

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

(профиль)

На тему «Разработка обучающих задач для численного моделирования технологических процессов ОМД в САЕ – программах»

Студент	В.А.Петрухнов	
	(И.О. Фамилия)	(Личная подпись)
Руководитель	П.Н.Шенбергер	
	(И.О. Фамилия)	(Личная подпись)
Консультанты	Л.Н.Горина	
	(И.О. Фамилия)	(Личная подпись)
	И.В.Краснопевцева	
	(И.О. Фамилия)	(Личная подпись)
	В.Г.Виткалов	

Заведующий кафедрой д.т.н. доцент В.В.Ельцов
(Ученая степень, звание, И.О. Фамилия)

(личная подпись)

« » 20 г.

Тольятти 2016

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»

УТВЕРЖДАЮ
Завкафедрой «СОМДиРП»
_____ В.В. Ельцов
(Подпись) (И.О. Фамилия)
« ____ » _____ 20__ г.

ЗАДАНИЕ
На выполнение бакалаврской работы

- Студент: Петрухнов Вадим Александрович
1. Тема: «Разработка обучающих задач для численного моделирования технологических процессов ОМД в САЕ – программах»
 2. Срок сдачи студентом законченной выпускной квалификационной работы _____
 3. Исходные данные к выпускной квалификационной работе традиционная методика расчета процессов ОМД
 4. Содержание выпускной квалификационной работы (перечень подлежащих разработке вопросов, разделов) 1) Особенности использование САЕ – программ в процессе обучения 2) разработка обучающих задач для имитационного моделирования технологических процессов в САЕ программах для персонала 3) Безопасность и экологичность проекта 4) экономическое обоснование проекта
 5. Ориентировочный перечень графического и иллюстративного материала: презентационный материал _____
 6. Консультанты по разделам
Краснопевцева И.В.
Горина Л.Н.
Виткалов В.Г.
 7. Дата выдачи задания « 26 » _____ января _____ 2016 г.

Руководитель выпускной квалификационной работы	_____	_____
	(Подпись)	(И.О. Фамилия)
Задание принял к исполнению	_____	_____
	(Подпись)	(И.О. Фамилия)

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»

УТВЕРЖДАЮ

Зав. кафедрой «СОМДиРП»

_____ В.В.Ельцов

(Подпись)

(И.О. Фамилия)

« ____ » _____ 20 ____ г.

КАЛЕНДАРНЫЙ ПЛАН

Выполнения выпускной квалификационной работы

Студента: Петрухнова Вадима Александровича

По теме: «Разработка обучающих задач для численного моделирования технологических процессов ОМД в САЕ – программах для персонала»

Наименование раздела работы	Плановый срок выполнения раздела	Фактический срок выполнения раздела	Отметка о выполнении	Подпись руководителя
Особенности использование САЕ – программ в процессе обучения	02.03.16	02.03.16	Выполнено	

Разработка обучающих задач для численного моделирования технологических процессов в САЕ программах для персонала	14.04.16	14.04.16	Выполнено	
Безопасность и экологичность проекта	05.05.16	05.05.16	Выполнено	
Экономическая часть проекта	25.05.16	25.05.16	Выполнено	

Руководитель выпускной квалификационной работы

Задание принял к исполнению

(Подпись)

(И.О. Фамилия)

(Подпись)

(И.О. Фамилия)

Содержание

Аннотация	6
Введение.....	7
1 Особенности использования САЕ – программ в процессе обучения	11
1.1 Проектирование с использованием САПР.....	11
1.2 САПР в машиностроении.....	12
2 Разработка обучающих задач для численного моделирования технологических процессов ОМД в САЕ – программах для персонала	17
2.1 Моделирование операции «Не глубокая вытяжка»	17
2.2 Определение положения тормозных ребер в конструкции штампа.....	25
2.3 Анализ пружинения детали после операции гибка	32
2.4 Операция отбортовка	43
2.5 Структура k-файла	52
3 Безопасность и экологичность проекта	58
3.1 Техническая характеристика объекта.....	58
3.2 Идентификация профессиональных рисков	59
3.3 Методы и средства снижения профессиональных рисков	60
3.4 Обеспечение пожарной безопасности технического объекта	61
3.5 Обеспечение экологической безопасности технического объекта.....	64
Заключение.....	73
Список используемых источников	75

Аннотация

В данной бакалаврской работе были разработаны обучающие задачи для имитационного моделирования процессов обработки металлов давлением (ОМД) в САЕ-программах. Моделирование было выполнено при помощи программного обеспечения Siemens NX 9.0, само обучение происходит в программных продуктах Ls-Prepost и LS-DYNA.

В первой части бакалаврской работы рассматривается применение САПР в машиностроении. Проанализированы преимущества САПР, позволяющие существенно снизить затраты времени и средств на создание новых и модернизацию существующих объектов, что доказывает их высокую эффективность в автоматизации работ конструкторских и технологических подразделений.

Во второй части работы описана разработка обучающих задач для имитационного моделирования технологических процессов ОМД в САЕ – программах. Рассмотрено пять процессов ОМД: не глубокая вытяжка, определение положения тормозных ребер в конструкции штампа, анализ пружинения детали после операции гибка, операция отбортовка, описание k-файла.

В бакалаврской работе также рассмотрены безопасность и экологичность проекта, а также экономическая эффективность.

Объем бакалаврской работы составил 76 страниц, графический материал – 6 листов формата А1.

Введение

В настоящее время повышение конкурентоспособности промышленных предприятий напрямую связывается с использованием систем автоматизированного проектирования, интегрированных в единое производственное пространство.

Современная наука и практика создания и эксплуатации САПР развиваются по отраслям, при этом в ряду самых сложных и массовых выступают комплексные системы информационной поддержки жизненного цикла изделий машиностроения. Однако развитие и повышение эффективности комплексных систем автоматизированного проектирования и производства (PLM-систем, часто называемых «решениями» – PLM-solutions) сдерживается прежде всего отсутствием квалифицированных специалистов, обладающих необходимыми профессиональными компетенциями для деятельности в интегрированной информационной среде.

При решении задач модернизации и инновационного развития экономики обучению персонала прикладным компьютерным технологиям отводится одна из ведущих ролей.

Необходимость обучения персонала навыкам работы с САПР определяется значительно возросшим за последние годы уровнем производства.

Во-первых, усложнились сами изделия и особенно процесс согласования отдельных технических решений. Число требований к отдельным элементам из-

делий и подсистемам возросло, и проверка полноты и непротиворечивости требований вручную стала практически неосуществимой. Поэтому продолжительность проектирования возросла в десятки раз и стала соизмеримой со временем морального и физического старения изделия. Совершенствование ручных методов проектирования уже не успевает за усложнением объектов проектирования. В реальных задачах число факторов, которое должно учитываться в проектировании, т. е. размерность задачи, очень велико.

Во-вторых, благодаря научно-техническому прогрессу ускорилась сменяемость элементной базы создаваемых изделий, материалов и технологий изготовления продукции. Так, в производстве ЭВМ за 25 лет элементы на лампах сменились полупроводниковыми элементами, которые в свою очередь были вытеснены микросхемами со все большей концентрацией элементов в одном кристалле. В производствах легкой промышленности появляются все новые и новые искусственные материалы. Современные производства пищевых продуктов характеризуются непрерывным совершенствованием и обновлением технологических процессов.

В-третьих, использование новых научных идей и технологических принципов приводит к неопределенности результатов проектирования, что вызывает необходимость вносить многочисленные изменения на разных стадиях проектирования.

В-четвертых, причинами актуальности САПР являются высокая стоимость изделий и требования к их качеству, обуславливающие потребность в оптимизации проектных решений. При ручном проектировании обычно разрабатываются

один-два варианта проектов. САПР позволяет просматривать значительно большее число вариантов и отбирать наиболее удачный.

По своему определению автоматизированное проектирование (АПР) является сложным информационным процессом взаимодействия проектировщиков (персонала САПР) и комплекса средств автоматизации проектных работ.

В настоящее время без компьютерной автоматизации уже невозможно производить современную конкурентоспособную технику. САПР в машиностроении используется для проведения конструкторских, технологических работ, работ по технологической подготовке производства. С помощью САПР выполняется разработка чертежей, делается трехмерное моделирование изделия и процессов, создается разнообразная оснастка, такие как штампы и пресс-формы, составляется технологическая документация и управляющие программы (УП) для станков с числовым программным управлением (ЧПУ), ведется архив.

Обучение и повышение квалификации специалистов необходимы из-за того, что рынок САПР постоянно и быстро обновляется: появляются совершенно другие версии систем проектирования отечественного и зарубежного происхождения, ранние версии снимаются с технической поддержки и обслуживания. При таких требованиях, персонал не справляется самолично изучить недавно появившиеся продукты, и они требуются в развитии их знаний.

Цель бакалаврской работы заключается в повышении эффективности и сокращении сроков реализации проектов за счет обучения проектного персонала навыкам численного моделирования в САЕ – программах.

Теоретическая важность разработки обучающих задач в области ОМД заключается в том, что они в своем комплексе составляют теоретическую основу обучения проектированию в области формирования навыков компетенций проектного персонала машиностроительных САПР.

Практическая важность разработанных обучающих задач, заключается в повышении уровня знаний и уменьшении времени обучения персонала, в сокращении сроков реализации проектов внедрения комплексных систем за счет ускорения переподготовки и адаптации проектного персонала, к условиям профессиональной деятельности в информационной сфере труда.

Задачи бакалаврской работы

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Определить особенности использования САЕ – программ в процессе обучения.
2. Разработать обучающие задачи для численного моделирования технологических процессов ОМД в САЕ – программах для персонала.
3. Рассмотреть безопасность и экологичность проекта.
4. Выполнить экономическую часть проекта.

1 Особенности использования CAE – программ в процессе обучения

1.1 Проектирование с использованием САПР

Проектирование различных изделий современными промышленными предприятиями трудно представить без использования автоматизированного проектирования (САПР). Использование САПР позволяет существенно снизить затраты времени и средств на создание новых модернизацию существующих объектов, что доказывает ее высокую эффективность в автоматизации работ конструкторских и технологических подразделений. Наряду с этим повышается качество конструкторской документации.

При проектировании программы CAD/CAE-программы выполняют вычислительные эксперименты в широком спектре физических моделей и процессов, обеспечивая правильный выбор инженерами конструктивных и технологических параметров проектируемого изделия. В прикладных исследованиях компьютерные инструменты CAE используются для поиска новых технических решений, конструкций и технологий. Вместе с тем, компьютерный инженерный анализ может быть направлен на решение теоретических задач и выявление новых закономерностей, например, при разработке нанотехнологий и новых материалов. Преимуществом компьютерного исследования является возможность анализировать междисциплинарные расчетные модели и визуализировать скрытые процессы.

Компьютерное проектирование – один из самых важных этапов жизненного цикла изделия, который непосредственно связан с исследованием конструкции машины и оценкой ее эксплуатационных параметрами средствами CAE.

Во-первых, САЕ – программы, особенно с очень сильным «мотором», требуют на порядок больше машинных ресурсов, чем системы конструирования. Одной из главных особенностей САЕ – программ является большой объем одновременно обрабатываемых данных.

Во-вторых, в процессе проектирования и изготовления изделий САЕ – программы, сами не вносят “глобальных” изменений в геометрию и являются по факту средством для проверки функциональной пригодности конструкции или оптимизации технологических параметров изготовления деталей.

В-третьих, как ни странно, но инженерный анализ конструкции является для инженера в какой-то степени чужим полем; поскольку инструменты САЕ не предназначены для синтеза новой конструкции, а используются для получения новых знаний, по изведываемому объекту или процессу.

Компьютерный инженерный анализ фактически является вычисленным экспериментом, а программы САЕ выполняют при этом роль исследовательского инструмента.

1.2 САПР в машиностроении

С расширением области приложения, углублением специализации и увеличением сложности современных САПР объектов машиностроения (САПР-М) все более важным для успешной автоматизации подготовки производства становится создание эффективных средств и методов обучения автоматизированному проектированию персонала комплексных систем. Это проявляется в значитель-

ном увеличении объема и разнообразия методического обеспечения, поставляемого на рынок ведущими разработчиками и интеграторами САПР. Обучение и переподготовка персонала стали обязательным и одним из критичных по длительности и результативности этапов в проектах внедрения PLM-решений.

В начале каждого вычисления стоит проблема – получить окончательный результат данной задачи, с наименьшим количеством затрат на машинное время и наперед заданной точностью.

В результате решения упомянутой проблемы можно выделить два направления: математическое и инженерное. Данные направления можно просмотреть на одном из очень распространенных в настоящее время методов решения задач математической физики – методе конечных элементов (МКЭ).

Хотя сейчас имеется огромное разнообразие в формулировках, применение метода конечных элементов может быть описана следующими свойствами:

1. Физическая область задачи делится на подобласти (конечные элементы);
2. Определенная переменная (от одной до некоторого количества) строится функцией специального вида на каждом из конечных элементов.
3. Подстановка переменных происходит в определяющие уравнения (или похожие им) получим систему множества уравнений с неизвестными переменными. Если решить данные уравнения, в результате можно получить значения искомых параметров и, следовательно, найти приближенное решение задачи.

Метод конечных элементов представляет эффективный численный метод решения инженерных и физических задач. Его можно применить для решения

весьма широкого круга задач, например:

- Простые задачи на распространение тепла.
- Диффузии.
- Все образные задачи гидромеханики.
- Задачи механики и прочности.
- Расчет распределения электрического поля в различных средах.
- И др.

Для достижения необходимого результата был выбран программный комплекс LS-DYNA и LS-PrePost и процессоры, позволяющие как создавать конечно-элементную модель, так и читать, редактировать и обрабатывать результаты анализа всеми доступными средствами. В качестве препроцессора для решения задачи используется решатель LS-DYNA.

LS-DYNA – многоцелевая программа, использующая явную формулировку метода конечных элементов (МКЭ) LS-Dyna - предназначена для анализа нелинейного динамического отклика трехмерных упругих структур. LS-DYNA была задумана как часть оборонной программы США и до сих пор является ею.

Полностью распараллеленный и векторизованный высокоэффективный алгоритм решения нелинейных и быстротекущих процессов, автоматизированный процесс решения контактных задач, а также множество функций по проверке получаемого решения позволяют инженерам во всем мире успешно решать самые сложные задачи удара, разрушения и формования.

Уникальный математический аппарат включает более 25 алгоритмов контактного взаимодействия, более 100 уравнений состояния, что позволяет решать задачи:

- Нелинейной динамики;
- Тепловые;
- Разрушения;
- Развития трещин;
- Контакта;
- Квазистатики;
- Эйлеровой формулировки МКЭ;
- Произвольного лагранж-эйлерова поведения;
- Акустики в реальном масштабе времени;
- Многодисциплинарного анализа: прочность, теплофизика, акустика.

Все приведенные аналитические инструменты позволяют моделировать широкий круг реальных задач. Вот лишь некоторые приложения возможностей LS-DYNA [6-8]:

- Оценка сопротивляемости удару (краш-тест): автомобили, летательные аппараты, поезда, суда;
- Анализ динамической прочности автомобильных комплектующих: кузов, бамперы, колесные диски, рулевые колонки и т.д. при движении по неровной поверхности;

- Оценка безопасности пассажира: взаимодействие воздушной подушки и виртуальной модели человека с моделированием ремней безопасности, прорыв подушки безопасности и др.;
- Формование металла, стекла, пластиков: прокат, выдавливание, штамповка, волочение, сверхпластическое формование, резка, прокат профилей, литье, глубокая вытяжка, гидроформование (включая большие деформации) и многоступенчатые процессы;
- Птицестойкость и задачи об отрыве лопатки турбинных двигателей;
- Взаимодействие потоков жидкости и газа с конструкцией;
- Взрывная нагрузка на изделия;
- Задачи проникания (пробивание броневой пластины, внедрение в грунт и т.п.);
- Расчет сварных, заклепочных и болтовых соединений;
- Биомедицинские приложения;
- Моделирование землетресений.

Отличительной особенностью LS-DYNA является то, что в данной системе не существует библиотеки материалов. Вместо этого, существует возможность выбора типа материала с заданными параметрами из более чем 260 типов. Это позволяет создавать модели материалов с минимумом известных параметров, такими как плотность, текучесть, модуль Юнга и другими.

2 Разработка обучающих задач для численного моделирования технологических процессов ОМД в САЕ – программах для персонала

2.1 Моделирование операции «Не глубокая вытяжка»

Цель данной задачи заключается в изучении моделирования операции «Неглубокая вытяжка» для выбора рационального радиуса матрицы при штамповке коробчатой детали.

Теоретическая основа задачи

Вытяжка представляет собой процесс превращения плоской заготовки в полую деталь любой формы (или дальнейшее изменение ее форм) и выполняется на вытяжных штампах.

Следовательно, вытяжка происходит за счет пластической деформации, сопровождаемой смещением значительного объема металла в высоту. При большой степени деформации, что соответствует глубокой вытяжке, и при небольшой толщине материала смещенный объем является причиной образования гофров на деформируемой заготовке [1].

В современном машиностроении большинство деталей получают путем вытяжки листовых заготовок. Вытяжка достаточно сложный процесс, так как в различных участках вытягиваемой детали создается различное напряженно-деформированное состояние металла заготовки, которое в свою очередь влияет на качество получаемых деталей, на изменение толщины в разных зонах и вероятность возникновения гофр.

Особый интерес вызывает вытяжка коробчатых деталей. Принято считать, что собственно вытяжка производится в угловых зонах детали, а на прямолинейных участках происходит вытягивание материала заготовки из-под прижима и вытягивание через радиус матрицы. На самом деле картина несколько сложнее и в зависимости от радиусов угловых закруглений коробчатой детали происходит более или менее интенсивное перераспределение материала из угловых зон в боковые стенки.

Исходные данные задачи

Первым этапом для достижения поставленной задачи было необходимо рассчитать заготовку для прямоугольной коробчатой детали.

Следующим шагом были выполнены технологические расчеты определение усилий вытяжки и прижима, технологические элементы, радиусы закруглений и зазоры между инструментом.

Далее необходимо смоделировать на основании полученных расчетов необходимые компоненты (матрица, пуансон, прижим, заготовка), которые создавались в программном продукте Siemens NX 9.0 после чего они сохраняются в формате IGES-file (рисунок 2.1), затем импортируются в LS-DYNA.

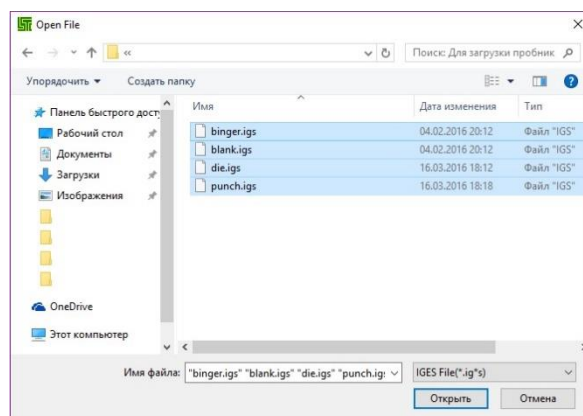


Рисунок 2.1 – Импорт файлов

Последовательность расчета

Следующим нашим шагом следует наложить сетку (mesher) на каждый из подгруженных объектов (для этого необходимо выбрать полностью зашиваемый объект) (рисунок 2.2).

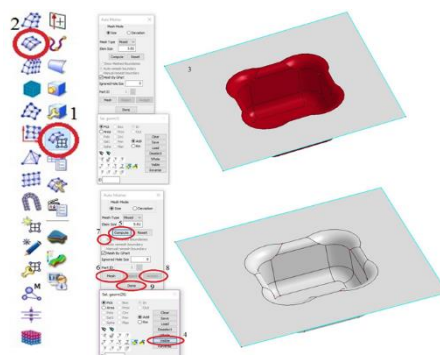


Рисунок 2.2 – Наложение сетки

Далее необходимо задать заготовке необходимый материал (рисунок 2.3) и задать толщину заготовке (Thickness=1), коэффициент трения (Friction=0,125) (в данном случае используется материал MAT_3-PARAMETER-BARLAT - это модель разработана для моделирования анизотропных материалов в условиях плоского напряженного состояния).

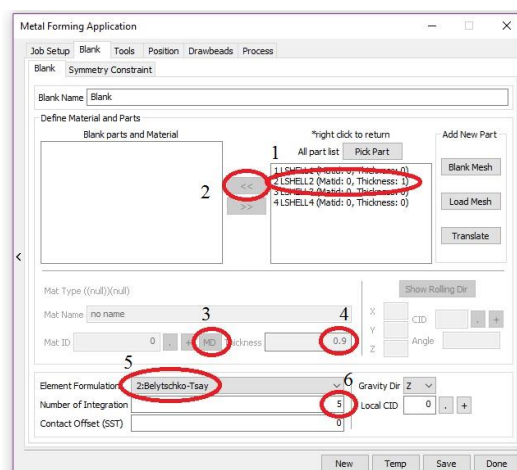


Рисунок 2.3- Загрузка материала и задание толщины

После этого необходимо выбрать процесс формообразования (рисунок 2.4) для данной вытяжки используем Drawing, кнопка Preview поможет проследить анимацию процесса. Обращаем особое внимание на то чтобы все инструменты были активны. Акцентируется внимание на Action (движение), у матрицы стоит closure with, что означает движение до пуансона, так как происходит обратная вытяжка и в этом случае пуансон находится в Stationary (неподвижном состоянии).

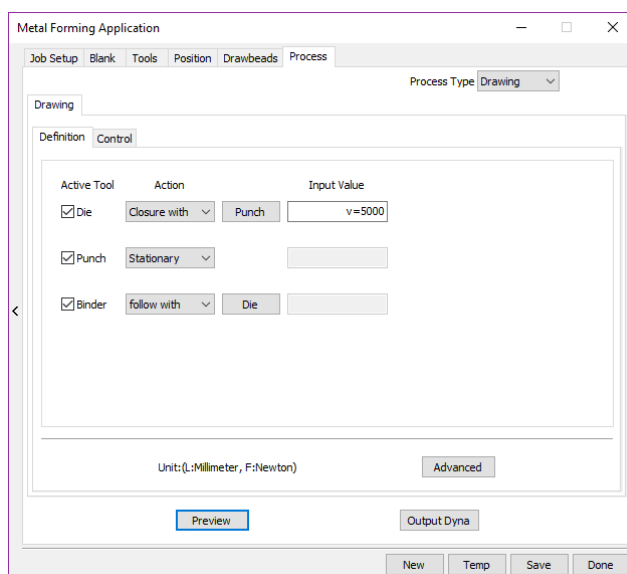


Рисунок 2.4 – Процесс формообразования

Далее следует сохранение проекта (рисунок 2.5). Следует обратить внимание на позицию 2 - Write all model to one, данная функция сохранит всю модель одним единым файлом для простоты работы в дальнейшем.

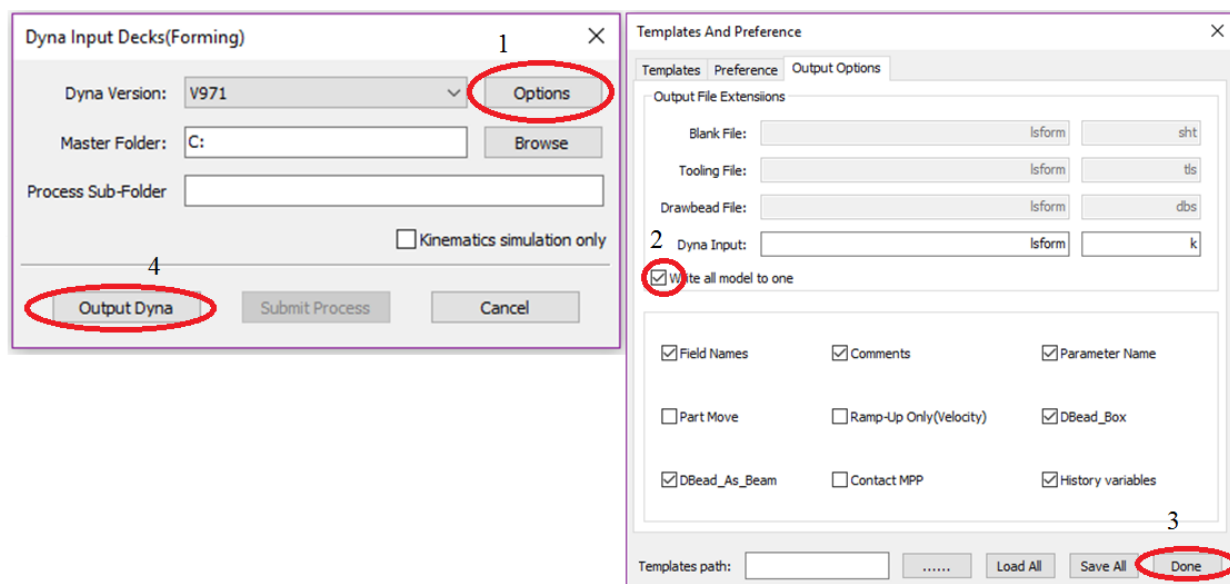


Рисунок 2.5 – Сохранение проекта

Далее необходимо открыть сохраненный файл в постпроцессоре LS-DYNA для расчета задачи, на выходе которого получаем d3plot.

Анализ результатов расчета операции «Неглубокая вытяжка»

Математическое моделирование процесса формообразования неглубокой вытяжки при помощи программного обеспечения LS-PREPOST и LS-DYNA позволило установить особенности деформирования заготовки в процессе штамповки и возможность возникновения гофр. На основании полученных результатов было выполнено построение графиков.

На рисунке 2.6 представлено процентное утонение материала на окончательном этапе вытяжки. Как видно из построенной диаграммы, что на матрице с попеременными радиусами происходит меньшее утонение в донно-радиусной зоне.

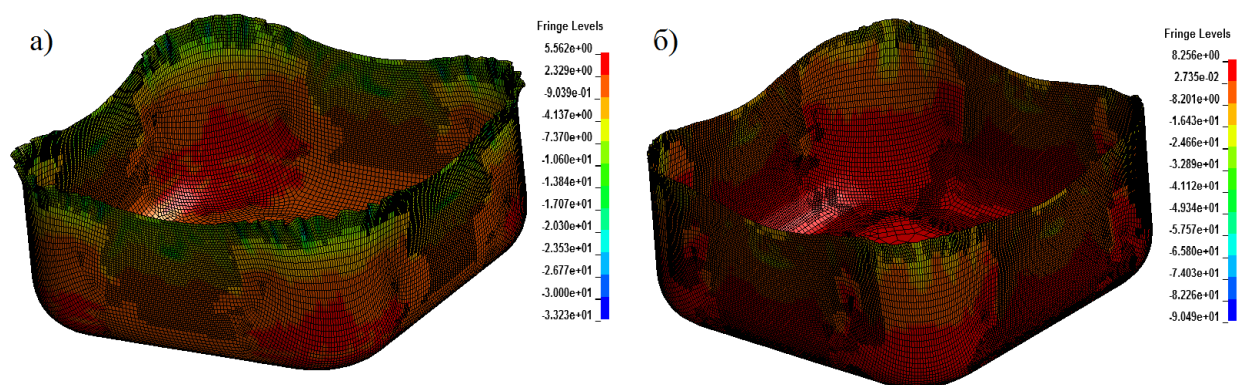


Рисунок 2.6 – Процентное утонение материала: (а)- одинаковый радиус закруглений вытяжных кромок матриц; (б)- попеременные радиуса закруглений вытяжных кромок матриц

Далее была построена схема, отражающая вероятность возникновения гофр, на которой можно увидеть, что при вытяжке на матрице с попеременными радиусами шанс возникновения гофр достаточно ниже, нежели это будет матрица с одинаковыми радиусами. (рисунок 2.7, а, б).

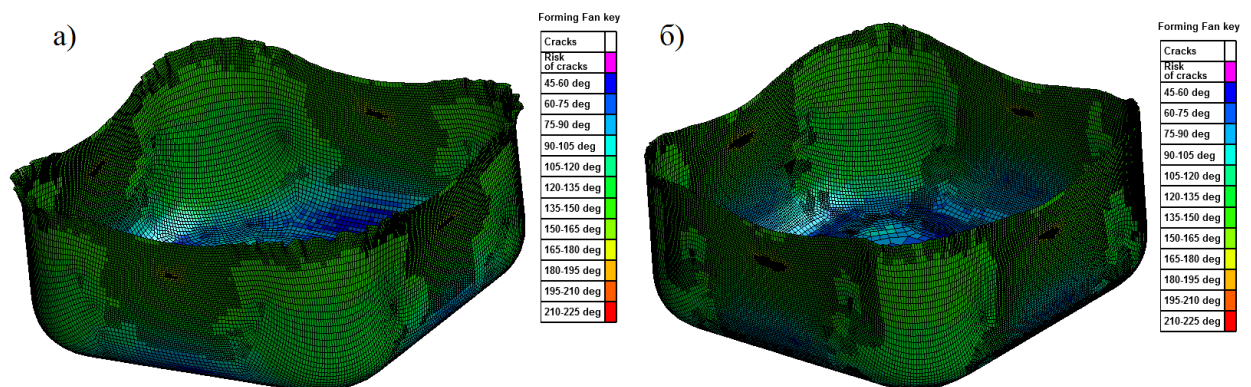


Рис. 2.7 – Шансы возникновения гофр, (а)- одинаковый радиус закруглений вытяжных кромок матриц; (б)- попеременные радиуса закруглений вытяжных кромок матриц

Следующая диаграмма (рисунок 2.8) показывает формуемость материала. Для этого строится FLD – диаграмма, которая позволяет предсказать разрушение листового материала при штамповке, оценить качество получаемого изделия.

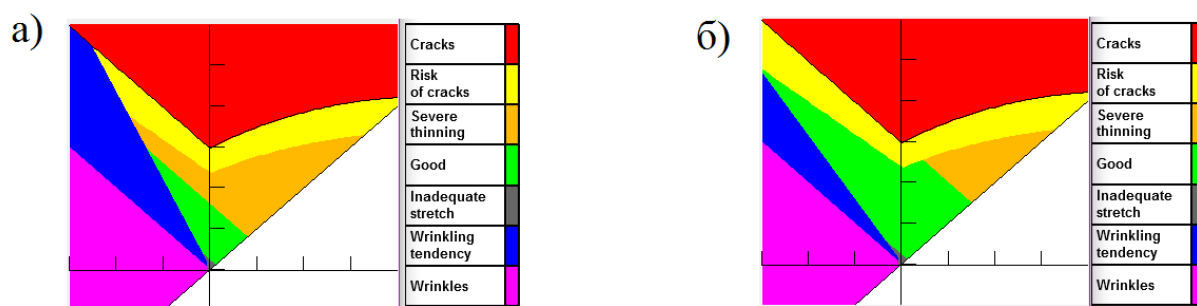


Рисунок 2.8 – Диаграмма формруемости: а) – матрица с одинаковым радиусом закругления вытяжных кромок; б) – матрица с попеременными радиусами закруглений вытяжных кромок

Вывод: для достижения указанной цели были выполнены теоретические и численные исследования процесса вытяжки коробчатой детали квадратного поперечного сечения из пластичного материала по методике, изложенной [1]. Разработана математическая модель матрицы с одинаковыми и переменными радиусами.

Проанализировав полученные результаты, можно сказать, что при вытяжке на матрице с попеременными радиусами закругления вытяжных кромок шанс возникновения гофр и шанс разрыва заготовки гораздо меньше, чем на матрице с одинаковыми радиусами закруглений вытяжных кромок.

2.2 Определение положения тормозных ребер в конструкции штампа

Целью данной задачи является определение расположения тормозных ребер и их влияние на штампуемость.

Теоретическая основа задачи

Вытяжные ребра предназначены для натяжения металла при вытяжке, увеличивая растягивающих и уменьшая тангенциальных напряжений и непосредственно предотвращения гофрообразование.

Например, для изделий ступенчатой формы применение вытяжных ребер значительно увеличивает растягивающие напряжение в радиальном направлении и уменьшает напряжения и деформацию сжатия в тангенциальном направлении. Однако в результате этого значительно повышается сопротивление фланца деформированию и увеличиваются радиальные растягивающие напряжения в опасном сечении. Отсюда следует, что наиболее благоприятные условия при вытяжке в штампах с вытяжными ребрами лучше достигаются в случае с применением металла повышенной прочности при достаточно высокой пластичности или сильно упрочняющего металла.

Крупногабаритные тонколистовые детали при толщине материала $s < 2$ мм в основном вытягивают в штампах с применением дополнительных средств торможения. При большом периметре наружного контура штампуемой детали и наличии нескольких рядов ребер могут возникать нагрузки, превышающие усилие буфера прессы (или усилия наружного ползуна на прессе двойного действия),

поэтому сфера применения перетяжных ребер ограничивается толщиной штампуемого материала.

При работе над конструкцией штампа для выполнения первой операции вытяжке всегда возникает вопрос о выборе схемы торможения заготовки. При этом большую часть помощь оказывают аналоги конструкций штампов. Если аналитически или на основании аналогов устанавливают необходимость применения дополнительных средств торможения заготовки, то их предусматривают при конструкции нового штампа. Перетяжные ребра или пороги не только препятствуют возникновению гофров или складок, но и стабилизируют процесс, сокращают расход листового металла, также вследствие того, что ребро, образованное на фланце заготовки, обладает большей жесткостью и большей устойчивостью на продольный изгиб [1]. Сокращение расходов материала достигается благодаря тому, что перетяжные ребра и пороги во время формообразования заготовки способствуют интенсивному растяжению штампуемого материала.

В популярных конструкциях вытяжных штампов наиболее распространение получили перетяжные ребра (рисунок 2.9), которые при $s < 0.5$ мм рекомендуется встраивать преимущественно в рабочие части, расположенной в верхней половине штампа, а для более толстого материала $s > 0.5$ мм, как правило, ребра располагают в нижней части штампа.

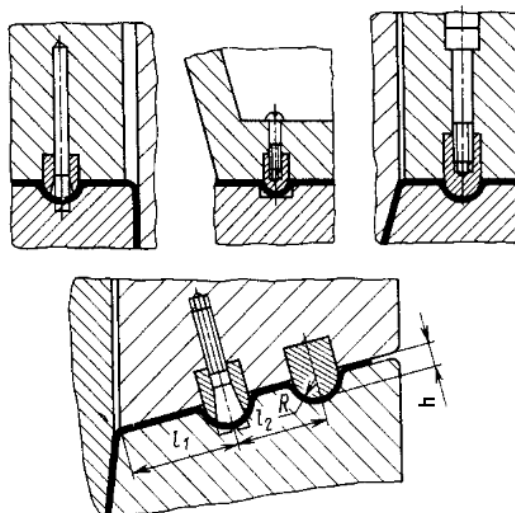


Рисунок 2.9 – Конструкция вытяжных ребер

Ребра, расположенные в нижней части штампа более технологично для монтажа перетяжных ребер и обработки их при отладке штампа, но менее удобно для укладывания штампуемой заготовки и затрудняет очистку от грязи рабочей поверхности штампа.

Исходные данные задачи

Первым этапом для достижения поставленной задачи было необходимость рассчитать исходную заготовку для вытяжки с тормозными ребрами.

Следующим шагом были определены высота тормозного ребра, радиус закругления, расстояние от проема матрицы, технологические элементы, определение усилия прижима, зазоры между инструментом.

Далее необходимо смоделировать на основании полученных расчетов необходимые компоненты (матрица, пуансон, прижим, заготовка) в программном продукте Siemens NX 9.0, которые сохраняются в формате IGES-file, после чего импортируются в LS-DYNA (рисунок 2.10).

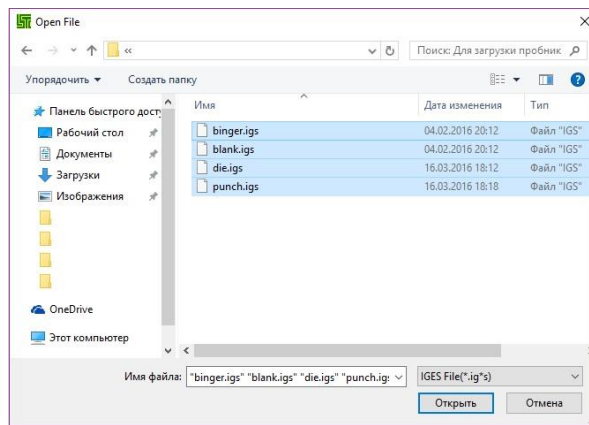


Рисунок 2.10 - Импорт файлов

Последовательность расчета

Следующим этапом следует наложить сетку (mesher) на каждый из подгруженных объектов (для этого необходимо выбрать полностью зашиваемый объект - рисунок 2.11).

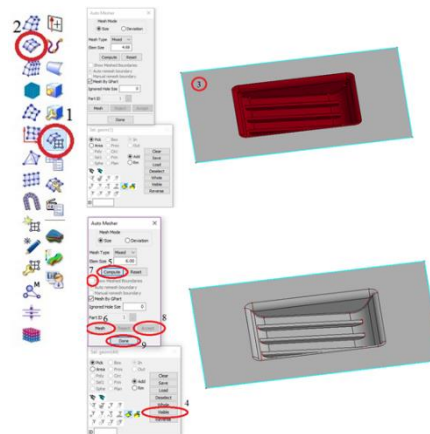


Рисунок 2.11 – Наложение сетки

Следующим шагом необходимо задать заготовке необходимый материал (рисунок 2.12) и задать толщину заготовке (Thickness=0.9) коэффициент трения (Friction=0,125) (в нашем случае *mat_transversely_anisotropic_elastic_plastic этот материал предназначен для моделирования анизотропных материалов в процессе

листовой штамповки. В данной модели учитывается только поперечная анизотропия).

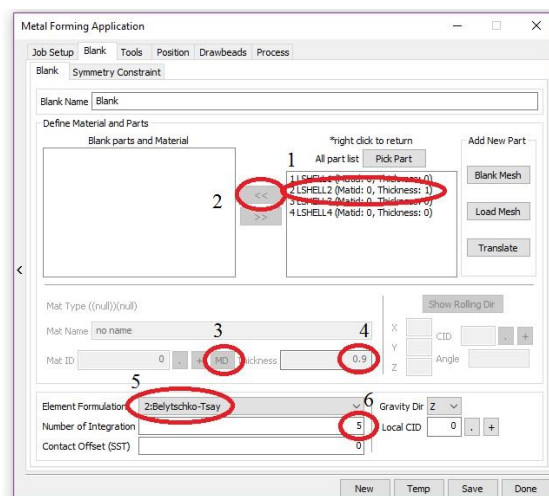


Рисунок 2.12 – Загрузка материала и задание толщины

После этого необходимо выбрать процесс формообразования (рисунок 2.13) (для данной вытяжки используем Forming, кнопка Preview поможет проследить анимацию процесса. Обращаем особое внимание на то чтобы все инструменты были активны. Акцентируется внимание на вкладке Closing, в которой движение задается только у прижима (Binder), это означает что сначала идет смыкание прижима с заготовкой, а затем только процесс вытяжки).

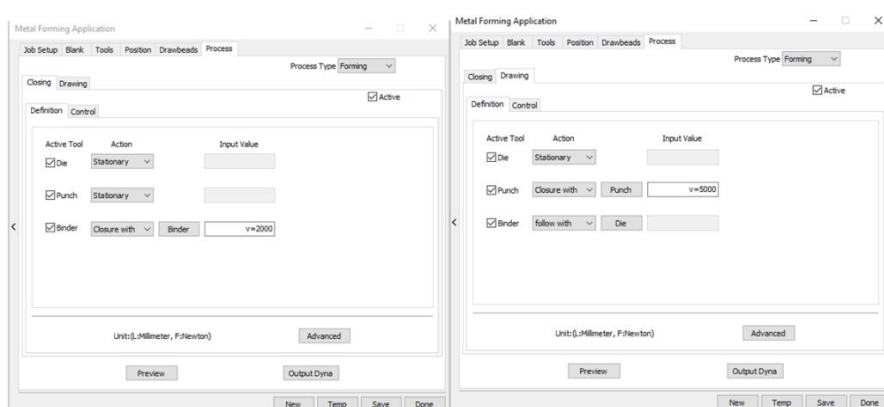


Рисунок 2.13 – Процесс формообразования

Далее следует сохранение проекта (рисунок 2.14). Следует обратить внимание на позицию 2 - Write all model to one, данная функция сохранит всю модель одним единым файлом для простоты работы в дальнейшем.

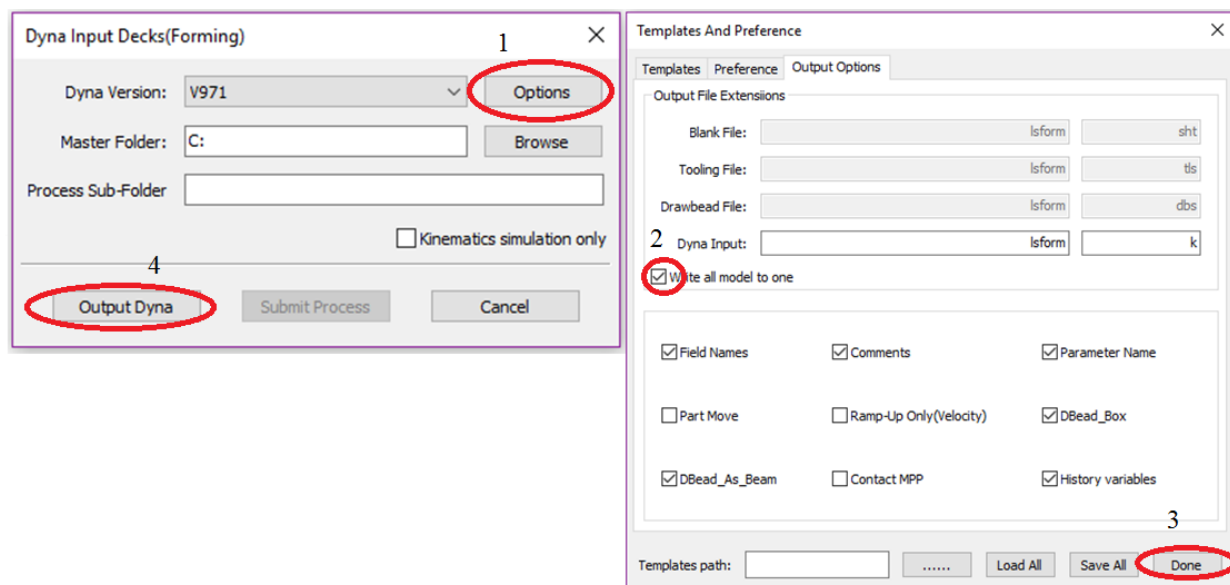


Рисунок 2.14 – Сохранение проекта

Далее необходимо открыть сохраненный файл в постпроцессоре LS-DYNA для расчета задачи, на выходе которого мы получим d3plot.

Анализ расчетов операции вытяжки с торможением материала

Математическое моделирование процесса формообразования вытяжки с тормозными ребрами при помощи программного обеспечения LS-PREPOST и LS-DYNA позволило установить особенности деформирования заготовки в процессе штамповки и возможность возникновения гофр. На основании полученных результатов было произведено построение графиков.

На (рисунке 2.15) представлено процентное утонение при вытяжке с тормозными ребрами и без них.

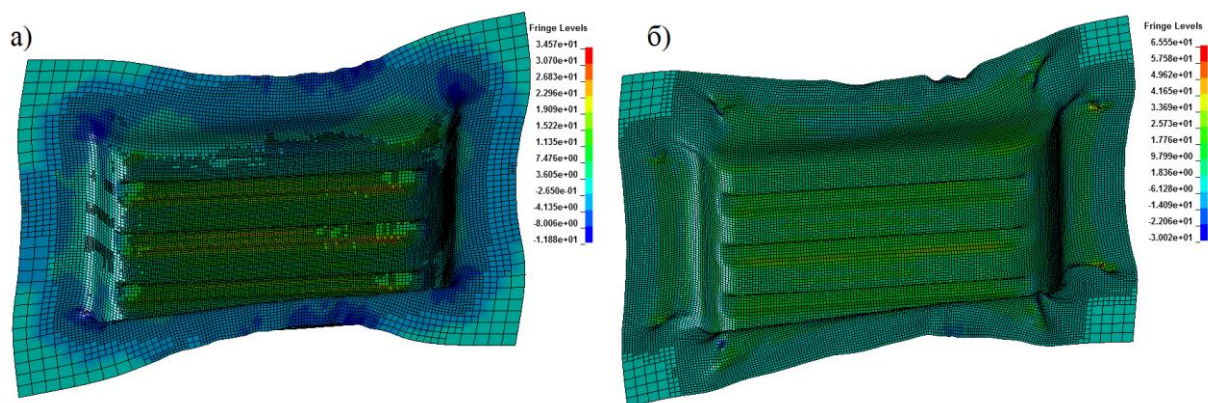


Рисунок 2.15 – Процентное утонение материала: а) – матрица без тормозных ребер; б) – матрица с тормозными ребрами

Далее была построена зависимость, на вероятность возникновения гофр. На которой можно наблюдать, что при вытяжке с матрицей с тормозными ребрами шанс возникновения гофр достаточно ниже, нежели это будет матрица с без тормозных элементов (рисунок 2.16).

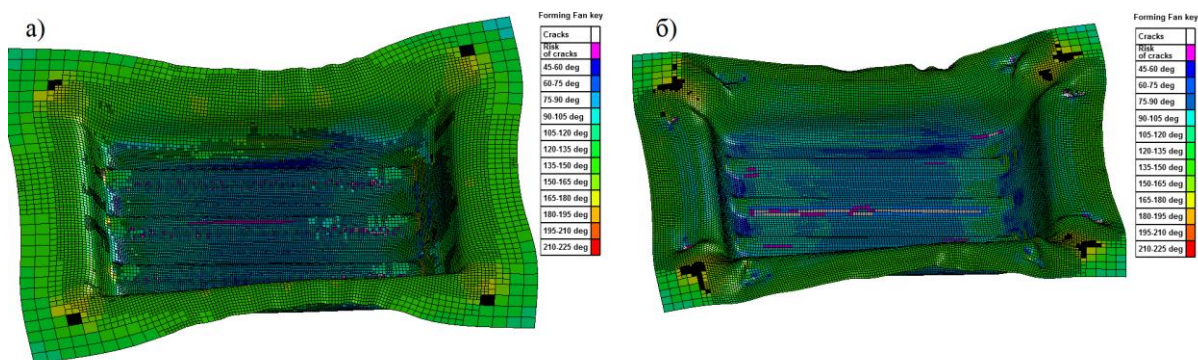


Рисунок 2.16 – Возникновение гофр, а) – матрица без тормозных ребер; б) – матрица с тормозными ребрами

Следующая диаграмма показывает формуемость материала. Для этого строится FLD – диаграмма, которая позволяет предсказать разрушение листового материала при штамповке, оценить качество получаемого изделия (рисунок 2.17).

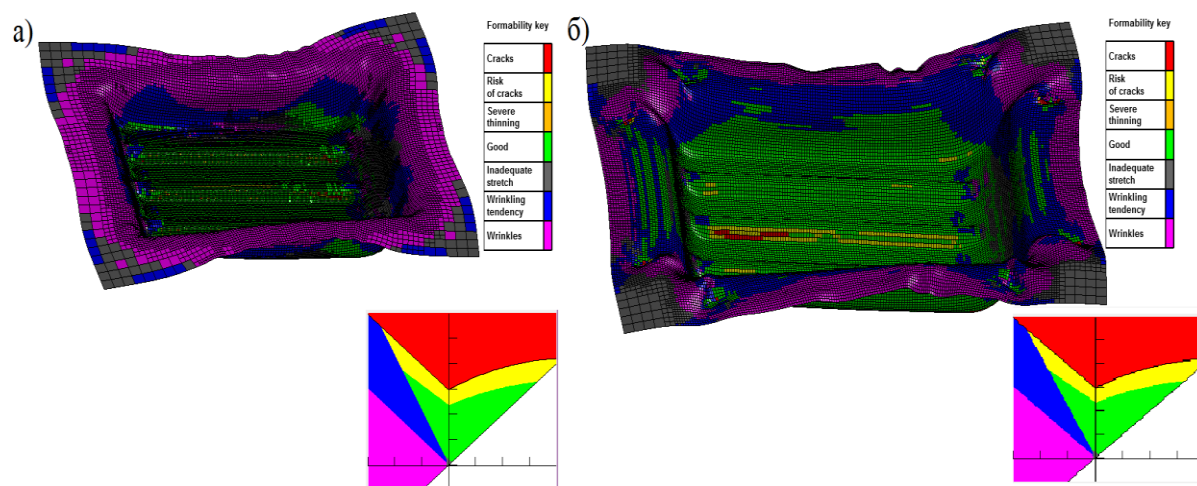


Рисунок 2.17 – Диаграмма формруемости

Вывод: для достижения указанной цели были выполнены теоретические и численные исследования процесса вытяжки с тормозными ребрами из пластичного материала по методике, изложенной [1]. Разработана математическая модель матрицы с тормозными ребрами.

Проанализировав полученные результаты, можно сказать, что при вытяжке на матрице с тормозными ребрами формруемость изделия выше, а шанс возникновения гофр меньше, чем на матрице без них.

2.3 Анализ пружинения детали после операции гибка

Целью данной задачи является определение пружинения после операции одноугловой гибки.

Теоретическая основа задачи

Гибка - технологическая операция листовой штамповки, в результате кото-

рой из плоской или изогнутой заготовки при помощи штампов получается изогнутая пространственная деталь. Гибка может производиться одновременно и с другими операциями - отрезкой, вырубкой, пробивкой.

Гибка может быть одноугловой, двухугловой, четырехугловой, многоугловой, круговой.

Гибка листового металла осуществляется в результате упругопластической деформации, протекающей различно с каждой сторон изгибаемой заготовки.

Слои металла внутри угла изгиба сжимаются и укорачиваются в продольном и растягиваются в поперечном направлении. Наружные слои растягиваются и удлиняются в продольном и сжимаются в поперечном направлении. Между удлиненными и укороченными слоями (волокнами) находится нейтральный слой, длина которого равна первоначальной длине заготовки (рисунок 2.18). При гибке узких полос происходит сильное искажение первоначального сечения, заключающее в уменьшении толщины в месте изгиба, уширении внутри угла с образованием поперечной кривизны и сужении с наружной стороны.

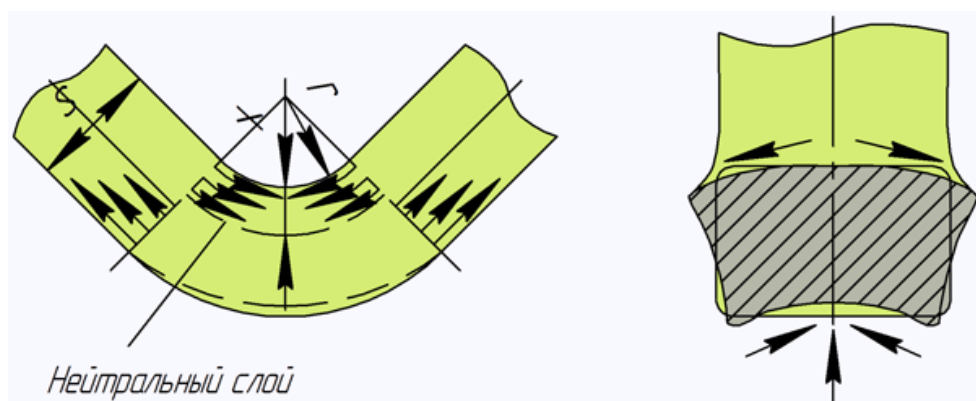


Рисунок 2.18 – Схема процесса гибки

В результате утонения материала и искажения форм поперечного сечения нейтральный слой в месте изгиба не проходит посередине сечения, а смещается

в сторону малого радиуса. При гибке широких полос и листов также происходит утонение материала, но почти без искажения поперечного сечения, так как деформации в поперечном направлении противодействует сопротивление материала большой ширины. Лишь по краям широких полос проходит деформация, аналогичная поперечной деформации узких полос [1].

Чаще всего гибка выполняется на кривошипных и гидравлических прессах, валковых листогибочных машинах, специальных профилегибочных машинах для гибки с растяжением, а также на универсально – гибочных автоматах.

Среди процессов гибки V-образная гибка является наиболее простым методом и широко используется в широком диапазоне производственных процессов. Процесс данной гибки обеспечивается точным перемещением пуансона по отношению к V-образной матрице. Таким образом, листовой металл сгибается, создавая угол в точке контакта между пуансоном и листом. Листовой металл имеет 3 точки контакта с пуансоном и матрицей (рисунок 2.19).

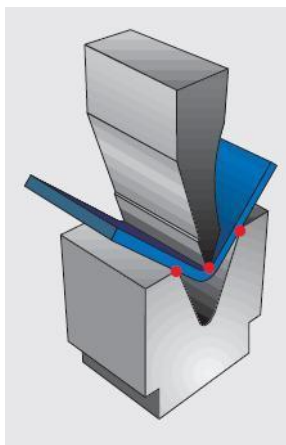


Рисунок 2.19 – Контакт заготовки с пуансоном и матрицей

Уголгиба определяется тем, насколько глубоко пуансон вошел внутрь матрицы. Обратное пружинение компенсируется увеличенным ходом пуансона, что

позволяет листу вернуться к требуемому углугиба (перегиб листа) после снятия нагрузки. Преимуществами V-образной гибки являются: низкое усилие гибки, возможность гибки очень толстых листов и возможность получения различных углов гибки используя одни и те же инструменты. Эти преимущества делают этот метод менее дорогим и более выгодным. V-образная гибка характеризуется сложностью достижения точного угла в связи с наличием эффекта обратного пружинения, а также необходимостью использовать высокотехнологичные прессы, чтобы гарантировать отличную точность гибки.

Так как гибка является процессом пластической деформации, сопровождающаяся упругой деформацией, определяемой законом Гука. По окончании гибки упругая деформация устраняется, вследствие чего происходит изменение размеров изделия по сравнению с размерами, заданными инструментом (пуансоном, матрицей). Упругое пружинение обычно выражается в угловом изменении и является той величиной, на которую уменьшится угол гибки, чтобы получить требуемый угол изогнутой детали. Величина упругого пружинения различна для свободной гибки без калибровки материала и для гибки в упор с калибровкой материала. При свободной гибке величина упругого пружинения зависит от упругих свойств материала, степени деформации при гибке, угла гибки и способа гибки. При гибке с большими радиусами закруглений необходимо определить не угловое пружинение, а упругое изменение радиуса после гибки.

Исходные данные задачи

Первым этапом для достижения поставленной задачи было необходимо рассчитать исходную заготовку для гибки.

Рисунок 2.21 – Наложение сетки

Следующим шагом необходимо задать заготовке необходимый материал (рисунок 2.22) и задать толщину заготовке (Thickness=0.5), (Friction=0,125) (в нашем случае *mat_transversely_anisotropic_elastic_plastic этот материал предназначен для моделирования анизотропных материалов в процессе листовой штамповки. В данной модели учитывается только поперечная анизотропия)

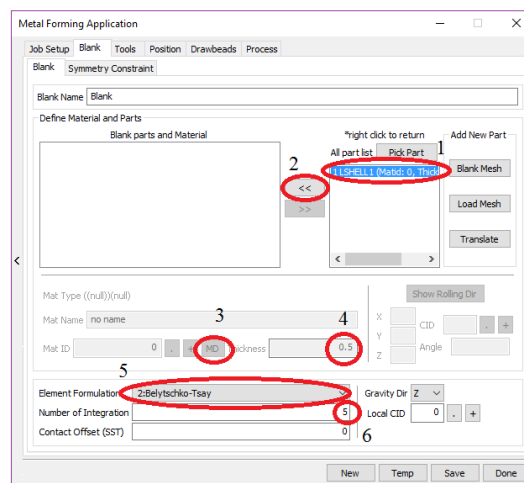


Рисунок 2.22 – Загрузка материала и задание толщины

После этого необходимо выбрать процесс формообразования (рисунок 2.23) (для данной вытяжки используем Drawing, кнопка Preview поможет проследить анимацию процесса. Обращаем особое внимание на то чтобы все инструменты были активны).

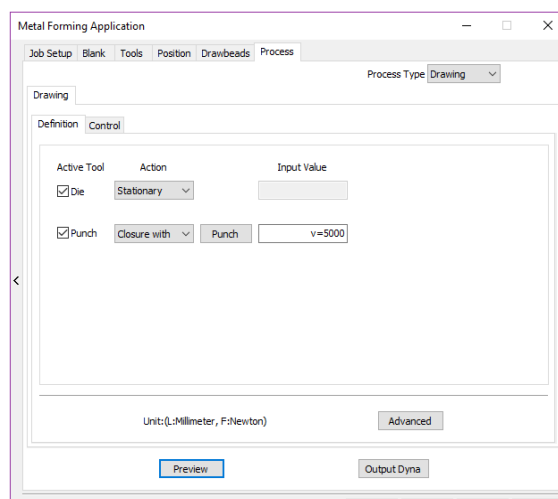


Рисунок 2.23 – Процесс формообразования

Вследствие за этим следует сохранение проекта (рисунок 2.24). Следует обратить внимание на позицию 2 (Write all model to one), данная функция сохранит всю модель одним единым файлом для простоты работы в дальнейшем.

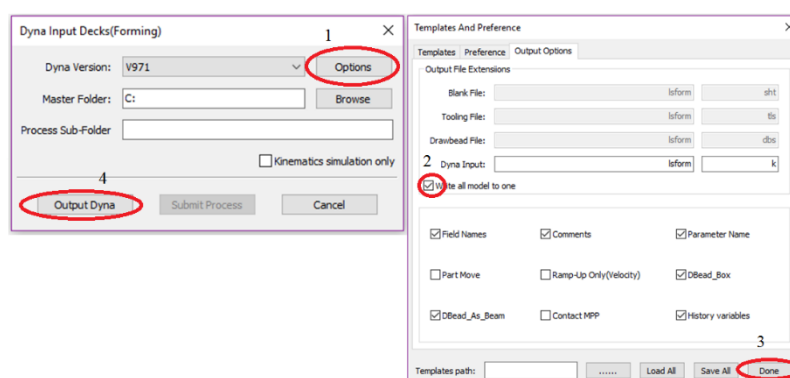


Рисунок 2.24 – Сохранение проекта

Далее необходимо открыть сохраненный файл в постпроцессоре LS-DYNA для расчета задачи, после того как программа закончила расчет необходимо зайти в папку со всем проектом и найти в нем файл dynain (благодаря которому можно определить упругое пружинение при гибке), затем его следует импортировать в Ls-Prepost (рисунок 2.25).

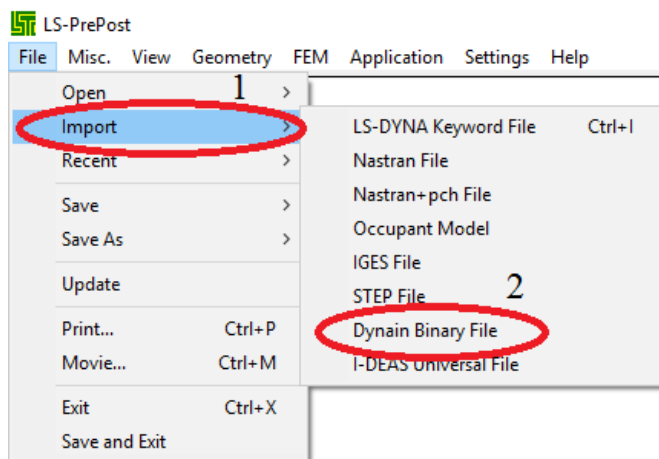


Рисунок 2.25 – Загрузка Dynain файла

Следующим шагом необходимо задать необходимый материал (рисунок 2.26) и задать толщину (Thickness=0.5), (Friction=0,125) (в нашем случае *mat_transversely_anisotropic_elastic_plastic этот материал предназначен для моделирования анизотропных материалов в процессе листовой штамповки. В данной модели учитывается только поперечная анизотропия)

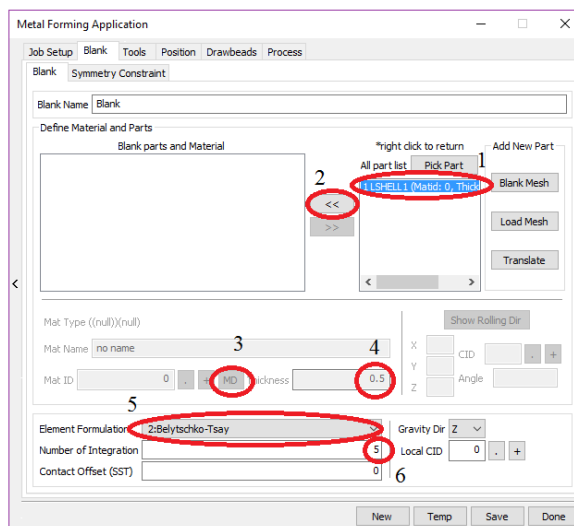


Рисунок 2.26 – Загрузка материала и задание толщины

После этого необходимо выбрать процесс формообразования (рисунок 2.27) для данной вытяжки используем SpringBack, обращаем внимание на оси X Y Z, которые должны быть активны (установлены галочки).

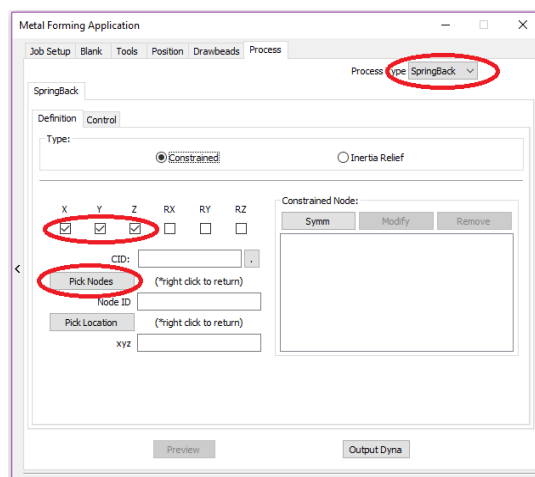


Рисунок 2.27 – Процесс формообразования

Далее необходимо выбрать три узла (рисунок 2.28), в такой последовательности чтобы они образовывали правильный треугольник.

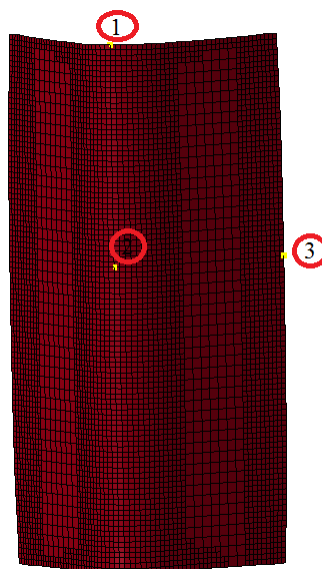


Рисунок 2.28 – Выбор узлов

После чего следует сохранение проекта (рисунок 2.29). Следует обратить внимание на позицию 2 (Write all model to one), данная функция сохранит всю модель одним единым файлом для простоты работы в дальнейшем.

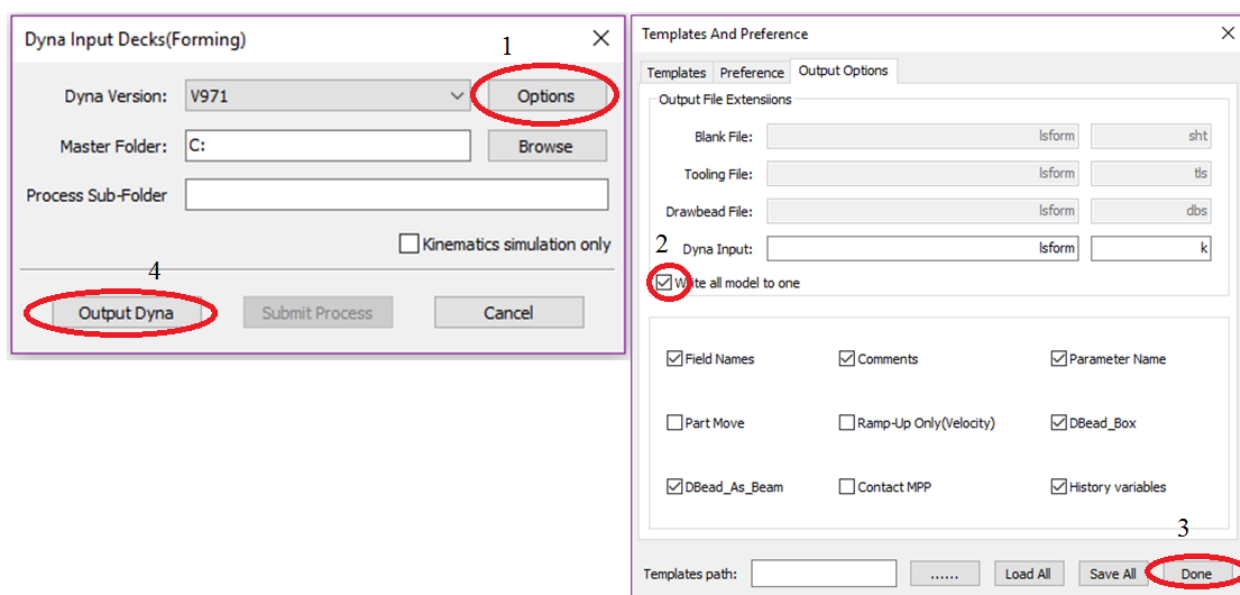


Рисунок 2.29 – Сохранение проекта

Далее необходимо открыть сохраненный файл в постпроцессоре LS-DYNA для расчета задачи, на выходе которого мы получим d3plot.

Анализ расчетов операции вытяжки с торможением материала.

Математическое моделирование процесса гибки с последующим определением упругого пружинения после деформирования при помощи программного обеспечения LS-PREPOST и LS-DYNA позволило установить особенности при одноугловой гибки. На основании полученных результатов было произведено построение графиков.

На (рисунке 2.30) представлено процентное утонение материала при одноугловой гибки.

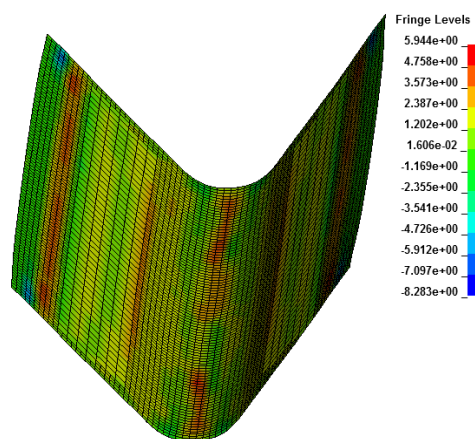


Рисунок 2.30 – Процентное утонение материала

Далее был проведен анализ, на какую величину будет происходить пружинение материала по окончании гибки (рисунок 2.31).

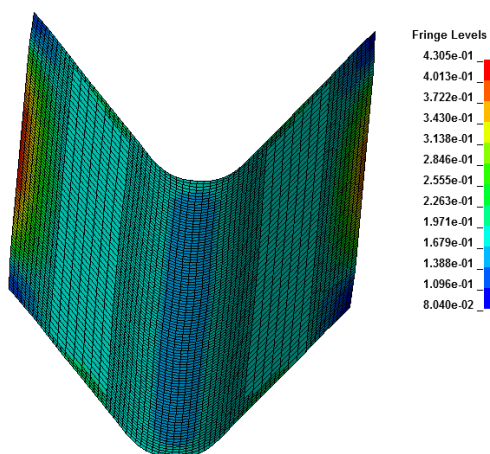


Рисунок 2.31 – Анализ пружинения

Вывод: для достижения указанной цели были выполнены теоретические и численные исследования процесса гибки с последующим определением пружинения материала в конечный результат гибки по методике, изложенной [1]. Разработана математическая модель матрицы и пуансона для гибки.

Проанализировав полученные результаты, можно сказать, что процесс гибки интересен тем что по окончании процесса происходит пластическая деформация, то есть заготовка пытается вернуть первоначальный объем и частично форму.

2.4 Операция отбортовка

Целью данной задачи является исследование процесса деформации материала при отбортовки отверстия.

Теоретическая основа задачи

Отбортовка подразделяется на два основных вида:

- отбортовка отверстий;
- отбортовка внешнего контура.

Они различаются характером деформации, схемой напряженного состояния и производственным назначением. Отбортовка отверстий представляет собой образование бортов вокруг заранее сделанных отверстий (возможны случаи и без отверстий) или по краю полых деталей, производимое за счет растяжения металла.

Отбортовка наружного контура представляет собой образование низких бортов по наружному неровному краю заготовок, производимое за счет растяжения или сжатия материала. Технологически разные случаи отбортовки могут быть разделены сочетаниями относительных диаметров: D_0/d_1 и d_0/d_1 , где D_0 - диаметр заготовки; d - диаметр отбортовки; d_0 - диаметр отверстия.

На рисунке 2.32 приведена зависимость взаимоположения технологически различных областей применения отбортовки которые зависят D_0/d_1 и d_0/d_1 величин, на схемах изображены различные случаи наружной и внутренней отбортовки круглых заготовок (с предварительно пробитым отверстием), относящиеся к различным областям графика [2].

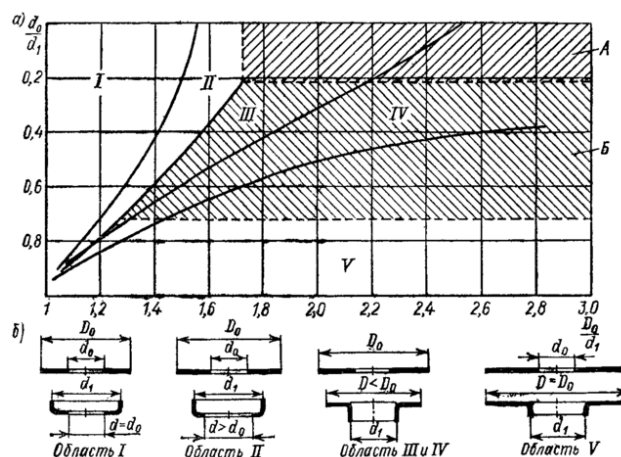


Рисунок 2.32 - Случаи отбортовки в зависимости от D_0/d_1 и d_0/d_1

Область I охватывает способы отбортовки наружных кромок без деформации отверстия, вследствие того, что растяжение дна практически отсутствует.

Область II относится к случаю наружной отбортовки с растяжением дна и увеличением размеров отверстия ($d > d_0$).

Области III и IV охватывают процессы отбортовки отверстия, происходящие при деформации всей заготовки. В этом случае отбортовка отверстия сопровождается уменьшением диаметра фланца ($D < D_0$). Разница между областями III и IV заключается в различии силовых параметров процесса, а также в том, что в области III вначале происходит деформация фланца, а затем дна заготовки, а в области IV - наоборот. Кроме того, в области IV возможно зарождение трещин по краю отверстия.

Область V является основной в процессах отбортовки отверстия и охватывает случаи отбортовки, при которых деформация наружного диаметра заготовки не происходит ($D = D_0$). В верхней части графика приведена технологически недопустимая область, в которой образуются окружные трещины, сопровождаемые иногда отрывом дна.

Отбортовка отверстий широко используется в штамповочном производстве, замещающая операции вытяжки, с дальнейшей вырубкой дна. Особенно значительную эффективность дает применение данного процесса при получении деталей с широким фланцем, когда вытягиванием трудно и необходимо делать несколько операций.

Деформация металла при отбортовке характеризуется изменением радиально-кольцевой сетки, нанесенной на заготовку (рисунок 2.33) [1].

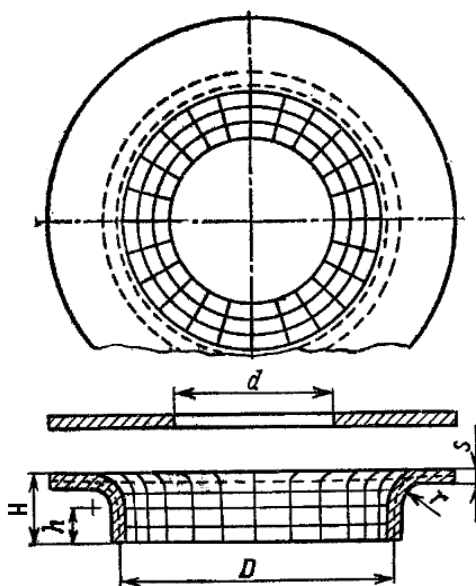


Рисунок 2.33 – Схема отбортовки

Рассматриваемый процесс является более рациональным вследствие большей устойчивости пластической деформации металла и отсутствия разрыва и трещин, потому что в процессе утонения образовывается более благоприятное напряженное состояние с появлением значительных сжимающих напряжений. Это позволяет производить отбортовку при смягченных «безопасных» коэффициентах, а высоту борта получить за счет максимально допустимого утонения материала.

На практике применяются следующие способы отбортовки:

- мелких отверстий пуансоном с сферической или заостренной формой конца;
- средних отверстий ступенчатым пуансоном с кольцевыми выступами постепенно, что увеличивает диаметр, причем первая ступень делает только отбортовку допустимой величины, а следующие кольцевые выступы делают постепенное утонение и увеличение высоты борта;
- больших отверстий в две операции - отбортовка и протягивание (если недостаточно величины хода пресса).

Исходные данные задачи

Первым этапом для достижения поставленной задачи было необходимость рассчитать исходную заготовку с отверстием для отбортовки.

Следующим шагом было выбор пуансона, определение радиусов, зазоры между рабочими частями.

Далее необходимо смоделировать на основании полученных расчетов необходимые компоненты (матрица, пуансон, выталкиватель, заготовка) в программном продукте Siemens NX 9.0, которые сохраняются в формате IGES-file, после чего импортируются в LS-DYNA (рисунок 2.34).

листовой штамповки. В данной модели учитывается только поперечная анизотропия).

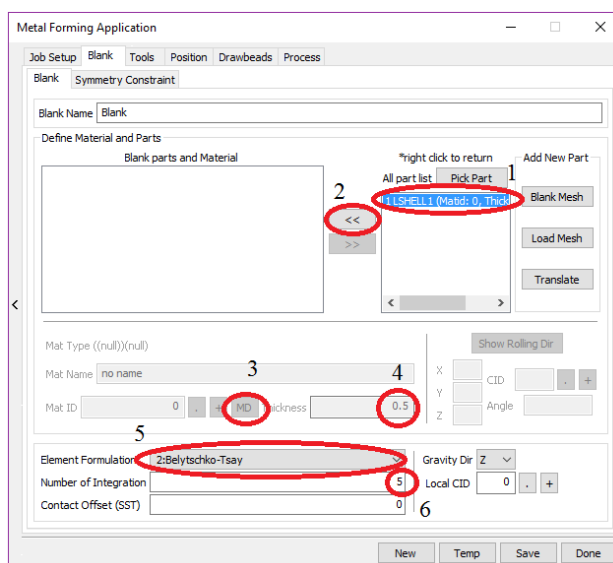


Рисунок 2.36 – Загрузка материала и задание толщины

После этого необходимо выбрать процесс формообразования (рисунок 2.37) (для данной вытяжки используем Flanging, кнопка Preview поможет проследить анимацию процесса. Обращаем особое внимание на то чтобы все инструменты были активны. Акцентирую внимание на вкладку Closing в который движение стоит только у прижима Binder, это означает что сначала идет смыкание прижима с заготовкой, а затем только процесс вытяжки).

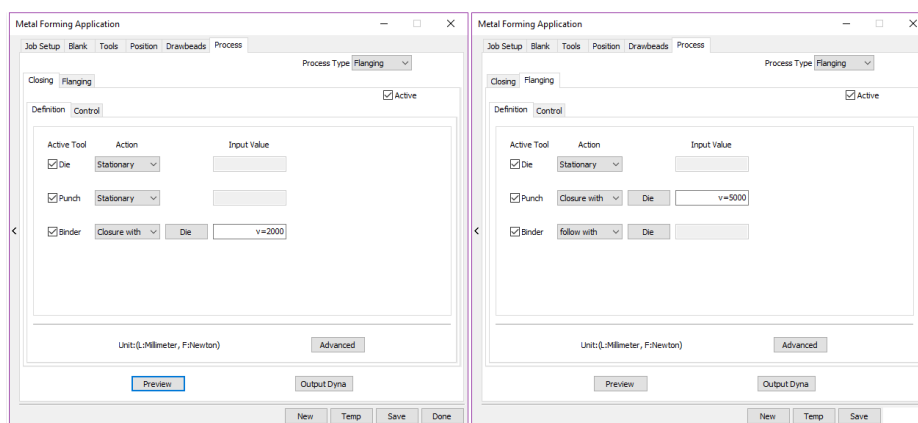


Рисунок 2.37 – Процесс формообразования

Вследствие за этим следует сохранение проекта (рисунок 2.38). Следует обратить внимание на позицию 2 (Write all model to one), данная функция сохранит всю модель одним единым файлом для простоты работы в дальнейшем.

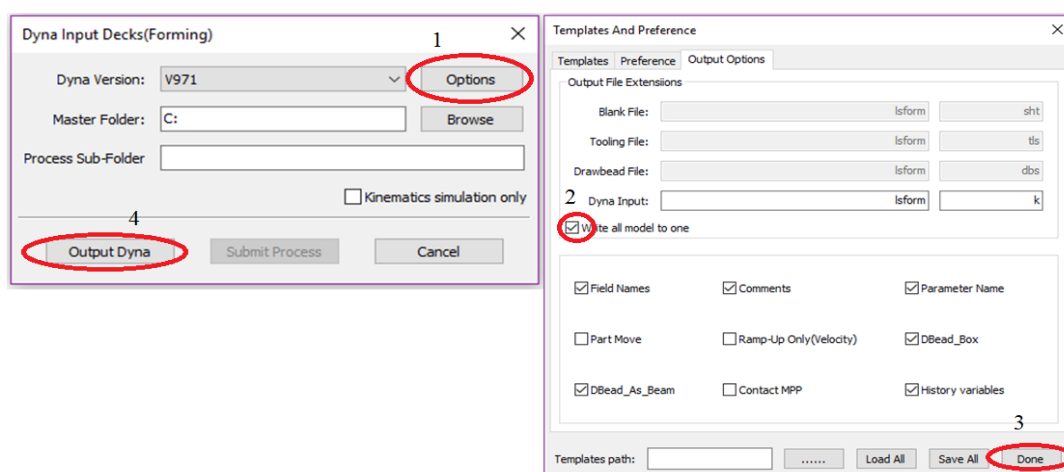


Рисунок 2.38 – Сохранение проекта

Далее необходимо открыть сохраненный файл в постпроцессоре LS-DYNA для расчета задачи, на выходе которого мы получим d3plot.

Анализ расчетов операции отбортовка отверстия

Математическое моделирование процесса отбортовки при помощи программного обеспечения LS-PREPOST и LS-DYNA позволило установить харак-

тер деформации заготовки в процессе отбортовки отверстия. На основании полученных результатов было произведено построение графиков. В данном случае для отбортовки отверстия будет использоваться сферический пуансон (рисунок 2.39).

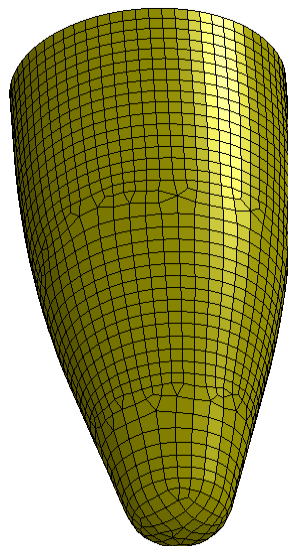


Рисунок 2.39 – Сферический пуансон

Ниже представлена смоделированная заготовка под отбортовку, с ранее пробитым отверстием (рисунок 2.40).

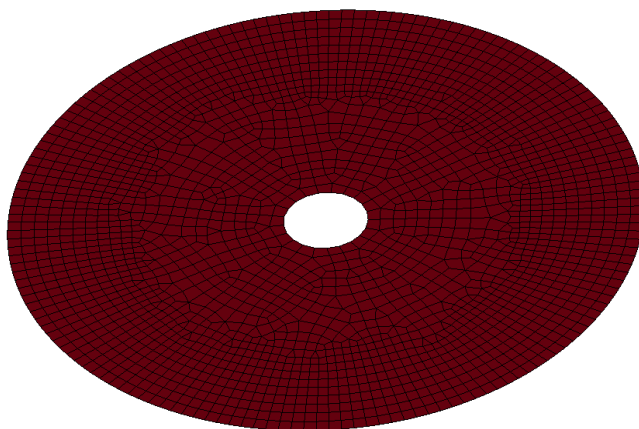


Рис. 2.40 – Начальная заготовка

Следующим этапом была отбортовка отверстия и анализ полученного отверстия на процентное утонение материала (рисунок 2.41).

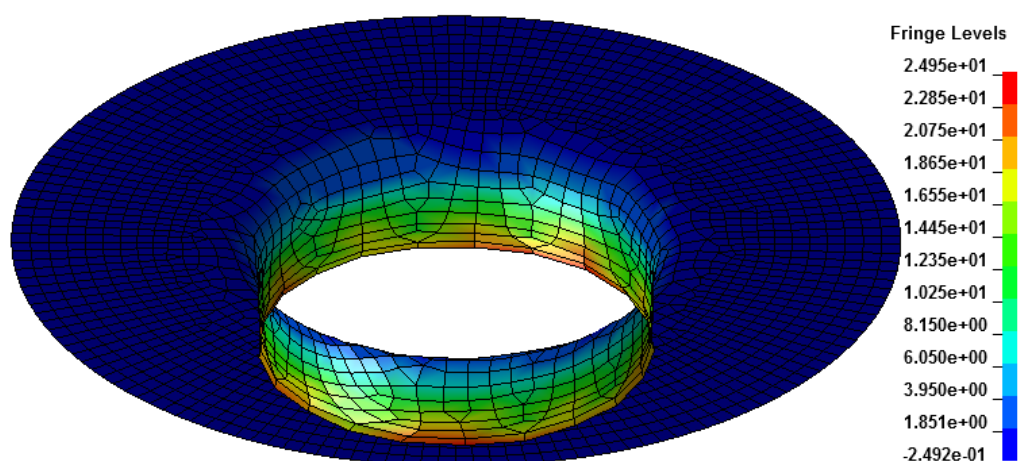


Рисунок 2.41 – Процентное утонение материала

Следующая диаграмма показывает формуемости материала. Для этого строится FLD – диаграмма, которая позволяет предсказать разрушение листового материала при штамповке, оценить качество получаемого изделия (рисунок 2.42).

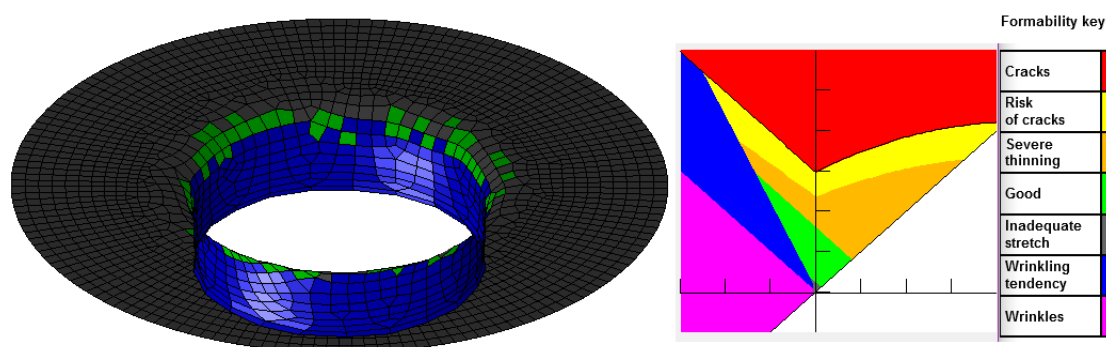


Рисунок 2.42 – Диаграмма пластичности

Вывод: для достижения указанной цели были выполнены теоретические и модельные исследования процесса отбортовки детали с предварительно пробитым отверстием в нем. Разработаны математические модели для имитации данной задачи.

Проанализировав полученные результаты, можно сказать, что при отбортовке отверстий демонстрируется образование бортов вокруг предварительно пробитых отверстий. В отличие от вытяжки отбортовка не связана с деформацией

всего фланца, благодаря этому ее легко проводить и при изготовлении деталей с очень большим фланцем, когда вытяжка затруднительна и требует большого количества подходов.

2.5 Структура k-файла

Целью данной задачи является анализ структуры k-файлов.

Теоретическая основа задачи

Созданный k-файл является обыкновенным текстовым файлом и может быть открыт и переписан в любом текстовом редакторе. В этом файле содержатся так называемые карты (cards), и все они начинаются только с ключевого слова (keyword). Перед ключевыми словами всегда идет звездочка (*), и обычно пишется через заглавные буквы. Если в k-файле не используется пунктуация в виде запятых, то в таком случае числовые параметры, записываемые в картах, должны быть расположены в строго определенном месте, позиции на строке. Это важно учитывать при редактировании файла, в противном случае при запуске программы LS_DYNA будут выдаваться ошибки.

Исходные данные задачи

Создание конечно-элементной модели чем-то напоминает кирпичную кладку, но при этом требует намного меньше физической силы. Конечные элементы модели, как кирпичи в стене, связываются между собой узлами (цемент). На (рисунке 2.43) показана конечно-элементная модель. В правой части рисунка показан увеличенный фрагмент модели с выделенной частью H799. Он изображён снизу справа, определяется он восемью узлами (1255, 1256, 1258, 1318, 1319,

1322, 1321). Соответственно вся модель состоит из элементов (восьмиугольников), которые в свою очередь определяются восемью узлами.

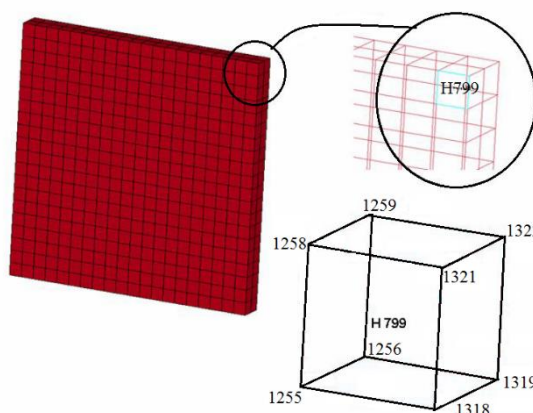


Рисунок 2.43 – Конечно-элементная модель

Создать k-файл можно как в обычном блокноте, так и в любом специальном редакторе (для просты чтения лучше использовать WordPad, когда он будет открыт текст будет иметь следующий вид (рисунок 2.44)).

```
*KEYWORD
*ELEMENT_
$#   eid      n1      n2      n3      n4      n5      n6      n7      n8
      799      1      1255    1256    1259    1258    1318    1319    1322    1321
*NODE
$#   nid      x      y      z      tc      rc
      1255      0.000    45.00000000    45.00000000
      1256      5.00000000    45.00000000    45.00000000
      1258      0.000    50.00000000    45.00000000
      1259      5.00000000    50.00000000    45.00000000
      1318      0.000    45.00000000    50.00000000
      1319      5.00000000    45.00000000    50.00000000
      1321      0.000    50.00000000    50.00000000
      1322      5.00000000    50.00000000    50.00000000
*PART
$# title
boxsolid
$#   pid      secid      mid      eosid      hgid      grav      adopt      tmid
      1
*END
```

Рисунок 2.44 - Пример k-файла

К-файл начинается с ключевого слова *keyword и оканчивается *end. Следует обратить внимание на то, что все ключевые слова записываются со «звездочки». Если впереди стоит \$, то из этого следует, что вся строка закомментирована и она не оказывает влияние на работу k-файла. Каждая строка является

набором чисел или каких-либо свойств, написанных в четко определенной форме.

За ключевым словом `*node` следует 8 карт, каждая из которых определяет номер и координаты узлов, а также граничные условия. Первое число — это порядковый номер узла (целое число, на которое дается 8 знаков), второе число — это координаты по оси X (число с плавающей точкой, ему выделяется 16 знаков), четвертое — координата по оси Z (число с плавающей точкой, ему выделяется 16 знаков), пятое — ограничение перемещений (число с плавающей точкой, на него отводится 8 символов), шестое — ограничение вращения (число с плавающей точкой, на него отводится 8 символов). За словом `*element_solid` следует одна карта, в которой размещается номер элемента, номер части (начинается с ключевого слова `*part`), к которой он принадлежит и номер узлов, из которых элемент состоит, все задаваемые числа являются целыми и на них дается 8 знаков.

Ключевое слово `*part`, что в переводе значит-часть. К этому слову относятся две карты. Первая это заголовок (подразумевает название части), вторая определяет номер части, номер секции, номер материала, номер уравнения состояния, идентификатор гравитационной нагрузки, возможность перестроения сетки, идентификатор теплофизических свойств материала для которых отводится 8 знаков.

Для полной записи конечно-элементной модели необходимо прописать сечение и материал. Для описания сечения используется ключевое слово, `*section` оно необходимо для формулировки конечных элементов, определения правила интегрирования и характеристики поперечного сечения.

В зависимости от написания конечного элемента могут использоваться разные ключевые слова:

- `*section_beam` – определяет характеристики поперечного сечения для балочных, стержневых и дискретных элементов;
- `*section_shell` – определяет параметр поперечного сечения для оболочечных элементов;
- `*section_solid` – определяет характеристики поперечного сечения для элементов сплошной среды;
- `*section_sph` – определяет характеристики сечения потока среды из частиц.

Для выбранного элемента используется ключевое слово `*section_solid`, для него задается одна карта, в которой указывается номер сечения, опция формулировки элемента, тип элемента для задания окружающей среды.

На рисунке 2.45 приведен пример задания и описание параметров.

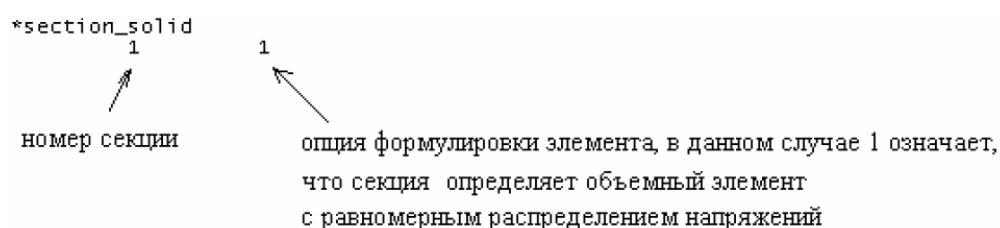


Рисунок 2.45 - Пример задания `*section_solid`

Остается задать материал. В пакете LS-DYNA представлено много вариантов задания материалов, для каждого варианта имеется свое ключевое слово. Для примера приведем несколько из них:

- *mat_elastic – упругий изотропный материал;
- *mat_plastic_kinematic – модель используется для расчета изотропного и кинематического упрочнения пластичных материалов;
- *mat_johnson_cook – материал, использующий модель Джонсона-Кука;
- *mat_rigid – модель абсолютно жесткого материала.

В качестве примера задания используем модель упругого материала. на задается ключевым словом *mat_elastic. Для задания упругого материала требуется ввести уникальный идентификатор материала (номер, целое число), плотность материала, модуль Юнга, коэффициент Пуассона, коэффициент демпфирования при осевом нагружении и коэффициент демпфирования при изгибе (последние два параметра требуется вводить при использовании балочного элемента Бельчико-Швера, тип 2 в карте для ключевого слова *section_beam), остальные параметры требуется вводить при использовании опции fluid. Для всех параметров отводится 8 символов.

Зададим материал со следующими свойствами

$$E = 210 \text{ ГПа}, \rho = 7850 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}, \mu = 0.3$$

Полученная запись в k-файле (рисунок 2.46).

```
*MAT_ELASTIC
1      7850  2.1e11      0.3
```

Рисунок 2.46 – Параметры типа материала «Mat_elastic»

Параметры задаются в тех единицах, которые определяет сам пользователь, и придерживается их на всем протяжении задачи и безусловного результаты бу-

дуг получаться в тех же самых единицах. Например, если длина задается в метрах (м), время в секундах (с), масса в килограммах (кг), то остальные параметры получаются из этих базовых, тогда сила в Ньютонах (Н), давление в паскалях (Па), энергия в джоулях (Дж). А если к примеру, задать длину в миллиметрах (мм), время в секундах (с), массу в тоннах (т), то получается силы измеряются в Ньютонах (Н), давление в мегапаскалях (МПа), энергия в 0.001 Джоуля (0.001Дж)

Из это всего следует, что приведенные ключевые слова и соответствующие им карты позволяют задать конечно-элементную модель, в которой определена одна часть, одна секция, один материал, восемь узлов и один элемент (рисунок 2.47).

```

*KEYWORD
*ELEMENT_SOLID
$# eid pid n1 n2 n3 n4 n5 n6 n7 n8
799 1 1255 1256 1259 1258 1318 1319 1322 1321
*NODE
$# nid x y z tc rc
1255 0.000 45.0000000 45.0000000
1256 5.0000000 45.0000000 45.0000000
1258 0.000 50.0000000 45.0000000
1259 5.0000000 50.0000000 45.0000000
1318 0.000 45.0000000 50.0000000
1319 5.0000000 45.0000000 50.0000000
1321 0.000 50.0000000 50.0000000
1322 5.0000000 50.0000000 50.0000000
*PART
$# title
boxsolid
$# pid secid mid eosid hgid grav adpopt tmid
1 1 1
*SECTION_SOLID
1 1
*MAT_ELASTIC
1 7850.00 2.1e11 0.3
*END

```

Рисунок 2.47 - Полученный k-файл

3 Безопасность и экологичность проекта

3.1 Техническая характеристика объекта

В данной бакалаврской работе, оборудование, на котором производится весь процесс выступает персональный компьютер со следующими характеристиками:

- Операционная система: Windows 10.
- Процессор: Intel (R) Core(TM) i5-5200 U.
- Операционная система: 4 Гб.

Данных системных требований хватает для работы в программах Ls-Prepost, LS-DYNA, Siemens NX9.

Таблица 3.1 – Технологический паспорт объекта

№ п/п	Технологический процесс	Технологическая операция, вид выполняемых работ	Наименование должности работника, выполняющего технологический процесс, операцию	Оборудование, техническое устройство, приспособление
1	Разработка обучающих задач для имитационного моделирования технологических процессов в CAE – программах для персонала	Разработка обучающих задач	Оператор ЭВМ(студент)	Персональный компьютер

3.2 Идентификация профессиональных рисков

Таблица 3.2 – Идентификация профессиональных рисков

№п/п	Производственно-технологическая и/или эксплуатационно-технологическая операция, вид выполняемых работ	Опасный и /или вредный производственный фактор	Источник опасного и / или вредного производственного фактора
1	Разработка обучающих задач для имитационного моделирования технологических процессов в САЕ – программах для персонала	Физические: Повышенные уровни электромагнитного излучения. Повышенные уровни запыленности воздуха Пониженная влажность воздуха рабочей зоны. Понижение уровня освещенности. Химические: Повышение озона. Повышение двуокиси углерода, аммиака, формальдегида. Психологические: Поза и статические нагрузки. Нагрузка на зрение. Нервное напряжение, утомляемость. Интеллектуальные нагрузки. Эмоциональные нагрузки. Монотонность работы.	

3.3 Методы и средства снижения профессиональных рисков

Таблица 3.3 – организационно-технические методы и технические средства снижения негативного воздействия опасных и вредных производственных факторов (реализованных в базовом исходном состоянии и дополнительно или альтернативно предлагаемых для реализации в рамках дипломного проекта).

Таблица 3.3 – Методы и средства снижения профессиональных рисков

№ п/п	Опасный и / или вред- ный производствен- ный фактор	Организационно-технические методы и технические средства защиты, снижения, устранения опасного и / или вредного производственного фактора	Средства ин- дивидуаль- ной защиты работника
1	Повышение уровня электромагнитного излучения	Сохранении оптимальной дистанции между опера- тором и ПК, размещении источников электромагнит- ного поля таким образом, чтобы их наиболее излуча- ющие части, такие как задняя стенка монитора, бу- дут направлены не в сторону рабочих мест	-
2	Повышенные уровни запыленности воздуха рабочей зоны.	Профилактика работы кулеров, вентиляция помеще- ния, влажная уборка в помещении	-
3	Пониженная влаж- ность воздуха рабочей зоны	Влажная уборка в помещении	-
4	Пониженный уровень освещенности	Следует применять преимущественно люминес- центные лампы и компактные люминесцентные лампы Следует проводить чистку стекол оконных рам и све- тильников не реже двух раз в год и проводить свое- временную замену перегоревших ламп	-

Продолжение таблицы 3.3

5	Поза и статические нагрузки	Оптимизация рабочего времени и распределение времени отдыха в соответствии с нормативной документацией. Выполнение специальных комплексов упражнений	-
6	Нагрузка на зрение	Оптимизация рабочего времени и распределение времени отдыха в соответствии с нормативной документацией	-
7	Утомление рук	Оптимизация рабочего времени и распределение времени отдыха в соответствии с нормативной документацией. Выполнение специальных комплексов упражнений	-
8	Нервное напряжение, утомляемость	Оптимизация рабочего времени и распределение времени отдыха в соответствии с нормативной документацией	-
9	Интеллектуальные нагрузки	Оптимизация рабочего времени и распределение времени отдыха в соответствии с нормативной документацией	-
10	Эмоциональные нагрузки.	Оптимизация рабочего времени и распределение времени отдыха в соответствии с нормативной документацией	-

3.4 Обеспечение пожарной безопасности технического объекта

Пожарная безопасность — состояние объекта, при котором исключается возможность пожара, а в случае его возникновения предотвращается воздействие на людей опасных его факторов и обеспечивается защита материальных ценностей.

Пожарная безопасность обеспечивается системой предотвращения пожара

и системой пожарной защиты. Во всех служебных помещениях обязательно должен быть «План эвакуации людей при пожаре», регламентирующий действия персонала в случае возникновения очага возгорания и указывающий места расположения пожарной техники.

В современных ЭВМ очень высокая плотность размещения элементов электронных схем. В непосредственной близости друг от друга располагаются соединительные провода, кабели. При протекании по ним электрического тока выделяется значительное количество теплоты. При этом возможно оплавление изоляции. Для отвода избыточной теплоты от ЭВМ служат системы вентиляции и кондиционирования воздуха. При постоянном действии эти системы представляют собой дополнительную пожарную опасность.

Таблица 3.4 – Идентификация классов и опасных факторов пожара

№ п/п	Оборудование	Класс пожара	Опасные факторы пожара	Сопутствующие проявления факторов пожара
1	Персональный компьютер	В, Е	Пламя и искры; повышенная температура окружающей среды, повышенная концентрация токсичных продуктов горения и термического разложения, пониженная концентрация кислорода, снижение видимости в дыму (в задымленных пространственных зонах)	Вынос (замыкание) высокого электрического напряжения на токопроводящие части технологических установок, оборудования, агрегатов, изделий и иного имущества

Таблица 3.5 – Технические средства обеспечения пожарной безопасности

Первичные средства пожаротушения	Мобильные средства пожаротушения	Стационарные установки системы пожаротушения	Средства пожарной автоматики	Пожарное оборудование	Средства индивидуальной защиты и спасения людей при пожаре	Пожарный инструмент (механизированный и немеханизированный)	Пожарные сигнализация, связь и оповещение.
Огнетушители	Пожарные автомобили	Водяные установки систем пожаротушения	Дымовые датчики	Рукава пожарные	Противогазы	Пожарные багры	Оповещатели о пожаре (звуковые, речевые)
Песок	Пожарные мотопомпы	Газовые установки систем пожаротушения	Тепловые датчики	Пожарный инвентарь	Носилки	Пожарные топоры	Световые указатели "ВЫХОД"
Кошма	Приспособленные технич. спец. средства (тягачи, прицепы)	Порошок. Установки систем пожаротушения	Применно контрольные приборы	Колонка пожарная	Защитные костюмы	Лопаты штыковые	Ручные пожарные извещатели

Таблица 3.6 – Организационные (организационно-технические) мероприятия по обеспечению пожарной безопасности

Наименование технологического процесса, оборудования технического объекта	Наименование видов реализуемых организационных (организационно-технических) мероприятий	Предъявляемые требования по обеспечению пожарной безопасности, реализуемые эффекты
Разработка методических пособий для персонала На ПК и программных продуктах SiemensNX 9.0 LS-PREPOST и LS-DYNA	Обучение персонала требования ПБ; соблюдение техники безопасности; соблюдение последовательности алгоритма технологического процесса; наличие средств пожаротушения	Квалифицированный персонал; обеспечение защиты помещений системами обнаружения пожара; оповещения и эвакуации; наличие систем пожаротушения

3.5 Обеспечение экологической безопасности технического объекта

Прямым и в тоже время косвенным воздействием на окружающую среду можно считать процесс производства компьютеров и компьютерной техники. Воздействие компьютеров на окружающую среду определяется именно тем, как воздействует на окружающую среду продукция компаний и фирм, производящих компьютеры и комплектующие устройства именно в процессе производства, а не в процессе эксплуатации.

Таблица 3.7 – Идентификация экологических факторов технического объекта

Наименование технического объекта, производственного технологического процесса	Структурные составляющие технического объекта, производственно-технологического процесса (производственного здания или сооружения по функциональному назначению, технологические операции, оборудование), энергетической установки, транспортного средства и т.п.	Негативное воздействие технического объекта на атмосферу (вредные и опасные выбросы в окружающую среду)	Негативное воздействие технического объекта на гидросферу (образующие сточные воды, забор воды из источников водоснабжения)	Негативное воздействие технического объекта на литосферу (почву, растительный покров, недра) (образование отходов, выемка плодородного слоя почвы, отчуждение земель, нарушение и загрязнение растительного покрова и т.д.)
Разработка обучающих программ для персонала	ПК и программные продукты Siemens NX 9.0 LS-PREPOST и LS-DYNA	Повышение озона Повышение двуокиси углерода, аммиака,	Утилизация ртутных ламп Утилизация расходных материалов	-

Таблица 3.8 – Разработанные организационно-технические мероприятия по снижению негативного антропогенного воздействия технического объекта на окружающую среду

Наименование технического объекта	Разработка обучающих задач для имитационного моделирования технологических процессов в САЕ – программах для персонала
Мероприятия по снижению негативного антропогенного воздействия на атмосферу	Использование вытяжной вентиляции с системой очистки воздуха
Мероприятия по снижению негативного антропогенного воздействия на гидросферу	Повышенный контроль за процессом утилизации использованных технологических материалов, сбор, сдача, размещение отходов производства по договорам, организациям имеющим лицензии на работу с отходами.
Мероприятия по снижению негативного антропогенного воздействия на литосферу	Повышенный контроль за процессом утилизации использованных технологических материалов, сбор, сдача, размещение отходов производства по договорам, организациям имеющим лицензии на работу с отходами.

Вывод: проведена идентификация профессиональных рисков по осуществляемой бакалаврской работы. В качестве опасных и вредных производственных факторов идентифицированы следующие: (таблица 3.2). Разработаны организационно-технические мероприятия, включающие в себя инструктаж по технике безопасности, применение средств автоматизации и механизации и т.д.

Подобраны средства индивидуальной защиты для работников (таблица

3.3). Разработаны мероприятия по обеспечению пожарной безопасности технического объекта. Проведена идентификация классов пожара и опасных факторов пожара и разработка средств и мер обеспечения пожарной безопасности (таблица 3.4). Разработаны мероприятия по обеспечению пожарной безопасности на техническом объекте (таблица 3.5).

4 Экономическая часть проекта

Организационно-экономическое обоснование целесообразности исследования в рамках данной бакалаврской работы заключается в следующем:

1. Определение трудоемкости и длительности проводимых работ.
2. Составление линейного плана-графика выполнения бакалаврской работы на протяжении всего процесса исследования.
3. Расчет затрат необходимых для проведения данного исследования.
4. Расчет экономической эффективности внедрения исследования.

4.1 Определение трудоемкости и длительности выполнения каждого этапа работы

Работы, осуществляемые в процессе исследования, разбиваются на определенные стадии и этапы и сводятся в таблицу (табл. 4.1).

Таблица 4.1 – Сводная таблица результатов отчёта

Этап работы	Шифр работы	Содержание работы	Трудоёмкость, чел/дн				Численность Р,чел
			t _{min}	t _{max}	t _{ож}	T _i	
1	1.1	Утверждение задания на дипломную работу	1	2	1,4	1	2
2	1.2	Анализ технологических процессов ОМД и выбор оптимальных	25	30	27	14	2
3	1.3	Расчет исходных данных для моделирования	2	3	2,4	2	2

Продолжение таблицы 4.1

4	1.4	Создание моделей инструмента и деталей с помощью программы NX 9	5	10	7	1	1
5	1.5	Редактирование моделей с помощью программы NX 9	2	4	3.2	4	1
6	1.6	Выбор оптимального материала	1	1	1	1	1
7	1.7	Создание методических пособий при помощи программы LS-PREPOST	15	30	9.8	10	1
7	1.8	Процесс расчёта с помощью программы LS-DYNA	4	6	4.8	5	1
8	1.9	Анализ конечных данных с помощью постпроцессора LS-PREPOST	3	5	3.8	4	1
9	1.10	Проверка работы	1	1	1	1	2
10	1.11	Анализ экономической эффективности	4	6	4.8	3	2
11	1.12	Безопасность и экологичность проекта	3	5	3.8	2	2
12	1.13	Составление пояснительной записки	21	30	24.6	25	1
13	1.14	Защита дипломной работы	1	1	1	1	1

Ожидаемая трудоемкость выполнения каждой работы и каждого этапа:

$$t_{\text{ож}} = \frac{3 \cdot t_{\text{min}} + 2 \cdot t_{\text{max}}}{5} \quad (4.1)$$

Где t_{min} – оптимистическая оценка трудоемкости выполнения работы, дн.;

t_{max} – пессимистическая оценка трудоемкости выполнения работы, дн.

Определение длительность каждого этапа:

$$T_{\text{эт}} = \frac{T_{\text{ож}}}{\text{Ч}} \quad (4.2)$$

где Ч – численность исполнителей.

$$t_{0-1} = \frac{3 \cdot 1 + 2 \cdot 2}{5} = 1,4 \text{ (дн.)}; \quad T_{0-1} = \frac{1,4}{6} = 0,23 \text{ (дн/чел)}, \text{ принимаем целое } T_{0-1} = 1 \text{ (дн/чел)}.$$

Суммарная длительность бакалаврской работы находится по формуле

4.3):

$$T_{\text{нир}} = \sum T_{\text{эт}} \quad (4.3)$$

В результате расчетов длительность выполнения бакалаврской работы составила 74 дней. Для наглядности хода выполнения работ строиться линейный план-график

4.2 Расчет затрат на проведение бакалаврской работы

Таблица 4.2 – Численность исполнителей по этапам работ

№ этапа	Техник	Руководитель	Всего (чел)
1.1	1	1	2
1.2	1	1	2
1.3	1	1	2
1.4	1	-	1
1.5	1	-	1
1.6	1	-	1
1.7	1	-	1
1.8	1	-	1
1.9	1	-	1
1.10	1	1	2
1.11	1	1	2
1.12	1	1	2
1.13	1	-	1
1.14	1	-	1

4.3 Построение линейного плана-графика

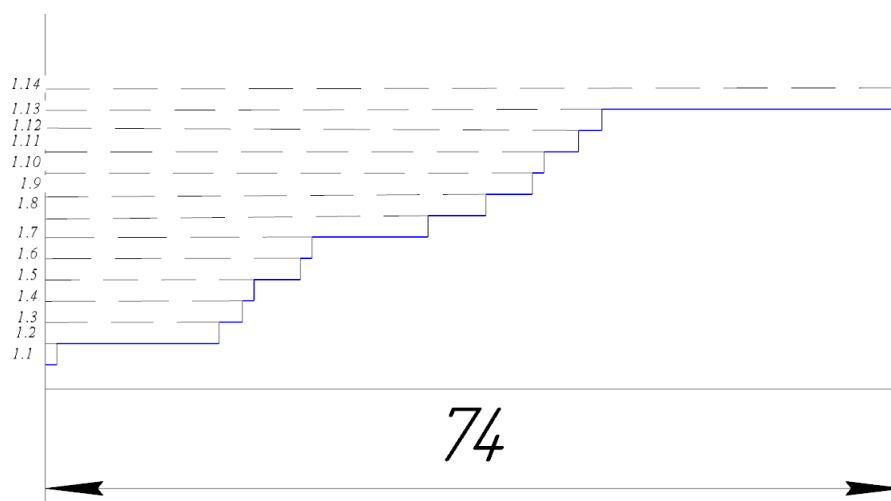


Таблица 4.3 – Расходы на заработную плату

Исполнители	Месячный оклад, руб.	Средняя дневная ставка, руб.	Время занятости, дн.	Сумма заработной платы, руб.
Студент	6000	82,0	74	6068
Руководитель	24000	653,0	23	15019
Суммарная заработная плата ЗПЛ _{бр} , руб.				21087

Отчисления на социальные нужды вычисляются по формуле (4.4):

$$O_{\text{с.н.}} = \frac{N_{\text{соц.}} \cdot \text{ЗПЛ}_{\text{бр}}}{100} = \frac{28 \cdot 21087}{100} = 5904.36 \quad (4.4)$$

где $N_{\text{соц.}}$ – норма отчислений на социальные нужды, 28%.

Общие расходы на бакалаврскую работу определяются по формуле:

$$З_{\text{бр}} = \frac{(\text{ЗПЛ}_{\text{бр}} + O_{\text{сн}}) \cdot 100}{43} = \frac{21087 + 5904.36 \cdot 100}{43} = 62770.6 \text{ руб.} \quad (4.5)$$

Из проделанных расчетов видно, что затраты на бакалаврскую работу составляют 62770.6, при длительности ее выполнения 74 дней.

4.4 Расчет экономической эффективности

Таблица 4.4 – Трудоёмкость проекта штамповки

Выполненная работа	Трудоёмкость (час)		Примечание
	До изменения	После изменения	
Создание методического пособия	40	24	Выбор более новой программы

$$\Delta t = t_{шт}^{пр} - t_{шт}^{баз} \quad (4.6)$$

$t_{шт}^{пр}$ – время потраченное на создание и анализ до изменений программы (40)

$t_{шт}^{баз}$ – время, потраченное на создание и анализ после изменения программы (24)

1) Экономический эффект от снижения времени проектных работ:

$$\mathcal{E}_1 = t_{шт}^{пр} \cdot C_T \cdot K_{зпл} \cdot N_\Gamma = 40 \cdot 64,84 \cdot 2,286 \cdot 50 = 101785,5 \text{ р.} \quad (4.7)$$

2) Экономический эффект от снижения времени на испытания:

$$\mathcal{E}_2 = (40 - 24) \cdot C_T \cdot K_{зпл} \cdot N_\Gamma = 16 \cdot 64,84 \cdot 2,286 \cdot 50 = 118579,4 \text{ р.} \quad (4.8)$$

3) Сумма экономических эффектов:

$$\Sigma \mathcal{E} = \mathcal{E}_1 + \mathcal{E}_2 = 101785,5 + 118579,4 = 220364,9 \text{ р.} \quad (4.9)$$

Срок окупаемости новой технологии:

$$T_{\text{ок}} = \frac{Z_{\text{окр}}}{\Sigma \text{Э}} = \frac{62770}{220364.9} \approx 1 \text{ год} \quad (4.10)$$

В результате затраты на исследовательскую работу составили 62770 руб., а суммарный экономический эффект составил 220364.9 руб., при сроке окупаемости затрат в течение одного года.

Заключение

Сегодня наибольший интерес в образовательном процессе представляют проблемно ориентированные программные комплексы, которые могут использоваться как инструмент формирования проектного решения.

Как было показано выше, системы автоматизированного проектирования имеют аналогичную структуру, мощные средства динамической визуализации, как компьютерные обучающие системы. Во всех современных САПР есть встроенная, достаточно объемная, справочная система, а во многих – встроенные «азбуки» проектирования.

В САПР автоматизированное проектирование выступает как инструмент закрепления старых и получения новых знаний по дисциплинам специализации (профилизации), а динамически визуализированные объекты проектирования сродни визуализированным объектам учебного материала в компьютерных обучающих системах.

Таким образом, можно сказать, что современные системы автоматизиро-

ванного проектирования в определенной мере выполняют функции компьютерных обучающих систем, за исключением функции автоматизированного контроля полученных знаний и навыков.

В конце обучения персонал имеет навыки:

- сведения о некоторых процессах ОМД в программной среде LS-DYNA/LS-Prepost.
- научиться пользоваться основными функциями LS-DYNA/LS-Prepost: загружать модельную часть из другой САПР программы, рассчитывать исходные заготовки, определять зазоры между рабочими частями, определять коэффициент штампуемости, создавать сетку для определенных элементов и т.д.
- овладеете информацией о актуальном состоянии САПР, зоне использования, тенденция улучшения программ.

В данной бакалаврской работе было выполнено:

1. Определены особенности использования САЕ – программ в процессе обучения.
2. Разработаны обучающие задачи для численного моделирования технологических процессов ОМД в САЕ – программах для персонала.
3. Рассмотрена безопасность и экологичность проекта.
4. Рассчитана экономическая часть проекта.

Данные методические пособия были переданы на кафедру в целях обучения

Список используемых источников

1. Справочник по холодной штамповке / под ред. В.П. Романовского. - Л.: Машиностроение, 1979. - 520 с.
2. Малов, А.Н. Технология холодной штамповки / Малов А.Н. М.: Машиностроение, 1985. – 410 с.
3. Холодная штамповка / Ю.А. Аверкиев. Издательство Ростовского университета, 1984
4. Ковка и штамповка: справочник. В 4 т. Т. 4. Листовая штамповка / ред. совет: Е. И. Семенов [и др.]; ред. тома А. Д. Матвеев [и др.]. - Москва: Машиностроение, 1987. - 544 с.
5. Скворцов, Г.Д. Основы конструирования штампов для холодной листовой штамповки / Г.Д. Скворцов. – М.: Машиностроение, 1974 – 318 с.
6. Кравчук, А.С. электронная библиотека механики и физики. Лекции по ANSYS/LS-DYNA и основам LS-PREPOST [Основные элементы графического интерфейса LS-PREPOST. Решение задач с помощью LS-DYNASolver]. / Кравчук А.С, А. И. Кравчук. – М.: БГУ, 2013 г. – 122с.: ил. – Библиогр.: с 71-72.
7. Кравчук, А.С. электронная библиотека механики и физики. Лекции по ANSYS/LS-DYNA и основам LS-PREPOST [Ограничения и нагрузки в ANSYS/LS-DYNA. Решение поставленных задач и просмотр результатов решения в ANSYS/LS-DYNA]. / Кравчук А.С, А. С. Чашинский, А. И. Кравчук. – М.: БГУ, 2013 г. – 74с.: ил. - Библиогр.: с 119-120.

8. Кравчук, А.С. электронная библиотека механики и физики. Лекции по ANSYS/LS-DYNA и основам LS-PREPOST [ANSYS/LS-DYNA. Общая характеристика интерфейса и средств создания твердотельной модели детали. Использование моделей материалов и типов конечных элементов LS-DYNA]. / Кравчук А.С, А. И. Кравчук. – М.: БГУ, 2013 г. – 161с.: ил. - Библиогр.: с 158- 159.
9. LS-DYNA Keyword User`s Manual. Version 970. LSTC.
10. LS-DYNA 960 Keyword User`s Manual. Livermore Software Technology Corporation – 2001.
11. LS-DYNA 960 Keyword User`s Manual [Volume 2, material models]. Livermore Software Technology Corporation – 2002.
12. John O. Hallquist. LS-DYNA theoretical manual. Livermore Software Technology Corporation. — 1998.
13. Ahmetoglu, M. Improvement of part quality in stamping by controlling blank-holder force and pressure / M.A. Ahmetoglu, T. Altan, G.L. Kinzel // Journal of Materials Processing Technology. – 1992. - № 33. С. 195 – 214.
14. Lovell, M. Increasing formability in sheet metal stamping operations using environmentally friendly lubricants / M. Lovell, C.F. Higgs, P. Deshmukh, A. Mobley // Journal of Materials Processing Technology. – 2006. - № 177. С. 87 – 90.
15. Справочник конструктора штампов: Листовая штамповка / под общ. ред. Л. И. Рудмана. - Москва: Машиностроение, 1988. - 495 с.

- 16.Скворцов, Г. Д. Основы конструирования штампов для холодной листовой штамповки: конструкции и расчеты / Г. Д. Скворцов. - Москва: Машиностроение, 1972. - 359 с.
- 17.Скворцов Г.Д. Основы конструирования штампов для холодной листовой штамповки. – М.: Машиностроение, 1974 – 318 с.
- 18.Нефедов, А. П. Конструирование и изготовление штампов: из опыта Горьковского автомобильного завода / А. П. Нефедов. - Москва: Машиностроение, 1973. - 408 с.
- 19.Горина Л.Н. Раздел выпускной квалификационной работы «Безопасность и экологичность технического объекта»: уч.-методическое пособие / Л.Н. Горина, М.И. Фесина. - Тольятти: изд- во ТГУ, 2016. – 22 с.
- 20.Сегерлинд, Л.Дж. Применение метода конечных элементов. / Сегерлинд Л. Дж. – М.: Мир, 1979. – 304 с.