

ДОПУСКАЕТСЯ К ЗАЩИТЕ:

Факультет Е  
индекс факультета  
Выпускающая кафедра Е4  
индекс кафедры  
Группа Е1М31  
индекс группы

Заведующий кафедрой Е4  
индекс кафедры  
Игнатенко В.В.  
Фамилия ИО  
«15» 12  
подпись  
2018 г.

## ОТЧЕТ

о выполнении научно-исследовательской работы (НИРС)

Исследование напряженно-деформированного состояния заготовки  
при изготовлении выдавливание радиальным обжатием матриц  
для штамповки элементов патрона

Кулешовой Анны Вячеславовны

Фамилия, имя, отчество обучающегося

обучающегося по  
направлению

15.04.03

код

Прикладная механика

полное наименование направления

Руководитель НИРС:

Нестеров Н.И., к.т.н., доцент, профессор кафедры Е4

Фамилия ИО, ученая степень, ученое звание, должность

Срок выполнения НИРС:

с 01.09.18 г. по 15.12.18 г.

Обучающийся:

Кулешова А.В.  
Подпись  
«14» 12

Кулешова А.В.

Фамилия ИО

2018г.

Руководитель НИРС:

Нестеров Н.И.  
Подпись  
«14» 12

Нестеров Н.И.

Фамилия ИО

2018г.

САНКТ-ПЕТЕРБУРГ

2018 г.

УТВЕРЖДАЮ:

Заведующий кафедрой Е4

В.В.Игнатенко

« 05 »

09

2018г.

## ЗАДАНИЕ

### на выполнение научно-исследовательской работы

**Обучающемуся группы** Е1М41 Кулешовой Анне Вячеславовне

**Направление** 15.04.03 Прикладная механика

**Руководитель НИРС** Нестеров Н.И., к.т.н., доцент, профессор кафедры Е4  
Фамилия ИО, ученая степень, ученое звание, должность

**Тема задания НИРС:** Исследование напряженно-деформированного состояния  
заготовки при изготовлении выдавливание радиальным обжатием матриц для штамповки  
элементов патрона.

**Срок выполнения:** с 01.09.18 г. по 15.12.18 г.

**Место выполнения:** БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова

- 1. Виды работ и требования к их выполнению:** Моделирование процесса  
деформирования конической заготовки при радиальном обжатии. Разработка программы  
построения графиков изменения параметров напряженно-деформированного состояния.
- 2. Виды отчетных материалов и требования к их выполнению:** Отчёт должен  
содержать исходные данные для моделирования, результаты моделирования двух заготовок,  
программу на языке СИ++, результаты апробации программы.

### 3. ПЛАН-ГРАФИК НИРС

№ этапа	Наименование этапа	Срок завершения этапа	Форма отчетности
1	Разработка программы для расчёта НДС.	01.10.18	Отчёт
2	Моделирование процесса деформирования конической заготовки.	01.11.18	Отчёт
3	Апробация программы	01.12.18	Отчёт
4	Написание отчета	10.12.18	Отчёт

Дата выдачи задания:

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2018 г.

Руководитель НИРС:

« 01 » 09 2018 г.

Срок сдачи отчетных документов:

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2018 г.

Обучающийся:

« 14 » 12 2018 г.

## СОДЕРЖАНИЕ

1 Постановка задачи проектирования	3
1.1 Характеристика детали. Описание процесса	3
2 Исследование процесса радиального обжима методом компьютерного моделирования DEFORM 3D	11
2.1 Исходные данные при моделировании	12
2.2 Анализ силы деформирования при моделировании	14
2.3 Анализ напряженно - деформированного состояния при моделировании	15
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	18
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	20
Приложение	21



## 1 Постановка задачи

### 1.1 Характеристика детали. Описание процесса

Современные пули стрелкового оружия представляют собой изделие, состоящее из нескольких элементов. Оболочка определяет баллистические и боевые качества пули, которая изготавливается с высокой точностью и правильностью формы. Для обеспечения заданных требований к пульной оболочке рабочий инструмент необходимо изготавливать с высокой точностью.

Важным и трудоёмким является процесс изготовления матрицы обжима пульной оболочки. Технология производства матриц обжима основана на использовании токарной обработки. У этого метода существует ряд недостатков: низкая производительность, невысокая стойкость изготавливаемого инструмента, а также сложность оборудования. Всё это вынуждает предприятия искать альтернативный способ изготовления этой матрицы.

Для увеличения стойкости изготавливаемого инструмента и повышения производительности по отношению к технологии резанием предложено использовать процесс выдавливания радиальным обжатием (рисунок 1).

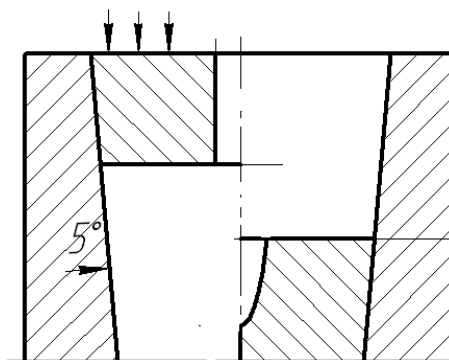


Рисунок 1 – Схема процесса радиального обжатия

На рисунке 2 представлен эскиз прижима, а на рисунке 3 – эскиз матрицы.

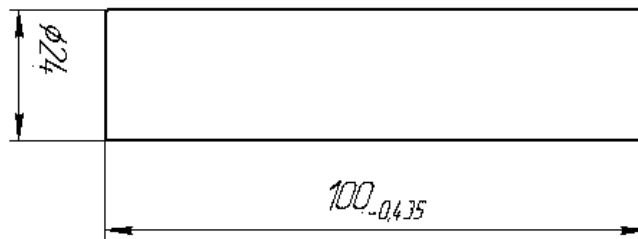


Рисунок 2 – Эскиз прижима

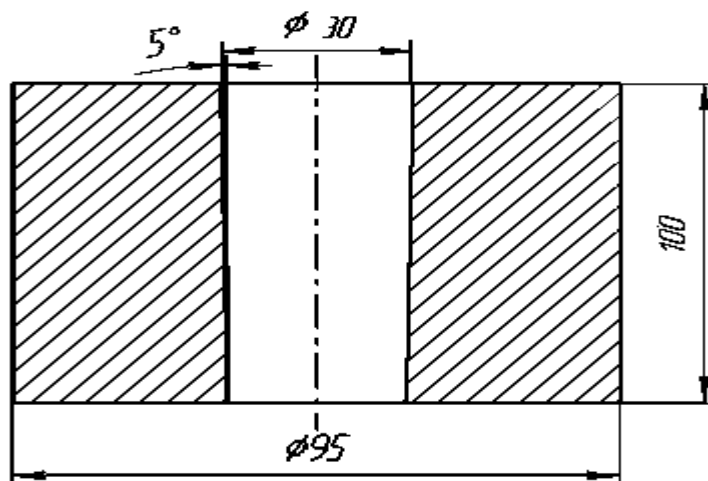
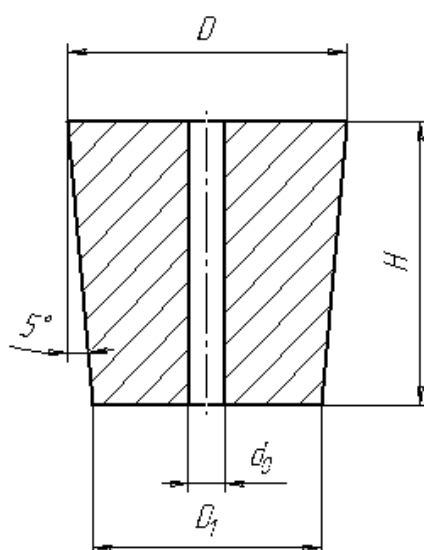


Рисунок 3 – Эскиз матрицы

На кафедре Е4 БГТУ «ВОЕНМЕХ» изготовлены полуфабрикаты матрицы обжима пульной оболочки радиальным обжатием конической заготовки со сквозным отверстием (рисунок 3) из стали У10А (ГОСТ 1435-99).



а)



б)

Рисунок 3 – Эскиз заготовки (а), полуфабрикат (б) после радиального обжатия

Химический состав материала У10А представлен в таблице 1, механические свойства – в таблице 2.

Таблица 1 – Химический состав заготовки У10А в %

С	Si	Mn	Ni	S	P	Cr	Fe	Cu
0.95-1.04	0.15-0.35	0.15-0.35	до 0.12	до 0.018	до 0.025	до 0.1	97	до 0.2

Таблица 2 – Механические характеристики стали У10А

Марка	$\sigma_b$ , МПа	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\varepsilon_{iy}$	$\varepsilon_{ip}$	$\sigma_{iy}$ , МПа	$\sigma_{ip}$ , МПа	$\delta$ , %	$\psi$ , %
У10А	588	271	0,183	0,929	701	1100	0,605	0,294

В таблице 3 обозначено:  $\sigma_b$  – предел прочности;  $\sigma_{0,2}$  – предел текучести;  $\varepsilon_{iy}$  – предельно устойчивая деформация;  $\varepsilon_{ip}$  – предельная деформация;  $\sigma_{iy}$  – интенсивность напряжения в момент образования шейки;  $\sigma_{ip}$  – интенсивность деформации в момент разрушения;  $\delta$  – относительное удлинение;  $\psi$  – относительное сужение.

Зависимость  $\sigma_i - \varepsilon_i$  для стали У10А после отжига приведена в приложении 1.

В лаборатории кафедры Е4 проведено деформирование радиальным обжатием конических заготовок со сквозным отверстием. Исследовано формоизменение с использованием метода делительной сетки.

В качестве примера рассмотрена коническая заготовка. Размеры заготовки до и после деформирования указаны в таблице 3. Использовали разъемные заготовки. Для исследования напряженно-деформированного состояния на поверхность разъема заготовок нанесли царапанием сетку с шагом  $a_0 = 1$  мм. Сетку нанесли алмазным наконечником с помощью специального приспособления, установленного на микроскопе УИМ-21. После нанесения сетки и измерения начальных координат сетки (R, Z) осуществлялось деформирование на испытательной машине ГМС 50 (Р-100) с применением

смазки графитол В310. Ход обжатия заготовки составляет 30 мм. Сила деформирования равна 37 т.

Таблица 3 – Размеры заготовки до и после деформации

№	D, мм	D <sub>1</sub> , мм	d <sub>0</sub> , мм	H, мм	H <sub>1</sub> , мм	D', мм
40	30	25	4	30	42	26

По окончании деформирования производилось измерение текущих параметров координат ( $r$ ,  $z$ ) узлов искаженной делительной сетки на микроскопе УИМ-21.

Текущие ( $r$ ,  $z$ ) и начальные ( $R$ ,  $Z$ ) координаты узлов являлись исходными данными для расчета параметров напряженно-деформированного состояния.

Разработана программа на языке высокого уровня C++ для расчета параметров напряженно-деформированного состояния.

По итогам расчета построены графики распределения параметров напряженно-деформированного состояния (рисунки 4-11) в четырех характерных сечениях заготовки 1-1, 2-2, 3-3 и 4-4 (рисунок 12), место расположения которых указано в таблице 4.

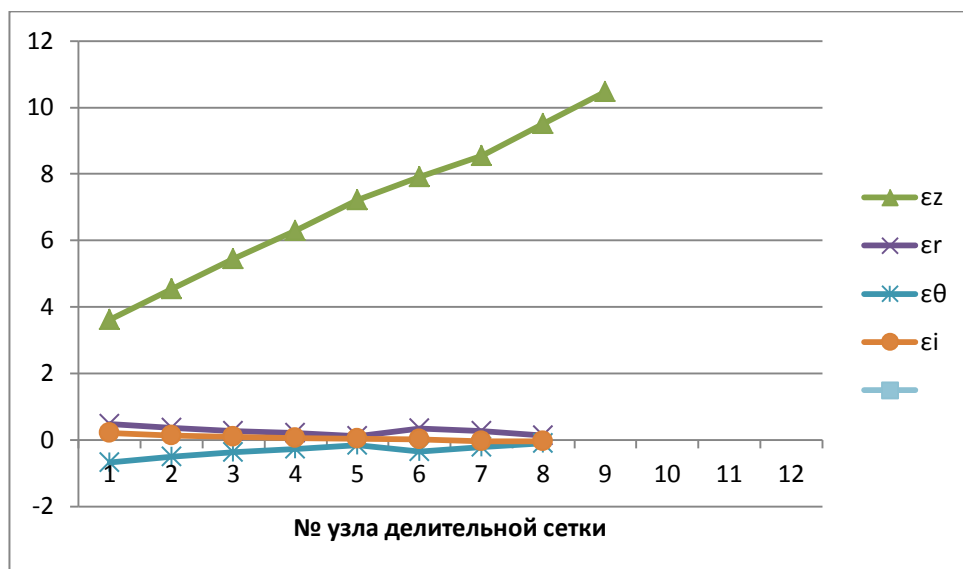


Рисунок 4 – Графики распределения главных компонент напряжений и интенсивности напряжений в сечении 1-1

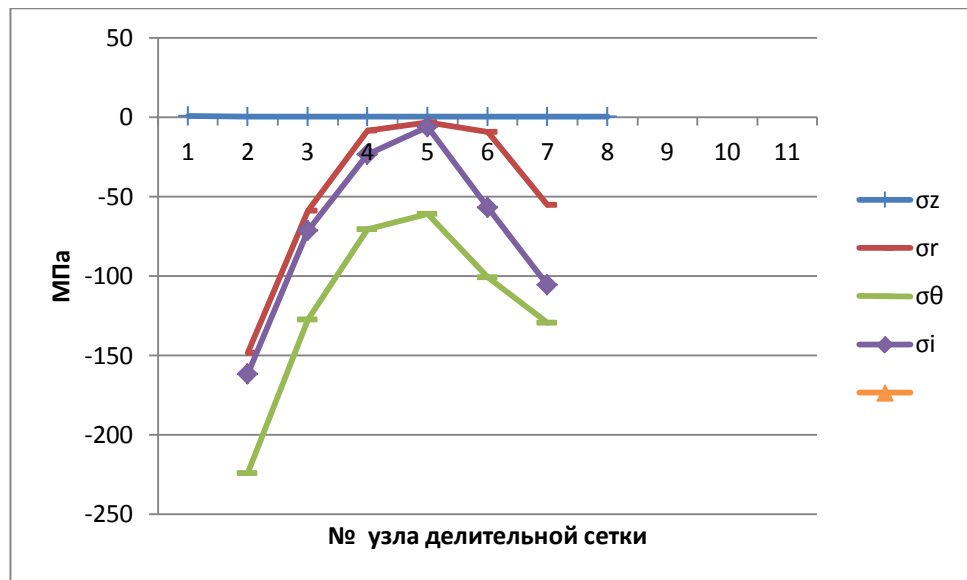


Рисунок 5 – Графики распределения главных компонент деформации и интенсивности деформации в сечении 1-1

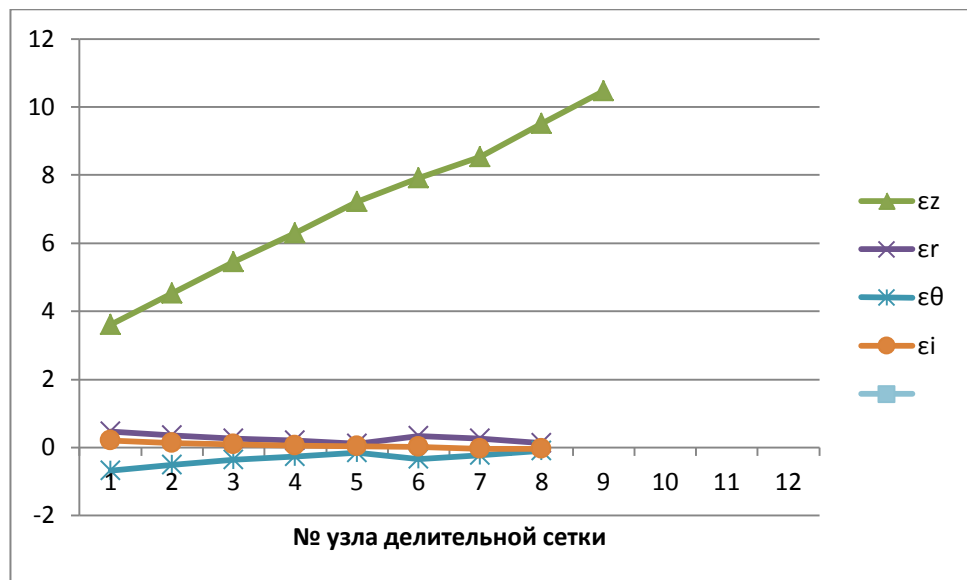


Рисунок 6 – Графики распределения главных компонент напряжений и интенсивности напряжений в сечении 2-2



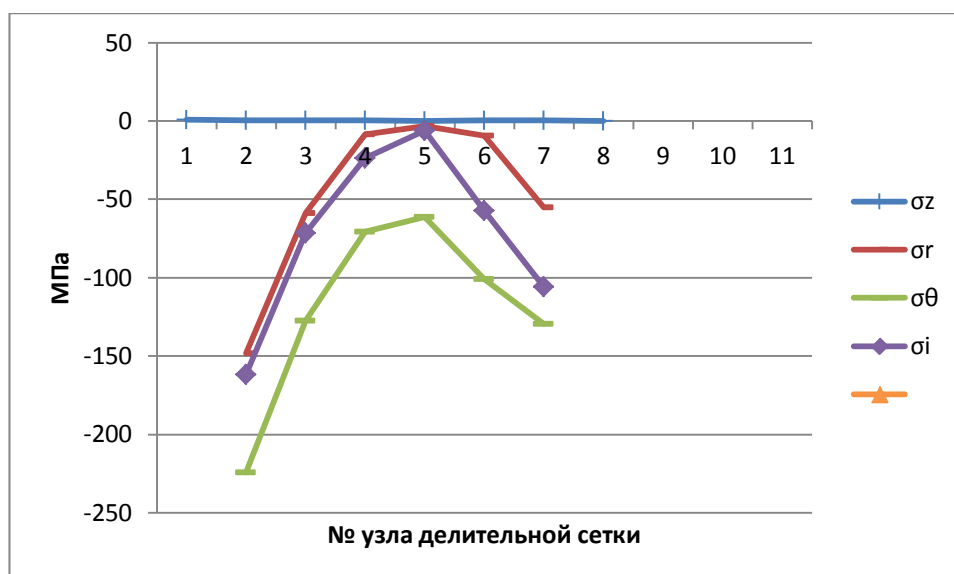


Рисунок 7 – Графики распределения главных компонент деформации и интенсивности деформации в сечении 2-2

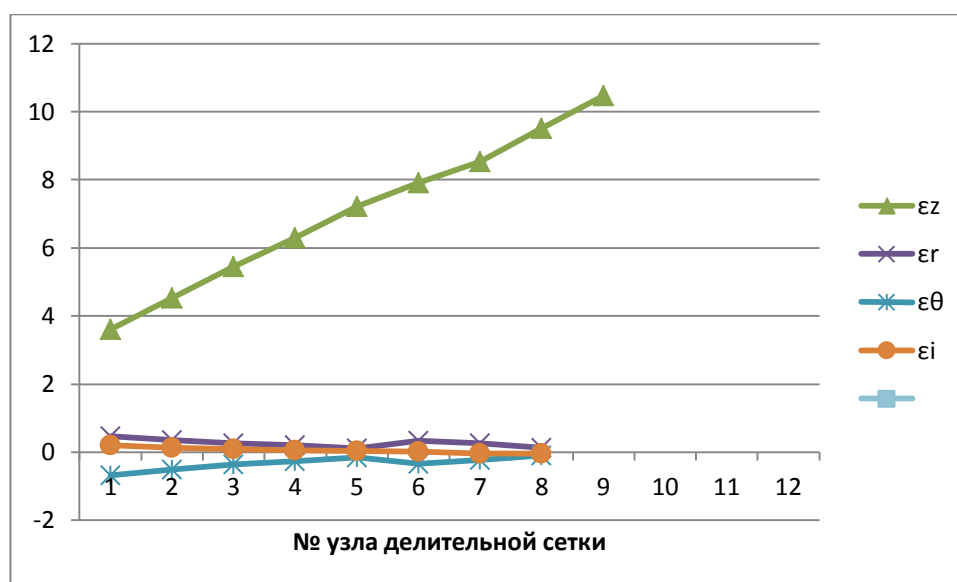


Рисунок 8 – Графики распределения главных компонент напряжений и интенсивности напряжений в сечении 3-3

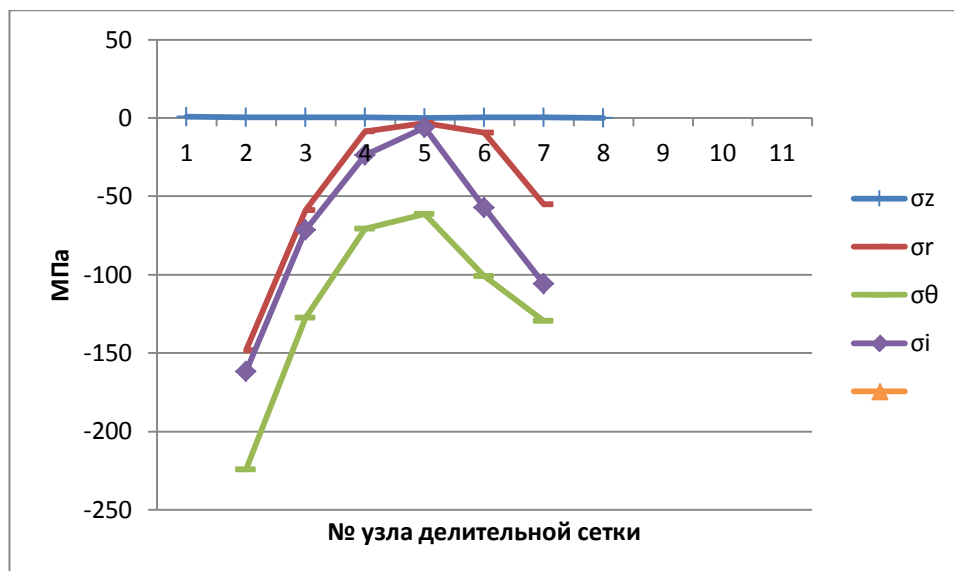


Рисунок 9 – Графики распределения главных компонент деформации и интенсивности деформации в сечении 3-3

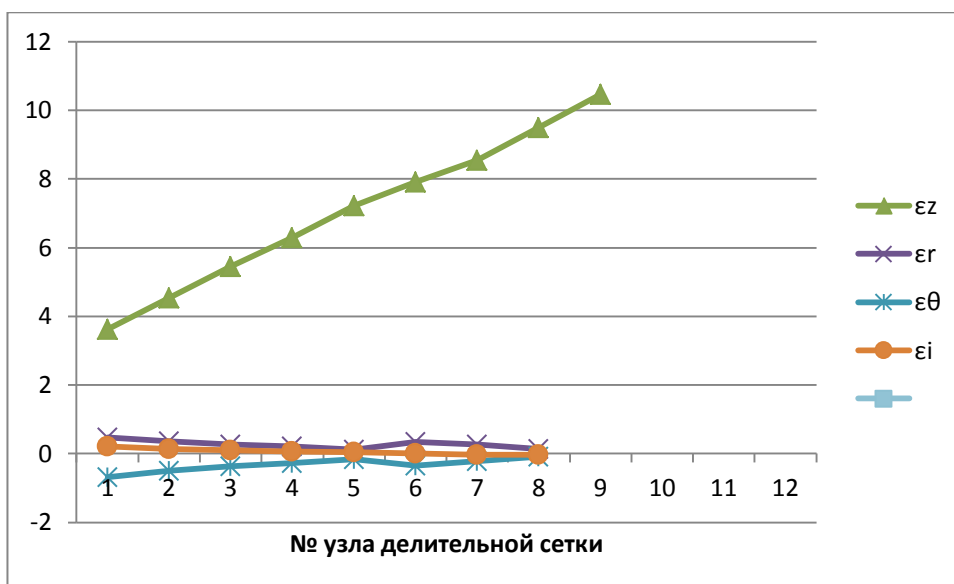


Рисунок 10 – Графики распределения главных компонент напряжений и интенсивности напряжений в сечении 4-4

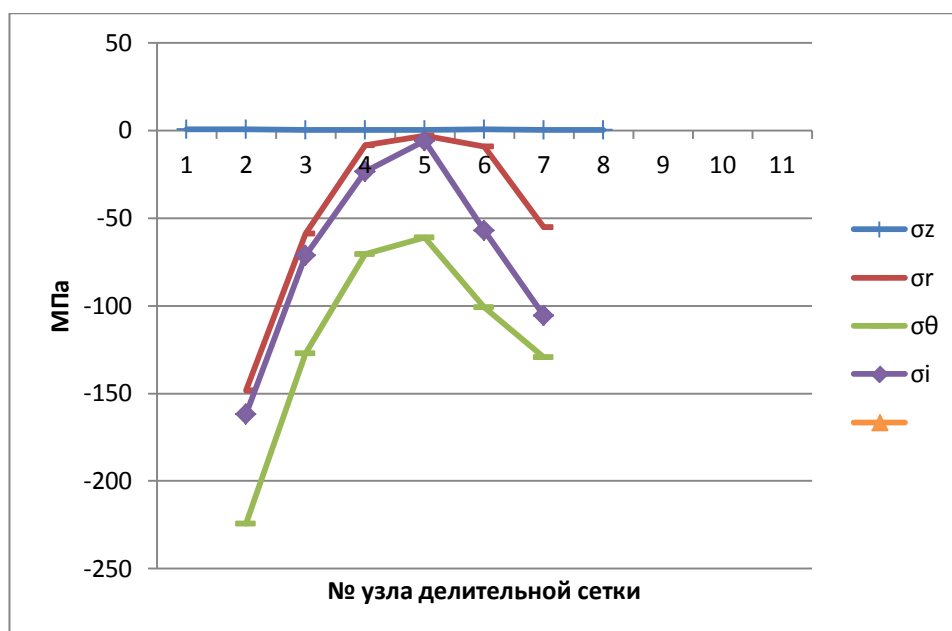


Рисунок 11 – Графики распределения главных компонент деформации и интенсивности деформации в сечении 4-4

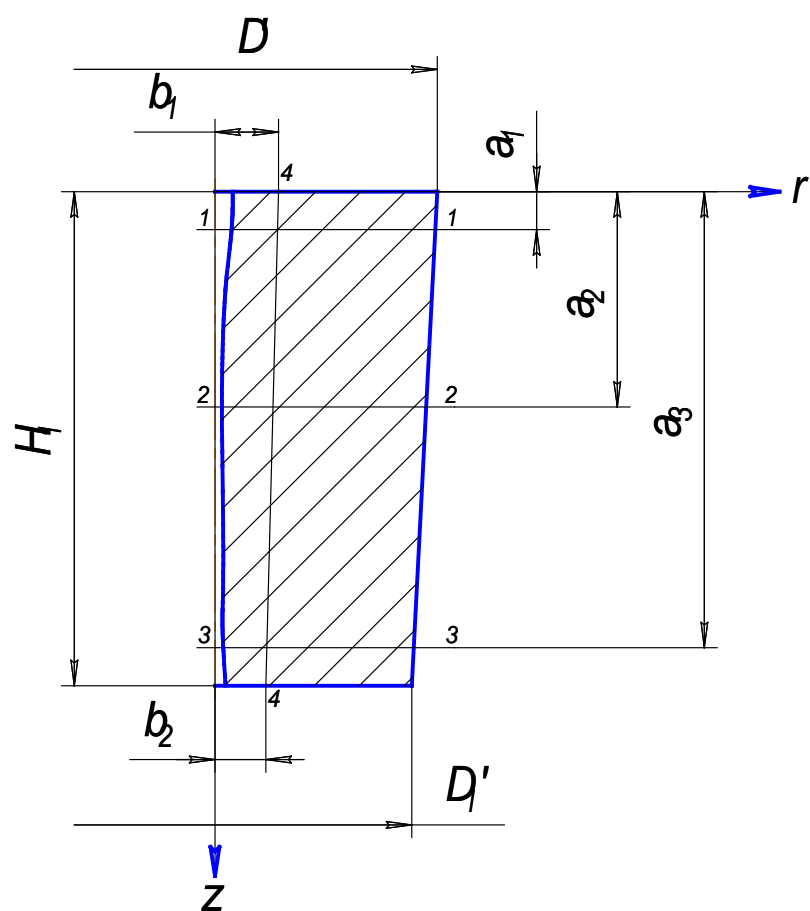


Рисунок 12 – Вид заготовки после деформации: 1-1, 2-2, 3-3, 4-4 – сечения, в которых исследовано НДС

Таблица 4 – Расположение характерных сечений

$a_1$	$a_2$	$a_3$	$b_1$	$b_2$
4	20	35	6	5

## 2 Исследование процесса радиального обжима методом компьютерного моделирования DEFORM 3D

В данной работе используется программный пакет DEFORM 3D. DEFORM 3D является системой конечно-элементного моделирования разрабатываемой компанией Scientific Forming Technologies Corporation (SFTC), и предназначена для анализа трехмерного течения металла при различных процессах обработки металлов давлением. Данная система позволяет прогнозировать характер формоизменения с высокой точностью и минимальными затратами на экспериментальные проверки. В данной программе есть собственный сеточный построитель, который производит полностью автоматическое разбиение сетки конечных элементов во время моделирования (адаптивное перестроение сетки) и присутствует библиотека оборудования для горячей и холодной штамповки. Модели материалов, используемые в программе, могут быть следующих типов: жесткие, пластичные, упруго-пластичные, пористые, упругие. Конечные элементы и модели материалов позволяют отслеживать места разрушения материалов. Для сложных переходных процессов присутствует возможность задавать параметры многопереходных процессов.

Кроме анализа напряжений, деформаций и температур в заготовке и инструменте, в программе предусмотрена возможность определения энергетических и силовых параметров оборудования.

Главным преимуществом системы Deform перед универсальными конечно-элементными пакетами типа Ansys, LS-Dyna или MSC-Marc является ее объектная ориентированность, что позволяет ее легко осваивать специалисту никогда прежде не использовавшему МКЭ в своей практике.

Решение задачи с применением МКЭ состоит из следующих основных этапов:

1. Идентификация задачи, присвоение ей имени, создание чертежа конструкции.

2. Создание геометрии модели, пригодной для МКЭ.
3. Разбиение модели на сетку конечных элементов.
4. Определение граничных условий.
5. Численное решение системы уравнений.
6. Анализ результатов.

Этапы 1, 2, 3 и 4 относятся к предпроцессорной стадии, этап 5 – к процессорной стадии, этап 6 – к постпроцессорной стадии.

## 2.1 Исходные данные при моделировании

Принятые допущения при моделировании:

1. Материал изотропный.
2. Процесс деформации приближенно монотонный.
3. Рабочие инструменты считать абсолютно жесткими.
4. Число конечных элементов было задано 500 000. После генерации сетки число КЭ составило 465830 элементов.
5. Температура не влияет на процесс моделирования.
6. Трение между рабочими инструментами и заготовкой составляет 0.05 [1].

Построение сетки на заготовке представлено на рисунке 13.



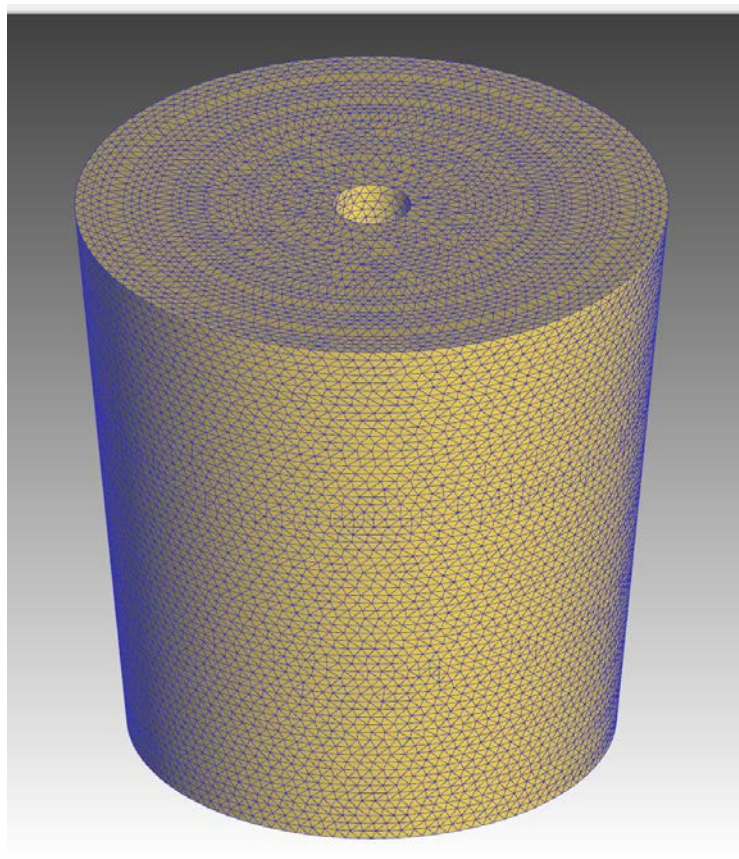


Рисунок 13 – Коническая заготовка после построения сетки конечных элементов

По результатам моделирования видно, что отверстие заготовки закрылось (рисунок 14). Высота заготовки составляет 53 мм.

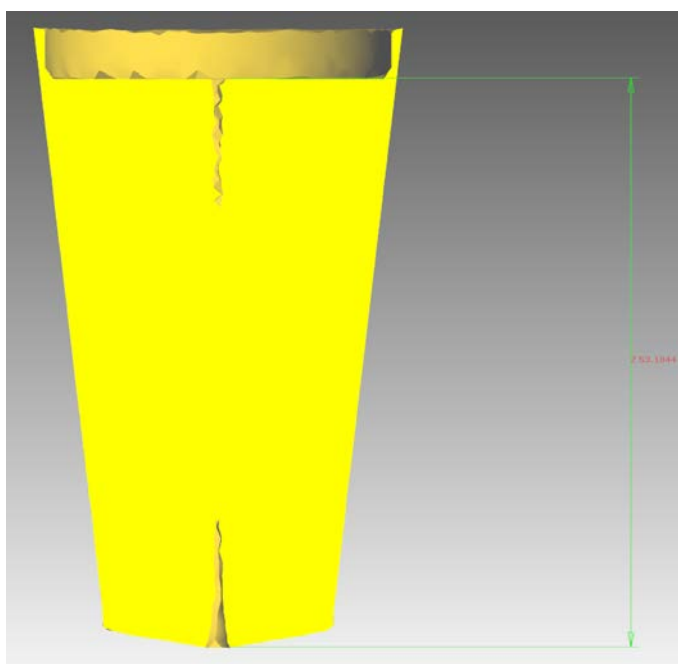


Рисунок 14 – Заготовка после деформирования

## 2.2 Анализ силы деформирования при моделировании

По результатам моделирования получена сила деформирования равная 54,5 т при ходе обжатия 30 мм (рисунок 15). Также исследована сила при ходе обжатия 15 мм, 25 мм (приложение 2, 3). При ходе обжатия сила деформирования составляет 34 т, при ходе обжатия 25 мм – 46т.

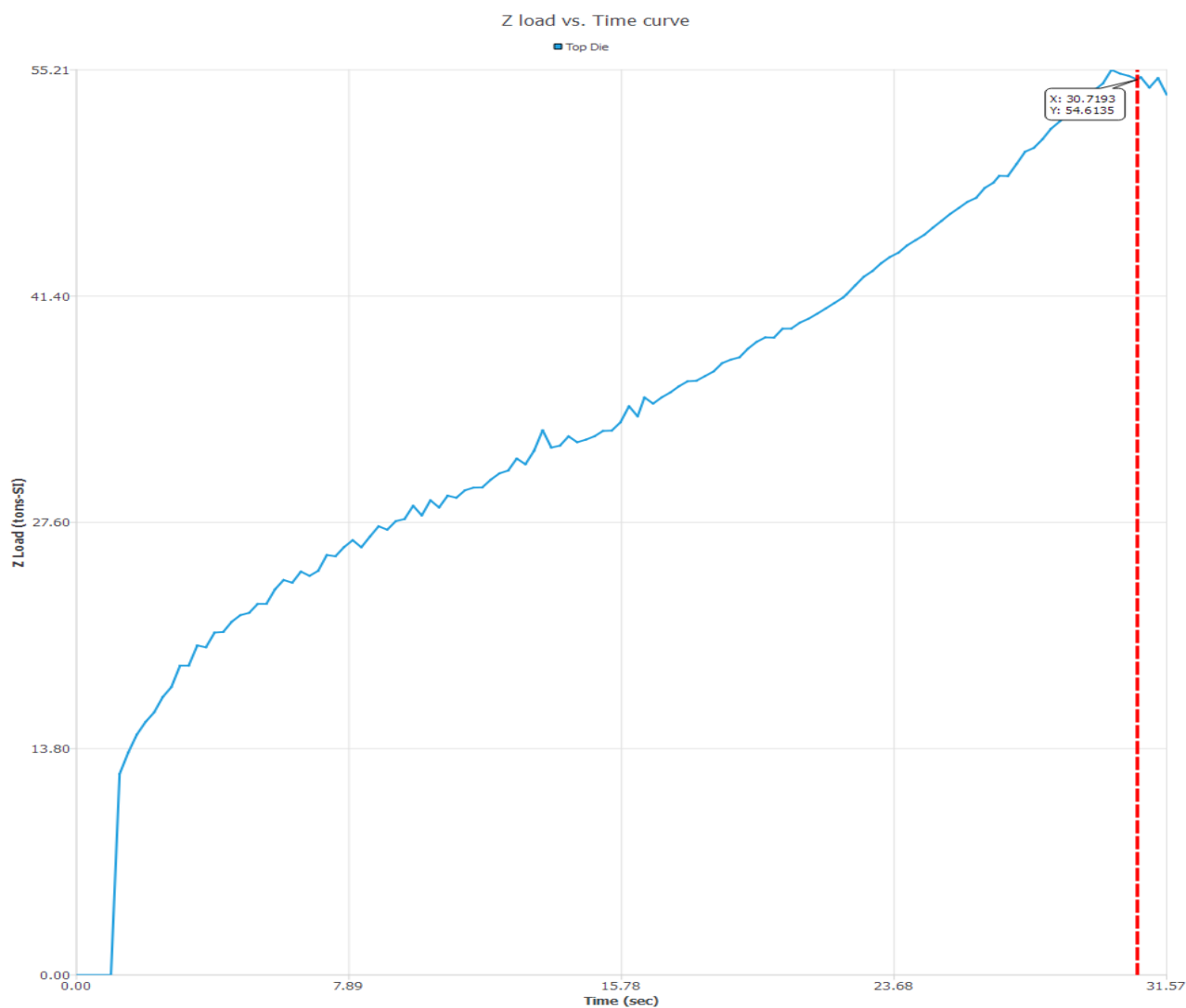


Рисунок 15 – Зависимость силы от времени при моделировании

### 2.3 Анализ напряженно - деформированного состояния при моделировании

Распределение интенсивности деформации в продеформированной заготовке представлены на рисунке 16. Распределение в заготовке интенсивности напряжений изображено на рисунке 17.

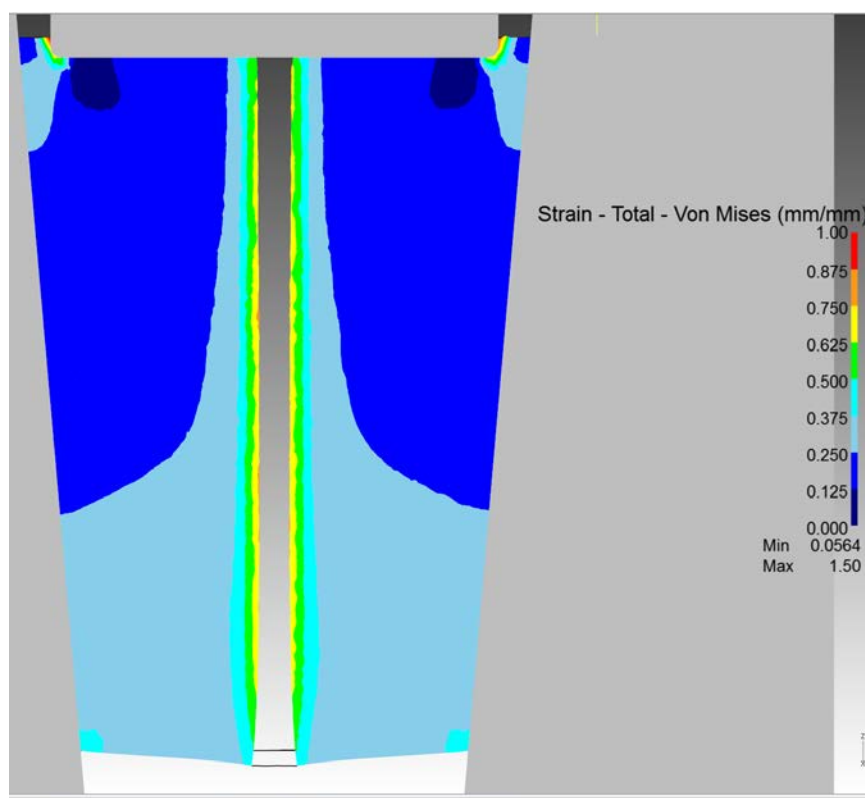


Рисунок 16 - Распределение интенсивности деформаций

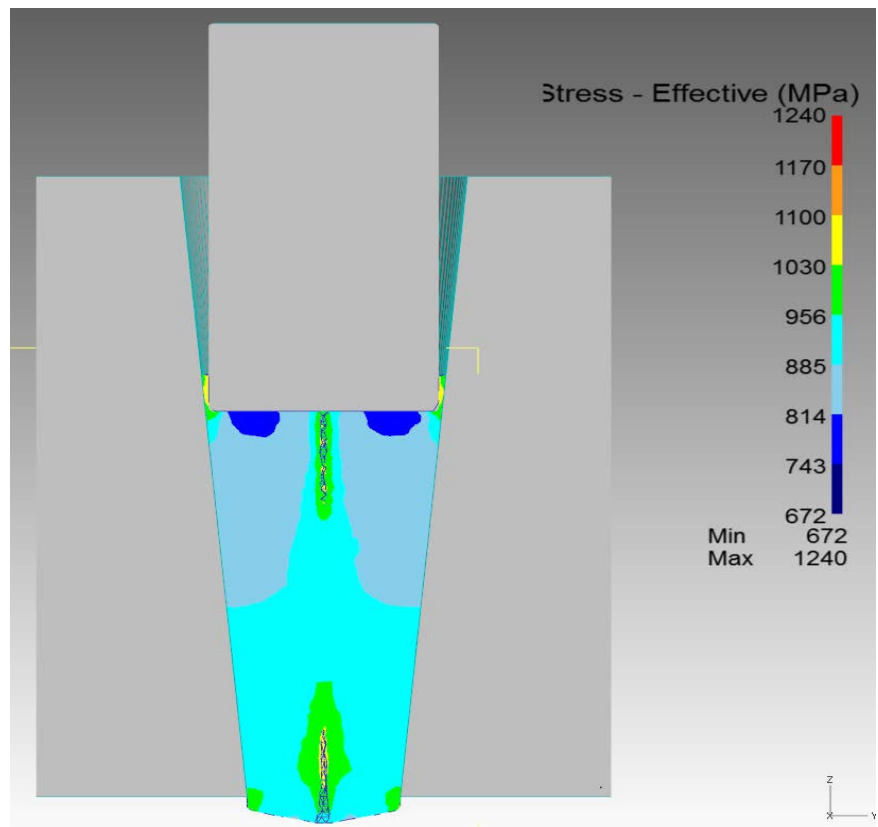


Рисунок 17 - Распределение интенсивности напряжений

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ результатов эксперимента позволяет говорить о следующем:

по высоте заготовки параметры деформированного состояния изменяются следующим образом (при движении сверху вниз):

- в осевом направлении происходит удлинение заготовки; величина деформации возрастает;
- радиальный компонент по высоте заготовки примерно постоянен;
- тангенциальный компонент увеличивается.

Интенсивность деформации к нижнему торцу возрастает. Интенсивность напряжений по высоте практически постоянна (сечение 4-4).

Тангенциальное и радиальное напряжение – напряжение сжатия (радиальное напряжение по абсолютной величине больше тангенциального); осевое напряжение или равно нулю или является растягивающим.

При рассмотрении изменения напряженно-деформированного состояния в поперечных сечениях заготовки выявлены следующие закономерности:

Заготовку можно разделить на три зоны – осевую, центральную и краевую.

Осевая зона продеформирована больше, чем остальная часть заготовки. В верхней части заготовки (сечение 1-1) и меньше в нижней части заготовки (сечение 3-3).

По абсолютной величине напряжения в осевой и краевой зонах в 2 и более раза превосходят напряжения в центральной части заготовки.

Напряжения в радиальном направлении изменяются по закону, похожему на синусоидальный.

В осевой зоне осевое напряжение, растягивающее, и достигает достаточно больших значений.

В программе Deform 3D смоделирован процесс радиального выдавливания конических заготовок со сквозным отверстием. Результаты моделирования не во всём соответствуют результатам экспериментальных

исследований, но позволяют выделить характерные зоны в заготовке для последующего более детального исследования напряженно-деформированного состояния и для построения математических моделей.

Не состыковка значений силы деформирования при моделировании и эксперименте, а также значений НДС может быть из-за сложности анализа процесса радиального выдавливания. Это может быть связано с тем, что формулы для расчёта параметров силы и НДС в программе Deform 3D отличаются от формул нахождения параметров силы и НДС методом делительной сетки для операции выдавливания.



## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Лясников, А.В. Образование полостей пресс – форм и штампов выдавливанием / А.В. Лясников. СПб.: Внешторгиздат. Санкт-Петербургское отделение, 1993. – С. 312.
2. Нестеров, Н.И. Определение размера заготовки при изготовлении радиальным обжатием матрицы с глухой полостью / Н.И. Нестеров, А.В. Старостенко // Актуальные вопросы ракетно-космической техники и систем вооружения: Сб. трудов студентов, магистрантов, аспирантов и молодых ученых БГТУ/ - СПб.: Изд-во Балт.гос.техн.ун-та, 2008. - Вып.6 - С.113-115.
3. Нестеров, Н.И. Оптимизация технологических режимов формования прецизионных корпусных деталей электронных модулей / Н.И. Нестеров, А.В. Старостенко, В.В. Трушенков // Вопросы радиоэлектроники: сборник научных трудов. – М.: ЦНИИ Электроника, 2013. – Т. 2, – № 2. – С. 138-146.

