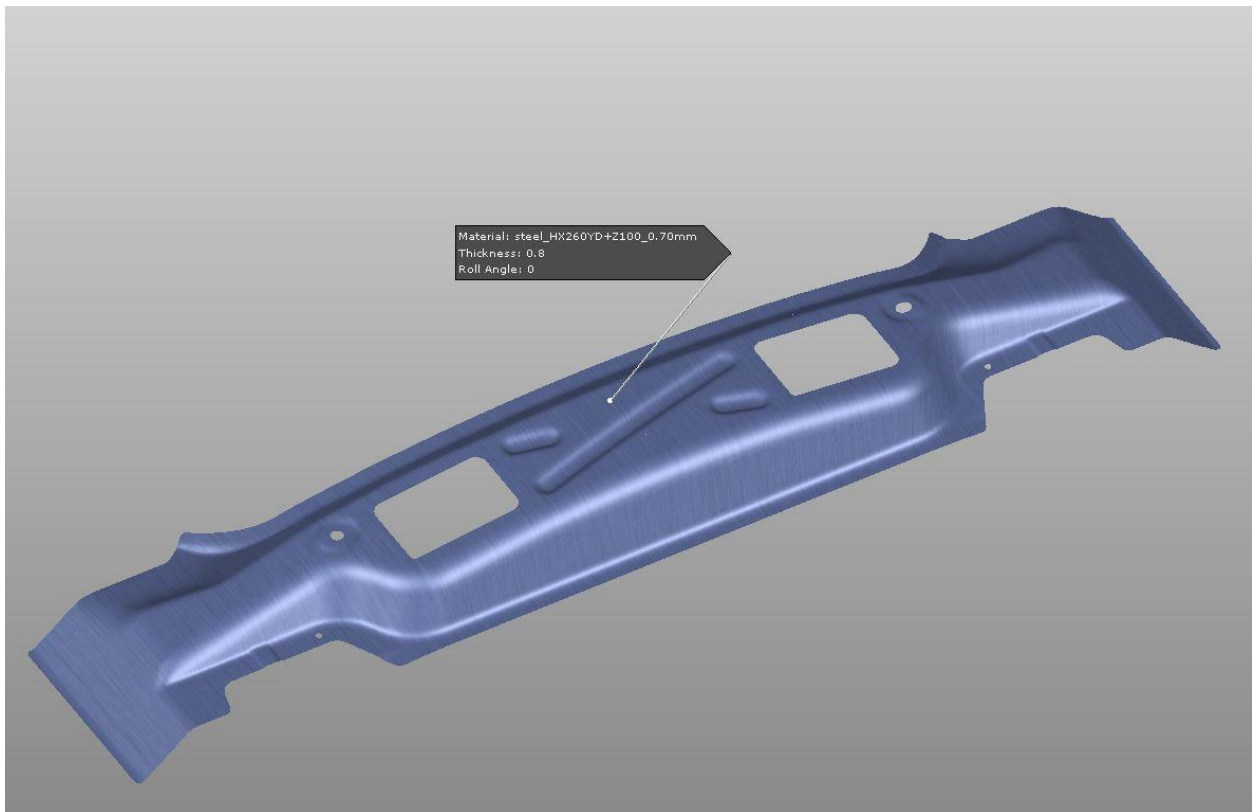


Рисунок 3.1 – Деталь «Поперечина панели задка»

Оценку изменения утонения рассмотрим на графиках характерных сечений – три поперечных сечений по оси X (рис. 3.1) и одного продольного сечения по оси Y (рис. 3.2):

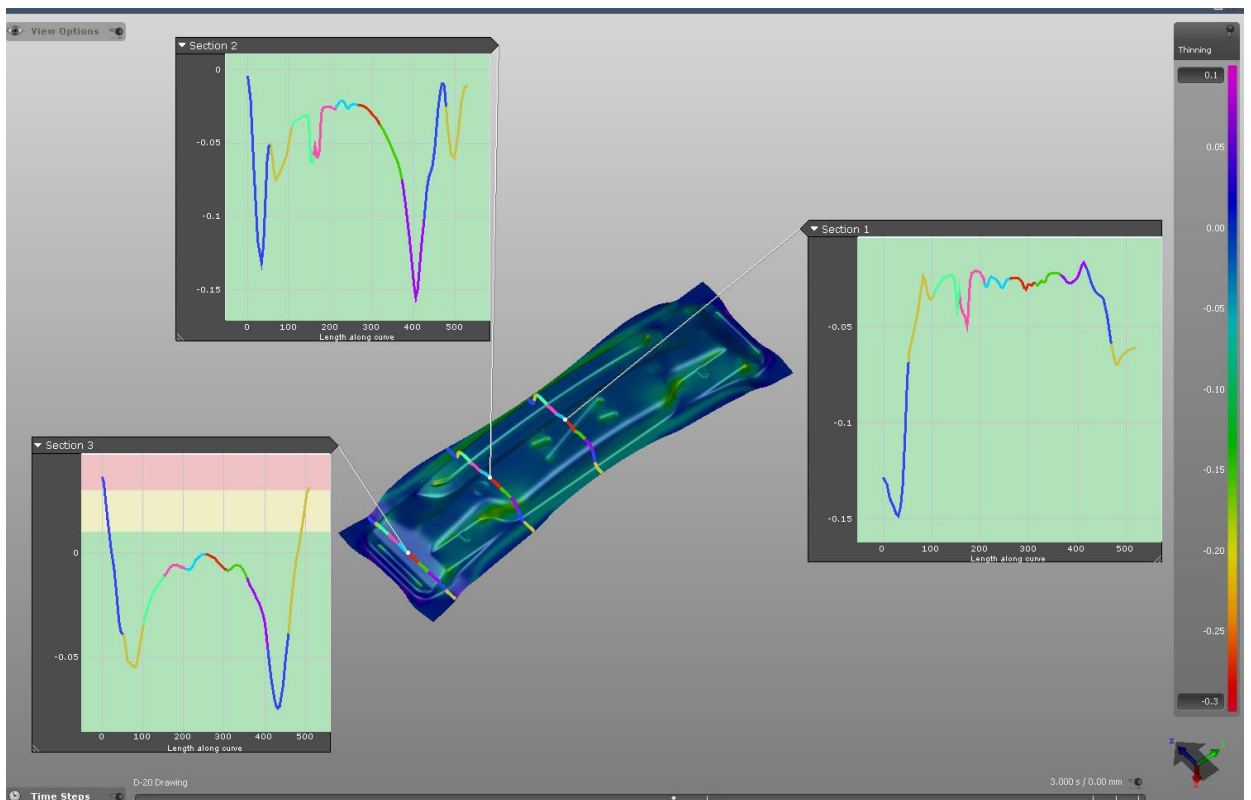


Рисунок 3.1- Поперечные сечения

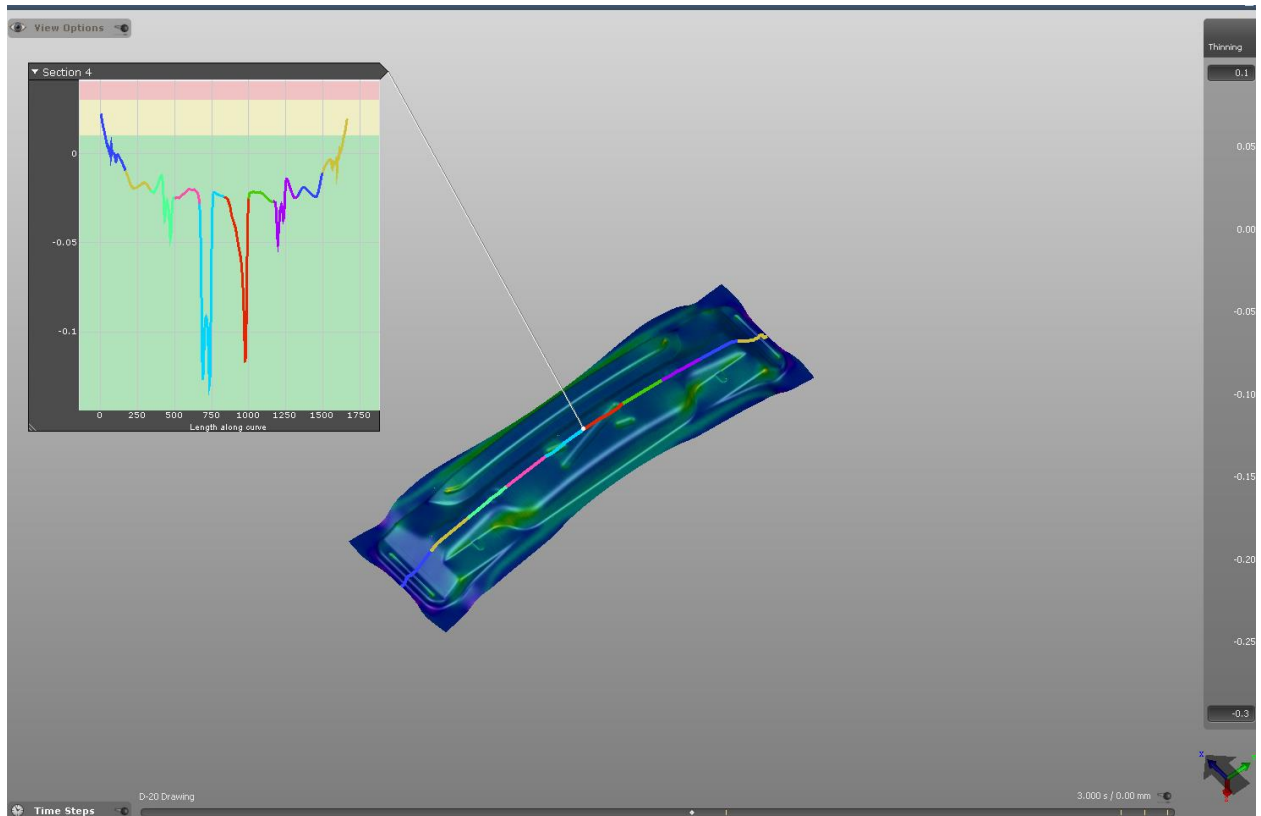


Рисунок 3.2 – Продольное сечение

Были получены четыре диаграммы Парето, которые показывают зависимость критериев процесса от утонения по направлению сечения.

Рассмотрим более детально каждое из сечений.

В сечении №1 видно, что минимальные значения (мин. -8%) лежат на стенках детали. Это зона двухосного растяжения. В то время как центральная часть испытывает только допустимые растяжения (утонение 5%). На зоне детали под прижимом наблюдаются гофры (рис. 3.3):

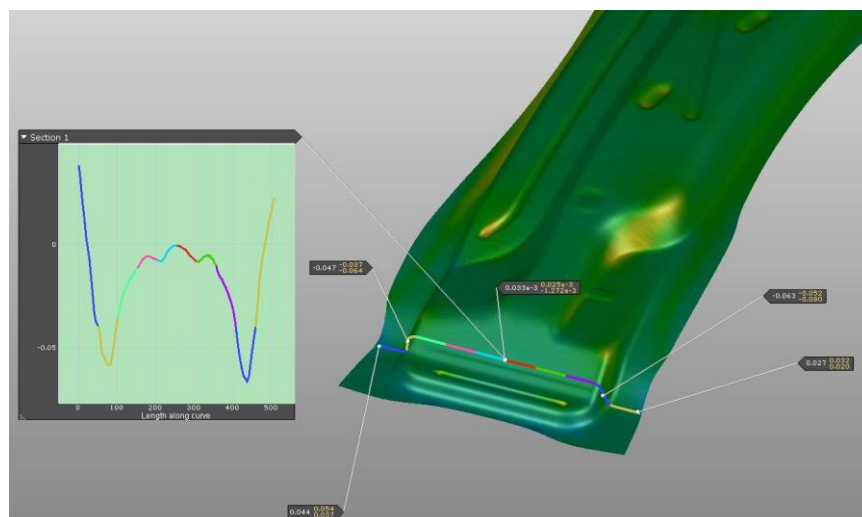


Рисунок 3.3 - Сечение № 1

В сечении №2 наблюдается НДС другого характера. Из-за большой глубины вытяжки в местах стенок и радиусов деталь утоняется до 15%, причем скорость деформации намного выше, чем в других характерных сечениях. Наблюдается зона одноосного растяжения. Очевидно, что и края вытяжного перехода испытывают большие растягивающие напряжения (рис. 3.4):

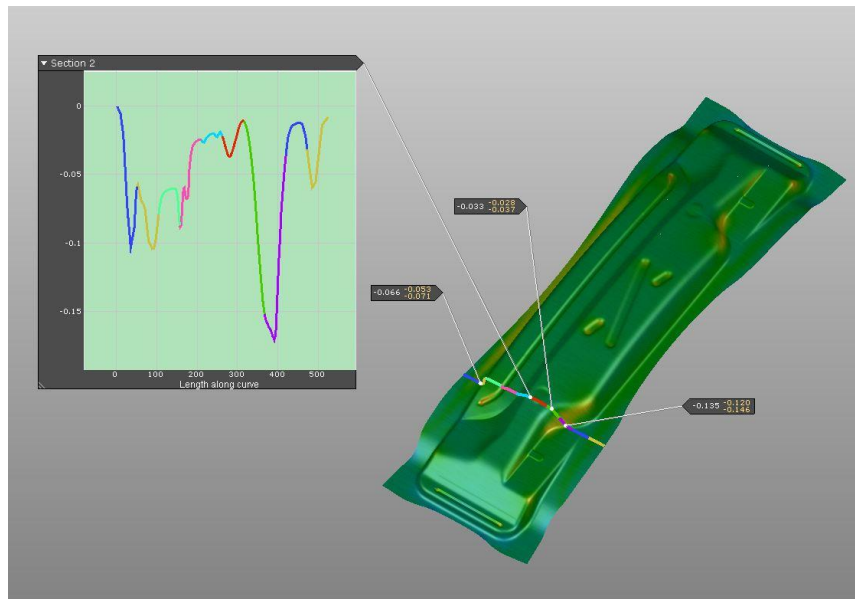


Рисунок 3.4 - Сечение № 2

В сечении №3 «опасная» зона находится на задней стенке перехода (утонение свыше 15%), но эта часть перехода будет обрезана на операции 30 «Обрезка» (рис. 3.5):

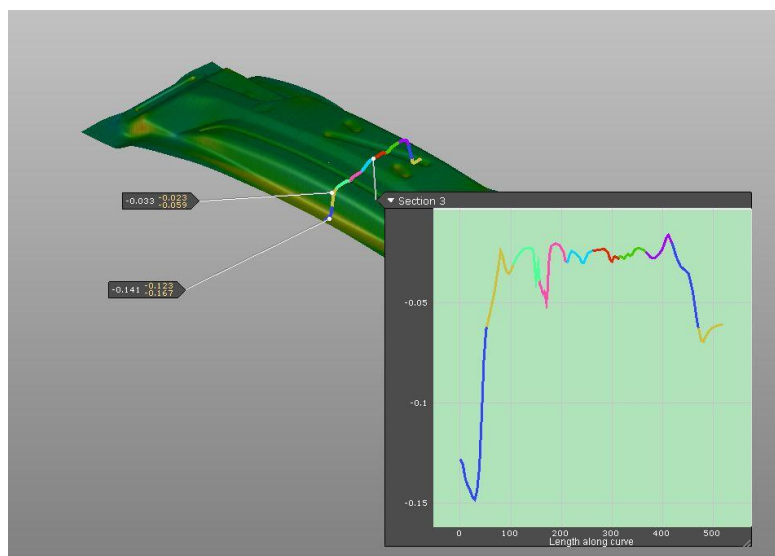


Рисунок 3.5 - Сечение № 3

В сечении №4 диаграмма отклоняется вниз в двух зонах подштамповок (14% и 15% соответственно), что в данном случае не является особо критичным (рис. 3.6):

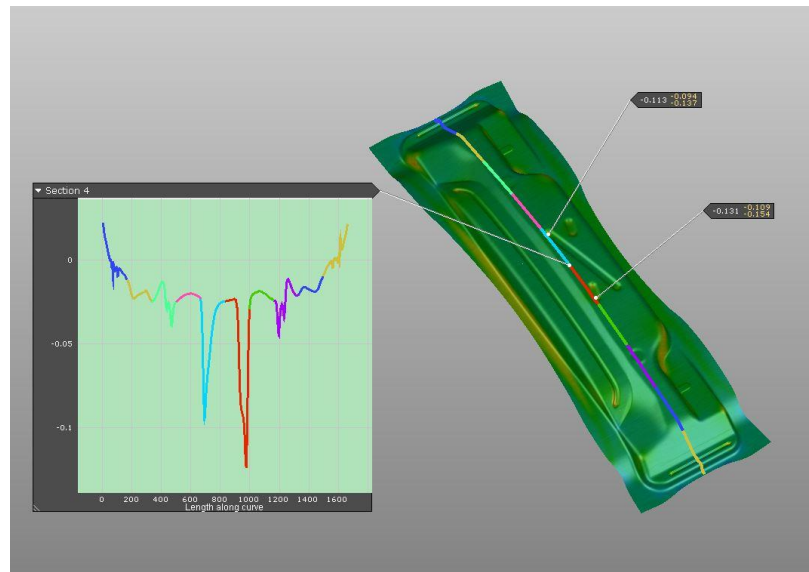


Рисунок 3.7 - Сечение № 4

Итак, значение утонения во всех сечениях является допустимым и можно приступить к определению чувствительности процесса к переменным ограничения.

3.2.Определение чувствительности процесса штамповки к назначенным переменным ограничениям

Для начала необходимо разработать технологический процесс производства детали, оценить существующие проблемы (рис. 3.8):

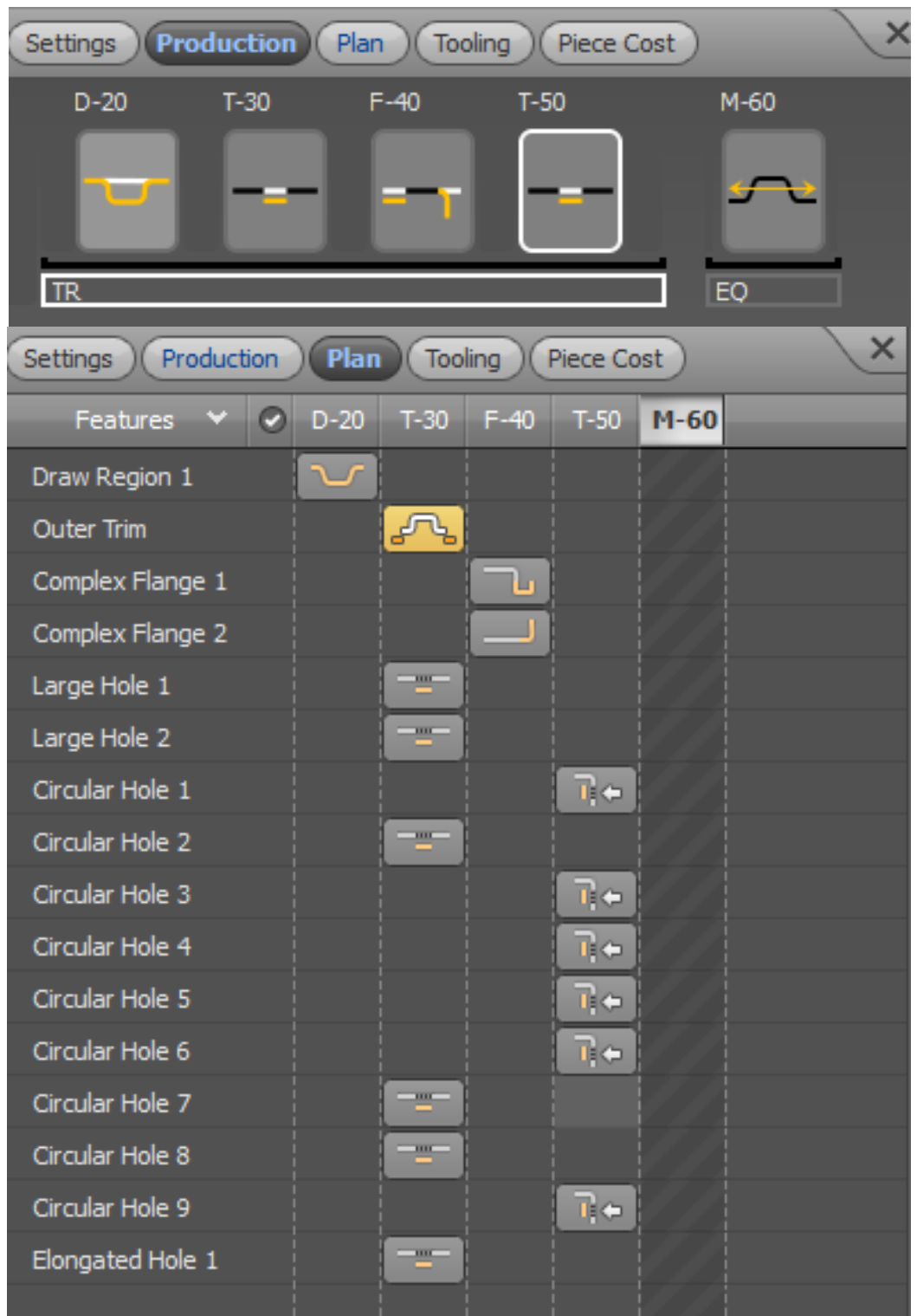


Рисунок 3.8 – Технологический процесс

Весь технологический процесс будет состоять из 4 следующих операций:

- вытяжка (рис. 3.9):

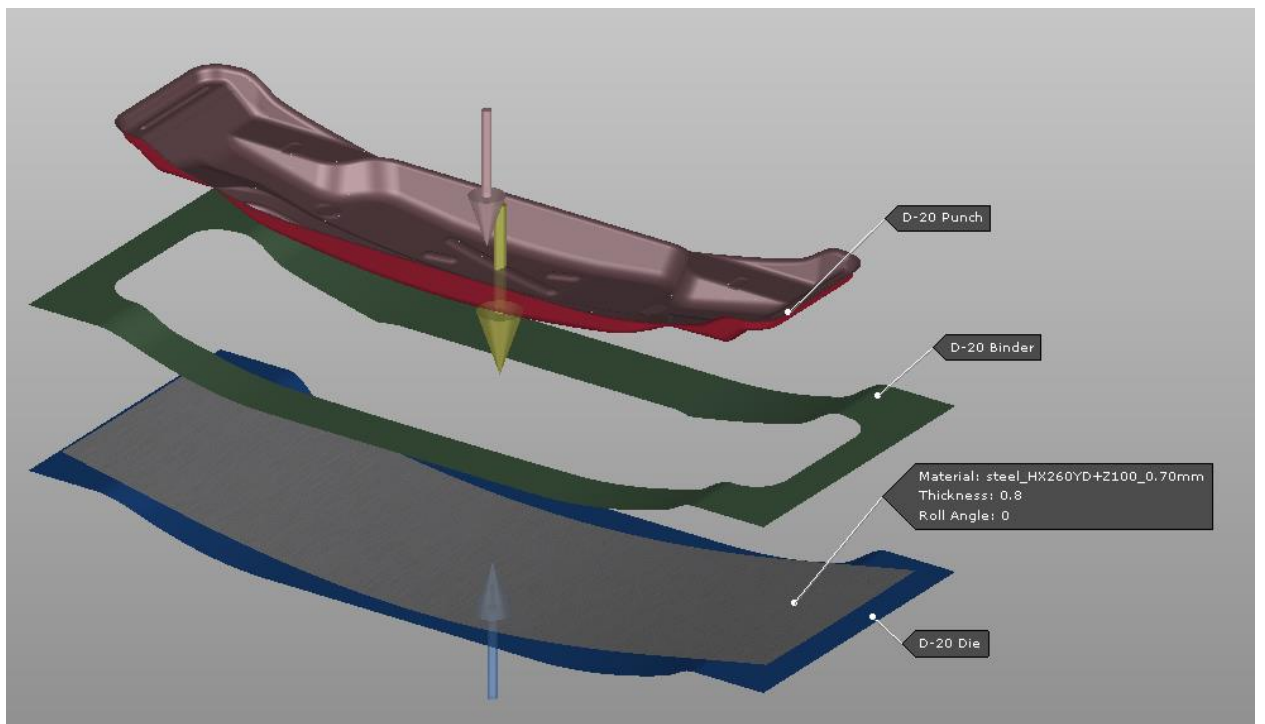


Рисунок 3.9 - Вытяжка

- обрезка и пробивка (рис 3.10):

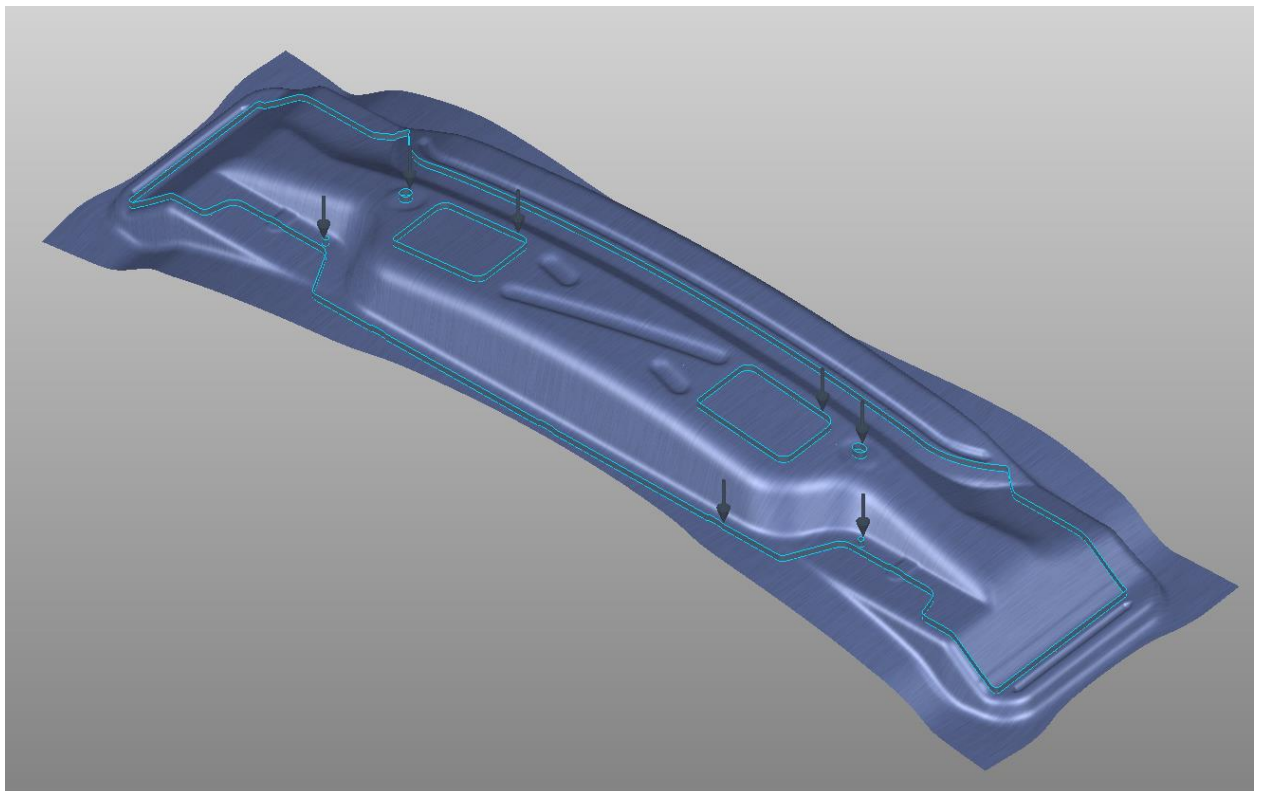


Рисунок 3.10 – Обрезка и пробивка

- правка, фланцовка (рис 3.11):

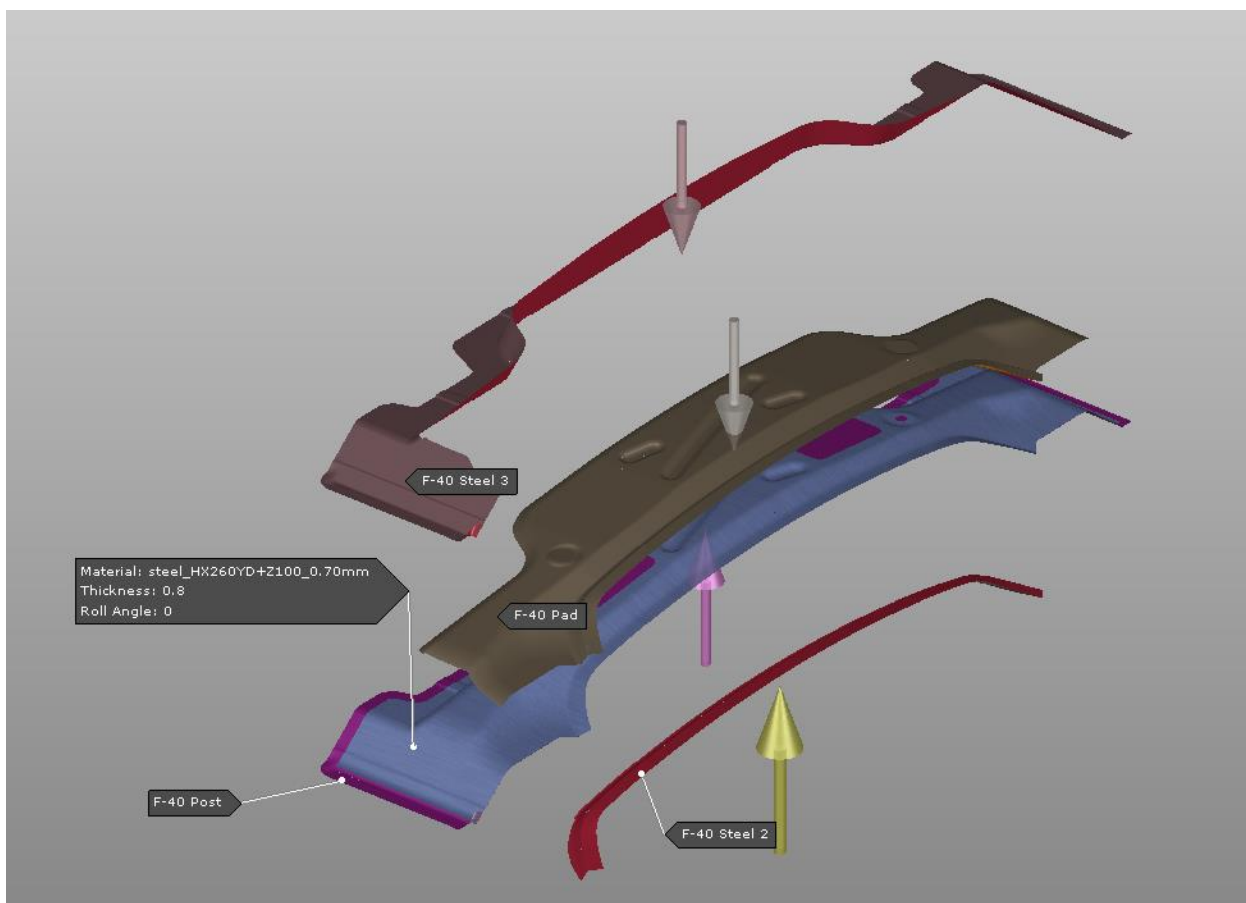


Рисунок 3.11 – Правка, фланцовка

- пробивка, клиновья пробивка (рис 3.12):

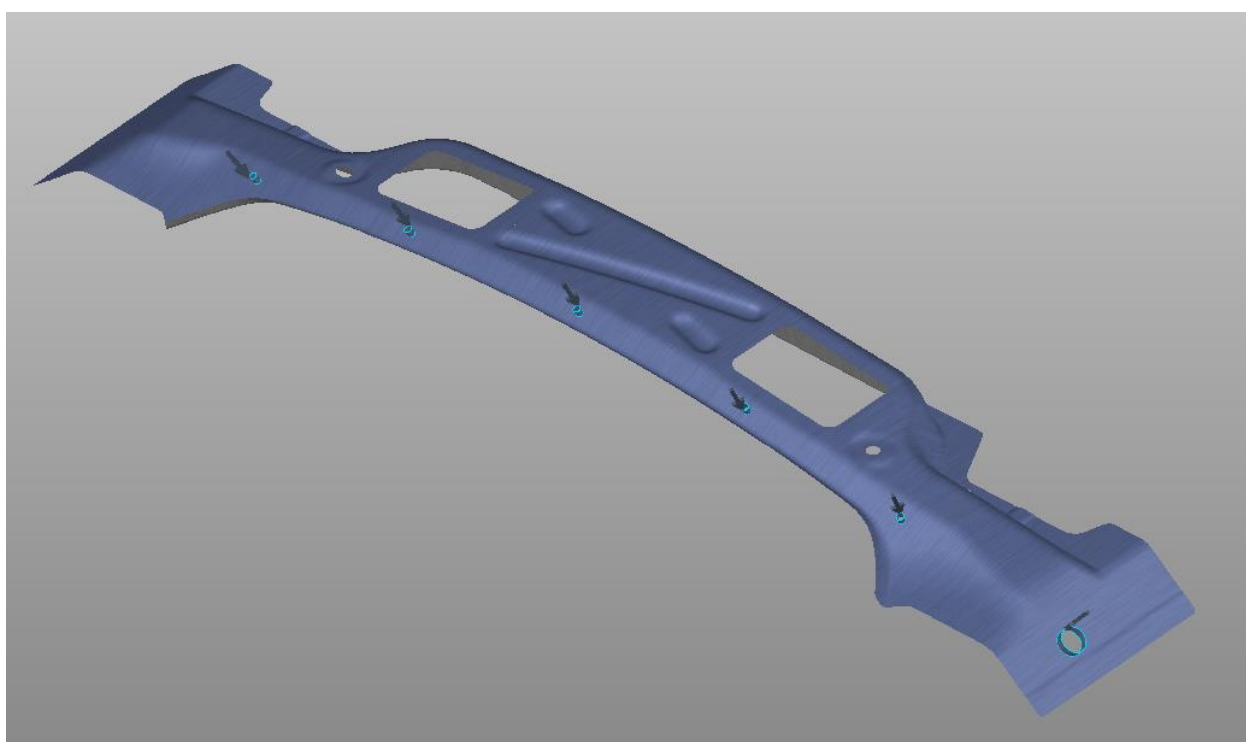


Рисунок 3.12 – Пробивка, клиновья пробивка

Данный технологический процесс имеет «естественное» рассеивание по следующим 8 параметрам, которые приводят к 96 вариантам реализаций процесса (рис. 3.13):

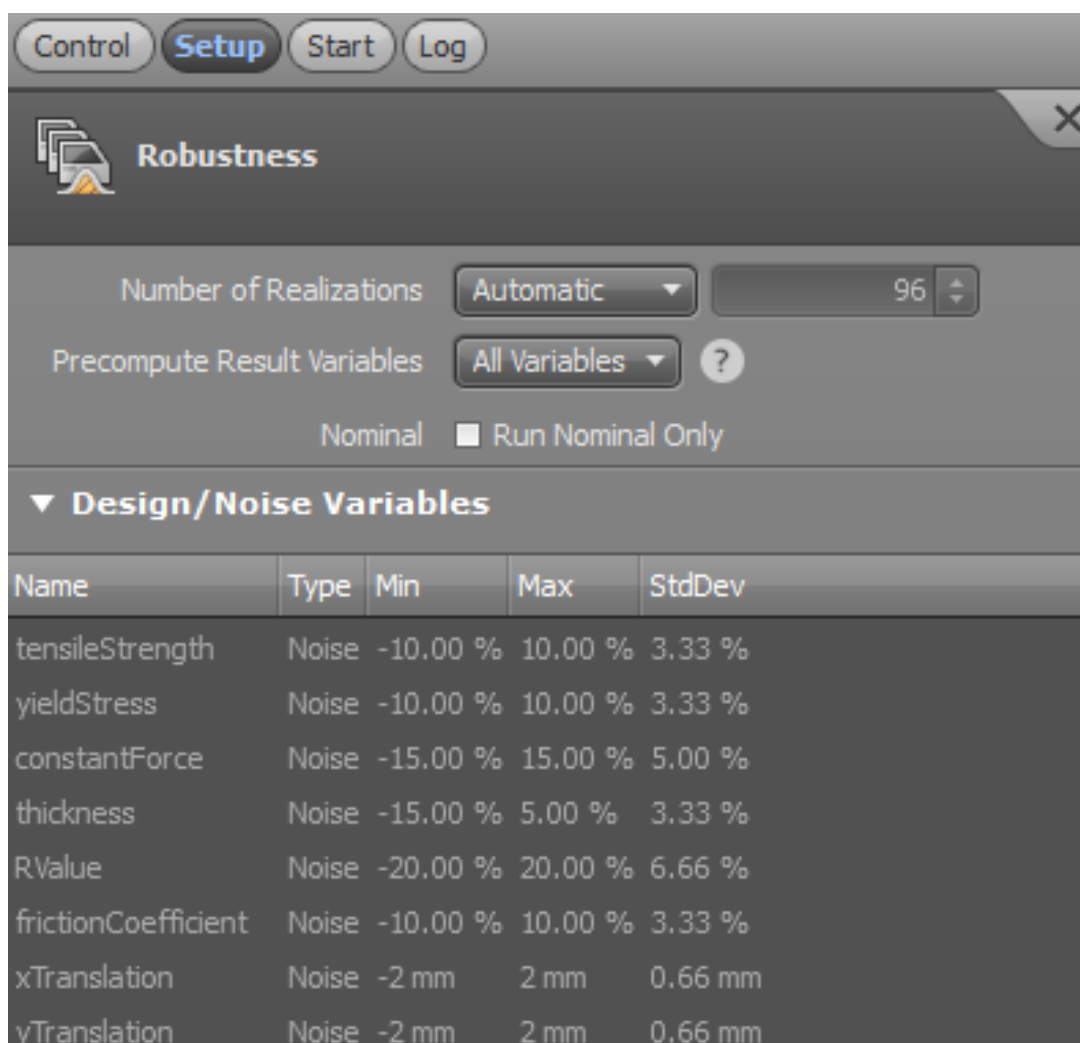


Рисунок 3.13 – Робастность: настройки процесса.

Этот «разброс» имеет влияние на следующие параметры процесса:

1. Положение заготовки в штампе по X и Y.
2. Изменчивость усилия прижима в реальном производстве.
3. Толщина заготовки от партии к партии.
4. Механические свойства заготовки (анизотропия, предел прочности, предел текучести).
5. Изменчивость условий трения.

Полный размах изменчивости стабильного процесса, обычно равный 6σ .
 Воспроизводимость технологического процесса принято оценивать индексами C_p
 и C_{pk} (рис. 3.14):

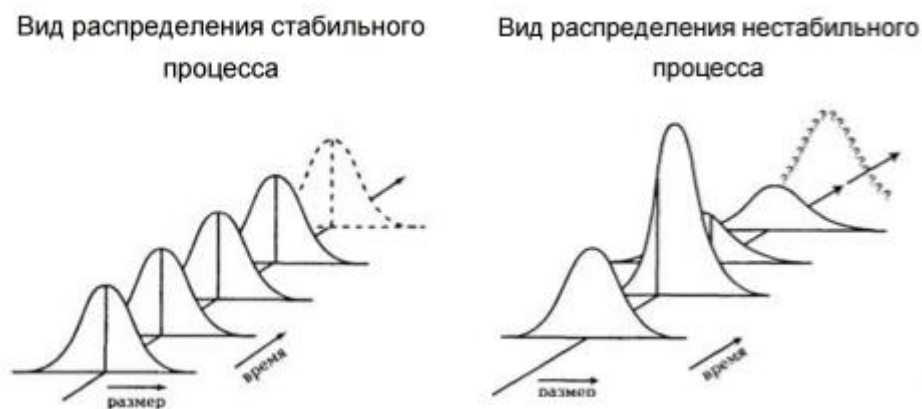


Рисунок 3.14 – Воспроизводимость техпроцесса

Разброс C_p (потенциальная пригодность) характеризует соответствие изменчивости статистически устойчивого процесса ширине поля спецификации:

$$C_p = (ВГД - НГД) / (6 * \text{сигма}),$$

где ВГД – верхняя граница допуска,

НГД – нижняя граница допуска

C_p - Это простейший и самый естественный показатель пригодности производственного процесса. Он определяется как отношение размаха допуска к размаху процесса (рис. 3.15).

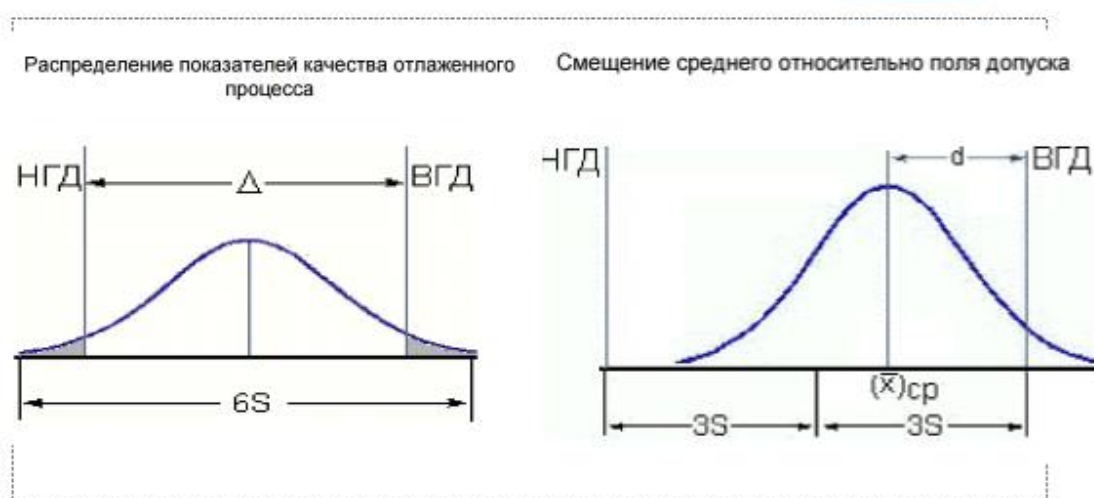


Рисунок 3.15 – ВГД и НГД

Срк- подтвержденное качество

Индекс Срк отображает то, насколько большое количество выпускаемой продукции находится за верхней или нижней границей требований.

Индекс воспроизводимости Срк характеризует рассеивание с учетом настроенности процесса на центр поля допуска.

Если $C_{pk} = 1$, то процесс соответствует требованиям на хорошем уровне, точнее говоря, ближайшая граница требований отстоит на 3 сигмы от среднего значения (большинство компаний стремятся к тому, чтобы индекс Срк был не менее 1).

Если $C_{pk} > 1$, то процесс соответствует требованиям, даже не смотря на некоторые колебания. Ближайшая граница требования отстоит более чем на 3 сигмы, что говорит о хорошей эффективности процесса.

Если $C_{pk} < 1$, то процесс скорее всего не соответствует требованиям на должном уровне, или точнее ближайшая граница требования отстоит менее чем на 3 сигмы (рис. 3.16).

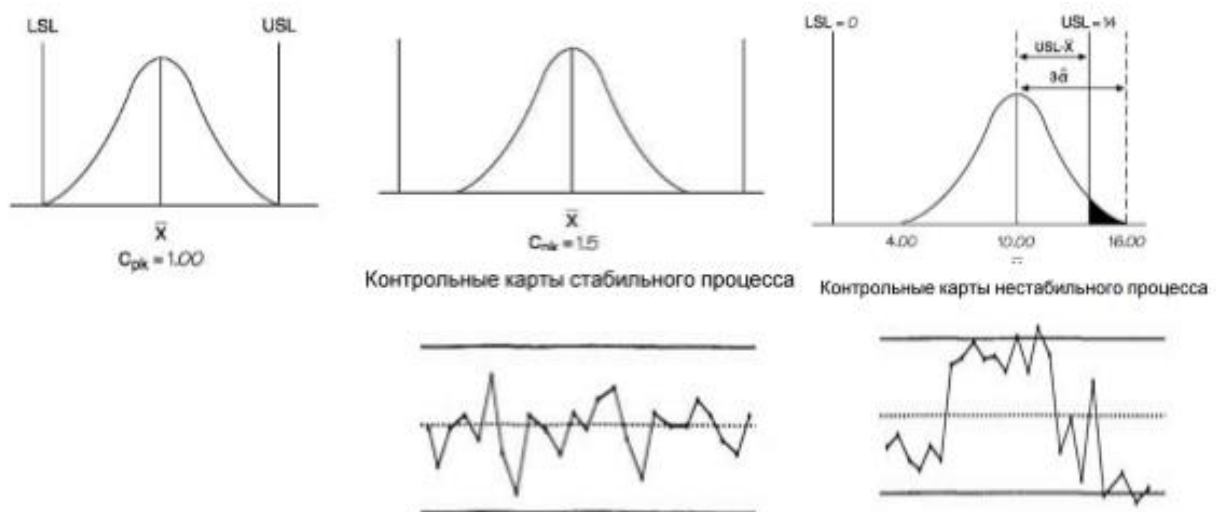


Рисунок 3.16 – Контрольные карты техпроцессов

Центрированность Срк - характеризует настроенность процесса на центр поля спецификации. $C_p < 1$ $C_{pk} < C_p$. Следует добиваться $C_{pk} = C_p > 1,33$.

По результатам расчетов в AutoForm Sigma получены следующие результаты устойчивости процесса:

Операция вытяжка - Критерий утонения C_{pk} – рис. 3.17:

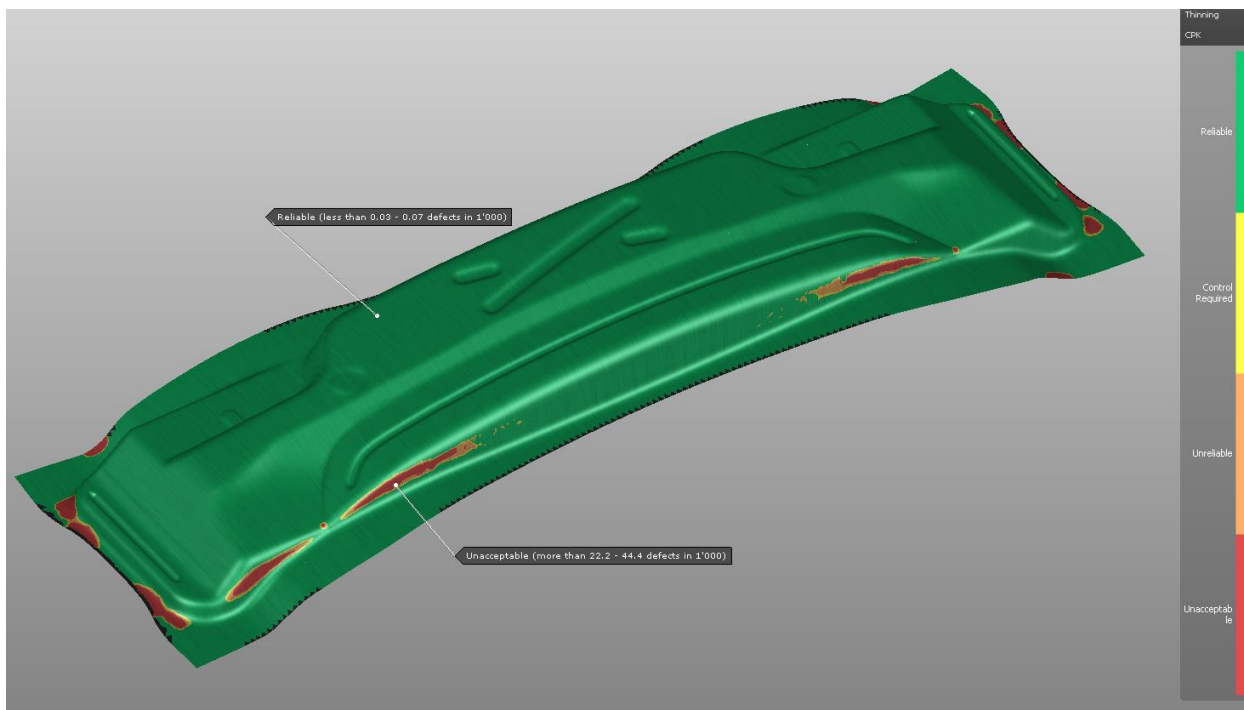


Рисунок 3.17 - Операция вытяжка - Критерий утонения C_{pk}

Операция вытяжка - Критерий утонения C_p – рис 3.18:

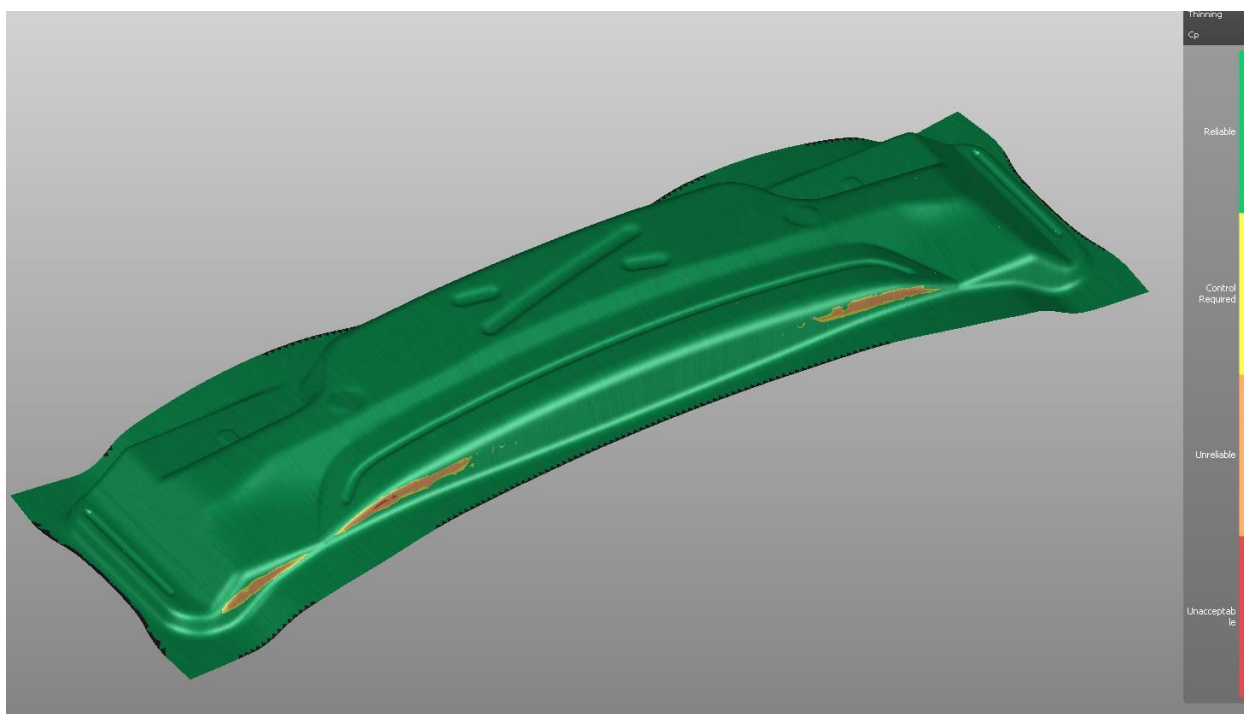


Рисунок 3.18 - Операция вытяжка - Критерий утонения C_p

Операция вытяжка - Критерий разрушения Срк – рис 3.19:

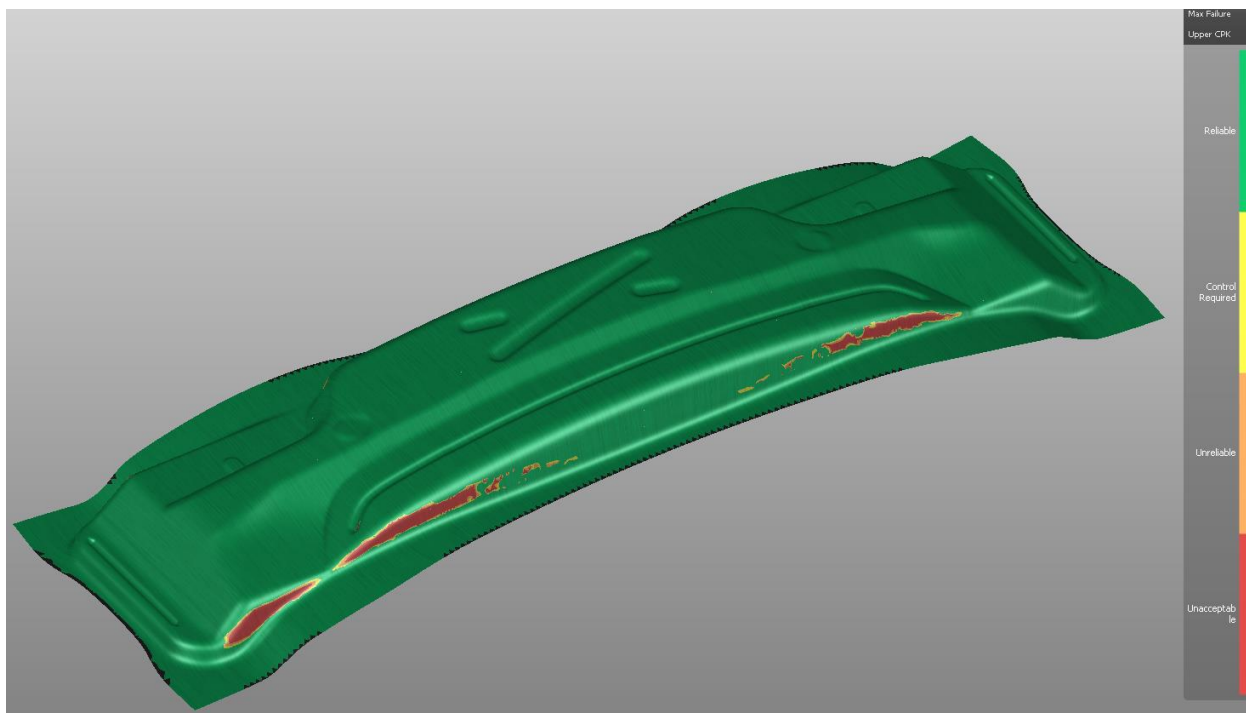


Рисунок 3.19 - Операция вытяжка - Критерий разрушения Срк

Операция вытяжка - Критерий гофрообразования Срк – рис 3.20:

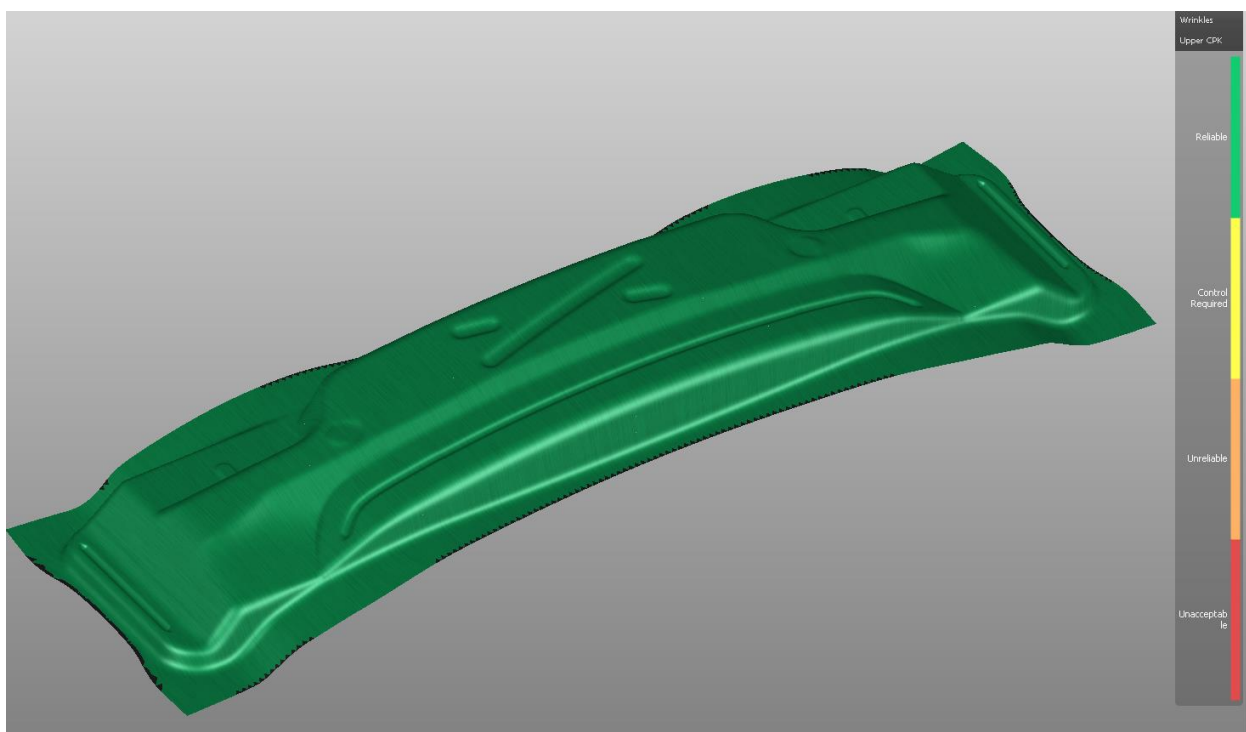


Рисунок 3.20 - Операция вытяжка - Критерий гофрообразования Срк

Операция правка - Критерий утонения Срк – рис 3.21:

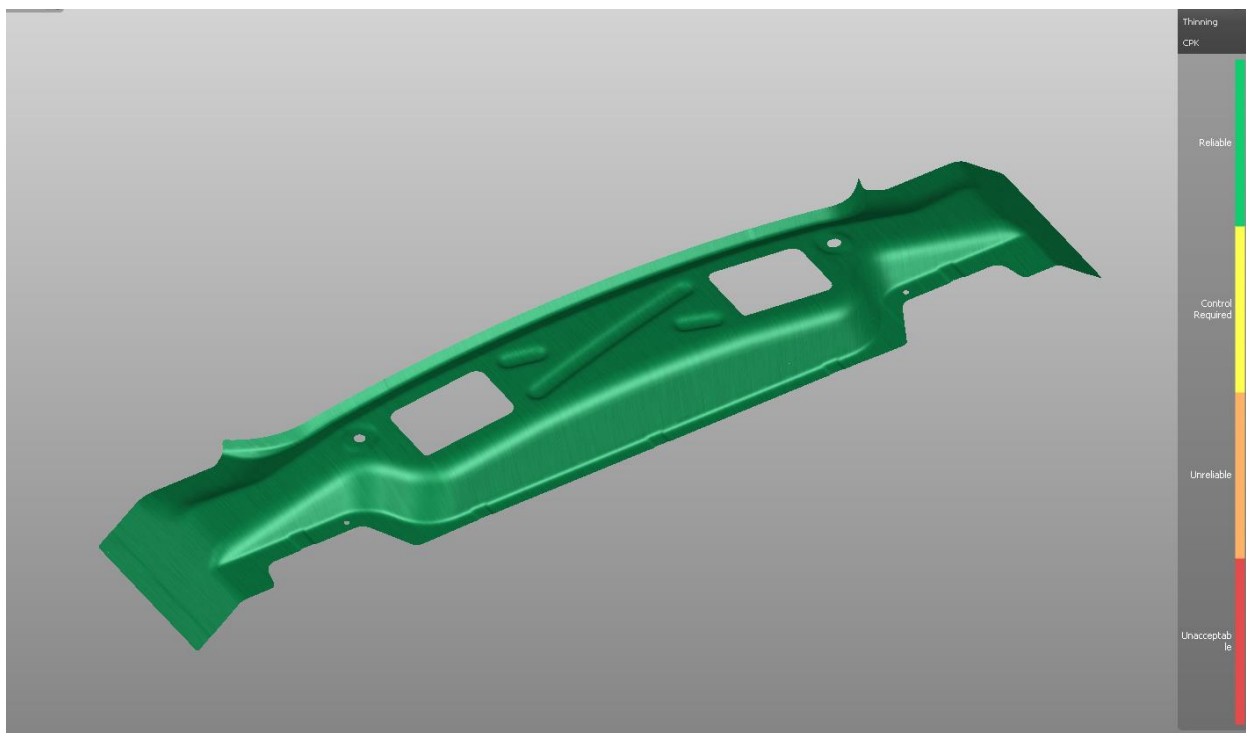


Рисунок 3.21 - Операция правка - Критерий утонения Срк

Операция правка - Критерий разрушения Срк – рис 3.22:

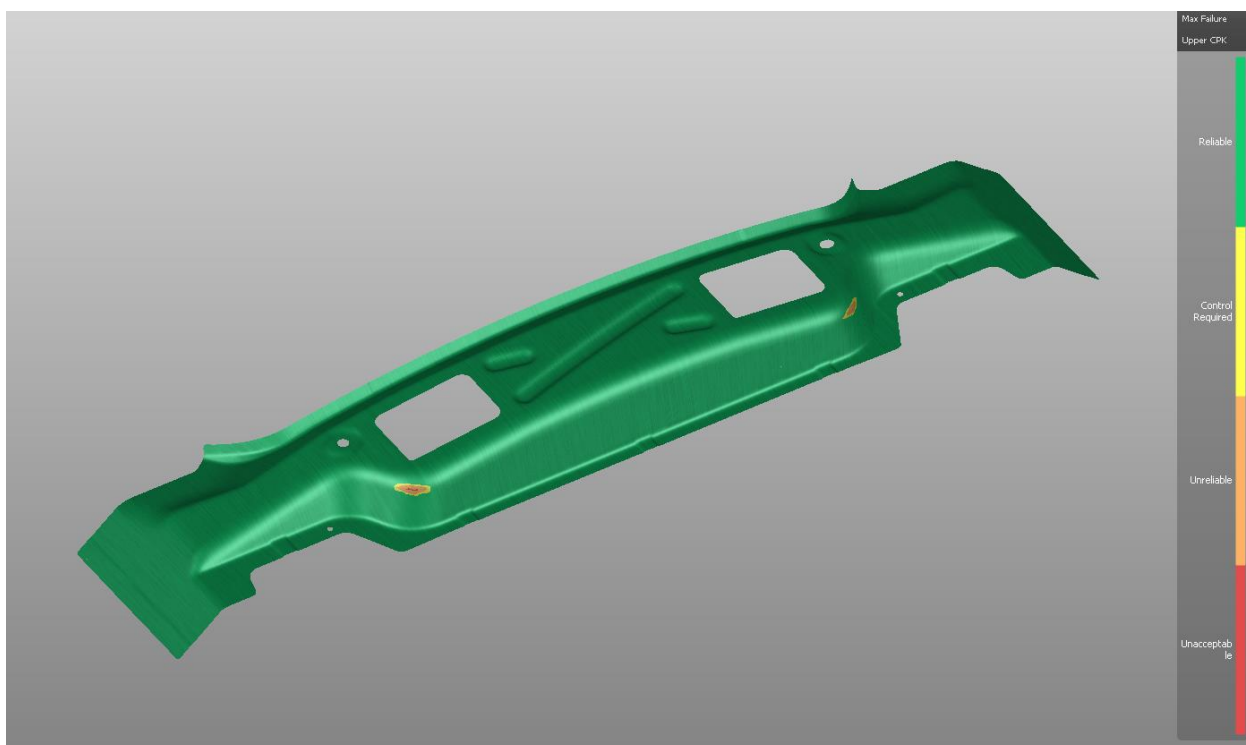


Рисунок 3.22 - Операция правка - Критерий разрушения Срк

Операция правка – гофрообразования Срк – рис 3.23:

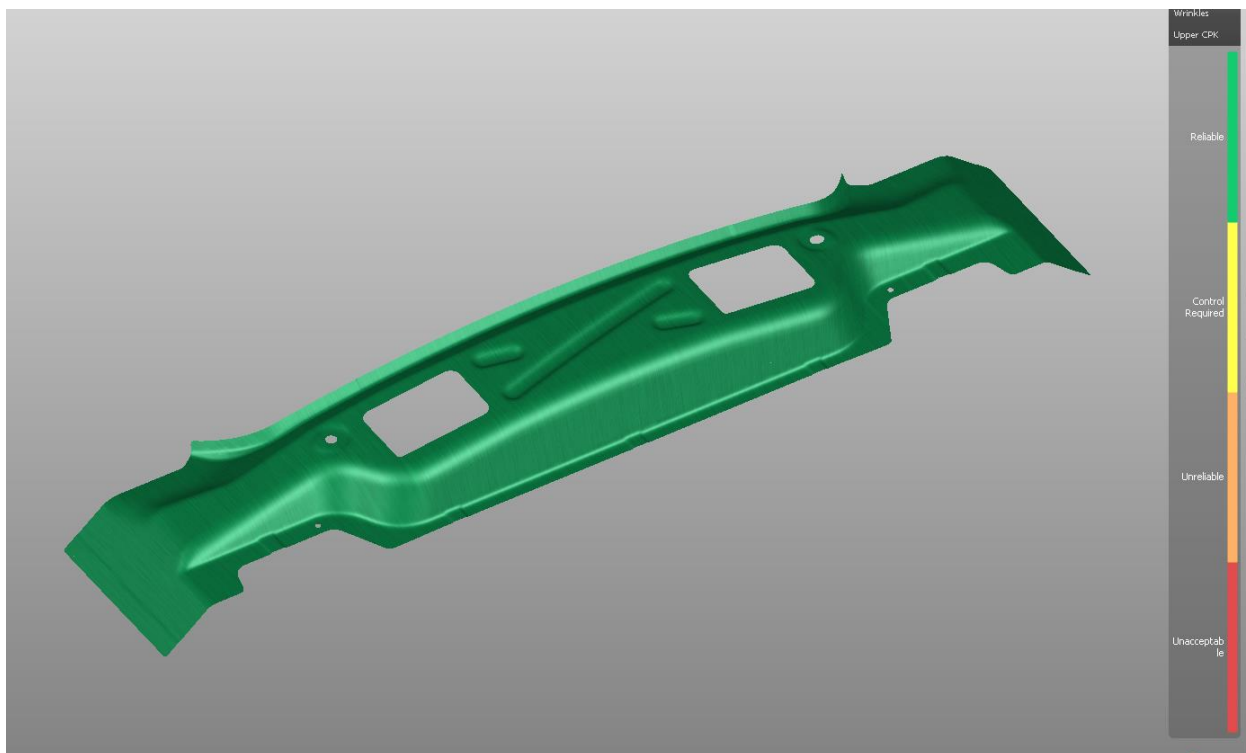


Рисунок 3.23 - Операция правка – гофрообразования Срк

Пружинение – значения перемещения находится в пределах от минус 8 мм до 8 мм (рис 3.24):

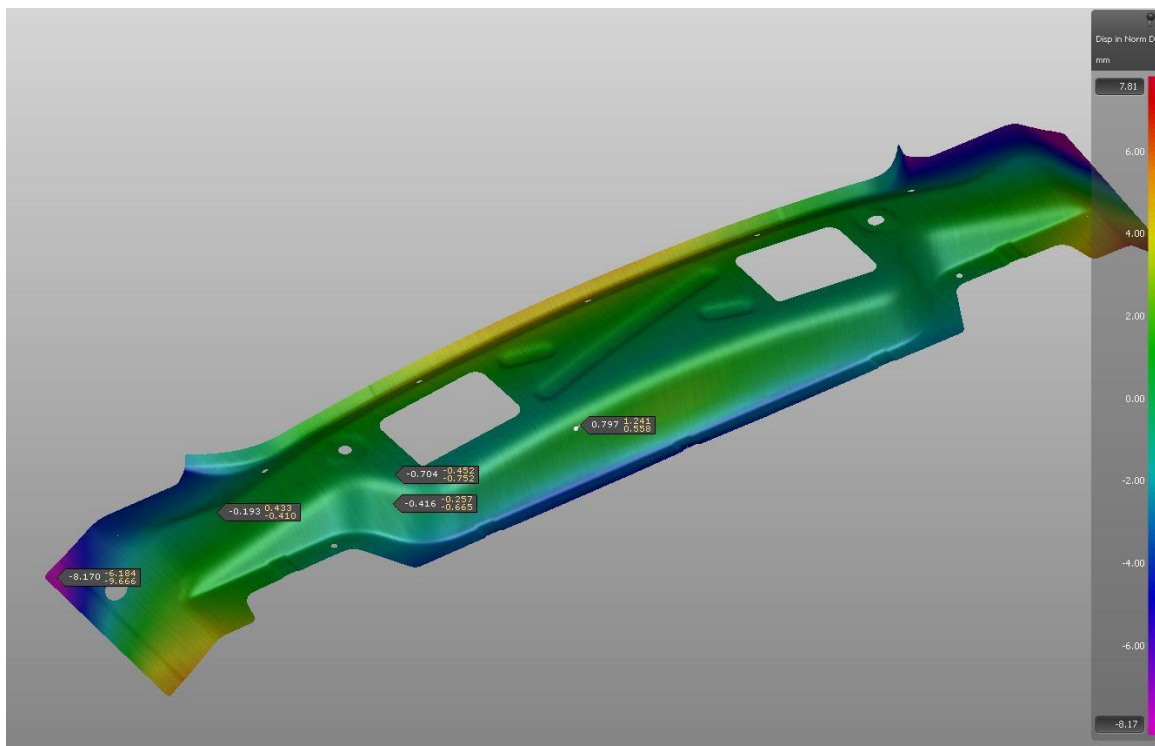


Рисунок 3.24 – Пружинение

Пружинение – Срк и Ср (рис 3.25 и 3.26):

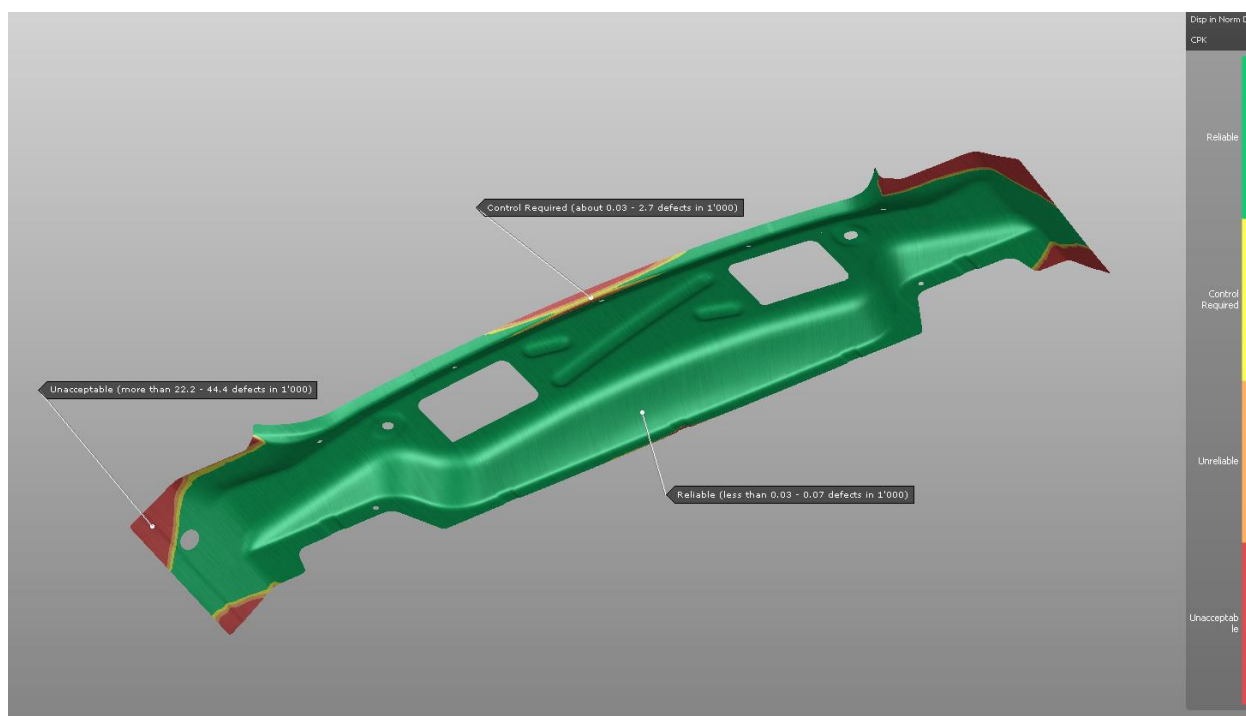


Рис. 3.25 - Пружинение Срк

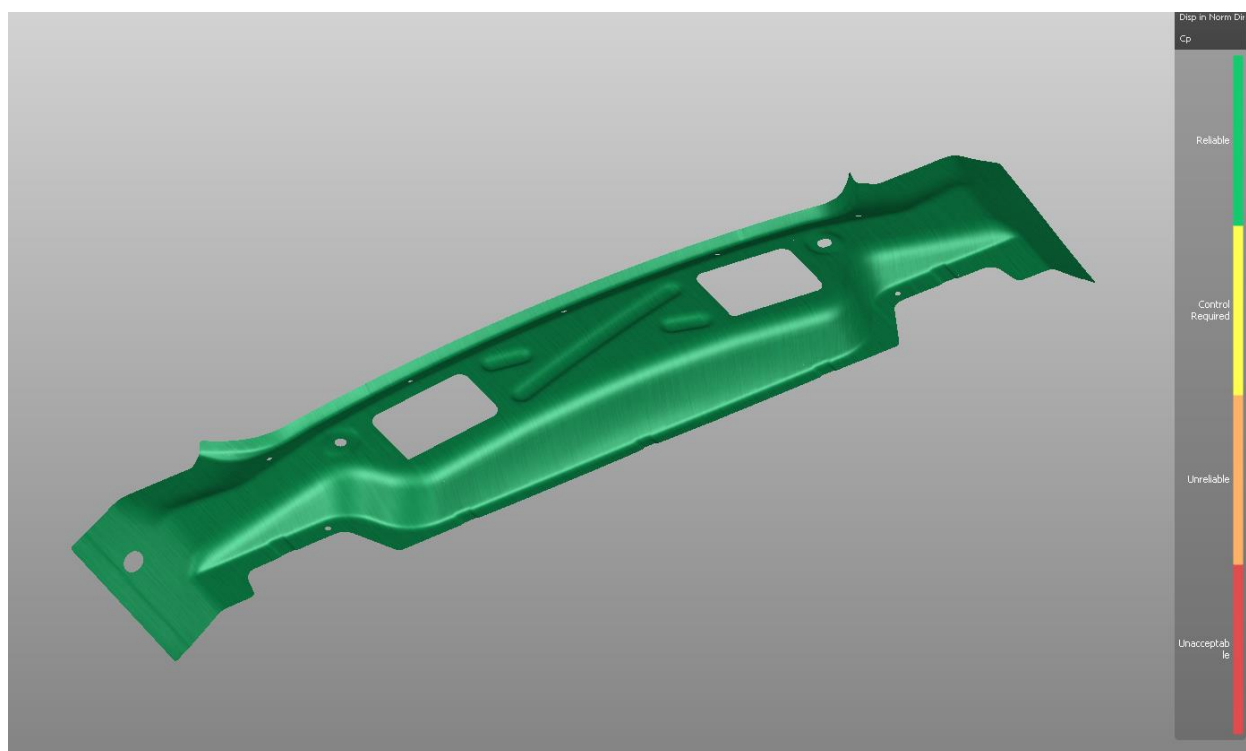


Рис. 3.26 - Пружинение Ср

Критерий Срк в данном случае показывает необходимость доводки оснастки с целью получения годной детали.

Критерий Ср в данном случае показывает, что это сделать возможно в рамках существующих изменяющихся параметров.

3.3. Редуцирование числа ограничений на основе критерия чувствительности процесса

Чувствительность процесса по критерию утонения на операции 20 «Вытяжка» (рис. 3.27):

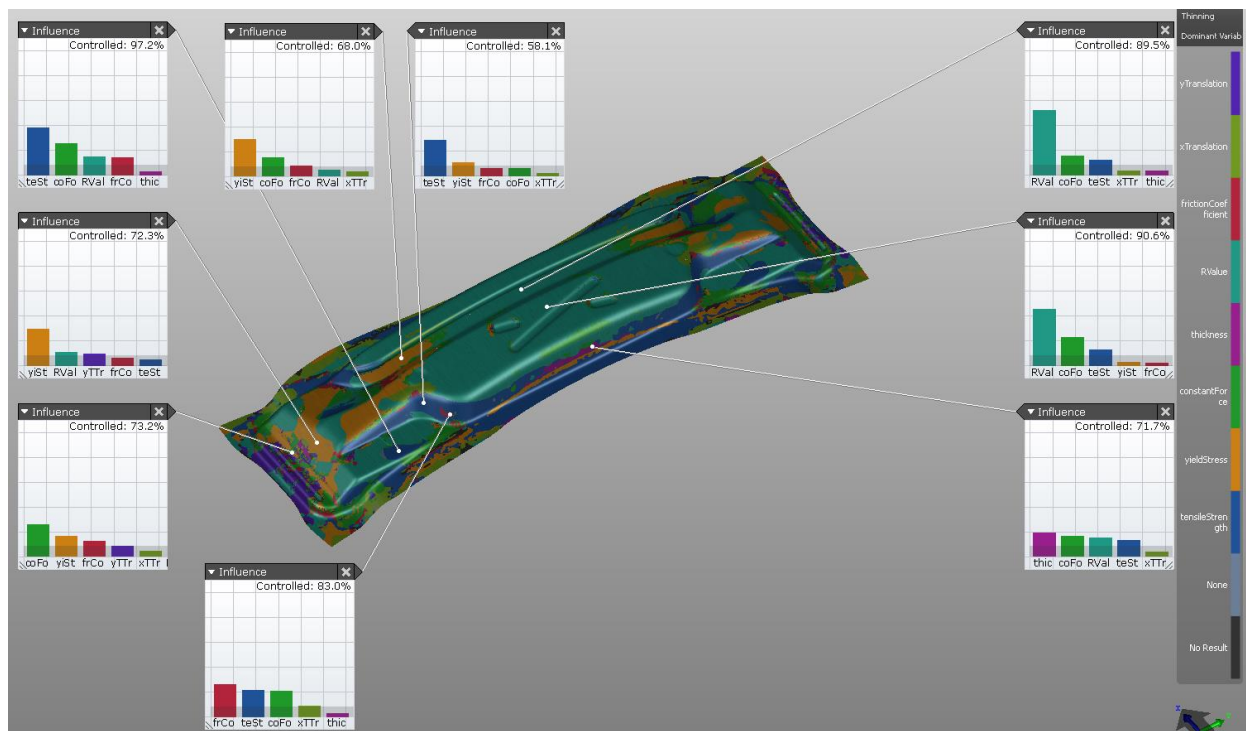


Рисунок 3.27 - Чувствительность процесса по критерию утонения на операции 20 «Вытяжка»

По полученным данным расчетов из рис 3.20 видно, что такие параметры не оказывают сильного влияния на технологический процесс:

- Толщина заготовки от партии к партии.
- Изменчивость условий трения.
- Положение заготовки в штампе по X и Y.

Чувствительность процесса по критерию разрушения на операции 20 «Вытяжка» (рис. 3.28):

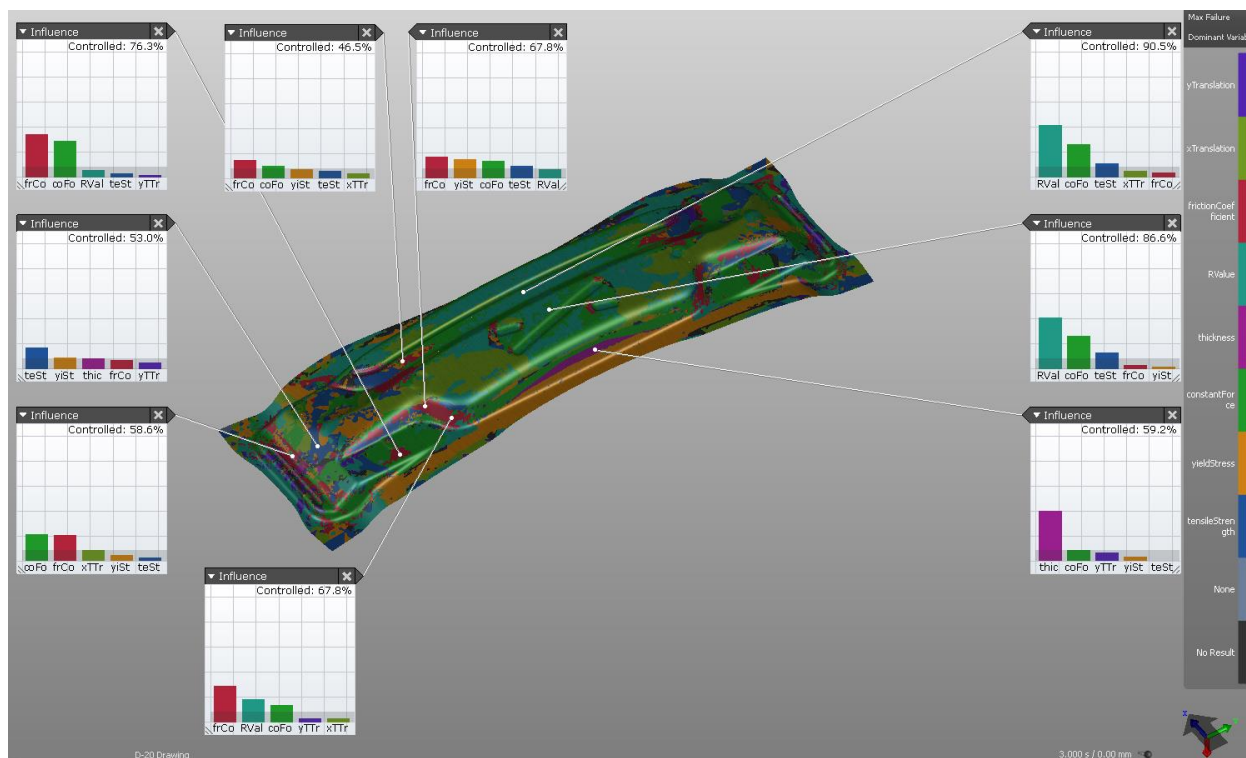


Рисунок 3.28 - Чувствительность процесса по критерию разрушения на операции 20 «Вытяжка»

По полученным данным расчетов из рис 12 видно, что такие параметры не оказывают сильного влияния на технологический процесс:

- Положение заготовки в штампе по X и Y.
- Толщина заготовки от партии к партии.

Здесь нужно отметить, что положение заготовки в штампе не сильно оказывает влияние на технологический процесс, так как вытяжка почти полностью «сидит» на ребрах и практически не уходит с них.

В то же время толщина заготовки оказывает влияние в данных типах деталях по большей части только на отвесных стенках. Поэтому целесообразно это ограничение также редуцировать, так как в данном месте разрыва не наблюдается.

Условия трения всегда оказывают существенное влияние на радиусных зонах рабочих частей штампа и плановых радиусах.

Чувствительность процесса по критерию утонения на операции 40 «Формовка» (рис. 3.29):

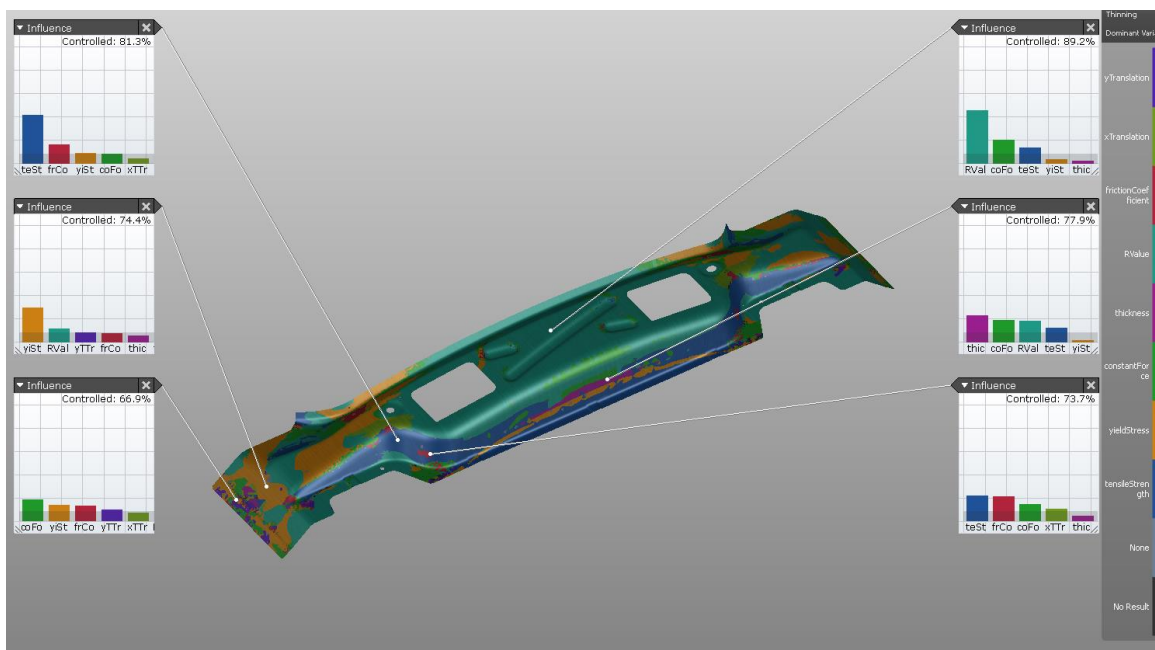


Рисунок 3.29 - Чувствительность процесса по критерию утонения на операции 40 «Формовка»:

После операции «Обрезка» число характерных точек для статистического анализа на переходе уменьшилось с 9 до 6, так как 3 точки лежали на надстройке.

По-прежнему ограничивающими факторами остались изменчивость свойства материала (коэффициент анизотропии RValue, предел текучести yeildStress и предел прочности tensileStrength), изменение усилия прижима на операции и разброс толщины листового проката.

Перемещение же детали в проеме матрицы по оси X и Y не оказывают влияния чувствительность процесса в еще большей степени по сравнению с результатами, полученными на операции «Вытяжка». Это объясняется тем, что края детали на надстройке были обрезаны на предыдущей операции и уже не влияют на точность получения детали.

Автор считает, что и изменчивостью толщины можно пренебречь, так как на критерий утонения не оказывает существенного влияния значения на стенке детали, где утонение находится в нормальных пределах.

Чувствительность процесса по критерию разрушения на операции 40 «Формовка» (рис. 3.30):

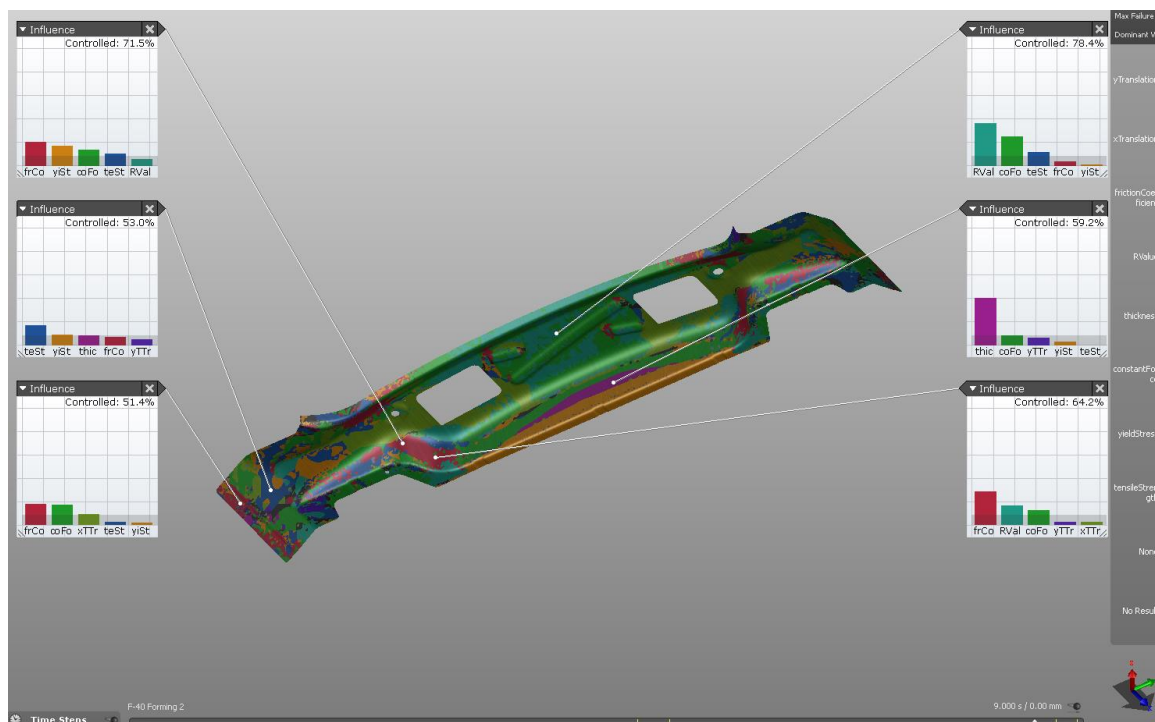


Рисунок 3.30 - Чувствительность процесса по критерию разрушения на операции 40 «Формовка»

На критерий разрушения не влияет фактор перемещения перехода по осям X и Y. Как и на операции 20 «Вытяжка» характерными факторами, влияющими на технологический процесс операции «Формовка» в зоне планового радиуса являются изменчивость условий трения, а на передней стенке изменения толщины проката.

Делая вывод из данных критериев утонения и разрушения в двух формоизменяющих операциях существенными факторами являются:

- изменение коэффициента анизотропии
- изменение предела прочности металлопроката от партии к партии
- изменение предела текучести металлопроката от партии к партии
- изменение усилия прижима вследствие изменения давления в пневмосети
- изменение условий смазки

В меньшей степени на технологический процесс влияют такие параметры:

- изменение начального положения заготовки по оси X
- изменение начального положения заготовки по оси Y
- изменение толщины заготовки от партии к партии

3.4. Разработка алгоритма оптимизации в AutoForm-Sigma^{plus}

Для начала необходимо разработать технологический процесс производства детали, определить влияние изменяющихся параметров на тех. процесс:

- изменение свойств металлопроката от партии к партии (предел прочности, текучести, коэффициента анизотропии)
- изменение начального положения заготовки (по оси X и по оси Y)
- изменение усилия прижима вследствие изменения давления в пневмосети
- изменение условий смазки
- изменение толщины заготовки от партии к партии

Для данного типового представителя детали «Поперечина панели задка» данных 8 параметров будет вполне достаточно. В общей сложности в AutoForm Sigma был проведен расчет 96 симуляций.

Алгоритм оптимизации в AutoForm Sigma схематично можно представить в виде блок-схемы (рис. 3.31):

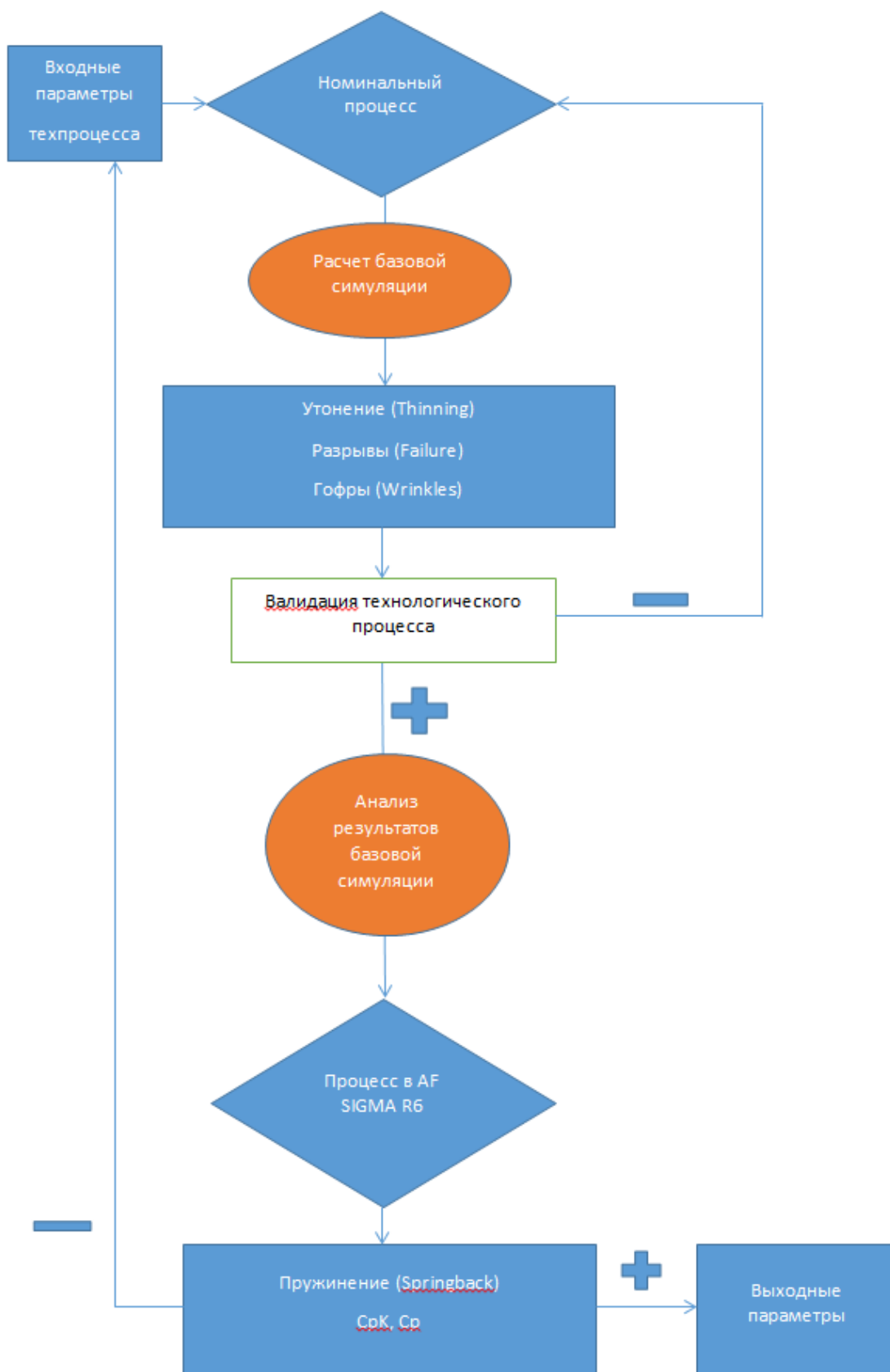


Рисунок 3.31 - Алгоритм оптимизации в AutoForm Sigma

3.5.Выводы

1. На ранних стадиях проектирования для оптимизации процессов листовой штамповки необходимо применять модуль AutoForm Sigma.

2. Для определения чувствительности процесса штамповки к назначенным переменным ограничения выполнены следующие этапы:

- Разработан технологический процесс производства детали в NX 8.0, AutoForm R6
- Определено «естественное» рассеивание параметров процесса (8 параметров – 96 реализаций)
- Определено влияние технологических ограничений на индексы пригодности S_p и S_{pk} на заданную целевую функцию оптимизации
- Приведено к минимальному количеству число ограничений на основе критерия чувствительности процесса

3. Разработан алгоритм и методика оптимизации процесса в AutoForm Sigma на основе численных экспериментов

4. Разработка методики оптимизации процесса листовой штамповки на стадии концептуального проектирования технологии изготовления автомобиля

4.1. Выбор типового представителя класса изделий кузова автомобиля

Под типовым представителем класса изделий кузова автомобиля условно понимают деталь кузова автомобиля, которая наиболее распространена в автомобилестроении.

Внутри класса изделий кузова автомобиля выбирается типовая деталь и все они объединяются единой конструкторской базой, для которых разрабатываются типовые технологические процессы, позволяющие обрабатывать сразу несколько наименований одной размерной групп деталей в автоматизированном производстве.

Выбор типового представителя в производстве начинают с выбора изделий, которое по конструкции и технологическому процессу сходно с остальными изделиями этой группы.

При этом происходит деление деталей на различные группы с учетом следующих признаков – назначении, конструктивного подобия, схожести технологического процесса, массы, габаритов, металло- и трудоемкости. Из каждой группы выбирается представитель, которые наиболее полно охватывает все упомянутые признаки.

На производстве ВАЗа для новой детали определяется его типовой представитель и создается технологическая карта изделия, в котором уже пронормированы общегодовые трудоемкости и станкоемкости, определено количество рабочих, а также наименование оборудования и типовое количество операций.

Например, деталь «Поперечина панели задка» является типовой деталью, получаемой операцией «Вытяжка» типа «Коробка». Заглянув в технологическую карту типового класса изделия, мы определим и зададим и тип штамповочного оборудования для задания процесса в AutoForm.

Например, предварительно для данной детали: вытяжка – двойного действия, усилие прижима на вытяжке 100 тс, поток не должен быть больше 6 операций (рис. 4.1):

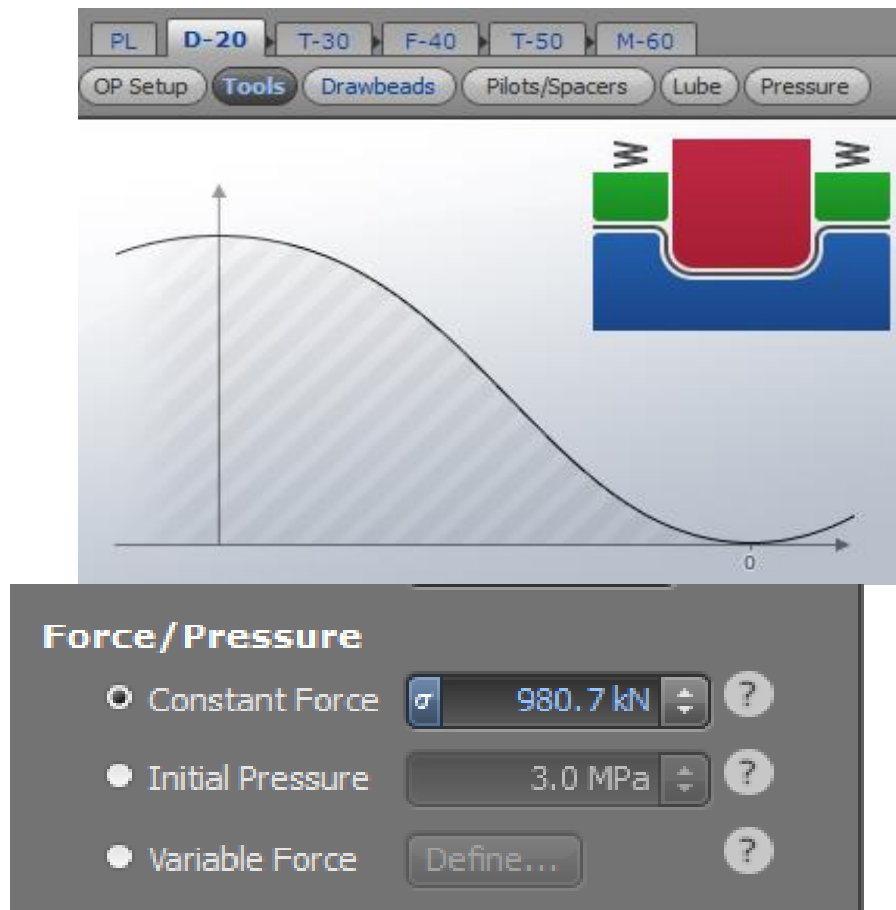


Рисунок 4.1 – Усилие прижима

Также в AutoForm можно воспользоваться и стандартами на технологическое оборудование. При этом в случае неправильного задания параметров процесса - выбору размера стола, максимального усилия или высоте детали и т.д. - мы автоматически увидим окно предупреждения.

Необходимо учесть опыт технологической проработки подобного класса деталей, так как при получении детали от конструктора к технологу для проведения анализа штампуемости в AutoForm необходимо при задании исходных данных будет построить операционный процесс или, проще говоря, технологию получения детали.

Для этого во вкладке Plan-Production необходимо задать количество и наименование всех операций для данной детали (рис. 4.2):

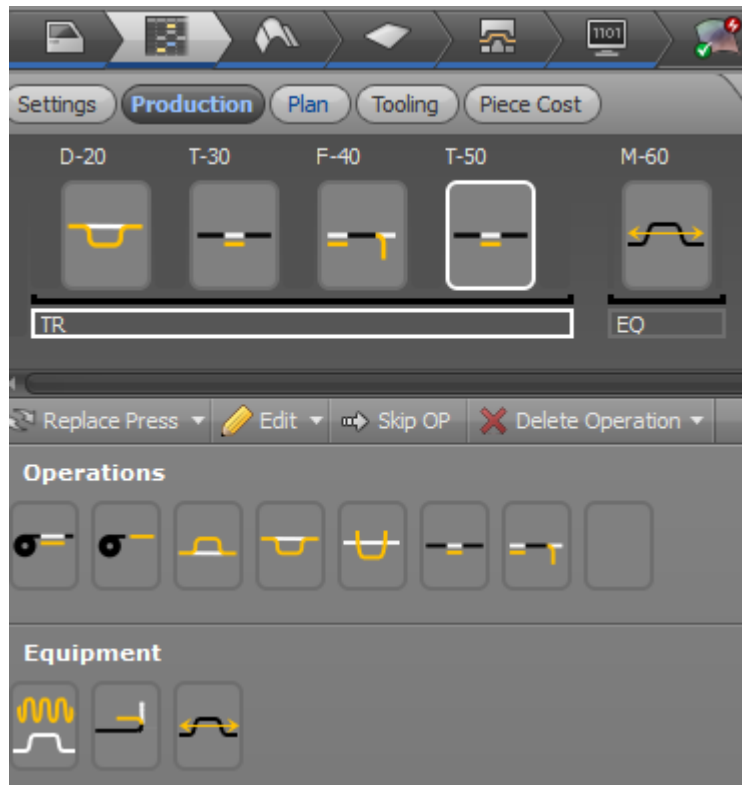


Рисунок 4.2 – План процесса

Далее мы методом AUTOPLAN или вручную задаем состав и направление инструментов (рис. 4.3):

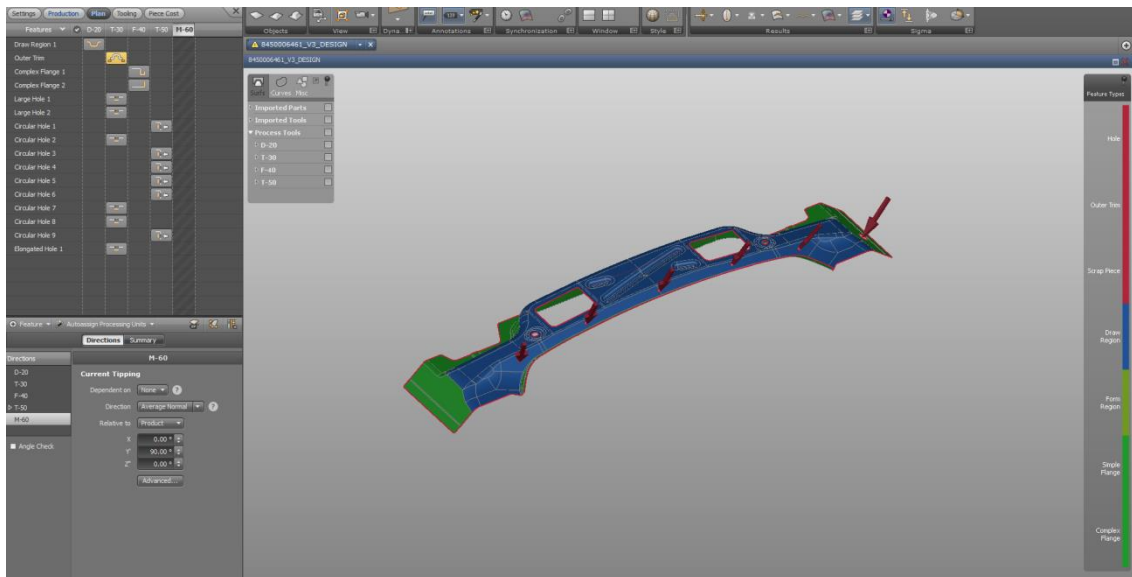


Рисунок 4.3 – Задание инструментов

Следующим шагом является задание размера заготовки и выбор рулона.

Для предприятия размер рулона стандартизирован, так как существуют типоразмеры рулонов, прокатываемых на металлургическом комбинате.

Кроме того, предварительно для данного типового класса изделия из КЦО и других нормативных технологических документов производства необходимо выбрать и существующий раскрой, и размер рулона, а также тип раскройной линии (рис. 4.4):

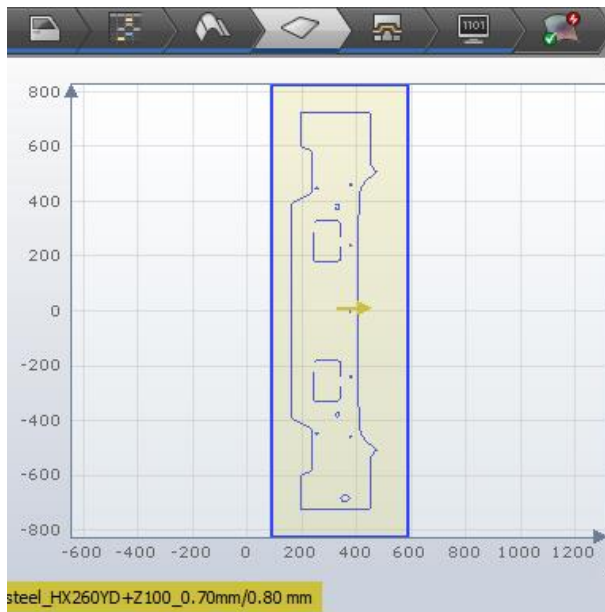


Рисунок 4.4 – Раскрой

Технология получения данного типа деталей «Поперечина панели» - глубокая вытяжка. Деталь должна быть хорошо растянута, поэтому введены перетяжные ребра. При этом на вытяжке не должно быть разрывов, поэтому радиуса рабочих частей «размыты».

Конструктивно имеет три зоны фланцовки, зону правки радиусов, клиновой пробивки. Также для данного типового класса известно, что наиболее частым дефектом в производстве является задиры, реже разрывы на верхнем и плановом радиусах при неточном позиционировании.

Поэтому уже на этапе построения технологической надстройки эти риски были сведены к минимуму, а на этапе анализа в Sigma определена оценка чувствительности процесса.

4.2. Разработка целевой функции и ограничений для типовой детали

Стратегию разработки критерия оптимальности была проведена ранее в пункте 2.1 настоящей работы.

Задача оптимизации технологического процесса штамповки является многокритериальной, поэтому следует выделить критерии процесса наиболее влияющие на данную типовую деталь. Для этого необходимо разработать целевую функцию оптимизации и определить количественно ее ограничения.

Например, целевая функция оптимизации качества изделия:

$$F = F(f_1, f_2, f_3, f_4) \rightarrow \max,$$

где f_1 – целевая функция получения детали без разрывов,

f_2 – целевая функция получения детали без складок (гофров),

f_3 – целевая функция получения детали без царапин (рисок),

f_4 – целевая функция получения детали с допустимым пружинением

Наибольшую значимость имеет целевая функция f_1 – получение детали без разрывов, так как при наличии гофров деталь может быть вполне приемлема по нормам качества. Наличие на детали разрывов всегда будет являться браком.

Иными словами необходимо привести многокритериальной к однокритериальной целевой функции на основе FLD диаграммы, то есть целевая функция оптимизации качества изделия:

$$F = F(f_1) \rightarrow \max,$$

где f_1 – целевая функция получения детали без разрывов.

Условиями ограничений на ДПД можно выделить область для поиска целевой функции. Эту зону характеризуют максимальное удаление точек в диаграмме ДПД от зоны утонения при условии, что точки должны располагаться выше линии образования складок.

Измерив расстояние для точек конечно-элементной сетки и обозначая соответствующие им главные деформации на ДПД, получим значение точек, входящих в область оптимальных деформаций без образования разрывов и гофров:

$$x_{\text{dist2flc}} = \varepsilon_{\text{maj}}(\varepsilon_{\text{min}}) - \varepsilon_{\text{flc}}(\varepsilon_{\text{min}})$$

На ДПД нижней точкой пересечения кривой образования складок и области точек является значение $\epsilon_{min} = -0.05$, поэтому $\epsilon_{wrc} = -\epsilon_{min} - 0.05$ (рис. 4.5):

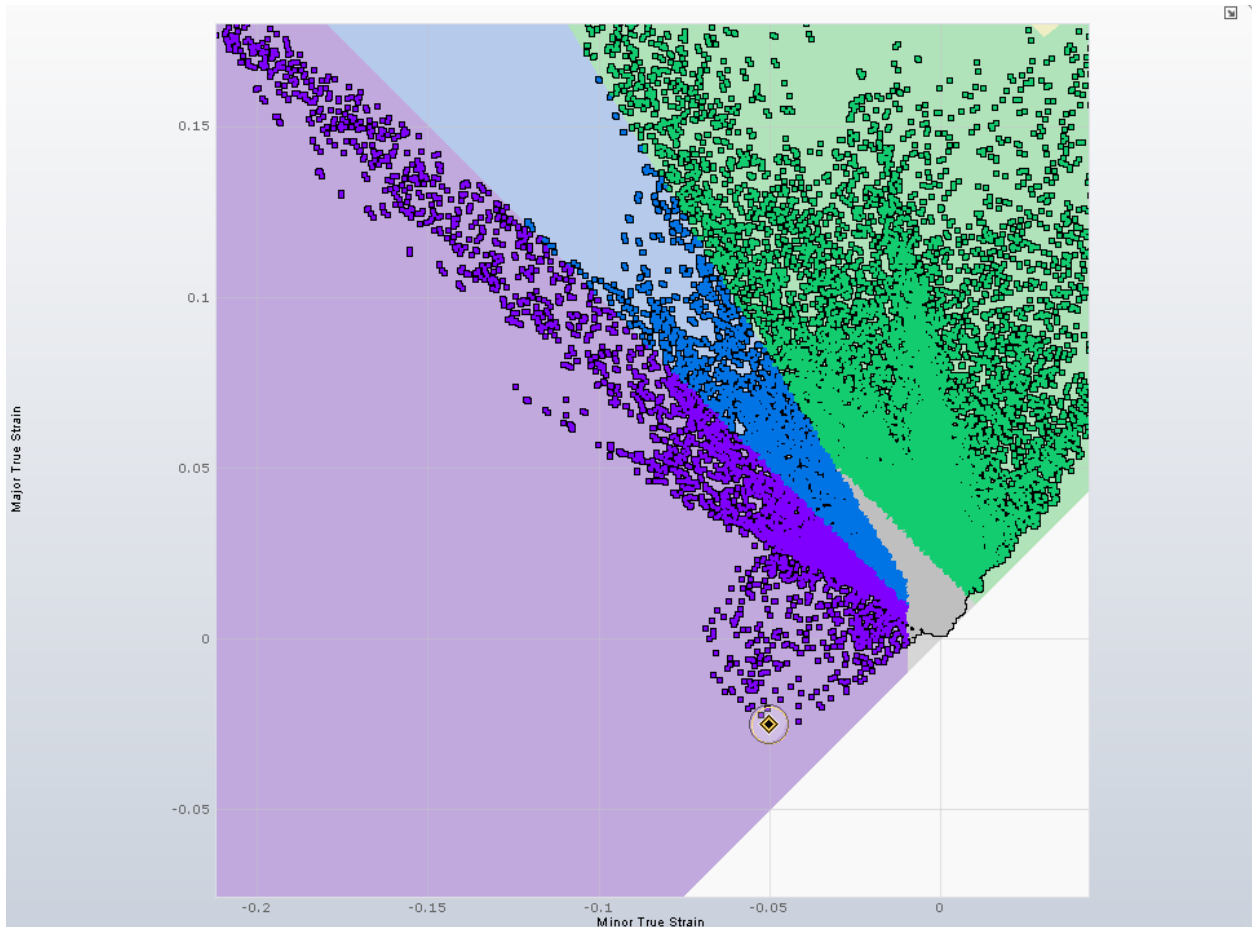


Рисунок 4.5 - Область складкообразования

На предыдущем этапе мы определились, что изменение входных переменных будет включать в себя изменение давления прижима на заготовку, а также изменение геометрических параметров заготовки, таких как позиционирование заготовки по оси X и размеров самой заготовки (рис.4.6):

Переменная	Параметр	Базовое значение	Нижняя граница значения	Верхняя граница значения
Предел прочности	tensileStrenght	420MPa	357 MPa	483 MPa
Предел текучести	yieldStress	303MPa	258 MPa	349 MPa

Усилие прижима	constant Force	1000kN	850kN	1150kN
Толщина заготовки	thickness	0.8мм	0.68мм	0.84мм
Пластическая анизотропия	Rvalue	1.55	1.395	1.705
Коэффициент трения	Friction Coefficient	0.15	0.135	0.165
Положение по осям X и Y.	xTranslation yTranslation	0мм	-2мм	+2мм

Рисунок 4.6 – Диапазоны изменения переменных

Явных ограничений, которые бы смогли описать невозможность задания данной задачи проектирования процесса, у данной целевой функции нет.

Была определена оптимизированную математическую модель:

Max f (tensileStrenght, yieldStress, constant Force, thickness, Rvalue, Friction Coefficient, xTranslation, yTranslation) = $\epsilon_{maj}(\epsilon_{min}) - \epsilon_{flc}(\epsilon_{min})$.

$$357 \text{ MPa} \leq \text{tensileStrenght} \leq 483 \text{ MPa}$$

$$258 \text{ MPa} \leq \text{yieldStress} \leq 349 \text{ MPa}$$

$$850\text{kN} \leq \text{constant Force} \leq 1150\text{kN}$$

$$0.68\text{мм} \leq \text{thickness} \leq 0.84\text{мм}$$

$$1.395 \leq \text{Rvalue} \leq 1.705$$

$$0.135 \leq \text{Friction Coefficient} \leq 0.165$$

$$-2 \leq \text{xTranslation} \leq 2\text{мм}$$

$$-2 \leq \text{yTranslation} \leq 2\text{мм}$$

Делая вывод вышесказанному, определено, что входные параметры изменения переменных проектирования будут включать в себя также изменения

давления прижима на заготовку и изменение геометрии перетяжных ребер (коэффициентов торможения).

4.3. Разработка методики подготовки данных в препроцессоре AutoForm-Sigma^{plus}

Как отмечалось в предыдущей главе, модуль AutoForm Sigma включает в себя два вида анализа, один из которых, это анализ на улучшение технологического процесса.

Улучшение технологического процесса направлено на поиск наилучших параметров технологического перехода, при которых будут получены наиболее благоприятные результаты по штампуемости детали.

Анализ на улучшение технологического процесса включает в себя следующие этапы:

- 1) Подготовка к расчету (Setup)
- 2) Расчет (Calculation)
- 3) Анализ результатов (Evaluation)

Методика подготовки данных в препроцессоре AutoForm Sigma включает в себя следующие основные этапы:

- а) Загрузка базовой симуляции (рис. 4.6):

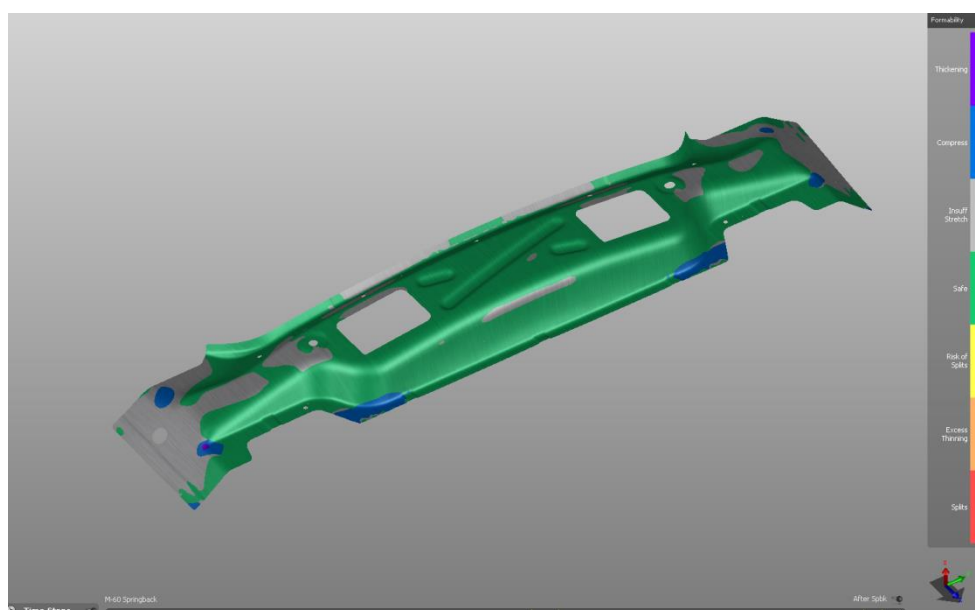


Рисунок 4.6 - Базовая симуляция

К базовой симуляции перед расчетом предъявляются следующие важные требования:

- обеспечение хорошего закрытия прижима;
- обеспечение хорошего первого контакта заготовки с пуансоном после закрытия прижима (без складок)
- при использовании тормозных ребер, задать среднее значение торможения ребра равным 0,35 по всей длине ребра;
- убедиться, что в процессе симуляции заготовка не перетекает за геометрию ребра.

б) Задание стандартов для проведения анализа (рис. 4.7):

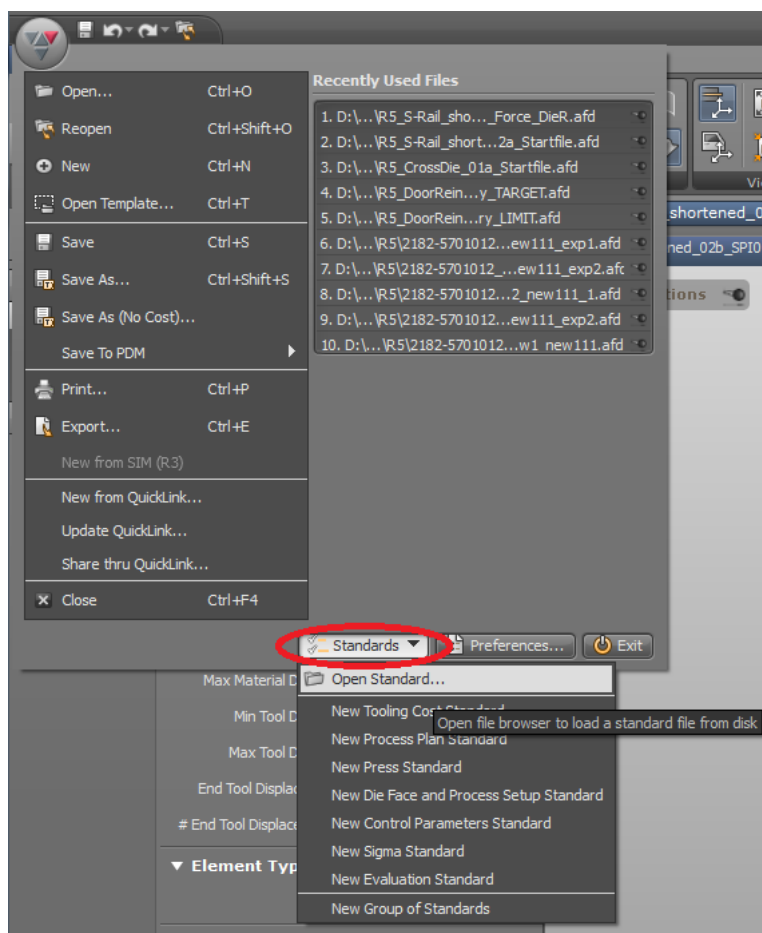


Рисунок 4.7 – Задание стандартов

в) Задание лимитов, по возможности, для таких параметров как:

- геометрия перехода (радиуса матрицы, пуансона; наклон стенок технологической надстройки);

На вкладке Die Face> Drawing> Addendum> Master Profile Options> All можно задать лимиты всех этих параметров (min и max значения)

Например, задается лимит значения радиуса матрицы от 4 до 10 мм

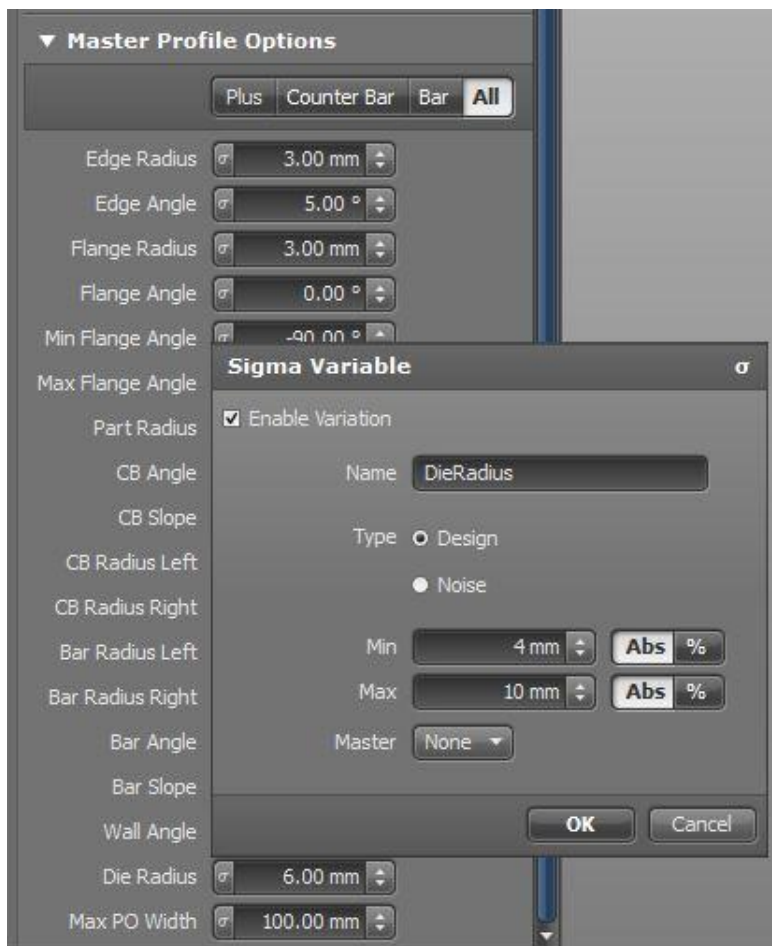


Рисунок 4.8 – Задание значений пределов отклонения радиуса матрицы

Но данная математическая модель была импортирована в формате. IGS из UGNX 8.0, поэтому задание лимитов было невозможно сделать посредством Die Design.

Для этого во вкладке Деталь-Modify были созданы регионы «Заплатки», для которых был задан разброс фактических значений точек, показанную на рисунке в виде центральной линии (рис. 4.9):

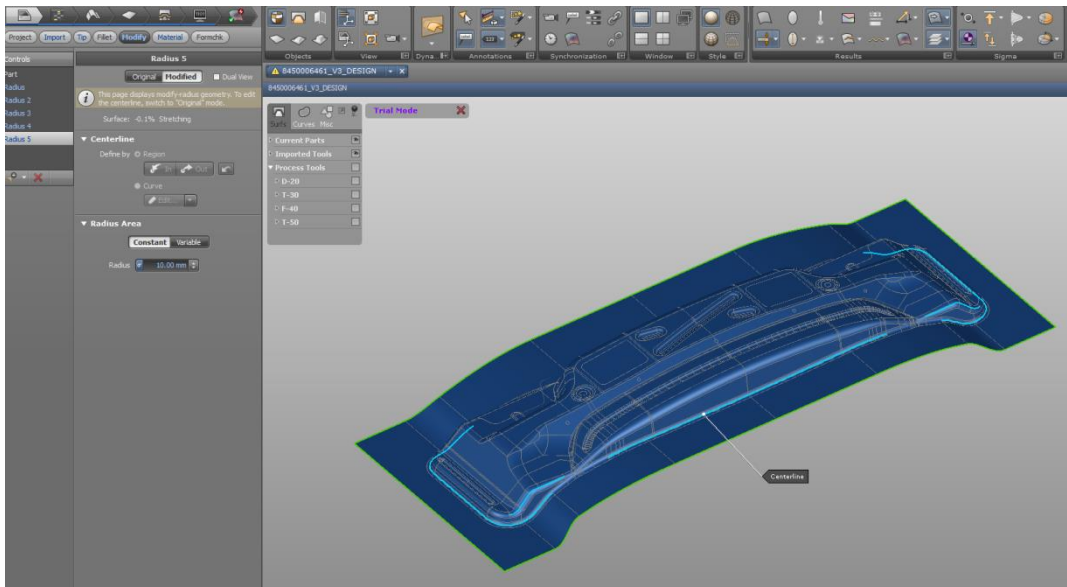


Рисунок 4.9 – Вытяжной переход

Для каждого значения радиуса матрицы/пуансона на данных 5 участках были заданы вариации значений (рис. 4.10):

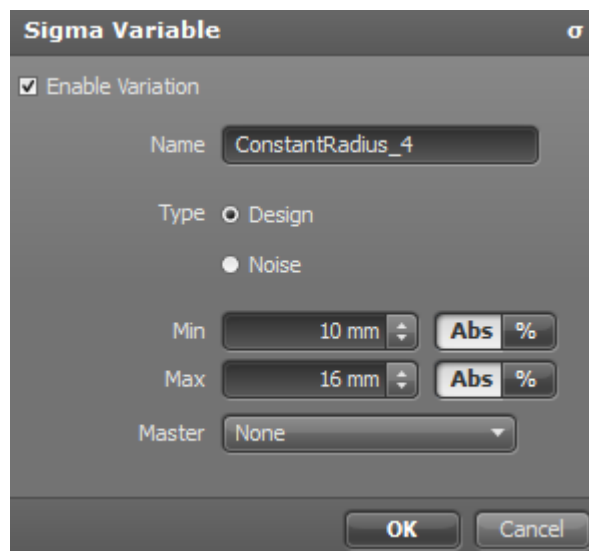


Рисунок 4.10 – Задание значений пределов отклонения радиуса пуансона

- усилие прижима;

На вкладке `Process>Drawing>Tools>ForcePressure>ConstantForce` задаются лимиты на усилие прижима (рис. 4.11):

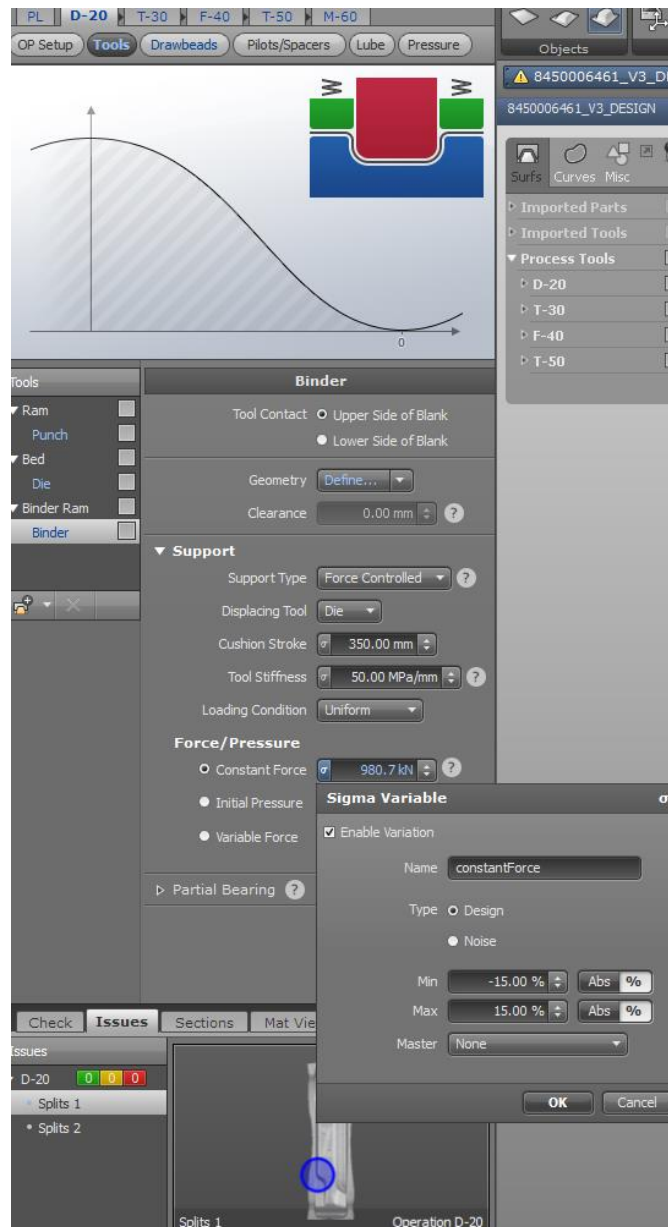


Рисунок 4.11 – Задание значений пределов отклонения усилия прижима

- коэффициент торможения для тормозных ребер;

На вкладке `Process>Drawing>Drawbeads>RestrainingForce>ForceFactor` можно задавать лимиты коэффициента торможения ребер (min и max значения) (рис. 4.12):

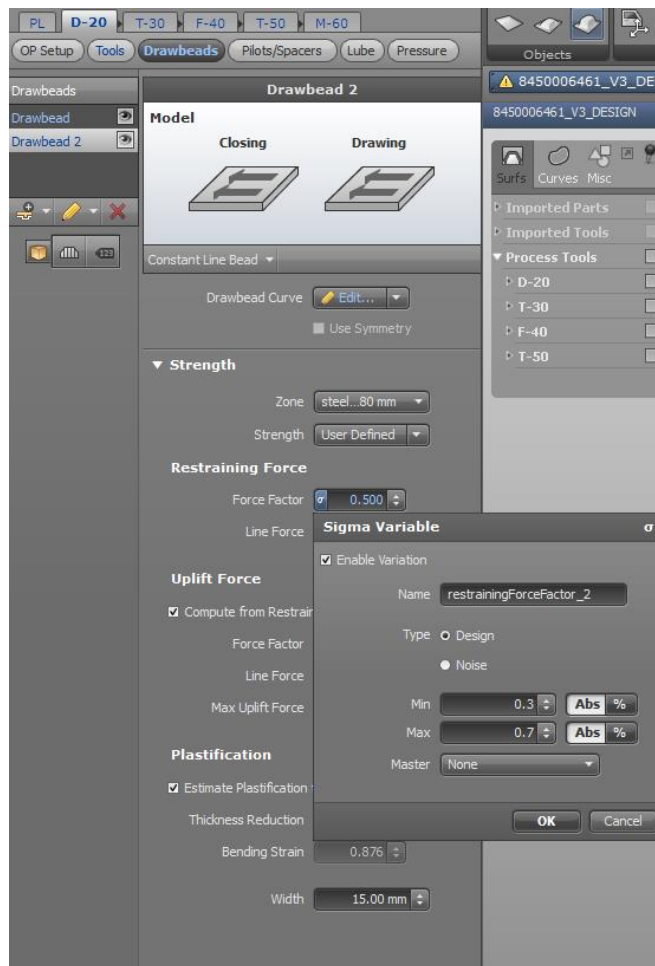


Рисунок 4.12 – Задание значений пределов отклонения тормозных ребер

- коэффициент трения (использование смазки).

Запуск расчета производится на вкладке:

Simulation > Start (рис. 4.13):

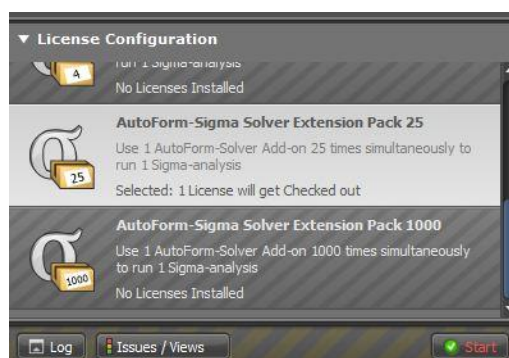


Рисунок 4.13 – Запуск на расчет (симуляция)

В модуле «Sigma» производится множество расчетов при различных комбинациях значений параметров, установленных их лимитами.

4.4 Анализ полученных результатов в постпроцессоре AutoForm-Sigma^{plus}

Результаты расчета можно увидеть на вкладке Evaluation.

В панели «Sigma» необходимо переключиться в режим «Trial» (рис. 4.14).



Рисунок 4.14 – Кнопка «Trial»

В окне «Setup» можно увидеть диаграмму предельных деформаций FLD, на которой виден разброс точек для базовой и симуляции, а также для всех других вариантов расчетов полученных в Sigma (бледный фон) (рис.4.15):

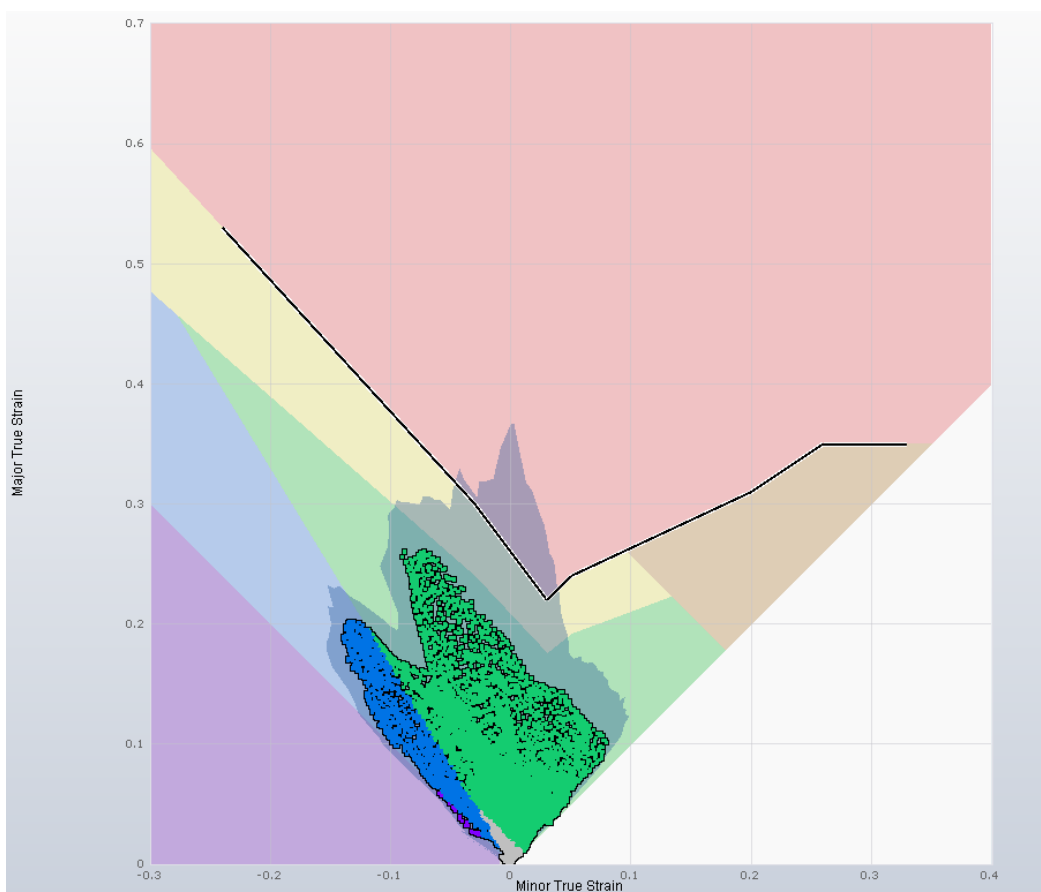


Рисунок 4.15 – FLD и облако точек в модуле Sigma

В окне «Resolve» представлены все параметры, для которых были заданы лимиты изменения их значений (рис. 4.16):

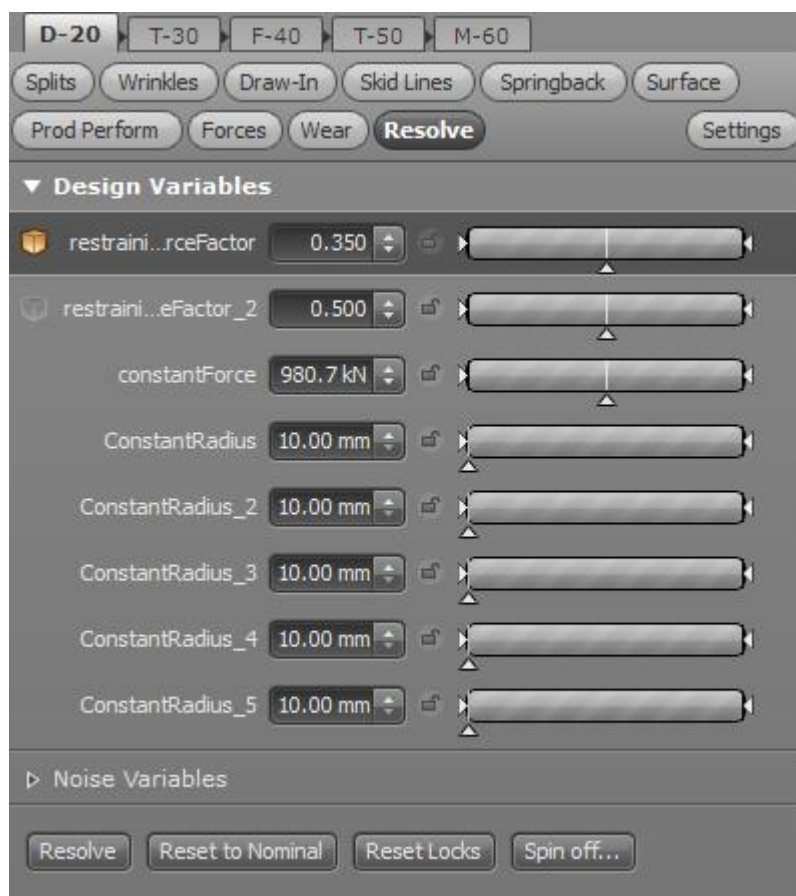


Рисунок 4.16 – Окно «Resolve»

С помощью ползунков можно вручную изменять значения каких-либо параметров в целях, например, предотвращения разрывов или образования складок, имеющих в базовой симуляции.

В некоторых случаях с помощью кнопки «Resolve» можно автоматически получить рациональные значения всех параметров, при которых мы будем иметь наиболее благоприятный вариант штампуемости детали (рис. 4.17):

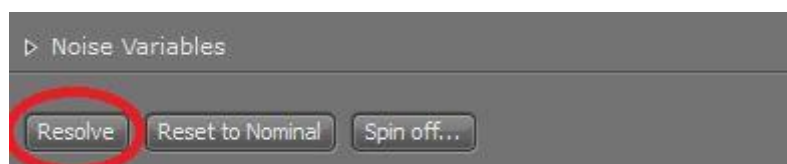


Рисунок 4.17 – Кнопка «Resolve»

В окне «Issues» представлены интересующие нас критерии оценки штампуемости (разрывы, гофры, пружинение и т.д.) (рис. 4.18):

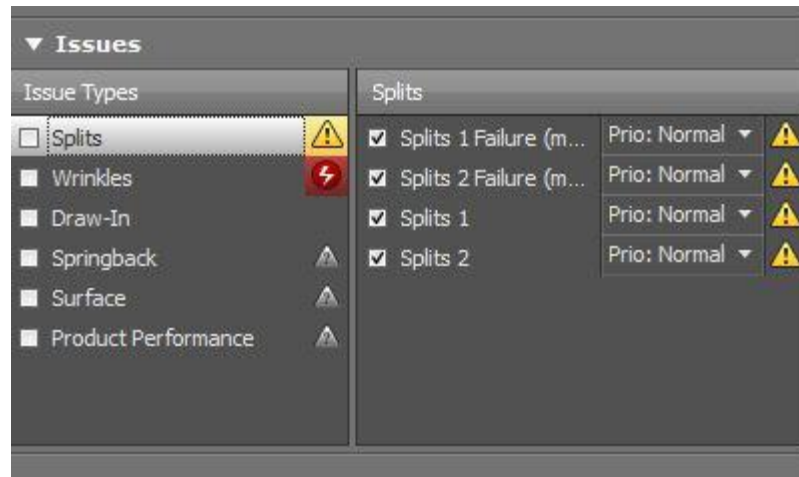


Рисунок 4.18 – Окно «Issues»

Зеленым цветом помечаются критерии оценки, при анализе которых проблем не возникает.

Желтым – где имеются отклонения при определенных значениях параметров.

Красным – где отклонения будут присутствовать при любых заданных значениях параметров.

Например, при базовой симуляции имелся следующий результат по утонению (разрыв) (рис. 4.19):

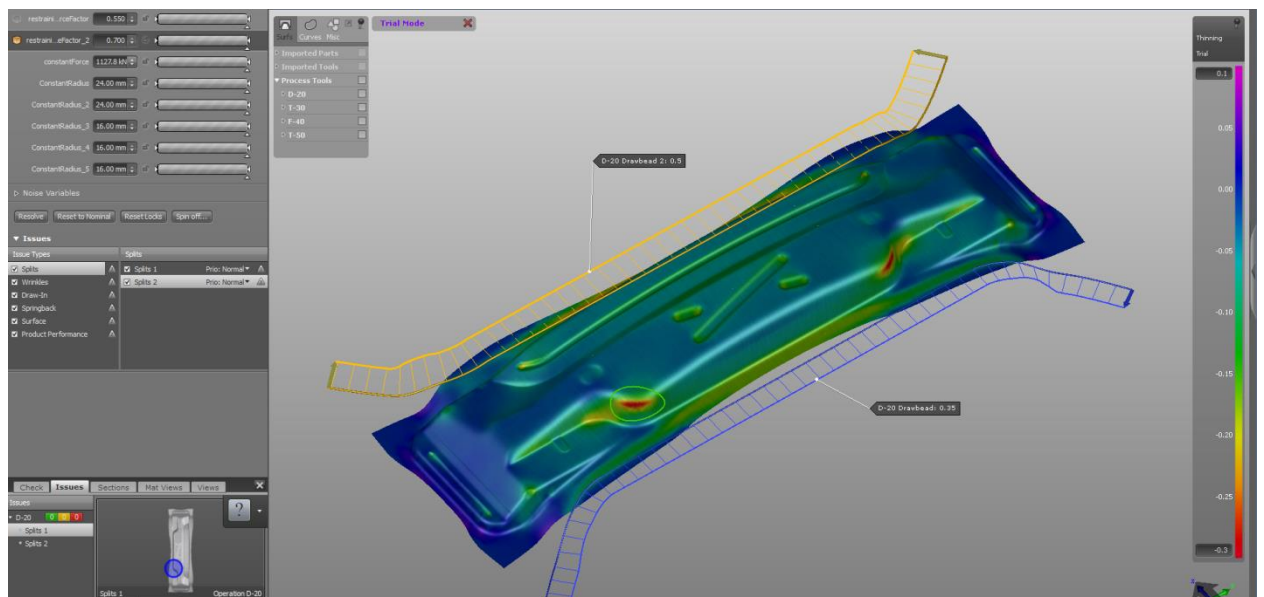


Рисунок 4.19 – Результат влияние тормозных ребер до оптимизации

При подборе коэффициентов тормозных ребер и значений радиусов матрицы и пуансона с помощью ползунков, можно добиться результата без разрыва и с допустимым значением по утонению (рис. 4.20):

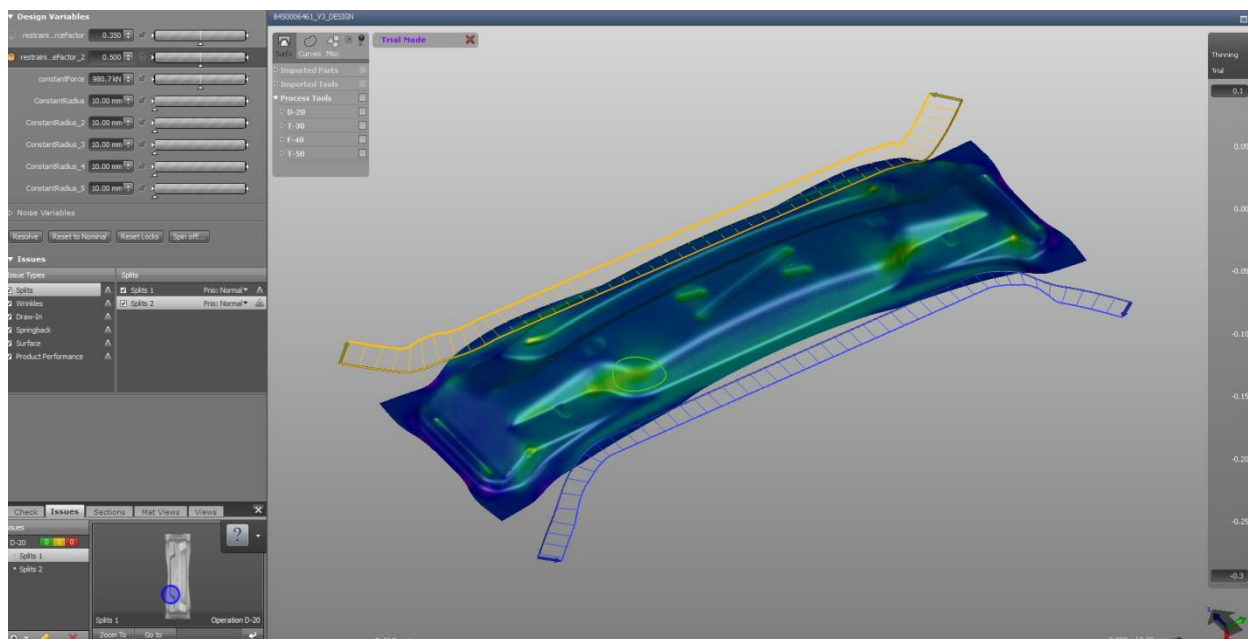


Рисунок 4.20 – Результат влияние тормозных ребер после оптимизации

При задании в Issues настроек значений предельных утонений и деформаций – получаем в панели «Design Variables» зеленую зону значений коэффициента торможения ребра, при котором деталь в данной зоне по качеству является допустимой (рис. 4.21):

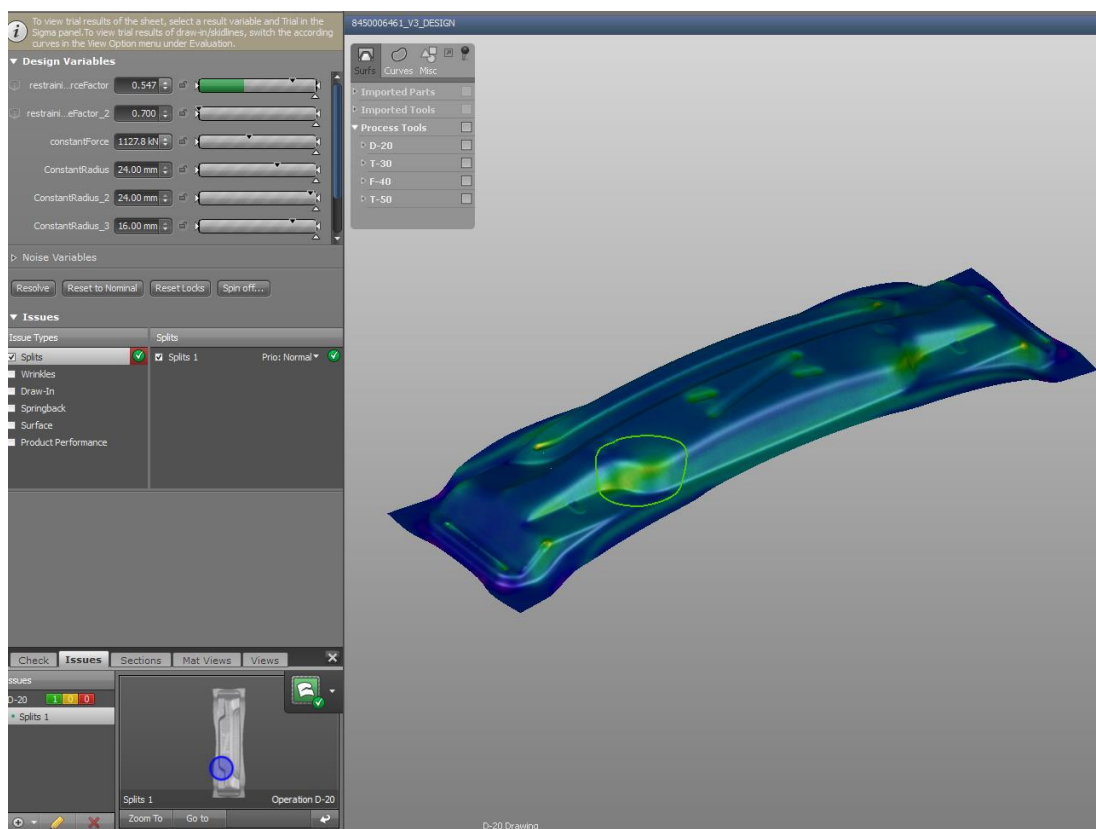


Рисунок 4.21 - Результат влияние тормозных ребер после оптимизации

Остается лишь установить бегунки разброса параметров на зеленые зоны во всех интересующих зонах, чтобы оптимизировать данный технологический процесс.

Таким образом, благодаря модулю AutoForm Sigma можем изменять определенным образом какие-либо параметры в целях быстрого получения наиболее рациональных результатов штампуемости детали.

Это существенно сокращает трудоемкость проработки технологичности детали, а также позволяет наглядно видеть влияние тех или иных параметров технологического перехода на критерии оценки технологичности.

5. Заключение.

В ходе диссертационной работы были решены следующие задачи:

1. Предложены критерии оптимальности и ограничений для проектирования процессов ЛШ в САЕ
2. Проведен статистический анализ на основе численных экспериментов с учетом чувствительности процесса
3. Разработана методика процесса оптимизации листовой штамповки в ПО САЕ AutoForm Sigma
4. Разработка методики подготовки данных в препроцессоре, анализа данных в постпроцессоре AutoForm Sigma с результатом улучшения ТП
5. Разработана целевая функция для технологического процесса изготовления детали «Поперечина панели задка» с диапазоном изменения производственных переменных.
6. На примере разработанной методики оптимизации была получена годная деталь.
7. Целевая функция по критерию C_p по всем ограничивающим критериям достигнута. По критерию C_{pk} решен вопрос о возможности доработки детали во избежание дефекта – превышение предельного пружинения.

Список используемой литературы

1. Е.Н. Шмелев «Высокой мысли пламень. Ч.3», НТЦ, ВАЗ // Тольятти: 2008. – С. 803
2. Лесин В.В., Лисовец Ю.П. «Основы методов оптимизации», МАИ // Москва: 1998. – с. 340
3. РДМУ 109-77 «Методика выбора и оптимизации контролируемых параметров технологических процессов», Гф ВНИИНМАШ) // Москва: 1987. – с. 49
4. J. Hu'etink, A.H. van den Boogaard, M.A. Masen «Optimisation of a deep drawing process with experimental validation» // University of Twente, 2007. – С. 5-26
5. П.М. Попов, Ф.Е. Ляшко «Оптимальное управление в ходе эволюционного развития процессов и систем: Учебное пособие. - Ульяновск: УлГТУ, 2000. - 148 с. - С. 106
6. Попов П.М., Попов С.П. «Верификационные методы анализа оптимального управления процессами и системами» - Ульяновск: УлГТУ, 2001.- С. 72
7. Рахмилевич Е. Г. Выбор рациональных методов получения заготовки при моделировании конструкторско-технологических вариантов изготовления детали // Технические науки - от теории к практике: сб. ст. по матер. XI междунар. науч.-практ. конф. – Новосибирск: СибАК, 2012.
8. ГОСТ 19903-74 - Прокат листовой горячекатаный. Сортамент: 2008
9. Официальный сайт ПО AutoForm. Точка доступа: <http://www.autoform.com/ru/products/autoform-sigma-plus/>
10. Д.В.Бузлаев, А.Н.Антонец, В.В.Калаев, А.В.Ряснянский «Новые методы оценки устойчивости и производительности технологических процессов» // «САПР и Графика, № 4/2006» Эл. доступ: <http://www.sapr.ru/article.aspx?id=15744&iid=745>
11. Sullivan, L. P. (1984). "Reducing Variability: A New Approach to Quality." Quality Progress 17, pp. 16-21. часть 3.2

12. Sullivan, L. P. (1985). "Letters." Quality Progress 18, pp. 7-8. Key Words: Capability, Target Value, Process Potential Process Performance. часть 3.2
13. Малов А.Н. Технология холодной штамповки. М.: Машиностроение, 1969., 586с.
14. Романовский В.П. Справочник по холодной штамповке – 6-е изд., перераб. и доп.-Л.: Машиностроение. Ленингр. Отд-ние, 1979.- 520с.
15. Смолин, Е.Л. Основы конструирования штамповой оснастки :учеб. Пособие для студентов заочной формы обучения/ Е.Л. Смолин.- Тольятти: ТГУ, 2007.-72с.
16. Норицин И. А., Власов В. И. Автоматизация и механизация технологических процессовковки и штамповки. – М.: Машиностроение, 1967. – 388 с
17. Смирнов А. М., Васильев К. И. Основы автоматизации кузнечно–прессовых машин. – М.: Машиностроение, 1987. – 270 с.
18. Ю. А. Аверкиев, А. Ю. Аверкиев. Технология холодной штамповки. - М; Машиностроение, 1989г.-304с.
19. Кузнечно-штамповочное оборудование (под ред. А. Н. Банкетова и д-ра техн. наук. проф. Е. Н. Ланского) М., Машиностроение, 1982г.-574с.
20. Контроль качества ферросплавов: Спр. изд. / Ю. Л. Плинер, Л. Ф. Первов, В. Г. Мизин и др. М.: Металлургия, 1993.