

**ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет»**

*На правах рукописи*



**ЯКОВЛЕВ СЕРГЕЙ СЕРГЕЕВИЧ**

**РИФЛЕНИЕ ВНУТРЕННЕЙ ПОВЕРХНОСТИ  
ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ОБОЛОЧКИ ЛОКАЛЬНЫМ  
ПЛАСТИЧЕСКИМ ДЕФОРМИРОВАНИЕМ**

**Специальность 2.5.7 – Технологии и машины обработки  
давлением**

Диссертация  
на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

**Научный руководитель:**

доктор технических наук,  
профессор В.Д. Кухарь

**Тула 2025**

# СОДЕРЖАНИЕ

|                                                                                                                                                             |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| ВВЕДЕНИЕ.....                                                                                                                                               | 4   |
| 1 ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ ОБ ИЗДЕЛИЯХ С РИФЛЯМИ НА ПОВЕРХНОСТИ ОБОЛОЧЕК И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССАХ ИХ ПОЛУЧЕНИЯ .....                                               | 11  |
| 1.1 Назначение деталей с рифлями.....                                                                                                                       | 12  |
| 1.2 Современное состояние технологии получения изделий с рифлями.....                                                                                       | 13  |
| 1.3 Теоретические и экспериментальные исследования получения рифленых поверхностей пластическим деформированием .....                                       | 20  |
| 1.4 Выводы и постановка задачи исследования .....                                                                                                           | 33  |
| 2 ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПОЛУЧЕНИЯ СЕТКИ РИФЛЕЙ НА ВНУТРЕННЕЙ ПОВЕРХНОСТИ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ОБОЛОЧЕК ЛОКАЛЬНЫМ ПЛАСТИЧЕСКИМ ДЕФОРМИРОВАНИЕМ ..... | 35  |
| 2.1 Способ и устройство для внутреннего рифления вращающимся инструментом .....                                                                             | 36  |
| 2.2 Математическая модель процесса рифления инструментом различной геометрии .....                                                                          | 39  |
| 2.3 Влияние геометрии инструмента на качество рифлей .....                                                                                                  | 44  |
| 2.4 Анализ силовых характеристик .....                                                                                                                      | 48  |
| 2.5 Вторичные математические модели процесса получения изделия с внутренним рифлением .....                                                                 | 51  |
| 2.6 Анализ напряженно-деформированного состояния.....                                                                                                       | 64  |
| 2.7 Получение изделий с сеткой рифлей.....                                                                                                                  | 85  |
| 2.8 Сравнение локального пластического деформирования и редуцирования .....                                                                                 | 85  |
| 2.9 Основные результаты и выводы по результатам моделирования рифления внутренней поверхности оболочки .....                                                | 86  |
| 3 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА НАНЕСЕНИЯ РИФЛЕЙ НА ВНУТРЕННЕЙ ПОВЕРХНОСТИ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ОБОЛОЧКИ.....                                           | 89  |
| 3.1 Оснастка для проведения экспериментальных работ по нанесению сетки рифлей на поверхностях оболочек.....                                                 | 90  |
| 3.2 Рабочие оправки для получения рифлей на внутренней поверхности оболочки .....                                                                           | 93  |
| 3.3 Заготовки для проведения экспериментальных работ.....                                                                                                   | 97  |
| 3.4 Общие сведения об эксперименте .....                                                                                                                    | 103 |
| 3.5 Получение рифлей на внутренней поверхности заготовки из алюминиевого сплава АМг5.....                                                                   | 104 |
| 3.6 Получение рифлей на внутренней поверхности заготовки из стали 20.....                                                                                   | 111 |
| 3.7 Сравнение теоретических и экспериментальных данных .....                                                                                                | 116 |
| 3.8 Выводы по нанесению рифлей на внутренней поверхности цилиндрической оболочки .....                                                                      | 118 |
| 4 НОВЫЕ СПОСОБЫ И УСТРОЙСТВА ДЛЯ НАНЕСЕНИЯ РИФЛЕЙ .....                                                                                                     | 120 |
| 4.1 Нанесение рифлей на внутренней поверхности оболочки локальным деформированием.....                                                                      | 121 |
| 4.1.1 Изготовление внутренней сетки рифлей принудительным вращением инструмента.....                                                                        | 121 |
| 4.1.2 Нанесение внутренней сетки рифлей совмещением операций рифления и раздачи .....                                                                       | 124 |

|                                                                                  |     |
|----------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 4.1.3 Формирование рифленой поверхностью с совмещением операции дорнования ..... | 129 |
| 4.2 Нанесение рифлей на внешней и на внутренней поверхностях .....               | 133 |
| 4.3 Выводы по главе.....                                                         | 138 |
| 5 ПРАКТИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ .....        | 139 |
| 5.1 Рекомендации по проектированию технологических параметров рифления .....     | 140 |
| 5.2 Использование результатов исследований в промышленности .....                | 141 |
| 5.3 Использование результатов исследований в учебном процессе .....              | 141 |
| ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....                                                                 | 143 |
| СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....                                                           | 146 |
| ПРИЛОЖЕНИЯ.....                                                                  | 158 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ А .....                                                               | 159 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ Б.....                                                                | 160 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ В .....                                                               | 161 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ Г .....                                                               | 162 |

## ВВЕДЕНИЕ

Основной задачей развития машиностроения является вывод его на принципиально новые ресурсосберегающие технологии, обеспечивающие повышение производительности труда, экономию материальных и энергетических ресурсов и охрану окружающей среды. В значительной степени решению этой задачи способствует внедрение в промышленность новых прогрессивных технологий нанесения рифлей на внутренней поверхности цилиндрических оболочек.

Существует большое число способов изготовления рифлей на поверхностях цилиндрических оболочек: обработка резанием, точное литье, электронно-лучевая обработка, накатывание, редуцирование. Однако применение данных технологий ограничено из-за низкой производительности процессов и невозможности получения требуемой геометрии на малогабаритных или крупногабаритных изделиях.

В связи с этим актуальной является разработка новых способов рифления и устройств, позволяющих путем локального пластического формоизменения осуществить нанесение рифлей с заданной геометрией инструментом ограниченной длины при совмещении поступательного и вращательного движения инструмента на прессовом оборудовании и обеспечивающих снижение технологической силы процесса рифления и съема полуфабриката.

Внедрение этих процессов в производство сдерживается отсутствием теоретических исследований, позволяющих оценить напряженное и деформированное состояние, кинематику течения материала, предельные возможности формоизменения и силовые параметры.

В настоящее время наиболее эффективным методом технологической подготовки в производстве является математическое моделирование процессов пластического формоизменения. Существующие методы математического моделирования процессов пластического формоизменения

предполагают, что границы и направления течения материала деформируемого тела известны. Однако при реализации процессов локального пластического деформирования движение материала относительно инструмента зачастую заранее неизвестно, в этом случае целесообразно применять методы, позволяющие однозначно определять на каждом этапе нагружения не только силовые параметры процесса, но и кинематику течения материала. Для достижения указанных результатов наиболее рационально использовать численные методы, основанные на конечно-элементной дискретизации деформируемого тела. Это позволяет получить наиболее точную картину распределения полей напряжений и деформаций по объему тела, что в свою очередь дает возможность определить форму и размеры обрабатываемой заготовки, установить ресурс бездефектного деформирования, уточнить методики расчета основных технологических параметров процесса и обосновать выбор оборудования, что в конечном итоге ведет к получению изделий высокого качества с заданными геометрическими размерами, экономии материала, повышению стойкости инструмента и надежности эксплуатации оборудования.

Работа выполнена в соответствии с грантом Правительства Тульской области в сфере науки и техники № ДС/167 «Научное обоснование и разработка инновационных технологических процессов изготовления элементов осколочных боевых частей из трубных заготовок локальным пластическим деформированием» и грантом РФФИ № 22-29-20212 «Инновационные технологические процессы изготовления изделий ответственного назначения методами локального пластического деформирования».

**Цель работы.** Повышение эффективности (снижение трудоемкости, уменьшение технологической силы) процесса рифления тонкостенных оболочек путем научно-обоснованного выбора рациональных технологических параметров его проведения.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Разработать новые способы и устройства для получения оболочек с рифлями, увеличивающих производительность и снижающих трудоемкость процессов при меньшей требуемой технологической силе.

2. Осуществить теоретические исследования процессов формирования рифлей на внутренней поверхности оболочки поворотным инструментом ограниченной длины с помощью компьютерного моделирования. Выявить влияние технологических параметров, формы и размеров инструмента на напряженно-деформированное состояние заготовки, силовые режимы, повреждаемость материала, температуру материала, качество получаемого изделия.

3. Получить вторичные математические модели зависимости силовых и деформационных параметров процесса от геометрических параметров формируемой рифли и инструмента.

4. Провести экспериментальные работы по нанесению сетки рифлей на внутренней поверхности оболочек с целью оценки технологической силы, качества детали. Сравнить результаты компьютерных моделирований и экспериментальных данных.

5. Разработать научно-обоснованные рекомендации по проектированию технологических процессов получения сетки рифлей на внутренней поверхности цилиндрических оболочек.

6. Использовать результаты исследования в учебном и производственном процессе.

**Объект исследования:** операция рифления внутренней поверхности заготовки локальным пластическим деформированием поворотным инструментом.

**Предмет исследования:** напряженно-деформированное состояние материала, его повреждаемость, силовые режимы при проведении операции рифления трубной заготовки.

**Методы исследования.** В работе использован комплексный метод исследований, включающий теоретический анализ и экспериментальную проверку полученных результатов. Теоретический анализ процессов проводился с использованием современного лицензионного программного комплекса QForm, который основан на методе конечных элементов. При проведении экспериментальных исследований использованы современный спектрометр эмиссионный МСАП V5, испытательная машина Р-5, испытательная машина ГМС-50, электронный микроскоп, регистрирующая аппаратура и средства измерения.

**Автор защищает:**

- результаты теоретических и экспериментальных исследований напряженного и деформированного состояния заготовки, силовых режимов, повреждаемости материала в зависимости от технологических параметров, глубины рифления, зазора между заготовкой и инструментом, углом подъема спиральных клиновых выступов;
- разработанные вторичные математические модели силовых режимов, интенсивности деформаций, средних напряжений, критерия разрушения от геометрии инструмента и параметров формируемых рифлей;
- способы и устройства для реализации новых технологических процессов рифления полых цилиндрических оболочек;
- практические рекомендации по разработке новых технологических процессов рифления полых цилиндрических оболочек.

**Научная новизна заключается в:**

- математической модели рифления внутренней поверхности тонкостенных осесимметричных заготовок поворотным инструментом ограниченной длины, позволяющей спроектировать технологический процесс и рабочий инструмент для его реализации;
- установленных закономерностях изменения силовых режимов рифления, характеристик напряженно-деформированного состояния и

повреждаемости материала заготовки в зависимости от глубины рифления, зазора между заготовкой и инструментом и угла подъема рифлей.

### **Практическая ценность и реализация работы.**

Разработаны и исследованы новые энергоэффективные способы и устройства для получения цилиндрических оболочек с рифлеными поверхностями.

Установлены границы бездефектного протекания процесса рифления в зависимости от геометрии спиральных клиновых выступов и зазора между рабочей оправкой и заготовкой.

Установлены рациональные геометрические параметры инструмента, обеспечивающие получение изделия требуемой геометрии с обеспечением заданного качества.

Получены вторичные математические модели, позволяющие оценить силовые и деформационные параметры процесса рифления в зависимости от технологических факторов.

Отдельные результаты исследований использованы на кафедре МиППФ ТулГУ в учебном процессе при подготовке бакалавров по направлению 15.03.01 «Машиностроение», магистров по направлению 15.04.01 «Машиностроение» и включены в разделы лекционных курсов.

Разработанные способы и устройства для рифления поверхностей цилиндрических оболочек, практические рекомендации, математические модели приняты к внедрению в опытном производстве на АО «НПО «СПЛАВ», АО «ТОЗ-МЕТИЗ» и ПАО «Императорский Тульский оружейный завод».

**Апробация.** Результаты исследований доложены на: всероссийской научно-технической конференции студентов и аспирантов «Современные технологии обработки металлов и средства их автоматизации» (Тула: ТулГУ, 2021, 2023 г.); IV Международной конференции «Applied Physics, Information Technologies and Engineering (Apitech-IV 2022)» (Бухара, Узбекистан, 2022 г.); международной научно-практической конференции «Проблемы развития

предприятий: теория и практика» (Пенза: ПГАУ, 2022-2023 гг.); международной научно-практической конференции «Управление, экономика и право: проблемы, исследования, результаты» (Пенза: ПГАУ, 2022 г.).

**Публикации.** Материалы проведенных исследований отражены в 14 работах, 5 из которых входят в базы данных Scopus и/или Web of Science, 9 работ опубликованы в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК. Получено 7 патентов на изобретения РФ.

Автор выражает глубокую благодарность кандидату технических наук, доценту В.А. Короткову за оказанную помощь при выполнении работы, критические замечания и рекомендации.

**Структура и объем диссертации.** Диссертационная работа состоит из введения, пяти разделов, заключения, списка литературы из 88 источников, 4 приложений и включает 162 страницы машинописного текста, содержит 84 рисунка и 18 таблиц. Общий объем 162 страницы.

Во **введении** кратко обоснована актуальность поставленной в работе задачи, ее научная новизна, практическая ценность, методы исследования, приведены положения, выносимые на защиту, данные об апробации работы, публикациях, структуре и объеме диссертационной работы и краткое содержание диссертации.

В **первом разделе** работы описано назначение цилиндрических деталей с рифленой поверхностью, изложено современное состояние технологических процессов получения изделий с рифлями, а также теоретических и экспериментальных исследований получения рифленых поверхностей пластическим деформированием. Проведен анализ и обоснование выбора программного обеспечения для теоретического исследования. В конце раздела формулируются задачи исследования.

Во **втором разделе** приведены новый разработанный способ и устройство для рифления внутренней поверхности цилиндрической заготовки, результаты математического моделирования операции формообразования рифлей на внутренней поверхности оболочки с применением программного

комплекса QForm. Выявлено влияние технологических параметров процесса и геометрии инструмента на силовые параметры процесса рифления, напряженно-деформированное состояние материала полуфабриката при получении деталей с сеткой рифлей.

В **третьем разделе** приведены результаты экспериментального исследования процессов внутреннего рифления инструментом ограниченной длины с последующим сравнением полученных данных с компьютерным моделированием.

В **четвертом разделе** приведены новые разработанные способы и устройства для получения рифленых поверхностей цилиндрических оболочек.

В **пятом разделе** приведены основные практические рекомендации для проектирования технологического процесса рифления внутренней поверхности цилиндрической оболочки локальным пластическим формоизменением, а также сведения об использовании результатов исследования в промышленности и учебном процессе.

В **заключении** описаны основные результаты и выводы, полученные в диссертационной работе.

В **приложениях** содержатся акты внедрения полученных результатов диссертационной работы в промышленности и учебном процессе.

**1 ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ ОБ ИЗДЕЛИЯХ С РИФЛЯМИ НА  
ПОВЕРХНОСТИ ОБОЛОЧЕК И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССАХ  
ИХ ПОЛУЧЕНИЯ**

## 1.1 Назначение деталей с рифлями

В машиностроении и других отраслях промышленности часто применяются цилиндрические оболочки или цилиндрические пустотелые заготовки с дном, имеющие на внутренней или внешней поверхности углубления, рифли (рис. 1.1). В большинстве случаев рифли могут потребоваться для подвода смазочно-охлаждающих жидкостей или других технических жидкостей, для увеличения площади теплообмена [1], для концентрации напряжений в определенной зоне. Подобные детали могут применяться в качестве рифленых муфт, корпусов вертикальных винтовых конвейеров [2-5], втулок, корпусов тепловых установок, деталей, которые увеличивают зацеп, например, рукояток и так далее [6]. Помимо этого, данные изделия [7-8] могут применяться в качестве корпусов осколочных боевых частей и ракет (рис. 1.1, в) типа «земля-воздух», «воздух-воздух», в частности, для изделия типа «воздух-воздух» применяются алюминиевые заготовки, а для «воздух-земля» - стальные.



Рисунок 1.1 – Детали с рифлями: а – рукоятка, б – наконечник, в – корпус

Как правило, рифли имеют небольшой угол подъема (не более  $45^\circ$ ), при этом угол подъема может отсутствовать, в этом случае рифли считаются продольными. Также рифли могут быть нанесены одновременно в двух

направлениях, в результате чего получается ромбовидная сетка рифлей (рис. 1.1, в).

Зачастую к таким деталям предъявляют высокие требования по эксплуатационным и геометрическим характеристикам, что связано с условиями и режимами их эксплуатации. Далее рассматриваются существующие технологии их изготовления.

## 1.2 Современное состояние технологии получения изделий с рифлями

### 1.2.1 Обработка резанием

Одним из наиболее распространенных способов формирования сетки рифлей на внутренней поверхности цилиндрической оболочки является обработка резанием, заключающаяся в снятии стружки в местах будущих рифлей [9]. При этом происходит нарезание резьбонарезными головками с призматическими гребенками (см. рис. 1.2), режущие кромки которых располагаются на одном диаметре и имеют заходной конус.

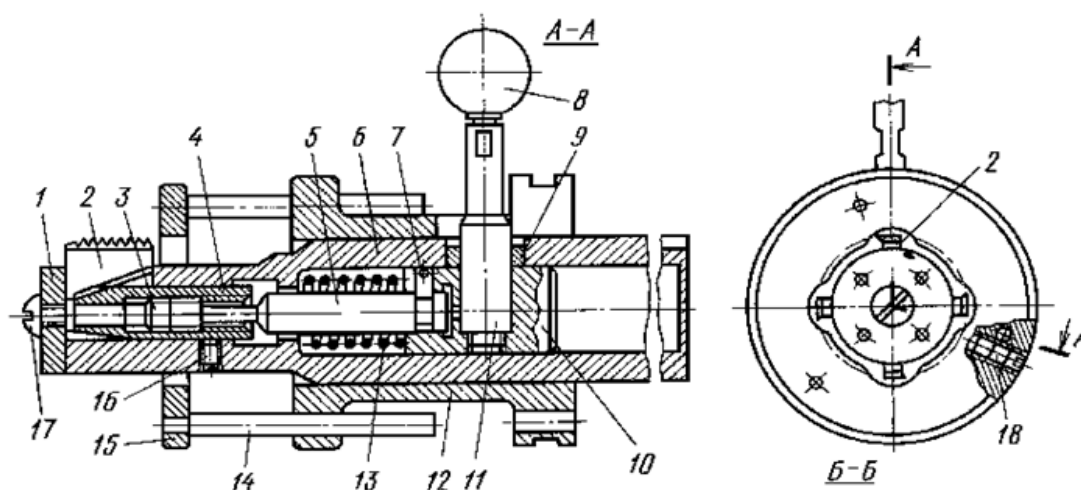


Рисунок 1.2 – Не вращающаяся винторезная головка для нарезания внутренней резьбы: 1 – фланец, 2 – гребенки, 3 – шлицы, 4 – втулки, 5 – тяга, 6 – корпус, 7 – стопор, 8 – шаровой наконечник, 9 – муфта, 10 – сердечник, 11 – рукоятка, 12 – корпус, 13 – пружина, 14 – стержень, 15 – кольцо, 16 – стопор, 17 – стопор, 18 – стопор

При формировании рифлей таким способом существует несколько недостатков: низкая производительность, высокий отход металла при снятии стружки, ограниченность применения метода для заготовок с небольшими диаметральными размерами.

### **1.2.2 Рифленый листовой прокат**

Еще одним способом нанесения рифлей на поверхности цилиндрической заготовки является применение листового проката [10], получаемого методом холодной или горячей прокатки (см. рис. 1.3) с последующим сворачиванием листа и соединением торцов при помощи сварки.

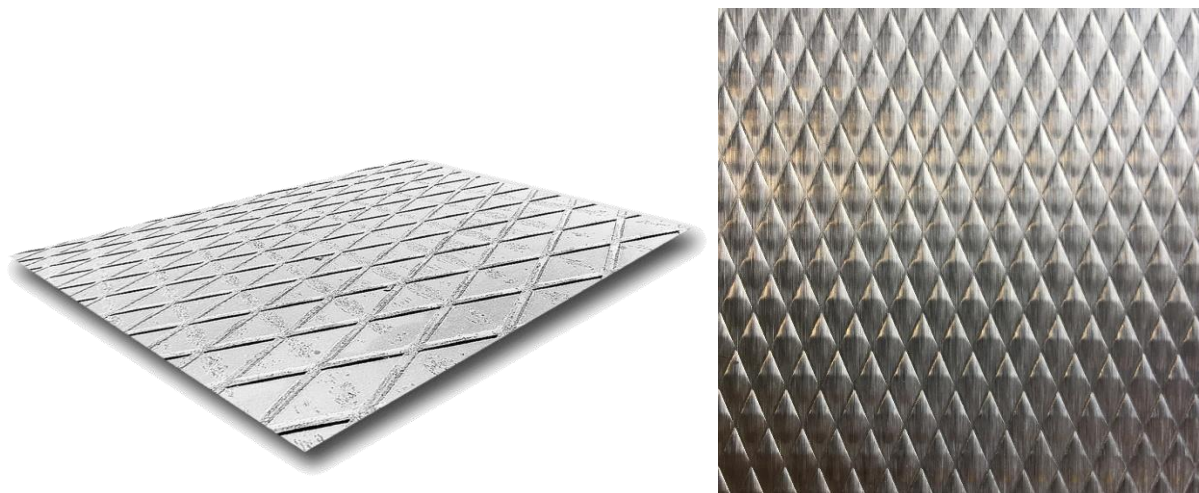


Рисунок 1.3 – Лист рифленый

Недостатком такого способа является наличие сварного шва, который имеет существенные минусы, среди которых низкая стойкость к вибрационным и ударным нагрузкам, сложность контроля качества шва, коробление детали в результате проведения сварочных работ, неточность размеров и формы полуфабриката, требующая применения последующих операций калибровки и отрезки.

### 1.2.3 Электрохимический метод обработки металлов

Альтернативным методом получения сетки рифлей является электрохимический метод, который основан на электрохимическом растворении металла (см. рис. 1.4) при прохождении тока через электролит, который подается под давлением в зазор между электродами, без непосредственного контакта между инструментом и заготовкой [11].

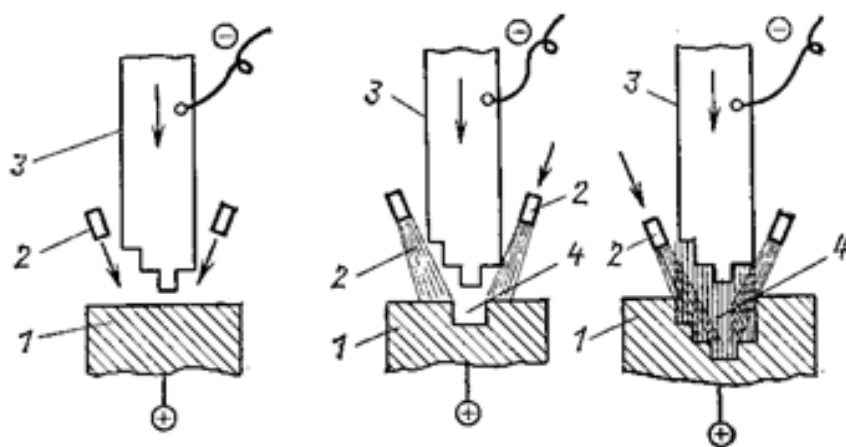


Рисунок 1.4 – Схема анодно-гидравлической размерной обработки изделий:

1 – анод; 2 – электролит; 3 – катод;

4 – профиль катода, воспроизводимый в аноде

Этот метод имеет ряд недостатков: низкая производительность, повышенная энергоёмкость, необходимость использования специального оборудования, необходимость сбора и утилизации отходов, относительно небольшая точность изготовления.

### 1.2.4 Ротационная ковка

Одним из эффективных процессов получения винтовых канавок является ротационная ковка [12], которая нашла широкое применение при изготовлении стволов стрелкового оружия. Этот метод позволяет исключить

образование стружки, улучшает физико-механические характеристики материала получаемого изделия и является более производительным, чем операция резанья.

Однако процесс ротационнойковки требует также значительных временных затрат, которые связаны с цикличностью процесса нагружения. Помимо этого, требуется специализированное оборудование.

### 1.2.5 Накатывание рифлей

Одним из способов получения рифлей на поверхности оболочек является накатывание (рис. 1.5) [13].

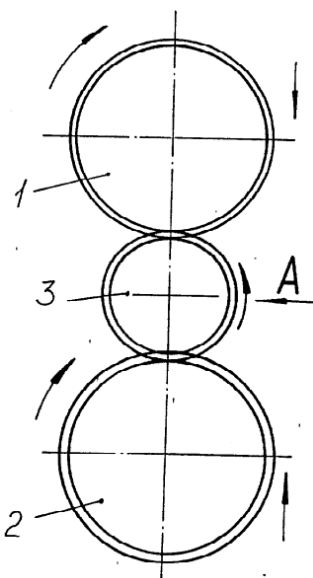


Рисунок 1.5 – Схема процесса: 1 и 2 – ролики, 3 – заготовка

Суть способа заключается в том, что заготовку 3 помещают между роликами 1 и 2, при этом заготовка осуществляет вращательное движение, а ролики – вращательное и поступательное.

Недостатком способа является сложная оснастка для формообразования, а также ограниченная глубина формируемых рифлей.

### 1.2.6 Редуцирование через коническую матрицу

Более эффективным является процесс редуцирования рифлёным пуансоном цилиндрической заготовки через коническую матрицу [14-31].

Для данного метода характерна следующая последовательность операций:

- на первой операции происходит формирование рифлей одного направления;
- на второй – съём полученного полуфабриката с пуансона;
- на третьей – отжиг полуфабриката;
- на четвертой – формирование рифлей противоположного направления;
- на пятой – съём полученного полуфабриката с пуансона;
- на шестой – термическая обработка.

Возможны два варианта реализации этого процесса. Первый вариант предполагает использование рифленого пуансона меньшей длины, чем получаемый полуфабрикат. Второй – когда длина рифленого пуансона соответствует длине получаемого полуфабриката на каждом переходе.

**Редуцирование через коническую матрицу инструментом ограниченной длины.** Данный метод был предложен авторами [32] и заключается в следующем: «Рифление осуществляется с помощью формирования многозаходных спиральных рифлей встречного направления на внутренней поверхности, образующих сетку выступов ромбической формы, включающего редуцирование трубчатой заготовки за две последовательные операции, каждая из которых выполняется путем совместного продавливания через калибровочную матрицу трубчатой заготовки и пуансона со спиральными выступами на боковой поверхности без относительного вращения пуансона и трубчатой заготовки. При этом на указанных операциях редуцирования используются пуансоны со спиральными выступами противоположного направления и калибровочные матрицы разного диаметра, а после завершения формирования спиральных рифлей на

каждой операции редуцирования трубчатую заготовку со сформированными спиральными рифлями и пуансон извлекают из матрицы, вывинчивают пуансон из заготовки при упоре последней в соосной матрице в кольцевой съемник. Каждую операцию редуцирования осуществляют по меньшей мере за два перехода, при этом используют пуансоны кратно меньшей длины, чем длина трубчатой заготовки. Совместное продавливание через калибровочную матрицу пуансона и трубчатой заготовки на первом переходе каждой операции редуцирования производится с упором пуансона в основание трубчатой заготовки. Между переходами на каждой операции редуцирования производится вывинчивание пуансона из трубчатой заготовки со сформированными спиральными рифлями, продольное перемещение которой ограничивается кольцевым съемником, до образования между пуансоном и трубчатой заготовкой пояса взаимосвязи спиральных выступов пуансона и спиральных рифлей трубчатой заготовки, который используется на следующем переходе редуцирования для упора пуансона и обеспечения направления формируемых на этом переходе спиральных рифлей».

Как отмечается в работах других авторов [21]: «предложенный порядок операций редуцирования и режим проведения переходов с использованием короткого инструмента позволяет дискретно, последовательно сформировать плавный профиль многозаходных спиральных канавок в трубчатых заготовках с дном за счет ступенчатого (возвратно-поступательного) перемещения пуансона вдоль обрабатываемой оболочки при упоре в направляющий технологический поясок винтовой взаимосвязи со сформированным профилем, который обеспечивается неполным вывинчиванием инструмента из полуфабриката на предшествующем переходе редуцирования».

Однако данная технология обладает рядом недостатков: не обеспечивается требуемая точность изделия в связи с неоднократным прохождением инструмента через одни и те же объемы деформированного материала; низкая производительность из-за многократного возврата

поступательного движения инструмента, значительные энергозатраты при редуцировании.

**Редуцирование через коническую матрицу инструментом, длина которого соответствует длине изделия.**

Технологический процесс получения такого типа изделия предполагает четыре операции (рис. 1.6):

- первая операция – редуцирование для получения винтовых рифтов одного направления;
- вторая операция – съем изделия с пуансона;
- третья операция – редуцирование для получения рифтов противоположного направления;
- четвертая операция – съем изделия с пуансона.

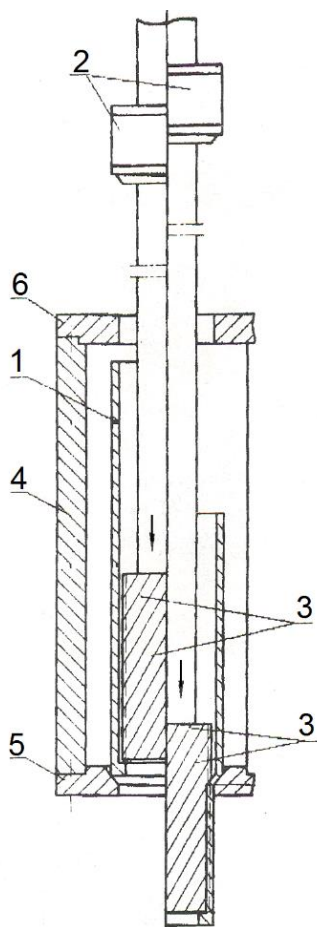


Рисунок 1.6 – Схема для формирования рифлей редуцированием:  
1 – заготовка; 2 – пуансон; 3 – спиральный выступ; 4 – корпус штамповой оснастки; 5 – калибровочная матрица; 6 – кольцевой съемник

Нанесение рифлей осуществляется пуансоном, на поверхности которого сформированы треугольные винтовые выступы, геометрия которых определяется углом вершины и высотой выступа, а также углом наклона направления выступа к образующей пуансона. Наружный диаметр пуансона соответствует внутреннему диаметру стакана.

Этот метод редуцирования отличается большой трудоёмкостью изготовления пуансона со спиральными выступами, высоким требуемым усилием съема, что вызывает трудности из-за того, что не все прессы способны выдавать большую силу при обратном ходе. Также формирование рифлений редуцированием на заготовках из цветных металлов сопровождается налипанием металла.

### **1.3 Теоретические и экспериментальные исследования получения рифленых поверхностей пластическим деформированием**

Проведенный анализ существующих технологий изготовления полых цилиндрических оболочек с внутренним рифлением показал целесообразность использования для их изготовления процессов обработки металлов давлением. Эти процессы позволяют значительно сократить расход материала, повысить качество и эксплуатационные характеристики изделий в сочетании с высокой производительностью.

Успешному внедрению процессов пластического формоизменения способствовали работы многих советских, российских и зарубежных ученых: Аверкиева Ю.А., Алюшина Ю.А., Анурьева В.И., Богатова А.А., Ганаго О.А., Голенкова В.А., Гречникова Ф.В., Губкина С.И., Демина В.А., Дмитриева А.М., Евдокимова А.К., Евстратова В.А., Евсюкова С.А., Зубцова М.Е., Колмогорова В.Л., Коробовой Н.В., Короткова В.А., Кухаря В.Д., Лавриненко В.Ю., Мазура И.П., Мещерина В.Т., Мишунина В.А., Овчинникова А.Г., Попова Е.А., Радченко С.Ю. Рене И.П.,

Романовского В.П., Рудмана Л.И., Семенова Е.И., Сосенушкина Е.Н., Степанского Л.Г., Сторожева М.В., Талалаева А.К., Тарновского И.Я., Томленова А.Д., Трегубова В.И., Чудина В.Н., Шофмана Л.А., Яковлева С.П., Яковлева С.С., Atlan T., Marciniak. Z., Hill R., Woo D.M., Sowerby R. Ими разработаны новые технологические процессы пластического формоизменения, проведены теоретические и экспериментальные исследования обработки металлов давлением.

При обработке металлов давлением происходят существенные трансформации геометрических параметров обрабатываемых деталей во время технологических операций. Зона пластического деформирования может изменяться в ходе процесса, что вызывает неравномерное и разнородное распределение скоростей течения в очаге пластической деформации. Все это значительно усложняет теоретическое и экспериментальное исследования процессов штамповки, целями которых являются определение деформированного и напряженного состояния заготовки в процессе штамповки, обоснование и создание условий, обеспечивающих возможность формоизменения при приложении меньших сил, оценка предельного формоизменения за один переход на основе применения современных теорий разрушения. Потребность в решении указанных проблем стимулировала модернизацию имеющихся подходов и разработку инновационных методик для анализа технологических процессов в области обработки металлов давлением.

Цилиндрические оболочки с рифленой поверхностью можно отнести к классу сложнопрофильных изделий, получению которых посвящен целый ряд работ [33-40]. В этих работах рассматривалось получение сложнопрофильного изделия, при котором пластическое формоизменение происходит во всем объеме материала. В то же время работы [41-45] посвящены получению сложнопрофильных изделий, при котором область пластического формоизменения материала охватывает не весь объем материала, а сосредоточена в зонах формирования элементов сложного профиля.

Если рассматривать вопрос получения рифлей именно треугольного поперечного сечения, то к первым работам в этом направлении следует отнести публикации авторов Хилла, Ли, Тампера [46], которые в рамках модели жесткопластического материала рассмотрели процесс внедрения симметричного твердого клина с углом раствора  $2\gamma$  в жесткопластическую среду, ограниченную плоскостью, при отсутствии трения на поверхности контакта [47]. При внедрении клина среда выдавливается по обе его стороны, а картина деформации имеет вид, схематически показанный на рис. 1.7.

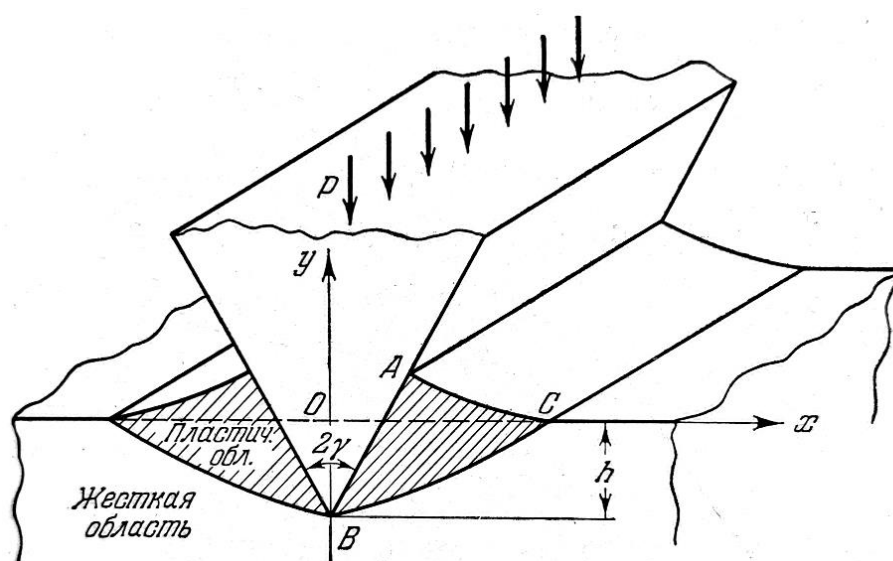


Рисунок 1.7 – Схема деформации при внедрении клина [46]

Хилл, Ли, Тампер [47-48] предложили сетку линий скольжения для анализа этого процесса, при этом решение предполагает накопление материала на свободных поверхностях по обе стороны пуансона, но таким образом, что сохраняется геометрическое подобие, то есть сетка линий скольжения при увеличении глубины вдавливания изменяется не по форме, а только по размерам. Сетка линий скольжения показана на рис. 1.8, а, годограф скоростей показан на рис. 1.8, б [46].

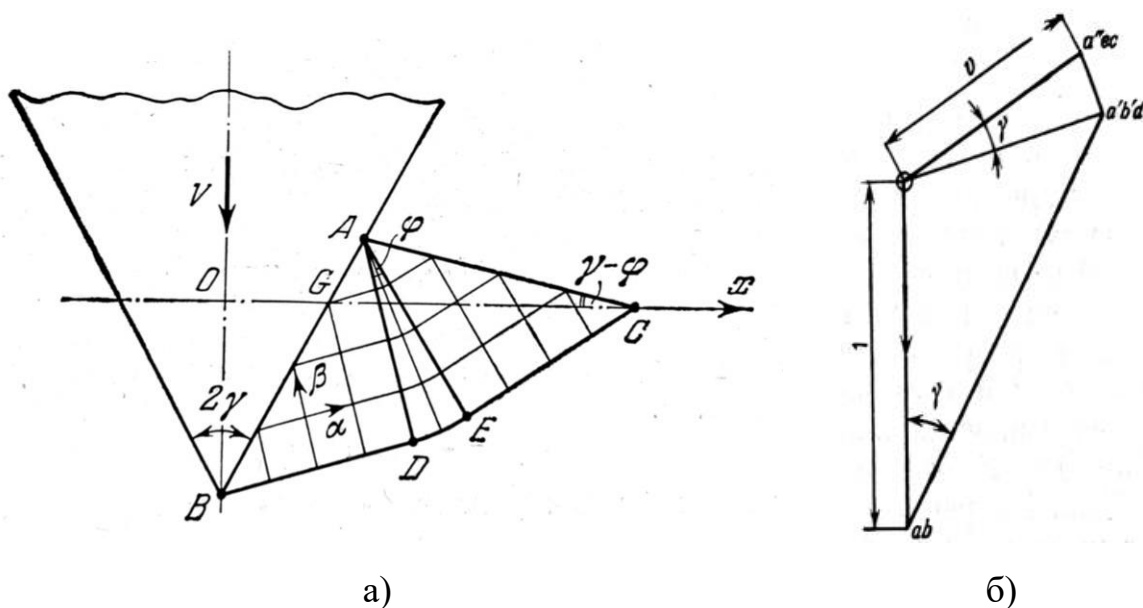


Рисунок 1.8 – Сетка линий скольжения (а), годограф скоростей (б) [46]

При этом нагрузка на единицу длины клина рассчитывается по формуле  $P = 2pl \sin \gamma$ , где  $p = 2k(1 + \gamma)$ ,  $k$  – предел текучести материала при сдвиге [47].

Таким образом, усилие процесса определяется глубиной внедрения клина, углом раствора и пределом текучести материала, выбор значения которого представляет собой самостоятельную задачу [48].

Подробный кинематический анализ скоростей течения материала в данном процессе приведен в работе [46], что позволило смоделировать искажение первоначальной квадратной сетки, предварительно нанесенной на плоскости сечения (рис. 1.9), что подтверждается результатами экспериментальных данных, приведенных на рисунке 1.10.

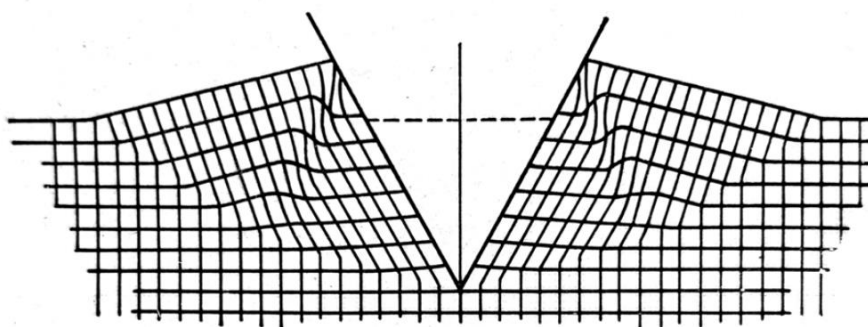


Рисунок 1.9 – Искажение первоначальной квадратной сетки [46]

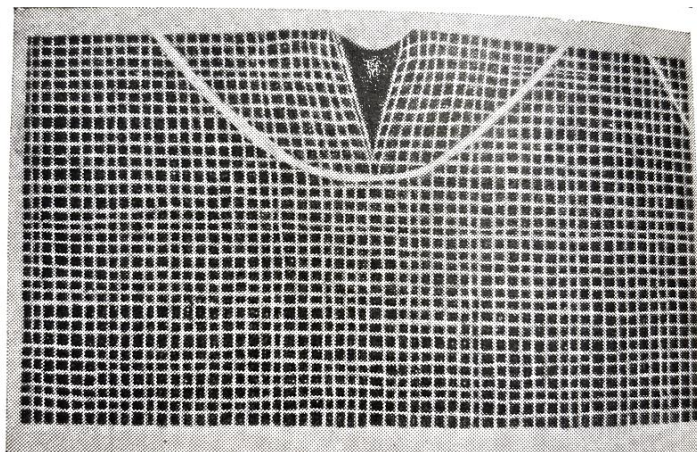


Рисунок 1.10 – Результаты эксперимента [46]

При этом аналитических зависимостей для получения данного результата недостаточно, потребовалось применение методов численного интегрирования. Анализ полученных результатов показал, что деформированное состояние материала существенно неоднородно, что приводит к неоднородному упрочнению материала во всей пластической области. Следовательно, гипотеза о равномерном распределении контактных напряжений по поверхности клина неправомерна.

Таким образом, можно утверждать, что исследование процессов нестационарного пластического течения, реализуемого в большинстве технологических процессов обработки металлов давлением, аналитическими методами практически невозможно и требует применение численных методов, среди которых наибольшее распространение получил метод конечных элементов (МКЭ).

МКЭ представляет собой численный метод решения дифференциальных уравнений с частными производными, а также интегральных уравнений, возникающих при решении задач прикладной теории пластичности [50]. Метод основан на разбиении объекта исследования на более мелкие, конечные элементы, в результате чего сложная задача упрощается до системы, которую можно эффективно разрешить с помощью стандартных вычислительных алгоритмов [51].

Метод конечных элементов был разработан в 1930-40-х годах в рамках исследований по теории упругости и строительной механики. Одними из создателей данного метода являются Александр Павлович Хренников, Рихард Курант, Иоаннис Аргирис, Фен Кан [52]. Развитие вычислительной техники и дальнейшее совершенствование МКЭ способствовало более широкому распространению и применению метода в различных областях.

Данный метод стал популярным в современной науке благодаря ряду преимуществ [50]:

- высокая гибкость и способность адаптироваться к задачам любой сложности и геометрии;
- возможность решения задач, которые невозможно или трудно решить другими численными методами;
- возможность компьютеризации и автоматизации расчетов;
- возможность настройки точности расчета путем уменьшения или увеличения количества элементов (укрупнения или уменьшения);
- возможность применения метода для решения мультифизических задач [53].

Однако у метода есть и недостатки. В частности, требуется значительный объем вычислительных ресурсов, особенно для больших и сложных задач. Сложность настройки модели и интерпретации результатов требует высокой квалификации и глубоких знаний как в области предметной дисциплины, так и в численных методах. Также необходимы дорогостоящие программные продукты.

Наибольшее распространение МКЭ получил благодаря возможности его реализации в компьютерном программном обеспечении, что значительно облегчает процесс расчета и анализа полученных данных.

Существует множество программных продуктов, основанных на МКЭ, которые применяются при исследовании процессов пластического формоизменения и моделировании операций [54]. Достоинством применения программ является быстрота компьютерных моделирований, возможность

предварительного анализа технологических процессов до их реализации, экономия временных и материальных ресурсов, возможность оптимизации процессов формоизменения.

Наиболее распространенным программным обеспечением для компьютерного моделирования обработки металлов давлением являются: AutoForm, PAM-STAMP, ABAQUS, Ansys, QFORM, DeForm.

AutoForm – программа для проведения расчетов листовой штамповки, разработанная в Швейцарии компанией «AutoForm Engineering GmbH» [55]. Из минусов программы можно назвать относительно невысокие возможности, которые позволяют провести анализ только процессов листовой штамповки.

PAM-STAMP – французская программа, разработанная компанией ESI-Group [56]. Программа позволяет провести анализ процессов листовой штамповки, гидроформовки, штамповки эластичной средой и пр. Главным недостатком является отсутствие возможности моделированияковки, объемной штамповки и многих других процессов.

ABAQUS – многофункциональная программа, используемая для численного моделирования большого числа задач из области машиностроения, авиа- и автомобилестроения, энергетики [57]. На основе данных, полученных по результатам литературного обзора, можно отметить, что непосредственно для моделирования процессов пластического формоизменения в России данную программу используют не так часто. Дополнительные трудности влечет сложность интерфейса и ресурсоемкость ABAQUS. Кроме того, в программе отсутствует русскоязычная поддержка, так как она ориентирована преимущественно на рынки других стран, нежели РФ.

Ansys – одна из самых известных программ, основанных на методе конечных элементов. Она позволяет рассчитать рекордное количество различных процессов и физических явлений [58]. Возможен расчет аэродинамики, акустики, механики деформирования твердого тела, гидравлики, трехмерной печати, механики конструкции, теплопередачи и теплообмена и пр. Представляет собой сложноструктурированный

программный продукт, имеющий большое количество модулей. Однако высокая сложность организации моделирования, отсутствие русификации, трудный для восприятия и анализа данных интерфейс, высокая стоимость и необходимость в покупке большого числа модулей, по мнению автора, делает данный программный продукт менее популярным для анализа процессов обработки металлов давлением по сравнению с аналогами.

В России в настоящее время для решения задач пластического изменения формы наиболее распространенными программами конечно-элементного моделирования являются QForm и DeForm, также они ориентированы преимущественно на обработку металлов давлением. Поэтому далее будет проведено более детальное их сравнение.

QForm – российский программный продукт, разработанный компанией «Кванторформ» и имеющий большое количество преимуществ [59]:

- возможность моделирования большого разнообразия процессов (прокатки, раскатки, листовой и объемной штамповки,ковки, прессования, электровысадки и пр.);
- встроенные обширные библиотеки смазок, оборудования, материалов с механическими характеристиками;
- возможность оценки влияния температуры на процессы формоизменения при подогреве заготовки и инструмента, внешнем нагреве/охлаждении, деформационном нагреве и пр.;
- возможность глубокой настройки сетки конечных элементов, их размеров и распределения, при этом не только заготовки, но и инструмента;
- простой и понятный интерфейс;
- возможность учета как пластических, так и упругих деформаций;
- тонкая настройка условий формоизменения (скорости движения инструментов, критериев остановки расчета);
- возможность анализа размера зерен сплавов и фазовых превращений;
- возможность расчета износа и напряженно-деформированного состояния инструмента;

- наличие встроенных и пользовательских подпрограмм, которые позволяют провести дополнительные расчеты и анализ по требованиям оператора;
- большое количество встроенных методов оценки повреждаемости, вероятности образования дефектов и пр.;
- возможность пакетного запуска расчетов, что значительно сокращает время проектирования;
- возможность точного анализа характеристик в точке с помощью ее трассировки;
- большие возможности для построения графиков, диаграмм распределения, анализа статистики и составления отчетов;
- большое количество руководств и справочников на русском языке, русскоговорящая поддержка.

DEFORM – программный комплекс для анализа процессов обработки металлов, разработанный в США компанией «SFTC» [60]. Имеет большие возможности для анализа широкого набора процессов, однако, по мнению автора, имеет ряд недостатков: отсутствие русификации и русскоязычной поддержки, сложный интерфейс и методика построения компьютерной модели с использованием системы pre- и post- процессоров, относительно небольшая база данных материалов и смазок.

Рассматривая более подробно эти комплексы, можно сделать вывод, что они оба подходят для решения задач обработки металла давлением, однако у QForm имеется ряд преимуществ перед DEFORM.

Компьютерное моделирование в программе QForm заключается в нескольких основных этапах. На первом строится трехмерная твердотельная модель заготовки и инструмента в программах автоматизированного проектирования наподобие Компас-3D. Далее проводится импорт трехмерной модели в среду QForm, где задаются начальные условия моделирования: температура штамповки, материал заготовки и инструмента, смазка, тип деформирования, условия остановки инструмента, граничные условия,

настройки сетки конечных элементов. На следующем этапе происходит запуск созданной компьютерной модели с учетом всех установленных параметров и условий и проводится автоматическая разбивка инструмента и заготовки на конечные элементы. В момент расчета возможен просмотр результатов в режиме реального времени, а также изменение начальных условий обработки давлением. В момент расчета, а также после окончания формообразования возможен детальный анализ параметров процесса.

Этот программный продукт был применен Митиным О.Н. и др. [21-31] для анализа процесса рифления тонкостенных оболочек методом редуцирования через коническую матрицу.

Моделирование процесса редуцирования было выполнено по схеме, представленной на рисунке 1.11.

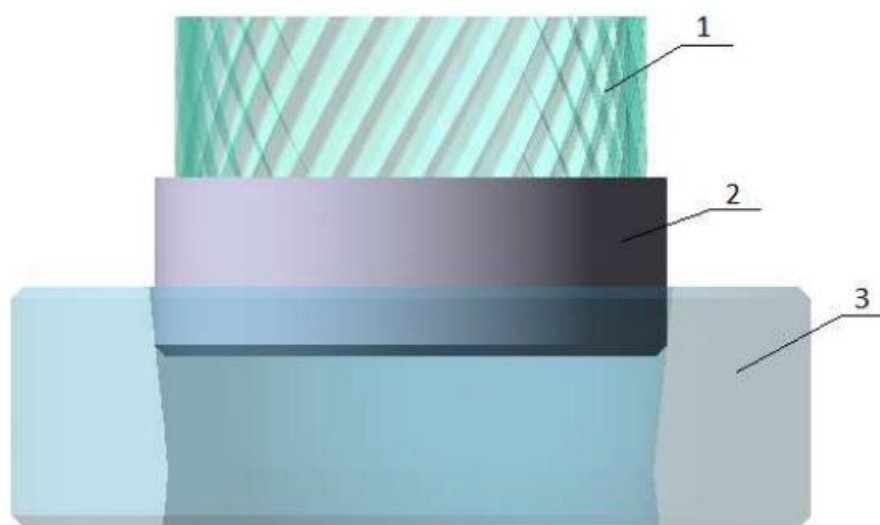


Рисунок 1.11 – Схема процесса редуцирования [22]:  
1 – пуансон; 2 – заготовка; 3 – матрица

При этом в процессе формоизменения заготовки происходит не только нанесение рифлей, но и изменение ее диаметра и толщины стенки, что приводит к удлинению заготовки в процессе деформирования и возникновению дополнительных растягивающих напряжений в осевом направлении.

В результате моделирования были получены картины распределения интенсивности деформаций, параметра Cockroft\_Latham в зоне формирования рифли (рис. 1.12).

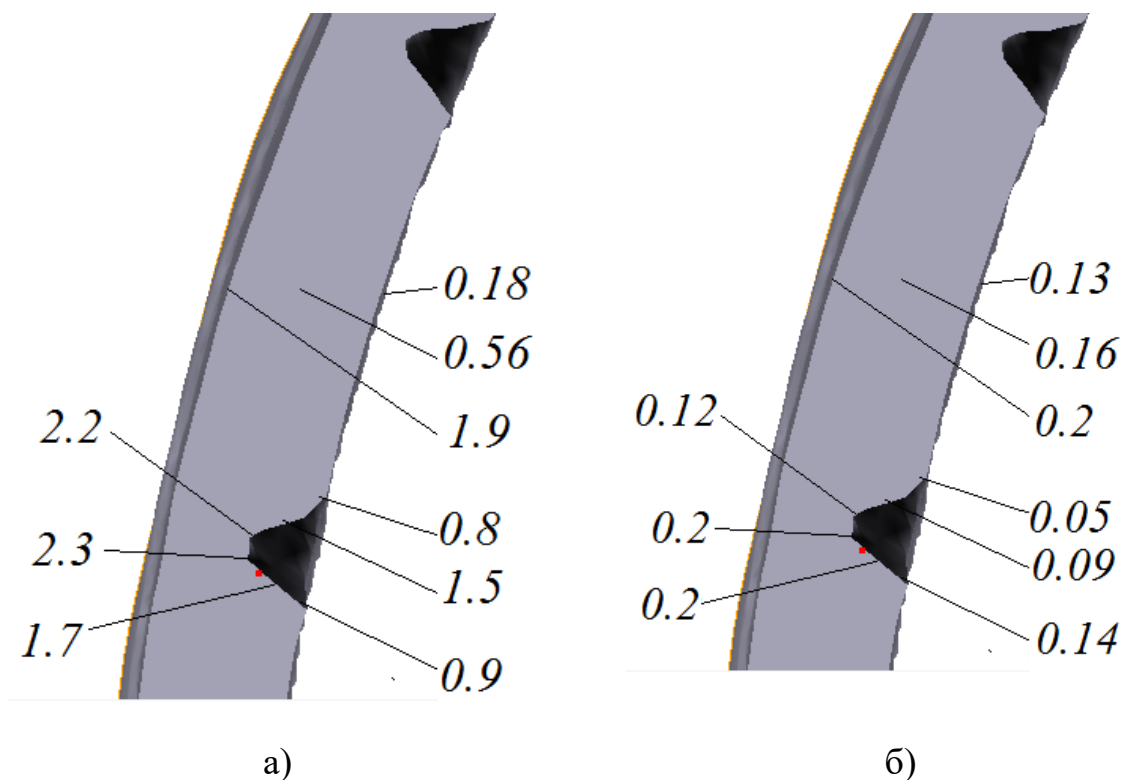


Рисунок 1.12 – Картина, характеризующая изменение интенсивности деформации (а), значения параметра Cockroft\_Latham (б) в сечении перпендикулярном к оси заготовки на конечном этапе формирования рифли

Анализ полученных результатов показал, что при формировании рифли в металле заготовки реализуется весьма значительные интенсивности деформаций, которые могут достигать значения более 200% в вершине рифли и порядка 95% на периферийных участках заготовки. Это свидетельствует, во-первых, о том, что пластическая область охватывает весь объем материала, а не только зону образования рифли, а во-вторых, о значительной неоднородности деформаций в материале в объеме заготовки.

В процессе формирования рифта во всей области реализуются высокие значения сжимающего гидростатического напряжения и только на заключительной стадии формирования рифта металл начинает претерпевать

растяжение в области стенки, это приводит к возникновению незначительных положительных значений гидростатического напряжения.

При этом анализ повреждаемости материала заготовки в процессе деформирования показал, что значение параметра Cockroft\_Latham не превышает 0,2.

Аналогично был смоделирован процесс съема заготовки с пуансона после первой операции редуцирования по схеме, приведенной на рис. 1.13 [26].

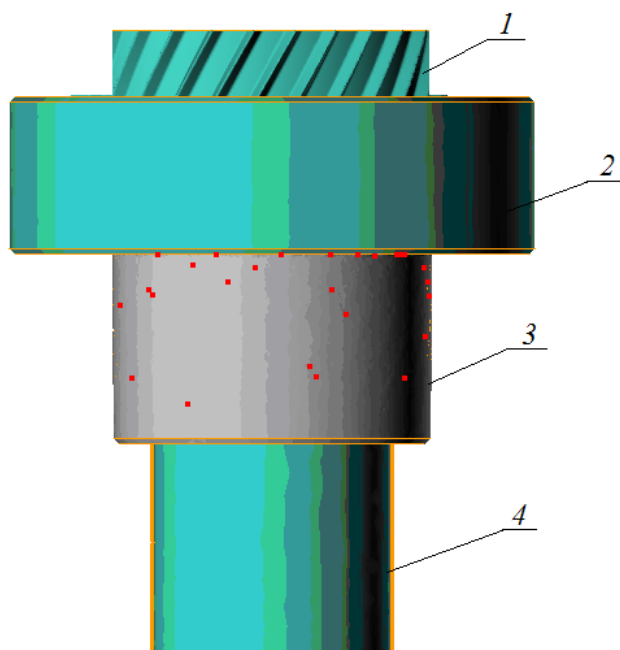


Рисунок 1.13 – Схема процесса съема заготовки с профильного пуансона:  
1 – пуансон; 2 – съемник; 3 – заготовка; 4 – упор

При съеме заготовка совершает винтовое движение по поверхности пуансона. Этот процесс характеризуется тем, что сила в начале процесса при незначительных перемещениях инструмента достигает максимального значения, после чего начинается движение заготовки при резком снижении силы процесса, и в дальнейшем она снижается практически до нуля (рис. 1.14).

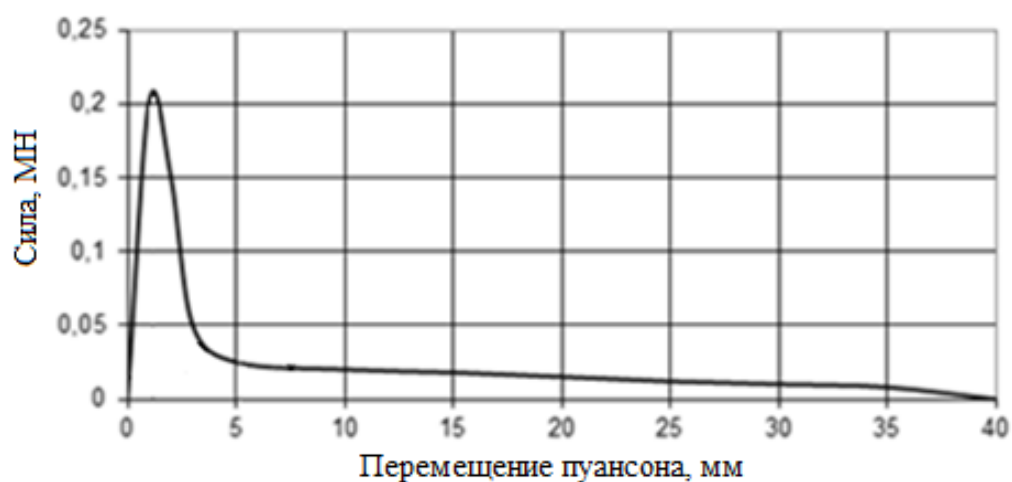


Рисунок 1.14 – Сила процесса съема заготовки после первой операции редуцирования

Аналогично была смоделирована вторая операция рифления противоположного направления и съема заготовки. Результаты показали, что отличительной особенностью второй операции рифления является то, что накопленные интенсивности деформаций в зоне пересечения рифлей могут достигать 300%, что связано с отсутствием промежуточного отжига заготовки.

Автором были проведены экспериментальные исследования [30] по формированию рифлей на трубных заготовках из стали 10, результаты которых представлены на рис. 1.15 и 1.16.

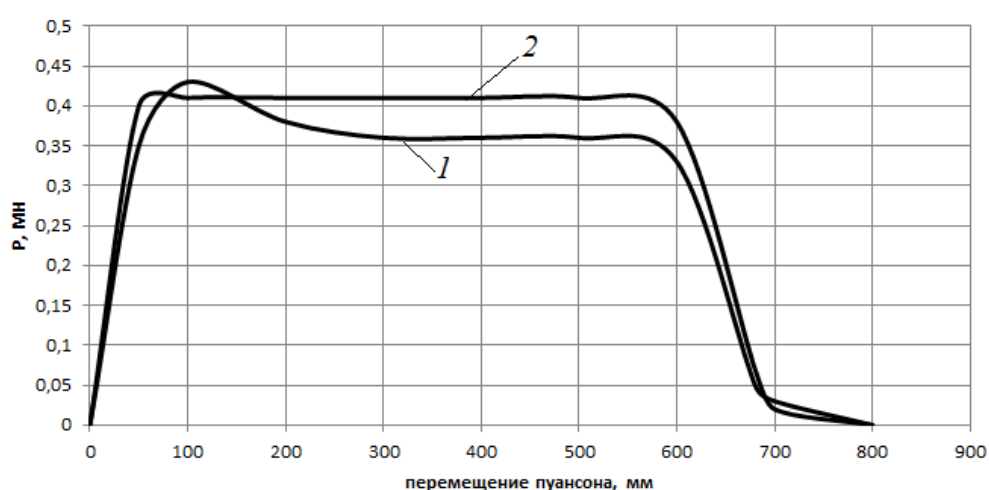


Рисунок 1.15 – Сила после первой операции редуцирования:  
1 – экспериментальная кривая; 2 – теоретическая кривая

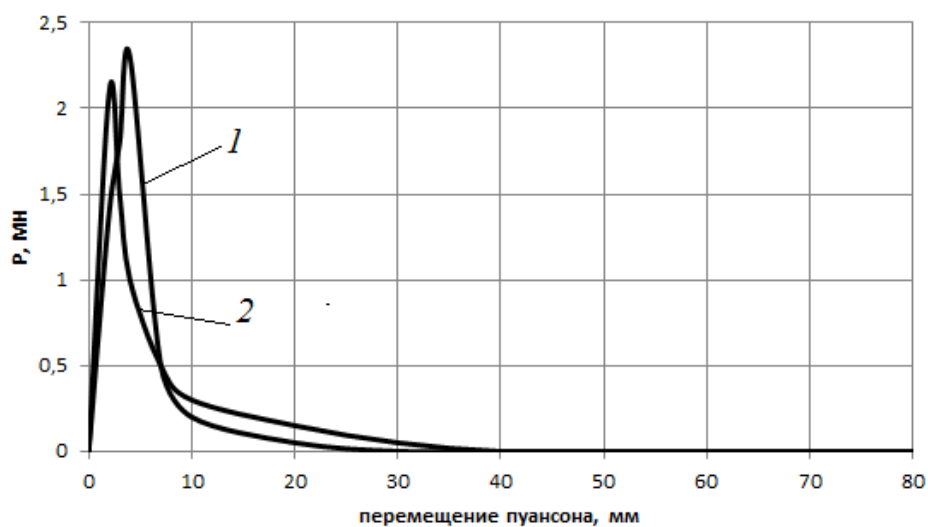


Рисунок 1.16 – Сила съема полуфабриката с рифленого пуансона с левыми рифлями: 1 – экспериментальная кривая; 2 – теоретическая кривая

Показаны удовлетворительные совпадения экспериментальных и расчетных данных. Следует отметить значительную величину силы съема детали с пуансона после операции рифления. Проведенные автором исследования показали, что величина силы редуцирования возрастает при увеличении количества рифлей не прямо пропорционально.

#### 1.4 Выводы и постановка задачи исследования

Проведенный обзор показал, что вышеперечисленные методы получения рифленых оболочек имеют ряд недостатков, таких как высокая трудоемкость, низкая производительность, высокая сила формоизменения и съема изделия. Поэтому вопрос о разработке новых способов и устройств для нанесения рифлей на внутренней поверхности, отличающихся высокой производительностью и низкой энергоемкостью, стоит довольно остро и является важной технической и научной задачей.

В связи с этим актуальной является разработка новых способов и устройств рифления, позволяющих путем локального пластического формоизменения осуществить нанесение рифлей с заданной геометрией инструментом ограниченной длины при совмещении поступательного и

вращательного движения инструмента на прессовом оборудовании. Это позволит на порядок снизить технологическую силу процесса рифления и съема, а также снизить затраты на его изготовление.

На основе описанного выше были сформулированы следующие задачи исследования:

1. Разработать новые способы и устройства для получения оболочек с рифлями, увеличивающие производительность и снижающие трудоемкость процессов при меньшей требуемой технологической силе.

2. Осуществить теоретические исследования процессов формирования рифлей на внутренней поверхности оболочки вращающимся инструментом ограниченной длины с помощью компьютерного моделирования. Выявить влияние технологических параметров, формы и размеров инструмента на напряженно-деформированное состояние заготовки, силовые режимы, повреждаемость материала, температуру материала, качество получаемого изделия.

3. Получить вторичные математические модели зависимости силовых и деформационных параметров процесса от геометрических параметров формируемой рифли и инструмента.

4. Провести экспериментальные работы по нанесению сетки рифлей на внутренней поверхности оболочек с целью оценки технологической силы, качества детали. Сравнить результаты компьютерных моделирований и экспериментальных данных.

5. Разработать научно обоснованные рекомендации по проектированию технологических процессов получения сетки рифлей на внутренней поверхности цилиндрических оболочек.

6. Использовать результаты исследования в учебном и производственном процессе.

**2 ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПОЛУЧЕНИЯ  
СЕТКИ РИФЛЕЙ НА ВНУТРЕННЕЙ ПОВЕРХНОСТИ  
ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ОБОЛОЧЕК ЛОКАЛЬНЫМ ПЛАСТИЧЕСКИМ  
ДЕФОРМИРОВАНИЕМ**

## 2.1 Способ и устройство для внутреннего рифления вращающимся инструментом

Был разработан новый способ рифления с помощью локального пластического деформирования в контейнере инструментом ограниченной длины (патент № 2654410) [61]. Общая схема нового способа рифления представлена на рисунке 2.1.

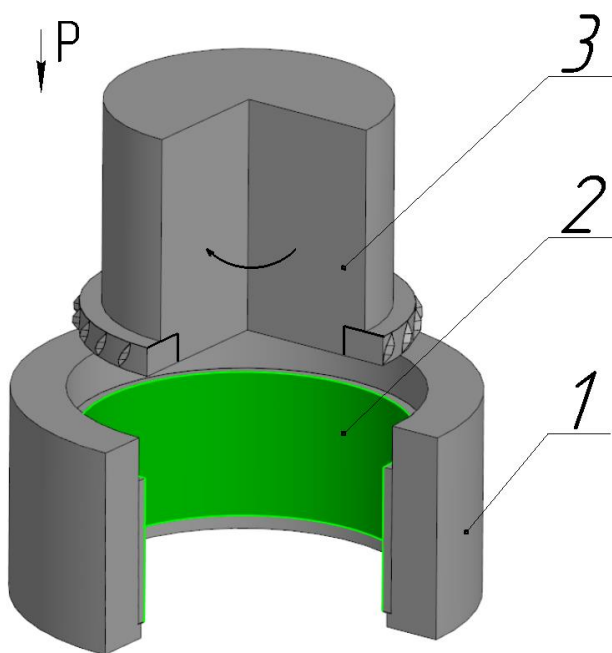


Рисунок 2.1 – Схема процесса изготовления рифлей на внутренней поверхности металлической оболочки: 1 – контейнер, 2 – цилиндрическая оболочка, 3 – инструментальный стержень с рабочей оправкой

Цилиндрическая оболочка (2) устанавливается в контейнер (1) и инструментальный стержень с рабочей оправкой (3) вводятся в полость оболочки, производя локальное деформирование внутренней поверхности на требуемую глубину. В процессе локального деформирования происходит поворот рабочей оправки и инструментального стержня (3) относительно корпуса (1) и заготовки (2) путем создаваемого крутящего момента в процессе пластического формоизменения. При обратном ходе также совершается поворот инструментального стержня и рабочей оправки с вывинчиванием из цилиндрической оболочки без повреждения внутренней поверхности. Для

реализации способа было разработано специальное устройство [62], на рис. 2.2 показано исходное его положение.

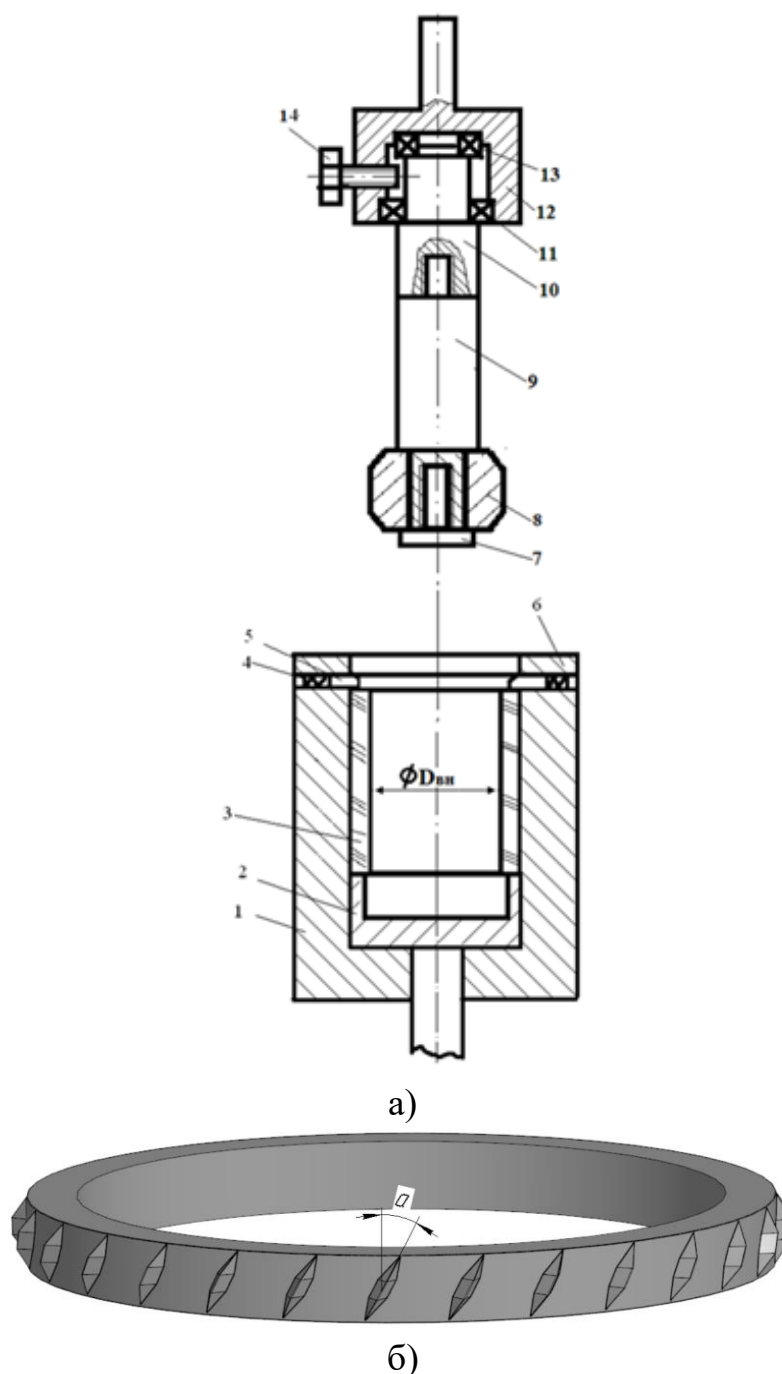


Рисунок 2.2 – Эскиз устройства (а) для реализации локального пластического деформирования и нанесения рифлей на внутренней поверхности оболочки, модель рабочей оправки (б): 1 – корпус, 2 – выталкиватель, 3 – цилиндрическая оболочка (заготовка), 4 – пружины, 5 – съемник, 6 – крышка, 7 – крышка, 8 – рабочая оправка, 9 – инструментальный стержень, 10 – подпятник, 11 – подшипник, 12 – хвостовик, 13 – подшипник, 14 – стопорный винт

Корпус (1) устройства закреплен на столе гидравлического пресса, а хвостовик (12) – в ползуне. Цилиндрическая оболочка (3) внутренним диаметром  $D_{\text{вн}}$  установлена в корпусе (1) на выталкивателе (2) с глухой полостью. При рабочем ходе рабочая оправка (8) с инструментальным стержнем (9) контактирует с внутренней поверхностью цилиндрической оболочки и происходит локализация деформаций в местах контакта спиральных клиновых выступов рабочей оправки (8) с внутренней поверхностью  $D_{\text{вн}}$  цилиндрической оболочки (3). При получении спиральных углублений возникают сила формоизменения и крутящий момент. Под действием крутящего момента происходит поворот вокруг оси инструментального стержня (9) и рабочей оправки (8). Рабочая оправка (8) закреплена на инструментальном стержне (9) с помощью крышки (7). Возможность вращения обеспечивается тем, что инструментальный стержень (9) установлен на подпятнике (10), контактирующем с подшипниками (11 и 13).

Таким образом, одновременное продольное перемещение и вращение рабочего инструмента обеспечивают получение спиральных рифлей на внутренней поверхности оболочки. При частичном выходе рабочей оправки (8) из полости цилиндрической оболочки (3) рабочий ход инструмента заканчивается. При этом сохраняется контакт спиральных клиновых выступов рабочей оправки со спиральными канавками цилиндрической оболочки (3).

При обратном ходе в результате продольного перемещения и одновременно поворота вокруг оси рабочей оправки (8) с инструментальным стержнем (9) происходит калибровка полученных спиральных канавок. При этом сила съема незначительна из-за малой площади контакта рабочей оправки (8) с поверхностью цилиндрической оболочки (3). В процессе удаления рабочего инструмента из цилиндрической оболочки (3) последняя контактирует со съёмником (5), подпружиненным пружинами (4), и остаётся внутри контейнера (1). Съёмник (5) и пружины (4) закрыты в верхней части корпуса (1) крышкой (6).

Перед второй операцией рабочая оправка меняется на рабочую оправку с противоположенным углом подъема спиральных клиновых выступов  $\alpha$  и закрепляется на инструментальном стержне (9). В этом случае угол подъема  $\alpha$  спиральных клиновых выступов изменяется на противоположный и проводится рабочее перемещение инструмента внутри полости цилиндрической оболочки с получением спиральных канавок и образованием сетки рифлей ромбической формы. После завершения выхода инструмента из полости цилиндрической оболочки (3) съёмник (5) отодвигается и срабатывает выталкиватель (2). Цилиндрическая оболочка (3) удаляется из контейнера (1). Удаление цилиндрической оболочки (3) из контейнера (1) возможно также с помощью рабочего инструмента. В этом случае при обратном ходе в момент частичного выхода оправки (8) из полости цилиндрической оболочки (3) съёмник (5) выдвигается в сторону. При этом спиральные выступы рабочей оправки (8) находятся в зацеплении со спиральными впадинами. Останавливается поворот инструмента вокруг оси с помощью стопорного винта (14) и рабочая оправка (8), продолжая продольное перемещение и находясь в зацеплении, удаляет цилиндрическую оболочку (3) из контейнера (1) с последующим свинчиванием оболочки (3) с рабочей оправки (8).

Таким образом осуществляется нанесение сетки рифлей на внутренней поверхности цилиндрической оболочки методом локального пластического деформирования, что предположительно снижает трудоемкость изготовления деталей, увеличивает производительность, повышает энергоэффективность.

## **2.2 Математическая модель процесса рифления инструментом различной геометрии**

Теоретические исследования нанесения сетки рифлей на внутренней поверхности цилиндрической оболочки (заготовки) локальным пластическим деформированием с использованием инструмента ограниченной длины [61]

были выполнены в предположении, что материал заготовки однородный, изотропный, изотропно упрочняющийся, жесткопластический.

При этом определяющая система уравнений включала в себя:

- уравнения равновесия:

$$\sigma_{ij,j} = 0;$$

- соотношения связи компонентов скоростей деформаций с компонентами вектора скорости перемещения:

$$\xi_{ij} = (v_{i,j} + v_{j,i})/2;$$

- условие несжимаемости:

$$\xi_{ii} = 0;$$

- уравнение теории пластического течения:

$$\xi_{ij} = \lambda S_{ij};$$

- условие текучести:

$$\sigma_i = f(\varepsilon_i, \xi_i, T).$$

В приведенных выражениях  $\sigma_{ij}$  – компоненты тензора напряжений;  $S_{ij}$  – компоненты девиатора напряжений;  $\xi_{ij}$  – компоненты скоростей деформаций;  $v_i$  – компоненты вектора скоростей,  $f$  – функция, определяющая изменение механических свойств в процессе пластического формоизменения;  $\lambda$  – некоторый положительный скалярный множитель,  $\sigma_i$  – интенсивность напряжений,  $\varepsilon_i$  – интенсивности деформации,  $\xi_i$  – интенсивность скоростей.

Численное моделирование процесса было проведено в программном комплексе QForm [62-71]. Трехмерные модели инструмента и заготовки представлены на рисунке 2.3.

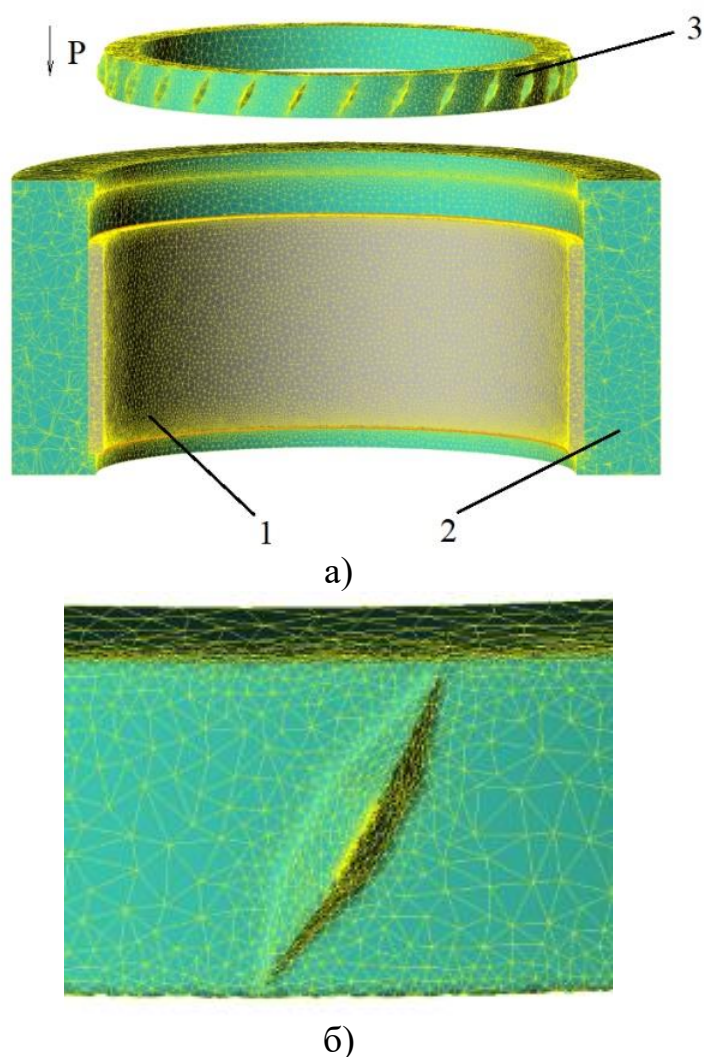


Рисунок 2.3 – Трехмерная модель оснастки (а) с разбиением на конечные элементы для изготовления рифлей на внутренней поверхности металлической оболочки: 1 – заготовка, 2 – контейнер, 3 – рабочая оправка; б – изображения клинового спирального выступа укрупненно

Инструмент считался абсолютно жестким, заготовка принималась подвижной, нижний инструмент (контейнер) – неподвижным, верхний инструмент (рабочая оправка) имел возможность только продольного перемещения с постоянной скоростью 1 мм/с. Во время формоизменения заготовка поворачивалась под действием создаваемого крутящего момента. При разбиении инструмента и заготовки на конечные элементы использовались стандартные (по умолчанию) характеристики сетки, за исключением множителя адаптации, который для объектов составлял 3,5, что уменьшало размеры конечных элементов. Максимальный внешний и внутренний угол ребра сетки составлял  $151^\circ$ , коэффициент разгонки – 1,5. При

расчете учитывались также инерционные и весовые параметры рассматриваемых объектов. Стоит отметить, что на каждом шаге расчета составлялось уравнение равновесия для исходной геометрии, а шаг расчета определялся автоматически исходя из максимального приращения деформации (составлял 0,1) или времени (0,5 с).

Трение между заготовкой и инструментом выбиралось из встроенной библиотеки QForm и коэффициент трения Кулона составлял 0,05. На границах заготовка-корпус трение отсутствовало, что является допущением для данного моделирования. Оно обусловлено тем, что в реальном процессе рабочая оправка, установленная на подшипниках, вращается под действием формоизменяющих сил, а заготовка и корпус – нет. В моделировании же рабочая оправка не имеет возможности вращения и происходит вращение заготовки относительно инструментов, и для снижения фактора вращения заготовки было установлено отсутствие трения при контакте заготовки с корпусом.

Процесс рифления моделировался на заготовке из стали 10 с внутренним диаметром 110,7 мм, высотой 50 мм, толщиной стенки 3,55 мм. Число рифлей – 28 шт., с углом подъема –  $30^\circ$ , углом при вершине рифли  $60^\circ$ . Модель получаемого изделия приведена на рисунке 2.4.

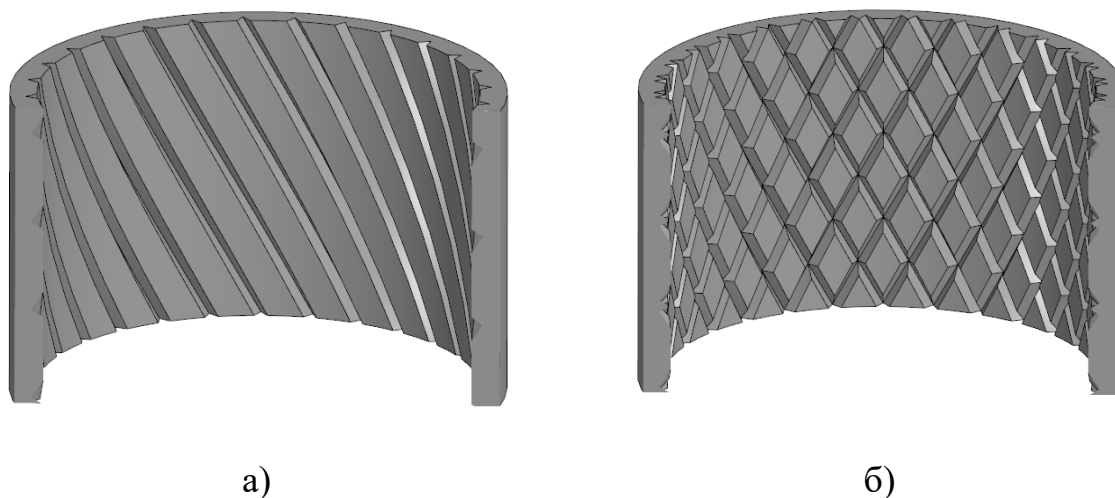


Рисунок 2.4 – Трехмерная модель детали с рифлями (а) и сеткой рифлей (б)

Влияние скорости деформации, величины деформации и температуры на сопротивление деформации материала учитывались в зависимости на основе табличных функций, которые заложены в библиотеке материалов программы QForm. Для стали 10 эти зависимости приведены на рис. 2.5.

В каждой точке заготовки во время формоизменения рассчитываются величина деформаций и их скорость, после чего на основе этих данных и значения температуры в рассматриваемой области определяется сопротивление деформации.

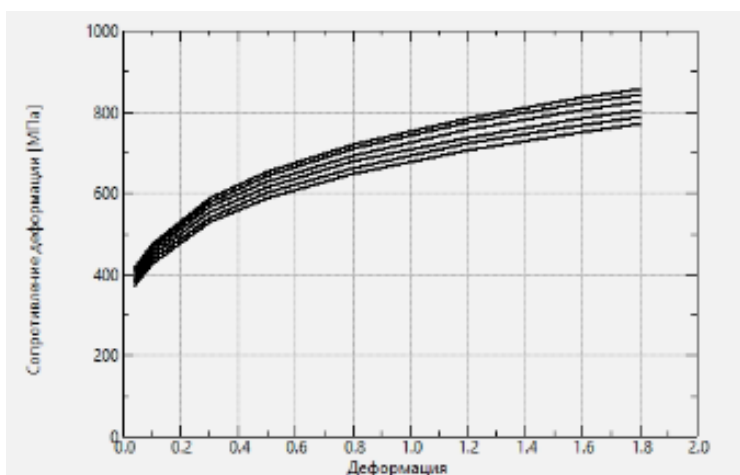


Рисунок 2.5 – Сопротивление деформации материала при разной скорости деформации: 0,01, 0,1, 1, 10, 100, 500 (1/с)

В ходе предварительных компьютерных моделирований было установлено, что напряженно-деформированное состояние, повреждаемость материала не зависят от числа формируемых рифлей ввиду отсутствия влияния рифлей на соседние рифли, что объясняется достаточным расстоянием между ними. Таким образом, количество рифлей влияет только на силу формоизменения и съема. Установлено, что увеличение числа рифлей прямо пропорционально увеличивает силу. Поэтому для увеличения скорости расчетов были проведены моделирования при получении 8 рифлей, а не 28, и усилие формоизменения соответственно умножалось в 3,5 раза.

Глубина внедрения выступов рабочей оправки составила 1, 1,3 и 1,6 мм. При этом высота выступов на рабочей оправке равнялась глубине внедрения или была больше глубины внедрения на 0,15, 0,3 и 0,45 мм, в результате чего соответственно обеспечивался зазор  $Z$  (рис. 2.6) между внутренней поверхностью заготовки и основной поверхностью рабочей оправки на величину 0, 0,15, 0,3 и 0,45 мм.

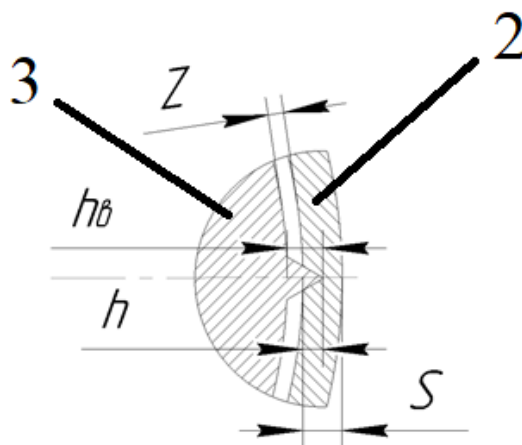


Рисунок 2.6 – Зазор между заготовкой (2) и рабочей оправкой (3)

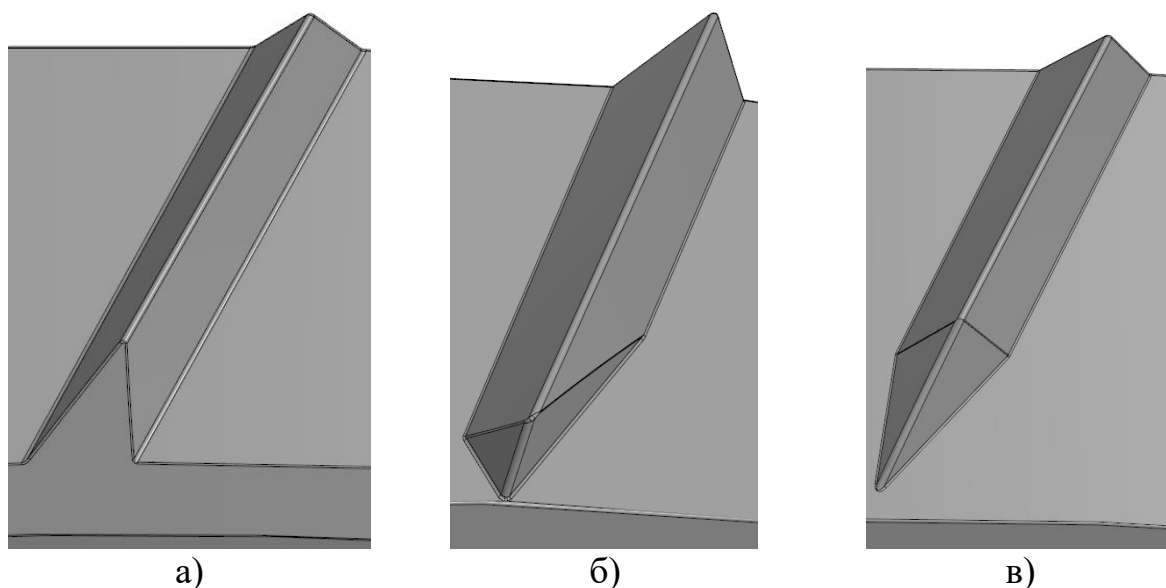
Моделирование проводилось в 4 этапа:

- 1 – Рифление одного направления;
- 2 – Съем полуфабриката;
- 3 – Рифление встречного направления;
- 4 – Съем изделия с рифленой внутренней поверхности.

## 2.3 Влияние геометрии инструмента на качество рифлей

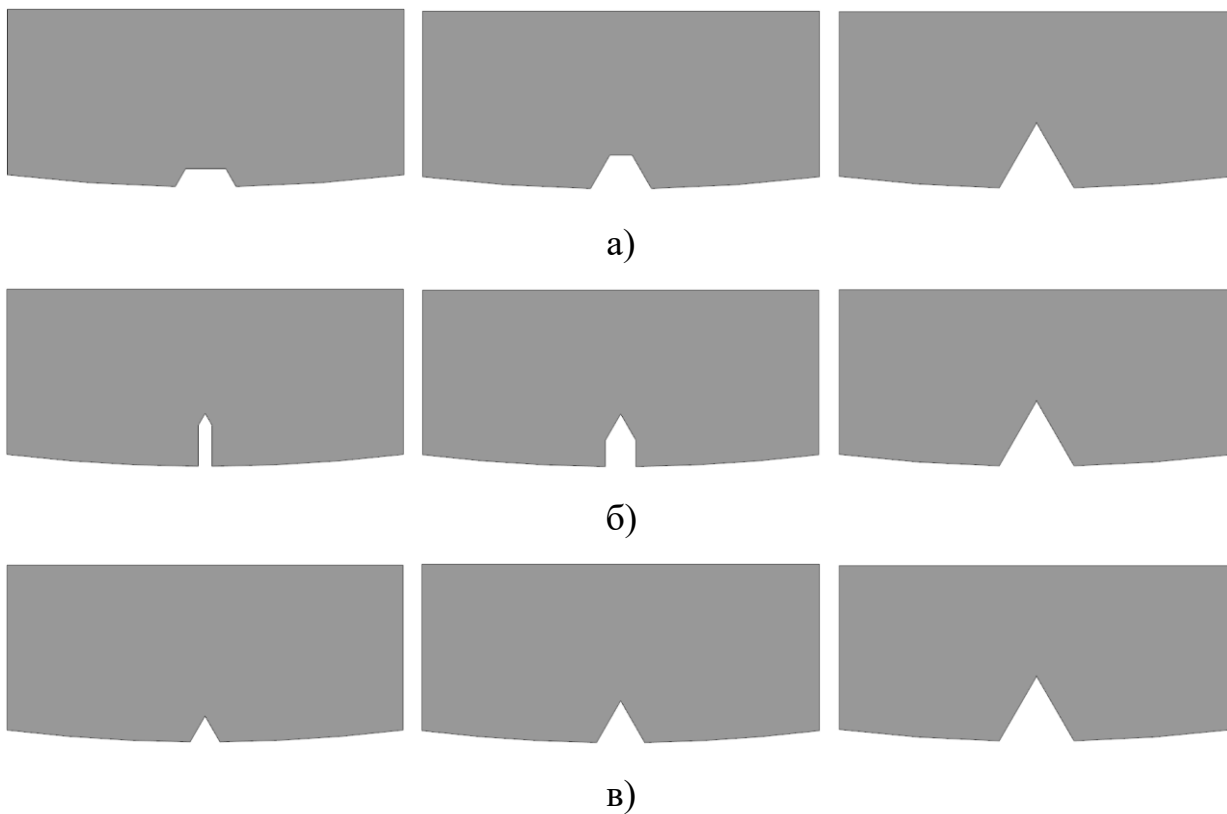
Были выбраны 3 рабочие оправки, которые отличаются формой заходной части спиральных клиновых выступов, то есть теми частями выступов, которыми начинается формоизменение. Рабочая оправка типа I (рис. 2.7, а) имеет плоскую заходную часть с углом  $45^\circ$  к торцевой поверхности заготовки; тип II (рис. 2.7, б) обладает клиновой формой, с ребром параллельным торцевой поверхности рабочей оправки; тип III (рис. 2.7, в)

выполнен с ребром, расположенным под углом относительно торцевой поверхности рабочей оправки. Высота рабочей оправки составляла 10 мм.



а)  
б)  
в)  
Рисунок 2.7 – Фрагмент выступов рабочей оправки: а – тип I, б – тип II, в – тип III

Поэтапный процесс внедрения спиральных клиновых выступов приведен на рисунке 2.8.



а)  
б)  
в)  
Рисунок 2.8 – Стадии внедрения выступов рабочих оправок в заготовку, при разных типах заходных частей: а – тип I, б – тип II, в – тип III

Рабочая оправка типа I формирует треугольную рифлю из трапеции, тип II – из прямоугольной фигуры с острым концом, тип III – из треугольника, который постепенно увеличивает длины сторон.

Первым этапом анализа полученных компьютерным моделированием данных является оценка формы изделия при рифлении всеми типами рабочих оправок на разную глубину при различном зазоре  $Z$ .

Визуальный анализ полученных трехмерных компьютерных моделей показал, что при рифлении оправкой типа I на любую глубину при зазоре  $Z$ , равном 0,15, 0,3 и 0,45, наблюдается фронтальный и боковой наплыв материала (рис. 2.9).

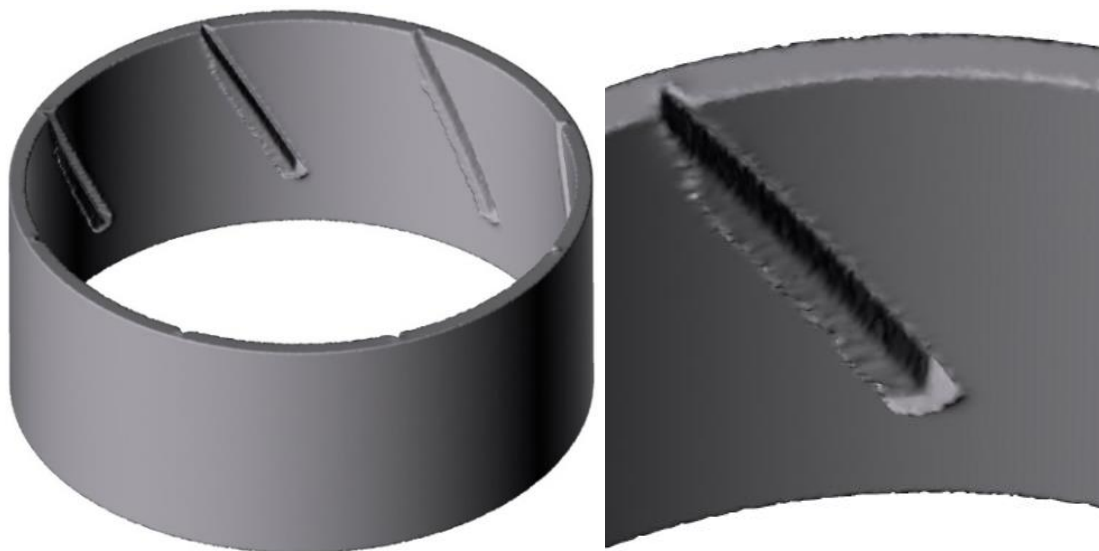


Рисунок 2.9 – Боковой и фронтальный наплыв материала при рифлении рабочей оправкой типа I при зазоре  $Z = 0,45$  мм

Также установлено, что фронтальный наплыв наблюдается при рифлении любым типом рабочих оправок на любую глубину при зазоре  $Z = 0$  (рис. 2.10).



Рисунок 2.10 – Фронтальный наплыв материала при рифлении рабочей оправкой типа III при зазоре  $Z = 0$  мм

При рифлении рабочей оправкой типа II и III с зазором  $Z > 0$  мм значительных наплывов или иных дефектов не наблюдается.

В итоге была составлена сводная таблица, в которой указано, были ли выявлены дефекты заготовки или инструмента (табл. 2.1).

Таблица 2.1 – Сводная таблица наличия фронтального наплыва

| Тип     | Зазор<br>$Z$ , мм | Глубина<br>внедрения 1 мм | Глубина<br>внедрения 1,3 мм | Глубина<br>внедрения 1,6 мм |
|---------|-------------------|---------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
|         |                   | Дефект                    |                             |                             |
| Тип I   | 0                 | наплыв металла            | наплыв металла              | наплыв металла              |
|         | 0,15              | наплыв металла            | наплыв металла              | наплыв металла              |
|         | 0,30              | наплыв металла            | наплыв металла              | наплыв металла              |
|         | 0,45              | наплыв металла            | наплыв металла              | наплыв металла              |
| Тип II  | 0                 | наплыв металла            | наплыв металла              | наплыв металла              |
|         | 0,15              | не выявлено               | не выявлено                 | не выявлено                 |
|         | 0,30              | не выявлено               | не выявлено                 | не выявлено                 |
|         | 0,45              | не выявлено               | не выявлено                 | не выявлено                 |
| Тип III | 0                 | наплыв металла            | наплыв металла              | наплыв металла              |
|         | 0,15              | не выявлено               | не выявлено                 | не выявлено                 |
|         | 0,30              | не выявлено               | не выявлено                 | не выявлено                 |
|         | 0,45              | не выявлено               | не выявлено                 | не выявлено                 |

Таким образом, рациональным является применение оправки типов II и III с зазором  $Z > 0$  мм, так как они обеспечивают лучшее качество рифленой поверхности изделия.

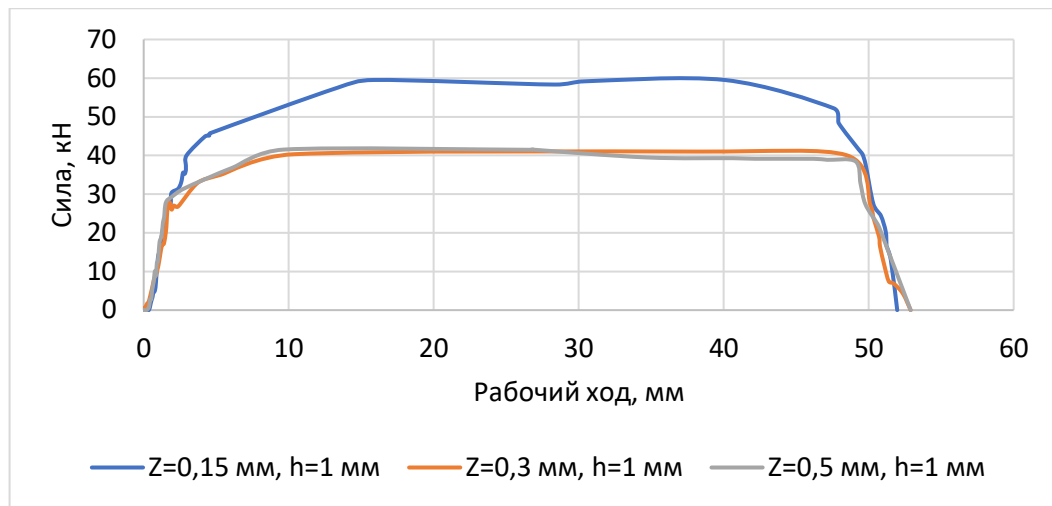
## 2.4 Анализ силовых характеристик

Далее было проведено сравнение сил рифления внутренней поверхности оболочки на первой технологической операции для рабочих оправок типа II и III с зазором  $Z > 0$  и всех рассматриваемых глубин внедрения (табл. 2.2)

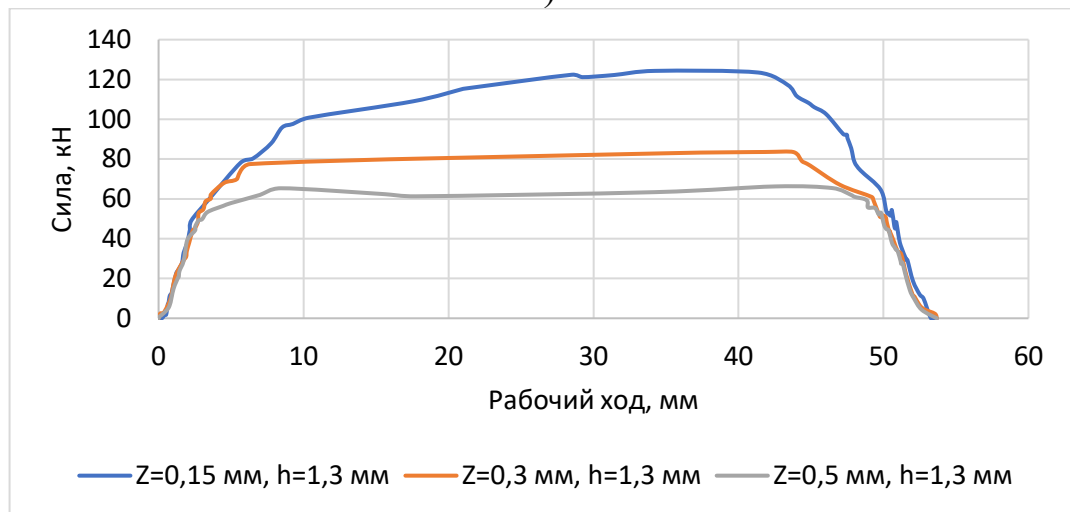
Таблица 2.2 – Максимальные технологические силы рифлений

| Тип     | Зазор<br>$Z$ , мм | Глубина<br>внедрения 1 мм | Глубина<br>внедрения 1,3 мм | Глубина<br>внедрения 1,6 мм |
|---------|-------------------|---------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
|         |                   | Технологическая сила, кН  |                             |                             |
| Тип II  | 0,15              | 63                        | 157,5                       | 210                         |
|         | 0,30              | 48                        | 140                         | 168                         |
|         | 0,45              | 40,25                     | 136,5                       | 147                         |
| Тип III | 0,15              | 59,5                      | 126                         | 197,1                       |
|         | 0,30              | 42,35                     | 83,1                        | 125                         |
|         | 0,45              | 42                        | 66,5                        | 105                         |

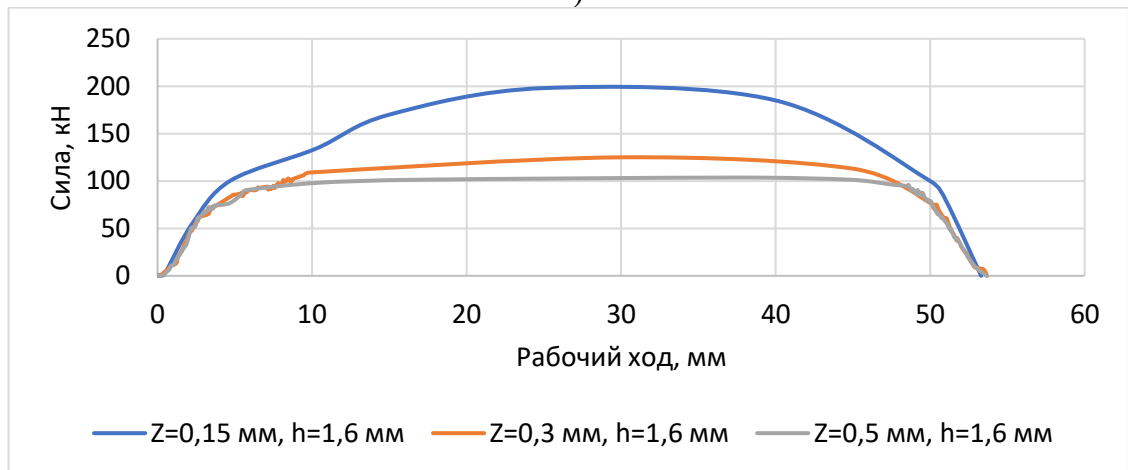
На рисунке 2.11 приведены графики сил рифления для оправки типа III.



а)



б)



в)

Рисунок 2.11 – График технологической силы рифления для оправки типа III:  
а – при глубине внедрения 1 мм, б – при глубине внедрения 1,3 мм,  
в – при глубине внедрения 1,6 мм

Была определена технологическая сила рифления, которая приходится на 1 спиральный клиновой выступ при рифлении (табл. 2.3).

Таблица 2.3 – Сила рифления на 1 выступ

| Тип     | Зазор<br>Z, мм | Глубина<br>внедрения 1 мм | Глубина<br>внедрения 1,3 мм | Глубина<br>внедрения 1,6 мм |
|---------|----------------|---------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
|         |                | Технологическая сила, кН  |                             |                             |
| Тип II  | 0,15           | 2,25                      | 5,63                        | 7,5                         |
|         | 0,30           | 1,714                     | 5                           | 6                           |
|         | 0,45           | 1,43                      | 4,875                       | 5,25                        |
| Тип III | 0,15           | 2,13                      | 4,5                         | 7,04                        |
|         | 0,30           | 1,513                     | 2,97                        | 4,47                        |
|         | 0,45           | 1,5                       | 2,38                        | 3,75                        |

Установлено, что технологическая сила меньше при рифлении оправкой типа III относительно оправки типа II для всех величин зазоров и глубин внедрения.

Так как наименьшая сила наблюдается для оправки типа III, дальнейшие исследования будут проводиться только для нее.

С увеличением глубины рифления оправкой типа III с 1 мм до 1,6 мм увеличивается технологическая сила формоизменения на 250% с 42 кН до 105 кН. С увеличением зазора сила рифления оправкой типа III снижается для глубин внедрения 1,3 и 1,6 мм почти в 2 раза, при глубине внедрения 1 мм сила уменьшается на 30%.

После процесса рифления происходит съем полуфабриката с рабочей оправки, при этом осуществляется обратный ход рабочей оправки и свинчивание рифленого полуфабриката при его упоре в съемник.

Была определена технологическая сила при съеме для оправки типа III (таблица 2.4), при этом для остальных оправок съем не рассчитывался в связи с низким качеством получаемого изделия или более высокими силами формоизменения.

Таблица 2.4 – Максимальные технологические силы съема

| Тип     | Зазор<br>Z, мм | Глубина<br>внедрения 1 мм | Глубина<br>внедрения 1,3 мм | Глубина<br>внедрения 1,6 мм |
|---------|----------------|---------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
|         |                | Технологическая сила, кН  |                             |                             |
| Тип III | 0,15           | 28                        | 56                          | 79                          |
|         | 0,30           | 17,5                      | 35                          | 43                          |
|         | 0,45           | 15,75                     | 21                          | 35                          |

Установлено, что с увеличением глубины рифления при всех зазорах сила съема увеличивается. Так, увеличение глубины внедрения с 1 до 1,6 мм приводит к повышению силы при зазорах 0,3 и 0,45 мм примерно на 250%.

## **2.5 Вторичные математические модели процесса получения изделия с внутренним рифлением**

При разработке технологического процесса изготовления изделий подобного типа требуется установить базовые регрессионные модели, которые ориентировочно описывают силовые характеристики процесса.

Для решения этой задачи целесообразно применять методы математической статистики и принципы планирования многофакторных экспериментов, опираясь на данные численного моделирования процесса с учетом различных комбинаций геометрических параметров инструмента и глубины формируемых рифлей.

При моделировании процесса использовалась заготовка из стали 10 внутренним диаметром 110,7 мм, высотой 50 мм, толщиной стенки 3,55 мм. Число выступов на инструменте 28, угол подъема 30°, угол при вершине 60°. Глубина внедрения выступов рабочей оправки в заготовку составляла 1 мм, 1,3 мм, 1,6 мм при обеспечении зазора между оправкой и заготовкой 0,15 мм, 0,3 мм, 0,45 мм.

Таким образом, в качестве основных факторов, определяющих процесс формирования сетки рифлей на внутренней поверхности оболочек, были

выбраны следующие параметры: зазор между внутренней поверхностью заготовки и основной поверхностью рабочей оправки –  $Z$ ; глубина внедрения выступов рабочей оправки –  $h$ .

В качестве выходных параметров (функции отклика), характеризующих данный процесс, были приняты:

- максимальная технологическая сила рифлений –  $P$ ;
- сила рифления на один выступ –  $P_B$ ;
- максимальная технологическая сила съема –  $P_{max}$ .

Для описания вышеперечисленных зависимостей использовалась полиномиальная модель второго порядка (2.1):

$$y_1 = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_{12}x_1x_2 + b_{11}x_1^2 + b_{22}x_2^2, \quad (2.1)$$

где  $y_1$  – значение выходного параметра (функции отклика);  $b_0$ ,  $b_i$ ,  $b_{ii}$  – коэффициенты регрессии;  $x_i$ ,  $x_j$  – кодированные значения входных факторов.

В таблице 2.5 приведены уровни и интервалы варьирования основных факторов.

Таблица 2.5 - Уровни факторов и интервалы их варьирования

| Наименование фактора  | Натуральное значение фактора: $Z$ | Кодированное значение фактора: $x_1$ | Натуральное значение фактора: $h$ | Кодированное значение фактора: $x_2$ |
|-----------------------|-----------------------------------|--------------------------------------|-----------------------------------|--------------------------------------|
| Область эксперимента  |                                   |                                      |                                   |                                      |
| Основной уровень      | 0,30                              | 0                                    | 1,3                               | 0                                    |
| Интервал варьирования | 0,15                              | 1                                    | 0,3                               | 1                                    |
| Нижний уровень        | 0,15                              | -1                                   | 1,0                               | -1                                   |
| Верхний уровень       | 0,45                              | +1                                   | 1,6                               | +1                                   |

Матрица планирования эксперимента, где -1, 0, +1 обозначены кодированные уровни рассматриваемых факторов, представлена в таблице 2.6.

Обозначим  $x_1, x_2$  кодовые значения факторов, которые связаны с действительными значениями следующими соотношениями (2.2):

$$x_1 = \frac{Z - 0,3}{0,15}, x_2 = \frac{h - 1,3}{0,3}. \quad (2.2)$$

В качестве плана эксперимента был использован двухфакторный план [72], матрица которого приведена в таблице 2.6.

Необходимые расчеты по определению коэффициентов регрессии были выполнены по программе *RAM 2\_6.exe*, разработанной на кафедре МПФ (в настоящее время МиППФ) ТулГУ.

Таблица 2.6 – Матрица планирования эксперимента

| № опыта | Z (X <sub>1</sub> ) | h (X <sub>2</sub> ) |
|---------|---------------------|---------------------|
| 1       | +1                  | +1                  |
| 2       | -1                  | +1                  |
| 3       | +1                  | -1                  |
| 4       | -1                  | -1                  |
| 5       | +1                  | 0                   |
| 6       | -1                  | 0                   |
| 7       | 0                   | +1                  |
| 8       | 0                   | -1                  |
| 9       | 0                   | 0                   |

Были получены уравнения регрессии, устанавливающие зависимости максимальной технологической силы рифления ( $P$ ) и силы рифления на один выступ ( $P_B$ ), максимальной технологической силы съема ( $P_{max}$ ) от зазора между внутренней поверхностью заготовки и основной поверхностью рабочей оправки ( $Z$ ) и глубины внедрения выступов рабочей оправки ( $h$ ), которые имеют вид:

- максимальная технологическая сила рифления:

$$P = 81,686 - 26,675x_1 + 48,028x_2 - 17,43x_1x_2 + 17,372x_1^2 + 2,7117x_2^2;$$

- сила рифления на один выступ:

$$P_B = 2,9196 - 0,95167x_1 + 1,7162x_2 - 0,62x_1x_2 + 0,62067x_1^2 + 0,097167x_2^2;$$

- максимальная технологическая сила съёма:

$$P_{max} = 33,102 - 14,233x_1 + 16,31x_2 - 7,35x_1x_2 + 8,0967x_1^2 - 1,7733x_2^2.$$

С помощью полученных уравнений регрессий были построены поверхности отклика и их сечения, отражающие зависимость максимальной технологической силы рифления (рис. 2.12), силы рифления на один выступ (рис. 2.13), максимальной технологической силы съема (рис. 2.14) от зазора между внутренней поверхностью заготовки и основной поверхностью рабочей оправки и глубины внедрения выступов рабочей оправки.

Анализ полученных результатов показал, что максимальная сила процесса реализуется в диапазоне от 40 кН до 180 кН. Наибольшее влияние на силу процесса оказывает глубина внедрения. При этом ее изменение от 1 мм до 1,6 мм увеличивает силу процесса практически в 3 раза. Влияние же зазора при малых глубинах внедрения на усилие процесса незначительно, а при наибольшей глубине внедрения увеличение зазора от 0,15 мм до 0,45 мм снижает усилие процесса практически в 2 раза.

Установлено, что на усилие съема практически в равной степени влияет как глубина внедрения, так и зазор. Так, с увеличением глубины внедрения от 1 мм до 1,6 мм усилие съема возрастает в 2 раза, а при увеличении зазора от 0,15 мм до 0,45 мм оно уменьшается также практически в 2 раза.

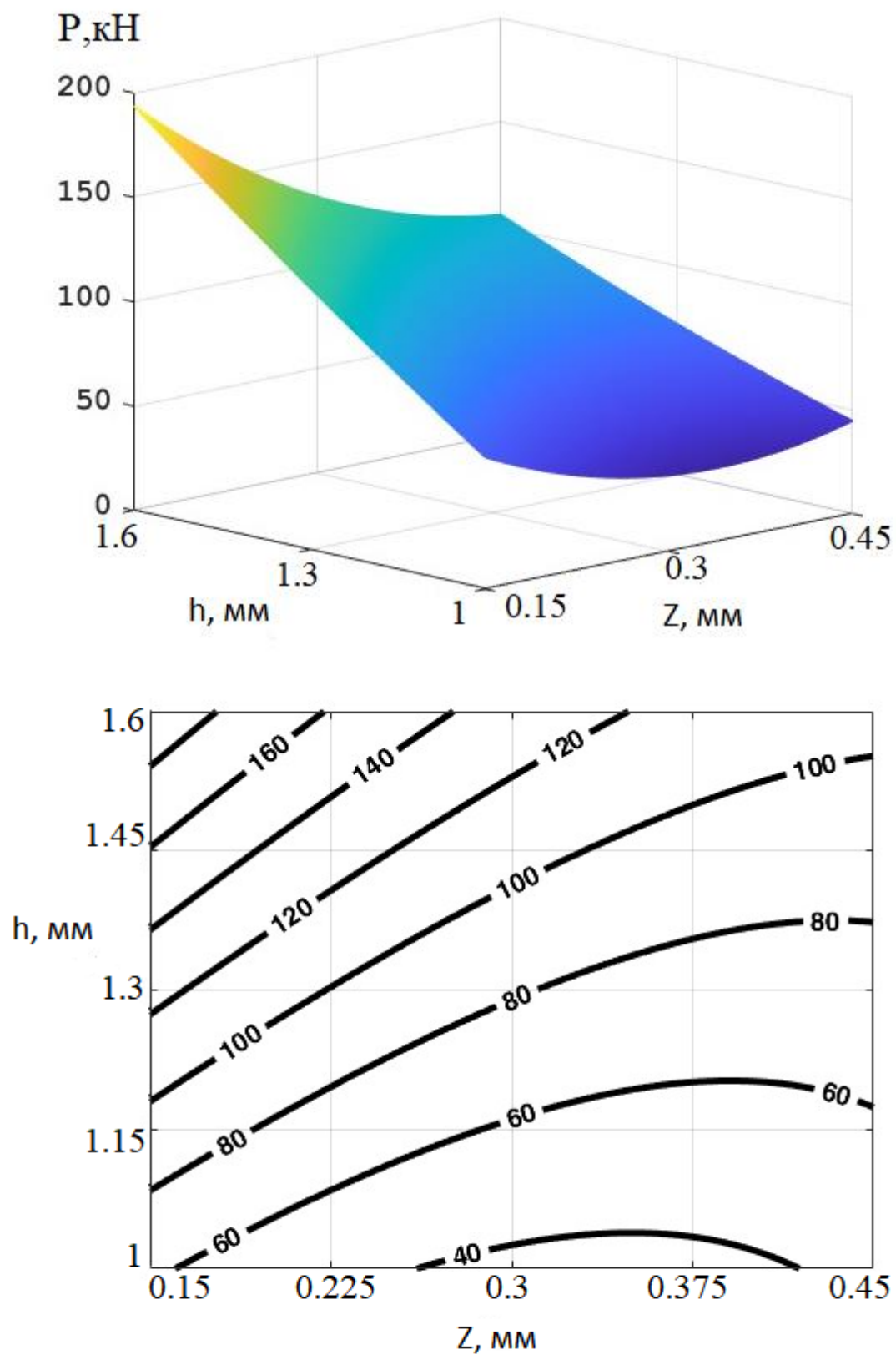


Рисунок 2.12 – Зависимость максимальной технологической силы рифления ( $P$ ) от величин ( $Z$ ,  $h$ )

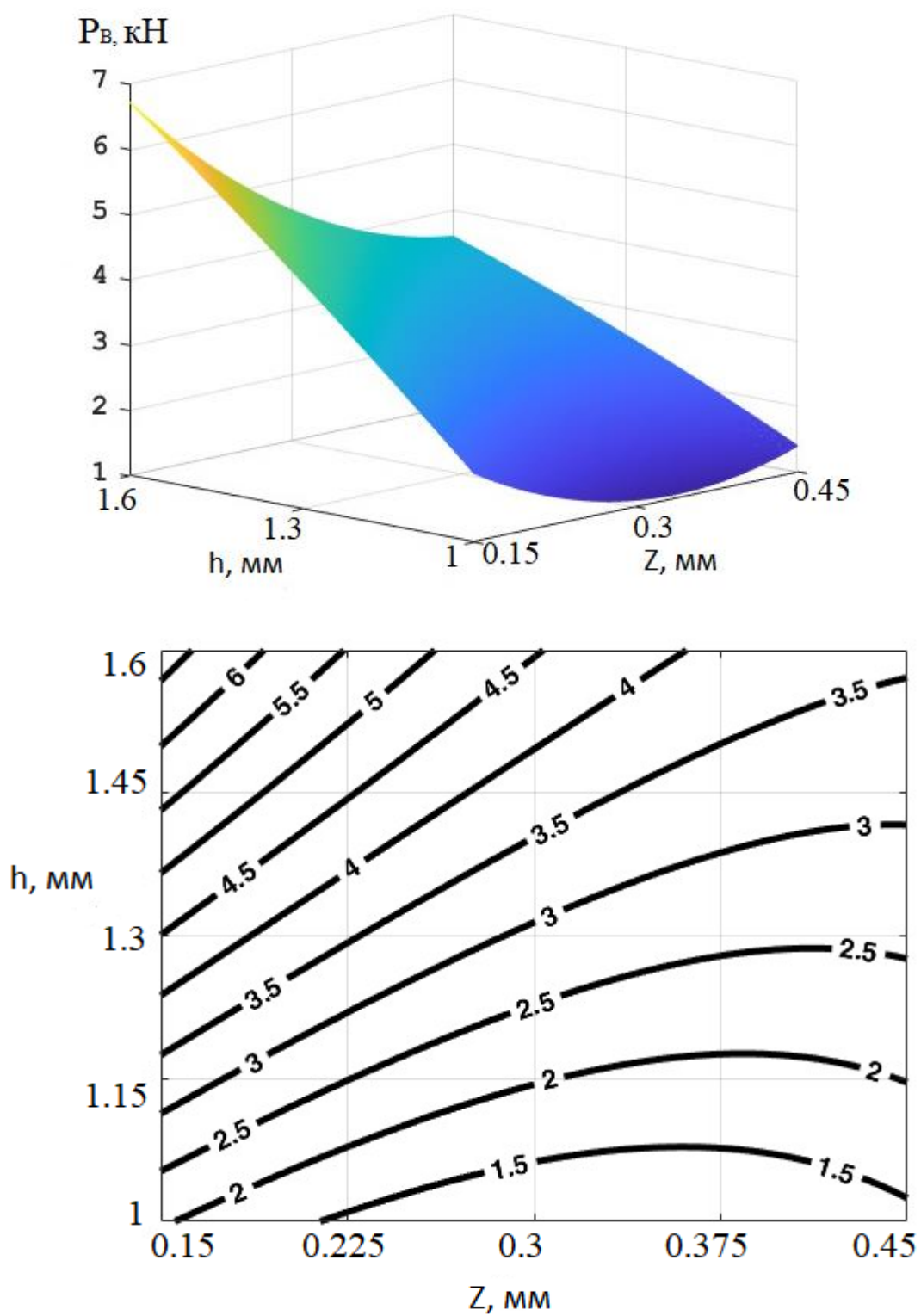


Рисунок 2.13 – Зависимость силы рифления на один выступ ( $P_B$ ) от величин ( $Z$ ,  $h$ )

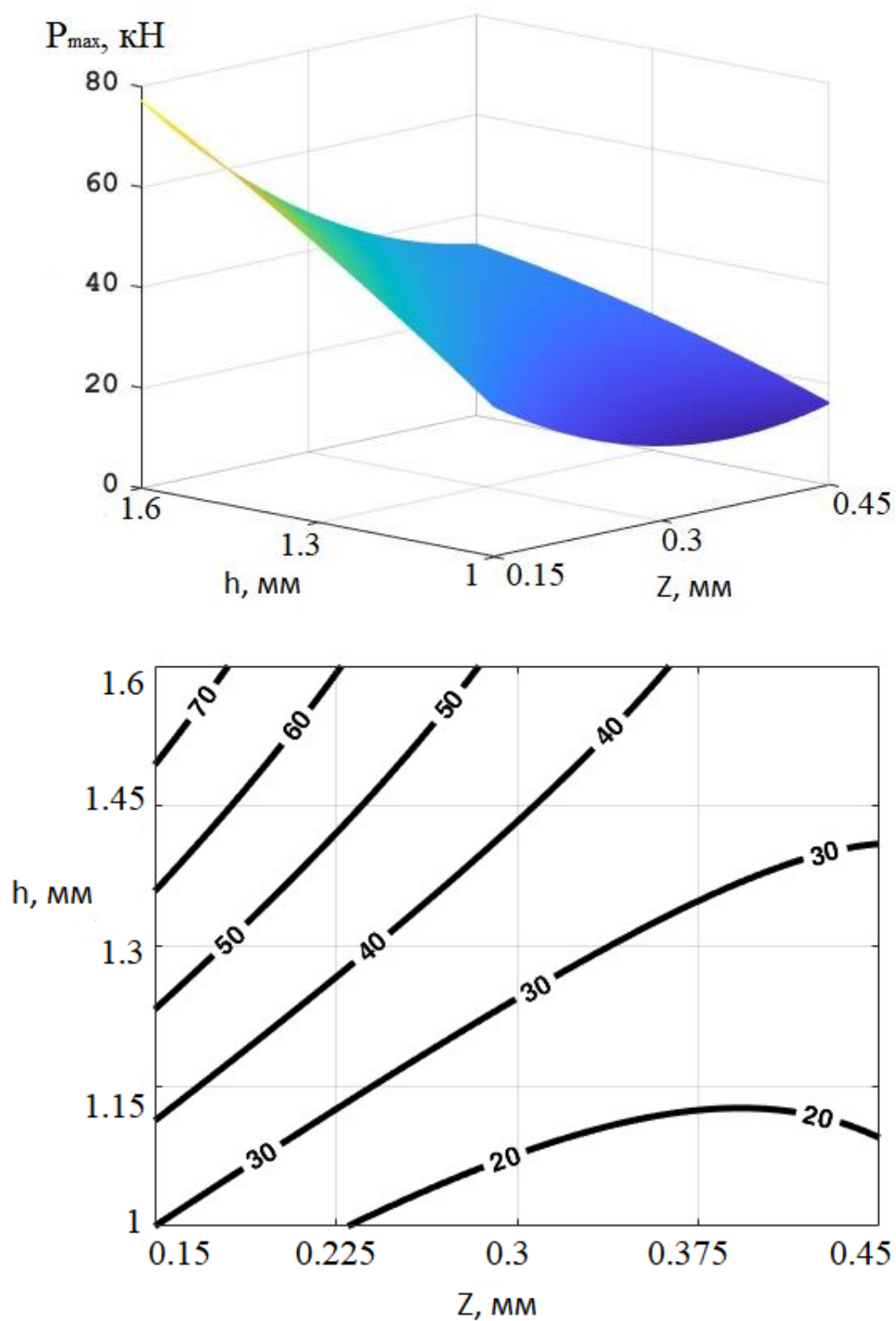


Рисунок 2.14 – Зависимость максимальной технологической силы съёма ( $P_{max}$ ) от величин ( $Z$ ,  $h$ )

Далее рассматривается влияние угла подъема спиральных рифлей на силовые параметры процесса локального формирования рифлей на внутренней поверхности оболочек.

При моделировании процесса использовались аналогичные условия и конфигурации инструмента. Таким образом, в качестве основных факторов, определяющих процесс формирования сетки рифлей на внутренней поверхности оболочек, были выбраны следующие параметры: зазор между внутренней поверхностью заготовки и основной поверхностью рабочей оправки –  $Z$ ; глубина внедрения выступов рабочей оправки –  $h$ ; угол наклона рифли –  $\alpha$ .

В качестве выходных параметров (функции отклика) была принята сила рифления на один выступ –  $P_B$ .

Для описания вышеперечисленных зависимостей использовалась полиномиальная модель второго порядка:

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{12}x_1x_2 + b_{23}x_2x_3 + b_{13}x_1x_3 + b_{11}x_1^2 + b_{22}x_2^2 + b_{33}x_3^2, \quad (2.3)$$

где  $y$  – значение выходного параметра (функции отклика);  $b_0$ ,  $b_i$ ,  $b_{ii}$ ,  $b_{ij}$  – коэффициенты регрессии;  $x_i$ ,  $x_j$  – кодированные значения входных факторов.

В таблице 2.7 приведены уровни и интервалы варьирования основных факторов.

Таблица 2.7 - Уровни факторов и интервалы их варьирования

| Наименование фактора  | Натуральное значение фактора: $Z$ | Кодированное значение фактора: $x_1$ | Натуральное значение фактора: $h$ | Кодированное значение фактора: $x_2$ | Натуральное значение фактора: $\alpha$ | Кодированное значение фактора: $x_3$ |
|-----------------------|-----------------------------------|--------------------------------------|-----------------------------------|--------------------------------------|----------------------------------------|--------------------------------------|
| Область эксперимента  |                                   |                                      |                                   |                                      |                                        |                                      |
| Основной уровень      | 0,3                               | 0                                    | 1,3                               | 0                                    | 20                                     | 0                                    |
| Интервал варьирования | 0,15                              | 1                                    | 0,3                               | 1                                    | 10                                     | 1                                    |
| Нижний уровень        | 0,15                              | -1                                   | 1                                 | -1                                   | 10                                     | -1                                   |
| Верхний уровень       | 0,45                              | +1                                   | 1,6                               | +1                                   | 30                                     | +1                                   |

Обозначим  $x_1, x_2, x_3$  кодовые значения факторов, которые связаны с действительными значениями следующими соотношениями (2.4):

$$x_1 = \frac{Z - 0,3}{0,15}, x_2 = \frac{h - 1,3}{0,3}, x_3 = \frac{\alpha - 20}{10}. \quad (2.4)$$

В качестве плана эксперимента был использован трехфакторный план [72], матрица которого приведена в таблице 2.8.

Необходимые расчеты по определению коэффициентов регрессии были выполнены по программе *RAM 3\_10.exe*, разработанной на кафедре МПФ (в настоящее время МиППФ) ТулГУ.

Таблица 2.8 - Матрица планирования эксперимента

| № опыта | $x_1$ | $x_2$ | $x_3$ | $P_B$ , кН |
|---------|-------|-------|-------|------------|
| 1       | -1    | -1    | -1    | 1,536      |
| 2       | -1    | 0     | -1    | 3,179      |
| 3       | -1    | 1     | -1    | 4,93       |
| 4       | 0     | -1    | -1    | 1,375      |
| 5       | 0     | 0     | -1    | 2,5        |
| 6       | 0     | 1     | -1    | 4,32       |
| 7       | 1     | -1    | -1    | 1,357      |
| 8       | 1     | 0     | -1    | 2,25       |
| 9       | 1     | 1     | -1    | 3,5        |
| 10      | -1    | -1    | 0     | 1,625      |
| 11      | -1    | 0     | 0     | 3,25       |
| 12      | -1    | 1     | 0     | 5          |
| 13      | 0     | -1    | 0     | 1,5        |
| 14      | 0     | 0     | 0     | 2,625      |
| 15      | 0     | 1     | 0     | 4,43       |
| 16      | 1     | -1    | 0     | 1,375      |
| 17      | 1     | 0     | 0     | 2,32       |
| 18      | 1     | 1     | 0     | 3,625      |
| 19      | -1    | -1    | 1     | 2,125      |
| 20      | -1    | 0     | 1     | 4,5        |
| 21      | -1    | 1     | 1     | 7,04       |
| 22      | 0     | -1    | 1     | 1,51       |
| 23      | 0     | 0     | 1     | 2,9        |
| 24      | 0     | 1     | 1     | 4,464      |
| 25      | 1     | -1    | 1     | 1,5        |
| 26      | 1     | 0     | 1     | 2,375      |
| 27      | 1     | 1     | 1     | 3,75       |

Было получено уравнение регрессии, устанавливающее зависимости силы рифления на один выступ ( $P_B$ ) от угла подъема спиральных клиновых выступов ( $\alpha$ ) и глубины внедрения выступов рабочей оправки ( $h$ ), которое имеет вид:

$$P_B = 2,596 - 0,6185x_1 + 1,508x_2 + 0,289x_3 - 0,42x_1x_2 - 0,292x_2x_3 + 0,136x_1x_3 + 0,22x_1^2 + 0,176x_2^2 + 0,201x_3^2,$$

Качество регрессионной модели определялось по критериям Фишера и Кохрана, которые показали следующие результаты:

Критерий Фишера составил 2,15;

Критерий Кохрана составил 0,44.

Полученные значения не превышает предельно допустимые, что свидетельствует об адекватности математической модели.

С помощью полученных уравнений регрессии были построены поверхности отклика и их сечения, отражающие зависимость силы рифления на один выступ (рис. 2.15 – 2.17) от угла подъема спиральных клиновых выступов ( $\alpha$ ) и глубины внедрения выступов рабочей оправки ( $h$ ) при разных зазорах между внутренней поверхностью заготовки и основной поверхностью рабочей оправки.

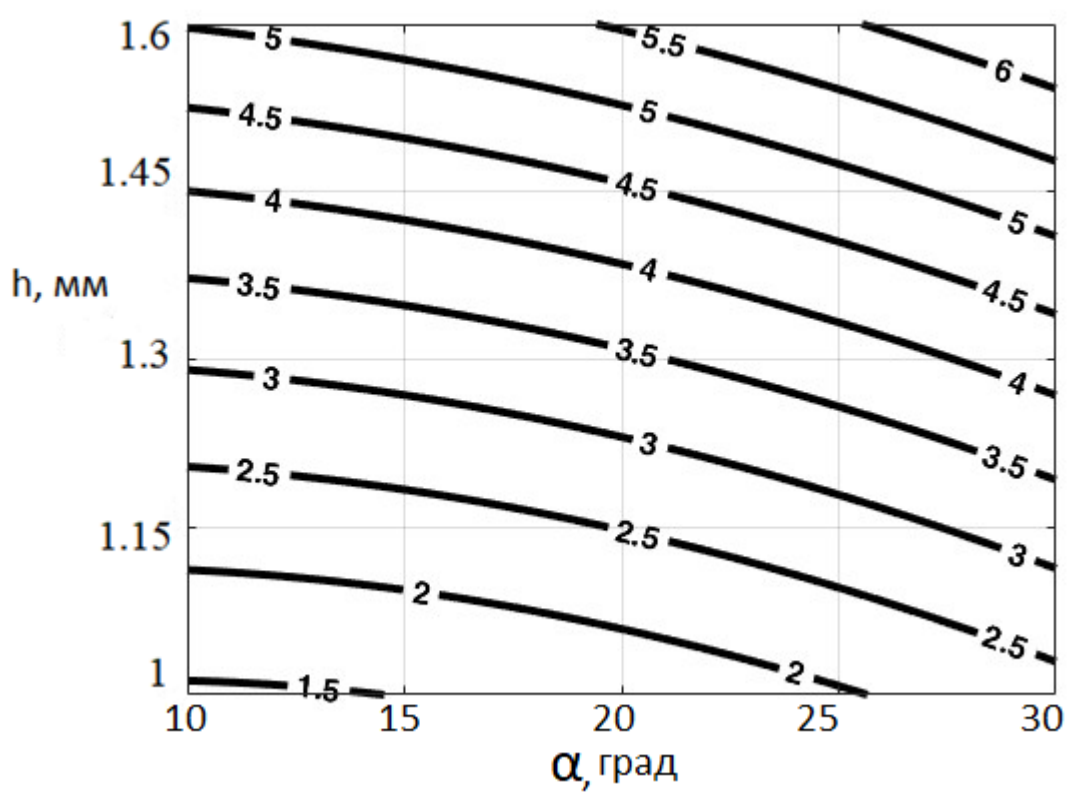
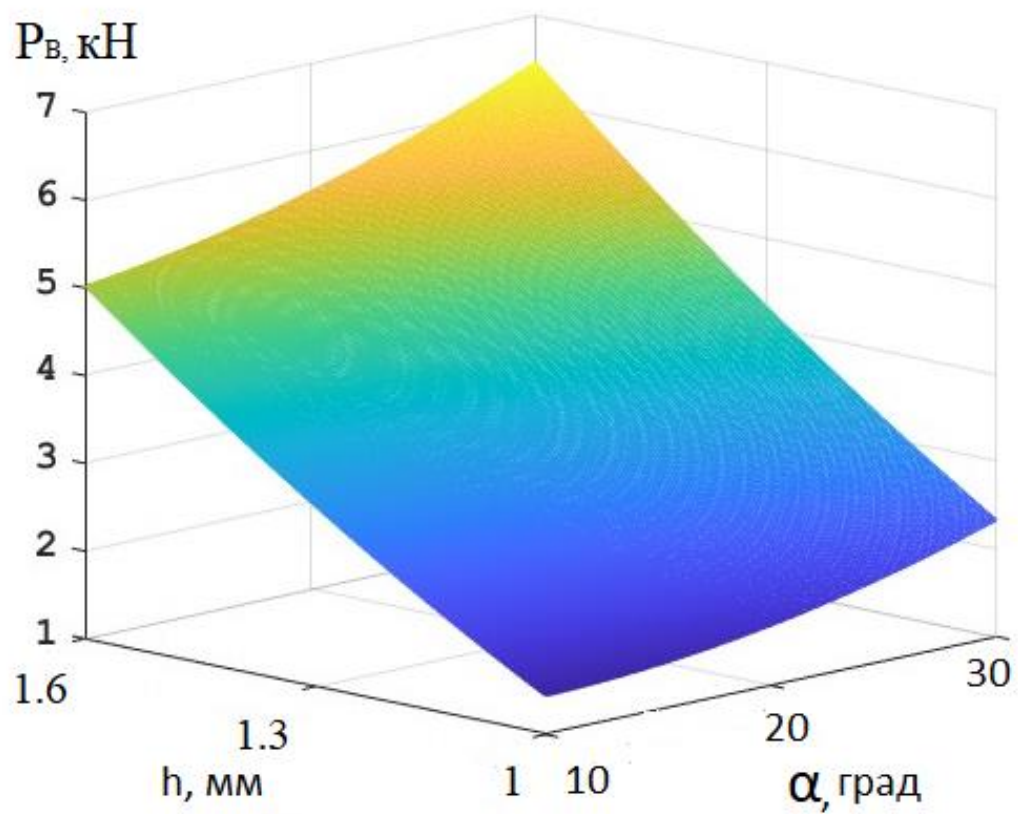


Рисунок 2.15 – Зависимость силы rifления на один выступ ( $P_B$ ) от величин ( $\alpha$ ,  $h$ ) при rifлении с зазором  $Z=0,15$  мм

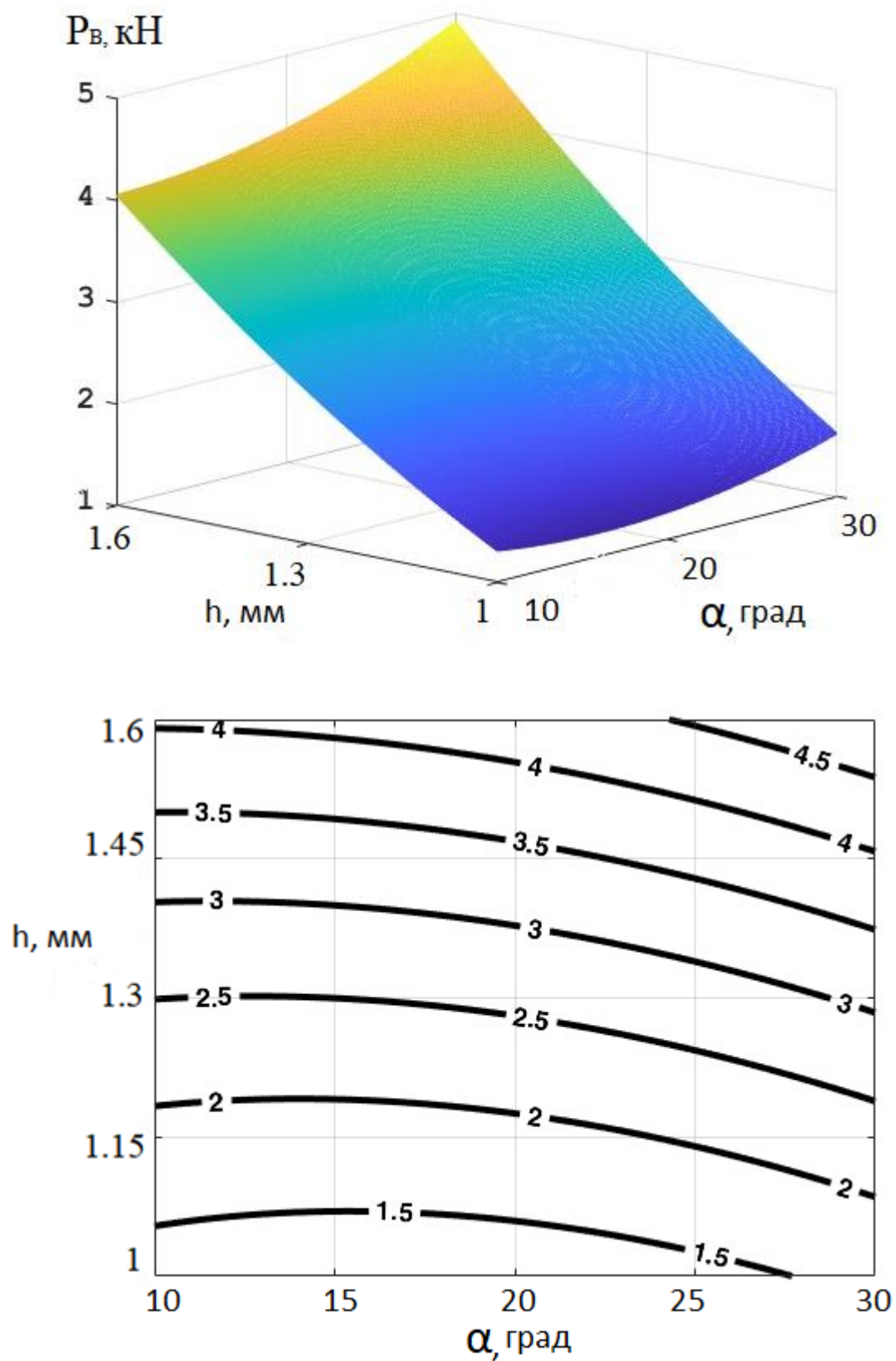


Рисунок 2.16 – Зависимость силы рифления на один выступ ( $P_B$ ) от величин ( $\alpha$ ,  $h$ ) при рифлении с зазором  $Z=0,3$  мм

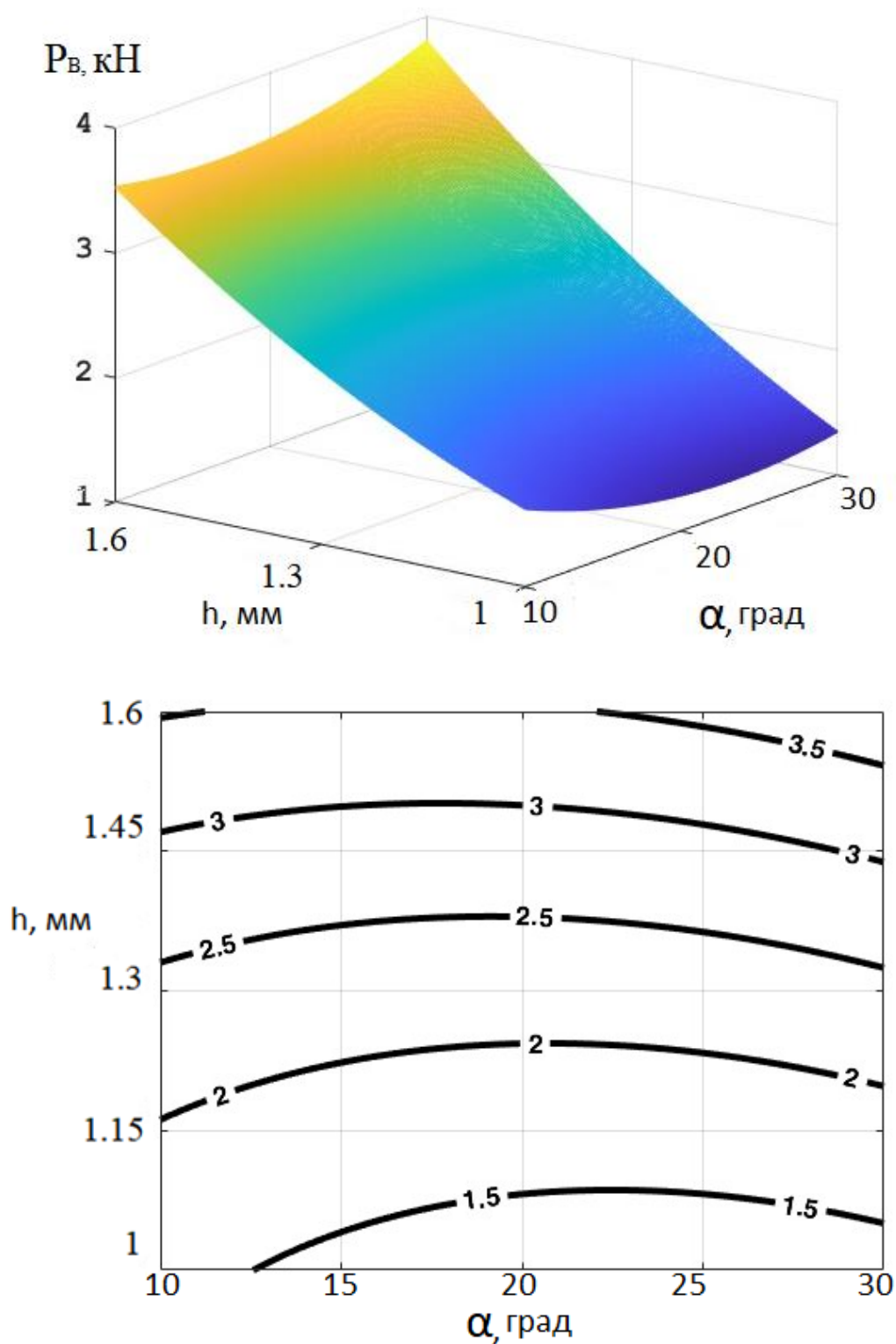


Рисунок 2.17 – Зависимость силы rifления на один выступ ( $P_B$ ) от величин ( $\alpha$ ,  $h$ ) при rifлении с зазором  $Z=0,45$  мм

Анализ полученных результатов показал, что при зазорах  $Z=0,15$  мм и  $Z=0,3$  мм с увеличением угла подъема сила увеличивается на 20-50% для всех

глубин внедрения. При зазоре  $Z=0,45$  мм угол подъема практически не влияет на силу формоизменения и зависит только от глубины внедрения.

## **2.6 Анализ напряженно-деформированного состояния**

Помимо технологической силы, при рифлении в обработке металлов давлением в целом важной характеристикой является исследование напряженно-деформированного состояния. Основными параметрами, характеризующими состояние материала в данном случае, являются интенсивность деформаций и средние напряжения в полуфабрикате в зоне формируемой рифли.

На рисунке 2.18 приведены схемы распределения интенсивности деформаций при глубине рифлей 1 мм, на рисунке 2.19 – схемы распределения интенсивности деформаций при глубине рифлей 1,3 мм, на рисунке 2.20 – при глубине рифлей 1,6 мм.

На рисунке 2.21 приведены схемы распределения средних напряжений при глубине рифлей 1 мм, на рисунке 2.22 – схемы распределения средних напряжений при глубине рифлей 1,3 мм, на рисунке 2.23 – при глубине рифлей 1,6 мм. При этом напряженно-деформированное состояние исследуется как по всему объему полуфабриката, так и в зоне сечения формируемой рифли. Оценка этих параметров проводится в меридиональном сечении посередине заготовки в очаге деформаций.

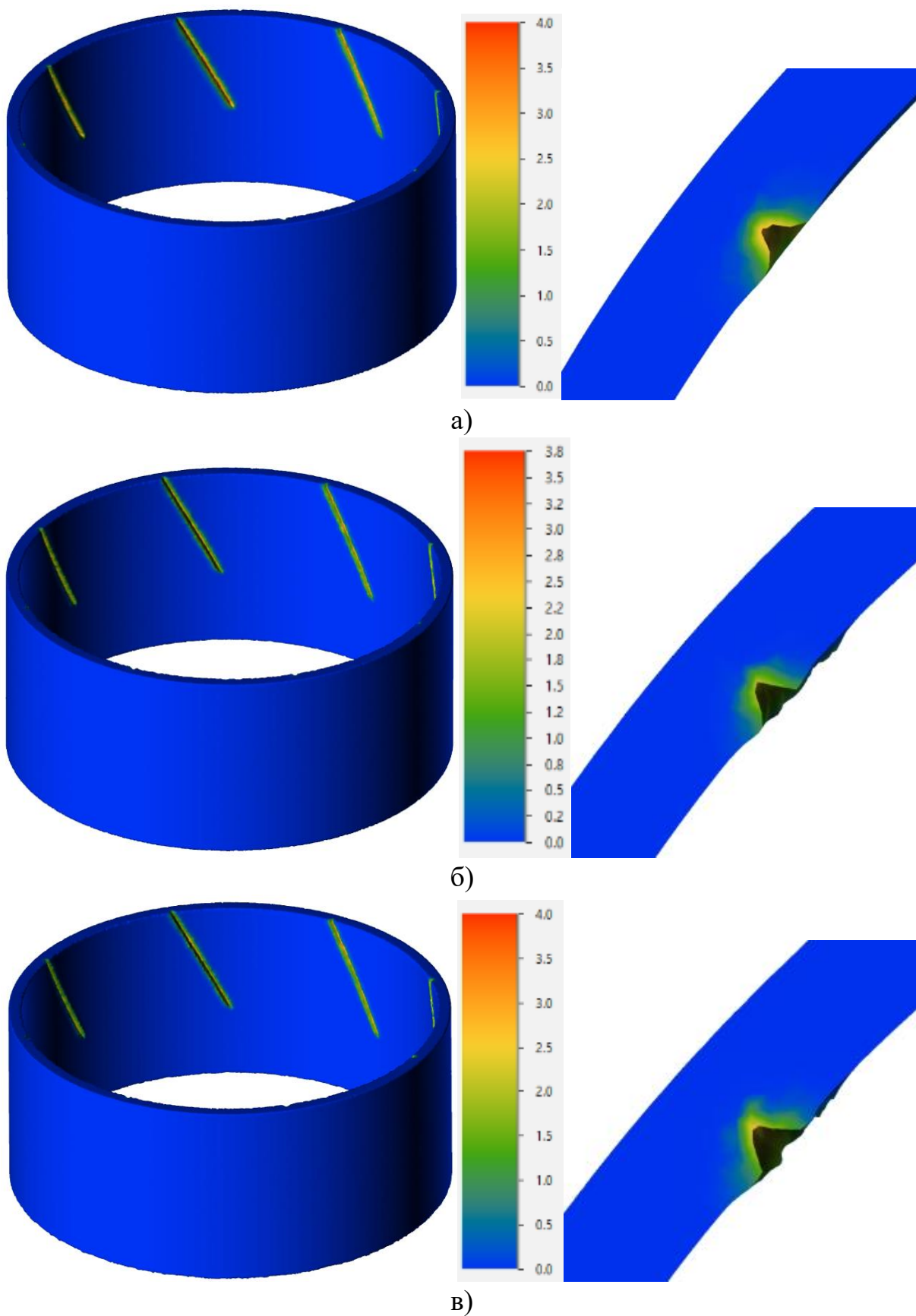


Рисунок 2.18 – Интенсивность деформаций при рифлении на глубину 1 мм:  
а – при зазоре  $Z = 0,15$  мм; б – при зазоре  $Z = 0,3$  мм;  
в – при зазоре  $Z = 0,45$  мм

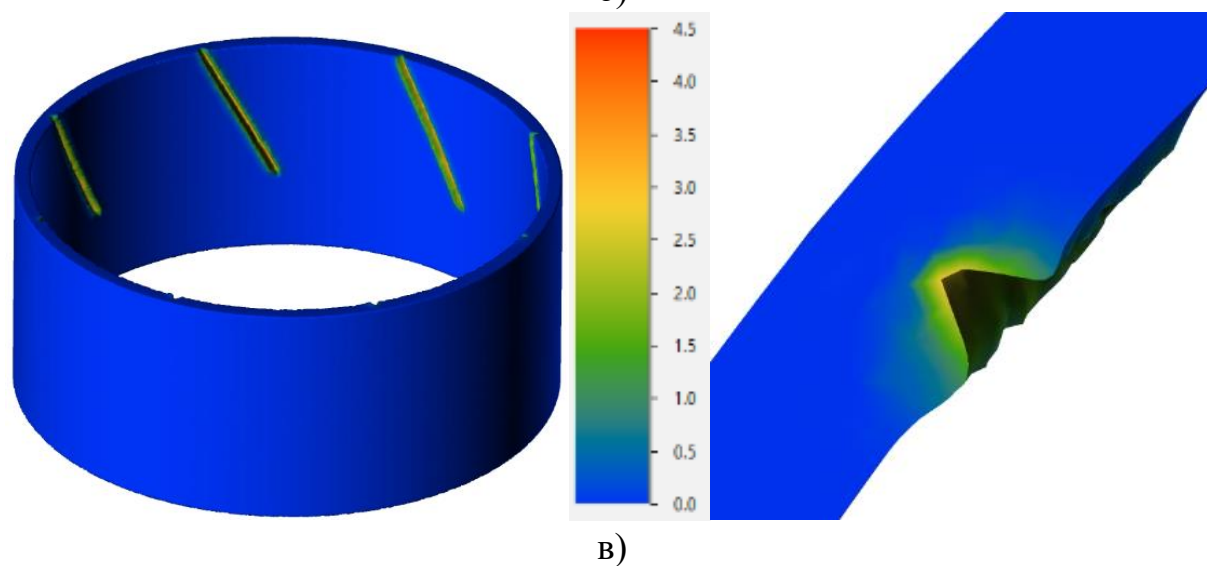
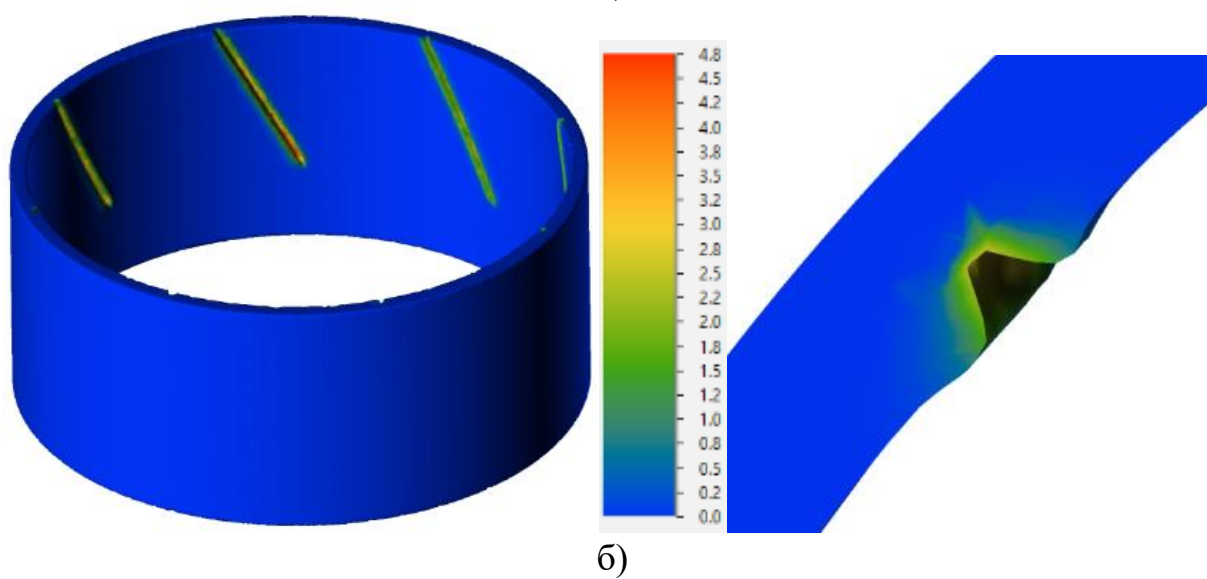
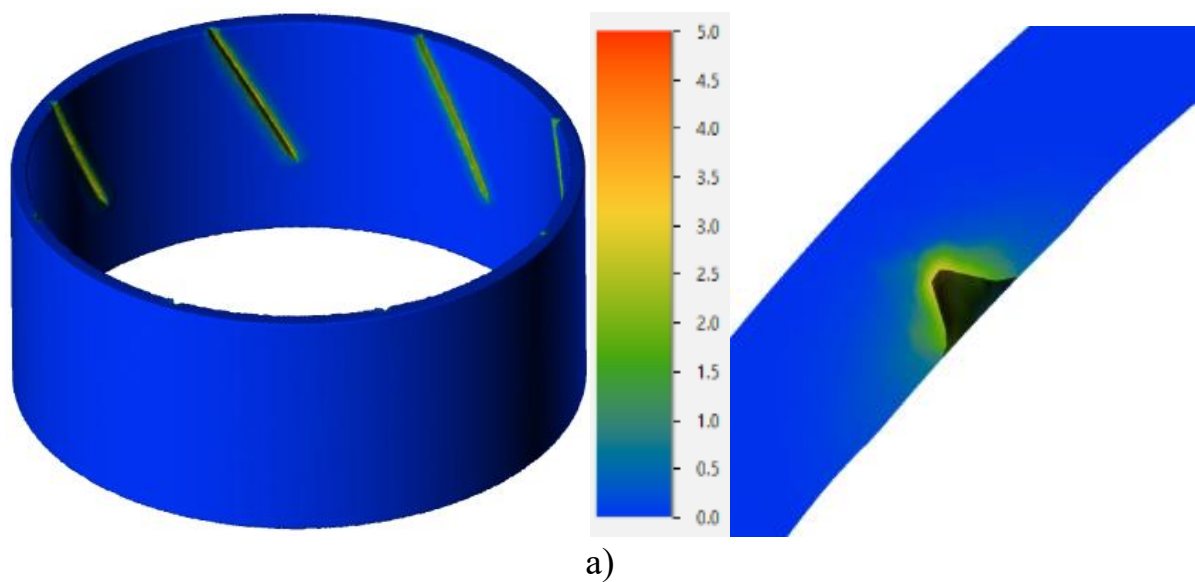


Рисунок 2.19 – Интенсивность деформаций на глубину 1,3 мм: а при зазоре  $Z = 0,15$  мм; б – при зазоре  $Z = 0,3$  мм; в – при зазоре  $Z = 0,45$  мм

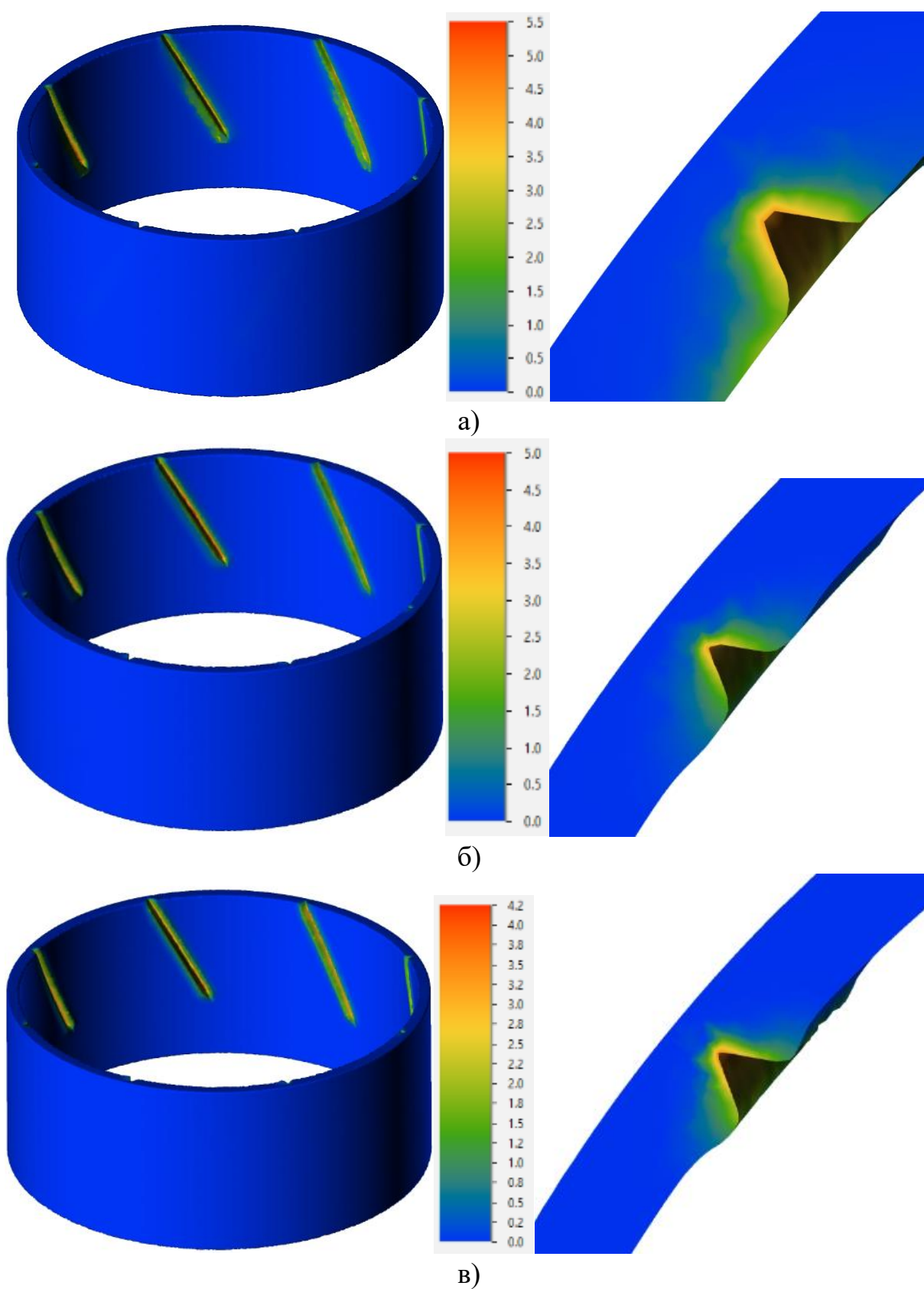


Рисунок 2.20 – Интенсивность деформаций при рифлении на глубину 1,6 мм:  
а – при зазоре  $Z = 0,15$  мм; б – при зазоре  $Z = 0,3$  мм;  
в – при зазоре  $Z = 0,45$  мм

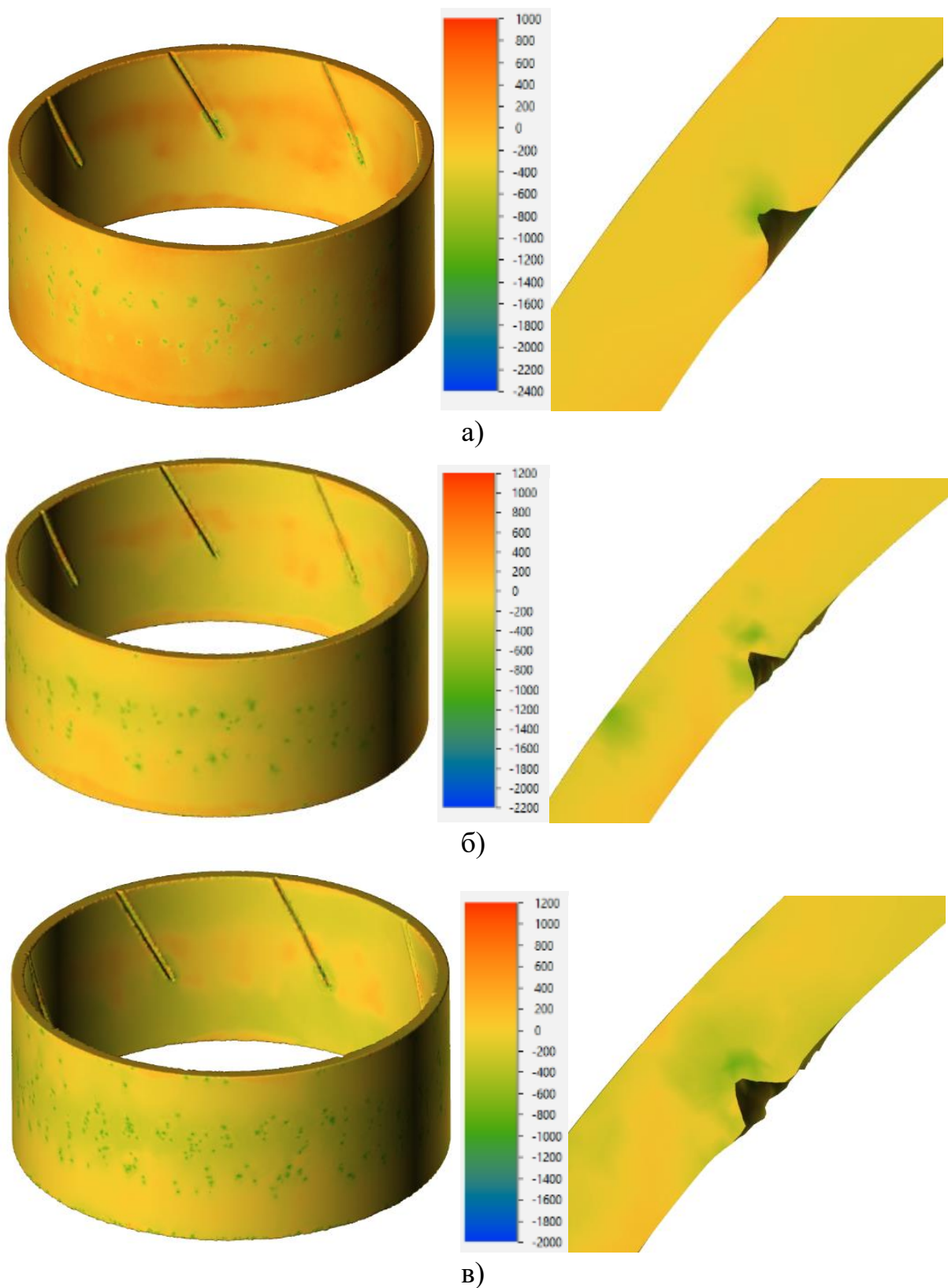
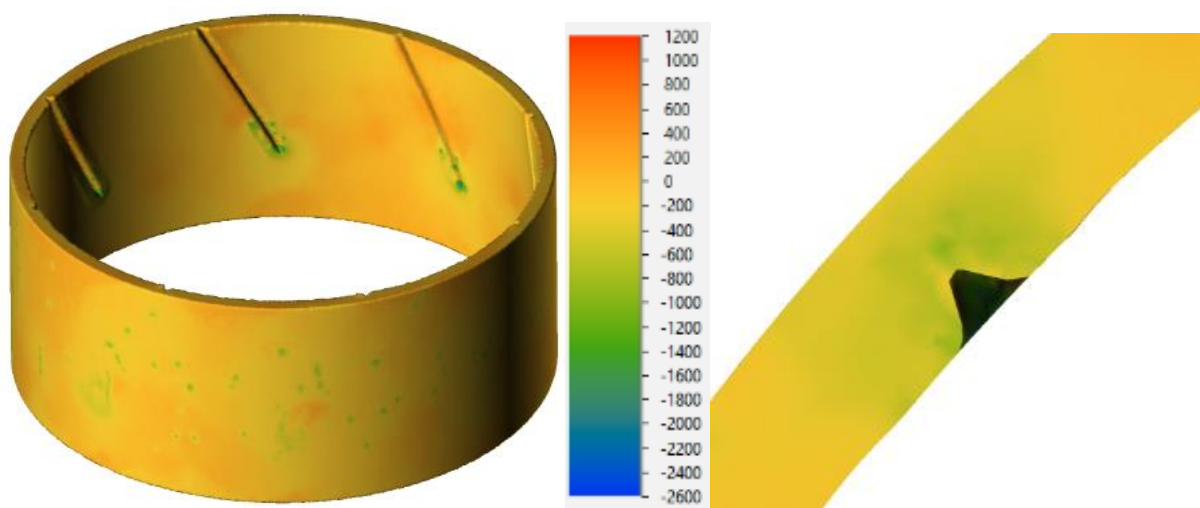
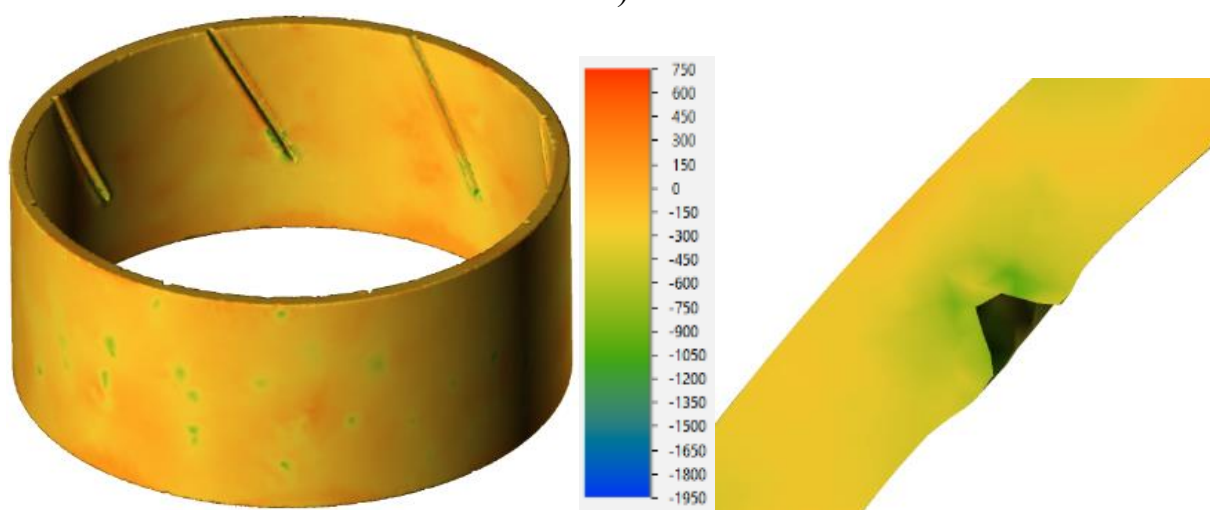


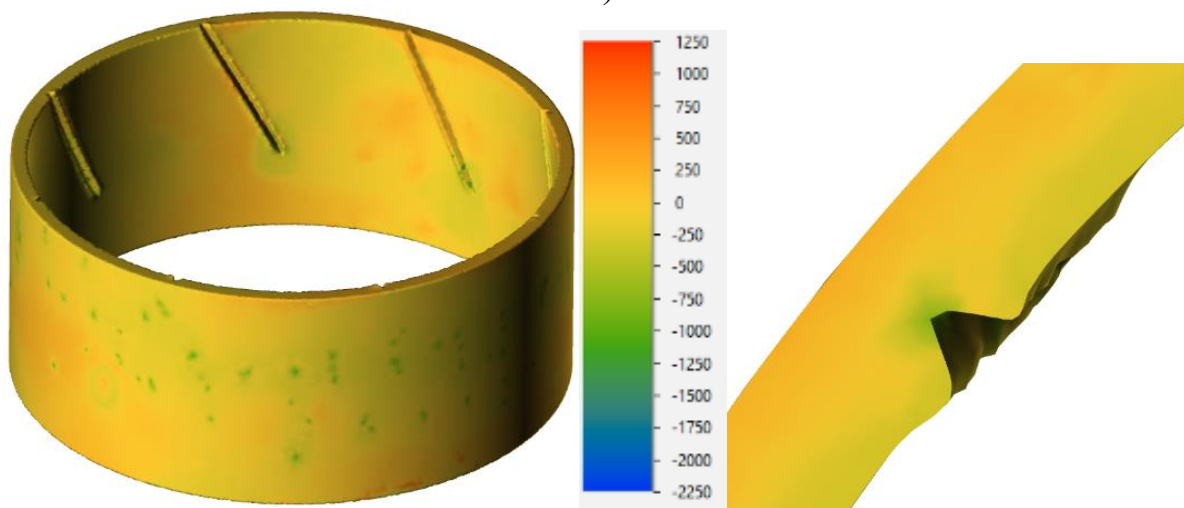
Рисунок 2.21 – Средние напряжения при рифлении на глубину 1 мм:  
а – при зазоре  $Z = 0,15$  мм; б – при зазоре  $Z = 0,3$  мм;  
в – при зазоре  $Z = 0,45$  мм



а)



б)



в)

Рисунок 2.22 – Средние напряжения при рифлении на глубину 1,3 мм:  
а – при зазоре  $Z = 0,15$  мм; б – при зазоре  $Z = 0,3$  мм;  
в – при зазоре  $Z = 0,45$  мм

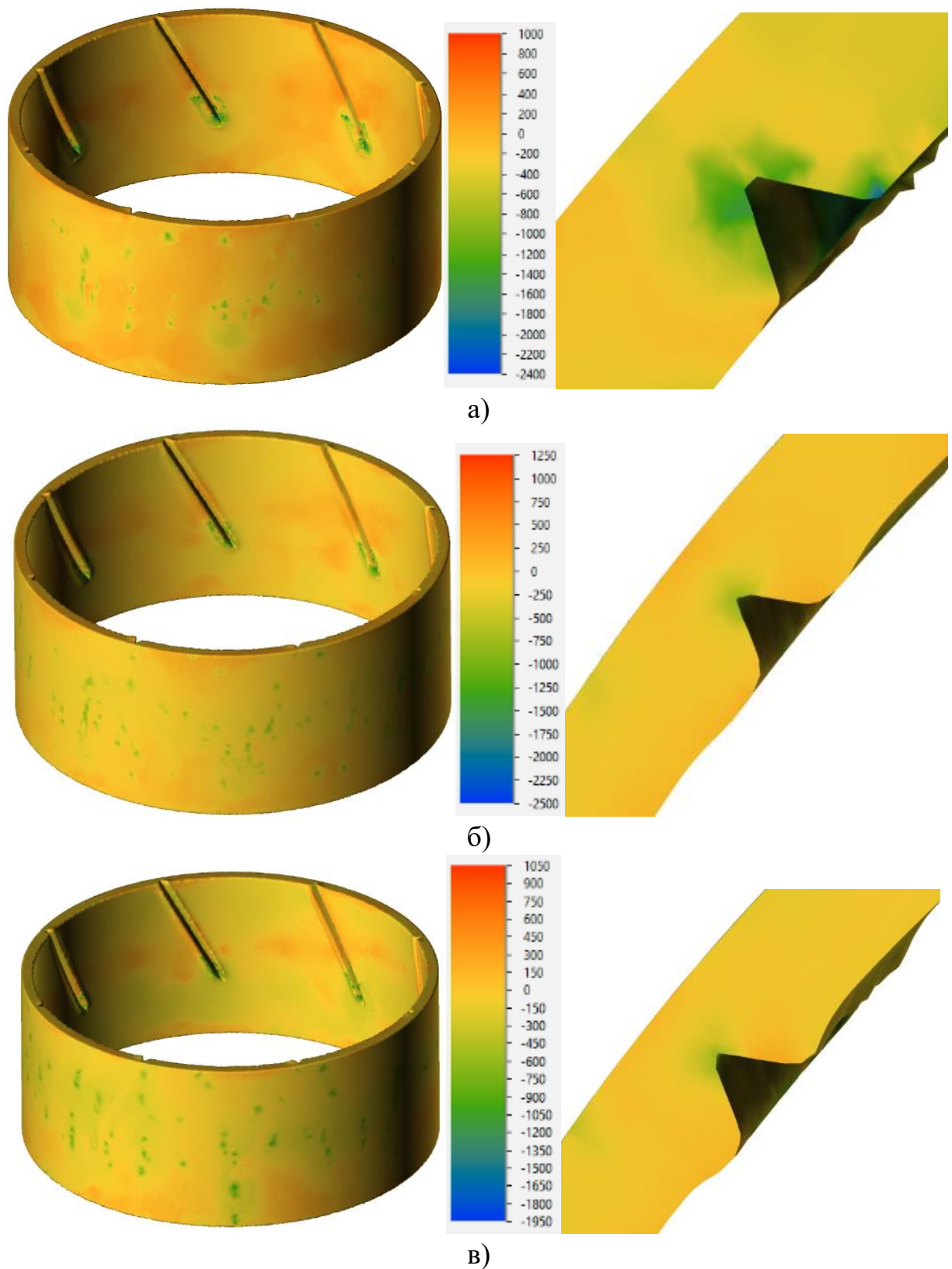


Рисунок 2.23 – Средние напряжения при рифлении на глубину 1,6 мм:  
а – при зазоре  $Z = 0,15$  мм; б – при зазоре  $Z = 0,3$  мм;  
в – при зазоре  $Z = 0,45$  мм

Также в определенной точке во впадине рифлей (рис. 2.24) были установлены величины деформаций (табл. 2.9) и средних напряжений (табл. 2.10).

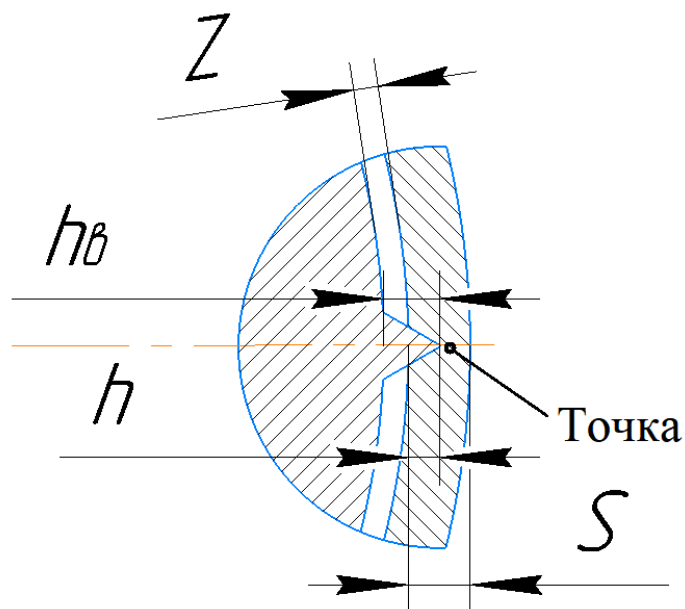


Рисунок 2.24 – Исследуемая точка

Таблица 2.9 – Интенсивности деформаций

| Тип     | Зазор<br>Z, мм | Глубина рифлей<br>1 мм   | Глубина рифлей<br>1,3 мм | Глубина рифлей<br>1,6 мм |
|---------|----------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
|         |                | Интенсивность деформаций |                          |                          |
| Тип III | 0,15           | 2,30                     | 2,75                     | 3,9                      |
|         | 0,30           | 2,11                     | 2,85                     | 3,4                      |
|         | 0,45           | 2,12                     | 2,81                     | 3,1                      |

Таблица 2.10 – Средние напряжения

| Тип     | Зазор<br>Z, мм | Глубина рифлей<br>1 мм  | Глубина рифлей<br>1,3 мм | Глубина рифлей<br>1,6 мм |
|---------|----------------|-------------------------|--------------------------|--------------------------|
|         |                | Средние напряжения, МПа |                          |                          |
| Тип III | 0,15           | -749                    | -750                     | -860                     |
|         | 0,30           | -752                    | -720                     | -755                     |
|         | 0,45           | -780                    | -746                     | -751                     |

При анализе интенсивности деформаций выявлено, что они наблюдаются только в зоне формируемых рифлей. Установлено, что во впадине формируемых рифлей интенсивность деформаций наибольшая, при этом с увеличением глубины рифления интенсивность деформаций растет.

При анализе средних напряжений выявлено, что практически во всей области заготовки наблюдаются средние напряжения, близкие к 0, в области же рифли наблюдаются как сжимающие, так и растягивающие напряжения. Во впадине формируемой рифли в основном присутствуют сжимающие напряжения, при этом по обе стороны от рифли наблюдаются растягивающие напряжения.

Далее проводится анализ повреждаемости материала. Повреждаемость материала считалась по критерию Колмогорова и определялась в сечении получаемой рифли. Для оценки вероятности разрушения обработанных образцов использовали стохастическую математическую модель, основанную на уравнении Колмогорова – полуэмпирическом уравнении роста среднего числа повреждений, и результатах регрессионного анализа данных. Данная модель позволяет с точностью до флуктуаций прогнозировать число повреждений. Повреждаемость  $D$  по критерию Колмогорова определяется как отношение накопленной деформации сдвига к ее предельной величине. При  $D > 0,7$  в материале накапливается такое число повреждений (дефектов), которое приводит к его разрушению [73]. Предельные значения интенсивности деформаций принимались из справочника Колмогорова [73] для данного материала и задавались в виде кривой в программе моделирования.

Повреждаемость определялась для рабочей оправки типа III при зазорах  $Z > 0$  и глубинах внедрения 1, 1,3 и 1,6 мм. На рисунке 2.25 приведены схемы повреждаемости металла при глубине рифлей 1 мм, на рисунке 2.26 – повреждаемость при глубине рифлей 1,3 мм, на рисунке 2.27 – при глубине рифлей 1,6 мм.

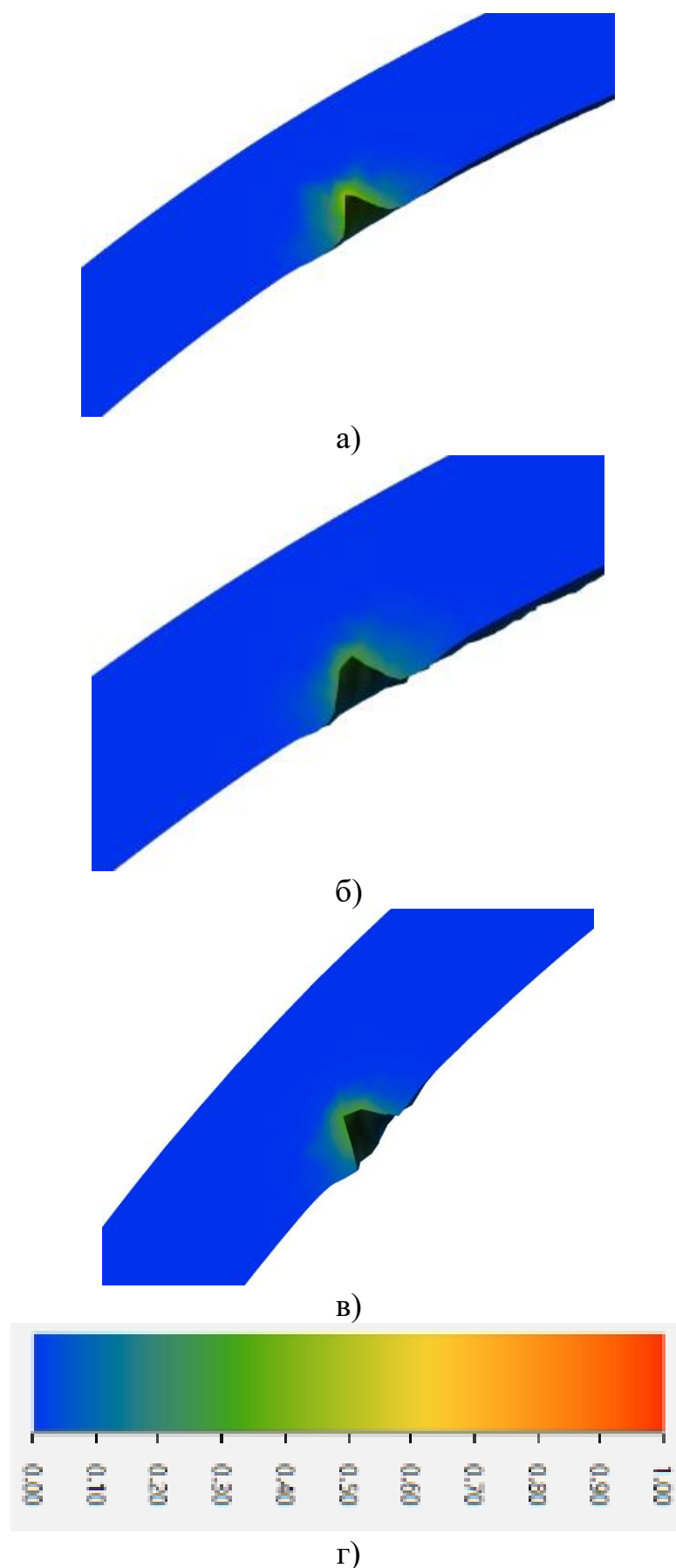


Рисунок 2.25 – Повреждаемость материала при рифлении оправкой типа III на глубину 1 мм: а– при зазоре  $Z = 0,15$  мм; б – при зазоре  $Z = 0,3$  мм; в – при зазоре  $Z = 0,45$  мм; г – шкала

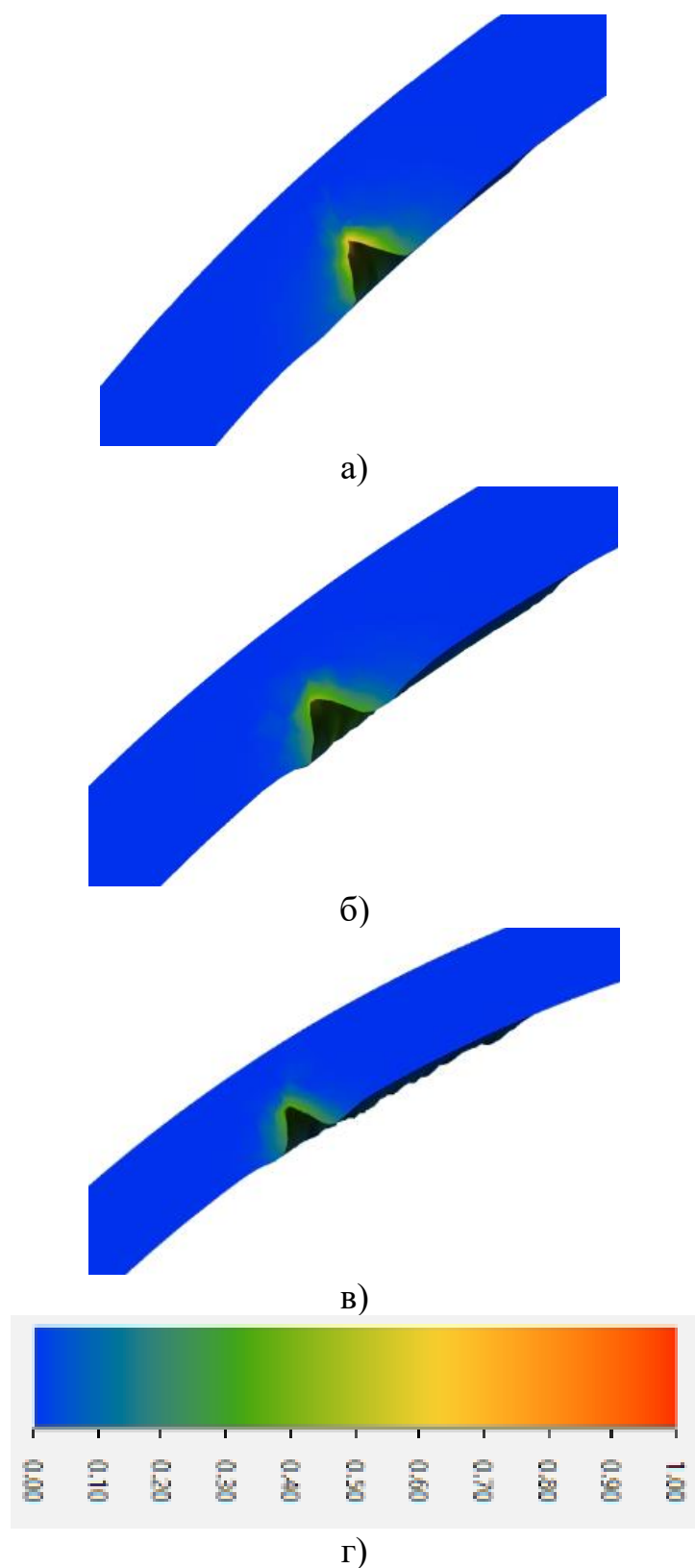


Рисунок 2.26 – Повреждаемость материала при рифлении оправкой типа III на глубину 1,3 мм: а – при зазоре  $Z = 0,15$  мм; б – при зазоре  $Z = 0,3$  мм; в – при зазоре  $Z = 0,45$  мм; г – шкала

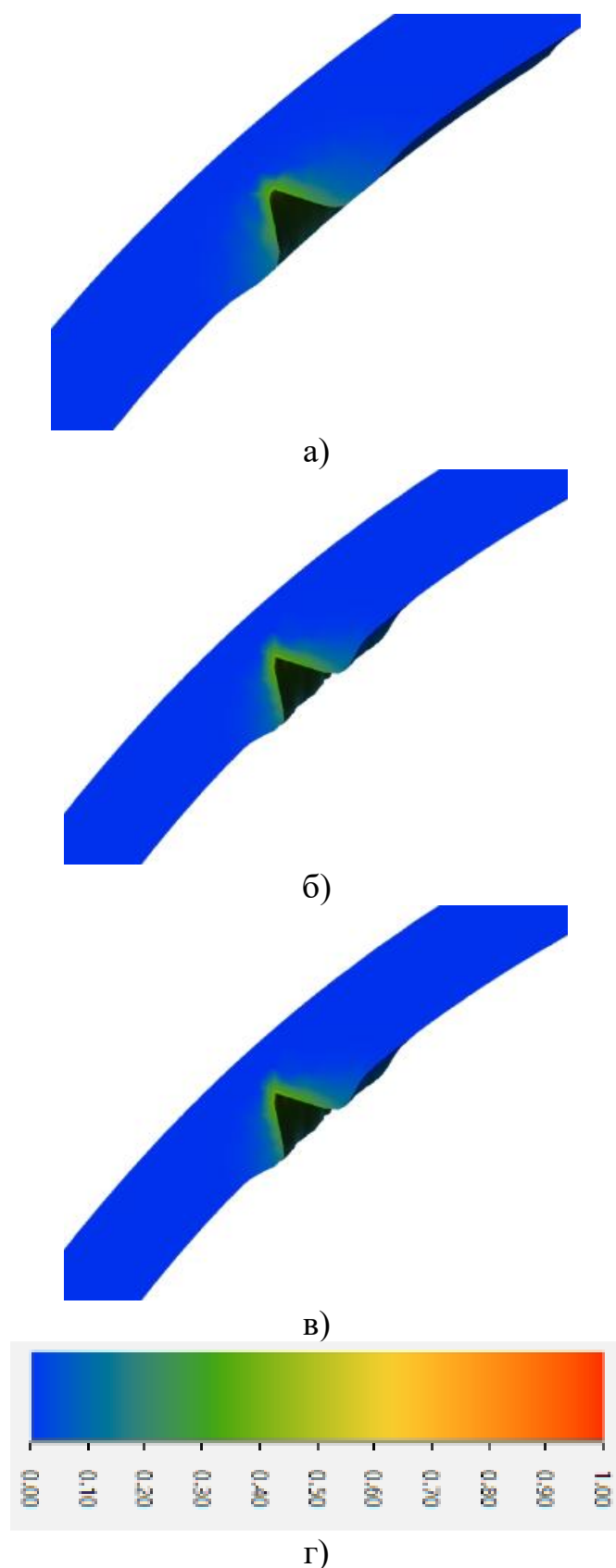


Рисунок 2.27 – Повреждаемость материала при рифлении оправкой типа III на глубину 1,6 мм: а – при зазоре  $Z = 0,15$  мм; б – при зазоре  $Z = 0,3$  мм; в – при зазоре  $Z = 0,45$  мм; г – шкала

Максимальные значения повреждаемости были записаны в таблицу 2.11.

Таблица 2.11 - Максимальные значения повреждаемости

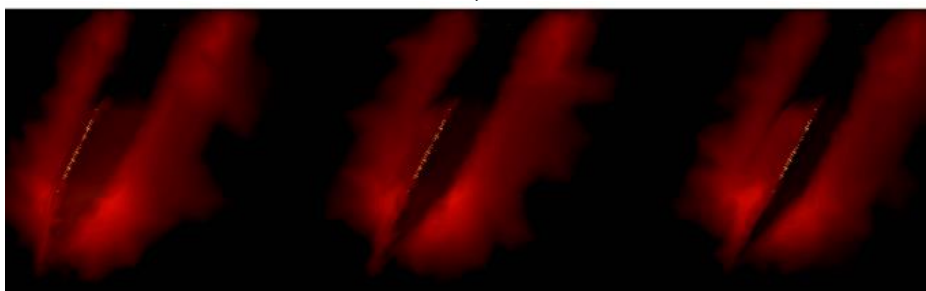
| Тип     | Зазор<br>Z, мм | Глубина рифлей<br>1 мм | Глубина рифлей<br>1,3 мм | Глубина рифлей<br>1,6 мм |
|---------|----------------|------------------------|--------------------------|--------------------------|
|         |                | Повреждаемость         |                          |                          |
| Тип III | 0,15           | 0,44                   | 0,61                     | 0,44                     |
|         | 0,30           | 0,41                   | 0,55                     | 0,42                     |
|         | 0,45           | 0,37                   | 0,40                     | 0,41                     |

Таким образом установлено, что глубина рифлей, а также зазор влияют на повреждаемость. Так, с увеличением зазора Z от 0,15 мм до 0,45 мм для всех глубин внедрения повреждаемость уменьшается на 10-25%. При этом выявлено, что наименьшая повреждаемость для глубин внедрения 1, 1,3 и 1,6 соответствует наибольшему зазору 0,45 мм.

Далее был проведен анализ температур, до которых разогреваются рабочая оправка и заготовка. На рисунке 2.28 приведены распределения температур для рабочей оправки, а на рисунке 2.29 – для заготовки при рифлении на глубину 1,6 мм.



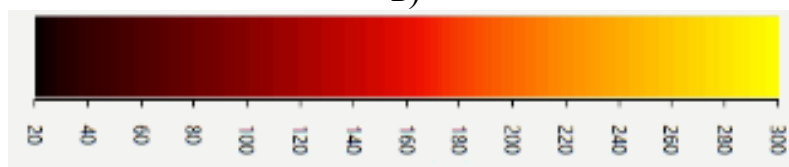
а)



б)



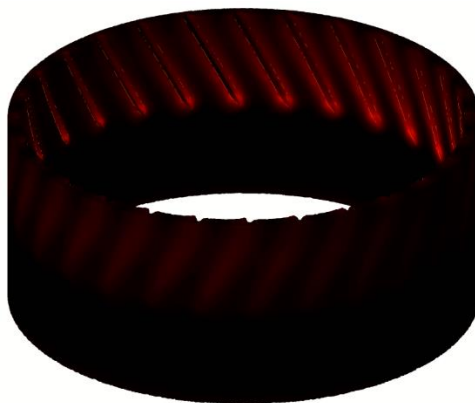
в)



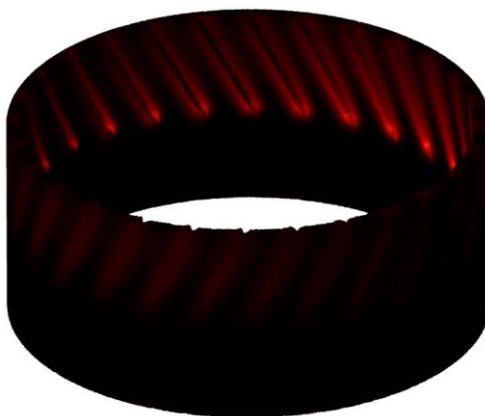
г)

Рисунок 2.28 – Температура в оправке при: а –  $Z=0,15$  мм, б –  $Z=0,3$  мм, в –  $Z=0,45$  мм, г – шкала

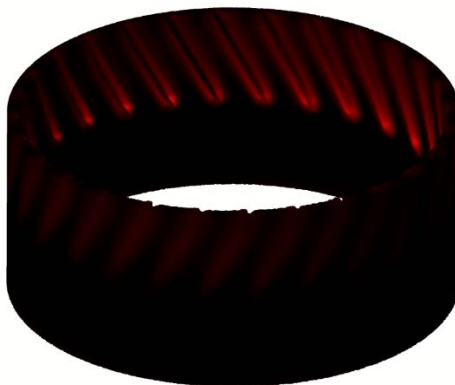
Анализ температур показал, что с увеличением зазора уменьшается площадь, на которой происходит увеличение температуры, что связано с уменьшением площади контакта оправки с заготовкой. При этом температура корпуса, в котором осуществляется формирование рифлей, практически не меняется.



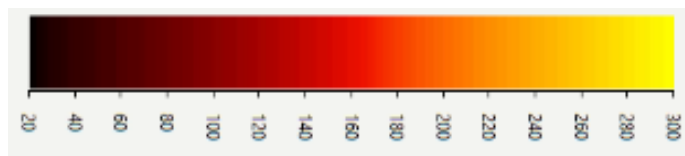
а)



б)



в)



г)

Рисунок 2.29 – Температура в заготовке при: а –  $Z=0,15$  мм, б –  $Z=0,3$  мм, в –  $Z=0,45$  мм, г – шкала

В результате формоизменения повышается температура в заготовке, при этом температура увеличивается локально, так как реализуется локальное деформирование. Наибольшая температура при зазоре 0,45 мм составляет 140°C.

Так как температура оказывает незначительное влияния на силовые и иные характеристики, в дальнейшем фактор температуры не будет рассматриваться.

Распределение средних напряжений и интенсивности деформаций материала при съеме изделия не меняется по результатам компьютерного моделирования, так как не происходит пластического формоизменения материала. При встречном рифлении и последующем съеме ситуация аналогична той, что происходит при первой операции рифления.

Повреждаемость материала при съеме изделия не меняется по результатам компьютерного моделирования, так как не происходит пластического формоизменения материала.

Так как напряженное и деформированное состояние зависит от глубины внедрения спиральных клиновых выступов и зазора между рабочей оправкой и заготовкой и не зависит от угла подъема, были построены двухфакторные модели для интенсивности деформаций, сжимающих напряжений и повреждаемости.

Таким образом, в качестве основных факторов, определяющих процесс формирования сетки рифлей на внутренней поверхности оболочек, были выбраны следующие параметры: зазор между внутренней поверхностью заготовки и основной поверхностью рабочей оправки –  $Z$ ; глубина внедрения выступов рабочей оправки –  $h$ .

В качестве выходных параметров (функции отклика), характеризующих данный процесс, были приняты:

- максимальное значение повреждаемости –  $D$ ;
- интенсивность деформаций –  $\varepsilon_i$ ;
- сжимающие напряжения –  $\sigma_{\text{ср}}$ .

Для описания вышеперечисленных зависимостей использовалась полиномиальная модель второго порядка:

$$y_1 = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_{12}x_1x_2 + b_{11}x_1^2 + b_{22}x_2^2,$$

где  $y_1$  – значение выходного параметра (функции отклика);  $b_0, b_i, b_{ii}$  – коэффициенты регрессии;  $x_i, x_j$  – кодированные значения входных факторов.

В таблице 2.12 приведены уровни и интервалы варьирования основных факторов.

Таблица 2.12 - Уровни факторов и интервалы их варьирования

| Наименование фактора  | Натуральное значение фактора: $Z$ | Кодированное значение фактора: $x_1$ | Натуральное значение фактора: $h$ | Кодированное значение фактора: $x_2$ |
|-----------------------|-----------------------------------|--------------------------------------|-----------------------------------|--------------------------------------|
| Область эксперимента  |                                   |                                      |                                   |                                      |
| Основной уровень      | 0,30                              | 0                                    | 1,3                               | 0                                    |
| Интервал варьирования | 0,15                              | 1                                    | 0,3                               | 1                                    |
| Нижний уровень        | 0,15                              | -1                                   | 1,0                               | -1                                   |
| Верхний уровень       | 0,45                              | +1                                   | 1,6                               | +1                                   |

Матрица планирования эксперимента, где -1, 0, +1 обозначены кодированные уровни рассматриваемых факторов, представлена в таблице 2.12.

Обозначим  $x_1, x_2$  кодовые значения факторов, которые связаны с действительными значениями следующими соотношениями:

$$x_1 = \frac{Z - 0,3}{0,15}, x_2 = \frac{h - 1,3}{0,3}$$

В качестве плана эксперимента был использован двухфакторный план [72], матрица которого приведена в таблице 2.13.

Необходимые расчеты по определению коэффициентов регрессии были выполнены аналогично предыдущим.

Таблица 2.13 – Матрица планирования эксперимента

| № опыта | Z (X <sub>1</sub> ) | h (X <sub>2</sub> ) |
|---------|---------------------|---------------------|
| 1       | +1                  | +1                  |
| 2       | -1                  | +1                  |
| 3       | +1                  | -1                  |
| 4       | -1                  | -1                  |
| 5       | +1                  | 0                   |
| 6       | -1                  | 0                   |
| 7       | 0                   | +1                  |
| 8       | 0                   | -1                  |
| 9       | 0                   | 0                   |

Были получены уравнения регрессии, устанавливающие зависимости максимального значения повреждаемости ( $D$ ), интенсивности деформаций ( $\varepsilon_i$ ), сжимающих напряжений ( $\sigma_{ср}$ ) от зазора между внутренней поверхностью заготовки и основной поверхностью рабочей оправки ( $Z$ ) и глубины внедрения выступов рабочей оправки ( $h$ ), которые имеют вид:

- максимальное значение повреждаемости –  $D$ :

$$D = 0,53 - 0,0517x_1 + 0,0083x_2 + 0,01x_1x_2 - 0,015x_1^2 + 0,105x_2^2;$$

- интенсивность деформаций:

$$\varepsilon_i = 2,7633 - 0,13667x_1 + 0,66167x_2 - 0,13x_1x_2 + 0,06x_1^2 + 0,035x_2^2;$$

- сжимающие напряжения:

$$\sigma_{ср} = -717,67 + 15,75x_1 - 15,5x_2 + 33x_1x_2 - 28,25x_1^2 - 37x_2^2.$$

С помощью полученных уравнений регрессии были построены поверхности отклика и их сечения, отражающие зависимость максимальных значений повреждаемости (рис. 2.30), интенсивности деформаций (рис. 2.31) и сжимающих напряжений (рис. 2.32) от зазора между внутренней

поверхностью заготовки и основной поверхностью рабочей оправки и глубины внедрения выступов рабочей оправки.

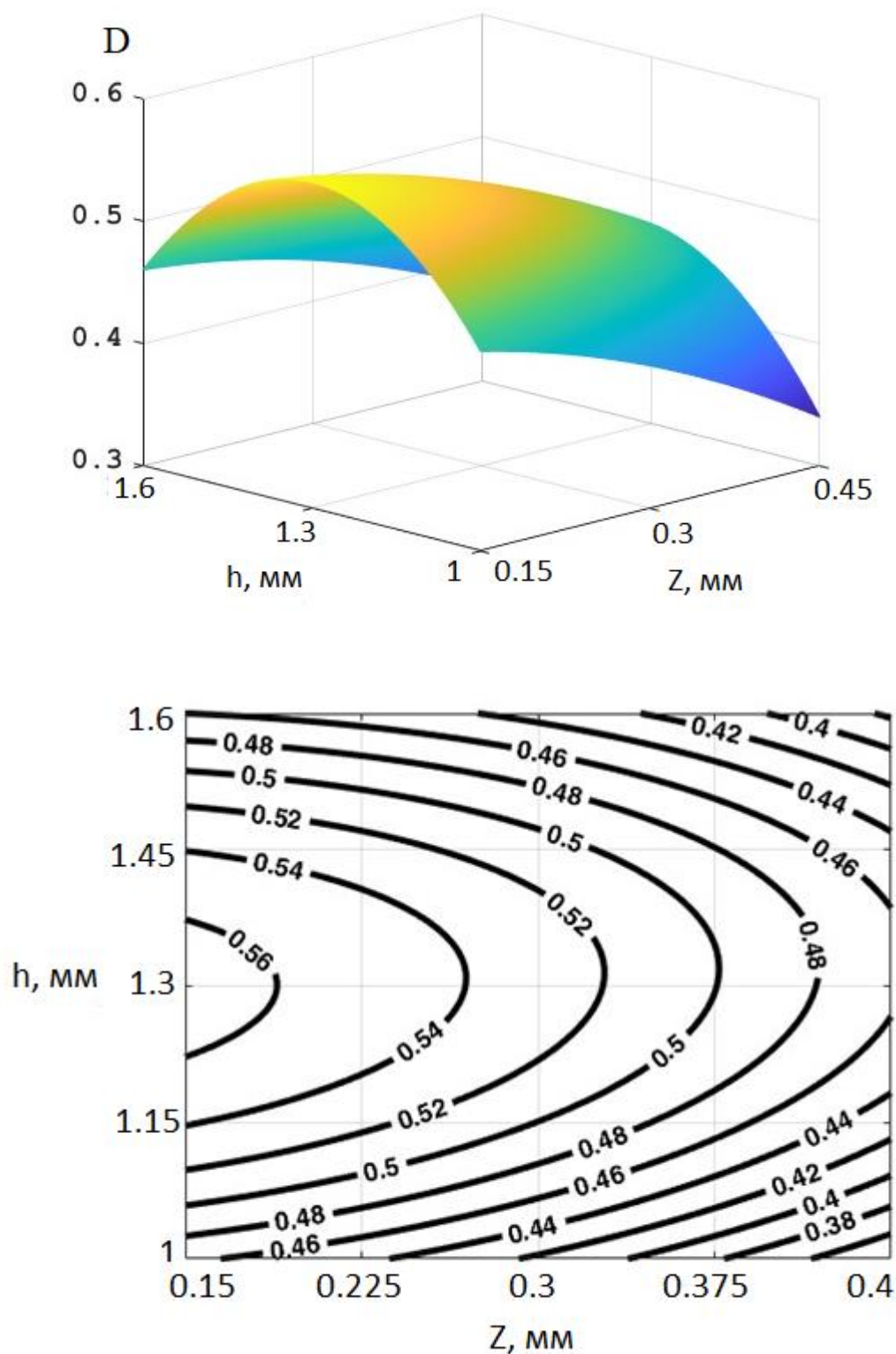


Рисунок 2.30 – Зависимость максимального значения повреждаемости ( $D$ ) от величин ( $Z, h$ )

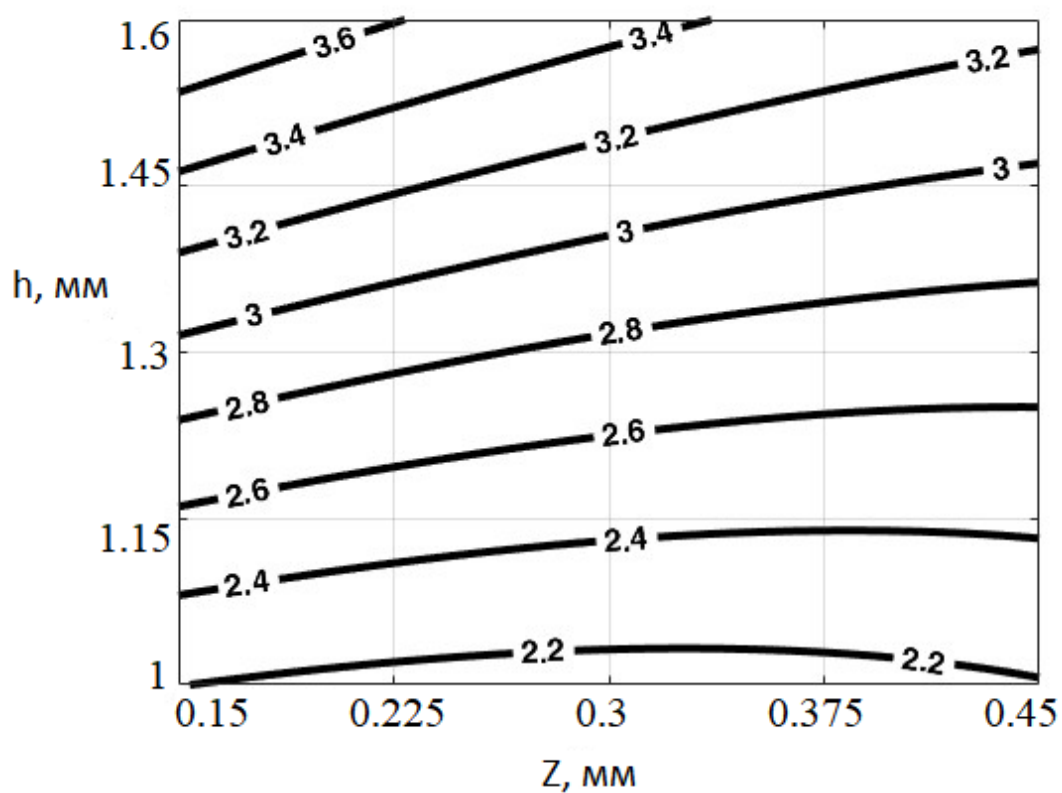
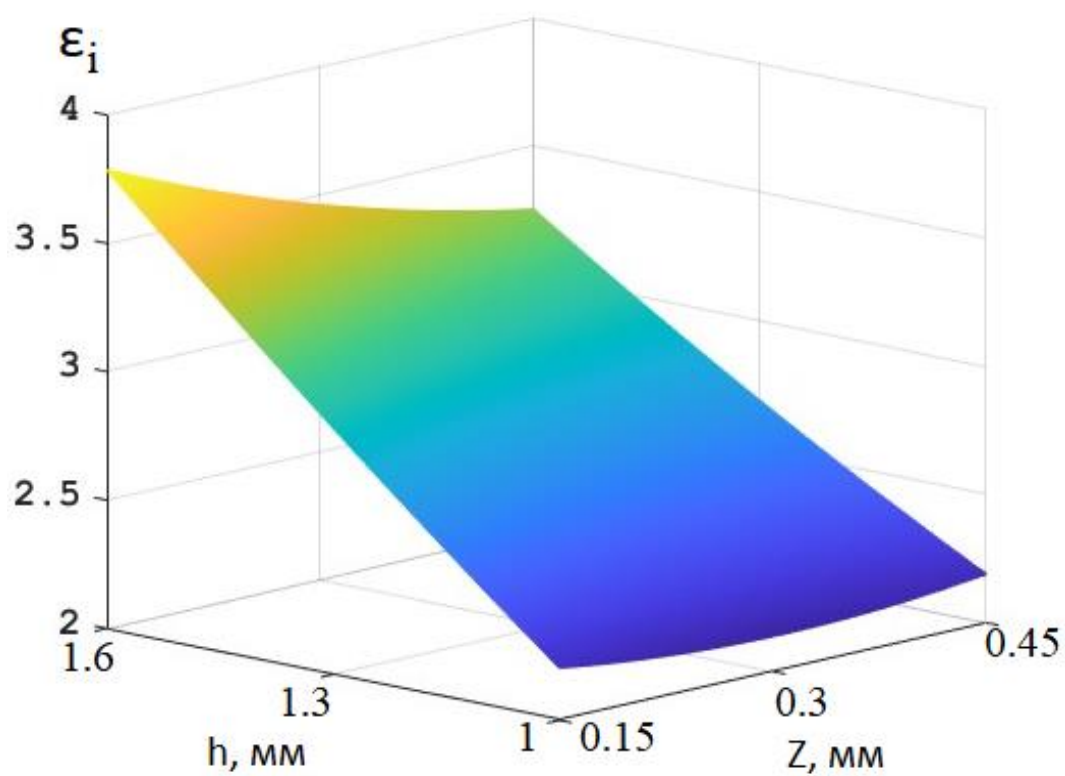


Рисунок 2.31 – Зависимость интенсивности деформаций ( $\epsilon_i$ ) от величин ( $Z, h$ )

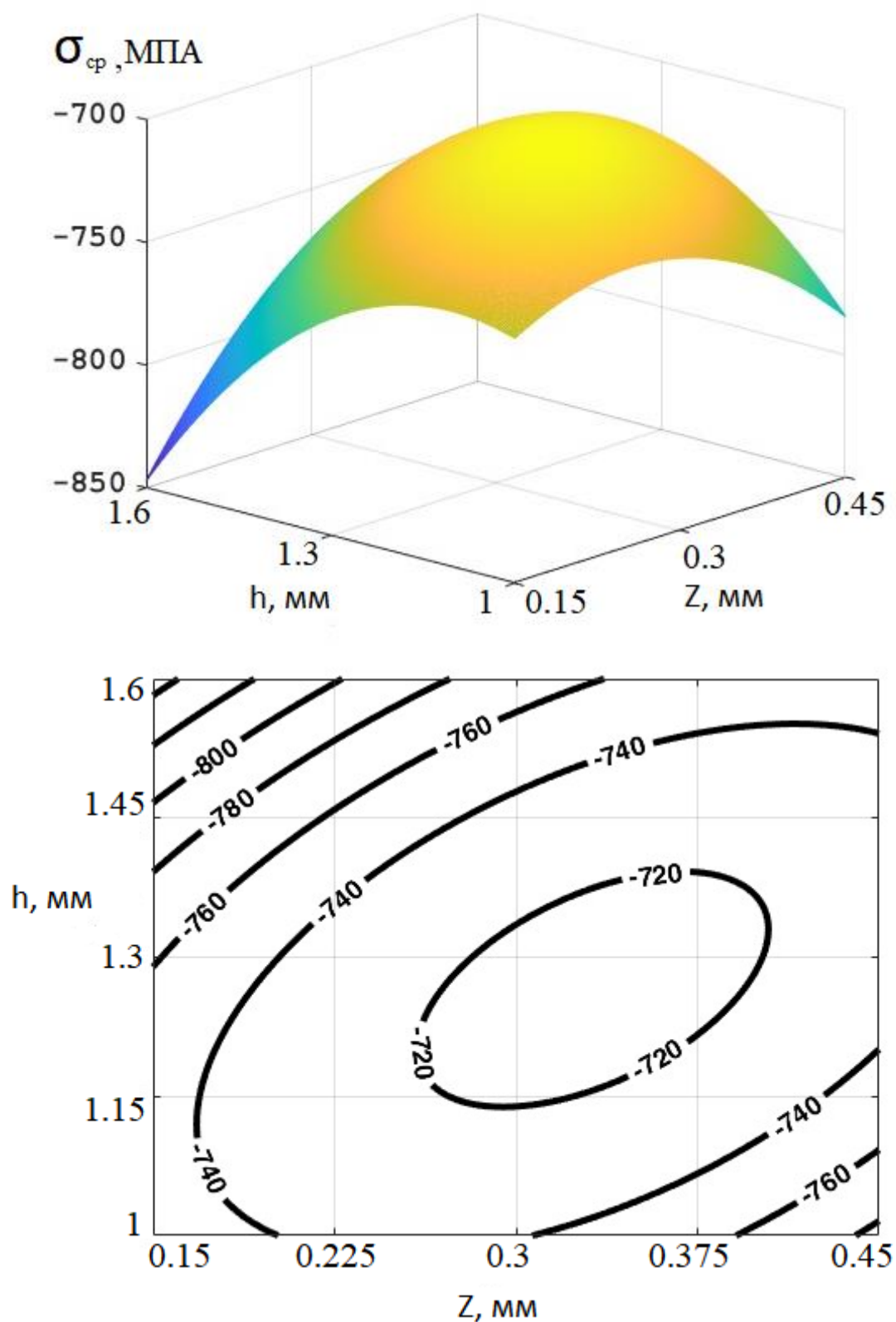


Рисунок 2.32 – Зависимость сжимающих напряжений ( $\sigma_{cp}$ ) от величин ( $Z$ ,  $h$ )

Выявлено, что максимальная интенсивность деформации достигает достаточно высоких значений – порядка 3,6. Однако наличие высоких

сжимающих напряжений в области деформаций позволяет осуществлять процесс формирования рифлей без разрушения, о чем свидетельствуют значения параметра повреждаемости  $D$  по критерию Колмогорова, не превышающие 0,6.

## **2.7 Получение изделий с сеткой рифлей**

Для получения сетки рифлей требуется проведение встречного рифления рабочей оправкой с противоположным углом подъема спиральных клиновых выступов. Поэтому было проведено компьютерное моделирование второй операции рифления и последующего съема. Встречное рифление проводилось также для оправки типа III.

В результате установлено, что сила встречного рифления в среднем на 10% ниже, чем при первом рифлении, что связано с небольшой раздачей полученного после первой операции полуфабриката. Однако при рифлении происходит скачкообразное изменение силы (колебания составляют около 30%) в связи с тем, что спиральные клиновые выступы попадают в уже сформированные рифли после первой операции.

Также установлено, что напряженное деформированное состояние повторяет первую операцию рифления и съема.

## **2.8 Сравнение локального пластического деформирования и редуцирования**

На данный момент редуцирование является основным методом получения деталей с внутренними рифлями, поэтому было проведено сравнение существующего метода с новым методом локального пластического формоизменения. Для этого было проведено дополнительное компьютерное моделирование в программе QForm, которое по исходным параметрам полностью повторяет описанные выше схемы моделирования.

Коэффициент трения, температура штамповки, конечные размеры полуфабриката с рифлями и прочие параметры были идентичны. В итоге был получен график технологических сил формоизменения и съема при рифлении и редуцировании (рис. 2.33). Высота заготовок составляла 50 мм, выполнены они были из стали 10.

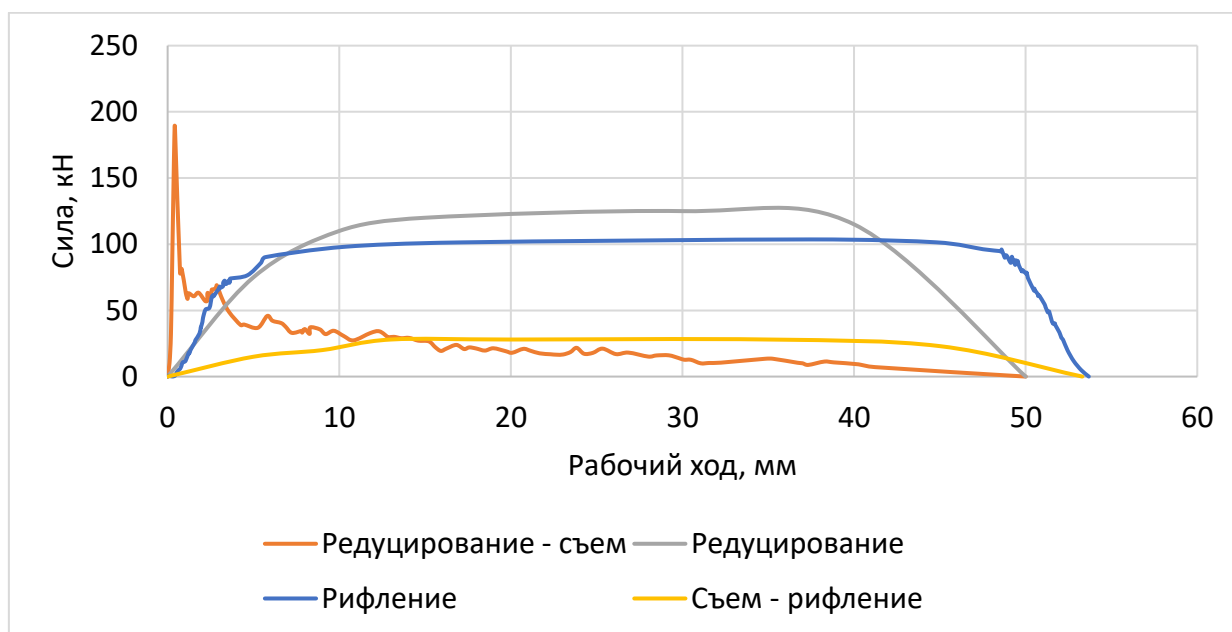


Рисунок 2.33 – График сил

Установлено, что сила при получении рифленой внутренней поверхности отличается при использовании рассматриваемых методов. Так сила редуцирования на 20% выше, чем рифления локальным пластическим деформированием. При анализе силы съема было установлено, что для съема полуфабриката с инструмента при редуцировании необходима сила, достигающая более 180 кН, при этом для нового метода необходимо 26 кН.

## 2.9 Основные результаты и выводы по результатам моделирования рифления внутренней поверхности оболочки

На основе результатов проведенного моделирования можно сделать следующие выводы:

1. При использовании оправки типа I наблюдается фронтальный наплыв, при рифлении оправками типа II и III с зазором  $Z=0$  также выявлен наплыв. При рифлении рабочей оправкой типа II и III с зазором  $Z>0$  мм значительных наплывов или иных дефектов не наблюдается.

2. Установлено, что технологическая сила при рифлении оправкой типа III меньше относительно оправки типа II для зазоров  $Z>0$  и всех глубин внедрения. С увеличением глубины рифления оправкой типа III с 1 мм до 1,6 мм увеличивается технологическая сила формоизменения на 250% с 42 кН до 105 кН. С увеличением зазора сила рифления оправкой типа III снижается для глубин внедрения 1,3 мм и 1,6 мм почти в 2 раза, при глубине внедрения 1 мм сила уменьшается на 30%.

3. Установлено, что с увеличением глубины рифления при всех зазорах сила съема увеличивается. Так, увеличение глубины внедрения с 1 мм до 1,6 мм приводит к повышению силы съема при зазорах  $Z=0,3$  мм и  $Z=0,45$  мм примерно на 250%.

4. При анализе влияния угла подъема на силу рифления установлено, что при зазорах  $Z=0,15$  мм и  $Z=0,3$  мм с увеличением угла подъема от  $10^\circ$  до  $30^\circ$  сила увеличивается на 20-50% для всех глубин внедрения. При зазоре  $Z=0,45$  мм угол подъема практически не влияет на силу формоизменения.

5. Во впадине формируемых рифлей интенсивность деформаций наибольшая, при этом с увеличением глубины рифления интенсивность деформаций растет. Максимальные интенсивности деформации достигают достаточно высоких значений – порядка 3,6. Однако наличие высоких сжимающих напряжений в области деформаций позволяет осуществлять процесс формирования рифлей без разрушения, о чем свидетельствуют значения параметра повреждаемости по критерию Колмогорова, которые не превышают 0,6 во всех рассматриваемых случаях.

6. Для получения сетки рифлей необходимо использовать рабочую оправку с противоположным углом подъема спиральных клиновых выступов. Установлено, что максимальная сила встречного рифления в среднем на 10%

меньше, чем при первом рифлении, из-за небольшой раздачи полуфабриката. Однако при встречном рифлении происходят колебания силы около 30%, так как выступы попадают в уже сформированные рифли. При этом напряженное и деформированное состояние на второй операции рифления аналогично первой операции рифления.

7. Сила получения рифленых оболочек при редуцировании на 20% выше относительно формообразования локальным пластическим деформированием инструментом ограниченной длины. Также установлено, что сила съема при локальном рифлении ниже на 85% относительно редуцирования.

8. Глубина рифлей, а также зазор влияют на повреждаемость. Так с увеличением зазора  $Z$  от 0,15 мм до 0,45 мм для всех глубин внедрения повреждаемость уменьшается на 10-25%. При этом выявлено, что наименьшая повреждаемость для глубин внедрения 1, 1,3 и 1,6 мм соответствует наибольшему зазору 0,45 мм.

9. В результате формоизменения повышается температура в заготовке, при этом температура увеличивается локально, так как реализуется локальное деформирование. Наибольшая температура при зазоре 0,45 мм составляет 140°C. Таким образом, температура оказывает незначительное влияние на силовые и иные характеристики.

### **3 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА НАНЕСЕНИЯ РИФЛЕЙ НА ВНУТРЕННЕЙ ПОВЕРХНОСТИ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ОБОЛОЧКИ**

Ниже приводятся результаты экспериментальных работ по нанесению рифлей на внутренней поверхности оболочек и сравнение полученных экспериментальных данных с теоретическими.

### 3.1 Оснастка для проведения экспериментальных работ по нанесению сетки рифлей на поверхностях оболочек

Для проведения экспериментальных работ по нанесению рифлей на внутренней поверхности цилиндрических оболочек был спроектирован и изготовлен экспериментальный штамп на основе полученного автором патента на изобретение №2654410 [61], схема которого приведена на рисунке 3.1 и 3.2.

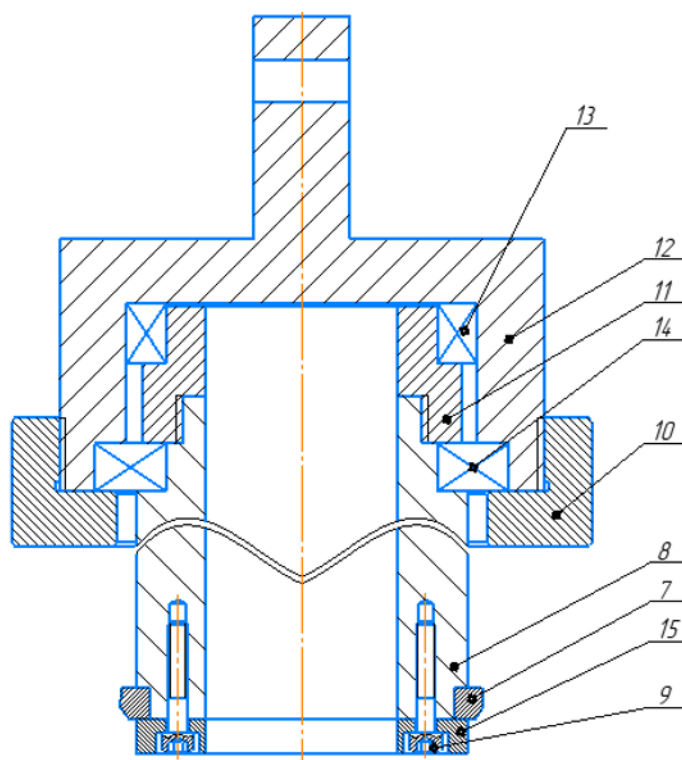


Рисунок 3.1 – Схема экспериментального штампа (верхняя часть)

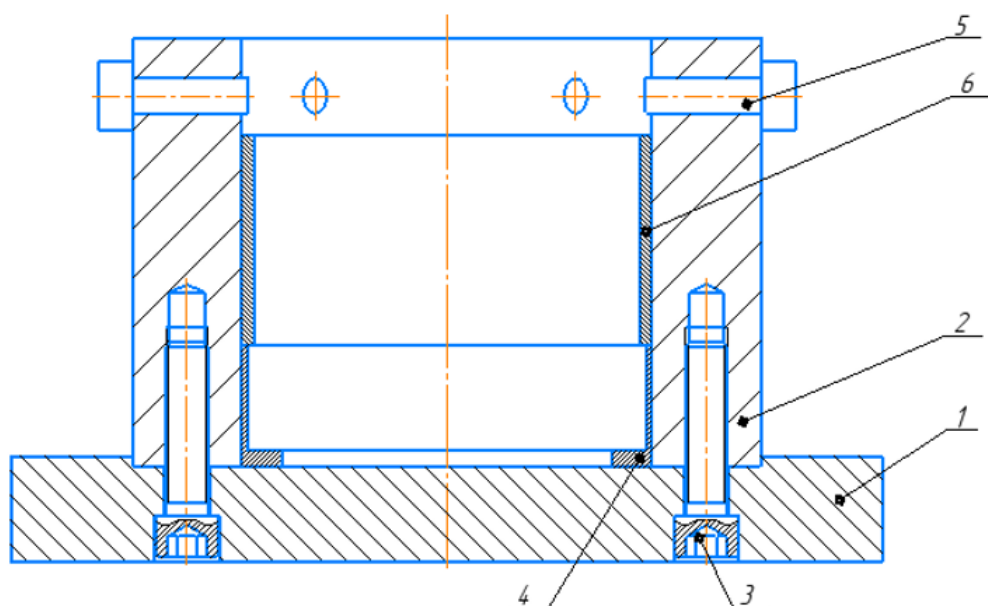


Рисунок 3.2 – Схема экспериментального штампа (нижняя часть)

Штамп состоит из нижней и верхней частей. На нижней плите (1) винтами (3) закреплен корпус (2). В корпусе (2) размещён выталкиватель (4), на который устанавливается заготовка (6). Также в корпусе (2) выполнены отверстия, в которые устанавливаются упоры (5).

Верхняя часть состоит из хвостовика (12), в котором закреплены подшипник 8117 ГОСТ 7872-89 (13) и подшипник 46117 ГОСТ 831-75 (14), подпятник (11), инструментальный стержень (8), зафиксированные крышкой (10). Рабочая оправка (7) со спиральными клиновыми выступами устанавливается на инструментальном стержне (8) и фиксируется крышкой (15) и винтами (9). На второй операции рабочую оправку (7) с углом наклона вершин клиновых выступов в  $30^\circ$  относительно оси заменяют на рабочую оправку с противоположным углом наклона спиральных клиновых выступов  $-30^\circ$ .

Общее изображение экспериментального штампа без нижней плиты приведено на рисунке 3.3.



Рисунок 3.3 – Общий вид экспериментального штампа

Штамп работает следующим образом: нижняя плита (1) устанавливается на столе гидравлической испытательной машины, а хвостовик (12) закрепляется в ползуне. Производится настройка устройства, заключающаяся в центрировании нижней части с верхней для устранения эксцентриситета поверхности рабочей оправки относительно внутренней поверхности заготовки. Включается пресс, и верхняя часть устройства производит рабочий ход. Рабочая оправка со спиральными клиновыми выступами входит в полость заготовки (6) и производит локальное пластическое формоизменение, при этом для получения спиральных клиновых рифлей рабочая оправка поступательно перемещается в осевом направлении и одновременно вращается вокруг своей оси. Вращение вокруг оси происходит под воздействием крутящего момента, возникающего при внедрении клиновых выступов с углом наклона  $30^\circ$ . Поворот вокруг оси инструментального

стержня (8) и рабочей оправки (7) происходит благодаря наличию подшипников (13) и (14).

Таким образом, одновременное продольное перемещение и вращение рабочего инструмента обеспечивают получение рифлений на внутренней поверхности заготовки (6). При частичном выходе рабочей оправки (7) из полости заготовки (6) рабочий ход заканчивается. При этом сохраняется контакт выступов рабочей оправки (7) с заготовкой (6).

При обратном ходе в результате продольного перемещения и одновременно поворота вокруг оси рабочей оправки (7) с инструментальным стержнем (8) происходит контакт заготовки (6) с упорами (5) и удаление рабочей оправки (7) из заготовки (6). В процессе удаления инструмента из заготовки (6) последняя контактирует с упорами (5) и остаётся внутри корпуса (2).

На второй операции вместо рабочей оправки (7) устанавливается рабочая оправка с противоположным углом подъема  $-30^\circ$ . Осуществляется рабочий ход аналогично первой операции с получением спиральных рифлений и образованием сетки рифлей ромбической формы на внутренней поверхности заготовки (6).

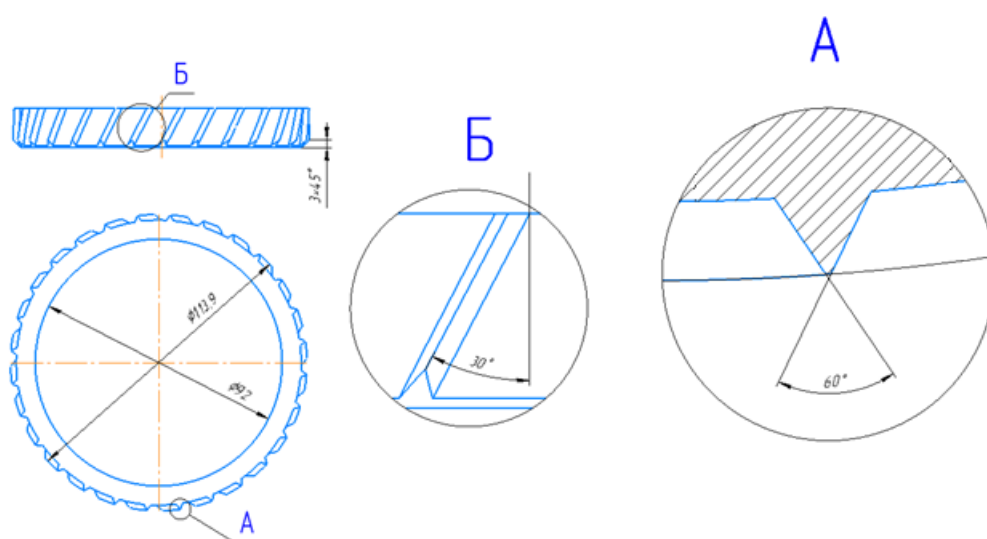
### **3.2 Рабочие оправки для получения рифлей на внутренней поверхности оболочки**

В результате компьютерного моделирования было определено, что при высоте клиновых выступов рабочей оправки равной глубине рифлей (при зазоре  $Z=0$  между рабочей оправкой и заготовкой) возникают значительный фронтальный наплыв, препятствующий локальному деформированию материала заготовки, и значительная сила формоизменения. В экспериментах использовались рабочие оправки с высотой клиновых выступов 1,5 мм, что создавало зазор  $Z=0,5$  мм между поверхностями заготовки и рабочей оправки и обеспечивало условие локального деформирования, при этом глубина

формируемых рифлей составляла  $h=1$  мм [74]. Использовалось три вида рабочих оправок с разными формами заходной части спиральных клиновых выступов, описанных в главе 3, а именно тип I (рис. 3.4), тип II (рис. 3.5) и тип III (рис. 3.6). Все рабочие оправки были изготовлены из инструментальной стали У10А и имели угол при вершине  $60^\circ$ , угол подъема  $30^\circ$ , число спиральных рифлей составляло 28 шт.



а)

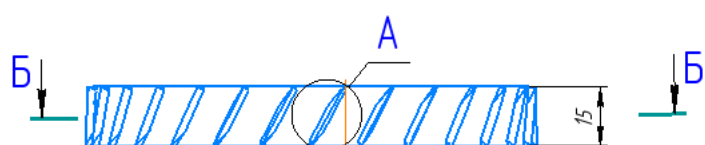


б)

Рисунок 3.4 – Рабочая оправка типа I: а – фотография, б – схема

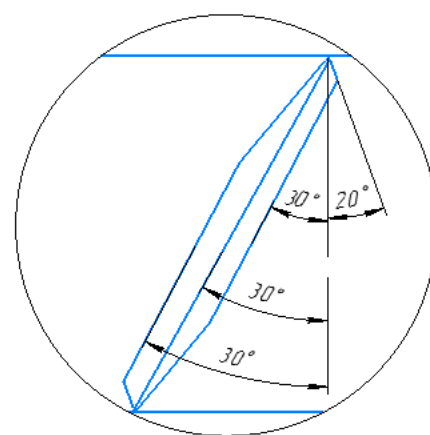
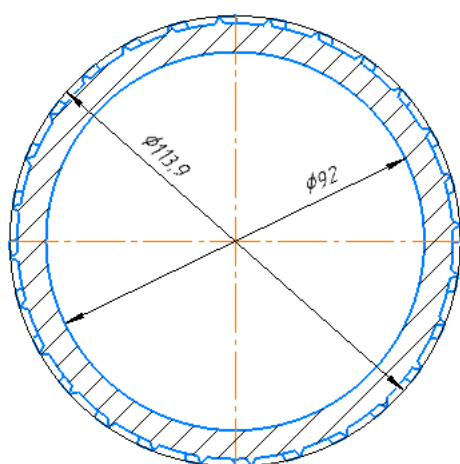


а)



Б-Б

А

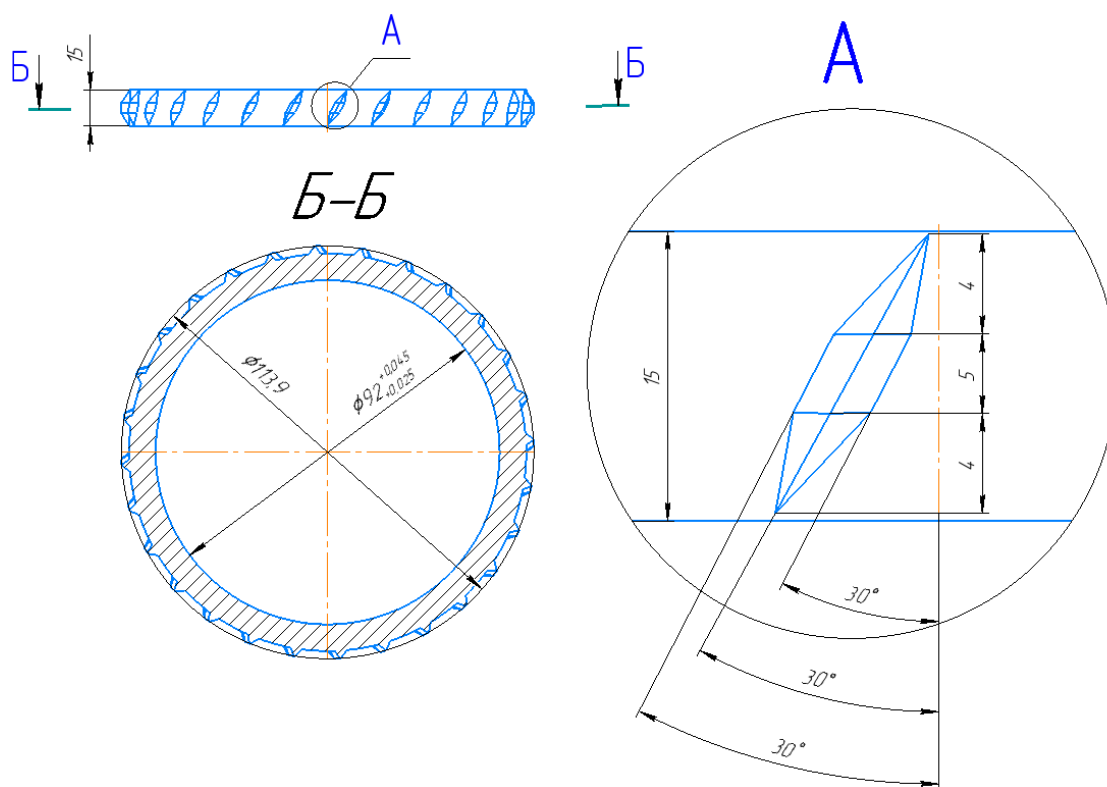


б)

Рисунок 3.5 – Рабочая оправка типа II: а – фотография, б – схема



а)



б)

Рисунок 3.6 – Рабочая оправка типа III: а – фотография, б – схема

### 3.3 Заготовки для проведения экспериментальных работ

Для проведения экспериментов были изготовлены заготовки-оболочки из двух сплавов: 1 – сталь 20 (рис. 3.7, а); 2 – алюминиевый сплав АМг5 (рис. 3.7, б). Наружный диаметр заготовки составляет 117,8 мм, внутренний диаметр заготовки составляет 111,9 мм, толщина стенки равна 2,95 мм, высота – 60 мм.



а)



б)

Рисунок 3.7 – Заготовки под последующее рифление: а – стальные заготовки, б – алюминиевые заготовки

Было проведено спектрометрическое исследование материала заготовок [74-75]. Спектрометрическое исследование проводилось на спектрометре эмиссионном МСАП V5 (рис. 3.8). Оптический эмиссионный спектрометр МСАП V5 разработан для точного экспрессного анализа состава металлов и сплавов, который определяет процентное содержание всех химических элементов одновременно, включая C, S, P, Si, Cr, Ni, Cu, V, W, Nb, Ti, Al, Zn, Sn, Pb, As и т. д., как в черных, так и в цветных металлах, при этом точность анализа превышает требования ГОСТов, регламентирующих количественные показатели спектрального анализа [76].



Рисунок 3.8 – Спектрометр эмиссионный МСАП V5 [77]

Из заготовок были вырезаны и выпрямлены на гидравлическом прессе образцы на каждый материал. Каждый образец был подвержен шлифованию одной из поверхностей с последующей пятикратной спектрометрией (рис. 3.9).

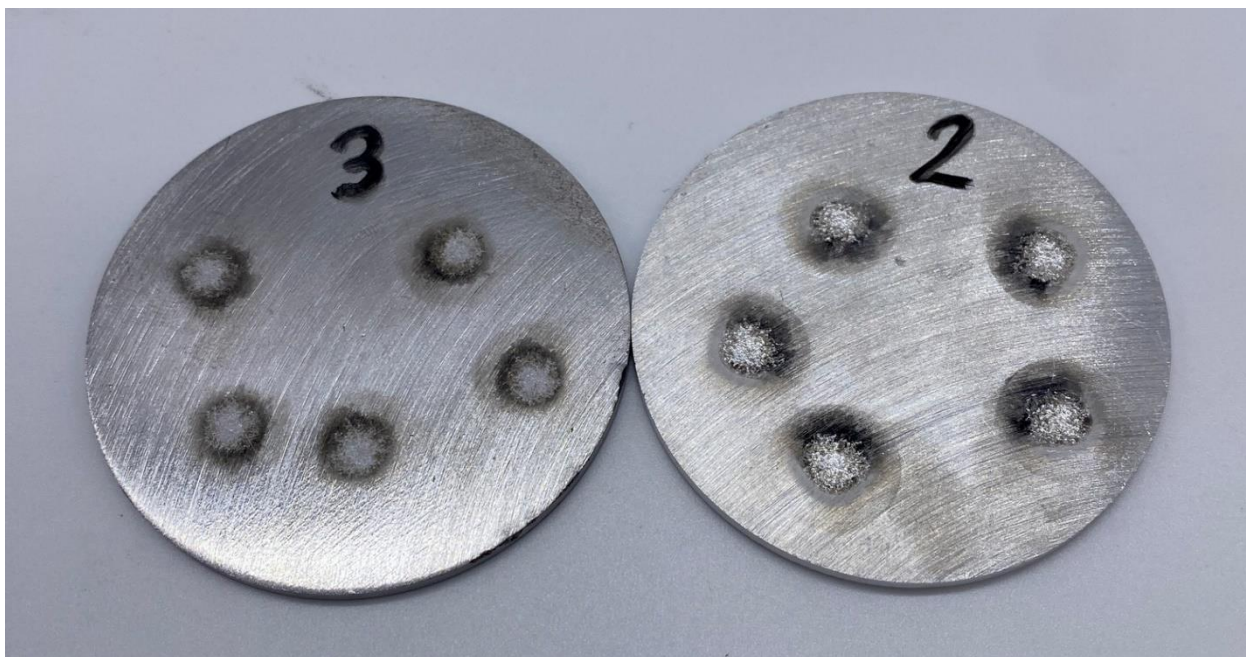


Рисунок 3.9 – Образцы, подверженные спектрометрии:  
образец слева – сталь 20, образец справа – АМг5

В результате были установлены следующие химические составы образцов (табл. 3.1).

Таблица 3.1 – Результаты спектрометрии

| Образец | Массовая доля, % |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|---------|------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|         | C                | Ni    | Cr    | Cu    | Mo    | Ti    | As    | P     | S     | Mn    | Si    | V     | Al    | Mg    | Fe    | Sn    | Pb    |
| 1       | 0,225            | 0,128 | 0,159 | 0,174 | 0,020 | 0,001 | 0,014 | 0,014 | 0,006 | 0,401 | 0,188 | 0,002 | 0,001 | 0,000 | -     | 0,000 | 0,000 |
| 2       | 0,000            | 0,000 | 0,011 | 0,085 | 0,000 | 0,029 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,400 | 0,413 | 0,000 | -     | 5,742 | 0,495 | 0,002 | 0,005 |

В результате проведенного спектрометрического исследования было установлено, что образец 1 выполнен из стали 20, а образец 2 – из алюминиевого сплава АМг5, что соответствует заявленному.

Помимо определения химического состава материала, также определялись механические свойства материала, такие как предел прочности, предел текучести и относительное удлинение.

Для определения механических характеристик заготовка была разрезана на образцы для испытания на растяжение. Испытание на растяжение проводилось на испытательной машине Р-5 с записью диаграммы «Нагрузка-перемещение» для стали 20 (рис. 3.10) и АМг5 (рис. 3.11). В результате испытаний на растяжение по ГОСТ 1497-84 (Металлы. Методы испытаний на растяжение) [78] были получены механические характеристики материалов (табл. 3.2).

Таблица 3.2 – Механические характеристики материалов

| Метка                   | Предел<br>текучести,<br>МПа | Предел<br>прочности,<br>МПа | Относит.<br>удлинение, % |
|-------------------------|-----------------------------|-----------------------------|--------------------------|
| <b>Сплав АМг5</b>       |                             |                             |                          |
| 1-1                     | 133,8                       | 279,0                       | 17,5                     |
| 1-2                     | 142,7                       | 297,4                       | 17,5                     |
| 1-3                     | 153,6                       | 318,9                       | 15,0                     |
| <b>Среднее значение</b> | <b>143,4</b>                | <b>298,4</b>                | <b>16,7</b>              |
| <b>Сталь 20</b>         |                             |                             |                          |
| 3-1                     | 267,3                       | 471,2                       | 27                       |
| 3-2                     | 292,2                       | 475,0                       | 30                       |
| 3-3                     | 308,2                       | 477,6                       | 35                       |
| <b>Среднее значение</b> | <b>289,2</b>                | <b>474,6</b>                | <b>31</b>                |

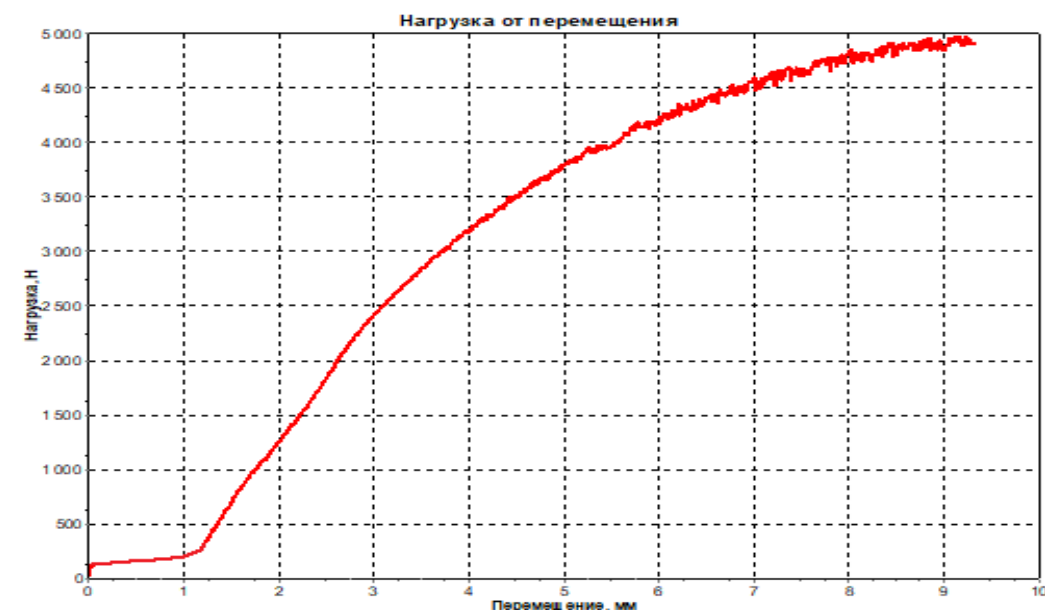


Рисунок 3.10 – Диаграмма «Нагрузка-перемещение» для образцов из стали 20

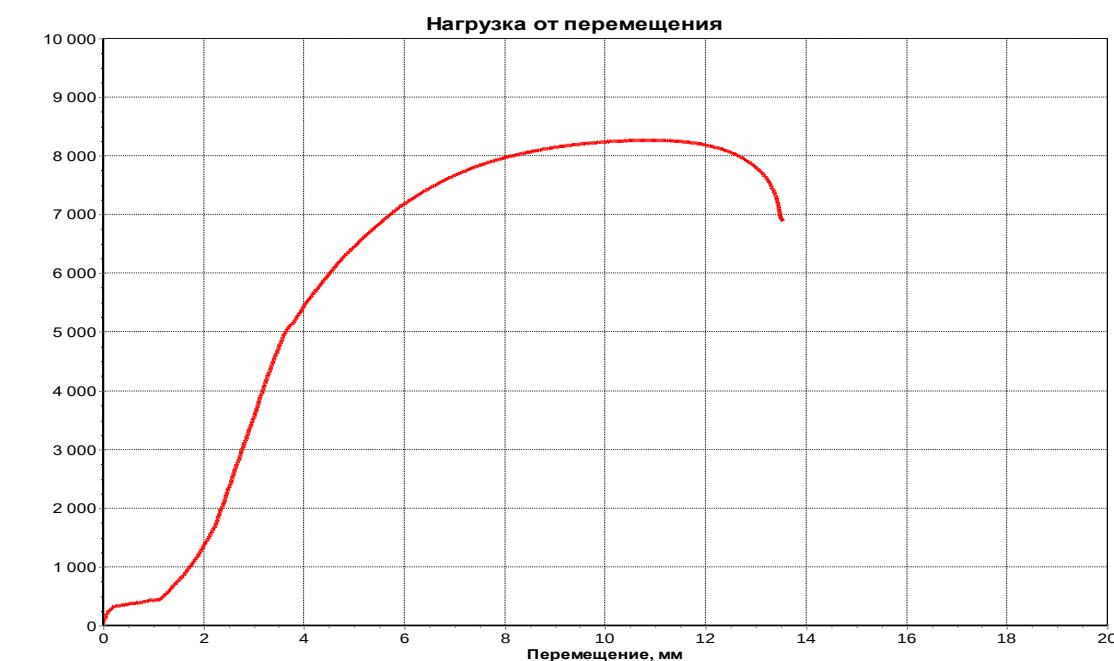


Рисунок 3.11 – Кривая «Нагрузка-перемещение» для образцов из  
алюминиевого сплава АМг5

С учетом полученных данных при обработке графиков «Нагрузка-перемещение» и механических характеристик были определены истинные напряжения и интенсивности деформаций при линейном напряжённом состоянии и получены кривые упрочнения исследуемых образцов (рис. 3.12 и 3.13).

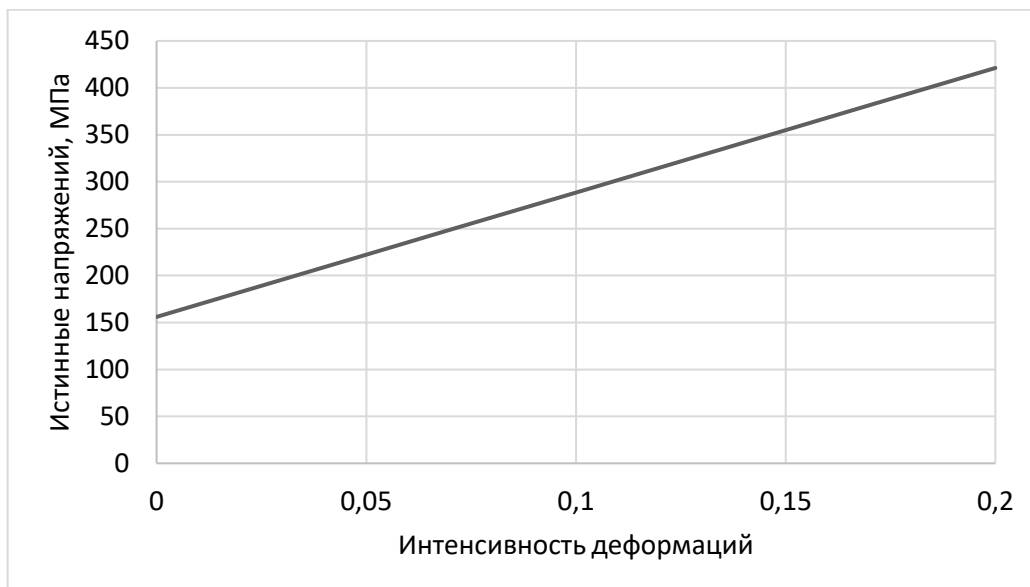


Рисунок 3.12 – Кривая упрочнения для сплава АМг5

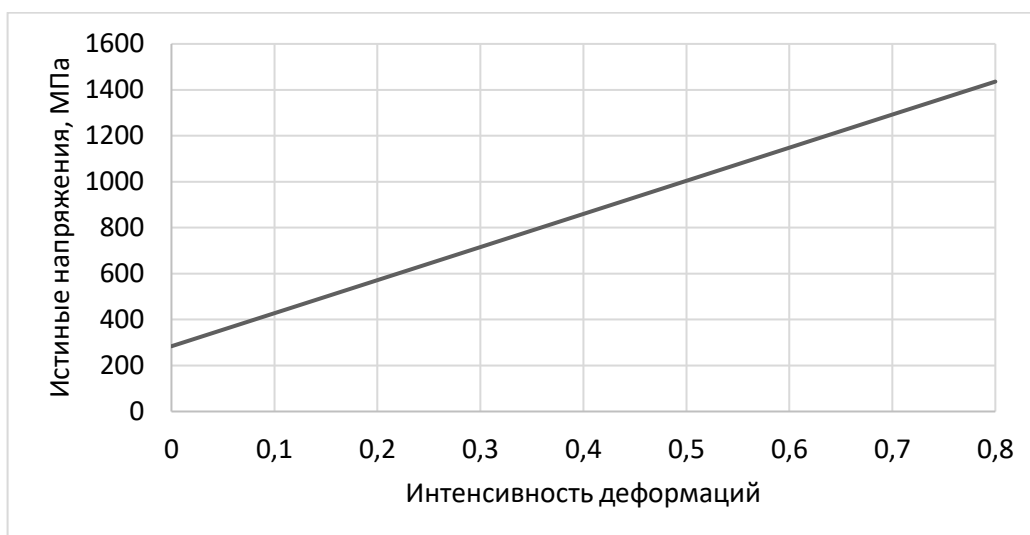


Рисунок 3.13 – Кривая упрочнения для стали 20

Была проведена аппроксимация кривых упрочнения материалов по линейной зависимости для алюминиевого сплава АМг5:

$$\sigma_i = 156 + 1326\epsilon_i,$$

и для стали 20:

$$\sigma_i = 284 + 1440\epsilon_i.$$

Полученные характеристики механических свойств материалов были использованы при моделировании процесса рифления в программном комплексе QForm.

### **3.4 Общие сведения об эксперименте**

Эксперимент проводился с помощью описанной выше штамповой оснастки. В результате компьютерного моделирования было установлено, что технологическая сила, требуемая для проведения рифления на глубину 1 мм у заготовок из стали 20, составляет не более 200 кН. Для проведения экспериментов использовалась испытательная машина ГМС-50 с поверенной регистрирующей аппаратурой и развиваемым усилием 490 кН.

Процесс рифления внутренней поверхности оболочки осуществлялся в несколько операций:

- 1 – Рифление с одним направлением рифлей.
- 2 – Съём изделия. Извлечение рабочей оправки с углом подъёма  $30^\circ$  из заготовки и установка на инструментальный стержень рабочей оправки с углом подъёма  $-30^\circ$ .
- 3 – Рифление со встречным направлением рифлей.
- 4 – Съём изделия. Извлечение рабочей оправки из заготовки.

Штамповка проводилась при нормальном температурном режиме. В качестве смазки использовалось машинное масло.

Цилиндрическая оболочка (заготовка) укладывалась в корпус до контакта с выталкивателем, корпус закреплялся на нижней плите. Нижняя плита устанавливалась на столе пресса, а верхняя часть экспериментального штампа – в ползуне пресса. Соосность верхней и нижней частей осуществлялась с помощью центрирующего кольца.

Целью экспериментов является исследование технологических параметров штамповки и их влияние на получение спиральных клиновых рифлей изделия и оценка их качества.

### 3.5 Получение рифлей на внутренней поверхности заготовки из алюминиевого сплава АМг5

При рифлении внутренней поверхности использовалась заготовка, представленная на рисунке 3.14 [65].



Рисунок 3.14 – Аллюминиевые заготовки для нанесения рифлей

Были использованы 3 типа рабочих оправок, описанные ранее. В результате эксперимента установлено, что при использовании рабочей оправки типа I наблюдается значительный фронтальный и боковой наплыв материала (рис. 3.15), что также было выявлено при компьютерном моделировании, описанном ранее.



а)



б)

Рисунок 3.15 – Полуфабрикат, полученный при рифлении рабочей оправкой типа I, и имеющий значительный фронтальный и боковой наплывы материала: а – по результатам эксперимента, б – по результатам моделирования

Далее использовалась рабочая оправка типа II, однако в ходе эксперимента произошла поломка спиральных выступов рабочей оправки.

Наилучшие результаты показало использование рабочей оправки типа III. В результате были получены спиральные клиновые рифли одного направления (левые) на заготовке (рис. 3.16). После завершения съема заготовки с рабочей оправки была проведена визуальная оценка как состояния инструмента, так и качества спиральных рифлей, которая показала, что спиральные клиновые выступы и их заходная часть на рабочей оправке не были повреждены, а спиральные рифли на внутренней поверхности заготовки соответствовали заданным форме и размерам.



Рисунок 3.16 – Полуфабрикат, полученный при первом рифлении рабочей оправкой типа III

Также не было выявлено фронтального наплыва, боковой наплыв при этом был незначительным.

После этого на инструментальном стержне была закреплена аналогичная рабочая оправка, но с противоположным углом подъема спиральных клиновых выступов, который составлял  $-30^\circ$ . После рифления был проведен съем рабочей оправки с полученной детали (рис. 3.17).



Рисунок 3.17 – Деталь с сеткой рифлей, полученная при рифлении рабочей оправкой типа III

Визуальная оценка полученного полуфабриката показала, что по форме и размерам он соответствует требуемому изделию. Также не было выявлено фронтального наплыва, боковой наплыв при этом был незначительным.

Графики технологической силы всех операций при рабочем ходе и при съёме приведены на рисунке 3.18. Из графиков видно, что имеются три участка: 1 – участок интенсивного роста нагрузки на начальной стадии внедрения клиновых выступов рабочей оправки в заготовку; 2 – участок, характеризуемый постоянством нагрузки в процессе формирования спиральных рифлей; 3 – участок интенсивного уменьшения нагрузки в процессе выхода рабочей оправки из заготовки. Следует отметить, что при выполнении второй операции формирования спиральных клиновых рифлей противоположной направленности на участке 2 наблюдается периодическое

колебание нагрузки, вызванное перемещением клиновых выступов рабочей оправки по сформированным на первой операции рифлям. При удалении рабочей оправки из заготовки в процессе съема сила съема была более чем в три раза меньше силы формирования рифлей и не вызывала затруднений.

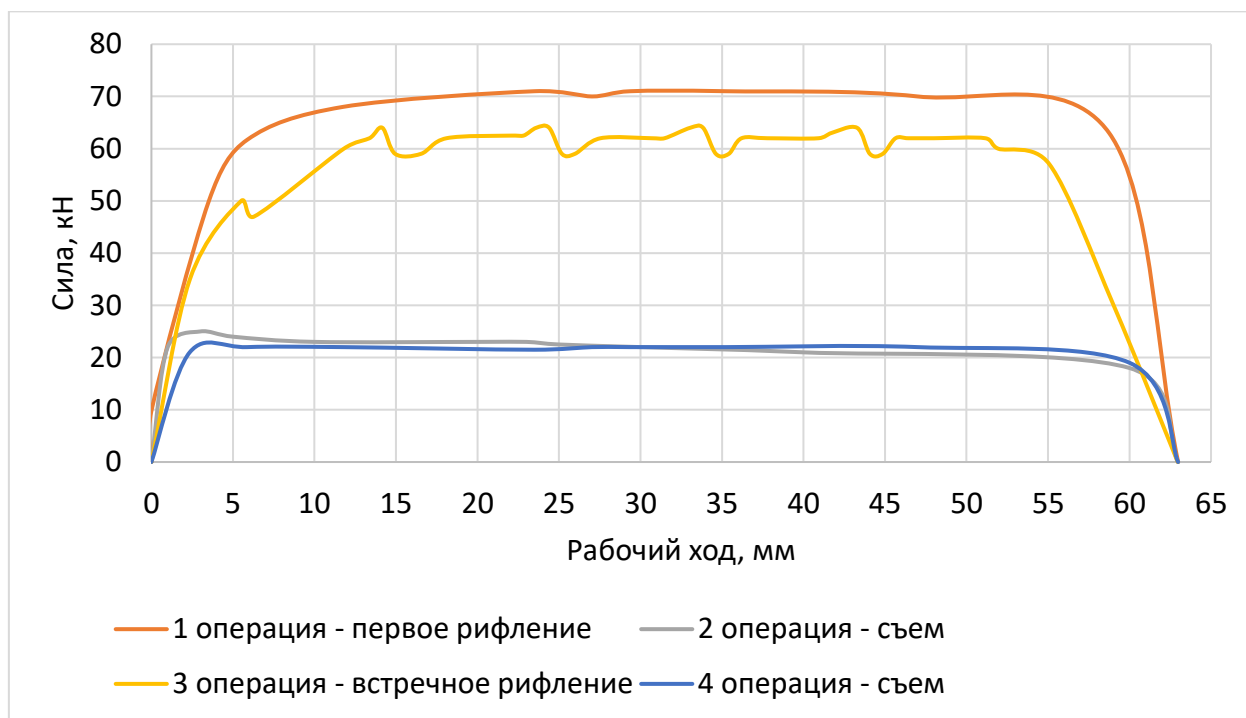


Рисунок 3.18 – График технологической силы, полученный по результатам эксперимента ( $Z=0,5$  мм,  $h=1$  мм)

В результате серии операций рифления внутренней поверхности алюминиевой заготовки (рис. 3.19) были выявлены максимальные технологические силы рифления и съема (табл. 3.3). Для определения силы съема рабочая оправка, установленная на инструментальном стержне, была ориентирована своими выступами по ранее изготовленным рифлям в заготовке, после чего осуществлялся рабочий ход с регистрацией силы.

Таблица 3.3 – Технологическая сила рифления

| Операция                       | Образец   | Сила, кН     |
|--------------------------------|-----------|--------------|
| Рифление первое<br>(левое)     | Образец 1 | 68,65        |
|                                | Образец 2 | 71,1         |
|                                | Образец 3 | 72,07        |
|                                | Образец 4 | 71,58        |
| <b>Среднее значение</b>        |           | <b>70,85</b> |
| Съем первый                    | Образец 1 | 20,59        |
|                                | Образец 2 | 22,75        |
|                                | Образец 3 | 21,08        |
|                                | Образец 4 | 21,57        |
| <b>Среднее значение</b>        |           | <b>21,5</b>  |
| Рифление встречное<br>(правое) | Образец 1 | 59,8         |
|                                | Образец 2 | 51,1         |
|                                | Образец 3 | 53,4         |
|                                | Образец 4 | 62,1         |
| <b>Среднее значение</b>        |           | <b>56,6</b>  |
| Съем второй                    | Образец 1 | 19,9         |
|                                | Образец 2 | 20,6         |
|                                | Образец 3 | 20,3         |
|                                | Образец 4 | 19,6         |
| <b>Среднее значение</b>        |           | <b>20,1</b>  |

В результате проведения серии экспериментов установлено, что сила съема намного меньше силы рифления как на первой операции (в 3,4 раза), так

и на второй (в 2,5 раза). Также установлено, что на встречном рифлении происходит колебание силы, связанное с тем, что при встречном рифлении инструмент попадает в область уже сформированных первоначальных рифлей.

В итоге установлено, что средняя сила нанесения рифлей (левых) составляет 70,85 кН, средняя сила съема для первой и второй операций – 21,5 и 20,1 кН соответственно. Средняя сила встречного (правого) рифления составила 56,6 кН. Разница в силах между первым и вторым рифлением объясняется тем, что после первой операции рифления происходит небольшая раздача (калибровка) заготовки в корпусе, а на второй операции такой раздачи уже нет. Так, сила рифления на первой и второй операции отличается более чем на 20%, сила же съема на первой и второй операции практически не отличается.



Рисунок 3.19 – Полуфабрикаты с рифлями одного направления и детали с сеткой рифлей

При получении всех полуфабрикатов и деталей не наблюдаются фронтальный наплыв и значительный боковой наплыв. По завершении испытаний визуальная оценка инструмента не выявила деформационных изменений или повреждений.

В связи с локальным формоизменением в местах формируемых рифлей важной частью исследования является определение силы, приходящейся на 1 спиральный клиновой выступ. Установлено, что при формировании рифлей по разработанному способу на технологическую силу оказывают влияние количество спиральных клиновых выступов, глубина их внедрения. При рифлении заготовки из алюминиевого сплава АМг5 на глубину 1 мм средняя сила, которая приходится на 1 спиральный клиновой выступ, при рифлении составляет 2,53 кН, при съеме – 0,75 кН.

### **3.6 Получение рифлей на внутренней поверхности заготовки из стали 20**

Аналогичные эксперименты были проведены для заготовок, выполненных из стали 20 [64]. При рифлении внутренней поверхности использовалась заготовка, аналогичная по размерам и форме алюминиевой и представленная на рисунке 3.20.



Рисунок 3.20 – Стальная заготовка для нанесения рифлей

Использовалась рабочая оправка типа III, были нанесены рифли одного направления (левые) на заготовке (рис. 3.21) на ГМС-50 с записью графиков «нагрузка-перемещение». Далее проводился съем полуфабриката с рабочей оправки также с записью графиков «нагрузка-перемещение». После завершения съема заготовки была проведена визуальная оценка инструмента, которая показала, что спиральные клиновые выступы и их заходная часть не получили повреждений.



Рисунок 3.21 – Стальной полуфабрикат, полученный при первом рифлении рабочей оправкой типа III

Визуальная оценка полученного полуфабриката показала требуемое качество получаемых рифлей в изделии, заключающееся в соответствии полученного по форме и размерам изделия требуемому. Также не было выявлено фронтального наплыва, боковой наплыв при этом был незначительным.

После этого рабочая оправка была заменена на такую же, но с противоположным углом подъема спиральных клиновых выступов, который

составлял  $-30^\circ$ . После рифления был проведен съём рабочей оправки с полученной детали (рис. 3.22).



Рисунок 3.22 – Стальная деталь с сеткой рифлей, полученная при рифлении рабочей оправкой типа III

Визуальная оценка показала высокое качество полученного изделия, заключающееся в его соответствии требуемым форме и размерам. Также не было выявлено фронтального наплыва, боковой наплыв при этом был незначительным.

В процессе эксперимента установлены силы рифлений и съема (табл. 3.4) и получены кривые «нагрузка-перемещение» при получении сетки рифлей (рис. 3.23).

Таблица 3.4 – Технологические силы рифления стальной заготовки, кН

| Операция           | Эксперимент №1 | Эксперимент №2 | Среднее значение |
|--------------------|----------------|----------------|------------------|
| Рифление первое    | 130            | 125,1          | <b>127,55</b>    |
| Съём               | 21,57          | 20,9           | <b>21,23</b>     |
| Рифление встречное | 122,58         | 119,2          | <b>120,89</b>    |
| Съём               | 19,6           | 20,1           | <b>19,85</b>     |

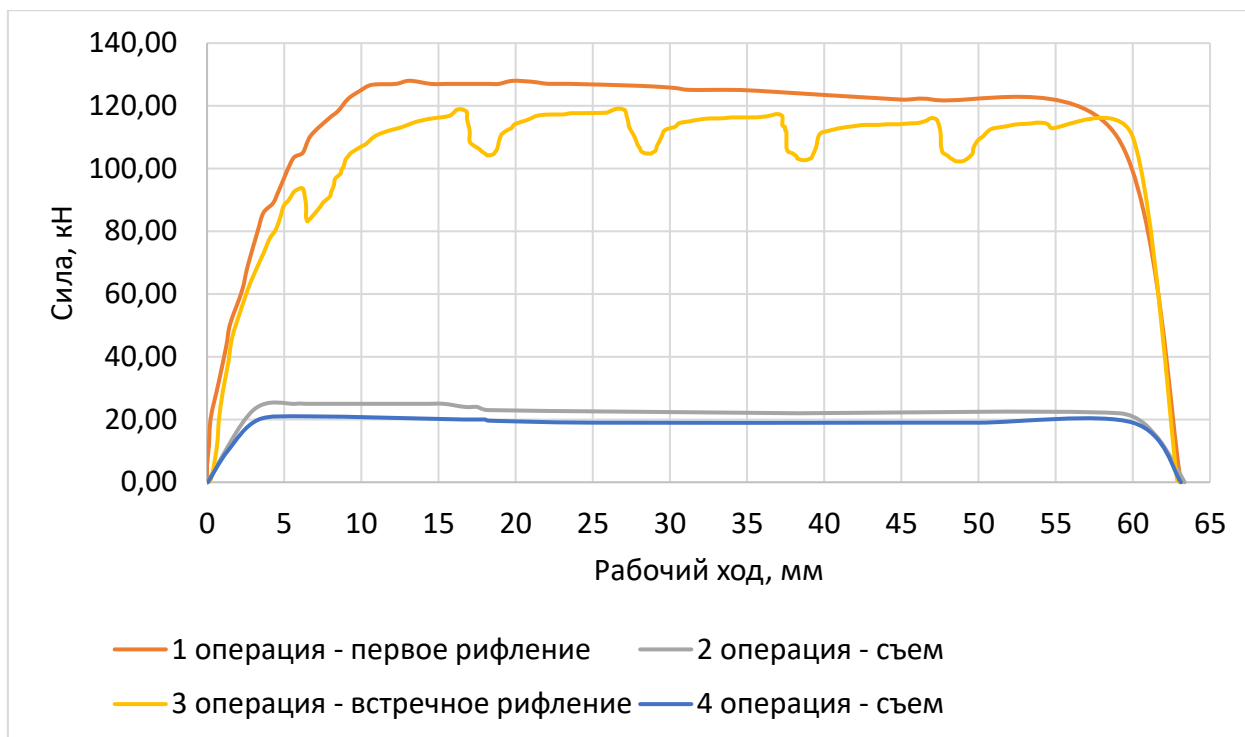


Рисунок 3.23 – График технологической силы при рифлении стального образца при эксперименте №1 ( $Z=0,5$  мм,  $h=1$  мм)

В результате установлено, что сила съема намного меньше силы рифления как на первой операции, так и на второй. Также установлено, что на встречном рифлении происходит колебание силы, связанное с тем, что при встречном рифлении инструмент попадает в область уже сформированных первоначальных рифлей.

На рисунке 3.24 приведена фотография заготовки, полуфабриката первой операции и детали с сеткой рифлей, что иллюстрирует стабильность технологического процесса.

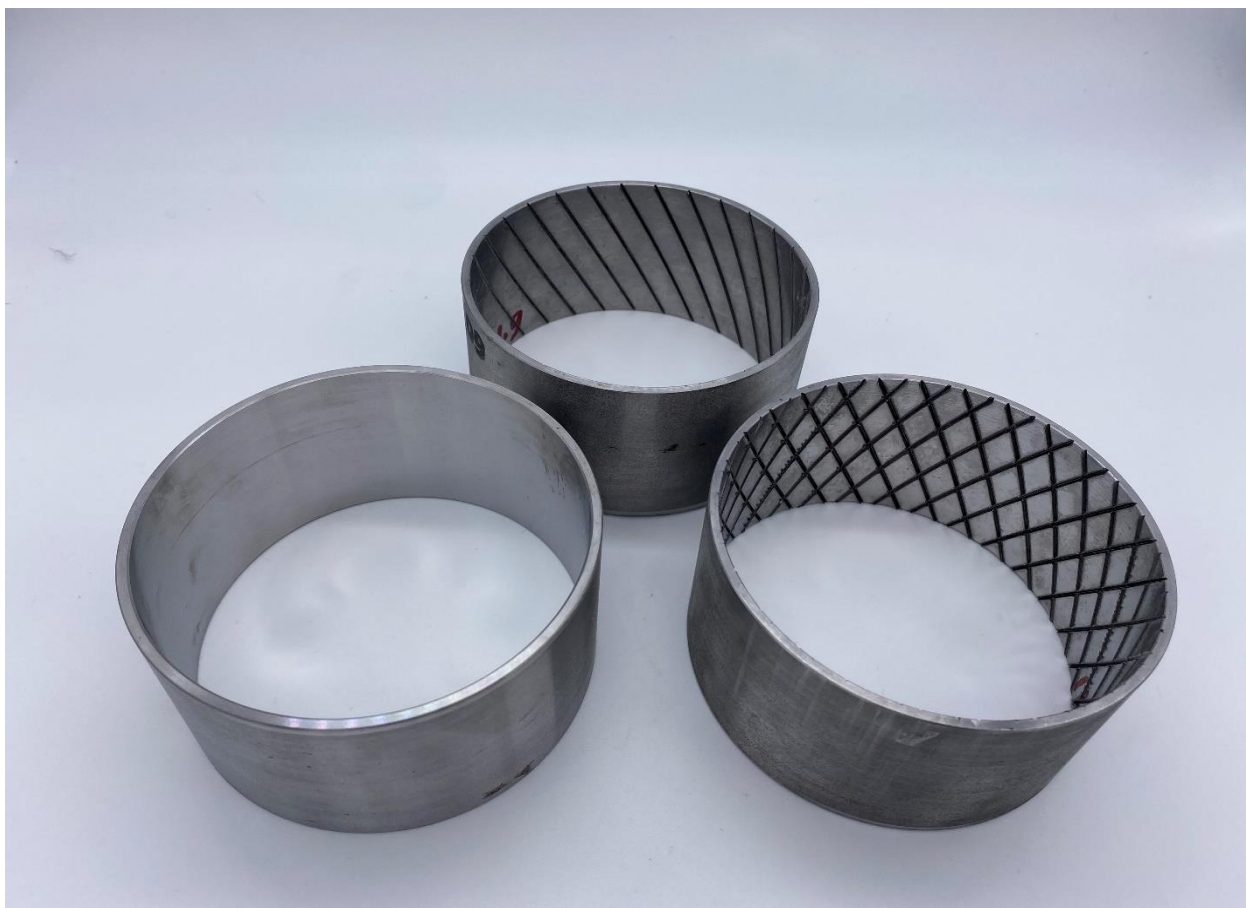


Рисунок 3.24 – Заготовка, полуфабрикат с рифлями одного направления и деталь с сеткой рифлей

При получении всех полуфабрикатов и деталей не наблюдается фронтального и бокового наплывов. В ходе визуальной оценки инструмента по завершении испытаний никаких деформационных изменений или повреждений не обнаружено.

При рифлении заготовки из стали 20 на глубину 1 мм средняя сила, которая приходится на 1 спиральный клиновой выступ, при рифлении составляет 4,6 кН, при съеме – 0,75 кН.

При сравнении графиков нагрузки (рис. 3.17 и рис. 3.22) видно, что по характеру изменения нагрузки, возникающие при формировании спиральных рифлей в заготовках из сплава АМг5 и стали 20, аналогичны, а по величине – зависят от механических свойств материала заготовки. По результатам экспериментов максимальная нагрузка при формировании рифлей на

стальных заготовках при равенстве их геометрических размеров в 1,9 раза больше, чем для заготовок из алюминиевого сплава АМг5, тогда как при съёме изделия с рабочей оправки сила съёма практически одинакова и зависит только от сил трения между поверхностью рабочей оправки и заготовок. Таким образом, механические свойства материала заготовки оказывают существенное влияние на силу при локальном деформировании, что следует учитывать при разработке технологического процесса. При этом на силу съёма механические свойства не оказывают влияния.

### **3.7 Сравнение теоретических и экспериментальных данных**

Для оценки адекватности математической модели было проведено моделирование процесса рифления с заготовкой, имеющей механические характеристики, полученные в результате испытаний, описанных ранее. Так, были проведены 2 компьютерных моделирования рифления алюминиевой и стальной заготовки рабочей оправкой типа III при зазоре между заготовкой и впадинами рабочей оправки 0,5 мм и глубиной рифления 1 мм.

Результаты экспериментальных и теоретических исследований приведены в таблице 3.5 и на рисунке 3.25.

Таблица 3.5 – Сравнение теоретических и экспериментальных данных

| Операция                       | Теоретическая сила<br>по компьютерному<br>моделированию, кН | Экспериментально<br>полученная сила,<br>кН | Разница, % |
|--------------------------------|-------------------------------------------------------------|--------------------------------------------|------------|
| <b>Алюминиевый сплав АМг5</b>  |                                                             |                                            |            |
| Рифление первое<br>(левое)     | 77                                                          | 70,85                                      | 8          |
| Съем первый                    | 24,5                                                        | 21,5                                       | 12         |
| Рифление встречное<br>(правое) | 65                                                          | 56,6                                       | 15         |
| Съем второй                    | 22                                                          | 20,1                                       | 9          |
| <b>Сталь 20</b>                |                                                             |                                            |            |
| Рифление первое<br>(левое)     | 123                                                         | 127,55                                     | 5          |
| Съем первый                    | 24,7                                                        | 21,23                                      | 14         |
| Рифление встречное<br>(правое) | 131                                                         | 120,89                                     | 8          |
| Съем второй                    | 21                                                          | 19,85                                      | 6          |

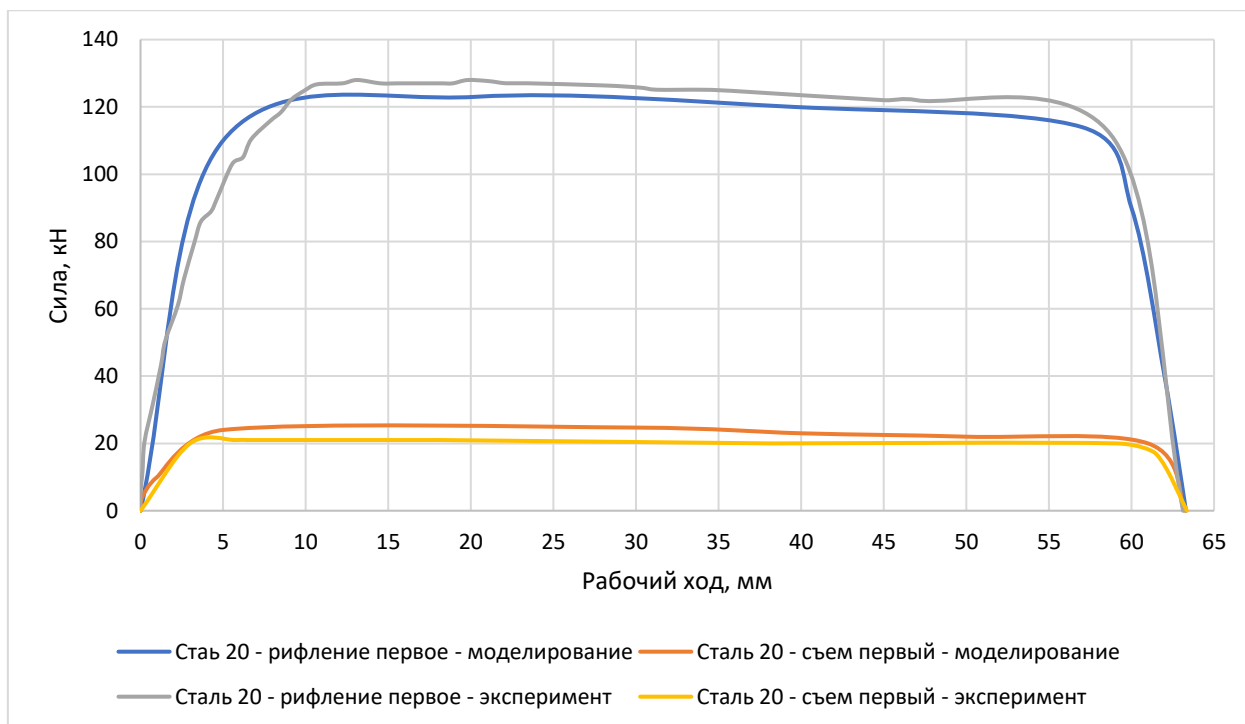


Рисунок 3.25 – График силы рифления

Установлено, что расхождение экспериментальных и расчетных данных не превышает 15%, что позволяет судить об адекватности математической модели. Кроме того, показано, что характер изменения силы при компьютерном моделировании и эксперименте совпадает.

### 3.8 Выводы по нанесению рифлей на внутренней поверхности цилиндрической оболочки

На основе результатов компьютерного моделирования и экспериментальных исследований можно сделать следующие выводы:

1. Экспериментально доказано, что технология формирования рифлей локальным пластическим формоизменением позволяет получать рифли на внутренней поверхности оболочек из разных металлических материалов и сплавов, включая черные и цветные металлы.

2. Установлено, что при использовании рабочей оправки типа I наблюдается значительный фронтальный и боковой наплыв материала.

Рифление оправкой типа II показало низкую стойкость при внедрении инструмента в металл. При получении всех полуфабрикатов и деталей при рифлении оправкой типа III не наблюдается фронтального и значительного бокового наплывов. В ходе визуальной оценки инструмента по завершении испытаний никаких деформационных изменений или повреждений не обнаружено. Рекомендуется использовать оправку типа III.

3. Установлено, что компьютерное моделирование и экспериментальное исследование по значениям силовых характеристик отличаются не более чем на 15% для всех операций, что свидетельствует об адекватности компьютерной модели. Экспериментально подтверждено, что компьютерное моделирование позволяет оценить не только силовые характеристики процесса, но и качество получаемого изделия.

4. Механические свойства материала заготовки оказывают существенное влияние на нагрузку при локальном деформировании. Максимальная нагрузка при формировании рифлей на заготовках из стали 20 в 1,9 раза больше, чем для заготовок из алюминиевого сплава АМг5. Также установлено, что на встречном рифлении происходит колебание силы, связанное с тем, что при встречном рифлении инструмент попадает в область уже сформированных первоначальных рифлей.

5. Установлено, что сила съема намного меньше силы рифления как на первой операции, так и на второй и не зависит от механических свойств материала заготовок.

6. На рабочей оправке следует выполнять как заходную, так и выходную части спирального выступа одинаковой формы для обеспечения не только рифления, но и облегченного съема изделий.

## **4 НОВЫЕ СПОСОБЫ И УСТРОЙСТВА ДЛЯ НАНЕСЕНИЯ РИФЛЕЙ**

Ниже приводятся ряд способов и устройств, которые позволяют усовершенствовать разработанный метод рифления.

#### **4.1 Нанесение рифлей на внутренней поверхности оболочки локальным деформированием**

##### **4.1.1 Изготовление внутренней сетки рифлей принудительным вращением инструмента**

При формировании рифлей локальным пластическим формоизменением в корпусе инструментом ограниченной длины происходит вращение инструмента под действием осевых сил, а использование принудительного вращения инструмента позволит снизить технологическую силу процесса. В связи с этим было разработано новое устройство нанесения рифлей (рис. 4.1) на внутренней поверхности, которое отличается возможностью обеспечения принудительного вращения верхней части инструмента относительно нижней [79-80].

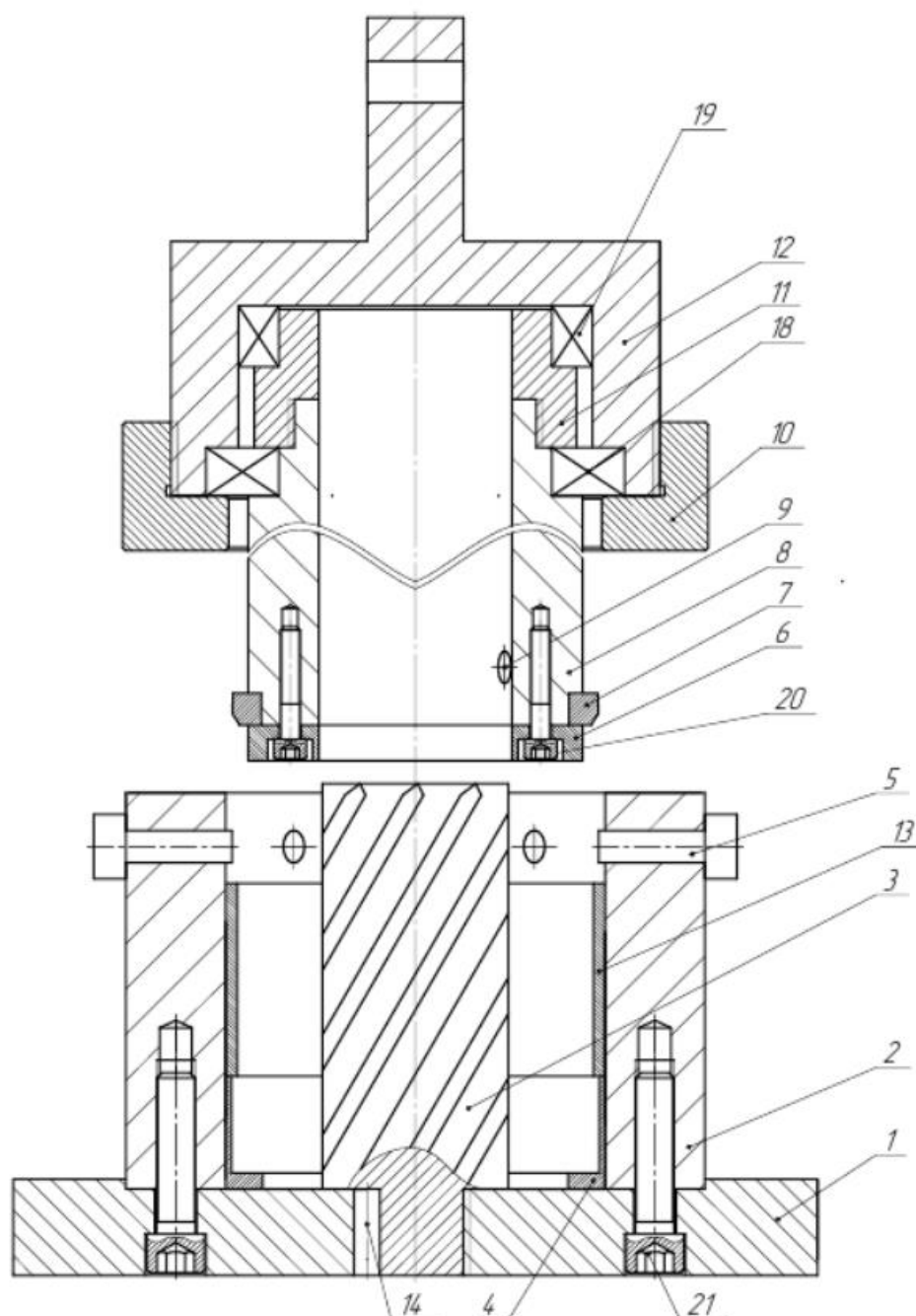


Рисунок 4.1 – Нанесение внутренней сетки рифлей принудительным вращением инструмента

Цилиндрическая оболочка (13) устанавливается на выталкиватель (4) в корпус (2), который закреплен винтами (21) на нижней плите (1). В нижнюю плиту (1) закручивается направляющая колонка (3) и во избежание самопроизвольного поворота устанавливается шпонка (14). Для свинчивания полуфабриката после проведения операции в нижней части конструкции

применяются выдвижные упоры (5). В верхней части устройства, в хвостовик (12), который крепится к ползуну пресса, запрессовываются подшипники (19 и 18), которые необходимы для обеспечения вращения подпятника (11). В подпятник (11) заворачивается инструментальный стержень (8), на котором с помощью крышки (6) и винтов (20) закрепляется рабочая оправка (7), на которой нанесены многозаходные спиральные клиновые выступы, требуемые для нанесения рифлей. Для обеспечения принудительного вращения в инструментальном стержне (8) предусмотрено отверстие, в котором устанавливается направляющий выступ (9). Подпятник (11) с инструментальным стержнем (8) и подшипниками (18 и 19) закреплены в хвостовике (12) с помощью крышки хвостовика (10). Направляющая колонка (3) имеет несколько винтовых углублений, которые необходимы для того, чтобы направляющий выступ (9) при рабочем ходе пресса попадал в винтовую поверхность и осуществлял принудительное вращение. Для формирования сетки рифлей на второй операции предусмотрена направляющая колонка (15, не показана), которая имеет противоположный угол подъема. Также на второй операции рабочая оправка (7) меняется на другую, имеющую противоположный угол подъема спиральных клиновых выступов. Выталкиватель (4) необходим, чтобы рабочая оправка могла продеформировать всю высоту заготовки (13). При обратном ходе после нанесения рифлей первого направления осуществляется обратный ход и происходит свинчивание заготовки (13) с рабочей оправки (7). Направляющие выступы (9) должны быть расположены осесимметрично для равномерного распределения нагрузки.

Преимуществом устройства является принудительное вращение инструмента рифления, что позволяет облегчить формирование требуемой внутренней поверхности, устранить возникновение бокового наплыва при рифлении.

#### **4.1.2 Нанесение внутренней сетки рифлей совмещением операций рифления и раздачи**

Нанесение рифлей локальным деформированием в корпусе [61] или с принудительным вращением [79] имеет недостаток, а именно высокую металлоемкость корпуса, который необходимо изготавливать большим по высоте, чем заготовка.

Для уменьшения металлоемкости конструкции был разработан новый метод нанесения рифлей на внутренней поверхности оболочки [81-82]. Метод (рис. 4.2, а) заключается в одновременном продольном перемещении рабочей оправки, ее вращении под действием создаваемого формоизменением крутящего момента и раздачи, которая происходит под воздействием рабочей оправки. При этом в отличие от предыдущего метода локального деформирования отсутствует корпус, и заготовка способна свободно увеличиваться по диаметру.

Цилиндрическую оболочку с толщиной стенки  $S_0$  и диаметром  $D_{30}$  устанавливают в устройство для раздачи (рис. 4.2, а) и центрируют по инструментальному стержню с рабочей оправкой (1) со спиральными клиновыми выступами, который имеет возможность вращения вокруг своей оси. При рабочем ходе инструментальный стержень с рабочей оправкой (1) входит в контакт с внутренней полостью цилиндрической оболочки и осуществляют ее раздачу с диаметра  $D_{30}$  до  $D_{31}$  (рис. 4.2 б). Возникает сила раздачи, в результате чего не только увеличивается диаметр внутренней полости до значений  $D_{31}=(1,05\dots 1,2)D_{30}$ , но и происходит внедрение клиновых спиральных выступов в поверхность цилиндрической оболочки. При получении рифлей происходит вращение инструментального стержня с рабочей оправкой (1) вокруг своей оси. Для этого инструментальный стержень с рабочей оправкой (1) закрепляется в устройстве с возможностью осевого вращения, например, в подшипниках. После окончания формоизменения, при

обратном ходе инструментального стержня с рабочей оправкой (1), цилиндрическую оболочку снимают с одновременным вращением вокруг своей оси инструментального стержня с рабочей оправкой (1). При этом опытным путем определяют соотношение глубины рифлей и высоты спиральных клиновых выступов рабочей оправки (1), которые зависят от свойств материала заготовки и ее геометрических размеров. Высоту спиральных выступов, как правило, принимают равной  $(0,005 \dots 0,025)D_{30}$ .

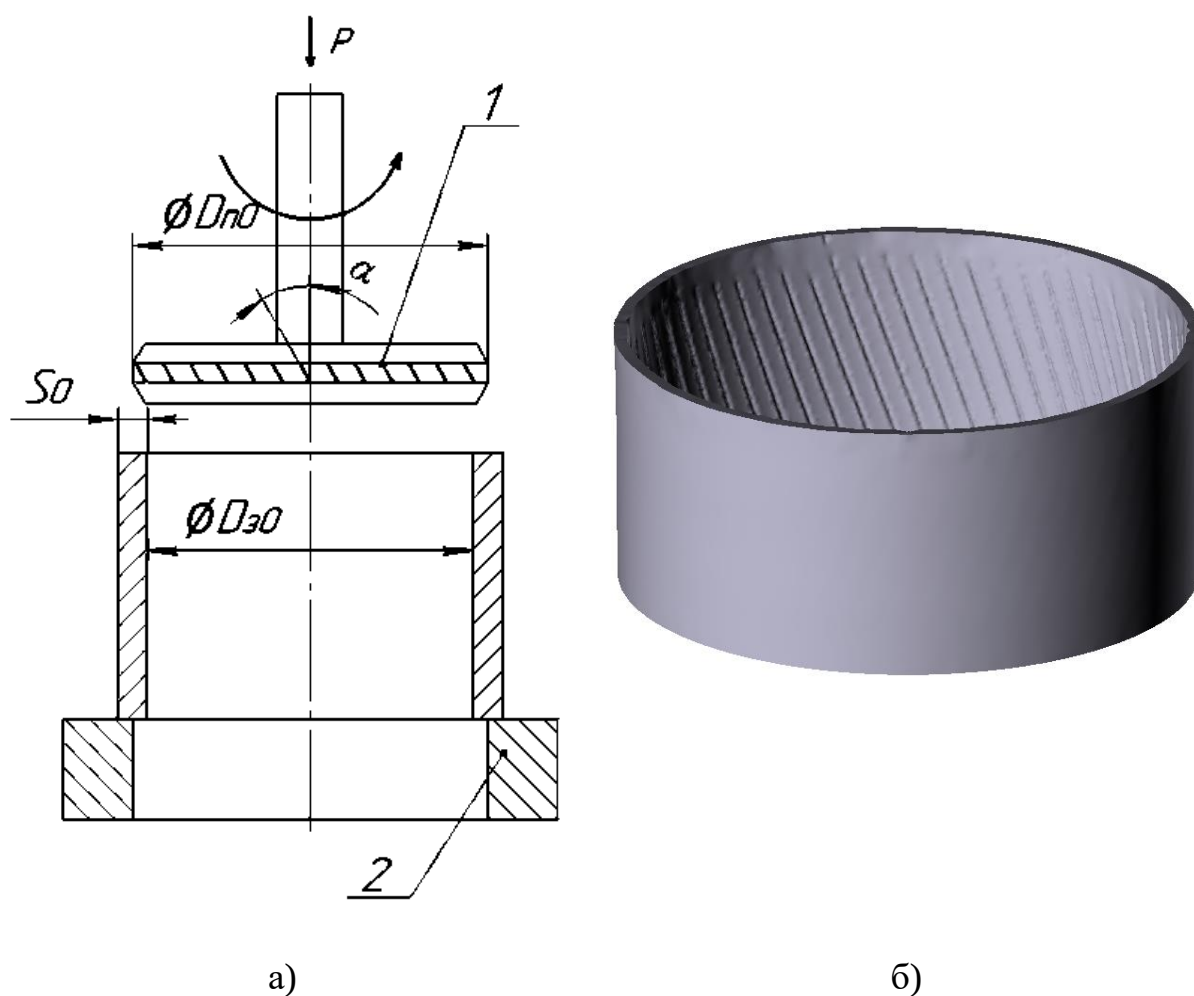


Рисунок 4.2 – Рифление с процессом одновременной раздачи на первой операции: а – схема процесса, б – полуфабрикат

На второй операции (рис. 4.3, а) в устройство устанавливается инструментальный стержень с рабочей оправкой (3) диаметром  $D_{п1} = (1,05 \dots 1,2)D_{п0}$  и осуществляются раздача полуфабриката до диаметра  $D_{32}$  и нанесение рифлей с противоположным углом подъема (рис. 4.3, б).

Возникает сила раздачи, в результате чего не только увеличивается диаметр внутренней полости до значений  $(1,05 \dots 1,2)D_{з1}$ , но и происходит внедрение клиновых спиральных выступов в поверхность цилиндрической оболочки с образованием сетки рифлей ромбовидной формы. Далее производится съем цилиндрической оболочки аналогично первой операции. При необходимости для получения требуемых геометрических размеров цилиндрической оболочки производится ее калибровка.

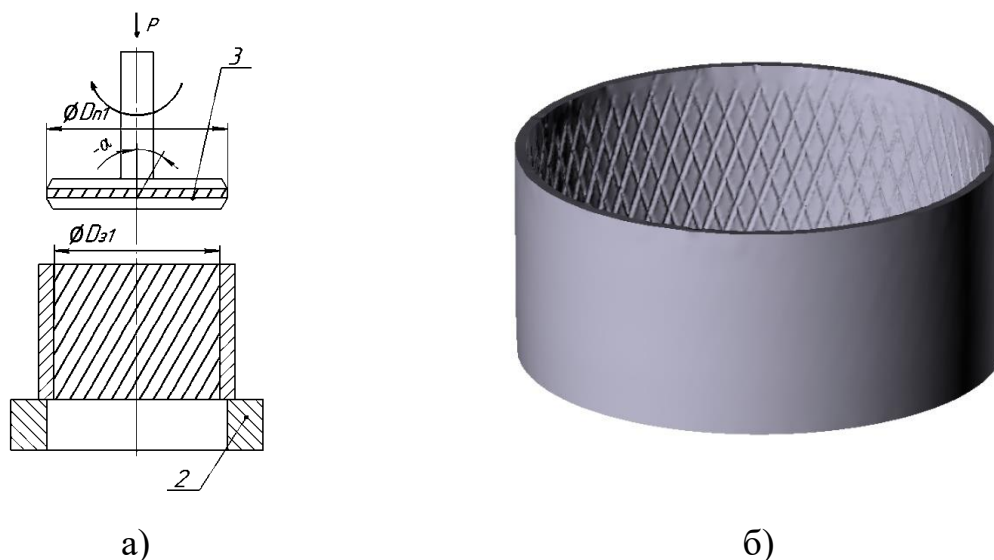


Рисунок 4.3 – Вторая операция для формирования сетки рифлей с раздачей:  
а – схема процесса, б – полуфабрикат

Для осуществления способа было разработано устройство (рис. 4.4), которое содержит: нижнюю плиту (1), в полости которой расположены пружины (3) с радиально перемещающимися подпружиненными секторами (2), служащими для центрирования и установки цилиндрической оболочки (4). На нижней плите (1) с помощью стоек (8) и гаек (9) установлена плита (7), в которой располагается съемник (5) с пружинами (6). В верхней части устройства имеется хвостовик (15), в котором на подшипниках (14 и 16) закреплена державка (13) с установленной на ней рабочей оправкой (11) и крышкой (10). Устройство на второй операции содержит другую рабочую оправку (12). В исходном положении (рис. 4.4) в устройство устанавливается

цилиндрическая оболочка (4) или заготовка с дном, закрепленная в нижней плите (1) подпружиненными секторами (2) с пружинами (3). Расстояние между нижней плитой (1) и плитой (7) отрегулировано по высоте цилиндрической оболочки (4) и обеспечивает ее установку и съем. В устройстве на державку (13) установлена рабочая оправка (11), на рабочей поверхности которой выполнены спиральные клиновые выступы, высота которых равна  $(0,005...0,025)D_{з1}$  для раздачи и нанесения рифлей. При этом высота рабочей оправки (11) принята равной  $(0,15...0,5)D_{з1}$  и имеет заходной и выходной конусные участки, а также цилиндрический участок. Рабочая оправка (11) в державке (13) закрепляется крышкой (10). Державка (13) в хвостовике (15) установлена на подшипниках (14 и 16), что обеспечивает её поворот вокруг оси в процессе нанесения рифлей на внутренней поверхности оболочки (4).

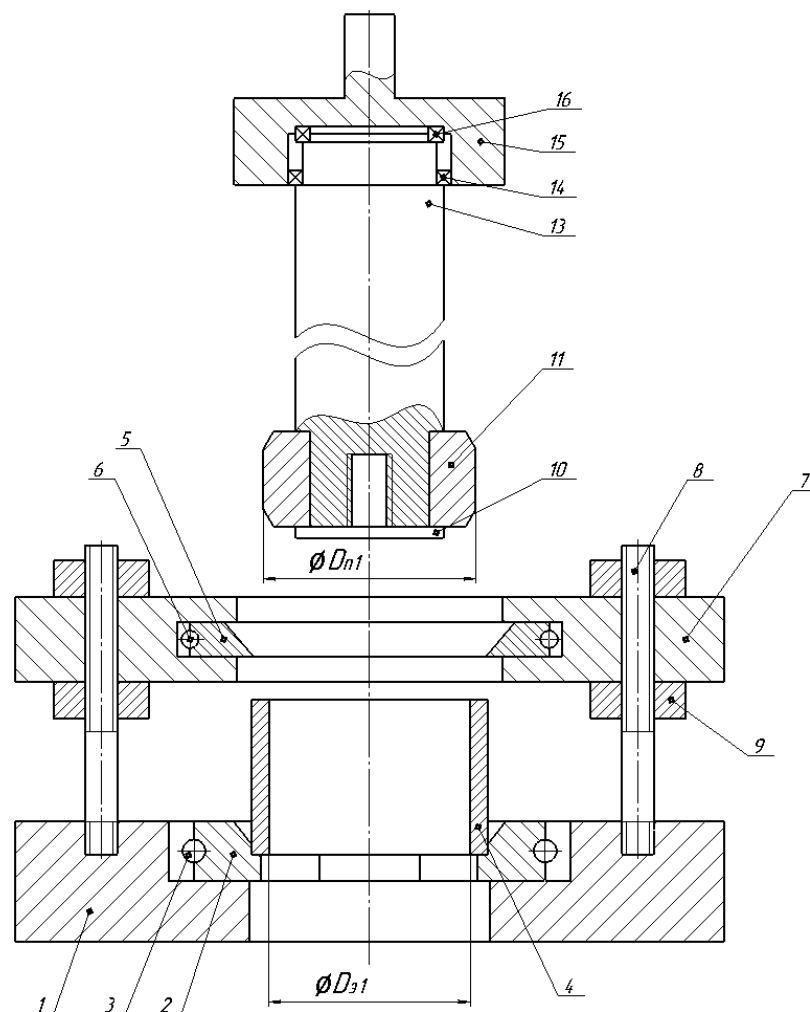


Рисунок 4.4 – Схема устройства для реализации способа рифления с раздачей

Устройство работает следующим образом. Цилиндрическая оболочка (4) устанавливается на подпружиненные сектора (2) с пружинами (3) и центрируется по рабочей оправке (11). Включается пресс и производится перемещение рабочего инструмента через съемник (5) с пружинами (6). Рабочая оправка (11) заходной частью входит в полость цилиндрической оболочки (4), осуществляя раздачу цилиндрической оболочки (4) и одновременное нанесение спиральных рифлей на внутренней поверхности, при этом происходит поворот державки (13) совместно с рабочей оправкой (11) и крышкой (10). Сила раздачи значительно меньше, чем в прототипе. После окончания рабочего хода цилиндрическая оболочка (4) перемещается вверх совместно с крышкой (10), рабочей оправкой (11), державкой (13) и упирается в съемник (5) с пружинами (6). Происходит процесс свинчивания цилиндрической оболочки (4) с рабочей оправки (11) при вращении державки (13) с рабочей оправкой (11) вокруг оси. При этом получается полуфабрикат, имеющий спиральные рифли и увеличенный внутренний диаметр  $D_{32}$ .

На второй операции в устройство устанавливается рабочая оправка (12) для раздачи и нанесения рифлей, на рабочей полости которой выполнены спиральные клиновые выступы с противоположным углом подъема, высота которых равна  $(0,005...0,025)D_{32}$ . Диаметр  $D_{п2}$  рабочей оправки (12) для раздачи и нанесения рифлей больше диаметра  $D_{п1}$  рабочей оправки (11), при этом спиральные клиновые выступы рабочей оправки (12) для раздачи и нанесения рифлей выполнены с углом подъёма с противоположным направлением. Полуфабрикат диаметром  $D_{32}$ , имеющий рифли на внутренней поверхности, устанавливается в подпружиненные сектора (2), в процессе рабочего хода осуществляется его раздача с диаметра  $D_{32}$  до  $D_{33}$  и формирование сетки рифлей ромбовидной формы с вращением державки (13), рабочей оправки (12) и крышки (10). После окончания рабочего хода цилиндрическая оболочка (4) движется вверх совместно с инструментом и упирается в съемник (5), происходит процесс свинчивания цилиндрической

оболочки (4) с рабочей оправки (12) с последующим ее удалением из рабочей зоны. При необходимости полученный полуфабрикат подвергается калибровке по наружному или внутреннему диаметру с сохранением сетки рифлей.

Преимуществом данного метода является меньшая металлоемкость конструкции, что позволяет использовать его для нанесения сетки рифлей на крупногабаритных цилиндрических оболочках.

#### **4.1.3 Формирование рифленой поверхностью с совмещением операции дорнования**

При рифлении описанными выше методами возможно образование наплывов материала в зоне рифления, поэтому для устранения этой возможной проблемы, а также для лучшей калибровки внутренней поверхности изделия был разработан новый способ рифления [83].

Задачей изобретения является повышение качества изделия путем обеспечения точности внутренней рифленой поверхности цилиндрической оболочки, устранения возможных наплывов на ее поверхности.

Способ (рис. 4.5) осуществляется следующим образом. В качестве примера используется заготовка – цилиндрическая оболочка (3), на внутренней поверхности которой диаметром  $D_3$  необходимо нанести сетку рифлей. Обычно цилиндрические оболочки (3) изготавливаются по 12...14 квалитету точности.

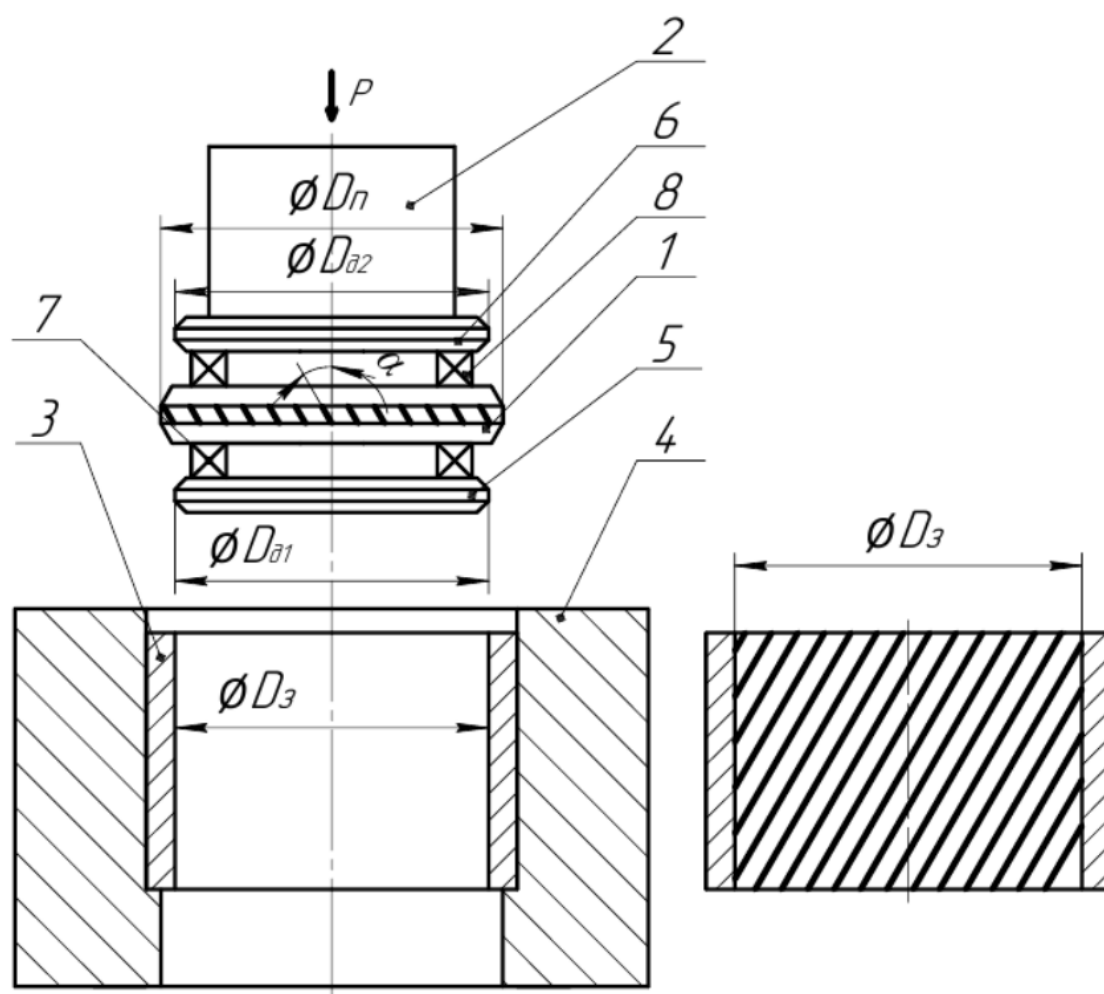


Рисунок 4.5 – Способ изготовления сетки рифлей на внутренней поверхности цилиндрической оболочки

В связи с этим поле допуска диаметра заготовки  $D_3$  внутренней полости цилиндрической оболочки (3) играет существенную роль при получении рифлей заданной глубины, что может сказаться на эксплуатационных характеристиках готовой детали из-за непостоянства значения глубины рифлей. Поэтому возникает необходимость в повышении точности внутреннего диаметра полости цилиндрической оболочки (3) до 7...8 квалитета. Для этого в контейнер (4) устанавливается цилиндрическая оболочка (3) с внутренним диаметром  $D_3$ . Изготовление сетки рифлей ромбовидной формы на внутренней поверхности цилиндрической оболочки (3) осуществляется за две операции, на каждой из которых проводится нанесение спиральных клиновых рифлей. Формирование рифлей

производится с помощью инструментального стержня (2), на рабочей ступени которого закреплены верхний дорн (6), упорный подшипник (8), рабочая оправка (1), упорный подшипник (7) и нижний дорн (5). На поверхности рабочей оправки (1) находятся спиральные клиновые выступы с углом подъема  $\alpha$ , верхний упорный подшипник (8) и нижний упорный подшипник (7). Инструментальный стержень (2) закреплён на ползуне прессы соосно с контейнером (1) и цилиндрической оболочкой (3). На первой операции при рабочем ходе нижний дорн (5) входит в полость цилиндрической оболочки (3) и осуществляет поверхностное пластическое деформирование внутренней полости. Для поверхностного пластического деформирования рабочий диаметр  $D_{д1}$  нижнего дорна (5) выполнен больше, чем внутренний диаметр  $D_3$  цилиндрической оболочки (3) на величину  $D_{д1} = D_{вн} > D_3$ . В результате дорнования внутренней поверхности цилиндрической оболочки (3) увеличивается точность её внутреннего диаметра  $D_{вн}$ . При дальнейшем рабочем ходе инструментального стержня (2) рабочая оправка (1), входит в контакт с внутренней поверхностью диаметром  $D_{вн}$  цилиндрической оболочки (3) и производит формирование рифлей на требуемую глубину  $h$ . Рабочая оправка (1) закреплена на инструментальном стержне (2) с возможностью осевого поворота и контактирует с верхним упорным подшипником (8). В этом случае одновременно с продольным перемещением происходит её вращение вокруг оси. Для уменьшения энергозатрат высота клиновых выступов выполнена больше, чем глубина рифлей  $h$ , на величину зазора  $z$ , который определяется опытным путём. На внутренней поверхности цилиндрической оболочки (3) образуются спиральные клиновые рифли глубиной  $h$ , возможно образование наплывов, которые выглаживаются верхним дорном (6) диаметром  $D_{д2} = D_{вн}$  при дальнейшем рабочем ходе. После окончания формоизменения при обратном ходе инструментальный стержень (2) удаляется из цилиндрической оболочки (3) с одновременным вращением вокруг своей оси рабочей оправки (1), контактирующей с нижним упорным подшипником (7). Нижний дорн (5) и верхний дорн (6) производят дорнование

и устраняют наплывы на внутренней поверхности, обеспечивая требуемое качество поверхности. При этом диаметры верхнего дорна (6) и нижнего дорна (5) составляют  $D_{д1} = D_{д2} = D_{вн}$ . Диаметр рабочей оправки (1) по вершине выступов равен  $D_{п} = D_{вн} + 2h$ , а по основанию клиновых выступов  $D_{вн} - z$ .

На второй операции на инструментальном стержне (2) закрепляется верхний дорн (6), затем верхний упорный подшипник (8), рабочая оправка (9), нижний упорный подшипник (7) и нижний дорн (5). При этом на рабочей оправке (9) выполнены клиновые спиральные выступы с противоположным углом подъема  $-\alpha$ . Вторая операция осуществляется так же, как и первая, формируя на внутренней поверхности сетку рифлей ромбовидной формы.

В результате сочетания операций дорнования и формирования сетки рифлей ромбовидной формы была получена цилиндрическая оболочка с ровной поверхностью без наплывов и с требуемой точностью рифленых канавок по глубине, то есть поставленная задача выполнена.

Для реализации способа было разработано устройство [84-85] (рис. 4.6), которое содержит: контейнер (1), в котором расположен выталкиватель (2). В верхней части контейнера (1) размещен съёмник (5), подпружиненный пружинами (4), и крышка (6). При этом цилиндрическая оболочка (3) устанавливается на выталкивателе (2). Верхняя часть устройства содержит инструментальный стержень (9), на рабочей ступени которого расположены верхний дорн (11), верхний упорный подшипник (12), рабочая оправка (8), нижний упорный подшипник (13), нижний дорн (10) и винт (7), с помощью которого нижний дорн (10) крепится к инструментальному стержню (9). Инструментальный стержень (9) крепится в ползуне прессы (не показан). Внешние диаметры верхнего дорна (11) и нижнего дорна (10) равны внутреннему диаметру  $D_{вн}$  готовой цилиндрической оболочки (3). На рабочей оправке нанесены спиральные клиновые выступы. Рабочая оправка (8) устанавливается в инструментальный стержень (9) с возможностью поворота вокруг оси между верхним дорном (11) и нижним дорном (12) и контактирует с нижним упорным подшипником (13) и верхним упорным подшипником (11).

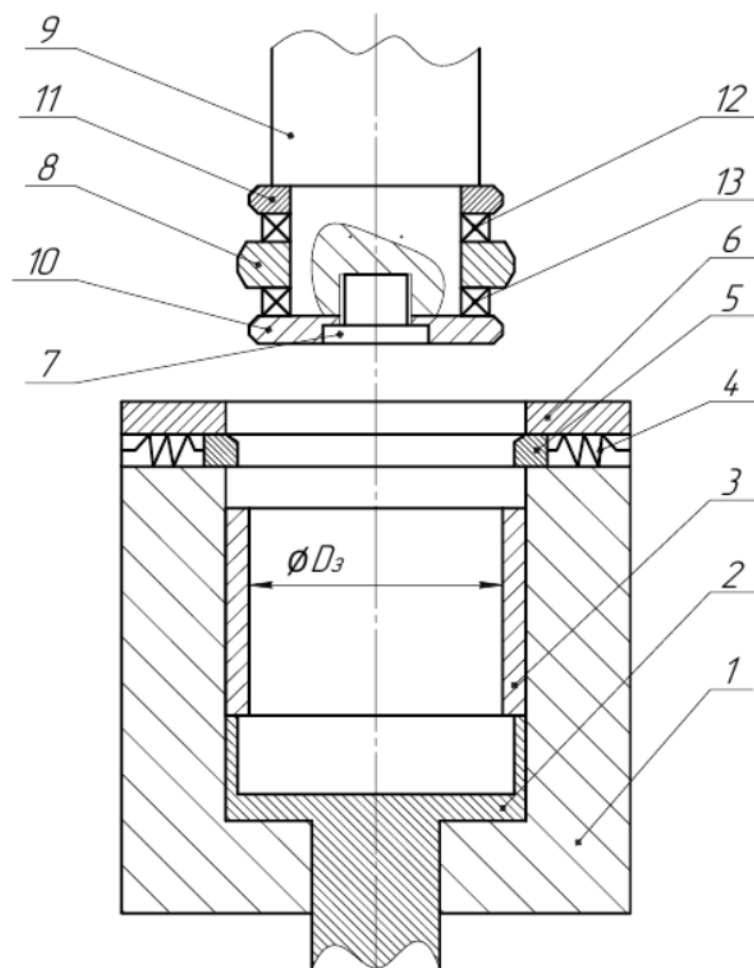


Рисунок 4.6 – Устройство для получения сетки рифлей на внутренней поверхности оболочки с дорнованием

Для выполнения второй операции используется рабочая оправка (14), имеющая противоположный угол подъема спиральных клиновых выступов.

Преимуществом устройства является улучшение качества внутренней поверхности цилиндрической оболочки с сеткой рифлей путем повышения точности размеров и устранения наплывов.

## 4.2 Нанесение рифлей на внешней и на внутренней поверхностях

Выше были рассмотрены конструкции и методы нанесения рифлей на внешней поверхности оболочки или на внутренней, однако в ряде случаев требуется изготовление деталей, на внешней и внутренней поверхностях которых, требуются рифли. Операций одновременного нанесения и

внутренних, и наружных рифлей на данный момент не известно, что приводит к необходимости разработки новых способов и устройств. К новому способу можно отнести изготовление сетки рифлей на обеих сторонах цилиндрической заготовки путем продавливания заготовки в полость между рабочей оправкой и матрицей, на которых нанесены специальные клиновые спиральные выступы [86-87].

Новый способ заключается в выполнении двух операций. На первой (см. рис. 4.7) осуществляется продавливание заготовки (5) в полость между рабочей оправкой (2) и матрицей (1). На матрице и оправке нанесены спиральные клиновые выступы (3 и 4) с углом подъёма  $\alpha$ . При продавливании происходит вращение заготовки вокруг своей оси во время формообразования рифлей локальным деформированием. В результате как на внешней, так и на внутренней поверхности оболочки образуются углубления, рифли. При этом выступы инструментов изготавливаются с требуемой формой и размерами. Далее после продавливания заготовки через зазор между инструментами производится съём полуфабриката.

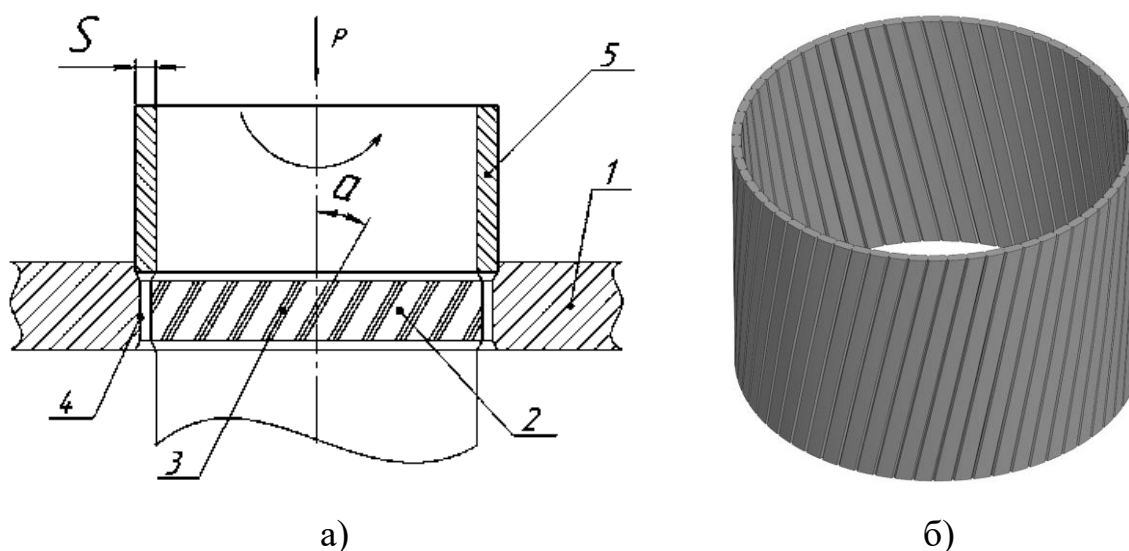


Рисунок 4.7 – Первая операция одновременного рифления и наружной поверхности, и внутренней: а – схема операции, б – получаемый полуфабрикат

Вторая операция (см. рис. 4.8) проходит аналогично первой, однако матрица и оправка выполнены с выступами, имеющими противоположный угол наклона  $-\alpha$ . Это необходимо для формирования именно сетки рифлей.

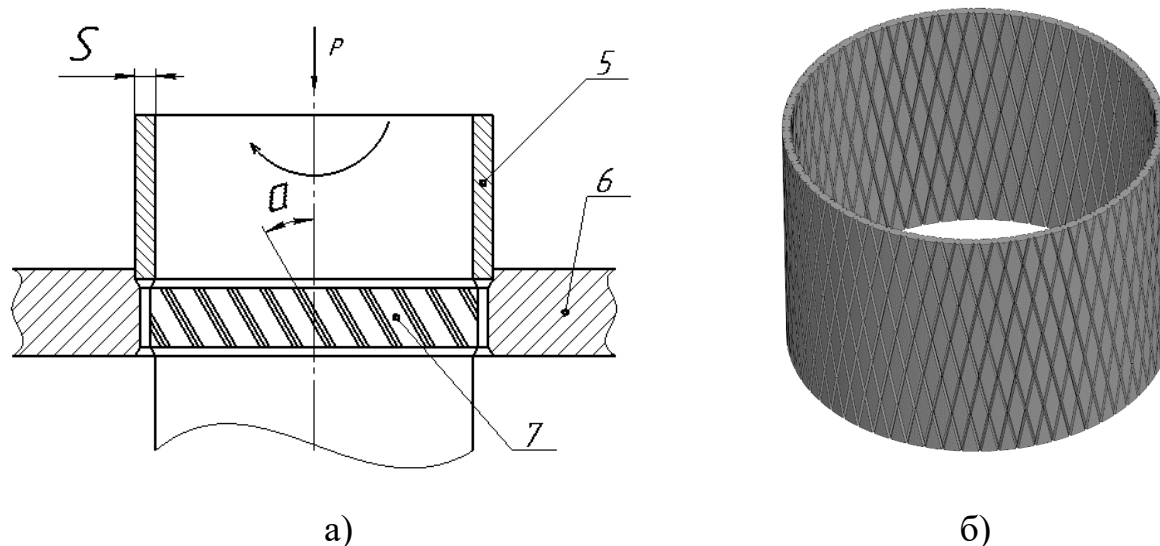


Рисунок 4.8 – Вторая операция одновременного рифления наружной и внутренней поверхностей: а – схема операции, б – получаемый полуфабрикат

Для реализации данного метода требуется специальное устройство [88], решающее проблему одновременного нанесения рифлей с обеих сторон заготовки. Конструкция рассматриваемого устройства приведена на рисунке 4.9.

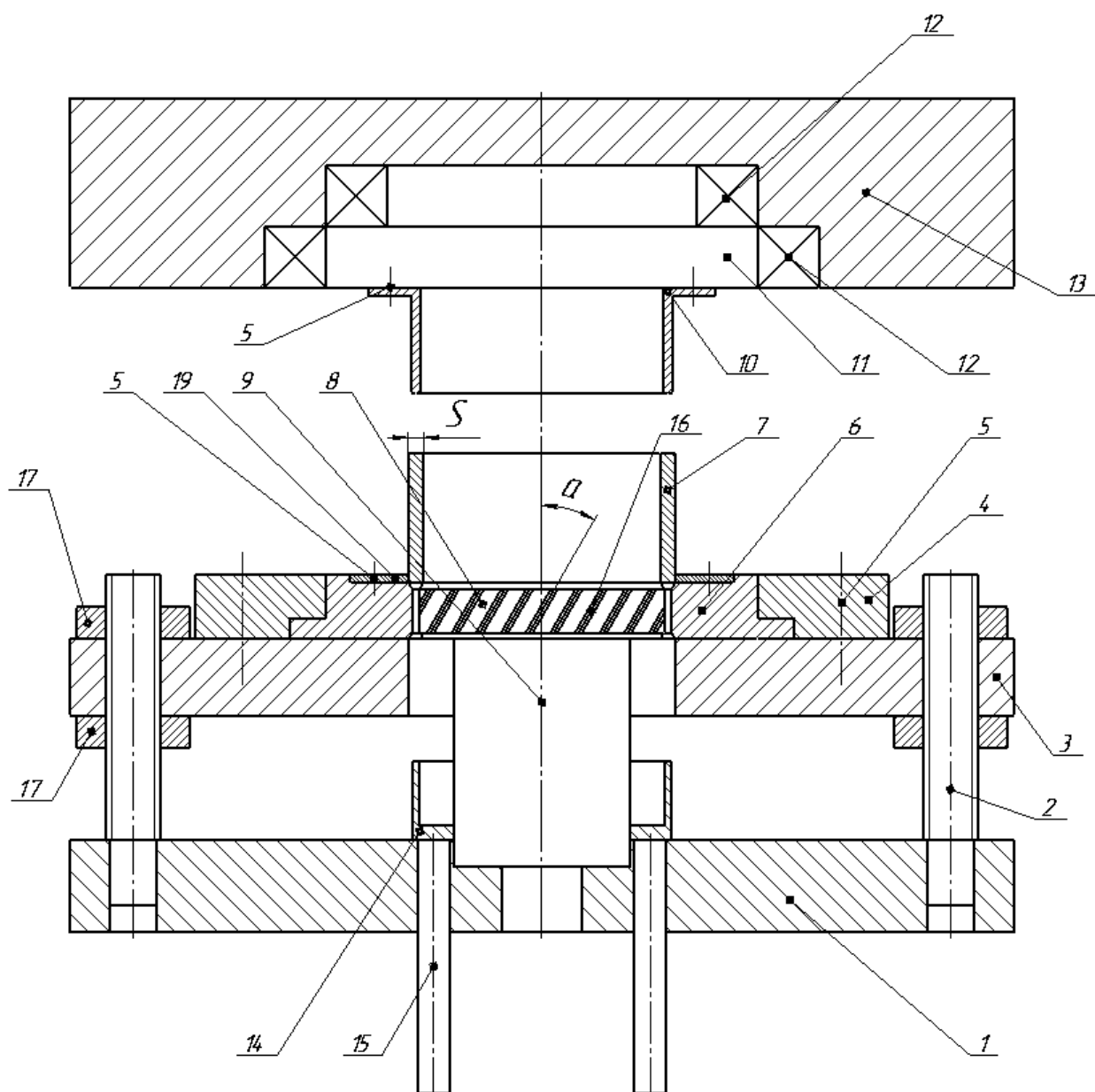


Рисунок 4.9 – Конструкция нового устройства для одновременного рифления и наружной поверхности, и внутренней

В сущности, конструкция устройства предполагает, что с помощью толкателя (10) осуществляется продавливание заготовки (7) между рабочей оправкой (8) и матрицей (6). На матрице и на рабочей оправке нанесены спиральные выступы, при внедрении которых в заготовку осуществляется нанесение рифлей. Толкатель установлен вместе с основанием (11) на подшипниках (12), что позволяет им свободно поворачиваться вокруг своей оси, что необходимо для снижения силы трения при рифлении, так как заготовка поворачивается вокруг своей оси под действием формоизменяющих

сил. Таким образом, при рифлении толкатель и заготовка поворачиваются вместе. Для осуществления съема полуфабриката из устройства применяются нижние толкатели (15) и выталкиватели (14), которые при движении вверх выталкивают заготовку обратно через отверстие между рабочей оправкой и матрицей.

Рабочая оправка крепится на инструментальный стержень (9), который в свою очередь закреплен в нижней плите. Помимо этого, в нижней плите установлены стойки (2), на которых с помощью гаек (17) удерживается промежуточная плита (3). Стойки также выполняют функцию регулирования расстояния между промежуточной и нижней плитами, в чем существует необходимость, если заготовки имеют разную высоту. На промежуточной плите в матрицедержателе (6) установлена матрица с выступами. Для центрирования заготовки в конструкции устройства предусмотрено центрирующее кольцо (19), закреплённое винтами (5).

Сетка рифлей получается в устройстве при смене рабочей оправки и матрицы на такие же, но с противоположным углом подъема спиральных выступов и совершении второй операции. Таким образом, получение сетки рифлей возможно в данном устройстве за две последовательные операции. На рисунке 4.10 приведена трехмерная модель того, как расположены между собой рабочая оправка и матрица.

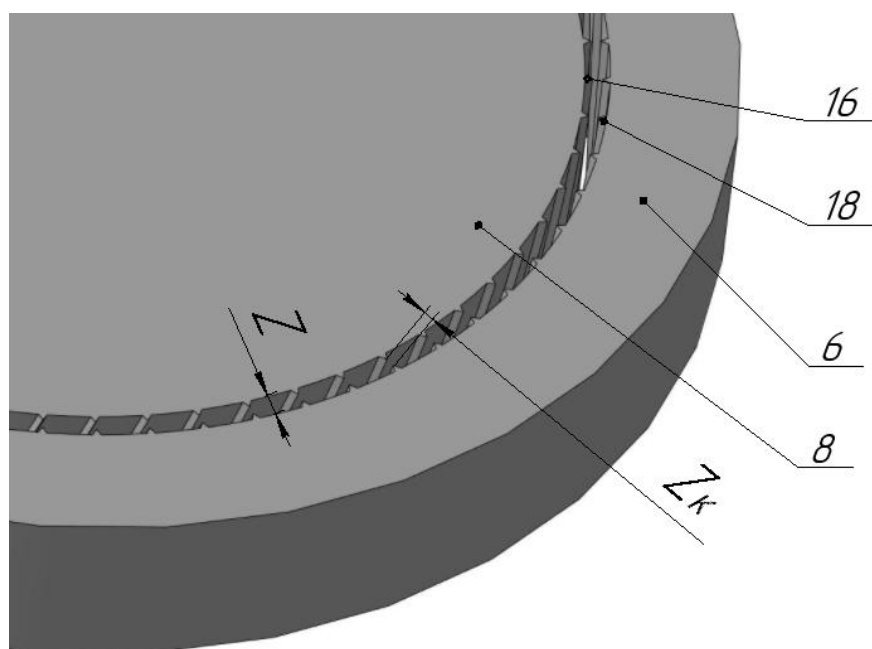


Рисунок 4.10 – Расположение рабочей оправки 8 и матрицы 6

Материал заготовки продавливается в зазор  $Z$  и  $Z_k$  между рабочей оправкой и матрицей с требуемой силой.

Таким образом, новый способ и устройство позволяют наносить рифли на внешней и внутренней поверхности заготовки одновременно, что значительно упрощает получение деталей, на которых и изнутри и снаружи требуются рифли.

### 4.3 Выводы по главе

Был разработан ряд новых способов и устройств для получения рифленых оболочек. Предложенные способы и устройства позволяют расширить технологические возможности формирования рифлей на поверхностях трубных заготовок широкой номенклатуры и различных диаметральных размеров, использовать энергосберегающие технологии с меньшей металлоемкостью инструмента для изготовления рифлей или сетки рифлей на внешней поверхности или на внешней и внутренней поверхностях одновременно.

## **5 ПРАКТИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ**

## **5.1 Рекомендации по проектированию технологических параметров рифления**

В ходе теоретического и экспериментального исследования были предложены основные рекомендации по проектированию технологического процесса рифления внутренней поверхности оболочки:

- Следует использовать рабочую оправку типа III для снижения силы локального формоизменения и обеспечения необходимой формы изделия.

- Необходимо обеспечить зазор между впадинами рабочей оправки и внутренней поверхностью цилиндрической оболочки 0,5 мм или более для обеспечения заданного качества и наименьшей силы пластического деформирования.

- На рабочей оправке следует выполнять как заходную, так и выходную части спирального выступа одинаковой формы для обеспечения не только рифления, но и облегченного съема изделий.

- Разработанное устройство предполагает наличие в конструкции радиально-упорных подшипников, их наличие и расположение обеспечивает возможность вращения рабочей оправки при формировании рифлей.

- Данная технология может быть реализована только на гидравлических и винтовых прессах.

- Для снижения технологической силы получения изделий рифлями возможно использование принудительного вращения верхней части штампа относительно нижней (см. п. 4.1.1).

- Также для снижения силы и уменьшения металлоёмкости конструкции возможно совмещение операций раздачи и редуцирования (см. п. 4.1.2).

- Для уменьшения наплыва возможно использование совмещения операций рифления-дорнования (см. п. 4.1.3).

- В случае необходимости получения рифлей сразу на внешней и внутренней поверхности оболочки, возможно использование метода проталкивания заготовки через специальную оснастку (см. п. 4.2).

При сравнении существующего метода получения рифленых оболочек, а именно редуцирования, с новым методом локального формоизменения установлено, что сила деформирования у нового меньше на 20%, также, как и сила съема, в этом случае разница составляет около 700%.

## **5.2 Использование результатов исследований в промышленности**

Разработанные новые способы и устройства для пластического формоизменения, вторичные математические модели, а также практические рекомендации по расчету технологических процессов рифления цилиндрических оболочек, полученные на основе теоретических и экспериментальных исследований, апробированы и используются в производстве предприятий ПАО «Императорский Тульский оружейный завод» (прил. А), АО «НПО «СПЛАВ» имени А.Н. Ганичева» (прил. Б), АО «ТОЗ-МЕТИЗ» (прил. В).

Отдельные результаты проведенного комплекса исследований и разработанные практические рекомендации позволили усовершенствовать технологию и повысить эффективность изготовления цилиндрических изделий с внутренней сеткой спиральных рифлей, снизив трудоемкость на 15...20%, металлоемкость на 20...60%, технологическую силу формоизменения и съема на 30...50%.

## **5.3 Использование результатов исследований в учебном процессе**

Отдельные результаты выполненной диссертационной работы использованы в научно-исследовательской работе студентов, при выполнении курсовых и выпускных квалификационных работ, в лекционных курсах «Механика процессов пластического формоизменения», «Специальные технологические процессы холодной штамповки» для бакалавров

направления 15.03.01 «Машиностроение» профиля «Машины и технология обработки металлов давлением», а также при подготовке магистров по направлению подготовки 15.04.01 «Машиностроение» профиля «Машиностроительные технологии и оборудование» (прил. Г).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе **решена актуальная задача**, которая заключается в разработке новых способов и устройств, позволяющих локальным пластическим формоизменением осуществить нанесение рифлей поворотным инструментом ограниченной длины, а также проведено теоретическое и экспериментальное исследование данного процесса.

В ходе теоретических и экспериментальных исследований получены следующие **основные результаты и сделаны выводы**:

1. Предложены способ и устройство для реализации рифления локальным пластическим деформированием поворотным инструментом ограниченной длины, что позволяет повысить производительность и снизить трудоемкость процесса получения рифленых оболочек вследствие отсутствия промежуточных операций термообработки.

2. На основе анализа получаемой геометрии изделия, технологических сил, напряженно-деформированного состояния из рассмотренных типов оправок наиболее рациональной для реализации процесса рифления локальным пластическим деформированием является оправка типа III.

3. Получены вторичные математические модели, которые позволяют определить силовые характеристики процесса при различных начальных условиях: угле подъема спиральных рифлей, глубине рифлей, зазоре между внутренней поверхностью цилиндрической заготовки и рабочей оправкой.

4. Установлено, что наибольшее влияние на силовые параметры процесса оказывают глубина внедрения и зазор между рабочей оправкой и заготовкой. Так, с увеличением глубины рифления с 1 мм до 1,6 мм увеличивается технологическая сила формоизменения на 250% с 42 кН до 105 кН. С увеличением зазора между рабочей оправкой и заготовкой сила снижается для глубин внедрения 1,3 мм и 1,6 мм почти в 2 раза, при глубине внедрения 1 мм сила уменьшается на 30%.

5. Максимальная интенсивность деформаций достигается во впадине формируемых рифлей и может составлять порядка 3,6. Однако наличие значительных сжимающих напряжений в области деформаций позволяет осуществлять процесс формирования рифлей без разрушения, о чем свидетельствуют значения параметра повреждаемости по критерию Колмогорова, который не превышает 0,6 во всех рассматриваемых случаях.

6. Экспериментально доказано, что технология формирования рифлей локальным пластическим деформированием позволяет получать рифли на внутренней поверхности оболочек из разных металлических материалов и сплавов. Выполнено сравнение теоретических и экспериментальных данных силовых характеристик процесса, которое показало, что отличие составляет не более 15% для всех операций, что свидетельствует об адекватности компьютерной модели.

7. Установлено, что формообразование локальным пластическим деформированием имеет преимущества по сравнению со способом редуцирования, так как сила получения рифленых оболочек при редуцировании на 20% выше относительно формообразования локальным пластическим деформированием инструментом ограниченной длины. Также установлено, что сила съема ниже на 85% относительно процесса редуцирования.

8. Разработан ряд новых способов и устройств для получения рифленых оболочек. Предложенные способы и устройства позволяют получать рифли или сетку рифлей на внутренней поверхности (патенты № 2789639, 2787911, 2758351, 2796090, 2654410) или на внешней и внутренней поверхностях одновременно (патенты № 2753075, 2755137).

9. Разработанные новые способы и устройства для пластического формоизменения, вторичные математические модели, а также практические рекомендации по расчету технологических процессов рифления цилиндрических оболочек, полученные на основе теоретических и экспериментальных исследований, апробированы и используются в

производстве предприятий ПАО «Императорский Тульский оружейный завод», АО «НПО «СПЛАВ» имени А.Н. Ганичева», АО «ТОЗ-МЕТИЗ» (см. Прил. А-В). Отдельные результаты выполненной диссертационной работы использованы на кафедре «Механика и процессы пластического формоизменения» ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет» в научно-исследовательской работе студентов и лекционных курсах (см. Прил. Г).

10. В дальнейшем предполагается проведение широкого круга экспериментальных и теоретических исследований, позволяющих оценить рациональные режимы нанесения рифлей различной геометрии, как на внутренней, так и на внешней поверхности осесимметричных заготовок из различных материалов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Булов, А. О. К вопросу получения внутренних рифлений труб теплообменных аппаратов / А. О. Булов // Актуальные проблемы авиации и космонавтики : Сборник материалов IX Международной научно-практической конференции, посвященной Дню космонавтики. В 3-х томах, Красноярск, 10–14 апреля 2023 года / Под общей редакцией Ю.Ю. Логинова. Том 1. – Красноярск: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева", 2023. – С. 283-285.
2. Евстратов, В. А. Исследование зависимости направления движения материала в вертикальном винтовом конвейере от угловой скорости вращения приводного вала и угла закручивания рифлей на внутренней поверхности корпуса / В. А. Евстратов, Е. И. Павлов // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. – 2010. – № 4. – С. 88-91.
3. Павлов, Е. И. Обоснование выбора параметров рифления внутренней поверхности корпуса вертикального винтового конвейера / Е. И. Павлов // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки. – 2011. – № 5(163). – С. 67-70.
4. Повышение коэффициента выдачи материала вертикального винтового конвейера за счет рифления внутренней поверхности корпуса / В. А. Евстратов, Н. Н. Евстратова, А. В. Рудь, В. И. Григорьев // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. – 2013. – № 4. – С. 82-87.
5. Павлов, Е. И. Повышение эффективности процесса транспортирования сыпучего материала вертикальным винтовым конвейером путем рифления внутренней поверхности корпуса / Е. И. Павлов // ПРОГРЕССИВНЫЕ технологии в современном машиностроении : сборник

статей X Международной научно-технической конференции, Пенза, 30 июня 2014 года / Под редакцией Е.А. Чуфистова. – Пенза: Автономная некоммерческая научно-образовательная организация «Приволжский Дом знаний», 2014. – С. 33-39.

6. Яковлев С.С. Способ формирования рифленых поверхностей // Всероссийская научно-техническая конференция студентов и аспирантов «Современные технологии обработки металлов и средства их автоматизации»: сборник тезисов. Тула: Изд-во ТулГУ, 2024. С. 65-66.

7. Lethal influence factors of natural and preformed fragmentation projectiles // B Zecevic, J Terzic, F Razic, S Serdarevic-Kadic / DAAAM international scientific book, 2015.

8. Metallic reactive materials application in fragmentation warhead // J Chen, Y J Chen, X Li, Zh F Liang, T Zhou, Ch Xiao Journal of Physics: Conference Series, 2020, Volume 1507, 1507 062004.

9. Обработка металлов резанием: Справочник технолога / А.А. Панов, В.В. Аникин, Н.Г. Бойм и др.; Под. Общ. Ред. А.А. Панова. 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 2004. – 784 с.

10. Справочник технолога-машиностроителя. В 2-х т. Т.2 /Под ред. А.Г. Косиловой и Р.К. Мещерякова. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1985. 496 с., ил.

11. Жидков И. С. Электрофизические методы обработки материалов: учебное пособие / И. С. Жидков, А. И. Кухаренко, С. О. Чолах. - Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2019. 195 с.

12. Ковка и штамповка: справочник. В 4 т. Т. 2. Горячая объемная штамповка. 22е изд., перераб. и доп. / Под общ. ред. Е.И. Семенова. М.: Машиностроение, 2010. 720 с.

13. Патент № 2087239 С1 Российская Федерация, МПК В21Н 7/18. Способ накатывания продольных рифлей : № 95111752/02 : заявл. 06.07.1995 : опубл. 20.08.1997 / Е. А. Попов ; заявитель Открытое акционерное общество "ГАЗ".

14. Михайлов, Ю. О. Способ получения трубчатых заготовок с внутренними нарезками / Ю. О. Михайлов, Д. Г. Дресвянников, С. Н. Князев // Интеллектуальные системы в производстве. – 2013. – № 1(21). – С. 81-82.

15. Михайлов, Ю. О. Моделирования процесса получения трубчатых заготовок с внутренними рифлями в программной среде DEFORM / Ю. О. Михайлов, Д. Г. Дресвянников, С. Н. Князев // Интеллектуальные системы в производстве. – 2013. – № 1(21). – С. 78-80.

16. Князев, С. Н. Методика расчета технологического усилия редуцирования трубной заготовки с оправкой / С. Н. Князев, Ю. О. Михайлов // Интеллектуальные системы в производстве. – 2015. – № 1(25). – С. 45-46.

17. Князев, С. Н. Математическое и компьютерное моделирование технологического процесса редуцирования трубной заготовки с оправкой / С. Н. Князев, Ю. О. Михайлов, Д. Г. Дресвянников // Интеллектуальные системы в производстве. – 2015. – № 1(25). – С. 47-48.

18. Князев, С. Н. Наноструктурированное PVD-покрытие как способ повышения износостойкости штамповой оправки / С. Н. Князев, Ю. О. Михайлов, В. В. Тарасов // Вестник ИжГТУ имени М.Т. Калашникова. – 2015. – Т. 18, № 4(68). – С. 4-5.

19. Патент на полезную модель № 113189 U1 Российская Федерация, МПК В21J 5/12. устройство изготовления деталей с внутренними спиральными рифлями : № 2011115772/02 : заявл. 20.04.2011 : опубл. 10.02.2012 / Ю. О. Михайлов, Д. Г. Дресвянников, С. Н. Князев ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Ижевский государственный технический университет".

20. Патент № 2406589 С1 Российская Федерация, МПК В21К 21/06, F42В 12/26. Способ изготовления корпуса осколочного снаряда с ведущим пояском : № 2009127211/02 : заявл. 14.07.2009 : опубл. 20.12.2010 / А. В. Брызжев, В. К. Зеленко ; заявитель Государственное унитарное предприятие "Конструкторское бюро приборостроения" (ГУП "КБП").

21. Митин, О. Н. Анализ существующих технологий получения цилиндрических заготовок с рифлением / О. Н. Митин, Ю. А. Иванов // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2013. – № 1. – С. 150-156.
22. Митин, О. Н. Формирование винтовых рифтов на внутренней поверхности цилиндрического стакана / О. Н. Митин // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2013. – № 3. – С. 548-553.
23. Митин, О. Н. Математическая модель обжима трубной заготовки / О. Н. Митин // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2013. – № 4. – С. 78-88.
24. Митин, О. Н. Напряженно - деформированное состояние материала при редуцировании цилиндрического стакана пуансоном с рифлями / О. Н. Митин, Ю. А. Иванов // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2013. – № 4. – С. 111-116.
25. Митин, О. Н. Моделирование процесса съема цилиндрической заготовки с пуансона после ее редуцирования в круговой матрице / О. Н. Митин, Ю. А. Иванов // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2013. – № 5. – С. 3-8.
26. Митин, О. Н. Моделирование процесса редуцирования цилиндрической заготовки с помощью профильного пуансона через коническую матрицу / О. Н. Митин // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2013. – № 6-2. – С. 83-89.
27. Митин, О. Н. Построение вторичных математических моделей процесса получения изделия с внутренним рифлением / О. Н. Митин, Ю. А. Иванов // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2013. – № 7-2. – С. 215-222.
28. Митин, О. Н. Напряженно-деформированное состояние материала изделия получаемого в процессе редуцирования с ромбовидным внутренним

рифлением / О. Н. Митин // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2013. – № 8. – С. 414-420.

29. Иванов, Ю. А. Влияние геометрии инструмента на силовые параметры процесса редуцирования цилиндрического стакана с внутренним рифлением / Ю. А. Иванов, О. Н. Митин // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2013. – № 9-2. – С. 403-406.

30. Митин, О. Н. Теоретические и экспериментальные исследования силовых режимов операций редуцирования профильным пуансоном трубных заготовок через коническую матрицу / О. Н. Митин, Ю. А. Иванов // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2015. – № 6-1. – С. 327-337.

31. Митин, О. Н. Технологии изготовления цилиндрических заготовок с внутренними рифлениями / О. Н. Митин, В. Д. Кухарь, А. Е. Киреева // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2013. – № 10. – С. 327-334.

32. Патент № 2316403 С2 Российская Федерация, МПК В21С 37/20, В21J 5/12, В21К 21/06. Способ формирования многозаходных спиральных рифлей : № 2006106113/02 : заявл. 28.02.2006 : опубл. 10.02.2008 / О. А. Анпилогов, И. В. Казаков, В. П. Кузнецов, Н. А. Серегин.

33. Штамповка сложнопрофильной детали из труднодеформируемых сплавов / В. А. Томило, А. Ю. Изобелло, Н. Г. Козырев, А. Л. Манцивода // Литье и металлургия. – 2022. – № 4. – С. 97-100.

34. Чудин, В. Н. Выдавливание ребер жесткости на корпусных деталях с локальным нагреванием / В. Н. Чудин, А. В. Черняев // Вестник машиностроения. – 2021. – № 7. – С. 72-74.

35. Вилимок, Я. А. Совершенствование конструкции штамповой оснастки для изготовления сложнопрофильных деталей из тонколистовых материалов / Я. А. Вилимок // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2015. – № 3. – С. 66-71.

36. Анализ силовых условий прессования бурильных труб с наружным спиральным оребрением / Д. В. Кашаев, В. В. Живаева, Б. В. Каргин, П. Н. Букин // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. – 2022. – № 11(359). – С. 9-12.

37. Афанасьев, А. Е. Силовые условия прессования легкосплавных бурильных труб со спиральным оребрением / А. Е. Афанасьев, В. Р. Каргин, Б. В. Каргин // Известия высших учебных заведений. Цветная металлургия. – 2016. – № 2. – С. 58-63.

38. Ахметшин, Л. Р. Численное моделирование интенсивной пластической деформации при динамическом рифлении прессованием / Л. Р. Ахметшин, Е. Н. Москвичев // Международный междисциплинарный симпозиум "Иерархические материалы: разработка и приложения для новых технологий и надежных конструкций" : Тезисы докладов International Workshop, Международной конференции и VIII Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, посвященной 50-летию основания института химии нефти, Томск, 01–05 октября 2019 года. – Томск: Национальный исследовательский Томский государственный университет, 2019. – С. 372-373.

39. Патент № 2422236 С1 Российская Федерация, МПК В21К 1/06, В21К 1/54, В21Н 7/18. Способ изготовления стержневых ступенчатых деталей с рифлениями : № 2010103428/02 : заявл. 02.02.2010 : опубл. 27.06.2011 / С. В. Овчинников, Р. Ш. Валиев, Е. И. Егоров ; заявитель Открытое акционерное общество "Белебеевский завод "Автономаль".

40. Механика выдавливания алюминиевого сплава при штамповке поковки с продольными ребрами / Е. Н. Сосенушкин, В. А. Кадымов, Е. А. Яновская, Т. В. Гуреева // Цветные металлы. – 2019. – № 3. – С. 69-75.

41. Численное моделирование механического контакта в плоских задачах локального деформирования / П. Г. Морев, К. И. Капырин, Т. В. Федоров, М. И. Борзенков // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2012. – № 2(292). – С. 24-29.

42. Радченко, С. Ю. Управляемое формирование заданных механических свойств деталей машин деформационным упрочнением в условиях комплексного локального нагружения очага деформации / С. Ю. Радченко, В. А. Голенков, Д. О. Дорохов // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2020. – № 2(340). – С. 34-42.
43. Каргин, Б. В. Исследование волочения труб с внутренним спиральным рифлением на короткой вращающейся оправке / Б. В. Каргин, В. Р. Каргин, Т. С. Пастушенко // Заготовительные производства в машиностроении. – 2009. – № 2. – С. 30-32.
44. Разработка технологии производства труб с внутренним рифлением на Ревдинском заводе ОЦМ / А. Г. Титова, А. С. Овчинников, А. М. Темченко [и др.] // Цветные металлы. – 2005. – № 12. – С. 89-94
45. Развитие техники ОМД применительно к производству труб со сложнопрофильными поверхностями / В. Л. Бережной, С. А. Петриков, А. С. Прокопенко, Н. Н. Хованов // Технология легких сплавов. – 2010. – № 2. – С. 77-86.
46. Качанов Л.М. Основы теории пластичности. - М.: Наука, 1969. - 420 с.
47. Теорияковки и штамповки : учебное пособие для вузов / Унксов Е. П., Джонсон У., Колмогоров В. Л. [и др.] ; общ. ред. Унксов Е. П., Овчинников А. Г. - 2-е изд., перераб. и доп. - М. : Машиностроение, 1992. - 719 с.
48. Hill R., Lee E. H. and Tupper S. J. A theory of wedge indentation of ductile materials. Proc., R. Soc., A, 188, 273, (1947).
49. Степанский, Л. Г. Расчёты процессов обработки металлов давлением / Л. Г. Степанский. – М.: Машиностроение, 1979. 238 с.
50. Зенкевич, О. Метод конечных элементов в технике / О. Зенкевич. М.: Машиностроение, 1975. 658 с.

51. Каменев, С. В. Основы метода конечных элементов в инженерных приложениях: учебное пособие / С. В. Каменев; Оренбургский гос. ун-т. – Оренбург: ОГУ, 2019. 110 с.

52. Метод конечных элементов // Википедия URL: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Метод\\_конечных\\_элементов](https://ru.wikipedia.org/wiki/Метод_конечных_элементов) (дата обращения: 15.08.2023).

53. Будилов, И. Н. Решение мультифизических задач на основе цифровых прототипов / И. Н. Будилов, В. С. Жернаков // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. 2020. Т. 24, № 3(89). С. 10-19.

54. Яковлев, С. С. Анализ программного обеспечения для компьютерного моделирования процессов обработки металлов давлением / С. С. Яковлев, Ю. С. Галкин, Я. В. Грибачев // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2024. – № 2. – С. 314-316.

55. AutoForm // AutoForm Engineering GmbH URL: <https://www.autoform.com/en/> (дата обращения: 15.08.2023).

56. ESI Group // PAM-STAMP Stamping Simulation Software URL: <https://www.esi-group.com/products/pam-stamp> (дата обращения: 15.08.2023).

57. ABAQUS Применение комплекса в инженерных задачах // Инжиниринговая компания ТЕСИС URL: [https://tesis.com.ru/infocenter/downloads/abaqus/abaqus\\_metodic\\_2010.pdf](https://tesis.com.ru/infocenter/downloads/abaqus/abaqus_metodic_2010.pdf) (дата обращения: 15.08.2023).

58. Морозов Е. М. ANSYS в руках инженера. Механика разрушения / Е.М. Морозов, А.Ю. Муйземнек, А.С. Шадский. М.: Ленанд, 2010. 456 с.

59. QForm 2D/3D Программа для моделирования процессов обработки металлов давлением Версия VX. Часть 2. Руководство пользователя. «КванторФорм», 2018. 431 с.

60. Моделирование процессов ОМД в программном комплексе Deform: методические указания / А. В. Сотов, В. Г. Смелов, А. В. Агаповичев, Р. Д. Карташов. Самара: Изд-во Самар. ун-та, 2017. 47 с.

61. Патент № 2654410 Российская Федерация, МПК В21К 21/06 (2006.01), В21J 13/00 (2006.01), В21D 17/02 (2006.01), В21D 37/00 (2006.01), В21С 37/20 (2006.01). Способ изготовления сетки рифлей на внутренней поверхности цилиндрической оболочки и устройство для его осуществления : № 2017117118 : заявл. 16.05.2017 : опубл. 17.05.2018, бюл. № 14 / Иванов Ю.А., Коротков В.А., Кухарь В.Д., Ларин С.Н., Митин О.Н., Трегубов В.И., Яковлев С.С.

62. Пасынков, А. А. Исследование повреждаемости и полей Гартфилда в стальном полуфабрикате при рифлении внутренней поверхности / А. А. Пасынков, С. С. Яковлев, А. И. Гасанов // Черные металлы. – 2022. – № 10. – С. 83-86.

63. Яковлев, С. С. Исследование процесса рифления внутренней поверхности заготовки / С. С. Яковлев // Проблемы развития предприятий: теория и практика : Сборник статей X Международной научно-практической конференции, Пенза, 17–18 апреля 2023 года / Под научной редакцией В.И. Будиной. – Пенза: Пензенский государственный аграрный университет, 2023. – С. 743-746.

64. Формирование рифленой внутренней поверхности стальной цилиндрической оболочки локальным деформированием / В.Д. Кухарь, В.А. Коротков, С.С. Яковлев, А.А. Шишкина // Черные металлы. – 2023. – № 5. – С. 72-75.

65. Исследование процесса рифления внутренней поверхности алюминиевой цилиндрической оболочки / В. Д. Кухарь, В. А. Коротков, С. С. Яковлев, А. А. Шишкина // Цветные металлы. – 2024. – № 4. – С. 92-96.

66. Yakovlev, S. S. A comprehensive study of shells with corrugated inner surface / S. S. Yakovlev, L. V. Karkach, K. A. Galitsina // Journal of Physics: Conference Series. – 2022. – Vol. 2388, No. 1. – P. 012089.

67. Кухарь, В. Д. Сравнение пластического формоизменения разными рабочими оправками при нанесении рифлей / В. Д. Кухарь, С. С. Яковлев // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2021. – № 12. – С. 133-136.

68. Яковлев, С. С. Исследование процесса рифления инструментом ограниченной длины / С. С. Яковлев // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2021. – № 11. – С. 480-484.

69. Яковлев, С. С. Влияние глубины внедрения пуансона на температуру в заготовке и инструменте при локальном формировании рифель / С. С. Яковлев // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2022. – № 3. – С. 135-138.

70. Комплексное исследование рифления внутренней поверхности цилиндрической оболочки локальным пластическим деформированием / В. Д. Кухарь, В. А. Коротков, С. С. Яковлев, А. А. Шишкина // Вестник машиностроения. – 2023. – Т. 102, № 1. – С. 62-64.

71. Яковлев, С. С. Построение вторичных математических моделей процесса локального формирования рифлей на внутренней поверхности оболочек / С. С. Яковлев, В. Д. Кухарь, А. Е. Лазаренко // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2024. – № 2. – С. 299-302.

72. Арсов Я.Б., Новик Ф.С. Оптимизация процессов технологии металлов методами планирования экспериментов. М.: Машиностроение; София: Техника, 1980. 304 с.

73. Колмогоров В.Л. Напряжения, деформации, разрушение // М.:Металлургия, 1970. - 229 с.

74. Экспериментальное исследование процесса рифления локальным пластическим деформированием / В. Д. Кухарь, В. А. Коротков, С. С. Яковлев [и др.] // Вестник машиностроения. – 2024. – Т. 103, № 1. – С. 55-57.

75. Corrugation of the Inner Surface of a Cylindrical Shell by Local Plastic Deformation / V. D. Kukhar', V. A. Korotkov, S. S. Yakovlev, A. A. Shishkina // Russian Engineering Research. 2023. Vol. 43, No. 3. P. 278-280.

76. Оптико-эмиссионный спектрометр МСАИ V5 // ООО «ТЕХКОН»  
URL: <https://techkontrol.ru/analizatory-himicheskogo-sostava/Analizatory-rentgeno fluorescentsentnye-statsionarnye/optiko-emissionnyy-spektrometr-msaii-v5/>  
(дата обращения: 15.11.2022).

77. Спектрометр эмиссионный МСАИ V5 // URL: <https://spectr-lab.ru/catalog/nastolnye-spektrometry/spektrometr-emissionnyy-msaii-v5/> (дата обращения: 15.11.2022).

78. ГОСТ 1497-84 «Металлы. Методы испытаний на растяжение».

79. Патент № 2796090 С1 Российская Федерация, МПК В21К 21/08, В21J 5/12, В21J 13/00. Устройство для получения рифлений на внутренней поверхности цилиндрической оболочки : № 2022122700 : заявл. 22.08.2022 : опубл. 16.05.2023 / С. С. Яковлев, В. А. Коротков, В. Д. Кухарь [и др.] ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Тульский государственный университет".

80. Кухарь, В. Д. Штамповая оснастка для реализации процесса рифления / В. Д. Кухарь, С. С. Яковлев // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2022. – № 2. – С. 38-41.

81. Патент № 2758351 С1 Российская Федерация, МПК В21К 21/06, В21D 17/02, В21С 37/20. Способ изготовления сетки рифлей на внутренней поверхности цилиндрической оболочки : № 2020140573 : заявл. 08.12.2020 : опубл. 28.10.2021 / С. С. Яковлев, В. А. Коротков, С. Н. Ларин [и др.] ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Тульский государственный университет".

82. Яковлев, С. С. Способ получения сетки рифлей на внутренней поверхности заготовки / С. С. Яковлев // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2019. – № 7. – С. 182-186.

83. Патент № 2787911 С1 Российская Федерация, МПК В21С 37/20, В21J 5/12, В21К 21/16. Способ изготовления сетки рифлей на внутренней поверхности цилиндрической оболочки : № 2022111661 : заявл. 27.04.2022 : опубл. 13.01.2023 / С. С. Яковлев, В. А. Коротков, В. Д. Кухарь [и др.] ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Тульский государственный университет".

84. Патент № 2789639 С1 Российская Федерация, МПК В21С 37/20, В21Н 7/18, В24В 39/02. Устройство для получения сетки рифлей на внутренней поверхности оболочки : № 2022110698 : заявл. 19.04.2022 : опубл. 06.02.2023 / С. С. Яковлев, В. А. Коротков, В. Д. Кухарь [и др.] ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Тульский государственный университет".

85. Изготовление сетки рифлей на внутренней поверхности цилиндрической оболочки / В. Д. Кухарь, В. А. Коротков, С. С. Яковлев, А. А. Шишкина // Заготовительные производства в машиностроении. – 2023. – Т. 21, № 3. – С. 120-122.

86. Патент № 2755137 Российская Федерация, МПК В21С 37/20 (2006.01), В21J 5/12 (2006.01). Способ получения рифлей ромбовидной формы на наружной и внутренней поверхностях цилиндрической оболочки : № 2020140223 : заявл. 07.12.2020 : опубл. 13.09.2021, бюл. № 26 / Яковлев С.С., Коротков В.А., Ларин С.Н., Кухарь В.Д., Лазаренко А.Е., Шишкина А.А.

87. Яковлев, С. С. Способ получения рифлей на внутренней и наружной поверхностях оболочки / С. С. Яковлев // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2021. – № 5. – С. 134-137.

88. Патент № 2753075 Российская Федерация, МПК В21К 21/00 (2006.01), В21J 5/12 (2006.01), В21D 17/02 (2006.01). Устройство для получения рифлей ромбовидной формы на наружной и внутренней поверхностях цилиндрической оболочки : № 2020140669 : заявл. 08.12.2020 : опубл. 11.08.2021, бюл. № 23 / Яковлев С.С., Коротков В.А., Ларин С.Н., Кухарь В.Д., Лазаренко А.Е., Шишкина А.А.

## **ПРИЛОЖЕНИЯ**

## ПРИЛОЖЕНИЕ А

### Акт о принятии к внедрению результатов диссертационной работы

«УТВЕРЖДАЮ»

Исполнительный директор  
ПАО «Императорский Тульский  
оружейный завод»,  
кандидат технических наук



А.Л. Бахно  
» \_\_\_\_\_ 2024 г.

АКТ

#### об использовании результатов научных исследований

Настоящим актом подтверждается, что в производстве ПАО «Императорский Тульский оружейный завод» используются результаты исследований Яковлева Сергея Сергеевича, изложенные в его работе на соискание ученой степени кандидата технических наук, по формированию сетки рифлей на поверхности цилиндрической оболочки пластическим деформированием.

Разработанные новые способы и устройства для пластического формоизменения, вторичные математические модели, а также практические рекомендации по расчету технологических процессов рифления цилиндрических оболочек, полученные на основе теоретических и экспериментальных исследований, апробированы и используются в производстве предприятия.

Отдельные результаты проведенного комплекса исследований и разработанные практические рекомендации позволили усовершенствовать и повысить эффективность изготовления цилиндрических изделий с внутренней сеткой спиральных рифлей, снизив трудоемкость на 15...20%, металлоемкость на 20...60%, технологическую силу формоизменения и съема на 30...50%.

Директор по техническим вопросам

А.А. Семенов

Главный технолог

В.В. Курочкин

Начальник производства  
многопрофильной обработки

Д.Ю. Колесников

Заместитель начальника производства  
многопрофильной обработки по технике

И.В. Зверев

## ПРИЛОЖЕНИЕ Б

### Акт об использовании результатов научных исследований

УТВЕРЖДАЮ

Заместитель генерального директора по по-  
работе с государственными органами  
АО «НПО «СПЛАВ» имени А.Н. Ганичева»,  
академик РАН,  
лауреат премии Правительства РФ,  
доктор технических наук, профессор

В.И. Трегубов

2024 г.

АКТ

о принятии к внедрению результатов  
диссертационной работы Яковлева С.С.



Настоящим подтверждается, что результаты диссертационной работы Яковлева Сергея Сергеевича, представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.5.7 «Технологии и машины обработки давлением», могут быть использованы в производственной деятельности АО «НПО «СПЛАВ» имени А.Н. Ганичева» при производстве перспективных изделий.

К результатам диссертационного исследования, представляющим практический интерес, относятся новые способы и устройства для формирования рифлей на поверхности цилиндрической оболочки локальным пластическим деформированием и вторичные математические модели.

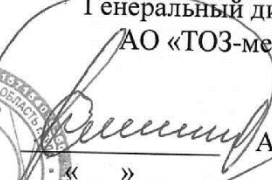
От АО «НПО «СПЛАВ» имени А.Н. Ганичева»

Начальник отдела №4

А.Ю. Пентелев

## ПРИЛОЖЕНИЕ В

### Акт об использовании результатов научных исследований

**«УТВЕРЖДАЮ»**  
Генеральный директор  
АО «ТОЗ-метиз»  
  
А.О. Романов  
«\_\_» \_\_\_\_\_ 2024 г.



#### АКТ об использовании результатов научных исследований

Настоящим подтверждается, что результаты диссертационной работы Яковлева Сергея Сергеевича, представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.5.7. - Технологии и машины обработки давлением, могут быть использованы в производственной деятельности АО «ТОЗ-метиз».

К результатам диссертационной работы относятся разработанные новые способы и устройства для получения рифленых изделий, вторичные математические модели, а также практические рекомендации по расчету технологических процессов рифления, которые могут быть использованы для получения крепежных изделий, метизов.

Начальник производства

Н.С. Абрамов

Начальник коммерческого отдела

Т.А. Терехова

Ведущий специалист коммерческого отдела

Е.С. Журавлева

## ПРИЛОЖЕНИЕ Г

### Акт о принятии к внедрению результатов диссертационной работы



«УТВЕРЖДАЮ»

проректор по учебной работе  
ФГБОУ ВО «ТулГУ», д.т.н., профессор

В.В. Котов

«\_\_» \_\_\_\_\_ 2024 г.

### ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ РЕЗУЛЬТАТОВ РАБОТЫ

Отдельные результаты кандидатской диссертационной работы аспиранта Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Тульский государственный университет» Яковлева С.С., посвященной рифлению внутренней поверхности цилиндрической оболочки локальным пластическим деформированием, использованы в научно-исследовательской работе студентов, при выполнении курсовых и выпускных квалификационных работ, в лекционных курсах «Механика процессов пластического формоизменения», «Специальные технологические процессы холодной штамповки» для бакалавров направления 15.03.01 «Машиностроение» профиля «Машины и технология обработки металлов давлением», а также подготовки магистров по направлению подготовки 15.04.01 «Машиностроение» профиля «Машиностроительные технологии и оборудование».

Зав. кафедрой МиППФ,  
д.т.н., профессор

С.Н. Ларин