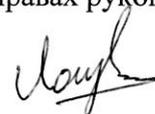


Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования «Московский авиационный институт  
(национальный исследовательский университет)»

На правах рукописи



Логунов Леонид Петрович

КОМПЛЕКСНАЯ МЕТОДИКА СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ  
ПРОЦЕССОВ РОТАЦИОННОЙ ВЫТЯЖКИ  
ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ ТОПЛИВНЫХ БАКОВ РАКЕТ-НОСИТЕЛЕЙ

05.07.02 - Проектирование, конструкция и производство летательных аппаратов

Диссертация на соискание учёной степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель:

Чумадин Анатолий Семёнович - доктор технических наук, профессор

Москва – 2018

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
ГЛАВА 1. АНАЛИЗ СОВРЕМЕННОГО СОСТОЯНИЯ ТЕОРИИ И ПРАКТИКИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ОСЕСИММЕТРИЧНЫХ ДЕТАЛЕЙ РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ.....	11
1.1. Конструктивно-технологический анализ осесимметричных деталей .....	11
1.2. Анализ существующих технологий изготовления осесимметричных деталей.....	22
1.3. Современное состояние теории и практики ротационной вытяжки.....	24
1.4. Выводы по главе 1 .....	47
ГЛАВА 2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ РОТАЦИОННОЙ ВЫТЯЖКИ.....	50
2.1. Исследование потери устойчивости фланца заготовки при ротационной вытяжке.....	50
2.2. Анализ напряжённо-деформированного состояния в очаге пластической деформации конических заготовок методом координатных сеток.....	68
2.3. Исследования деформационного упрочнения при комбинированной ротационной обработке давлением.....	78
2.4. Выводы по главе 2 .....	94
ГЛАВА 3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ РОТАЦИОННОЙ ВЫТЯЖКИ .....	96
3.1. Экспериментальные исследования изготовления конических деталей.....	97
3.2. Экспериментальные исследования изготовления деталей типа фланец .....	107
3.3. Экспериментальные исследования изготовления широких листов.....	116
3.4. Выводы по главе 3 .....	124
ГЛАВА 4. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ И ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ.....	125
4.1. Изготовление детали типа диафрагма .....	125
4.2. Изготовление детали типа фланец .....	132
4.3. Изготовление крупногабаритной обшивки днища .....	135
4.4. Технологические рекомендации и выводы .....	136
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	139
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ .....	141
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ .....	143

ПРИЛОЖЕНИЯ .....	149
А. Техническое решение №170-ДКМ-1-14.....	149
Б. Отчёт по результатам исследования фланцев 8С812КМ-0217-31, изготовленных методом ротационной вытяжки.....	151
В. Письмо ОАО «Композит» исх. №9103-150 от 25.02.2014.....	154
Г. Расчёт ожидаемого экономического эффекта от внедрения технологии ротационной вытяжки обшивок днищ топливных баков.....	155

## ВВЕДЕНИЕ

В изделиях ракетно-космической техники, к которым относятся ракеты-носители, разгонные блоки, космические аппараты и станции, спутники и модули различного назначения, широко применяются осесимметричные детали, изготавливаемые из листовых заготовок. К ним относятся: обшивки днищ топливных баков, герметичных отсеков и обитаемых модулей, днища лейнеров и баков высокого давления, различные элементы ёмкостей пневмогидравлических систем, в том числе фланцы, горловины, патрубки, разделительные диафрагмы, а также обтекатели, кожухи, сопла и горловины двигателей, и другие детали. С конструктивно-технологической точки зрения указанные детали являются тонкостенными оболочками, имеющими сферические, цилиндрические, торовые, конические, параболические формы, а также их различные сочетания. К деталям ракетно-космической техники предъявляются высокие эксплуатационные требования по массе, прочности, точности и герметичности. Например, для днищ диаметром 4,0 м допуск на толщину стенки составляет 0,2 мм, а допускаемое отклонение от теоретического контура до 2,5 мм. Днища изделий ракетно-космической техники изготавливаются из алюминиевых сплавов марок АМг6МПП, 1545К, 01570, титанового сплава марки ВТ6С, высокопрочных и жаростойких сталей марок 07Х16Н6, 12Х18Н10Т и других сплавов.

В производстве указанных деталей широко используются традиционные методы листовой штамповки, такие как вытяжка, формовка, обтяжка, гибка, раздача, обжим, отбортовка и другие. Однако постоянное совершенствование конструкции деталей, использование новых материалов и повышенные эксплуатационные требования по прочности и герметичности, по параметрам точности и шероховатости поверхностей, вызывают необходимость совершенствования технологии их изготовления.

### **Актуальность темы исследования.**

Традиционные технологии обладают рядом существенных недостатков, особенно проявляющихся в условиях единичного или мелкосерийного производства, характерного для изделий ракетно-космической техники. Они не обеспечивают требуемого упрочнения деталей, не позволяют управлять толщиной заготовки при обработке, связаны с необходимостью применения сварных соединений при изготовлении крупногабаритных деталей. Кроме того, они характеризуются большими затратами на подготовку производства и длительным производственным циклом, их использование связано с большими затратами на проектирование и изготовление штамповой оснастки, многооперационными энергоёмкими процессами формоизменения и термической обработки.

В последние годы все большее распространение для изготовления подобных деталей получают технологии локального деформирования, в том числе технология ротационной вытяжки, которая обрела новые возможности развития в связи с появлением специализированных станков с ЧПУ (числовым программным управлением).

Несмотря на большое число работ в области ротационной вытяжки, необходимо отметить, что наиболее полно исследована только проекционная ротационная вытяжка деталей по, так называемому, закону или правилу «синуса» (в дальнейшем в настоящей работе употребляется термин правило «синуса»). Но эта технология в силу особенностей процесса часто не обеспечивает достижение требуемых характеристик деталей по распределению толщины стенки, что снижает эффективность такой обработки и увеличивает трудоемкость изготовления. Возможности ротационной вытяжки с отклонением от правила «синуса» изучены недостаточно, чтобы использовать её на практике. Неслучайно, одно из ведущих мировых предприятий, многие десятилетия специализирующееся на изготовлении оборудования для ротационной обработки давлением, немецкая фирма "*Leifeld*" на самых современных станках с ЧПУ сохраняет функцию ручного управления траекторией движения деформирующего инструмента оператором. Этот факт свидетельствует об отсутствии надёжных методик расчёта указанных процессов обработки не только в нашей стране, но и за рубежом. Поэтому на практике по-прежнему широко используется метод проб и ошибок, связанный с существенными материальными затратами и временем отработки изготовления новых типоразмеров деталей из новых материалов.

Другая задача связана с изготовлением крупногабаритных деталей типа днищ, так как отечественная металлургическая промышленность выпускает листы из алюминиевых сплавов шириной не более 2,0...3,0 м. Для изготовления крупногабаритных обшивок днищ требуются заготовки диаметром свыше 4,0 м. В настоящее время указанная задача решается путем сварки предварительно отформованных сегментов. Из-за наличия сварных швов такая технология изготовления отрицательно влияет на эксплуатационные свойства деталей, снижаются прочность и герметичность, значительно увеличиваются затраты и время изготовления. В этой связи, важным и актуальным представляется изготовление деталей с использованием ротационной вытяжки крупногабаритных сплошных листовых заготовок без сварных швов.

В условиях жесткой конкуренции на мировом рынке ракетно-космической техники совершенствование технологий изготовления напрямую связано с повышением экономической эффективности, которая зависит от затрат на материалы, энергетических затрат, трудоёмкости изготовления, производительности труда, степени механизации и автоматизации производства. Поэтому важными задачами производства изделий ракетно-космической техники является

снижение энергетических затрат, разработка технологий с высокой степенью автоматизации и малым количеством операций, повышение коэффициента использования материала.

Таким образом, работа на тему «Комплексная методика совершенствования технологии ротационной вытяжки элементов конструкций топливных баков ракет-носителей» является актуальной научно-технической задачей, имеющей важное практическое значение.

#### **Степень разработанности темы исследования.**

Теоретические и практические вопросы ротационной обработки давлением рассмотрены в работах отечественных исследователей: Баркая В. Ф., Бутусова Е. А., Гредитора М. А., Грязева М. В., Капоровича В. Г., Королькова В. И., Могильного Н. И., Трегубова В. И., Юдина Л. Г., Яковлева С. П. и др., а также зарубежных исследователей: В. Авитцура, С. Калпакчиоглы, Х. Кобаяши, В. Селлина, Э. Томасетта, С. Уэллса, П. Шрёдера и др. Большое количество работ посвящено изучению ротационной вытяжки проецированием по правилу «синуса».

Очень мало работ, в которых исследуется ротационная вытяжка с отклонением от правила «синуса», наиболее интересная для ракетно-космического производства с практической точки зрения. Отсутствуют методики и методы расчёта основных технологических параметров указанной обработки.

**Объектом** исследования являлись элементы конструкции топливных баков ракет-носителей: обшивки днищ, фланцы и диафрагмы.

**Предмет** исследования – процессы ротационной вытяжки элементов конструкции топливных баков.

**Цель** диссертационной работы заключалась в разработке комплексной методики совершенствования процессов ротационной вытяжки, обеспечивающей изготовление элементов конструкций топливных баков с улучшенными свойствами.

Под улучшенными свойствами элементов конструкций понимается их уменьшенная масса и повышенные характеристики прочности, точности и герметичности.

Для достижения указанной цели были поставлены и решены следующие **задачи**.

1. Проведён анализ известных технологий; методик проектирования технологических процессов и методов расчета технологических параметров при ротационной вытяжке, в том числе:

- разработана классификация деталей, изготовление которых возможно методами ротационной вытяжки;
- выявлены недостатки традиционных методов изготовления деталей;
- уточнена цель и задачи исследования.

2. Выполнены теоретические исследования процессов ротационной вытяжки:

- определены предельные возможности обработки с отклонением от правила «синуса»;
- уточнено напряжённно-деформированное состояние в очаге пластической деформации при изготовлении конусообразных деталей;
- проведено моделирование деформационного упрочнения материала деталей после комбинированной ротационной обработки.

3. Проведены экспериментальные исследования процессов ротационной вытяжки, в том числе:

- подтверждены пределы возможной обработки конических деталей с отклонением от правила «синуса»;
- подтверждено соответствие напряжённно-деформированного состояния в очаге пластической деформации разработанной теоретической модели;
- экспериментально определено изменение механических свойств материалов деталей после ротационной вытяжки.

4. Разработаны пути совершенствования процессов ротационной вытяжки с целью достижения требуемых показателей качества изготавливаемых деталей, включая новые способы комбинированной обработки.

5. Разработаны методики проектирования и расчёта технологических параметров новых разновидностей ротационной вытяжки.

6. Выполнена технологическая отработка, включающая разработку технологических процессов изготовления деталей топливных баков, проектирование и изготовление технологической оснастки, которая позволила разработать новые и усовершенствовать базовые технологии ротационной вытяжки.

Представленная работа, включающая теоретические и экспериментальные исследования, выполнена на кафедре «Технология производства летательных аппаратов» Московского авиационного института и в Государственном космическом научно-производственном центре им. М. В. Хруничева.

**Научная новизна** диссертации заключается в разработке комплексной методики совершенствования процессов ротационной вытяжки элементов конструкций топливных баков с улучшенными свойствами, включающей:

- новую методику проектирования технологических процессов ротационной вытяжки с отклонением от правила «синуса», позволяющую управлять толщиной стенки изготавливаемых деталей;

- новую методику расчёта напряжённно-деформированного состояния в локальном очаге деформации при ротационной вытяжке, базирующуюся на представлении кинематики пластического течения металла, как суперпозиции деформаций изгиба и сдвига в условиях плоского деформированного состояния;

- новую методику расчёта локального деформационного упрочнения материала деталей новым запатентованным способом с использованием ротационной вытяжки.

В теоретическом плане работа связана с совершенствованием методов расчёта напряжённо-деформированного состояния заготовок в условиях локального деформирования.

**Теоретическое значение** работы состоит в разработке математических моделей, позволяющих моделировать и оценивать:

- процесс образования гофров при ротационной вытяжке на основе предложенного энергетического критерия, характеризующего потерю устойчивости фланца заготовки;

- распределение накопленных деформаций и степени упрочнения материала по толщине стенки и по образующей элементов конструкций;

- упрочнение материала деталей новым способом обработки с использованием ротационной вытяжки.

В практическом плане работа связана с разработкой рациональных технологических процессов изготовления осесимметричных деталей ракетно-космической техники методами ротационной обработки давлением.

**Практическая значимость** работы:

1. Разработан способ локального деформационного упрочнения деталей (патент РФ № 2 490 085), позволяющий уменьшить массу ракет-носителей.

2. Разработан способ изготовления широких заготовок (патент РФ № 2 494 829), позволяющий уменьшить массу и повысить герметичность ракет-носителей.

3. Разработаны технологические процессы, спроектирована и изготовлена технологическая оснастка, проведена отработка технологий изготовления, обеспечившие снижение затрат и сроков технологической подготовки производства.

4. Разработанные технологии внедрены в серийное производство при изготовлении трёх серийных деталей ответственного назначения: диафрагм двух типоразмеров и фланца днища.

**Методология и методы исследований**, использовавшиеся в работе.

Теоретический анализ процессов локального формоизменения выполнен с использованием основных положений теории пластичности, методов идеализации и формализации описания явлений, возникающих при ротационной вытяжке. Для разработки 3-х мерных адаптивных параметрических моделей деталей использовалась программа Inventor, а расчёты математических моделей проводились с использованием программы Excel.

Экспериментальные методы исследования и обработки результатов на масштабных образцах и натурных деталях проводились с использованием стандартных и нестандартных методик определения механических характеристик материалов, металлографических исследований и методом координатных сеток.

**Положения, выносимые на защиту:**

1. Комплексная методика совершенствования процессов ротационной вытяжки, обеспечивает производство элементов конструкций с улучшенными свойствами.
2. Методика проектирования технологических процессов с отклонением от правила «синуса», использующая предложенный критерий, характеризующий потерю устойчивости фланца заготовки, позволяет смоделировать процесс ротационной вытяжки и определить основные технологические параметры: допустимую величину отклонения от правила «синуса» и количество переходов обработки.
3. Уточнённая модель деформирования, основанная на представлении о суперпозиции пластических деформаций изгиба и сдвига при ротационной вытяжке, позволяет определять распределение механических характеристик материала по толщине стенки и по образующей элементов конструкций в зависимости от параметров обработки: радиуса скругления рабочей поверхности деформирующего ролика и величины отклонения от правила «синуса».
4. Математические модели и методика расчёта локального деформационного упрочнения деталей новым способом с использованием ротационной вытяжки позволяют определить повышение механических характеристик материала и уменьшение массы изделий.
5. Обоснована целесообразность внедрения нового способа локального упрочнения и нового способа изготовления широких заготовок, позволяющих уменьшить массу и повысить герметичность крупногабаритных летательных аппаратов.

**Степень достоверности** научных положений и выводов, приведённых в работе, подтверждается использованием апробированных методик теоретических и экспериментальных исследований, принятием обоснованных корректных предположений и допущений, удовлетворительным совпадением результатов теоретических и экспериментальных исследований, а также изготовлением элементов конструкций с улучшенными свойствами, используемых в серийном производстве.

**Апробация результатов.** Основные положения диссертации докладывались: на XLII; XLI; XL и XXXVI Академических чтениях по космонавтике в МГТУ им. Н. Э. Баумана в 2018, 2017, 2016, 2012 г. г. соответственно. Материалы работы также были доложены на международной молодёжной научно-технической конференции «Перспективные подходы и технологии проектирования и производства деталей и изделий аэрокосмической техники» в 2017 г.

На конкурсе «Лучший инновационный проект и лучшая научно-техническая разработка» ГКНПЦ им. М.В. Хруничева в 2011 г. работа была признана победителем и награждена дипломом 2 степени.

**Публикации.** Основное содержание диссертации отражено в 11 научных статьях, в том числе в 4 изданиях, входящих в перечень ВАК РФ для кандидатских диссертаций, а также в двух патентах РФ на изобретения.

**Внедрение полученных результатов.** Технологии, разработанные с использованием результатов работы, используются в ГКНПЦ им. М. В. Хруничева при производстве серийных изделий ответственного назначения.

**Личный вклад соискателя.** Основные теоретические положения, экспериментальные результаты и практические разработки получены автором самостоятельно. Часть теоретических и экспериментальных исследований, и патенты на изобретения получены в соавторстве, что отражено в списке литературы.

**Структура и объём работы.** Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка литературы и приложений. Общий объём работы составляет 155 страниц, включая 110 рисунков и 19 таблиц. Список литературы содержит 120 наименований.

# ГЛАВА 1. АНАЛИЗ СОВРЕМЕННОГО СОСТОЯНИЯ ТЕОРИИ И ПРАКТИКИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ОСЕСИММЕТРИЧНЫХ ДЕТАЛЕЙ РАКЕТНО- КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ

## 1.1. Конструктивно-технологический анализ осесимметричных деталей

В летательных аппаратах широко применяются детали, которые можно отнести к классу осесимметричных тонкостенных оболочек. Это обшивки днищ топливных баков средств выведения и герметичных отсеков космических аппаратов и модулей, корпусные детали, обтекатели, переходники, горловины, сопла и другие детали, имеющие сферическую, коническую, торовую, цилиндрическую форму или комбинацию этих форм. С практической точки зрения представляется целесообразным разбить осесимметричные детали, которые можно изготовить способами ротационной обработки давлением, на несколько классов:

- оболочки двойной кривизны одного знака,
- торовые оболочки двойной кривизны разных знаков,
- конические оболочки,
- цилиндрические оболочки,
- комбинированные детали.

Некоторые представители указанных классов деталей, представлены на рис.1.1, 1.2, 1.3, 1.4, 1.5, 1.6.

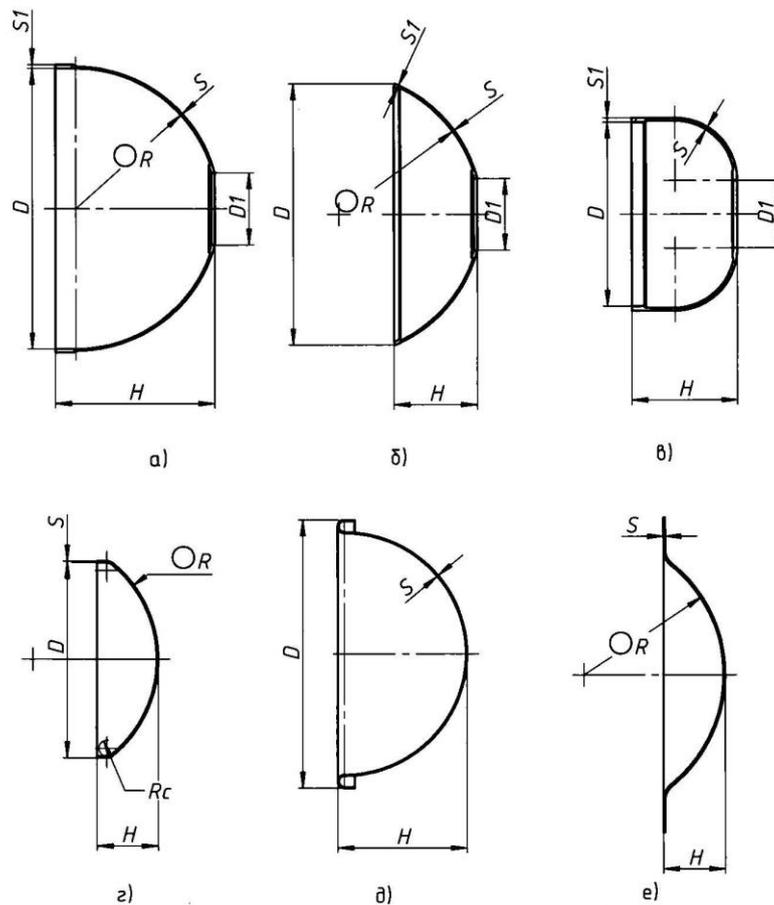
На рис.1.1 и 1.2 представлены детали класса оболочек двойной кривизны одного знака. На рис.1.1 а изображена обшивка днища топливного бака, представляющая собой полусферическую оболочку радиусом  $R$  с цилиндрическим участком диаметром  $D$ , предназначенным для приварки к шпангоуту бака. В полюсной части обшивки имеется отверстие диаметром  $D_1$  для приварки фланца. По кромке отверстия и по краю обшивки имеет толщину  $S_1$ , большую, чем толщина полотна  $S$ . На рис.1.1 б также изображена обшивка днища топливного бака. Её отличие от обшивки рис.1.1а в том, что она является не полусферой, а сферическим сегментом. Кроме того, отверстие в полюсе обшивки может отсутствовать. Обшивки указанного вида могут изготавливаться из высокопрочных алюминиевых сплавов марок АМг6, 01570, 1545К, 1201. Диаметры указанных обшивок могут быть от 0,2 м до 4 м и более, толщины стенок от 2 мм до 15 мм и более.

В классе оболочек двойной кривизны в качестве подкласса можно выделить крупногабаритные обшивки днищ топливных баков. Характерными геометрическими параметрами указанных обшивок являются: диаметр –  $D$ , радиус кривизны –  $R$ , величина допуска на отклонение от теоретического контура –  $\Delta R$ , толщина –  $S$ , допуск на отклонение от

толщины полотна обшивки –  $\Delta S$ , толщина –  $S_l$ , допуск на отклонение от толщины в зонах приварки шпангоутов –  $\Delta S_l$ , высота –  $H$ . Диаметры обшивок могут достигать 4,0 м и более, при толщинах заготовок от 3 до 10 мм. Величины относительного радиуса кривизны обшивок –  $R/D = 0,55 \dots 0,85$ , величина относительной толщины –  $S/D = 0,0003 \dots 0,003$ . Последняя величина позволяет говорить об обшивках днищ, как об особо тонкостенных деталях, обладающих малой жесткостью, что создаёт значительные трудности при изготовлении. Допустимые отклонения от теоретического контура  $\Delta R$  могут достигать качества точности *IT9* и должны быть минимальны, так как их величина существенно влияет на несущую способность обшивок в процессе эксплуатации, а отклонения по толщине  $\Delta S$  значительно влияют на массу обшивок днищ. Таким образом, обшивки днищ являются точными крупногабаритными деталями, обладающими малой жесткостью. Для обеспечения весового совершенства конструкции обшивки должны иметь высокие значения пределов текучести и прочности материала после формообразования. Для обеспечения требований повышенной чистоты ёмкостей величина показателя шероховатости поверхностей обшивок не должна превышать величину по параметру  $R_a = 5$  мкм.

На рис.1.1 в изображено днище лейнера композиционного баллона высокого давления. Особенностью подобных деталей является специальная форма поверхности двойной кривизны, задаваемая в табличной форме или аналитической зависимостью. На внутренней поверхности подобных днищ по кромкам могут быть утолщения  $S_l$ . Представленные днища могут изготавливаться из алюминиевых сплавов, нержавеющей стали или титановых сплавов. Диаметры указанных днищ могут быть от 0,2 м до 0,5 м и более, толщины стенок от 0,5 мм до 3 мм. Особенностью днищ баков, изображённых на рис.1.1 г, является эллиптическая форма, сопряженная радиусной частью с цилиндрическим участком. На рис.1.1 д изображена диафрагма ёмкости высокого давления. Диафрагма имеет буртик, начиная с которого происходит её выворачивание в процессе эксплуатации. Диафрагма имеет специальную форму поверхности двойной кривизны, задаваемую в табличной форме или аналитической зависимостью и переменную толщину стенки. К толщине стенки предъявляются очень высокие требования по точности – в пределах сотых долей миллиметра, и качеству поверхностей. Диафрагмы изготавливаются из пластичного алюминиевого сплава марки А6М. Освоено изготовление диафрагм диаметром до 800 мм. На рис. 1.2 ж представлено днище, особенностью которого является горловина в полюсной части, предназначенная для приварки штуцера. Толщина  $S_2$  цилиндрического участка горловины меньше толщины  $S$  полотна днища. Подобные днища изготавливаются из высокопрочных сталей и титановых сплавов, имеют диаметр до 500 мм при толщине стенки до нескольких миллиметров. На рис.1.2 и изображено сопло двигателя. Сопла имеют специальную форму поверхности двойной кривизны и

изготавливаются из жаропрочных сталей и медных сплавов. Диапазон характерных габаритов велик и составляет от миллиметров до метров. На рис.1.2к изображён головной обтекатель. По геометрическим характеристикам, за исключением носовой части, обтекатели подобны соплам, но изготавливаются из алюминиевых сплавов.



а – полусферическая обшивка с цилиндрическим участком

б – обшивка сферического сегмента

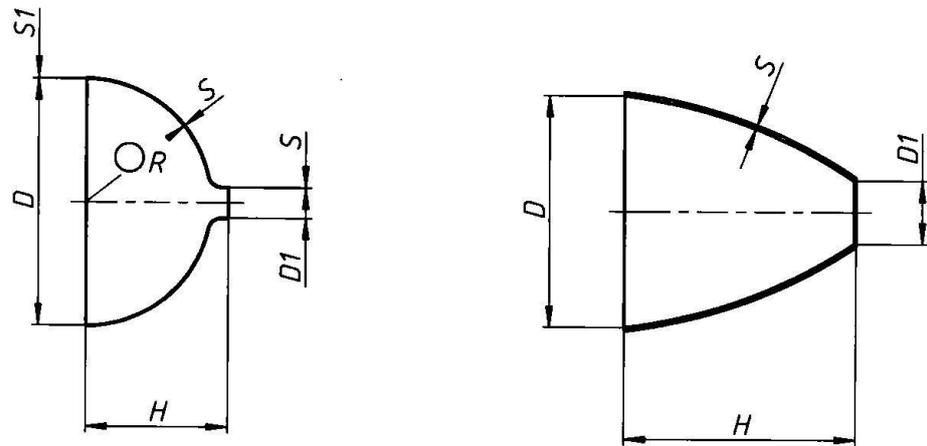
в – днище лайнера

г – днище бака

д – диафрагма

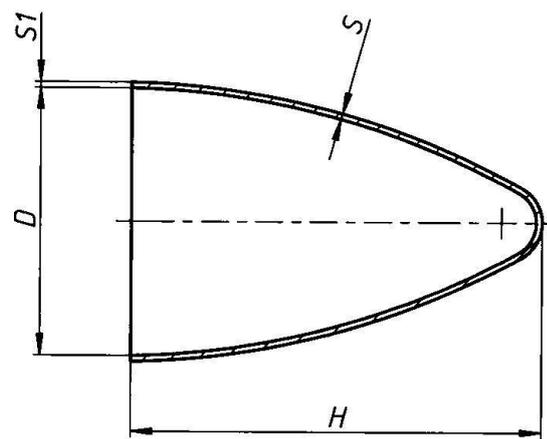
е – крышка

Рис.1.1. Детали класса оболочек двойной кривизны одного знака



ж)

и)



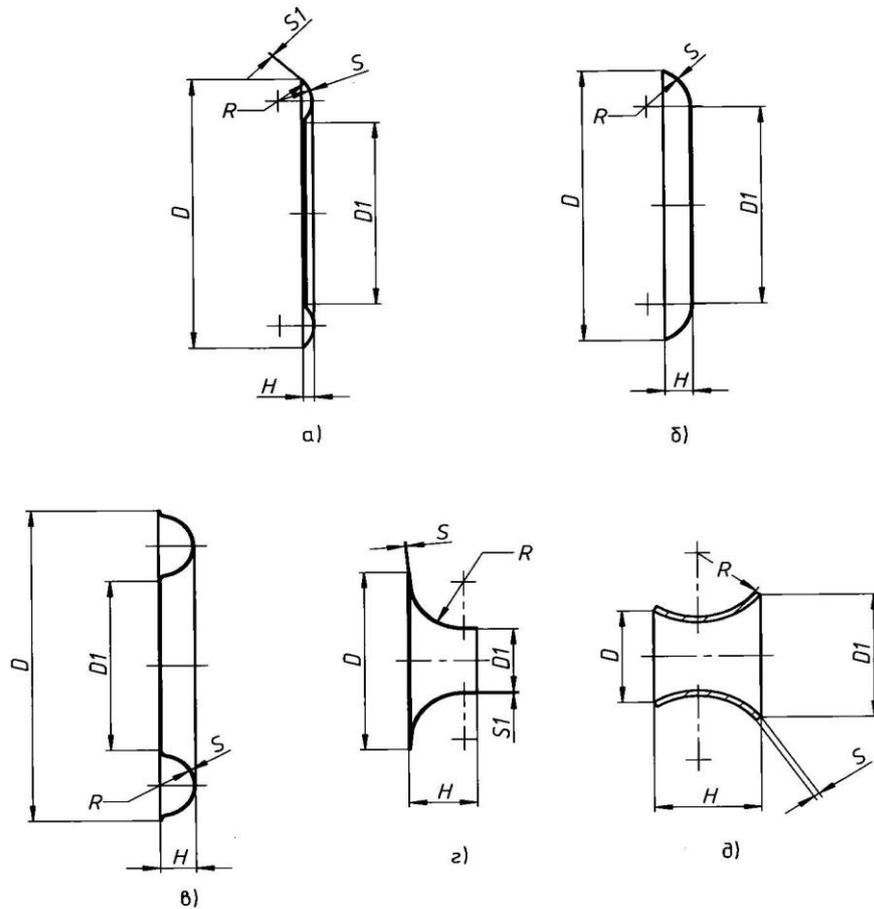
к)

ж – днище с горловиной

и – сопло

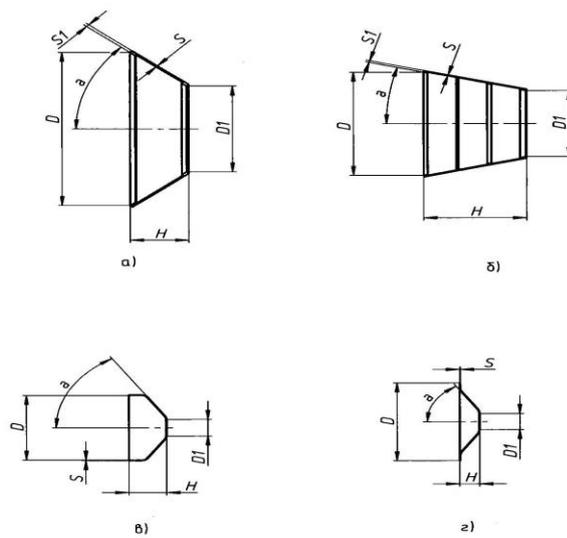
к – обтекатель

Рис.1.2. Детали класса оболочек двойной кривизны одного знака



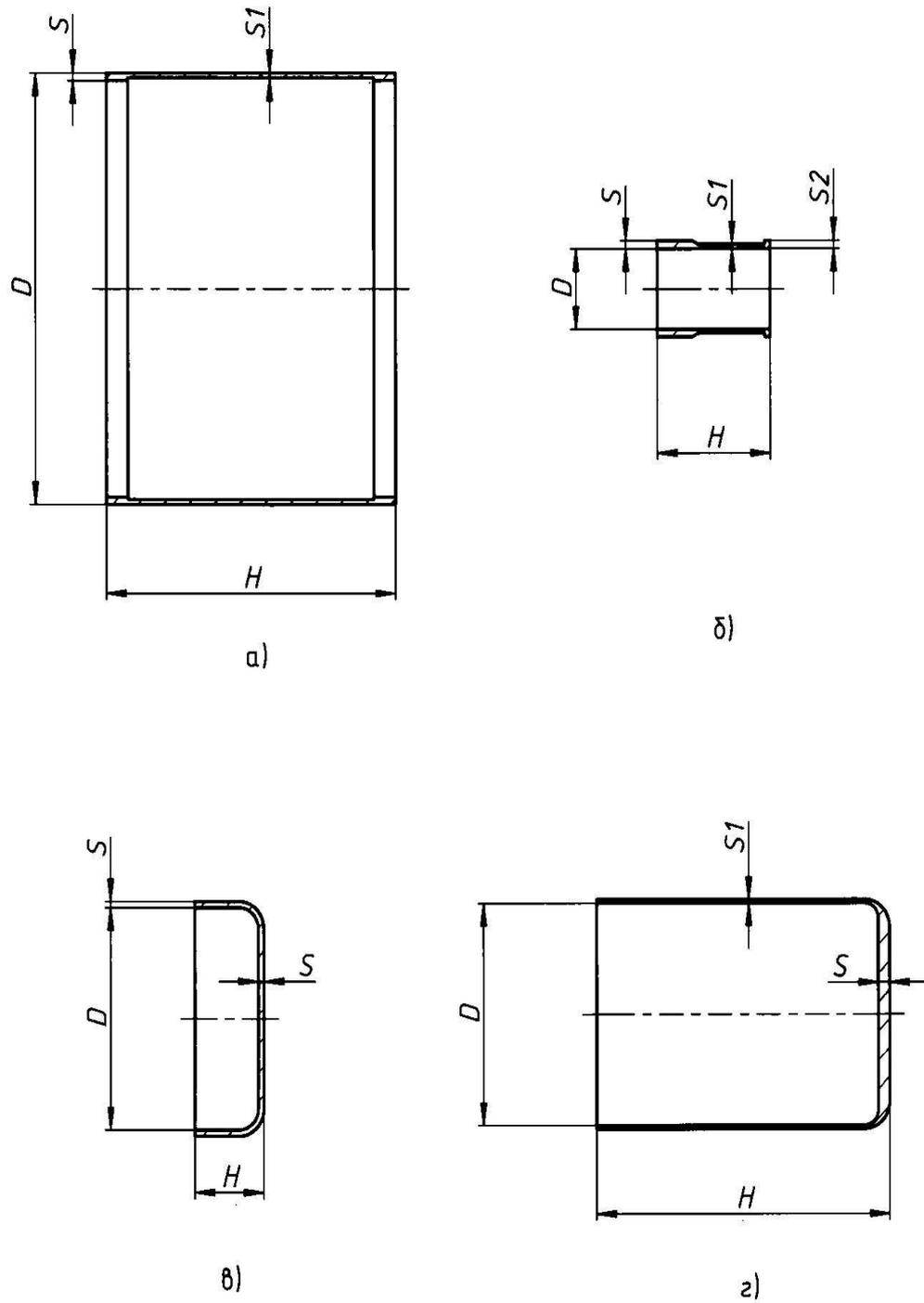
а – обшивка 1; б – обшивка 2; в – обтекатель; г – фланец; д – горловина

Рис.1.3. Детали класса торовых оболочек:



а – обшивка коническая; б – обтекатель; в – крышка 1; г – крышка 2

Рис.1.4. Детали класса конических оболочек:

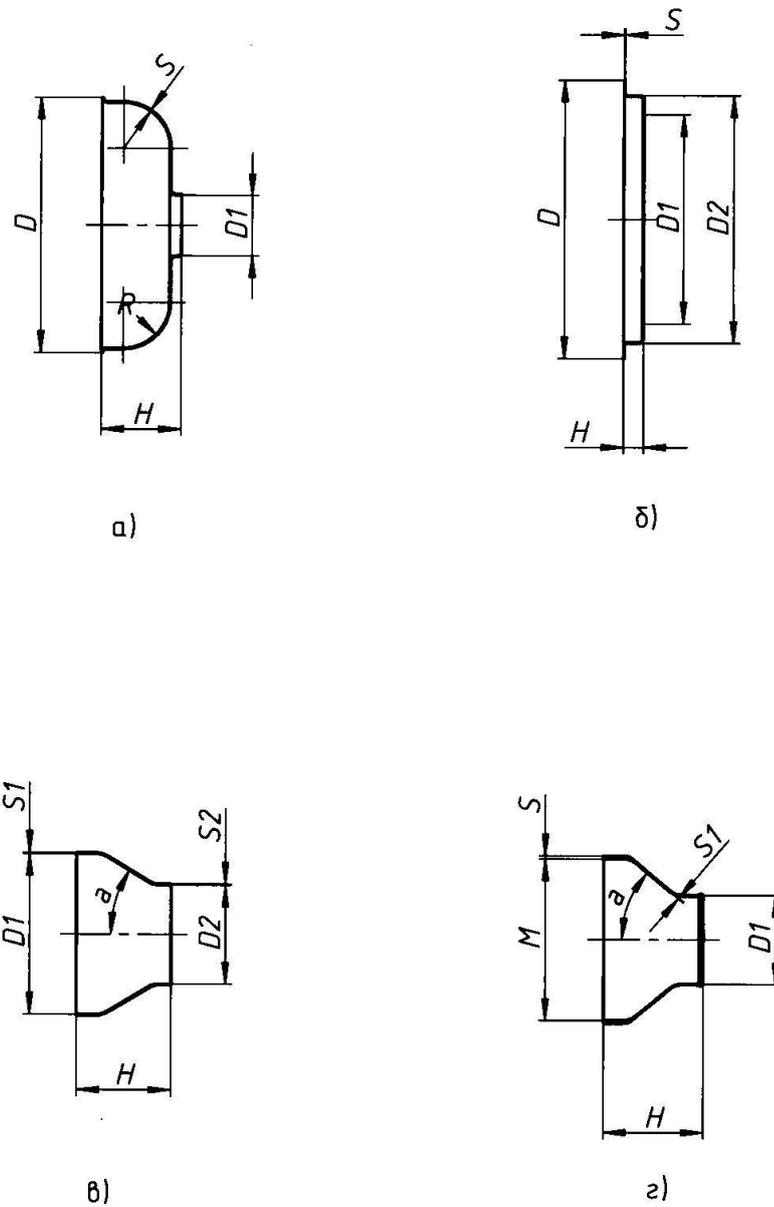


а – обечайка; б – корпус;

в – стакан с постоянной толщиной стенки

г – стакан с переменной толщиной стенки

Рис.1.5. Детали класса цилиндров:



а – чашка; б – кольцо ступенчатое; в – втулка; г – корпус

Рис.1.6. Детали комбинированного класса:

Детали геометрически подобные обтекателям необходимы в качестве технологической оснастки, используемой при изготовлении обтекателей из композиционных материалов. Габариты обтекателей могут достигать 5 м.

На рис.1.3 представлены детали класса торových оболочек. На рис.1.3 а изображена обшивка днища торového топливного бака, представляющая собой торovou оболочку радиусом  $R$  с внешним диаметром  $D$  и внутренним диаметром  $D_1$ . По внешней и внутренней кромке обшивка имеет утолщения  $S_1$ , предназначенные для приварки к шпангоутам бака. Особенностью

обшивки, изображённой на рис.1.3 б является то, что центр тора радиуса  $R$  расположен на диаметре меньшем, чем диаметр  $D_1$ . Подобные обшивки используются в качестве промежуточных днищ торových топливных баков. Указанные днища изготавливаются из традиционных алюминиевых сплавов и могут иметь диаметр  $D$  до 4 м. Особенностью обтекателя, изображённого на рис.1.3 в, является то, что он изготавливается из аустенитной стали. На рис.1.3 г изображён фланец, предназначенный для варки в обшивку днища топливного бака. С геометрической точки зрения фланец представляет собой торовую поверхность, сопряжённую с одной стороны с конической, а с другой стороны с цилиндрической поверхностью. Такая геометрия фланца обеспечивает малое гидравлическое сопротивление при подаче компонента топлива из бака к трубопроводу, соединённому с двигателем. Диаметры  $D$  подобных фланцев могут достигать 500 мм при толщине стенки  $S$  до 6 мм. Указанные фланцы изготавливаются из тех же материалов, что и топливные баки. На рис.1.3 д изображена деталь типа горловина, являющаяся частью двигателя. Подобные детали могут изготавливаться из жаропрочных сплавов.

На рис.1.4 представлены детали класса конических оболочек. На рис.1.4 а изображена обшивка конического днища топливного бака, представляющая собой оболочку в виде усечённого конуса с диаметрами  $D$  и  $D_1$  и половиной угла конусности  $\alpha$ . На внешней и внутренней кромке обшивка имеет утолщения  $S_1$ , предназначенные для приварки к шпангоутам бака. Обшивки указанного вида могут изготавливаться из высокопрочных алюминиевых сплавов марок АМг6НОП, 01570Н, 1545К, 1201. Диаметры указанных обшивок могут достигать 4 м и более, а толщины стенок – 15 мм и более. На рис.1.4 б представлена деталь типа обтекатель, представляющая собой коническую обшивку. На внутренней поверхности обшивка может иметь утолщения  $S_1$  в качестве элементов жесткости. Особенностью подобных обшивок является малый угол конусности  $2\alpha$ . Как правило, указанные обшивки изготавливаются из высокопрочных алюминиевых сплавов. На рис.1.4 в и 1.4 г изображены детали типа крышка, отличие которых заключается в форме краевой части – плоская или цилиндрическая. Подобные детали весьма разнообразны и изготавливаются из различных алюминиевых сплавов и сталей. Характерные размеры: диаметры  $D$  до 1 м, толщины  $S$  до 3 мм, половина угла конусности  $\alpha$  –  $45^\circ \dots 70^\circ$ .

На рис.1.5 представлены детали класса цилиндрических оболочек. На рис.1.5 а изображена обечайка топливного бака, представляющая собой цилиндрическую оболочку диаметром  $D$  высотой  $H$  с утолщёнными краевыми участками  $S$ . Характерные размеры подобных обечаек: диаметры  $D$  до 4 м и более, высота  $H$  до 2 м, толщина  $S$  до 15 мм. Обычно обечайки изготавливаются из высокопрочных алюминиевых сплавов, но известно также использование сталей. На рис.1.5 б представлена деталь типа корпус. Подобные детали находят применение в

кабелях, изготавливаются из алюминиевых сплавов и могут иметь на утолщенной части  $S$  внешнюю или внутреннюю резьбу мелкого шага. Широко используются детали типа стаканов, представленные на рис.1.5 в и 1.5 г. Такие детали используются, например, в качестве заготовок для изготовления сильфонов. Отличие деталей, изображённых на рис.1.5 в и 1.5 г, в толщине цилиндрической и донной части. Толщина  $S$  стакана, изображённого на рис.1.5 в постоянна, а толщина  $S_1$  стакана, изображённого на рис.1.5 г может значительно – до 10 раз быть меньше толщины  $S$ . Детали типа стаканов могут изготавливаться из различных сталей и сплавов.

Значительное применение в изделиях ракетно-космической техники находят детали комбинированного класса, отличительной особенностью которых является сочетания различных геометрических элементов: цилиндрических, конических, торовых поверхностей и плоскостей, изображённые на рис.1.6. Подобные детали могут изготавливаться из разнообразных сталей и сплавов, но все они относятся к тонкостенным оболочкам, толщина  $S$  которых существенно меньше других геометрических параметров.

Большое количество деталей в ракетно-космической технике изготавливаются из листовых заготовок из алюминиевых сплавов марок АМг6, 1201, 1545К, 01570 и др. Указанные материалы обладают средними прочностными характеристиками и невысокой пластичностью. Основные механические свойства листов из указанных материалов в состоянии поставки представлены в таблице 1.1.

Таблица 1.1 – Механические свойства листов из алюминиевых сплавов

Марка материала	Состояние	Механические свойства при растяжении, не менее		
		$\sigma_b$ , Н/мм <sup>2</sup> (кгс/мм <sup>2</sup> )	$\sigma_{0,2}$ , Н/мм <sup>2</sup> (кгс/мм <sup>2</sup> )	$\delta$ , %
АМг6	отожжённое	315 (32,0)	155 (16,0)	15
	нагартованное	375 (38,0)	285 (29,0)	6
1201	отожжённое	215 (22,0)	120 (12,0)	12
	закалённое и иск. состаренное	378 (37,5)	280 (28,5)	7
1545К	отожжённое	392 (40,0)	265 (27,0)	15
	нагартованное	422 (43,0)	324 (33,0)	10
01570	отожжённое	392 (40,0)	235 (24,0)	15
	нагартованное	441 (45,0)	323 (33,0)	8

Невысокие пластические свойства листов из указанных алюминиевых сплавов и способность к быстрому деформационному упрочнению в процессе пластической деформации затрудняют обработку давлением, при этом для большинства сплавов, кроме АМг6, ограничено допустимое количество промежуточных термообработок. Одной из серьёзных проблем при производстве

крупногабаритных деталей является отсутствие широких листов из алюминиевых сплавов, используемых в качестве заготовок. В связи с тем, что российская металлургическая промышленность выпускает листы с габаритами не более 3х3 м или шириной не более 2 м, обшивки днищ большого диаметра изготавливаются сварными. Использование сварочных работ для получения листовых деталей требуемых габаритов приводит к значительному увеличению трудоёмкости изготовления, снижает надёжность, увеличивает массу деталей, уменьшает точность их изготовления из-за остаточных сварочных деформаций. Всё это снижает конкурентоспособность изготавливаемых изделий ракетно-космической техники.

Учитывая, что одной из важнейших характеристик деталей ракетно-космической техники является их масса, для наиболее распространённых сферических обшивок днищ баков представим целевую функцию, характеризующую их качество, в виде:

$$M = K_k p F \frac{\rho}{\sigma_{0,2}} \quad (1.1)$$

где  $M$  – масса детали;

$K_k$  - коэффициент конструкции, характеризующий конструктивные особенности детали;

$p$  – расчётное давление топлива в баке;

$F$  – площадь поверхности детали;

$\rho$  – плотность материала детали;

$\sigma_{0,2}$  – условный предел текучести материала детали.

Таким образом, для определённых при проектном расчёте параметрах  $K_k$ ,  $p$ ,  $F$  и заданном материале с плотностью  $\rho$ , единственной возможностью уменьшения массы детали является повышение условного предела текучести материала технологическими способами, в частности, деформационным упрочнением или упрочняющей термообработкой. Графики зависимостей массы трёх деталей с различными условными пределами текучести представлен на рис.1.7.

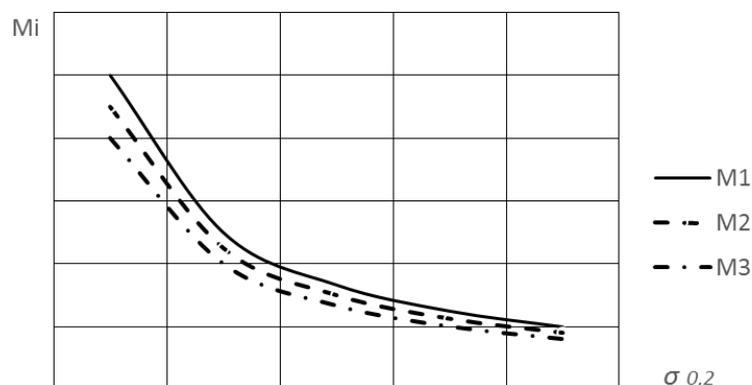


Рис.1.7. Зависимость массы деталей от условного предела текучести

Другой важной характеристикой деталей ракетно-космической техники является их герметичность, которая характеризуется степенью негерметичности. Пренебрегая утечками компонентов топлива через основной материал, степень негерметичности детали можно охарактеризовать величиной  $Q$ , считая её в первом приближении, пропорциональной суммарной длине сварных швов:

$$Q = L_{св.ш} q \quad (1.2)$$

где  $Q$  – суммарная утечка пробного газа;

$L_{св.ш}$  - суммарная длина сварных швов;

$q$  – удельная утечка пробного газа через сварной шов единичной длины.

График зависимости степени негерметичности детали от суммарной длины сварных швов представлен на рис.1.8.

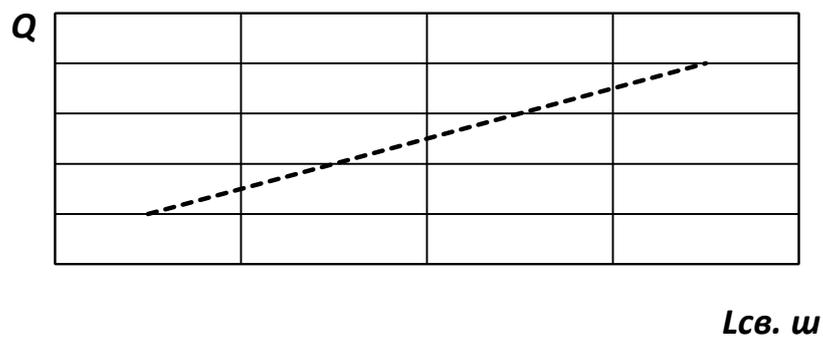


Рис.1.8. Зависимость степени негерметичности детали от суммарной длины сварных швов

К основным показателям качества деталей ракетно-космической техники также можно отнести:

- механическую прочность материала, характеризуемую пределом прочности (временным сопротивлением) -  $\sigma_b$ , условным пределом текучести -  $\sigma_{0,2}$  и относительным удлинением -  $\delta$ , определяемых на образцах, вырезанных из готовых деталей;
- допустимые отклонения поверхностей готовых деталей от теоретических контуров (мм);
- относительную разнотолщинность готовой детали или допустимое утонение заготовки после ротационной обработки давлением. В нормативной отраслевой документации допустимое утонение деталей после холодной обработки давлением не должно превышать 15%;

## 1.2. Анализ существующих технологий изготовления осесимметричных деталей

В настоящее время на предприятиях отрасли для изготовления обшивок крупногабаритных днищ топливных баков применяется четыре основные технологии.

Первая технология, обычно используемая при изготовлении сферических обшивок диаметром до 2,0 м из целого листа, заключается в штамповке заготовок жидкостью высокого давления. Недостатками этой технологии являются ограниченные диаметры, большая разнотолщинность получаемой детали, достигающая 15...20% и выходящая далеко за пределы допустимых отклонений, а также неконтролируемые упругие деформации изготавливаемых деталей после штамповки и обрезки технологического припуска, превышающие допустимые отклонения от теоретического контура детали, что приводит к необходимости многократной доработке крупногабаритной штамповой оснастки. Недостатком этой технологии также является необходимость применения уникального прессового оборудования с размерами рабочего стола до 6х6 м с усилием до 6000 тс.

Вторая технология, используемая при изготовлении сварных сферических обшивок диаметром свыше 2,0 м, заключается в изготовлении секторов штамповкой из листовых заготовок методом обтяжки по оправке на обтяжных прессах. Количество секторов, входящих в обшивку, определяется пластическими свойствами материала и габаритами заготовки, и может составлять от 2 до 5 штук и более. После обтяжки и трудоёмкой слесарной операции доводки заготовок для обеспечения требуемого отклонения кривизны  $\Delta R$  от теоретического контура, сектора фрезеруют и сваривают между собой по меридианным стыкам. Недостатком этой технологии является наличие сварных швов, снижающих надёжность и весовые характеристики изделий и резко увеличивающие затраты на изготовление. Эта технология также характеризуется низким значением коэффициента использования материала (КИМ), которое обычно не превышает величины 0,25 и связано с большими припусками на обтяжку и нерациональным раскроем заготовок. Сложной технологической проблемой этой технологии является поиск формы обтяжной оправки, которая должна изготавливаться с упреждением, компенсирующим упругие деформации детали не только после обтяжки, но и после вырезки секторов из отштампованной заготовки, а также после сварки секторов между собой. Подгонка и сварка меридианных швов также связана с решением сложных технологических задач.

Третья технология, используемая в частности при изготовлении сварных торовых обшивок, заключается в штамповке деталей вытяжкой на гидравлических прессах в инструментальных штампах. Основными недостатками третьей технологии также является необходимость применения уникального прессового оборудования, усугубляемая необходимостью

крупногабаритной дорогостоящей штамповой оснастки, сложность прогнозирования упругих остаточных деформаций при вытяжке несимметричных заготовок и связанные с этим доработки штамповой оснастки, подгонка и сварка меридианных швов при изготовлении крупногабаритных деталей. Кроме того, вытяжка деталей сферической формы в инструментальных штампах затруднена, так как большая часть поверхности заготовки в процессе штамповки не контактирует с инструментом и при вытяжке особо тонкостенных деталей на ней легко возникают складки и гофры. При этом процесс вытяжки значительно усложняется при уменьшении относительной толщины заготовки.

Четвертая технология, используемая при изготовлении конических обшивок, заключается в гибке сегментов методом прокатки на листогибочных машинах. Эта технология также характеризуется невысоким значением коэффициента использования материала и ограниченными технологическими возможностями – изготовление деталей преимущественно конической формы. Кроме того, сварка меридианных стыков между сегментами вызывает остаточные деформации, приводящие к недопустимому уменьшению геометрических параметров точности.

Иногда для изготовления деталей используется формовка взрывом, при которой в специальном бассейне давление продуктов детонации взрывчатых веществ через промежуточную среду, обычно воду, передаётся на листовую заготовку. Эта технология требует соблюдения особых мер безопасности при проведении работ с взрывчатыми веществами и применяется обычно при изготовлении обшивок из высокопрочных трудно деформируемых сплавов в единичном и мелкосерийном производстве. Разновидностью формовки взрывом является формовка электрогидравлическим разрядом.

При формовке небольших неглубоких деталей находят применение формовка эластичной средой и магнитно-импульсная формовка.

Во всех рассмотренных технологиях заготовки перед сваркой подвергаются дополнительной обработке для получения требуемых толщин обшивки и слесарной доводке для обеспечения требуемого отклонения от теоретического контура. Таким образом, применяемые в настоящее время технологии изготовления осесимметричных деталей имеют ряд существенных недостатков, в том числе:

- не обеспечивают высоких механических характеристик материала деталей, что увеличивает массу изделий;
- характеризуются пониженной герметичностью и точностью из-за большого количества сварных швов;
- имеют длительный цикл изготовления и большую трудоемкость, в том числе тяжёлых слесарных доводочных и подгоночных, а также фрезерных и сварочных работ;

- используемый комплекс технологического оборудования занимает большие производственные площади и требует значительных затрат энергии.

Одним из рациональных, экономичных и производительных способов изготовления указанных деталей, особенно в условиях мелкосерийного производства, является ротационная обработка давлением, в том числе ротационная вытяжка. Эта технология позволяет устранить недостатки существующих методов, расширить технологические возможности и в конечном итоге повысить конкурентоспособность изготавливаемых изделий ракетно-космической техники.

### **1.3. Современное состояние теории и практики ротационной вытяжки**

Теоретические и практические вопросы ротационной обработки давлением рассмотрены в работах отечественных исследователей: Баркая В. Ф., Бугусова Е. А., Гредитора М. А., Грязева М. В., Капоровича В. Г., Королькова В. И., Могильного Н. И., Ремнева К. С., Свицерского В. П., Трегубова В. И., Юдина Л. Г., Яковлева С. П., Яковлева С. С. и многих др. [3, 10, 17, 23, 25, 28, 32, 33, 40, 61, ..., 66, 68, 71, ..., 74, 77, ..., 80, 92, ..., 95]; а также зарубежных исследователей: В. Авитцура, С. Калпакчиоглы, Х. Кобаяши, В. Селлина, Э. Томасетта, С. Уэллса, П. Шрёдера, Ч. Янга и других [12, 53, 54, 70, 102, ..., 120].

В этой области плодотворно работают научные школы Тульского государственного университета, Воронежского государственного технического университета, Московского авиационного института, МГТУ им. Н. Э. Баумана и других высших учебных заведений. За рубежом интенсивные исследования проводятся в Германии, США, Японии и Великобритании.

Технология ротационной вытяжки применяется аэрокосмическими предприятиями ведущих стран мира, в частности при изготовлении днищ для ракеты-носителя «Ариан-5» в Европейском космическом агентстве, предприятиями “MT Aerospace” в Германии, “Boeing” в США, “Mitsubishi Heavy Industries” в Японии, Корейским космическим агентством и на других предприятиях.

Понятие ротационной обработке давлением объединяет широкий круг процессов локального деформирования. К сожалению, в отечественной литературе отсутствуют общепринятые термины, связанные с ротационной обработкой давлением. В стандарте ГОСТ 18970 в качестве рекомендуемого термина указана только операция ротационная вытяжка – вытяжка при относительном вращении инструмента и заготовки. Этот термин является производным от обязательного термина вытяжка, определённого как образование полой заготовки или изделия из плоской или полой исходной листовой заготовки. В работе [10] справедливо указано, что отсутствие единой терминологии затрудняет выбор технологического способа ротационной обработки давлением и поиск научно-технической информации. В той же работе предложено два

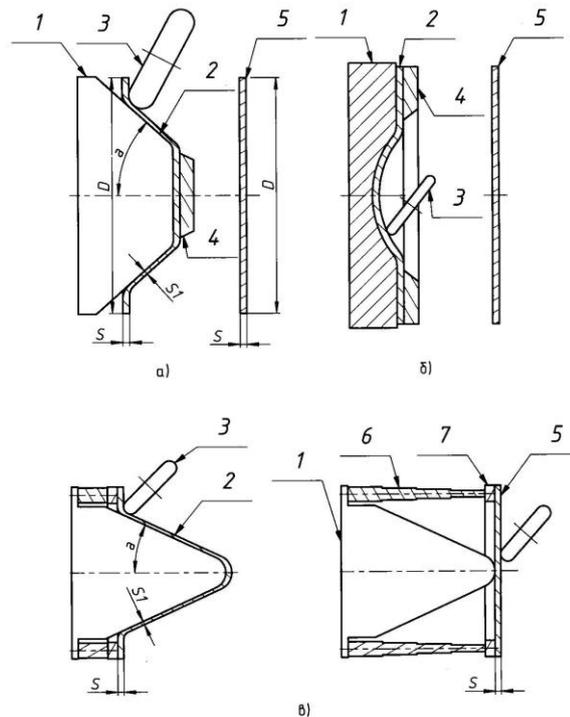
термина: давящие работы (выдавливание, давящая обработка) – для выдавливания без преднамеренного утонения, и ротационное выдавливание – для выдавливания с преднамеренным утонением. В работе [28] указывается, что термин ротационная вытяжка (РВ) объединяет три качественно различных процесса: РВ конусообразных оболочек, РВ цилиндрических изделий, а также токарно-давящую обработку без существенного изменения толщины стенки заготовки. Далее в настоящей работе используются термины: РВ с утонением – вытяжка с преднамеренным уменьшением толщины стенки исходной заготовки, аналог английского термина *shear forming*, и ротационная вытяжка без преднамеренного уменьшения толщины стенки исходной заготовки, аналог английского термина *spinning*.

Основные схемы РВ с утонением стенки нецилиндрических деталей из плоских заготовок представлены на рис.1.9, на котором представлена классическая схема изготовления конической детали из плоской круглой заготовки диаметром  $D$  и толщиной  $S$ . Плоская заготовка 5 прижимом 4 прижимается к вращающейся оправке 1 и удерживается на ней силами трения. Деформирование заготовки производится роликом 3, закреплённым на суппорте станка с ЧПУ и перемещаемым по программе. В процессе РВ по этой схеме диаметр заготовки  $D$  остается постоянным, а толщина детали 2 на коническом участке определяется по правилу «синуса» [32], по формуле:

$$S_1 = S_0 \sin \alpha \quad (1.3)$$

где  $S_1$  и  $S_0$  – толщины на коническом участке детали и заготовки соответственно,  
 $\alpha$  – половина угла конусности оправки.

Указанная схема применяется для изготовления деталей не только конической, но и сферической или торообразной формы, при этом угол  $\alpha$  равняется половине текущего угла конусности оправки в зоне контакта оправки с роликом. Очевидно, что при такой обработке толщина получаемой детали будет переменной. Для получения детали постоянной толщины используют профилированные по толщине заготовки.



а – внешняя РВ с прижимом в центре; б – внутренняя РВ;

в – внешняя РВ с прижимом по краю

1 – оправка, 2 – деталь, 3 – ролик, 4 – прижим, 5 – заготовка,

6 – телескопическая опора, 7 – кольцо

Рис.1.9. Схемы ротационной вытяжки с преднамеренным утонением стенки нецилиндрических деталей из плоских заготовок

На рис.1.9 б представлена схема изготовления из плоской круглой заготовки детали со сферическим углублением в центральной части. Плоская заготовка 5 прижимом в виде кольца 4 прижимается к вращающейся оправке 1 и удерживается на ней либо силами трения, либо механическими прижимами. Деформирование заготовки также производится роликом 3, закреплённым на суппорте станка с ЧПУ и перемещаемым по программе. В процессе РВ по этой схеме диаметр заготовки  $D$  остается постоянным, а толщина детали 2 на сферическом участке также определяется по правилу синуса.

На рис.1.9 в представлена схема изготовления из плоской круглой заготовки конической детали, особенностью которой является остро закруглённая носовая часть, не позволяющая осуществить надёжную фиксацию заготовки на оправке с помощью центрального прижима. При обработке по этой схеме заготовку фиксируют на кольце, установленном на оправке через телескопические опоры. В процессе обработки телескопические опоры сжимаются. В остальном указанная схема аналогична схеме, представленной на рис.1.9 а.

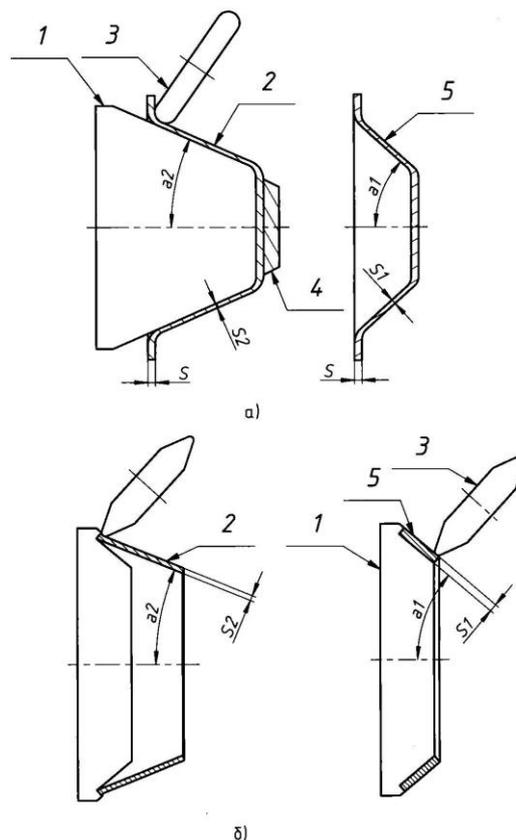
На рис.1.10 представлены схемы РВ с преднамеренным утонением стенки нецилиндрических деталей из полых заготовок. На рис.1.10 а изображена схема изготовления детали из полрой заготовки, которая может быть получена либо РВ из плоской заготовки на первом переходе, либо вытяжкой или формовкой. Зная толщину детали –  $S_2$ , толщину промежуточной заготовки –  $S_1$  можно найти по формуле:

$$S_1 = S_2 \sin \alpha_1 / \sin \alpha_2 \quad (1.4)$$

где  $S_1$  и  $S_2$  – толщины на конических участках,

$\alpha_1$  и  $\alpha_2$  – половины углов конусности.

На рис.1.10 б изображена разработанная в США схема внешней РВ без прижима заготовки. Особенностью этой схемы является обратное течение металла по отношению к движению ролика. Плавно изменяя величину зазора между роликом и оправкой в процессе обработки, можно управлять формой изготавливаемой оболочки. Степень утонение при обработке по данной схеме может достигать 80%.



а – внешняя РВ с прижимом в центре; б – внешняя РВ без прижима

1 – оправка, 2 – деталь, 3 – ролик, 4 – прижим, 5 – заготовка

Рис.1.10. Схемы ротационной вытяжки с преднамеренным утонением стенки нецилиндрических деталей из полых заготовок

В ряде работ [10, 28, 32] отмечается, что отклонение зазора  $\Delta z$  между роликом и оправкой от правила «синуса» ведёт к нарушению процесса формообразования и потери устойчивости фланца. При условии  $\Delta z \leq S_0 \sin \alpha$ , стенка детали будет иметь чрезмерное утонение, «...во фланце возникнут сжимающие напряжения, которые могут вызвать изгиб фланца вперёд или назад», привести к потере устойчивости с образованием гофров. В случае  $\Delta z \geq S_0 \sin \alpha$  «...во фланце возникают сжимающие тангенциальные напряжения, вследствие чего он изгибается в сторону передней бабки» станка, и при относительно тонкой заготовке на фланце образуются гофры.

В работе [32] указывает, что ротационную вытяжку утонением одни исследователи рассматривают как знакопеременный изгиб, с одновременной прокаткой заготовки вдоль конической винтовой линии, а другие – как последовательное вдавливание инструмента в металл с получением сливающихся лунок. Широкое распространение получила третья теория, основанная на сдвиговом механизме деформации, согласно которой при деформации заготовки по оправке реализуется простой сдвиг слоев металла. Предполагая сдвиговый механизм деформации, то, что «сдвиг осуществляется под углом, равным примерно  $45^\circ$  к направлению деформирования», а также, приняв условие  $\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3$ , автор определил теоретически минимальный угол конусной оправки  $2\alpha = 25^\circ 40'$ . Для ориентировочных расчётов составляющих сил вытяжки рекомендовано использовать зависимости:

$$P_x = C \sigma_B S_0 \cos \alpha \quad (1.5)$$

$$P_y = P_x \quad (1.6)$$

$$P_z = (0,12 \dots 0,2) P_x \quad (1.7)$$

где  $P_x, P_y, P_z$  – осевая, радиальная и тангенциальная составляющая силы,

$C = 6,8$  – экспериментальный коэффициент, мм,

$\sigma_B$  – временное сопротивление, Н/мм<sup>2</sup>,

$S_0$  – толщина заготовки, мм.

В работах [10, 28, 35] приведена приближённая формула для расчёта тангенциального усилия, действующего на деформирующий ролик:

$$P_z = S_0 f \sin \alpha \sigma_s^{cp} \frac{\operatorname{ctg} \alpha}{\sqrt{3}} \quad (1.8)$$

где  $S_0$  – толщина заготовки, мм,

$f$  – подача ролика, мм/об,

$\sigma_s^{cp}$  – среднее напряжение текучести, Н/мм<sup>2</sup>.

Формула (1.8) удовлетворительно согласуется с экспериментальными данными, полученными при обработке алюминиевых листов с подачей  $f$  до 1,25 мм/об для углов  $\alpha = 20^\circ \dots 50^\circ$ .

В работе [112] предложено тангенциальное усилие  $P_z$  рассчитывать по приближённой формуле, полученной с использованием метода баланса работ внешних сил и работы деформации:

$$P_z = S_0 * f * \sin \alpha * \int \sigma_s d\varepsilon_i \quad (1.9)$$

Радиальное усилие  $P_y$  рассчитывается по формуле:

$$P_y = P_z \frac{F_y}{F_z} \quad (1.10)$$

а осевое усилие  $P_x$  – по формуле:

$$P_x = P_z \frac{F_x}{F_z} \quad (1.11)$$

где  $F_x, F_y, F_z$  – соответствующие проекции площадей контакта ролика с заготовкой в радиальном, осевом и тангенциальном направлении.

Проекции площадей контакта определяют по приближённым формулам:

$$F_z = \frac{1}{2} R_p m f \cos^2 \alpha \quad (1.12)$$

$$F_y = \frac{1}{2} R_p \sqrt{m} R \Theta_{cp} \left[ 1 - \sin \alpha + \frac{f \cos \alpha}{2R_p} \right] \quad (1.13)$$

$$F_x = \frac{1}{2} R_p \sqrt{m} R_n \Theta_{cp} \cos \alpha \quad (1.14)$$

где  $R_p$  радиус скругления ролика,

$m$  – параметр, зависящий от условий контакта ролика с заготовкой,

$f$  – подача,

$R$  – радиус от оси вращения заготовки до центра радиуса скругления ролика,

$\Theta_{cp}$  – средний угол зоны деформации,

$R_n$  – радиус от оси вращения заготовки до линии контакта с роликом.

В работе [95] на основе предположений о формоизменении сдвигом, без учёта сил трения и изгиба фланца заготовки получена формула для определения нормального давления на ролик в зоне контакта с заготовкой:

$$q = \frac{1,15\sigma_s}{2} \left\{ 1 + \left[ \frac{S_0 + R_p (1 - \sin \alpha)}{S} \right]^2 \right\} \quad (1.15)$$

где  $\sigma_s$  – напряжение текучести,

$S$  – толщина заготовки в зоне деформации.

Величину  $\sigma_s$  определяют по диаграмме  $\sigma_s - \varepsilon_i$ , полученной при испытаниях на одноосное сжатие. Составляющие усилия, действующего на ролик по трём направлениям, определяют по формулам:

$$P_z = q_{cp} F_z \quad (1.16)$$

$$P_y = q_{cp} F_y \quad (1.17)$$

$$P_x = q_{cp} F_x \quad (1.18)$$

где  $q_{cp}$  – среднее значение давления в зоне контакта.

Проекции площадей контакта вычисляют по формулам:

$$F_z = f h \quad (1.19)$$

$$F_y = \frac{a}{3b} (2b + f) \sqrt{f(2b + f)} \quad (1.20)$$

$$F_x = \frac{2a}{3b} \sqrt{f(2b + f)} h \quad (1.21)$$

где

$$a = \sqrt{R_p (1 - \sin \alpha) \frac{2R_1 R_2}{R_1 \cos \alpha}} \quad (1.22)$$

$$b = R_p \cos \alpha \quad (1.23)$$

$h$  – высота зоны контакта,

$R_1$  – радиус ролика,

$R_2$  – радиус оправки в зоне контакта.

Мощность главного привода станка –  $N_1$  (кВт) можно определить по формуле:

$$N_1 = \frac{0,0098 P_z v}{\eta_1} \quad (1.24)$$

где  $v$  – максимальная окружная скорость вращения заготовки, м/сек,

$\eta_1$  – коэффициент полезного действия главного привода.

Мощность продольного привода станка –  $N_2$  (кВт) можно определить по формуле:

$$N_2 = \frac{0,000163 P_x f \Omega}{\eta_2} \quad (1.25)$$

где  $f$  – продольная подача ролика, мм/об,

$\Omega$  – частота вращения заготовки, об/мин,

$\eta_2$  – коэффициент полезного действия продольного привода.

В работе [3] без учёта изгиба фланца заготовки получена приближённая формула для расчёта контактного давления на ролик с принятием кусочно-линейной аппроксимации условия пластичности, позволяющая производить расчёты процессов РВ с отклонением от правила «синуса». Показано, что осевое усилие  $-P_x$  можно вычислить по формуле:

$$P_x = 0,58 \sigma_{0,2} S_0 f \cos \alpha \quad (1.26)$$

где  $\sigma_{0,2}$  – предел текучести материала заготовки.

В работах [63, 64, 93] разработана математическая модель проекционной ротационной вытяжки конических деталей из трансверсально-изотропного упрочняющегося материала с использованием условия текучести Мизеса-Хилла и ассоциированного закона пластического течения. Модель построена разделением заготовки на три участка — зону обжатия, в которой предполагается объёмное напряжённо-деформированное состояние, зону плоской деформации и зону фланца, находящегося в условии плоского напряжённого состояния. Интегрирование дифференциальных уравнений равновесия выполнялось конечно-разностным методом с использованием двух предложенных условий текучести. Упрочнение материала при ротационной вытяжке учитывалось по приближённой методике с использованием кривой упрочнения вида:  $\sigma_s = \sigma_{0,2} + A\varepsilon_i^n$ . Для ротационной вытяжки конических деталей на оправке предложено три составляющие силы формообразования  $P$ : тангенциальную  $-P_z$ , радиальную  $-P_y$  и осевую  $-P_x$ , определять путём интегрирования соответствующих уравнений с граничными условиями. Результаты расчёта по предложенной модели ротационной вытяжки из медной заготовки толщиной 3 мм на оправке с углом конуса  $25^\circ \dots 45^\circ$  роликом диаметром 100 мм показали, что тангенциальная составляющая силы формообразования  $-P_z$  на порядок меньше двух других составляющих и увеличивается на 60...70% по мере перемещения ролика по образующей конуса. Показано, что с увеличением степени деформации с 0,33 до 0,67; величины составляющих сил формообразования возрастают на 80...110%, а при увеличении угла наклона образующей конуса от  $25^\circ$  до  $45^\circ$  осевая составляющая силы формообразования  $-P_x$  увеличивается в три раза, тангенциальная составляющая  $-P_z$  увеличивается в два раза, а радиальная составляющая  $-P_y$  уменьшается примерно на 30%. В работе отмечается качественное согласование результатов расчёта с экспериментальными данными.

При разработке технологического процесса РВ важно знать предельную степень деформации конкретной марки металла. При РВ утонением обрабатываемость листового металла принято характеризовать степенью утонения  $\varepsilon$ :

$$\varepsilon = 100(S_0 - S) / S_0 \quad (1.27)$$

где  $S$  и  $S_0$  – толщины детали и заготовки.

Экспериментально установлено, что предельная степень утонения –  $\varepsilon_n$  зависит от марки металла и от формы готовых деталей. Рекомендуемые значения степени деформации при РВ утонением приведены в таблице 1.2 и составляют 80...90%  $\varepsilon_n$ .

Таблица 1.2 – Рекомендуемые величины степени утонения  $\varepsilon$  при РВ

Материал	$\varepsilon$ , %		
	Конусные детали	Полусферические детали	Цилиндрические детали
Высокопрочные стали	65...75	50	75
Жаропрочные сплавы	40...70	35...55	60...70
Нержавеющие стали	60...75	45...50	65...75
Титановые сплавы	30...55	-	30...75
Алюминиевые сплавы	50...75	35...50	60...75

Известно также эмпирическое соотношение [10], полученное в результате испытаний листовых заготовок из сталей, алюминиевых сплавов и меди при частоте вращения оправки 400 об/мин и подаче 230...380 мм/мин:

$$\varepsilon_n = \frac{\psi}{0,17 + \frac{\psi}{100}} \quad (1.28)$$

где  $\psi$  – относительное сужение в шейке образца при испытаниях на одноосное растяжение, %

График указанной зависимости представлен на рис.1.11.

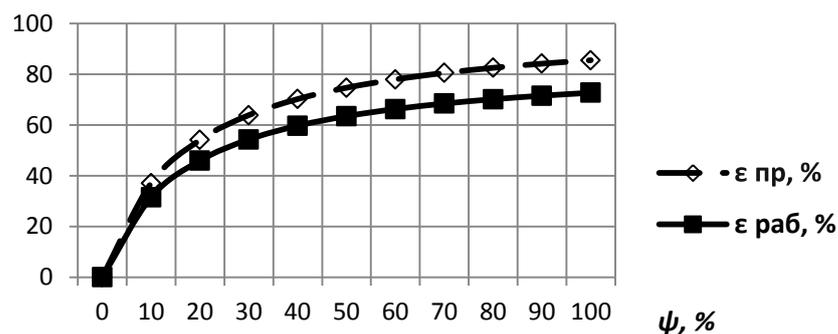
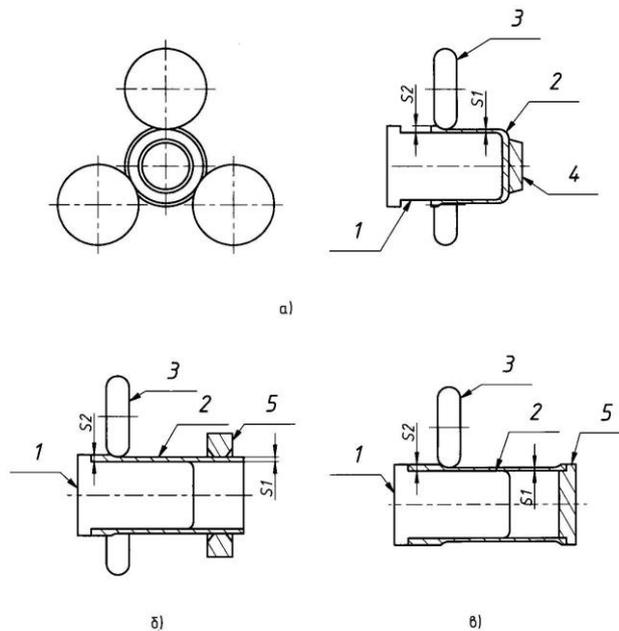


Рис.1.11. Зависимость  $\varepsilon_{пр}$  и  $\varepsilon_{раб}$  от  $\psi$

Степень деформации на каждом переходе должна быть рациональной. Исследования, проведенные в МГТУ им. Н. Э. Баумана на стали марки 12Х18Н10Т и алюминиевом сплаве марки Д1, показали, что при РВ предельная степень деформации  $\varepsilon_n$  за один переход в зависимости от относительной осевой подачи ( $f_0 = f/S_0$ ) сначала возрастает до определённого

значения, а затем остается постоянной. По мнению авторов это объясняется тем, что вначале с увеличением осевой подачи увеличиваются граничные нормальные сжимающие  $\sigma_{zp}$  и касательные  $\tau_{zp}$  напряжения, вызывающие повышение пластичности материала. Дальнейшее увеличение осевой подачи приводит к возрастанию  $\tau_{zp}$  до значений  $\tau_s$ . Часть металла вытесняется во вне контактную зону, величина которой остается постоянной на всём процессе деформирования, с образованием наплыва перед фронтом давящих элементов. Предельно допустимая деформация ограничивается не только исчерпанием ресурсов пластичности в очаге деформации, но и временным сопротивлением стенки изготовленной детали. При этом, делается вывод о существовании области рациональных технологических параметров, при которых не происходит разрушения заготовки, а при подаче  $f_{prac}$  может быть достигнута предельная деформация, обеспечивающая наибольшую производительность.

На рис.1.12 представлены схемы РВ цилиндрических деталей. Известно, что при РВ цилиндрических деталей происходит увеличение длины вращающейся цилиндрической заготовки за счёт уменьшения её толщины путём создания в продольном направлении локальной нагрузки с помощью одного или нескольких деформирующих инструментов. При прямой схеме РВ предварительно вытянутая заготовка надевается на оправку 1 и фиксируется прижимом 4. Направления течения металла и подачи деформирующих роликов 3 совпадают. Этот способ позволяет изготавливать более точные детали, но требует применения оправок



а – прямая; б – обратная; в – комбинированная  
1 – оправка, 2 – деталь, 3 – ролики, 4 – прижим, 5 – опора

Рис. 1.12. Схемы ротационной вытяжки цилиндрических деталей

длиной больше длины готовых деталей. Последнее затрудняет изготовление крупногабаритных деталей из-за большой массы оправок. При обратной схеме РВ – рис.1.12 б трубчатая заготовка надевается на оправку с буртом до упора в торец, на котором за счёт трения происходит передача крутящего момента. Направления течения металла и подачи деформирующих роликов по этой схеме противоположны. Преимуществом схемы является возможность изготовления длинных деталей на короткой оправке, но требуется исключить продольный изгиб и биение детали после её схода с оправки. С целью уменьшения искривления детали может использоваться кольцевая опора 5. Этот способ более предпочтителен при изготовлении крупногабаритных деталей. При комбинированной схеме РВ – рис.1.12 в деформированной части заготовки с помощью опоры 5 создаются растягивающие напряжения, что позволяет повысить точность изготавливаемых деталей.

Ротационная обработка давлением является давно известной технологией, но её применение приобрело особенное значение с появлением современного оборудования – мощных, в том числе крупногабаритных станков с ЧПУ. Современные специализированные станки с ЧПУ, предназначенные для ротационной обработки давлением, позволяют обрабатывать заготовки из алюминиевых сплавов диаметром до 5,0 м и толщиной до 25 мм, производить при необходимости, токарную обработку как всей поверхности обшивки для обеспечения требуемых допусков по толщине, так и подрезку торца. Один станок может заменить целый комплекс используемого в настоящее время оборудования. В настоящее время в Европе производителями крупногабаритного специализированного оборудования для ротационной обработки давлением являются фирмы: *Leifeld Metal Spinning* (Германия), *DENN* (Испания), *Nova Sidera Metal Forming* (Италия) и др. Некоторые виды оборудования производятся в России.

Ротационной обработкой давлением изготавливают детали самых разных размеров: с толщиной стенки от 0,1 мм до 40 мм, диаметром от 2 мм до 5000 мм и длиной до нескольких десятков метров. Ротационная обработка давлением применяется при изготовлении деталей из самых различных материалов: сталей, алюминиевых, титановых, медных сплавов, жаропрочных и жаростойких сплавов.

Для ротационной обработки давлением применяются:

- плоские листовые заготовки (плиты, листы, ленты, фольга),
- заготовки, полученные предварительной штамповкой, например, с помощью вытяжки из листовых заготовок,
- трубные заготовки,
- точёные заготовки из поковок и штамповок.

Заготовки для ротационной обработки давлением могут быть сварными. Например, в качестве заготовок могут использоваться согнутые из листа конусы или цилиндры, сваренные продольными стыковыми швами. Для изготовления сварных заготовок применяются различные виды сварки, в частности, фрикционная сварка перемешиванием, лазерная или аргонодуговая сварка.

В качестве деформирующего инструмента широко используются свободно вращающиеся ролики, реже – роликовые и шариковые головки, давилники, ролики с приводом, наклонные кольцевые качающиеся и вращающиеся матрицы.

В качестве технологической оснастки, обеспечивающей получение требуемой формы деталей, чаще всего применяются различные оправки, но существуют и схемы ротационной обработки давлением без использования оправок, в которых очаг пластической деформации создаётся между двумя деформирующими роликами, расположенными на противоположных сторонах заготовки. В последние годы активно развиваются способы ротационной обработки давлением, при которых деформирование закреплённой по контуру плоской заготовки, осуществляется вращающимся давилником.

Известны две основные схемы управления положением роликов при РВ проецированием: управление величиной зазора между роликом и оправкой и управление величиной давления на ролике. Обычно РВ по установленному зазору используют для изготовления деталей цилиндрической и конической формы. Более простым и универсальным способом является РВ с регулированием давления на деформирующем ролике. Современные станки позволяют реализовать обе схемы управления.

Отличительной особенностью РВ по сравнению с обычной вытяжкой и вытяжкой с утонением стенки является локализация очага пластической деформации, окружённого упругопластической зоной. При сочетании определенных условий в очаге деформации создаются благоприятные условия для пластического течения металла, что позволяет значительно увеличить предельно допустимую степень деформации за один переход и значительно уменьшить усилия деформирования.

В работе [59] отмечается всегда имеющая место ограниченность возможностей пластического деформирования металлов при обработке давлением и важность расчёта предельных деформаций, превышение которых приводит к появлению различного рода дефектов в виде разрывов, появления складок, гофров и поверхностей с так называемой «апельсиновой коркой», локальных утонений стенки сверх допустимых пределов. Наиболее частыми дефектами листовой штамповки, в частности, при ротационной обработке давлением, является разрушение заготовки под действием растягивающих напряжений, и потеря устойчивости заготовки под действием сжимающих напряжений. Некоторые примеры

указанных дефектов представлены на фотографиях в разделе 4. Предельные деформации заготовок зависят от большого числа факторов: марки и состояния материала (отожжённое или нагартованное), геометрических параметров, например в виде отношений характерных размеров к толщине заготовки, напряжённо-деформированного состояния, температурно-скоростных условий деформирования, контактного трения и др. Знание этих зависимостей позволяет разрабатывать рациональные технологические процессы обработки. В монографии также указывается на развитие теоретико-эмпирических методов прогнозирования предельных деформаций Г. А. Смирновым-Аляевым, В. Л. Колмогоровым, В. И. Ершовым В. Ф. Катковым, и др. исследователями. Это связано с желанием объединения преимуществ как теоретического, так и эмпирического методов, исключив их недостатки. Теоретические методы позволяют решить разнообразные задачи, используя минимальное количество экспериментальных данных, но точные решения получены для небольшого числа задач, а эмпирические методы позволяют решать только конкретные задачи, требуя проведения большого количества экспериментов.

Известно, что при РВ давление ролика на заготовку в очаге деформации могут достигать  $3000 \text{ Н/мм}^2$ , при этом значительно изменяется структура и механические свойства металла. В процессе холодной пластической деформации, в том числе при ротационной обработке давлением, происходит существенное изменение физико-механических свойств материалов. В частности наблюдается деформационное упрочнение металлов и сплавов, называемое также наклёпом или нагартовкой. При этом прочностные свойства материалов, характеризуемые пределами прочности и текучести, твёрдостью увеличиваются, а пластические свойства, характеризуемые относительными удлинением и сужением, ударной вязкостью – уменьшаются. В производстве изделий ракетно-космической техники деформационное упрочнение применяют для повышения прочностных свойств материалов, которые не подвергаются термическому упрочнению, например, сплавов типа Al-Mg. При наклёпе происходит и изменение физико-химических свойств материалов. Происходит увеличение электрического сопротивления, уменьшается теплопроводность и стойкость к коррозии, может происходить выделение мелкодисперсных частиц по границам зёрен и по плоскостям скольжения и другие явления. Деформационное упрочнение сплавов в процессе ротационной обработке давлением и его влияние на эксплуатационные характеристики деталей является сложным и недостаточно изученным вопросом явлением. Исследования, проведённые рядом авторов, показали, что прочностные и пластические свойства деталей, изготовленных ротационной обработке давлением зависят от факторов трёх групп: от механических и физико-химических свойств, присущих самим сплавам, от технологических факторов процесса и от конструктивных факторов, характеризующих заготовки и технологическую оснастку.

К первой группе относится способность конкретного сплава к упрочнению, часто характеризуемая величиной относительного равномерного сужения образца при растяжении до момента появления шейки –  $\psi$ . По значению величины  $\psi$  сплавы разделяют на сильно упрочняющиеся (нержавеющие аустенитные стали, титановые сплавы, медь,  $\psi \geq 25\%$ ), средне упрочняющиеся (углеродистые стали, латунь, алюминиевые сплавы,  $20\% \leq \psi \leq 25\%$ ) и мало упрочняющиеся ( $\psi \leq 20\%$ ). Сплавы, относящиеся ко второй группе, как правило, требуют при обработке проведения промежуточных термообработок для снятия наклёпа. Для восстановления пластических свойств материалов после холодной деформации заготовки подвергают высоко или низко температурному отжигу или закалке в зависимости от марки материала. В ряде случаев целесообразно производить термообработку не всей заготовки, а её отдельных частей. При ротационной обработке давлением необходимо учитывать физико-химические процессы, происходящие в обрабатываемых материалах, в частности старение термически упрочняемых алюминиевых сплавов марок 1201, Д16 и др., связанное с дисперсионным твердением. Проведённые исследования показали, что для материалов, подвергаемых искусственному старению, целесообразно холодную пластическую обработку проводить в свежо закалённом виде, так как их обработка в отожженном состоянии хотя и возможна, но может потребовать дополнительной трудоёмкой правки после искусственного старения, иногда сопровождаемого значительными остаточными деформациями.

Ко второй группе факторов относятся:

суммарная величина пластической деформации, которая при РВ характеризуется показателем  $\psi$ , и величина деформации за один переход (проход), количество переходов (проходов) деформирования, величина зазора между роликом и оправкой, скорость вращения заготовки, величина подачи ролика, температура заготовки в процессе деформирования, траектории движения ролика, история деформирования.

Величина зазора между роликом и оправкой значительно влияет на протекание процессов РВ и на степень деформационного упрочнения. Могут наблюдаться явления потери устойчивости фланца заготовки, неконтролируемые изменения формы за очагом пластической деформации, локальная потеря устойчивости пластического течения с возникновением волнистой обработанной поверхности и др. Большое влияние на процессы РВ оказывает смазка. Как правило, все процессы РВ реализуются в условиях хорошей смазки, облегчающей пластическое течение обрабатываемого металла.

К третьей группе факторов относятся: рабочие радиусы и диаметр ролика, геометрические параметры профиля ролика, радиус скругления оправки, форма и размеры заготовки. Радиусы закруглений ролика и оправки значительно влияют на напряжённо-деформированное состояние в очаге пластической деформации при ротационной обработке давлением.

В связи со сложностью теоретического изучения процесса упрочнения материала заготовки, в частности в процессе ротационной обработке давлением, необходимо проведение экспериментальных исследований.

При обработке давлением тонколистовых заготовок, часто ограничивающим фактором является потеря устойчивости с образованием гофров. При РВ из плоского листа потеря устойчивости наблюдается на свободном фланце, в котором при обработке возникают сжимающие напряжения. В зависимости от режимов обработки сжимающие напряжения могут возникать как в радиальном, так и в окружном направлении. Поэтому потеря устойчивости фланца может происходить либо с образованием радиальных гофров, либо – кольцевых гофров. Устойчивость пластического формообразования является недостаточно исследованным разделом теории листовой штамповки, особенно для тонколистовых заготовок со сложным напряжённо-деформированным состоянием, а тем более обладающих выраженной анизотропией. Имеются результаты теоретических и практических исследований по некоторым видам устойчивости пластического формообразования, но они недостаточны для разработки рациональных технологических процессов формообразования, в частности, при РВ. В развитие теории устойчивости пластин значительный вклад внесли работы С. П. Тимошенко. Ряд задач устойчивости оболочек решены И. Г. Бубновым и Б. Б. Галеркиным. А. А. Ильюшиным разработана теория устойчивости пластин при наличии пластических деформаций. В. И. Феодосьев отмечал, что задача об устойчивости за пределами упругости не полностью вписывается в классическую схему, так как в ней под устойчивостью понимается способность системы восстанавливать первоначальное состояние после устранения причин, вызвавших отклонение от положения равновесия, а система, подвергшаяся пластической деформации, лишена указанного свойства. В. Д. Головлёвым отмечалось, что потеря устойчивости формообразования характеризуется возникновением больших местных деформаций, которые обычно приводят или к разрушению металла, или к образованию недопустимо больших искажений формы деталей.

Для исследования вопросов потери устойчивости тонкостенных заготовок в процессах обработки металлов давлением используем определение, предложенное в монографии [59], а именно, под потерей устойчивости будем понимать такое неблагоприятное изменение формы обрабатываемой заготовки, которое приводит к появлению недопустимой волнистости, складок и гофров или ограничивает возможности дальнейшего формоизменения. Для ротационной обработки давлением вопросы потери устойчивости заготовок актуальны, так как технические и технологические возможности её предотвращения очень ограничены. Анализ литературных источников показал, что явление потери устойчивости при ротационной обработке давлением исследовано недостаточно, а известные методики расчёта устойчивости тонкостенных деталей

при решении задач пластического деформирования не позволяют разрабатывать технологические процессы.

Вопросы повышения эксплуатационных характеристик крупногабаритных тонкостенных корпусных деталей рассмотрены в работах [71, 77]. Было показано, что деформирование заготовки двумя или тремя роликами с использованием локального нагрева заготовки вблизи очага деформации при изготовлении различных осесимметричных деталей из высокопрочных интенсивно упрочняющихся материалов позволяет значительно интенсифицировать и расширить технологические возможности процесса раскатки. В работах определены взаимосвязи между геометрическими параметрами очага деформаций и технологическими параметрами процесса при комбинированной ротационной обработке давлением. Для моделирования процесса комбинированной деформирующей обработки разработан программный комплекс на базе *Mathcad 2001 Professional*, позволяющий определять деформации при изготовлении корпусных деталей сферической, эллиптической, параболической и гиперболической форм. Заявлено, что расхождение между теоретическими и экспериментальными значениями не превышает 10%, при этом разработанные методики позволили повысить точность изготовления деталей от квалитетов *IT10...IT12* до *IT9* и снизить параметр шероховатости обработанных поверхностей  $R_a$  с 2,5...1,25 мкм до 1,63...0,16 мкм. Кроме того, удалось снизить массу изготовленных деталей.

В работе [74] исследовалось влияние технологических факторов многопроходной ротационной вытяжки на качество заготовок профильных деталей из коррозионностойких и жаропрочных сталей марок ЭП708, ХН60ВТ, 12Х18Н10Т. Проведённые экспериментальные исследования выявили основные факторы, наиболее значительно влияющие на качество готовых деталей. Такими факторами предложено считать:

- подачу ролика (эксперименты проводились в диапазоне от 15 до 70 мм/мин),
- частоту вращения заготовки (в диапазоне от 100 до 400 об/мин),
- радиус рабочей части деформирующего ролика (в диапазоне от 2 до 8 мм),
- величину относительного зазора ( $\Delta z$ ), равную отношению величины зазора, установленного между роликом и оправкой, и величиной зазора, рассчитанного по «закону синуса» (в диапазоне от 0,9 до 1,1).

Качество обработанных поверхностей оценивалось по параметру шероховатости  $R_a$ . После обработки контролировались упругие остаточные деформации  $\Delta l$  детали по толщине. Производились измерения поперечной деформирующей силы. На основе полного факторного эксперимента получены математические модели процесса в виде уравнений регрессии:

параметр шероховатости  $R_a$  в мкм:

$$R_a = 1,17f + 0,071\omega + 3R_p - 0,0028f\omega - 0,117fRR_p - 0,0068\omega R_p + 2,28 \cdot 10^{-4} f\omega R_p - 29,9 \quad (1.29)$$

величина упругих остаточных деформаций в мм:

$$\Delta l = 0,48 - 0,004f - 0,026R_p - 0,049\Delta z - 0,019R_p\Delta z + 0,03fR_p + 0,0056f\Delta z \quad (1.30)$$

поперечная сила деформирования в Н:

$$P_x = 0,46f - 0,019\omega + 0,44R_p - 12\Delta z - 9,28 \cdot 10^{-4}f\omega - 8,8 \cdot 10^{-4}\omega R_p + 0,024\omega\Delta z + 9,8 \quad (1.31)$$

Результаты экспериментов показали, что величина параметра шероховатости  $R_a$  сильно зависит от величины подачи и от величины рабочего радиуса ролика. Определена область оптимальных значений технологических факторов, обеспечивающих получение деталей с шероховатостью  $R_a$  менее 6,3 мкм.

В работе [80] приведены результаты экспериментальных исследований изменения механических свойств  $\sigma_b$ ,  $\sigma_{0,2}$ ,  $\delta_5$  сталей 10ГН и СП28, а также алюминиевого сплава АМг6, при изготовлении РВ цилиндрических деталей по трёх роликовой схеме. В качестве варьируемых параметров использовалась степень деформации  $\varepsilon$ , которую изменяли в диапазоне от 10% до 70%, и рабочая скорость подачи  $f$ , которую изменяли в диапазоне от 0,55 мм/об до 2 мм/об. Деформирование осуществляли коническими роликами с углами рабочего конуса от  $10^\circ$  до  $30^\circ$ . Частота вращения оправки с заготовкой была постоянной – 180 об/мин. Механические характеристики материала заготовок определялись на продольных образцах в соответствии с ГОСТ 1497. Было установлено, что при увеличении угла рабочего конуса ролика от  $15^\circ$  до  $20^\circ$  наблюдается более интенсивное изменение механических свойств деталей и увеличение высоты наплыва перед роликом с 0,47...0,74 мм до 0,7...1,14 мм.

Детали, обработанные роликом с углом рабочего конуса  $30^\circ$ , имели значительные поверхностные дефекты, связанные с возникновением большого наплыва перед роликом. Для исследованных материалов наблюдалось значительное изменение механических свойств в зависимости от степени деформации. Так, например, для сплава АМг6 при степени деформации 50% величины  $\sigma_b$  и  $\sigma_{0,2}$  возросли соответственно на 55...60% и 70...75%, а величина  $\delta_5$  уменьшилась в 4 раза. На основании экспериментальных данных были построены зависимости  $\sigma_b$ ,  $\sigma_{0,2}$ ,  $\delta_5$  от  $\varepsilon$  в виде:  $y = y_0 + a\varepsilon^b$ . Для исследованных материалов приведены вычисленные константы  $y_0$ ,  $a$  и  $b$ . В частности, для сплава АМг6 отожжённого при  $T = 320^\circ \dots 350^\circ\text{C}$  в течение 120 мин при обработке по схемам 1: роликами с закрытой калибровкой и  $\alpha_p = 30^\circ$  после низкотемпературного отжига и схеме 2: роликами с открытой калибровкой и  $\alpha_p = 20^\circ$ , получены экспериментальные константы, представленные в таблице 1.3.

Таблица 1.3 – Значения коэффициентов упрочнения для сплава АМг6

Схема обработки	y	y <sub>0</sub>	a	b
1	$\sigma_B, \text{Н/мм}^2$	282	183,4	0,53
	$\sigma_{0,2}, \text{Н/мм}^2$	212	243,4	0,62
	$\delta_5, \%$	23,5	-24,29	0,52
2	$\sigma_B, \text{Н/мм}^2$	282	286,4	0,64
	$\sigma_{0,2}, \text{Н/мм}^2$	212	354,8	0,68
	$\delta_5, \%$	23,5	-28,24	0,53

В работе [93] приведены результаты экспериментальных исследований изменения механических свойств  $\sigma_B$ ,  $\sigma_{0,2}$ ,  $\delta$  стали 10 при изготовлении РВ цилиндрических деталей по трём схемам обработки тремя роликами: открытой калибровки, закрытой калибровки, с разделением очага деформации между роликами. Авторы отмечают, что анализ результатов экспериментов показал практическую независимость характера изменения механических свойств от схемы обработки. После РВ анизотропия механических свойств в долевом и поперечном направлении детали незначительна, но имеется небольшое различие в значениях  $\delta$ . На  $\sigma_B$ ,  $\sigma_{0,2}$  влияет не только степень деформации, но и вид предварительной термообработки.

Анализируя представленные результаты исследований, можно предположить, что при РВ деталей двойной кривизны роликом с радиусной рабочей частью существенное влияние на изменение механических свойств материала будут оказывать степень деформации и отношение величины рабочего радиуса ролика к величине зазора между роликом и оправкой.

В работах [10, 32] отмечается, что исследования влияния РВ на механические свойства сплавов аналогично влиянию при холодной прокатке. Исследования микроструктуры показывают измельчение зёрен и их вытягивание в направлении течения металла. В этой связи представляет интерес изучение анизотропии свойств деталей, полученных РВ. Отмечается, что после РВ конусов с углом  $\alpha=21^\circ$ , предел прочности возрастает: у коррозионностойких сталей с  $612 \text{ Н/мм}^2$  до  $1210 \text{ Н/мм}^2$ , у углеродистых сталей с  $334 \text{ Н/мм}^2$  до  $670 \text{ Н/мм}^2$ , у алюминия с  $91,5 \text{ Н/мм}^2$  до  $176 \text{ Н/мм}^2$ , при этом относительное удлинение очень сильно уменьшается: у коррозионностойких сталей с 65% до 6...7%, у углеродистых сталей с 45% до 5%, у алюминия с 45% до 9%. Отмечается также, что предел прочности жаропрочных, ферритных и мартенситных сталей после РВ увеличивается, но основное упрочнение наблюдается при  $\varepsilon \leq 20\%$ .

В отчёте исследовательского центра NASA в Лэнгли [116], приведены результаты изучения микроструктуры и механических характеристик, применяемых в авиации и космонавтике алюминиевых сплавов до и после РВ. Отмечается, что в отличие от исследований РВ сталей, РВ алюминиевых сплавов находится на ранней стадии. Исследовалось два способа РВ цилиндрических обечаек: по двух роликовой и одно роликовой схеме. Приведены зависимости

площади контакта ролика с заготовкой от степени деформации, радиуса ролика и радиуса заготовки.

Влияние РВ на толщину стенки неоднозначно – с одной стороны уменьшение диаметра заготовки ведет к увеличению толщины стенки, а с другой – локальная деформация в очаге пластической деформации приводит к уменьшению толщины стенки [10]. Согласовано изменяя величину подачи и давление ролика на заготовку, можно управлять распределением толщины детали.

В производстве деталей ракетно-космической техники весьма актуальным представляется вопрос о ротационной обработке давлением с зазорами между деформирующим роликом и оправкой отличными от зазоров, определяемых по правилу «синуса». Это связано с несколькими причинами. Во-первых, листовые заготовки в состоянии поставки часто имеют величину допуска на отклонения по толщине большую, чем готовая деталь. Во-вторых, металлургическая промышленность изготавливает листовые заготовки толщиной с шагом 0,5 мм, что далеко не всегда соответствует требуемым толщинам готовых деталей. В-третьих, часто изготавливаемые детали имеют переменную толщину стенки, например, локальные кольцевые утолщения в зоне сварки для компенсации пониженной прочности сварного шва по сравнению с основным материалом. Поэтому, при ротационной обработке давлением часто возникает задача либо уменьшить, либо увеличить толщину заготовки в процессе обработки.

В отраслевой нормативно-технической документации указывается, что при изготовлении ответственных деталей разнотолщинность в одной заготовке не должна превышать для листовых заготовок – поля допуска на толщину исходного листа, а для механически обработанных заготовок – 0,05 мм. Превышение указанных величин приводит к перекосам торца детали, искривлению её оси, овальности диаметральных размеров и увеличенной разнотолщинности готовой детали. Также указывается, что при вытяжке по проекционной схеме качественные детали могут быть получены только при изготовлении деталей ротационной вытяжкой по правилу «синуса» или «близко к нему». Что имеется в виду под степенью близости, не указывается.

Практика показывает, что процесс ротационной обработки давлением может сопровождаться целым рядом явлений, непосредственно влияющих на качество изготавливаемых деталей. Можно наблюдать различные виды потери устойчивости фланца заготовки, выпучивание заготовки после ролика, появление волнообразной рябизны обработанной поверхности, шелушение поверхности контакта с роликом, появление «апельсиновой корки», чрезмерные утонение с образованием разрывов материала в зонах растяжения, трещины в зонах сжатия и др.

В работе [32] отмечается, что на процесс РВ значительное влияние оказывают механические свойства материала заготовки; степень утонения, частота вращения оправки, величина подачи инструмента, прямой или обратный способ деформирования, геометрические параметры деформирующих роликов, зазор между оправкой и обрабатываемой деталью, угол наклона плоскости деформирующего ролика к оси заготовки и другие.

На основе результатов работ, проведённых многими исследователями [10, 17, 28], приводятся некоторые практические рекомендации. Установлено, что чем больше отношение  $\sigma_{\theta}/\sigma_{0,2}$  материала стремится к 1,0, тем меньшей способностью к РВ он характеризуется. Мягкие металлы хуже обрабатываются РВ, чем более твёрдые и прочные. При многопроходной РВ рекомендуется на первом проходе назначать утонение стенки в пределах 40...60%, а на последующих проходах – 30...50%. Утонение стенки менее 20% при РВ нежелательно, так как «... возможно растрескивание внутренних слоев металла». Указывается, что при соблюдении этих рекомендаций и величине подачи ролика 0,1...0,8 мм/об, возможно изготовление цилиндрических деталей с суммарной степенью утонения до 90% без промежуточных отжигов.

Значительное влияние на процесс РВ может оказывать возникновение напльва металла перед деформирующим роликом. Напльв металла чаще наблюдается при обработке мягких сплавов с большими степенями утонения, с большими величинами подачи и применении роликов с малыми радиусами скругления. Разрушение напльва нередко приводит к появлению чешуйчатых отслоений металла на обработанных поверхностях деталей. Отмечается, что напльв возникает в результате потери устойчивости стенки заготовки под действием силы деформирования от продольной подачи и может сопровождаться отрывом стенки заготовки от оправки, что может приводить к и увеличению диаметра заготовки. В качестве одного из эффективных способов предотвращения появления напльвов является поворот оси вращения ролика относительно оси вращения заготовки на угол 3...12°.

Для нормального протекания РВ цилиндрических деталей при прямом способе рекомендуется обеспечивать плотное прилегание заготовки к оправке, например, предварительной калибровкой.

В процессе РВ может происходить изменение диаметра готовой детали. Существенное влияние на это оказывают радиальный зазор между деформирующим инструментом и оправкой, геометрия деформирующего инструмента, в частности радиус при вершине ролика, передний угол и ширина калибрующего пояса инструмента. Рекомендуется принимать радиус при вершине ролика тем меньше, чем больше напряжение текучести обрабатываемого материала.

Скорость вращения заготовки ограничивается возникновением нежелательных вибраций, возникающих из-за недостаточной жёсткости системы станок-приспособление-инструмент-

деталь. Для деталей малых и средних размеров при прямой РВ предлагается выбирать скорость вращения из диапазона 100...300 об/мин при подачах 0,1...0,8 мм/об. Для уменьшения вибраций не рекомендуется применение роликов диаметром кратным диаметру оправки.

В работе [65] указывается, что в процессе РВ реализуется сложный механизм взаимодействия заготовки и инструмента. Качество получаемой поверхности детали во многом зависит от условий трения между роликом, при этом экспериментально установлено, что при больших степенях деформации трение качения не оказывает существенного влияния на энергосиловые параметры процесса и шероховатость поверхности, а трение скольжения, порождаемое различными величинами линейных скоростей ролика и заготовки, оказывает значительное влияние. Выведены зависимости, показывающие, что при увеличении угловой скорости вращения заготовки и увеличении радиуса давилного элемента, проскальзывание ролика относительно заготовки увеличивается.

В работе [28] отмечается, что из-за большого количества различных факторов, влияющих на процесс РВ проектированием, получение деталей требуемого качества может быть обеспечено только методом проб с использованием отработанных технологических рекомендаций.

В работе [61] представлены результаты исследования методом делительной сетки действительного течения материала при РВ цилиндрических образцов из алюминиевого сплава АМг5. Исследования проводились на толстостенной трубе, разрезанной в продольном направлении и скреплённой на концах резьбовыми втулками. Внутренний диаметр трубы превышал диаметр оправки на 0,02...0,03 мм. Координатная сетка наносилась в плоскости разёма образца с базой 0,5 мм. В качестве деформирующего инструмента использовались шарики. Представлена координатная сетка после РВ прямым способом со степенью обжатия 20%. Для сравнения приведены результаты, полученные при вытяжке заготовки с такой же исходной и конечной толщиной стенки. Отмечается различный характер течения при РВ и обычной вытяжке. Для описания искажения ячеек при РВ выделено три участка. На прошедшем обжатие участке ячейки получили значительные деформации в осевом и радиальном направлении. При этом, материал наружных слоев заготовки вытекал из-под давилного элемента в направлении обратном его перемещению. На втором участке – участке контакта давилного элемента с материалом, ячейки поворачивались в направлении движения инструмента, наблюдалось течение материала в свободную зону перед фронтом давилных элементов с образованием наплыва. На участке перед давилным элементом наблюдались незначительные деформации. Прилегающие к оправке внутренние слои образца получали преимущественно осевые деформации. Представлены графики изменения суммарной деформации сдвига вдоль двух траекторий у наружной и внутренней поверхности образца для обычной вытяжки и РВ. Отмечается, что при РВ шариками наблюдается значительное

превышение интенсивности деформаций внешних волокон по сравнению с обычной вытяжкой, при этом указанное превышение тем больше, чем больше степень обжатия. Указывается, что экспериментально установлены два вида наплывов. При этом один предложено рассматривать как стационарное утолщение перед давальным элементом, которое на протяжении процесса не меняет своей формы. Для наплыва второго типа характерно увеличение внутреннего диаметра заготовки перед давальным элементом. Такой вид наплыва обычно возникает при РВ шарами большого диаметра и при значительной степени обжатия. В процессе РВ этот наплыв может срезаться с образованием кольцевой стружки. На рисунках представлено образование кольцевой стружки при РВ алюминиевого сплава АМц.

Данных по исследованию методом координатной сетки подвергаемых РВ деталей, с формой, отличной от цилиндрической, не выявлено.

В работе [59] указывается, что обычно кривые упрочнения материала при холодной пластической деформации описываются степенными функциями вида:

$$\sigma_s = A(\varepsilon_0 + \varepsilon_i)^n \quad (1.32)$$

где  $A$ ,  $\varepsilon_0$ ,  $n$  – экспериментальные константы, определяемые по результатам испытаний на одноосное растяжение,  $\varepsilon_i$  – интенсивность деформаций.

В работе [55] предлагается в производственных условиях указанные экспериментальные константы приближённо определять по формулам:

$$n = \ln(1 + \delta_p) \quad (1.33)$$

$$\varepsilon_0 = \frac{\delta_p \left( \frac{\sigma_{0,2}}{\sigma_s} \right)^{\frac{1}{n}}}{1 - \left( \frac{\sigma_{0,2}}{\sigma_s} \right)^{\frac{1}{n}}} \quad (1.34)$$

$$A = \frac{\sigma_{0,2}}{\varepsilon_0^n} \quad (1.35)$$

где  $\delta_p$  – относительное равномерное удлинение при разрыве.

Одним из важных вопросов при проектировании технологических процессов является вопрос управления толщиной стенки изготавливаемых деталей. Известно три способа управления толщиной стенки при ротационной вытяжке. Один способ предусматривает изготовление для последующей ротационной вытяжки плоских заготовок переменной толщины обработкой резанием. Второй способ предусматривает изготовление специально профилированных промежуточных заготовок методами обработки давлением, в частности вытяжкой или формовкой листовой заготовки. Известен и комбинированный способ управления толщиной

стенки изготавливаемых деталей, сочетающий оба способа. Но все эти способы трудно реализуемы при изготовлении крупногабаритных тонкостенных деталей и связаны с большими дополнительными затратами

В работе [10] отмечается, что наибольшие технологические трудности вызывает ротационная вытяжка полусфер. Для построения заготовки плавной переменной толщины требуется графоаналитический или тригонометрический расчёт с интервалом  $0,5^\circ$ . На рис.1.13 представлено возможное сечение заготовки, предназначенной для ротационной вытяжки полусферы постоянной толщины. Обработка заготовки резанием выполняется на карусельном станке с вакуумным прижимом, после которой периферическая часть заготовки отгибается с помощью формообразующих операций вытяжки, отбортовки или ротационной вытяжки.

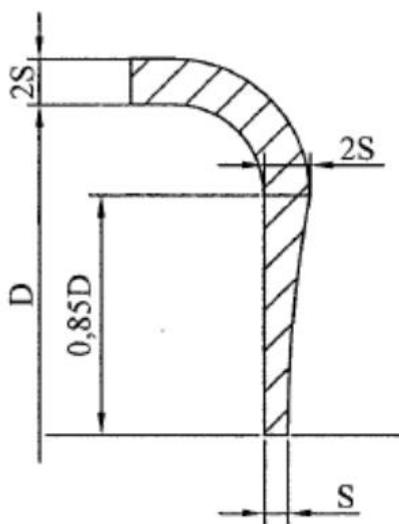


Рис.1.13 Заготовка для полусферы

Таким образом, проведенный анализ технологий изготовления тонкостенных осесимметричных деталей показывает, что применение ротационной вытяжки взамен традиционных технологий листовой штамповки имеет ряд преимуществ в части повышения коэффициента использования металла, снижения трудоемкости и повышения качества деталей, однако ее использование в реальном производстве ограничивается нерешенностью рядом теоретических и технологических задач.

Таким образом, для совершенствования процессов ротационной вытяжки элементов конструкций топливных баков ракет-носителей необходимо разработать комплексную методику, позволяющую на основе исходных данных, включающих геометрические параметры деталей и механические характеристики материала, минимизировать целевые функции, в качестве которых предлагается рассмотреть массу, степень их негерметичности и точность изготавливаемых деталей. Комплексная методика должна включать:

- моделирование потери устойчивости фланца заготовки для оценки возможности обработки с отклонением от правила «синуса»,
- моделирование напряжённо-деформированного состояния для уточнения распределения прочностных характеристик после обработки,
- моделирование упрочнения материала после ротационной вытяжки с целью снижения массы рассматриваемых элементов конструкций.

Комплексная методика совершенствования процессов ротационной вытяжки должна обеспечить изготовление объектов исследования с улучшенными свойствами

#### 1.4. Выводы по главе 1

1. Проведенный анализ литературных и патентных источников показал, что в печати опубликовано большое количество работ, посвященных исследованию и совершенствованию процессов ротационной обработки давлением. Указанные работы проводятся во всех промышленно развитых странах мира, что свидетельствует об актуальности рассматриваемой темы.

2. Большое количество работ посвящено изучению РВ цилиндрических деталей и изучению изготовления полых деталей из листовых и предварительно отштампованных полых заготовок способом РВ проецированием по правилу «синуса». В результате проведенных исследований разработаны модели, позволяющие рассчитывать энергетические и силовые параметры процессов изготовления цилиндрических и конических деталей постоянной и переменной толщины, в том числе с учётом анизотропии свойств исходных заготовок, определены предельные возможности деформирования, связанные с исчерпанием ресурса пластичности металла и приведены технологические рекомендации по практической реализации исследованных процессов. Вместе с тем, практически отсутствуют работы, посвященные токарно-давилной обработке (ротационной вытяжке с постоянной толщиной стенки), а также работы, где обработка ведется с отклонением от правила «синуса».

3. Во всех процессах ротационной вытяжки не исследованы вопросы потери устойчивости фланца заготовки при отклонении от правила «синуса», что ограничивает возможности управления толщиной стенки получаемой детали и, как следствие, ведет к многопереходной и многооперационной обработке, повышая затраты и сроки технологической подготовки производства.

4. Не выяснено влияние отклонений обработки от правила «синуса» на эксплуатационные свойства готовых деталей, а именно на микроструктуру и механические характеристики  $\sigma_6$ ,  $\sigma_{0,2}$ ,  $\delta$ , что не позволяет количественно моделировать степень деформационного упрочнения материала при ротационной вытяжке.

5. Отсутствует модель напряженно-деформированного состояния в локальном очаге деформации с учетом не монотонности деформирования материала при ротационной вытяжке конусообразных деталей, которая устанавливала бы связь напряженно-деформированного состояния с технологическими параметрами обработки.

6. Для практического использования недостаточно известных способов обработки и имеющихся технологических рекомендаций по ротационной вытяжке деталей с отклонением от правила «синуса».

На основе представленных выводов можно уточнить цель и задачи исследования.

Целью работы является разработка комплексной методики совершенствования процессов ротационной вытяжки, обеспечивающей изготовление элементов конструкций топливных баков с улучшенными свойствами.

Под улучшенными свойствами элементов конструкций понимается их уменьшенная масса и повышенные характеристики прочности, точности и герметичности.

Для достижения указанной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Провести анализ известных технологий; методик проектирования технологических процессов и методов расчета технологических параметров при ротационной вытяжке, в том числе:

- разработать классификацию деталей, изготовление которых возможно методами ротационной вытяжки;

- выявить недостатки традиционных методов изготовления деталей;

2. Выполнить теоретические исследования процессов ротационной вытяжки:

- определить предельные возможности обработки с отклонением от правила «синуса»;

- уточнить напряженно-деформированное состояние в очаге пластической деформации при изготовлении конусообразных деталей методом координатных сеток;

- провести моделирование деформационного упрочнения материала деталей после ротационной обработки.

3. Провести экспериментальные исследования процессов ротационной вытяжки, в том числе:

- подтвердить пределы возможной обработки конических деталей с отклонением от правила «синуса»;

- подтвердить соответствие напряженно-деформированного состояния в очаге пластической деформации разработанной теоретической модели;

- экспериментально определить изменение механических свойств материалов деталей после ротационной вытяжки.

4. Разработать пути совершенствования процессов ротационной вытяжки с целью достижения требуемых показателей качества изготавливаемых деталей, включая новые способы комбинированной обработки.
5. Разработать методики проектирования и расчёта технологических параметров новых разновидностей ротационной вытяжки.
6. Выполнить технологическую отработку, включая разработку технологических процессов изготовления деталей топливных баков, проектирование и изготовление технологической оснастки, отработку режимов изготовления деталей.

## ГЛАВА 2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ РОТАЦИОННОЙ ВЫТЯЖКИ

### 2.1. Исследования потери устойчивости фланца заготовки при ротационной вытяжке

В работе [59] отмечается, что возможности пластического деформирования деталей при обработке давлением ограничены предельными деформациями, превышение которых приводит к появлению в заготовках различных дефектов в виде трещин, складок, гофров, поверхностей с «апельсиновой коркой», локального утонения и других. Наиболее часто встречающимися дефектами при обработке давлением является разрушение заготовки под действием растягивающих напряжений, и потеря устойчивости формы заготовки под действием напряжений сжатия. Обзор литературы по обработке металлов давлением позволяет сделать вывод о том, что работ, посвящённых исследованию предельных деформаций под действием растягивающих напряжений, значительно больше числа работ, связанных с прогнозированием предельных деформаций, приводящих к потере устойчивости заготовки.

Под потерей устойчивости в соответствии работе [59] будем понимать такое неблагоприятное и неконтролируемое изменение формы деформируемой заготовки, которое приводит к появлению дефектов в виде волнистости, складок, гофров и (или) ограничивает возможности дальнейшего формообразования. В процессах ротационной обработки давлением тонкостенных заготовок явление потери устойчивости играет очень большую роль, так как в этих процессах, в отличие от традиционных процессов обработки давлением крайне ограничены технологические возможности управления этим явлением.

Вопросы потери устойчивости рассматривались в ряде работ, но, как правило, задачи в них решаются в предположении малости деформаций при переходе от одной устойчивой формы заготовки к другой, что не всегда является корректным допущением, так как известно, что в ряде случаев обработку заготовки можно продолжать и после её потери устойчивости.

Рассмотрим возможность разработки критерия предельного деформирования, для количественного моделирования возможности ротационной обработки давлением заготовки после потери устойчивости. В настоящее время подобные критерии не определены.

Из практики хорошо известно, что для устойчивого протекания процесса ротационной вытяжки с преднамеренным утонением стенки заготовок, необходимо, чтобы выполнялось правило «синуса». В тоже время, из ряда работ известно, что ротационную вытяжку можно проводить и с отклонением от этой зависимости, но возможности предельного деформирования при реализации таких процессов исследованы недостаточно. На практике такие задачи встречаются и требуют решения.

Сформулируем гипотезу о возможности ротационной вытяжки с отклонением от правила «синуса». При отклонении от правила «синуса» (1.3) фланец заготовки теряет плоскую форму с образованием гофров как при переутонении ( $S < S_0 \sin \alpha$ ), так и при недоутонении ( $S > S_0 \sin \alpha$ ) стенки детали из-за возникновения в нём сжимающих окружных или меридианных напряжений. Дальнейшее деформирование потерявшего устойчивость фланца возможно, если величина, характеризующая величину гофра, не превышает определённого значения.

Рассмотрим процесс обработки с отклонением от правила «синуса» при следующих допущениях:

- деформируемая оболочка является тонкостенной, то есть её толщиной можно пренебречь по сравнению с двумя другими размерами;
- материал заготовки однородный, изотропный, и несжимаемый;
- деформированное состояние плоское;
- процесс деформирования монотонный;
- очаг деформации квазистационарный;
- трение в процессе пластической деформации не учитывается.

На рис.2.1 изображена расчётная схема, иллюстрирующая возникновение сжимающих меридианных напряжений во фланце заготовки, при РВ с переутонением стенки детали. Рассмотрим кольцевой фланец с постоянной толщиной  $S_0$ , малой по сравнению с внешним и внутренним радиусом  $R_0$  и  $R$ . Оси  $x$  и  $y$  расположены в срединной плоскости фланца, а ось  $z$  совпадает с осью вращения заготовки.

Предположим, что за малый интервал времени, когда текущий радиус касания деформирующего ролика равнялся  $R$ , произошло переутонение стенки детали по сравнению с расчётной толщиной равной  $S_0 \sin \alpha$  на величину  $dS$ . Тогда толщину стенки  $S_1$  можно найти из уравнения:

$$S_1 = S_0 \sin \alpha - dS \quad (2.0)$$

Предположим, что перемещение элементарного объёма металла с конического участка заготовки во фланец вызовет перемещение его нижней границы на величину  $dx$ .

Из условия равенства смещаемых объёмов, пренебрегая бесконечно малыми более высокого порядка, можно записать равенство:

$$S_0 dx = (S_0 \sin \alpha - S_1) \frac{dR}{\sin \alpha} \quad (2.1)$$

После преобразования (2.1) получим:

$$dx = \frac{S_0 \sin \alpha - S_1}{S_0 \sin \alpha} dR \quad (2.2)$$

Выражение (2.2) позволяет определить величину перемещения нижней границы фланца при обработке с переутонением стенки. Это перемещение металла будет вызывать во фланце сжимающие напряжения, которые могут вызывать пластические деформации фланца, вызывающие увеличение его толщины. При определённом значении  $x$  происходит бифуркация и плоская форма фланца переходит в другую относительно устойчивую форму с образованием радиальных гофров. Величину  $x$  можно определить из выражения:

$$x = \int_{R_1}^R \left(1 - \frac{S_1}{S_0 \sin \alpha}\right) dr \quad (2.3)$$

где  $x$  – перемещение нижней границы фланца после обработки от радиуса  $R_1$  до радиуса  $R$ ;  
 $R_1$  – величина радиуса, на котором началась обработка с отклонением от правила «синуса»

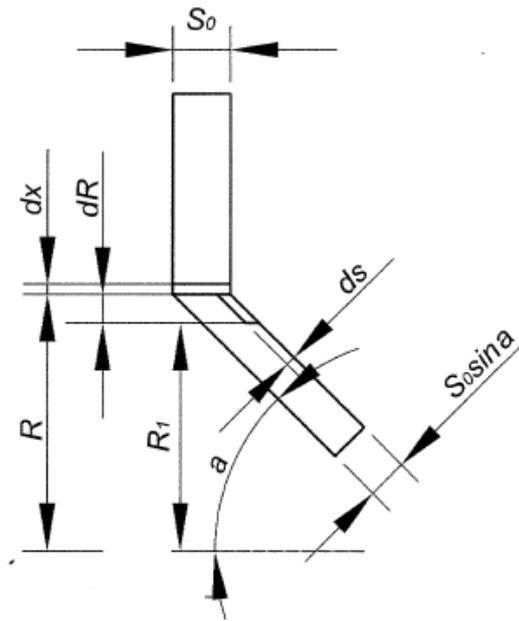


Рис.2.1. Схема смещённых объёмов при переутонении стенки

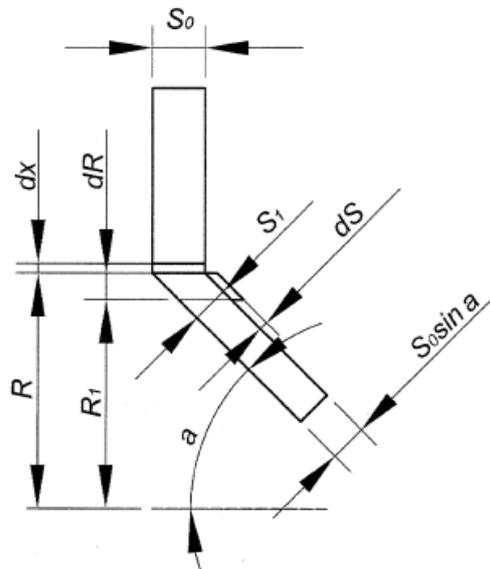


Рис.2.2. Схема смещённых объёмов при недоутонении стенки

Величины, характеризующие изгиб фланца в начальный момент, незначительны и позволяют проводить дальнейшую обработку, но в процессе обработки они быстро возрастают и появляются недопустимые дефекты в виде складок и разрывов.

На рис.2.2 изображена расчётная схема, иллюстрирующая возникновение сжимающих тангенциальных напряжений во фланце заготовки, при РВ с недоутономением стенки детали.

Предположим, что в этом случае будет происходить перемещение элементарного объёма металла из фланца на конический участок заготовки, что вызовет перемещение его нижней границы на величину  $dx$ . Величину  $dx$  можно аналогично определить из выражения (2.2).

Определим напряжённое состояние во фланце заготовки при обработке с отклонением от правила синуса.

Схема напряжённого состояния во фланце заготовки при обработке с переутономением стенки детали представлена на рис.2.3.

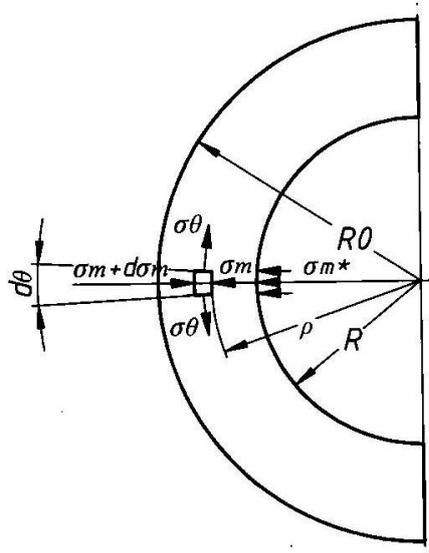


Рис.2.3. Схема напряжённого состояния во фланце заготовки при обработке с переутономением стенки детали

В этом случае во фланце в точке с текущим радиусом  $\rho$  возникают сжимающие меридианные напряжения  $\sigma_m$  и растягивающие тангенциальные напряжения  $\sigma_\theta$ .

Схема напряжённого состояния во фланце заготовки при обработке с недоутономением стенки детали представлена на рис.2.4.

В этом случае во фланце в точке с текущим радиусом  $\rho$  возникают сжимающие тангенциальные напряжения  $\sigma_\theta$  и растягивающие меридианные напряжения  $\sigma_m$ .

Напряжённое состояние фланца определим путём совместного решения системы, состоящей из уравнения равновесия для осесимметричного напряжённого состояния в цилиндрической системе координат и приближённого условия пластичности Треска-Сен-Венана:

$$\begin{cases} \rho \frac{d\sigma_m}{d\rho} + \sigma_m - \sigma_\theta = 0 \\ \sigma_s = \sigma_m - \sigma_\theta \end{cases} \quad (2.4)$$

где  $\sigma_s$  – напряжение текучести материала заготовки,  
 $\sigma_m$  и  $\sigma_\theta$  – меридианные и тангенциальные напряжения,  
 $\rho$  – текущий радиус фланца.

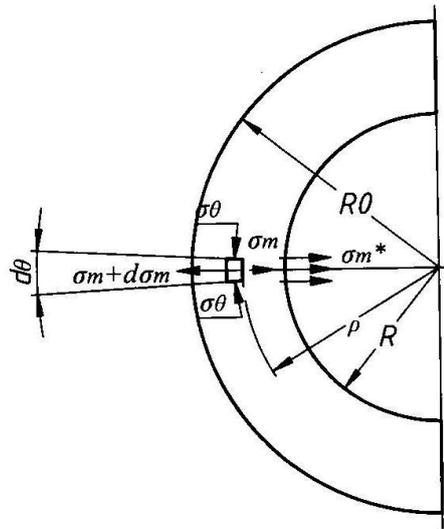


Рис.2.4. Схема напряжённого состояния во фланце заготовки при обработке с недоутономением стенки детали

Из совместного решения системы уравнений (2.4) после интегрирования имеем:

$$\sigma_m = \pm \sigma_s \ln\left(\frac{R_0}{R}\right), \quad (2.5)$$

где  $R_0$  – внешний радиус фланца.

На радиусе  $R$  величину меридианных напряжений можно определить из выражения:

$$\sigma_m = \sigma_s \ln\left(\frac{R_0}{R}\right) \quad (2.6)$$

Аналогичным образом можно определить распределение напряжений во фланце при обработке с переутономением стенки детали. С учётом знака напряжений имеем:

$$\sigma_m = -\sigma_s \ln\left(\frac{R_0}{R}\right) \quad (2.7)$$

Работу внешней силы, необходимую для перемещения нижней границы фланца на величину  $x$ , как для случая с недоутономением, так и для случая с переутономением стенки детали можно определить из выражения:

$$A_{вне} = \int_x F \sigma_m dx \quad (2.8)$$

где  $F$  – площадь цилиндрической поверхности фланца с напряжениями  $\sigma_m$ .

Учитывая (2.6), после интегрирования получим:

$$A_{вне} = 2\pi R S_0 \sigma_s \ln\left(\frac{R_0}{R}\right) x \quad (2.9)$$

Работа внешней сил может пойти на увеличение толщины фланца или привести к возникновению гофров. Возможен и промежуточный вариант, при котором произойдёт и увеличение толщины фланца, и возникновение гофров. Учитывая малую относительную толщину детали, будем считать, что вся работа внешних сил пойдёт на образование гофров.

Оценим работу внутренних сил при потере устойчивости фланца заготовки. Сначала рассмотрим случай потери устойчивости фланца заготовки с образованием радиальных гофров. На рис.2.5 изображена трёхмерная модель фланца в начальный момент потери устойчивости с образованием восьми радиальных гофров.

Предположим в первом приближении, что на внутренней границе фланца радиусом  $R$  гофры отсутствуют, а их высота линейно возрастает с увеличением радиуса и достигает максимальной величины на внешней кромке радиусом  $R_0$ . Будем считать, что поперечные сечения гофров являются сопряжёнными дугами окружностей. Предполагая ступенчатую эпюру распределения напряжений по толщине фланца, изгибающий момент в гофре можно оценить, аналогично случаю гибки «широкой» полосы, выражением:

$$M_{изг} = \sigma_s S_0^2 \frac{R_0 - R}{4} \quad (2.10)$$

Выражение для расчёта работы внутренних сил при изгибе:

$$A_{вну} = M_{изг} \Phi_1 \quad (2.11)$$

где  $\Phi_1$  – сумма углов изгиба всех гофров, зависящая от количества гофров и от их высоты.

Предположим в первом приближении, что предельная величина гофров, при которой деформирование фланца невозможно, определяется суммарным углом изгиба величиной  $\Phi_1$ . Тогда уравнение (2.11) с учётом (2.10) будет иметь вид:

$$A_{вну} = \sigma_s S_0^2 \frac{(R_0 - R)\Phi_1}{4} \quad (2.12)$$

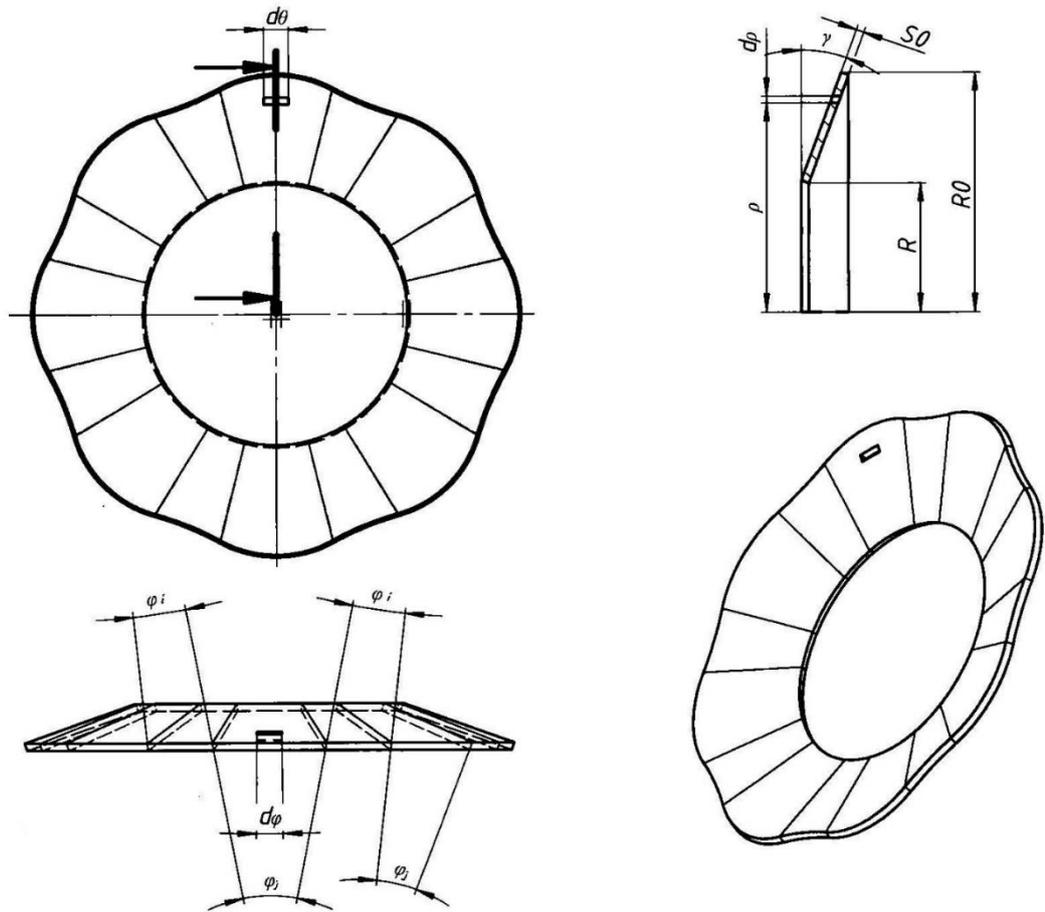


Рис.2.5. Схема потери устойчивости фланца с образованием продольных гофров

В соответствии с методом баланса работ, приравнявая работы внешних и внутренних сил из уравнений (2.9) и (2.12), получим:

$$2\pi\sigma_s R S_0 \ln\left(\frac{R_0}{R}\right) x_1 = \sigma_s S_0^2 \frac{(R_0 - R)\Phi_1}{4} \quad (2.13)$$

Из выражения (2.13) можно определить предельную величину перемещения нижней границы фланца заготовки, при которой, в соответствии с принятым критерием  $\Phi_1$  происходит потеря устойчивости фланца и его дальнейшее деформирование становится невозможным:

$$x_1 = S_0 \Phi_1 \frac{(R^* - 1)}{8\pi \ln R^*} \quad (2.14)$$

где  $R^* = R_0/R$  – относительная ширина фланца.

Расчётные величины предельного относительного перемещения нижней границы фланца  $x_1/S_0$  при потере устойчивости с образованием радиальных гофров в зависимости от относительной ширины фланца  $R^*$  и критерия  $\Phi_1$  представлены в таблице 2.1 и на рис. 2.7.

Во втором случае потери устойчивости фланца образуется кольцевой гофр, трёхмерная модель которого изображена на рис.2.6. В этом случае изгибающий момент в первом приближении можно оценить из выражения:

$$M_{изг} = \sigma_S S_0^2 \frac{\pi(R_0 + R)}{4} \quad (2.15)$$

В качестве предельного угла изгиба примем величину угла  $\Phi_2$ . Тогда работа внутренних сил при изгибе будет равна:

$$A_{вн} = \sigma_S S_0^2 \frac{\pi\Phi_2(R_0 + R)}{4} \quad (2.16)$$

Приравнявая работы внешних и внутренних сил из уравнений (2.9) и (2.16), получим:

$$2\pi R S_0 \sigma_S \ln\left(\frac{R_0}{R}\right) x_2 = \sigma_S S_0^2 \frac{\pi\Phi_2(R_0 + R)}{4} \quad (2.17)$$

Учитывая  $R^* = R_0/R$ , имеем:

$$x_2 = S_0 \Phi_2 \frac{(R^* + 1)}{8 \ln R^*} \quad (2.18)$$

Расчётные величины предельного относительного перемещения нижней границы фланца –  $x_2/S_0$  при потере устойчивости с образованием кольцевого гофра в зависимости от относительной ширины фланца  $R^*$  и критерия  $\varphi_2$  представлены в таблице 2.2 и на рис. 2.8.

В качестве примера рассмотрим обработку заготовки с размерами:  $R_0 = 100$  мм,  $R = 75$  мм,  $S_0 = 2$  мм,  $S_1 = 0,9$  мм,  $\alpha = \pi/6$  и зададим величины предельных критериев деформации  $\Phi_1 = 2\pi$ , а  $\Phi_2 = \pi/2 - \alpha = \pi/3$ , что соответствует прилеганию фланца заготовки к оправке.

Из формулы (2.3):

$$x = \frac{(S_0 \sin \alpha - S_1)}{S_0 \sin \alpha} dR = \frac{2 \sin \pi/6 - 0,9}{2 \sin \pi/6} (100 - 75) = 2,50 \text{ мм} \quad (2.19)$$

Из формулы (2.14):

$$x_1 = S_0 \frac{(R^* - 1)\Phi_1}{8\pi \ln R^*} = 2 \frac{(100/75 - 1) 2\pi}{8\pi \ln(100/75)} = 0,58 \text{ мм} \quad (2.20)$$

Из формулы (2.18):

$$x_2 = S_0 \Phi_2 \frac{(R^* + 1)}{8 \ln R^*} = 2 \frac{\pi}{3} \frac{100/75 + 1}{8 \ln(100/75)} = 2,12 \text{ мм} \quad (2.21)$$

Сравнивая полученные значения  $x$ ,  $x_1$  и  $x_2$ , из выражений (2.19), (2.20) и (2.21) видим, что минимальная величина предельного перемещения нижней границы фланца имеет место в случае потери устойчивости с образованием радиальных гофров. При этом, возможности обработки с переутонением стенки в рассматриваемом примере примерно в 3,6 раза больше по

сравнению с обработкой с недоутономением. Это необходимо учитывать при разработке технологических процессов ротационной вытяжки.

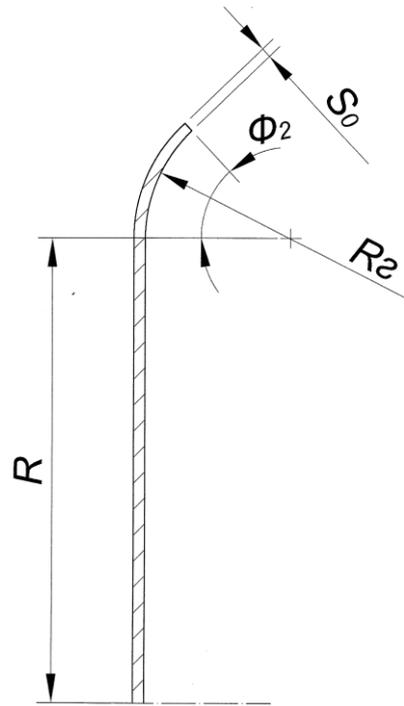


Рис.2.6. Схема потери устойчивости фланца с образованием кольцевого гофра

Из условия равенства величин  $x$  и  $x_l$  при совместном решении уравнений (2.3) и (2.14) можно определить предельную величину  $R_n$ , при которой в соответствии с принятым критерием возможно появление радиальных гофров:

$$R_n = \frac{S_0^2 \Phi_1 (R^* - 1) \sin \alpha}{8\pi (S_0 \sin \alpha - S_1) \ln R^*}; \quad (2.22)$$

В рассматриваемом примере после подстановки:

$$R_n = \frac{2^2 2\pi (100/75 - 1) \sin \pi/6}{8\pi (2 \sin \pi/6 - 0,9) \ln(100/75)} = 5,79 \text{ мм}; \quad (2.23)$$

Таким образом, при радиальном перемещении деформирующего ролика на величину 5,79 мм, при переутономении  $dS/S_0 = 0,1/2,0 = 5\%$ , возможно появление радиальных гофров и дальнейшая обработка будет затруднена.

В заключение отметим, что предлагаемый метод расчёта предельных отклонений от правила «синуса» при РВ приближённый, но он может быть усовершенствован при уточнении величин критериев потери устойчивости по результатам дополнительных экспериментальных исследований.

В таблице 2.1 приведены результаты расчётов предельных относительных перемещений  $x_1/S_0$  нижней границы фланца при потере устойчивости с образованием радиальных гофров, а в таблице 2.2 – предельные относительные перемещения  $x_2/S_0$  нижней границы фланца при потере устойчивости с образованием кольцевых гофров.

Диаграммы, представленные на рисунках 2.7 и 2.8, иллюстрируют возможность на этапе разработки технологического процесса оценить риск потери устойчивости заготовки, т.е. более качественно разработать технологический процесс, в том числе уменьшить число переходов.

Таблица 2.1 – Предельное относительное перемещение нижней границы фланца при потере устойчивости с образованием радиальных гофров

$\Phi_1 \backslash R^*$	1,01	2,0	3,0	4,0	5,0	6,0
$\pi/6$	0,021	0,030	0,038	0,045	0,052	0,058
$\pi/3$	0,042	0,060	0,076	0,090	0,104	0,116
$\pi/2$	0,063	0,090	0,114	0,135	0,155	0,174
$2\pi/3$	0,084	0,120	0,152	0,180	0,207	0,233
$5\pi/6$	0,105	0,150	0,190	0,225	0,259	0,291
$\pi$	0,126	0,180	0,228	0,271	0,311	0,349
$7\pi/6$	0,147	0,210	0,265	0,316	0,362	0,407
$4\pi/3$	0,167	0,240	0,303	0,361	0,414	0,465
$3\pi/2$	0,188	0,271	0,341	0,406	0,466	0,523
$5\pi/3$	0,209	0,301	0,379	0,451	0,518	0,581
$11\pi/6$	0,230	0,331	0,417	0,496	0,570	0,640
$2\pi$	0,251	0,361	0,455	0,541	0,621	0,698

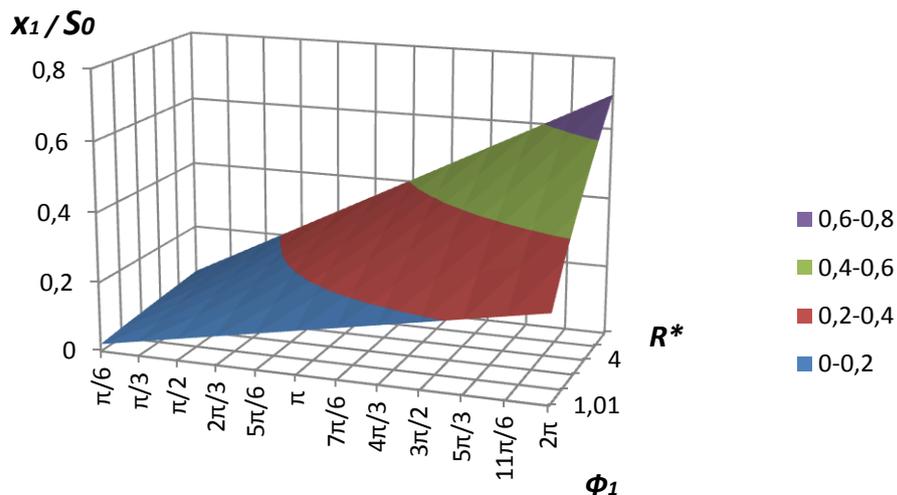


Рис.2.7. Зависимость  $x_1/S_0$  от  $R^*$  и  $\Phi_1$

Таблица 2.2 – Предельное относительное перемещение нижней границы фланца при потере устойчивости с образованием кольцевого гофра

$\Phi_2 \backslash R^*$	1,01	2,0	3,0	4,0	5,0	6,0
$\pi/12$	6,609	3,576	1,627	0,734	0,342	0,167
$\pi/6$	13,219	7,151	3,255	1,467	0,684	0,334
$\pi/4$	19,828	10,727	4,882	2,201	1,026	0,501
$\pi/3$	26,437	14,303	6,509	2,935	1,368	0,668
$5\pi/12$	33,046	17,878	8,137	3,668	1,709	0,835
$\pi/2$	39,656	21,454	9,764	4,402	2,051	1,002

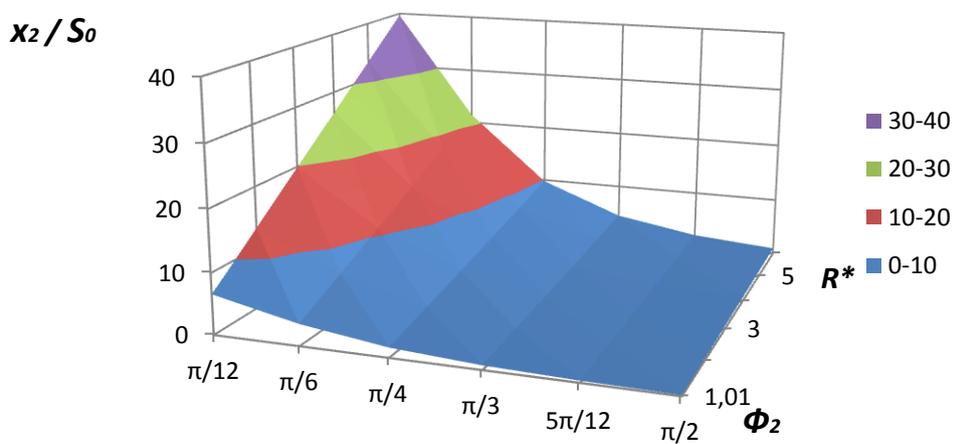


Рис. 2.8. Зависимость  $x_2/S_0$  от  $R^*$  и  $\Phi_2$

**Рассмотрим методику проектирования технологических процессов с отклонением от правила «синуса».**

Методика рассмотрена для изготовления деталей типа конусообразных обшивок с утолщениями, представленных на рисунке 2.9. Такую обшивку можно изготовить двумя традиционными способами с использованием ротационной вытяжки.

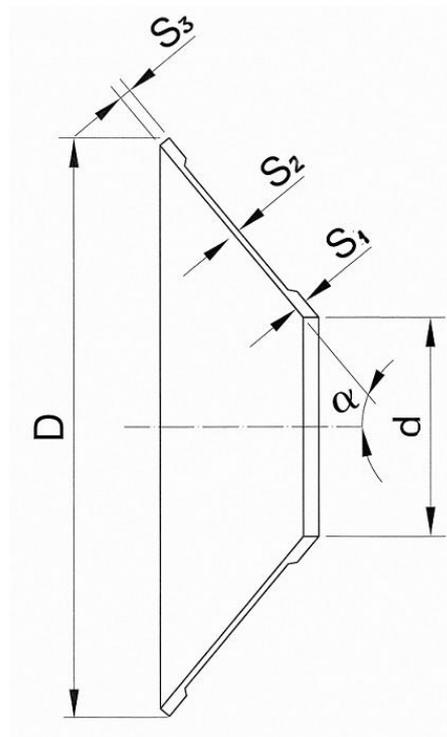


Рис.2.9. Обшивка с утолщениями

По первому известному способу из листовой заготовки вырезают круглую заготовку, которую подвергают ротационной вытяжке с соблюдением правила «синуса». Полученную коническую промежуточную заготовку химически фрезеруют или обрабатывают резанием с помощью токарной или фрезерной операции с удалением металла. Согласно второго известного способа, сначала на исходной заготовке выполняют кольцевую проточку с удалением металла химическим фрезерованием или обработкой резанием, а затем промежуточную заготовку подвергают ротационной вытяжке с соблюдением правила «синуса». Недостатком обоих способов является обработка детали с удалением металла, что приводит к увеличению затрат и нерациональному использованию материала, связанному с образованием стружки или отходов химического фрезерования.

Усовершенствовать процесс изготовления подобных деталей можно за счёт использования нового способа, а именно, ротационной вытяжкой с отклонением от правила «синуса». В ряде работ обоснована принципиальная возможность такой обработки, однако в литературе отсутствуют практические рекомендации по проектированию подобных процессов.

Методика должна обеспечить определение: размеров исходной заготовки, а также траекторию деформирующего ролика.

Описываемая ниже методика применима для определения основных параметров технологического процесса изготовления деталей, как с прямолинейной, так и с криволинейной

образующей: конических, полусферических, эллиптических и т.п. Детали могут быть как постоянной, так и переменной толщины.

Разработку технологического процесса начинают с определения размеров исходной заготовки: диаметра круга и его толщины, исходя из необходимого объёма материала. Далее выполняют поверочный расчёт для подтверждения возможности обработки с отклонением от правила «синуса». Расчёт заготовок основан на графоаналитическом методе и проводится в последовательности от детали к заготовке следующим образом.

Строится трёхмерная модель детали в адаптивной параметрической системе автоматизированного проектирования, например, *Inventor*, *T-flex*, *NX*, *CATIA* и др. На свободных концах детали достраиваются технологические припуски. Численные значения конструктивных элементов припуска выбираются из известных рекомендаций по ротационной вытяжке. При необходимости, назначают припуски для окончательной обработки детали с удалением материала по толщине.

Для расчёта промежуточной заготовки деталь разбивают вдоль образующей на  $N$  кольцевых участков так, чтобы прямолинейные образующие колец, кроме крайних, были параллельны оси вращения заготовки, а криволинейные образующие колец можно было аппроксимировать прямыми. Количество кольцевых участков зависит от сложности формы изготавливаемой детали, для проведённых расчётов было достаточно 20...50 участков. Измеряют длины образующих колец. С помощью 3D моделирования определяют объёмы материала каждого кольца.

Из технологических рекомендаций в зависимости от формы детали (цилиндрическая или конусообразная поверхность), марки и состояния материала (отожжённое, нагартованное, закалённое и т.п.), вида обработки (с нагревом или без нагрева) выбирается величина относительной деформации заготовки по толщине при  $PB - \varepsilon$ . Известно, что величина относительной деформации заготовки по толщине менее 20% нежелательна, а рациональные величины лежат в диапазоне от 25% до 70%. Толщину исходной заготовки в первом приближении –  $S_{01}$  определяют по формуле:

$$S_{01} = S_2 / (1 - \varepsilon_\partial) \quad (2.24)$$

где  $\varepsilon_\partial$  – максимально допустимое значение относительной деформации

Полученную величину округляют в меньшую сторону до ближайшей толщины листа –  $S_0$  из используемого сортамента с учётом минусового допуска на толщину листа в состоянии поставки.

Выполняют поверочный расчёт возможности обработки с недоутономением стенки в соответствии с принятым критерием  $\Phi_2$  из неравенства:

$$S_{01} \leq S_2 / (\sin \alpha - \Phi_2 \frac{R_1^* + 1}{8 \ln R_1^*}) \quad (2.25)$$

где  $R_1^* = R_0 / R_1$  – относительная ширина фланца.

Соответствующая область допустимых значений расположена ниже поверхности, изображённой на рис. 2.8.

Выполняют поверочный расчёт возможности обработки с переутонением стенки в соответствии с принятым критерием  $\Phi_1$  из неравенства:

$$S_{02} \leq S_1 / (\sin \alpha - \Phi_1 \frac{R_2^* - 1}{8\pi \ln R_2^*}) \quad (2.26)$$

Соответствующая область допустимых значений расположена ниже поверхности, изображённой на рис. 2.7.

Выполняют поверочный расчёт возможности обработки с недоутонением стенки в соответствии с принятым критерием  $\Phi_2$  из неравенства:

$$S_{03} \leq S_3 / (\sin \alpha - \Phi_2 \frac{R_1^* + 1}{8 \ln R_1^*}) \quad (2.27)$$

Из сортамента выпускаемых листов выбирают номинальную толщину исходной заготовки с учётом минусового допуска в состоянии поставки.

Вычисляют степени обжатия заготовки при обработке как с переутонением, так и с недоутонением для всего диапазона возможных толщин заготовки и полученные значения сравнивают с допустимыми.

При невозможности изготовления детали за один переход производят расчёт промежуточной заготовки по известным методикам изготовления способами вытяжки или ротационной вытяжки без преднамеренного утонения стенки, и повторяют расчёты возможности обработки с отклонениями от правила «синуса во втором приближении».

Блок-схема методики проектирования технологического процесса с отклонением от правила «синуса» представлена на рис. 2.10

Рассмотрим пример разработки технологического процесса ротационной вытяжки с отклонением от правила «синуса» конической обшивки с утолщениями.

Исходные данные: эскиз детали представлен на рисунке 2.9.

$D_1 = 2000$  мм;  $D_2 = 3600$  мм;  $S_1 = 4,0$  мм;  $S_2 = 4,6$  мм;  $L_1 = 20$  мм;  $\Phi_1 = \pi/2$ ;  $\Phi_2 = \pi/12$ ;  $\alpha = 45^\circ$ .

Деталь изготавливается из сплава АМг6М. При изготовлении конических деталей из сплава АМг6М ротационной вытяжкой диапазон рациональных величин относительной деформации заготовки по толщине –  $\varepsilon = 25 \dots 45\%$ .

Исходной заготовкой является плоский лист или плита. Толщину исходной заготовки выбирают из интервала:

$$\frac{S_1}{\sin \alpha} \leq S_0 \leq \frac{S_2}{\sin \alpha} \quad (2.28)$$

где  $S_0$  – толщина исходной заготовки.

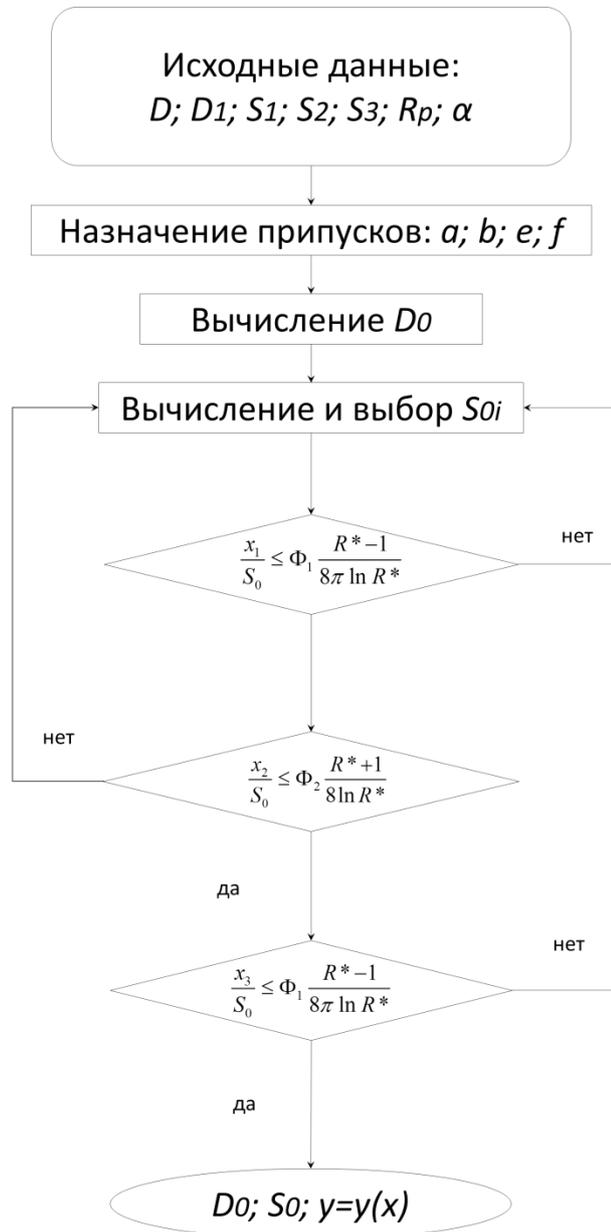


Рис.2.10 Блок-схема методики проектирования технологического процесса

С точки зрения потери устойчивости наиболее неблагоприятным случаем обработки является обработка с широким фланцем, поэтому величину  $R_1^*$  вычислим по формуле:

$$R_1^* = D_2/D_1 = 1,8 \quad (2.29)$$

В первом приближении определяют максимально допустимую толщину исходной заготовки –  $S_{01}$  при ротационной вытяжке с недоутономением из неравенства:

$$S_{01} \leq S_2 / (\sin \alpha - \Phi_2 \frac{R_1^* + 1}{8 \ln R_1^*}) \quad (2.30)$$

После подстановки исходных данных получим  $S_{01} < 8,34$  мм. При обработке по правилу «синуса» толщина исходной заготовки –  $S_{0T}$  должна быть равна:

$$S_{0T} = S_2 / \sin \alpha = 6,505 \quad (2.31)$$

С учётом сортамента выпускаемых листов выбирают номинальную толщину исходной заготовки равной 6,5 мм. Минимальная толщина заготовки с учётом минусового допуска может быть равной 6,1 мм. Расчётная степень обжатия заготовки при обработке с недоутономением –  $\varepsilon_n = 24,6\%$ .

Далее определяют возможность обработки с переутономением стенки. Величину  $R_2^*$  вычисляют по формуле:

$$R_2^* = D_2 / (D_1 + L_1 \sin \alpha) = 1,787 \quad (2.32)$$

В первом приближении определяют максимально допустимую толщину исходной заготовки –  $S_{02}$  при ротационной вытяжке с переутономением из неравенства:

$$S_{02} \leq S_1 / (\sin \alpha - \Phi_1 \frac{R_2^* - 1}{8\pi \ln R_2^*}) \quad (2.33)$$

После подстановки исходных данных получим  $S_{02} < 6,427$  мм. Расчётная степень обжатия заготовки при обработке с переутономением –  $\varepsilon_n = 34,4\%$ .

Далее выполняют поверочный расчёт возможности обработки с недоутономением стенки на участке с толщиной стенки  $S_3$  по формуле, аналогичной (2.29).

Расчёты степеней обжатия заготовки при обработке как с переутономением, так и с недоутономением для всего диапазона возможных толщин заготовки в состоянии поставки: от 6,1 до 6,5 мм показали, что величины  $\varepsilon_n = 24,6\% \dots 29,5\%$ , а величины  $\varepsilon_n = 34,4\% \dots 38,5\%$ .

Таким образом расчёты показали возможность изготовления детали как с недоутономением, так и с переутономением стенки из заготовки постоянной толщины, при этом степени обжатия заготовки лежат в диапазоне рациональных значений.

Эскиз заготовки конической обшивки в утолщениями с припусками представлен на рис.2.11. Припуски  $a, b, e, f$  выбираются по известным методикам обработки резанием и ротационной вытяжки.

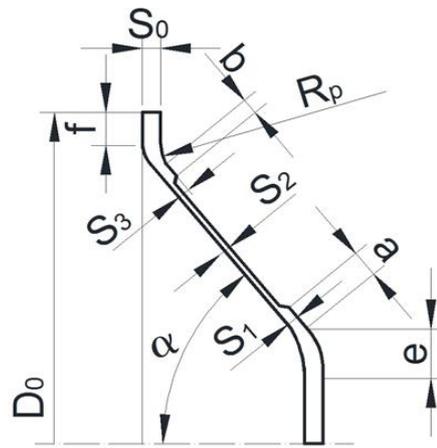


Рис.2.11. Модель заготовки конической обшивки с утолщениями после ротационной вытяжки

Объём заготовки –  $V_0$  удобно определять в результате трёхмерного проектирования детали с припусками, а диаметр заготовки вычисляют по формуле:

$$D_0 = 2\sqrt{V_0/(\pi S_0)} \quad (2.34)$$

Траектория движения деформирующего ролика будет линией эквидистантной поверхности обрабатываемой детали.

Сравним прочностные характеристики материала детали после двух способов обработки: ротационной вытяжки по правилу «синуса» и с отклонением от него. При обработке по правилу «синуса» относительную степень деформации на участке толщиной  $S_1$  определяют по формуле:

$$\varepsilon = 1 - \sin \alpha \quad (2.35)$$

После подстановки  $\varepsilon = 0,293$  в формулы (2.45) и (2.46) получим значения  $\sigma_B = 413 \text{ Н/мм}^2$  и  $\sigma_{0,2} = 366 \text{ Н/мм}^2$ .

При обработке с переутонением на участке с толщиной стенки  $S_1$  относительную степень деформации определяют по формуле:

$$\varepsilon = (S_0 - S_1)/S_0 \quad (2.36)$$

После подстановки значений  $S_0$  и  $S_1$  получим величину  $\varepsilon_n = 0,344$ , и после её подстановки в формулы (2.45) и (2.46) получим значения  $\sigma_B = 427 \text{ Н/мм}^2$  и  $\sigma_{0,2} = 384 \text{ Н/мм}^2$ .

Таким образом, изготовление детали новым способом с отклонением от правила «синуса» по сравнению с традиционным способом ротационной вытяжки повысит значения  $\sigma_B$  на 3,4%, а значения  $\sigma_{0,2}$  на 4,9%, что позволит уменьшить массу детали. В рассматриваемом примере для детали массой 74 кг снижение массы составит 3,6 кг.

Разработанная методика проектирования технологического процесса ротационной вытяжки с отклонением от правила «синуса» позволяет определить основные технологические параметры

изготовления конусообразных деталей переменной толщины с утолщениями. Внедрение методики позволяет проводить расчёты способа изготовления, обеспечивающего снижение массы деталей и затрат на их производство.

Для моделирования процесса РВ с отклонениями от правила «синуса» также разработана методика компьютерного моделирования процесса с использованием параметрической адаптивной программы 3D моделирования *Inventor Pro*, учитывающая потерю устойчивости фланца заготовки при обработке. Методика заключалась в следующем.

По известным геометрическим параметрам: толщина и диаметр исходной заготовки, угол конусности оправки, радиус скругления деформирующего ролика, величина зазора между оправкой и деформирующим роликом, строилась объёмная 3D модель деформируемого участка заготовки и свободного фланца. При этом предполагалось, что толщина фланца в процессе обработки не изменяется, а сам фланец вместо плоской формы становится коническим, изгибаясь вокруг радиуса рабочей части деформирующего ролика. Также предполагалось, что длина фланца по средней линии в продольном направлении в процессе деформирования остается постоянной, а фланец испытывает только изгибные и сдвиговые деформации. Величина радиуса перехода  $R_{II}$  – от свободной поверхности фланца к обработанной конической части заготовки предполагался равным величине:

$$R_{II} = R_p + S_0 \quad (2.37)$$

где  $R_p$  – радиус рабочей части ролика,

$S_0$  – толщина заготовки.

По формуле:

$$V_\phi = \pi S_0 (R_0^2 - R^2) \quad (2.38)$$

вычислялся объём деформируемого участка заготовки и фланца до обработки.

Параметром моделирования были угол конусности фланца. Задавая различные значения угла конусности фланца в программе *Inventor Pro* получали ряд значений объёмов обработанной конической части заготовки с фланцем –  $V_i$ . Полученные значения  $V_i$  аппроксимировали линейной зависимостью от угла конусности фланца. Из условия равенства объёма, полученного в результате аппроксимации, и объёма, вычисленного по формуле (2.38), определяли теоретический угол конусности фланца и высоту гофра.

Указанная методика применима при обработке как с недоутонением, так и с переутонением со степенями отклонения от правила «синуса» на 10...15%, до тех пор, пока не происходит образования продольных гофров. При построении модели учитывался экспериментально установленный факт наклона фланца в сторону деформирующего ролика при обработке с недоутонением и в противоположную сторону – при обработке с переутонением.

В качестве примера в таблице 2.3 приведены теоретические величины значений высоты гофра  $h$ , определённые по изложенной методике для следующих исходных данных:  $R_0=100$  мм,  $R=47$  мм,  $S_0=2,4$  мм,  $R_p=6$  мм, длина обработанного конуса – 30 мм. На графике на рис. 2.12 изображена соответствующая зависимость.

Таблица 2.3 – Зависимость высоты гофра от степени отклонения от правила «синуса»

$R_s, \%$	-10	-5	0	5	10	15
$h, \text{мм}$	-10,5	-7,7	0	2,4	4,1	4,9

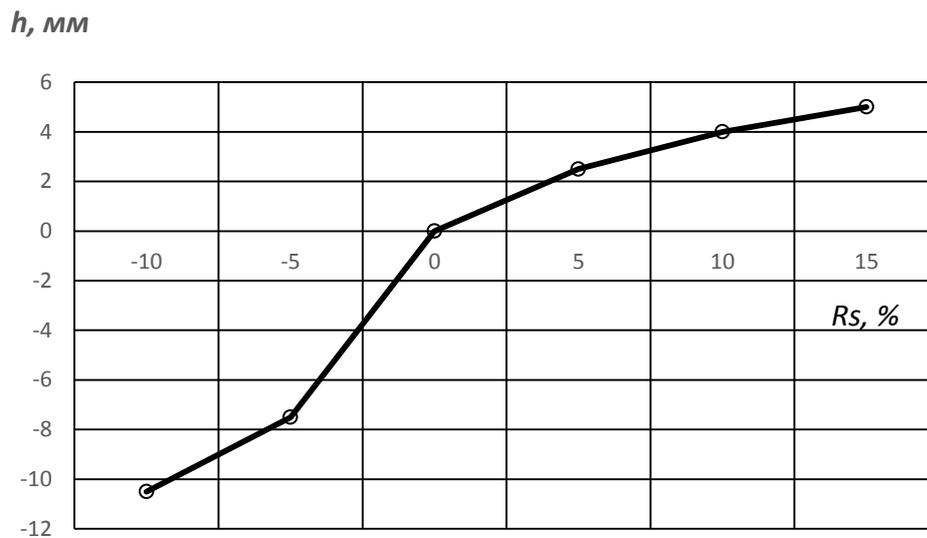


Рис.2.12. Зависимость высоты гофра от степени отклонения от правила «синуса»

Далее полученные теоретические значения высоты гофров сравним со значениями, полученными экспериментальным путём.

## 2.2. Анализ напряжённо-деформированного состояния в очаге пластической деформации конических заготовок методом координатных сеток

Рассмотрим задачу определения напряжённо-деформированного состояния в очаге пластической деформации конической заготовки при РВ. Используем гипотезу жесткопластического тела и допустим, что деформации вне зоны очага пластической деформации отсутствуют, а в зоне очага пластической деформации упругие деформации учитывать не будем в связи с их малой величиной по сравнению с остаточными деформациями. Задачу пластического деформирования рассмотрим в двумерной плоской постановке. Схема процесса РВ в сечении плоскостью, проходящей через ось вращения заготовки, представлена на рис.1.8а.

Схема определения параметров напряжённо-деформированного состояния в очаге пластической деформации заготовки представлена на рис.2.13. Ось  $O_I Z_1$  цилиндрической системы координат проходит через ось вращения заготовки, а ось  $O_I R_I$  – перпендикулярна ей.

Вначале рассмотрим модель с использованием гипотезы «чистого сдвига», предложенную в работе [10]. Согласно этой модели, при РВ материал заготовки послойно сдвигается параллельно оси её вращения, при этом расстояние от оси вращения до слоя остаётся постоянным. Предположим, что частицы металла в очаге пластической деформации перемещаются по дугам окружностей радиуса  $R_p$ . Тогда в системе координат  $ZOR$  координаты узлов сетки в очаге пластической деформации можно найти из системы уравнений:

$$\begin{cases} r^2 + (z - i\delta)^2 = R_p^2 \\ r = j\delta \end{cases} \quad (2.39)$$

где  $\delta$  – шаг сетки в недеформированном состоянии,

$I = 0, 1, \dots, N$ , - номер узла сетки вдоль оси  $r$ ,

$j = 0, 1, \dots, L$ , - номер узла сетки вдоль оси  $z$ .

На основании полученной координатной сетки можно провести анализ напряжённо-деформированного состояния в очаге пластической деформации. В настоящей работе использована методика, изложенная в работе [6].

Длины хорд, соединяющих точки, расположенные вокруг расчётной точки, определялись по формулам:

$$l_r = \left[ (z_{i,j+1} - z_{i,j-1})^2 + (r_{i,j+1} - r_{i,j-1})^2 \right]^{0,5} \quad (2.40)$$

$$l_z = \left[ (z_{i-1,j} - z_{i+1,j})^2 + (r_{i+1,j} - r_{i-1,j})^2 \right]^{0,5} \quad (2.41)$$

где  $r_{i,j}$  и  $z_{i,j}$  – координаты узлов сетки после деформирования.

Главные компоненты тензора деформаций определялись по формулам:

$$\varepsilon_1 = \ln \left\{ \frac{1}{2} \left[ \sqrt{\left( \frac{l_z}{2\delta} \right)^2 + \left( \frac{l_r}{2\delta} \right)^2} + 2 \frac{R_j}{r_{i,j}} + \sqrt{\left( \frac{l_z}{2\delta} \right)^2 + \left( \frac{l_r}{2\delta} \right)^2} - 2 \frac{R_j}{r_{i,j}} \right] \right\} \quad (2.42)$$

$$\varepsilon_2 = \ln \left\{ \frac{1}{2} \left[ \sqrt{\left( \frac{l_z}{2\delta} \right)^2 + \left( \frac{l_r}{2\delta} \right)^2} + 2 \frac{R_j}{r_{i,j}} - \sqrt{\left( \frac{l_z}{2\delta} \right)^2 + \left( \frac{l_r}{2\delta} \right)^2} - 2 \frac{R_j}{r_{i,j}} \right] \right\} \quad (2.43)$$

$$\varepsilon_3 = \ln \frac{r_{i,j}}{R_j} \quad (2.44)$$

где  $R_j$  – радиальная координата соответствующего узла до деформации.

Интенсивность деформаций определялась по формуле:

$$\varepsilon_i = \sqrt{\varepsilon_3^2 + \frac{1}{3}(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2} \quad (2.45)$$

Учитывая, что в данной модели  $r_{i,j} = R_j$ , из уравнения (2.43) следует, что  $\varepsilon_3 = 0$ , и

$$\varepsilon_i = \frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_2}{\sqrt{3}} \quad (2.46)$$

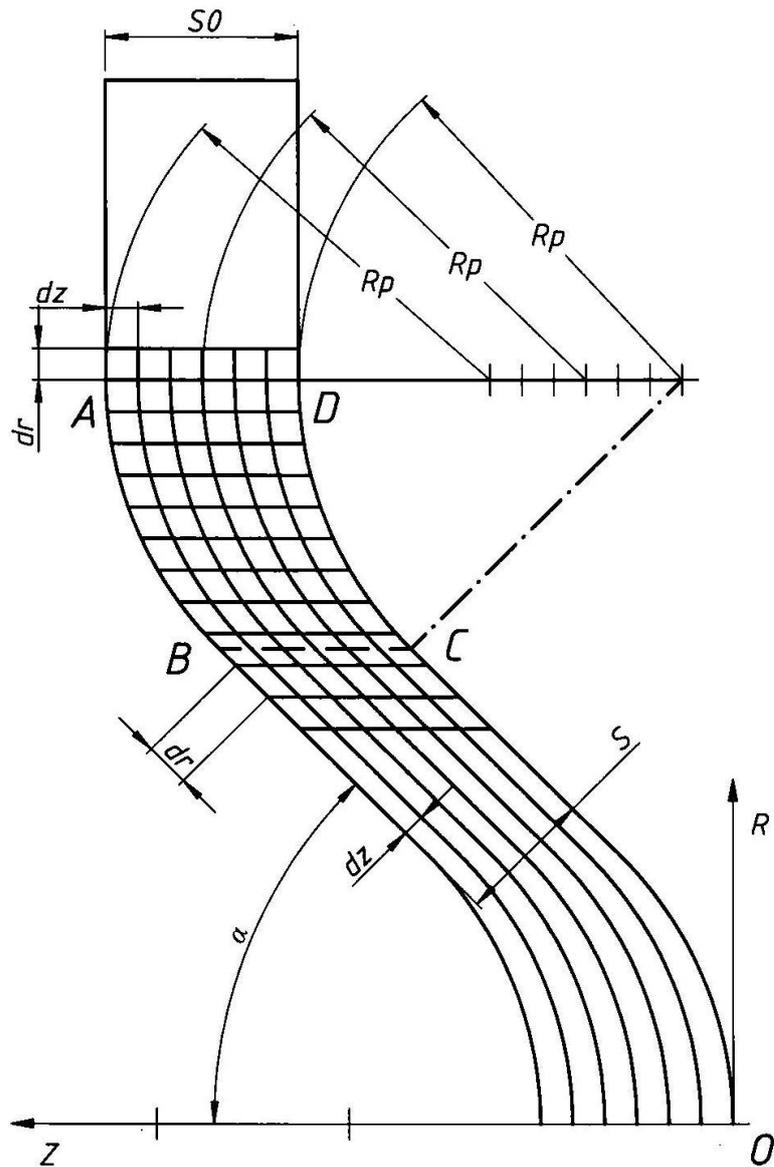


Рис.2.13. Схема координатных сеток в очаге пластической деформации при РВ по правилу «синуса»

В качестве иллюстрации в таблице 2.4 представлены результаты расчетов распределения накопленной деформации  $\varepsilon_i$  и приращение накопленной деформации  $\Delta\varepsilon_i$  в очаге пластической деформации при РВ по правилу «синуса» в модели «чистого сдвига» с параметрами  $R_p / S_0 = 2$  и

$\alpha = \pi/4$ . Графики распределения соответствующих величин представлены на рис.2.14. Расчёты выполнялись в универсальной программе табличных вычислений *EXCEL*.

Таблица 2.4 – Распределение накопленной деформации  $\epsilon_i$  и приращение накопленной деформации  $\Delta\epsilon_i$ .

$J$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$\epsilon_i$	0,00	0,01	0,05	0,10	0,15	0,20	0,26	0,33	0,41	0,50	0,55	0,55
$\Delta\epsilon_i$	0,00	0,01	0,04	0,05	0,05	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09	0,05	0,00

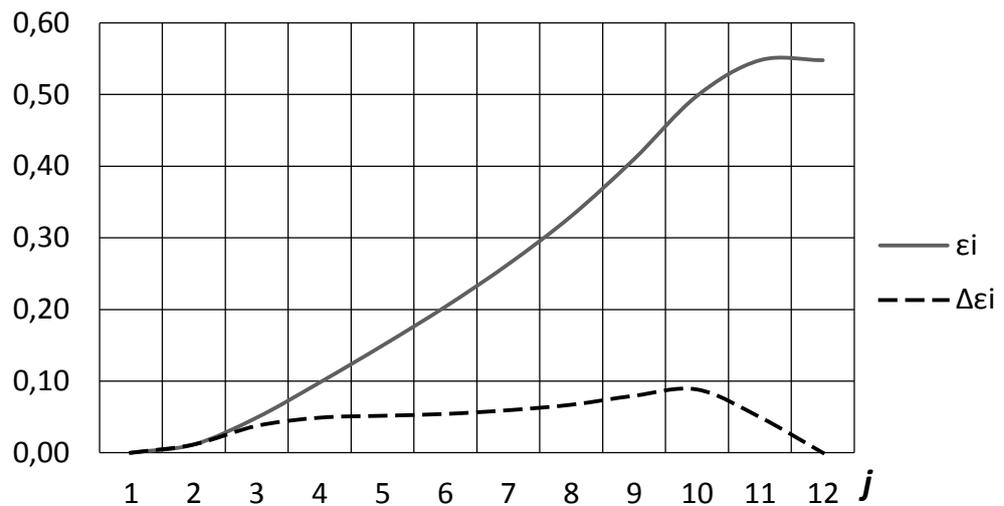


Рис. 2.14. График распределения  $\epsilon_i$  и  $\Delta\epsilon_i$

В таблице 2.5 представлены результаты расчетов зависимости накопленной деформации  $\epsilon_i$  от угла  $\alpha$  оправки, а на рис.2.15 изображён график соответствующей зависимости. Указанный график показывает быстрое нелинейное увеличение накопленной деформации  $\epsilon_i$  при уменьшении угла  $\alpha$  оправки, что необходимо учитывать при назначении количества операций РВ при изготовлении ответственных деталей, к которым предъявляются повышенные требования по герметичности.

Таблица 2.5 – Зависимость накопленной деформации  $\epsilon_i$  от угла  $\alpha$  оправки

$\alpha, ^\circ$	15	30	45	60	75	90
$\epsilon_i$	1,6	0,9	0,56	0,33	0,15	0

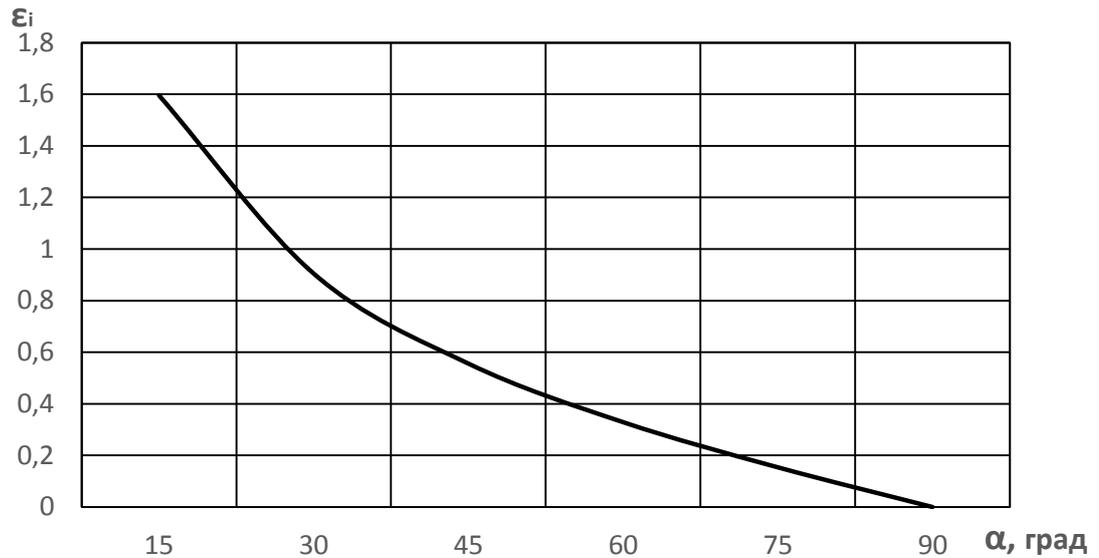


Рис.2.15. График зависимости накопленной деформации  $\epsilon_i$  от угла  $\alpha$  оправки

Основным недостатком модели «чистого сдвига» является несоблюдение граничных условий, заключающееся в наличии сдвиговых напряжений на свободной границе  $AB$  и на границе  $DC$  очага пластической деформации. Для устранения указанного несоответствия сформулируем гипотезу о характере пластических деформаций в локальном очаге при ротационной вытяжке, предполагая следующее:

- линии координатной сетки на границах  $AB$  и  $DC$  очага пластической деформации перпендикулярны траекториям течения металла,
- траектории течения металла являются дугами окружностей, проведённых из центра радиуса скругления деформирующего ролика,
- кривые линии координатной сетки, поперечные траекториям течения металла являются дугами окружностей, радиусы которых определяются подбором для обеспечения равенства площадей ячеек координатной сетки с погрешностью не более 6...8%,
- площади ячеек координатной сетки не изменяются в процессе деформации,
- после очага пластической деформации толщина заготовки определяется по правилу «синуса»,
- нормальные расстояния между соседними траекториями течения металла равны между собой.

Уточнённая схема координатной сетки, построенная с учётом указанных предположений в адаптивной графической системе 3D-проектирования *Inventor Prof*, представлена на рис.2.16.

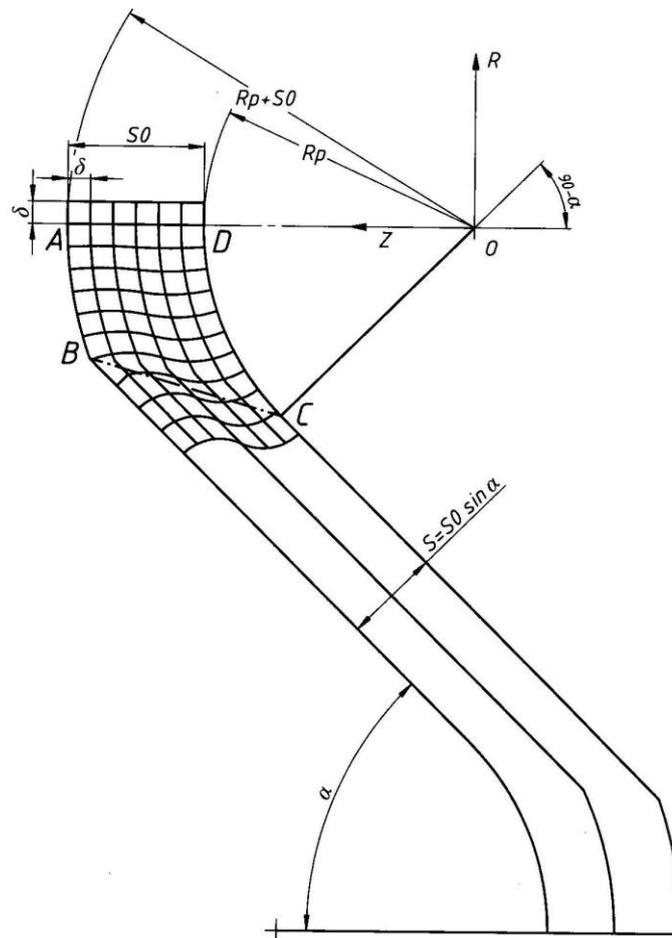


Рис.2.16. Уточнённая схема координатной сетки при РВ по правилу «синуса»

Результаты расчётов распределения накопленной деформации  $\epsilon_i$  и  $\epsilon_{icp}$  в очаге пластической деформации при РВ по правилу «синуса» по уточнённой модели при  $R_p/S_0 = 2$  и  $\alpha = \pi/4$  представлены в таблице 2.6, а графики распределения соответствующих величин представлены на рис.2.17.

Таблица 2.6 – Распределение накопленной деформации  $\epsilon_i$  и  $\Delta\epsilon_i$  в уточнённой модели

$j$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$\epsilon_{i5}$	0,00	0,117	0,171	0,174	0,196	0,220	0,271	0,320	0,390	0,461	0,491	0,491
$\epsilon_{i4}$	0,00	0,012	0,077	0,116	0,183	0,245	0,318	0,389	0,475	0,566	0,616	0,616
$\epsilon_{i3}$	0,00	0,012	0,049	0,098	0,150	0,204	0,263	0,330	0,410	0,498	0,548	0,548
$\epsilon_{i2}$	0,00	0,012	0,050	0,130	0,183	0,252	0,319	0,393	0,476	0,569	0,616	0,616
$\epsilon_{icp}$	0,00	0,038	0,087	0,129	0,178	0,230	0,293	0,358	0,438	0,523	0,568	0,568

Сравнение значений накопленной деформации  $\epsilon_i$  по модели чистого сдвига и накопленной деформации  $\epsilon_{icp}$  по уточнённой модели показывает их незначительное расхождение, величина которого не превышает 3%. Существенным отличием двух моделей является то, что уточнённая модель позволяет смоделировать распределение накопленных деформаций по толщине заготовки. При этом, значения максимальной накопленной деформации отличаются от значения минимальной накопленной деформации в рассмотренном примере до 25%. Таким образом,

уточнённая модель деформации при РВ позволяет предложить объяснение наблюдаемого при некоторых режимах обработки явления, заключающегося в отслоении металла в виде чешуек с обрабатываемого давальным инструментом поверхностного слоя детали. Более точное количественное описание данного явления требует дополнительных исследований.

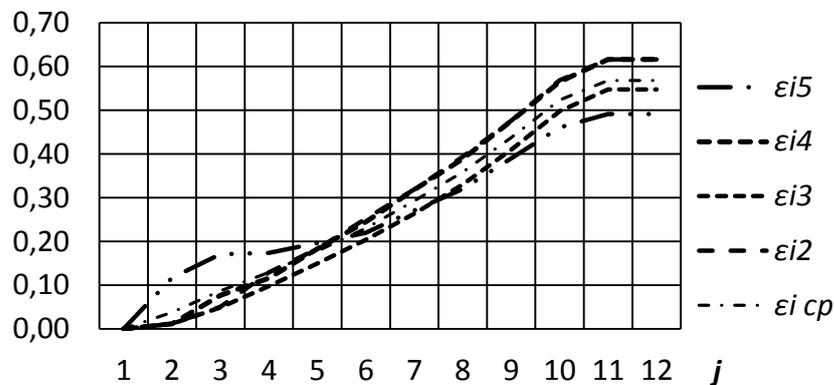


Рис.2.17. Графики распределения накопленной деформации  $\epsilon_i$  и  $\epsilon_{icp}$  по различным линиям тока по уточнённой модели.

Зная распределение величин накопленной деформации по толщине стенки детали, с использованием кривых упрочнения для конкретного сплава можно определить распределение прочностных характеристик по толщине, полученное в результате ротационной вытяжки. В частности, для сплава АМгб для определения значений  $\sigma_B$  и  $\sigma_{0,2}$  можно использовать формулы (2.53) и (2.54).

Далее рассмотрим задачу определения деформированного состояния в очаге пластической деформации конической заготовки при РВ с отклонением от правила «синуса», а именно с переутонением стенки заготовки. В ходе предварительных экспериментов было выяснено, что в процессе РВ с переутонением стенки фланец заготовки теряет плоскую форму и приобретает форму конической поверхности с вершиной, обращённой в сторону противоположную направлению движения ролика. При продолжении обработки фланец теряет устойчивость, приобретая форму сложной конической поверхности с гофрами, которые увеличиваются в процессе обработки. В некоторый момент времени плавные гофры превращаются в складки или происходит отрыв фланца. Кроме того, в процессе обработки с переутонением стенки радиус перехода между фланцем и конической частью заготовки, прилегающей к оправке, непрерывно уменьшается. Указанные явления изображены на схеме стадий РВ с переутонением стенки в различные моменты времени на рис.2.18, на котором представлены сечения заготовки плоскостью, проходящей через её ось вращения. На указанной схеме изображено увеличение угла наклона фланца –  $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$  и уменьшение радиуса перехода от фланца к конической части –  $R_1, R_2, R_3$  в моменты времени  $\tau_1, \tau_2, \tau_3$ . Толщина стенки детали определяется выражением:

$$S_1 = S \sin \alpha - \delta S \quad (2.47)$$

где  $\delta S$  – величина, характеризующая переутонение заготовки.

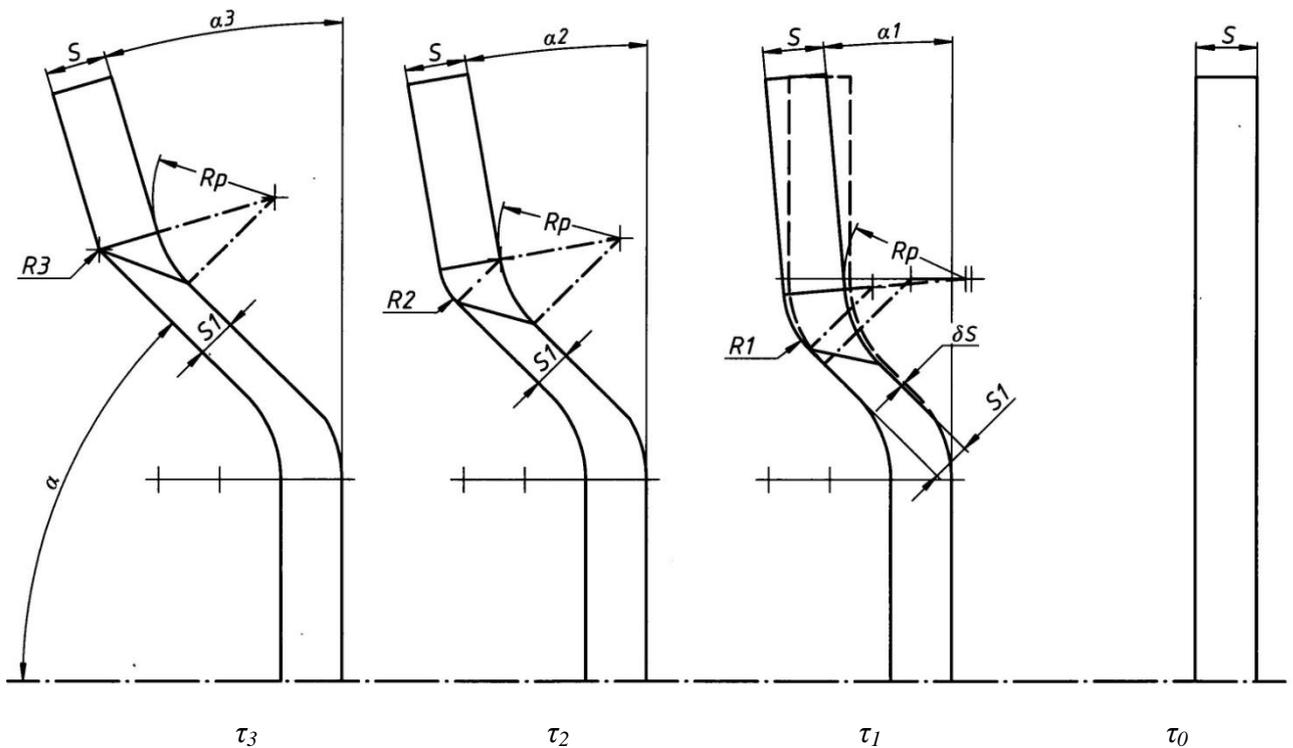


Рис.2.18. Схема стадий ротационной вытяжки с переутонением стенки в моменты времени  $\tau_0, \tau_1, \tau_2, \tau_3$

Вводя обозначение степени переутонения стенки –  $S_\delta = \delta S / S_1$ , из (2.46) следует:

$$S_\delta = \frac{S \sin \alpha}{S_1} - 1 \quad (2.48)$$

Схемы координатных сеток в очаге пластической деформации при РВ с переутонением стенки в начальной и конечной стадии процесса представлены на рис.2.19 и рис.2.20. Из указанных схем видно, что в процессе обработки, величины радиусов линий течения в очаге пластической деформации –  $R_i$  и угол охвата ролика заготовкой –  $\beta_i$  убывают, угол  $\alpha$  – увеличивается, а параметры ячейки  $\delta_i$  – остаются постоянными. В таблице 2.7 и на рис.2.21 представлено распределение накопленной деформации  $\epsilon_i$  и усреднённой накопленной деформации  $\epsilon_{icp}$  в очаге пластической деформации при РВ с параметрами  $R_p / S_0 = 2$ ;  $\alpha = 45^\circ$  с переутонением 10% на конечной стадии процесса.

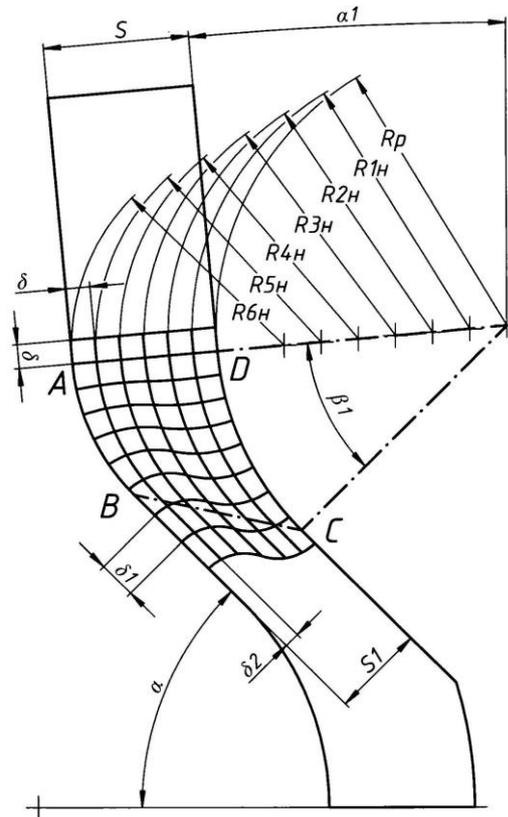


Рис.2.19. Схема координатной сетки при ротационной вытяжке с переутонением в начальной стадии

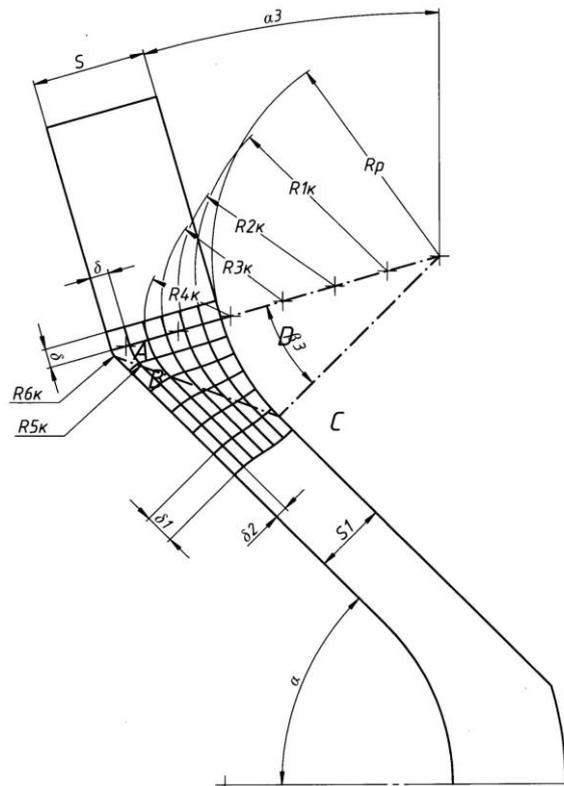


Рис.2.20. Схема координатной сетки при РВ с переутонением в конечной стадии

Таблица 2.7 – Распределение накопленной деформации  $\epsilon_i$  и  $\epsilon_{icp}$  по различным линиям тока при обработке с перереутономением 10% на конечной стадии

$j$	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$\epsilon_{i5}$	0,0	0,011	0,011	0,093	0,161	0,189	0,297	0,451	0,451
$\epsilon_{i4}$	0,0	0,029	0,034	0,158	0,254	0,259	0,348	0,471	0,471
$\epsilon_{i3}$	0,0	0,040	0,051	0,163	0,296	0,358	0,387	0,467	0,467
$\epsilon_{i2}$	0,0	0,054	0,069	0,198	0,339	0,421	0,428	0,449	0,449
$\epsilon_{icp}$	0,0	0,033	0,041	0,153	0,263	0,307	0,365	0,460	0,460

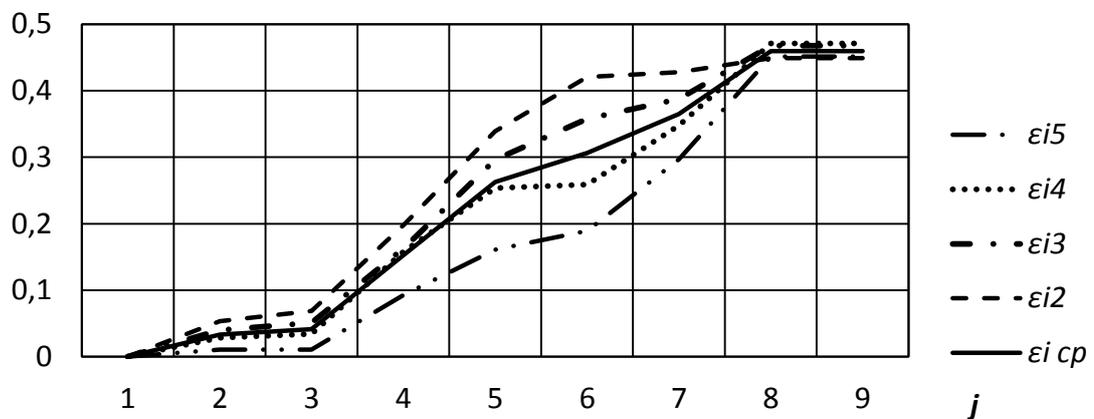


Рис.2.21. График распределения  $\epsilon_i$  и  $\epsilon_{icp}$  по различным линиям тока при РВ с перереутономением 10% на конечной стадии

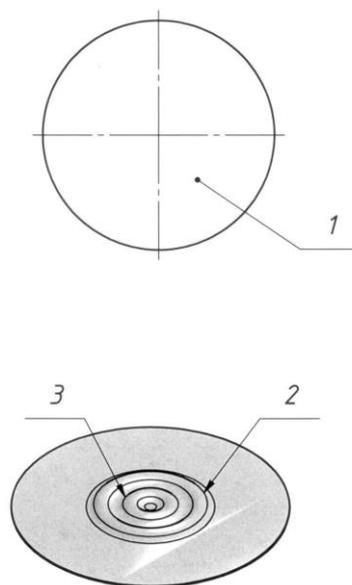
На основе выполненных построений и расчётов с учётом принятых предположений можно сделать следующие выводы:

- при РВ конических деталей в очаге пластической деформации имеет место сочетание изгибных и сдвиговых деформаций;
- метод координатных сеток позволяет построить уточнённую модель напряжённо-деформированного состояния в очаге пластической деформации при ротационной вытяжке конических деталей, учитывающую переменность накопленной степени деформации по сечению детали;
- максимальная степень накопленной деформации имеет место на поверхности, контактирующей с деформирующим роликом;
- модель, построенная с использованием метода координатных сеток, позволяет проводить расчёты напряжённо-деформированного состояния при РВ как с соблюдением правила «синуса», так и с отклонением от него;

- даже небольшие отклонения от правила «синуса» существенно изменяют картину пластического деформирования.

### 2.3. Исследование деформационного упрочнения при комбинированной ротационной обработке давлением

Автором настоящей работы в соавторстве разработан способ ротационной вытяжки, позволяющий получить на листовых заготовках упрочнённые пластическим деформированием зоны [94]. Известно, что одним из недостатков способов РВ нецилиндрических деталей является то, что они имеют переменную толщину. При этом степень деформации, а, следовательно, и показатели прочности материала изготовленной детали также будут переменными по длине образующей. Таким образом, деталь получается не равнопрочной. Для устранения этого недостатка согласно разработанному способу в центральной зоне заготовки свободно вращающимися роликами формируют локальные углубления, форма и размеры которых определяют из требуемой степени упрочнения, технологических параметров и механических свойств материала. После формовки углублений их раскатывают до плоского состояния, осуществляя локальное упрочнение заготовки. После формовки и раскатки первых углублений на заготовке формируют дополнительные углубления, которые также раскатывают до плоского состояния, при этом вершины дополнительных углублений располагают между вершинами первых углублений. Способ поясняется схемами, представленными на рис.2.22.



1 – заготовка, 2 и 3 – кольцевые рифты

Рис.2.22. Схема способа упрочнения листовых заготовок.

Из листа из алюминиевого сплава вырезают круглую заготовку поз.1 и неподвижно закрепляют её по периметру на оправке, имеющей кольцевые канавки и установленной на планшайбе станка. При вращении планшайбы на заготовке формируют углубления, например, кольцевые канавки поз. 3 и 4, свободно вращающимися роликами. Канавки формируют за счёт растяжения металла и утонения заготовки в зоне канавок. Форма и размеры канавок определяются требуемой степенью упрочнения и определяются экспериментально. Например, для алюминиевого сплава степень деформации составляет 7...12%. В результате получают заготовку поз.2. Затем заготовку поз.2 неподвижно закрепляют по периметру на плоской оправке и при её вращении раскатывают заготовку свободно вращающимися роликами до плоского состояния. В результате в зоне кольцевых канавок за счёт создания сначала пластических напряжений растяжения, а затем пластических напряжений сжатия, происходит требуемое упрочнение заготовки. Для более равномерного упрочнения заготовки по длине образующей в варианте реализации способа по пункту 1 получают упрочнённую заготовку поз.5. Затем на заготовке поз.5 формируют дополнительную кольцевую канавку поз.6. При этом вершину канавки поз.6 располагают между вершинами канавок поз. 3 и 4. Такой вариант осуществления способа позволяет получить более равномерное упрочнение заготовки за счёт перекрытия зон пластической деформации. Таким образом, изложенная совокупность выполняемых операций позволяет изготовить заготовку с упрочнённой центральной зоной.

Практический интерес представляет разработка методики расчёта локального деформационного упрочнения деталей, позволяющей смоделировать изменение прочностных характеристик материала после локального деформационного упрочнения.

Формовку гофра можно реализовать различными вариантами. Рассмотрим два варианта: первый – ротационная вытяжка проецированием, а второй – формовка-вытяжка роликом в кольцевую матрицу.

С помощью программы 3D-проектирования *Inventor* были разработаны две параметрические объёмные модели гофра с различным распределением толщины стенки. На рис. 2.23. представлена одна из 3D-моделей гофра после формообразования.

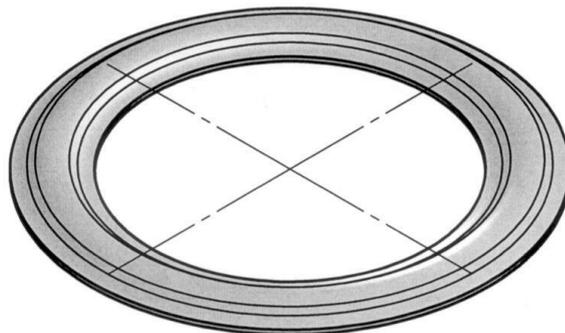


Рис.2.23. Модель гофра после формовки

Рассмотрим первый вариант способа формовки гофра. С этой целью рассмотрим схему упрочнения заготовки, представленную на рис. 2.24.

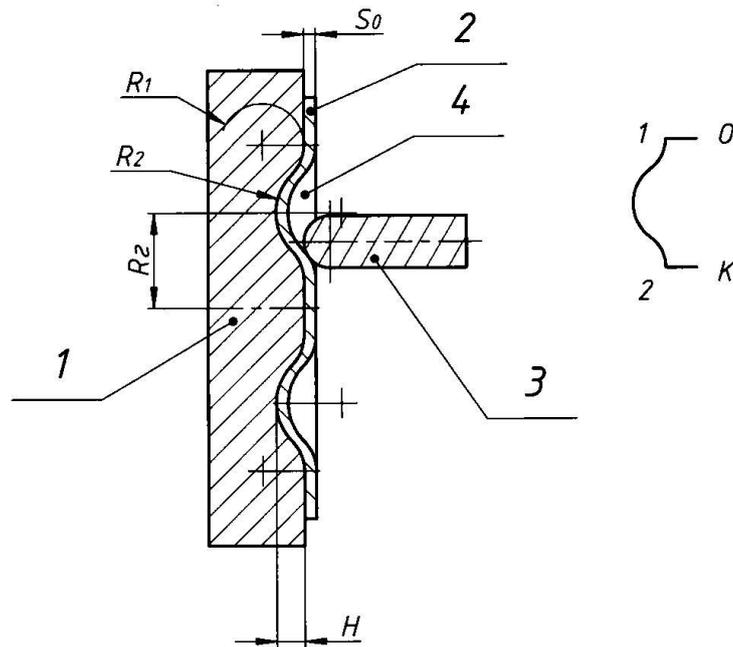


Рис.2.24. Схема упрочнения заготовки по варианту 1

На плоской оправке 1, имеющей кольцевую проточку, неподвижно закреплена плоская заготовка 2 толщиной  $S_0$ . Кольцевая проточка оправки имеет радиусные участки  $R_1$  и  $R_2$ . Деформирующий инструмент 3 формирует в заготовке 2 кольцевую канавку 4. Траекторию движения  $O12K$  инструмента 3 зададим таким образом, чтобы на радиусных кромках оправки 1 реализовать ротационную вытяжку по правилу «синуса». В результате такой обработки часть заготовки, расположенная в кольцевой проточке будет иметь различную степень деформации и соответственно различную степень упрочнения. Рассчитаем распределение механических свойств материала в зоне кольцевой канавки после ротационной обработки. Расчётная схема, по которой построена 3D-модель гофра, представлена на рис.2.25.

Предположим, что заготовка деформируется в условиях плоского деформированного состояния. Величину одной из главных относительных деформаций –  $\varepsilon_1$  можно определить из выражения:

$$\varepsilon_1 = \frac{S}{S_0 \sin \alpha} - 1 \quad (2.49)$$

где  $S$  и  $S_0$  – толщины детали и заготовки

Из условия постоянства объёма:

$$\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 = 0 \quad (2.50)$$

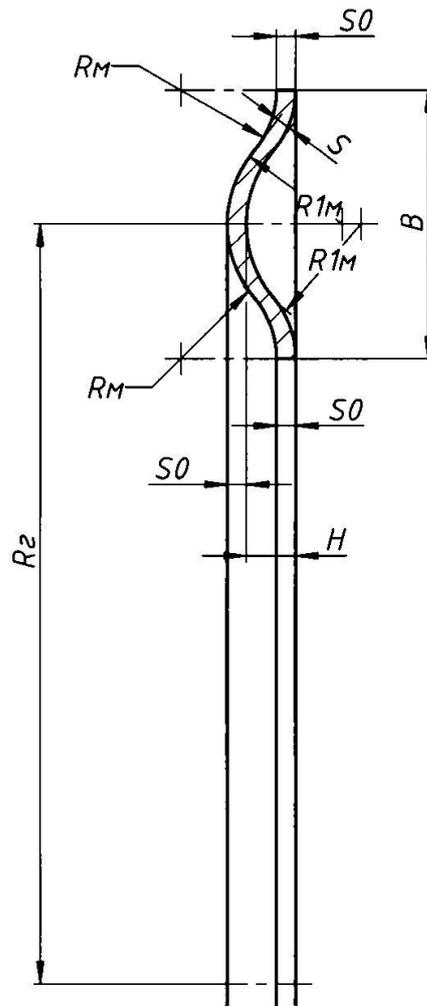


Рис.2.25. Расчётная схема формовки гофра RB проецированием

Учитывая, что  $\varepsilon_3 = 0$ :

$$\varepsilon_1 = -\varepsilon_2 \quad (2.51)$$

Интенсивность деформаций в главных осях имеет вид:

$$\varepsilon_i = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2 + (\varepsilon_2 - \varepsilon_3)^2 + (\varepsilon_3 - \varepsilon_1)^2} \quad (2.52)$$

С учётом принятых допущений интенсивность деформаций примет вид:

$$\varepsilon_i = 2\sqrt{\frac{\varepsilon_1}{3}} \quad (2.53)$$

Для сплава АМг6 используем, в соответствии с [80], зависимости кривых упрочнения материала в виде:

$$\sigma_B = 282 + 286,4 \varepsilon_i^{0,64} \quad (2.54)$$

$$\sigma_{0,2} = 212 + 354,8 \varepsilon_i^{0,68} \quad (2.55)$$

Соответствующие диаграммы упрочнения представлены на рис.2.26.

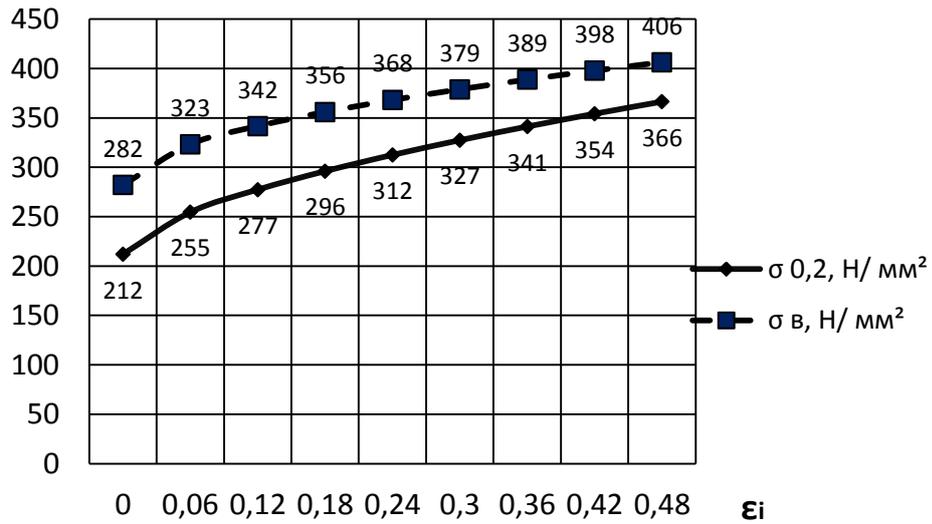


Рис.2.26. Диаграммы упрочнения сплава АМг6

В соответствии с отраслевыми рекомендациями предельная накопленная степень деформации для сплава АМг6 не должна превышать величины 0,45.

Расчётные эпюры распределения относительной толщины стенки гофра, накопленной степени деформации и относительного увеличения напряжения текучести, представлены на рис.2.27.

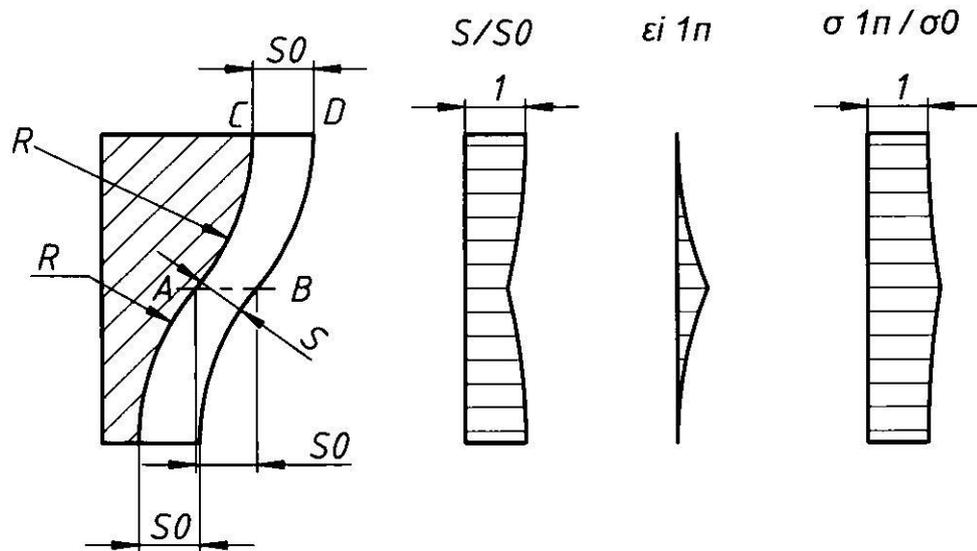


Рис.2.27. Эпюры распределения величин после первого перехода по первому способу

На втором переходе обработки гофр раскатывается роликом на плоской оправке в обратном направлении, и заготовка вновь становится плоской. Соответствующие эпюры распределения, представлены на рис.2.28.

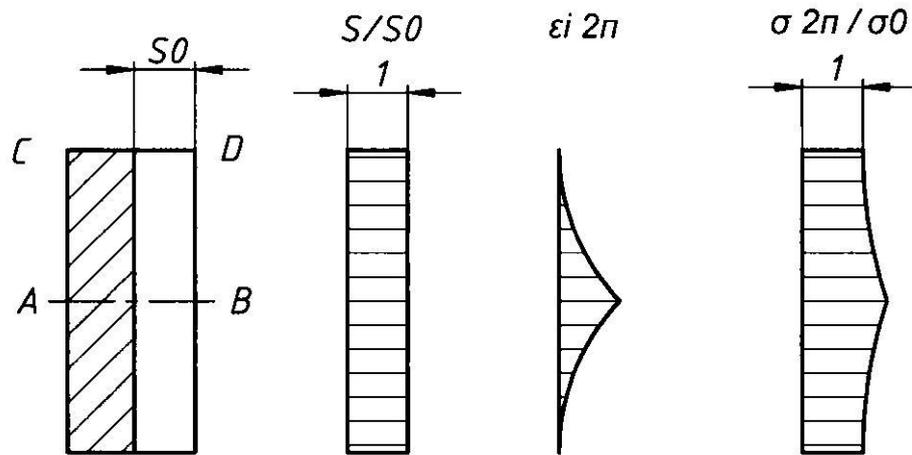


Рис.2.28. Эпюры распределения величин после второго перехода по первому способу

На третьем переходе обработки гофр раскатывается на оправке, канавки которой радиально смещены относительно канавок первой оправки на величину, равную половине ширины гофра. Соответствующие эпюры распределения, представлены на рис.2.29.

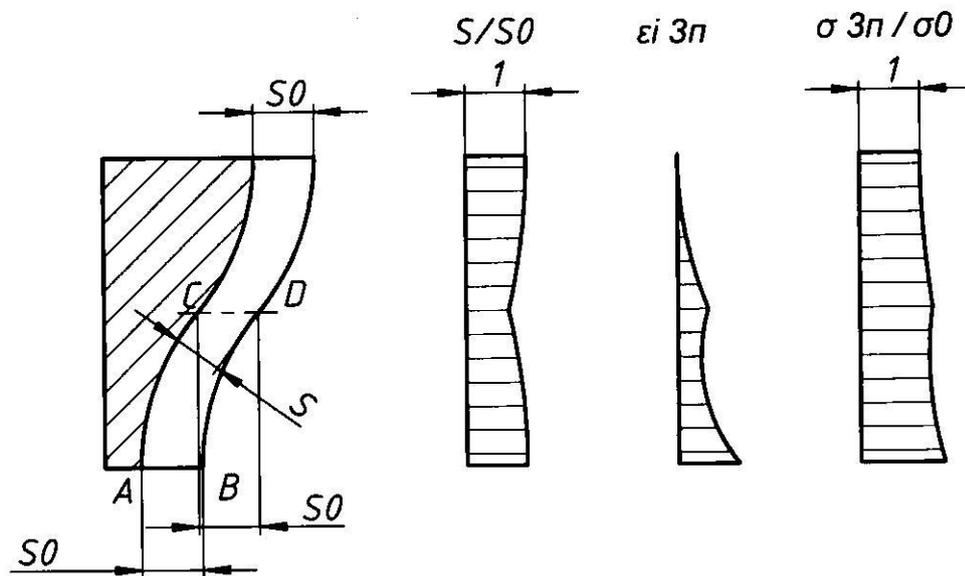


Рис.2.29. Эпюры распределения величин после третьего перехода по первому способу

На четвёртом переходе обработки гофр раскатывается роликом на плоской оправке, и в результате получаем плоскую нагартованную заготовку. Соответствующие эпюры распределения, представлены на рис.2.30.

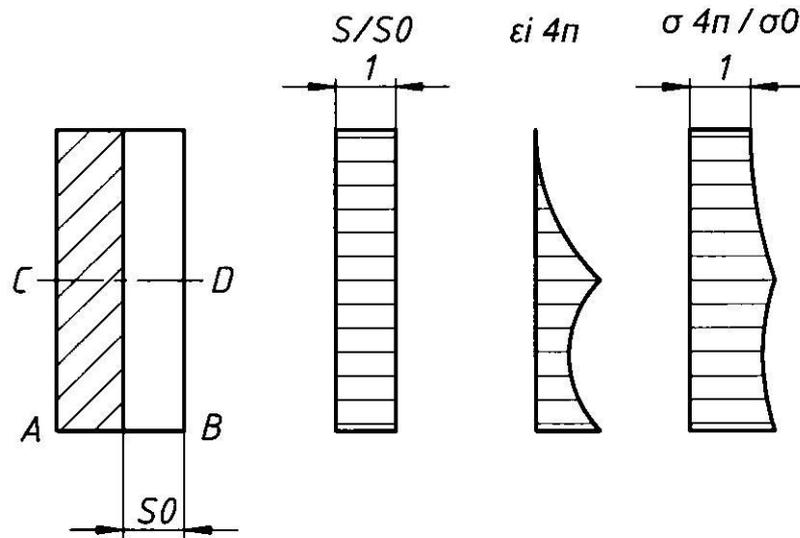


Рис.2.30. Эпюры распределения величин после четвёртого перехода по первому способу

Выполним расчёты по упрочнению материала заготовки из сплава АМг6М. В первом приближении не будем учитывать распределение деформаций по сечению заготовки. Также не будем учитывать эффект Баушингера. Суммарную накопленную интенсивность деформации будем считать равной линейной сумме интенсивностей деформаций на каждом переходе:

$$\varepsilon_i = \varepsilon_i^{1n} + \varepsilon_i^{2n} + \varepsilon_i^{3n} + \varepsilon_i^{4n} \quad (2.56)$$

где  $\varepsilon_i^{jn}$  - интенсивность деформаций на  $j$ -переходе.

Расчёты выполним с учётом условия, чтобы суммарная накопленная деформация не превышала рекомендуемой для сплава АМг6 величины  $\varepsilon_i \leq 0,4$ . Предположим, что гофр симметричен, поэтому выполним расчёты для половины гофра. Результаты расчета представлены в таблице 2.8 и на графиках рис.2.31...2.34. Обратим внимание, что в результате расчёта получена величина предельного угла касательной к образующей гофра и осью вращения заготовки, который для сплава АМг6 не должен превышать  $34^\circ$ .

Таблица 2.8 – Распределения расчётных величин вдоль половины гофра

$\alpha, ^\circ$	0	8,5	17	25,5	34	25,5	17	8,5	0
$S/S_0$	1	0,989	0,956	0,902	0,829	0,902	0,956	0,989	1
$\varepsilon_1$	0	0,011	0,044	0,098	0,171	0,098	0,044	0,011	0
$\varepsilon_{i 1n}$	0	0,013	0,051	0,113	0,198	0,113	0,051	0,013	0
$\varepsilon_{i 2n}$	0	0,013	0,051	0,113	0,198	0,113	0,051	0,013	0
$\varepsilon_{i 1n} + \varepsilon_{i 2n}$	0	0,026	0,102	0,226	0,396	0,226	0,102	0,026	0

$\varepsilon_{i 3n}$	0,198	0,113	0,051	0,013	0	0,013	0,051	0,113	0,198
$\varepsilon_{i 4n}$	0,198	0,113	0,051	0,013	0	0,013	0,051	0,113	0,198
$\varepsilon_i$	0,396	0,252	0,203	0,252	0,396	0,252	0,204	0,252	0,396
$\sigma_{0,2}, \text{H/мм}^2$	349	315	302	315	349	315	302	315	349
$\sigma_{B,}, \text{H/мм}^2$	394	370	361	370	394	370	361	370	394

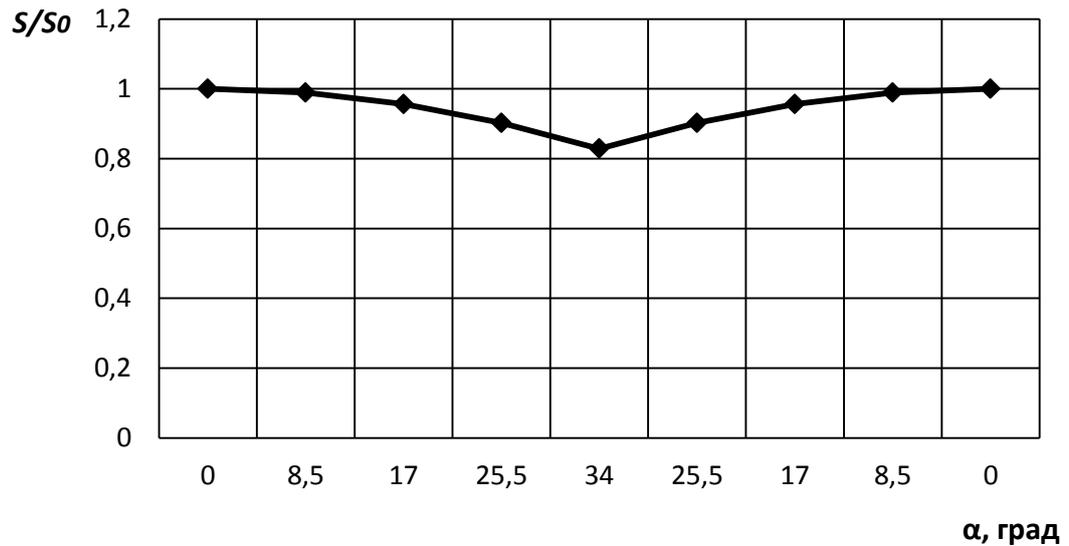


Рис.2.31. Распределение относительной толщины гофра по способу 1

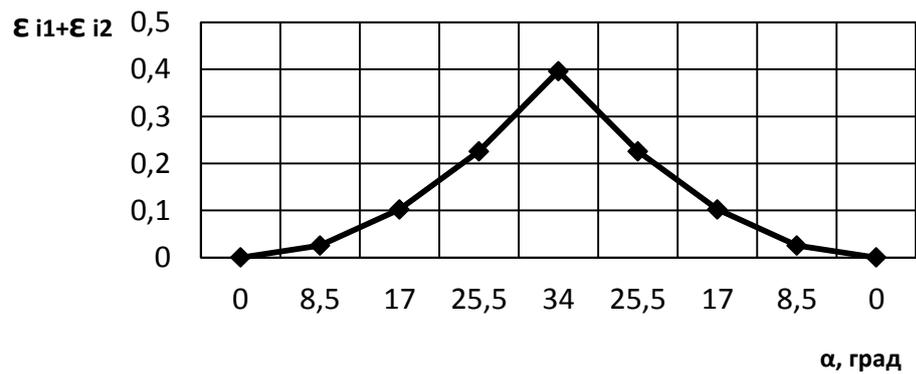


Рис.2.32. Распределение накопленной деформации после переходов 1 и 2 вдоль гофра по способу 1

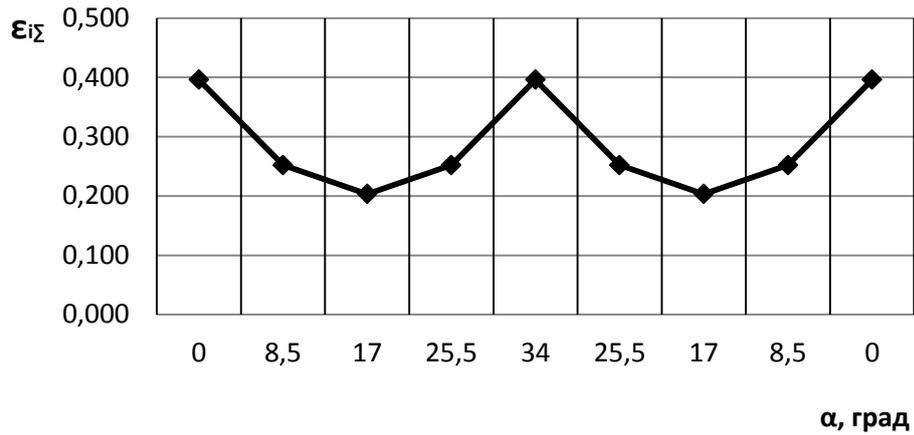


Рис.2.33. Распределение накопленной деформации после четырёх переходов вдоль гофра по способу 1

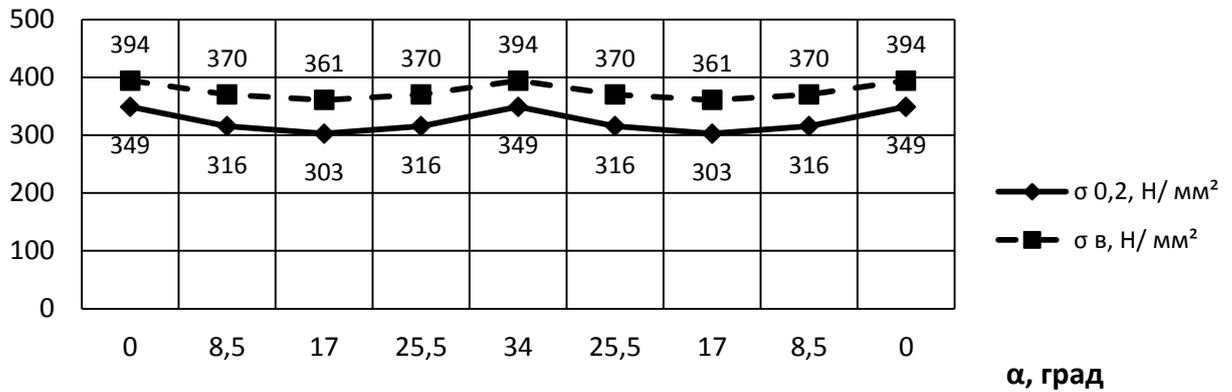


Рис.2.34. Распределение  $\sigma_B$  и  $\sigma_{0,2}$  вдоль гофра по способу 1 после четырёх переходов

Рассмотрим второй вариант способа формовки гофра. С этой целью рассмотрим схему упрочнения заготовки, представленную на рис.2.35.

На плоской оправке 1, имеющей кольцевую проточку, неподвижно закреплена плоская заготовка 2 толщиной  $S_0$ . Кольцевая проточка оправки имеет радиусные участки  $R_1$  и  $R_2$ . Деформирующий инструмент 3 формирует в заготовке 2 кольцевую канавку 4. Траектория движения инструмента 3, в отличие от способа 1, представляет собой прямую линию  $O1K$  параллельную оси вращения. При этом, реализуется схема ротационной вытяжки материала заготовки в кольцевую канавку. В результате такой обработки, часть заготовки, расположенная в кольцевой проточке будет иметь различную степень деформации и соответственно различную степень упрочнения аналогично способу 1, но минимальная толщина стенки –  $S_k$  будет наблюдаться в вершине гофра. Рассчитаем распределение механических свойств материала в этом случае.

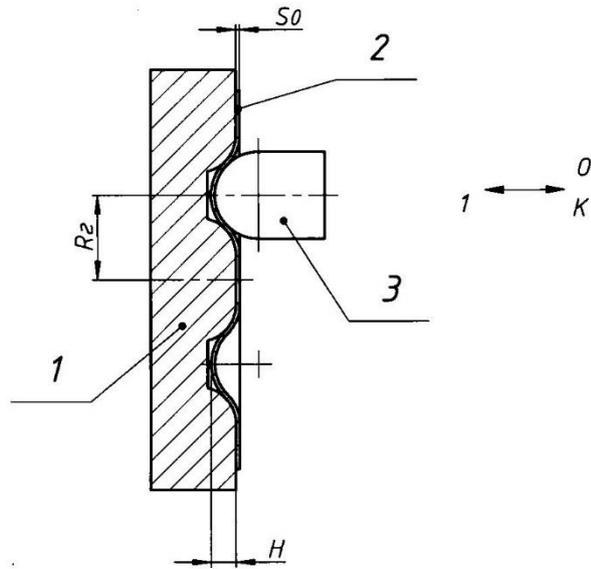


Рис.2.35. Схема упрочнения заготовки по способу 2

Расчётная схема, по которой построена 3D-модель гофра, представлена на рис. 2.36.

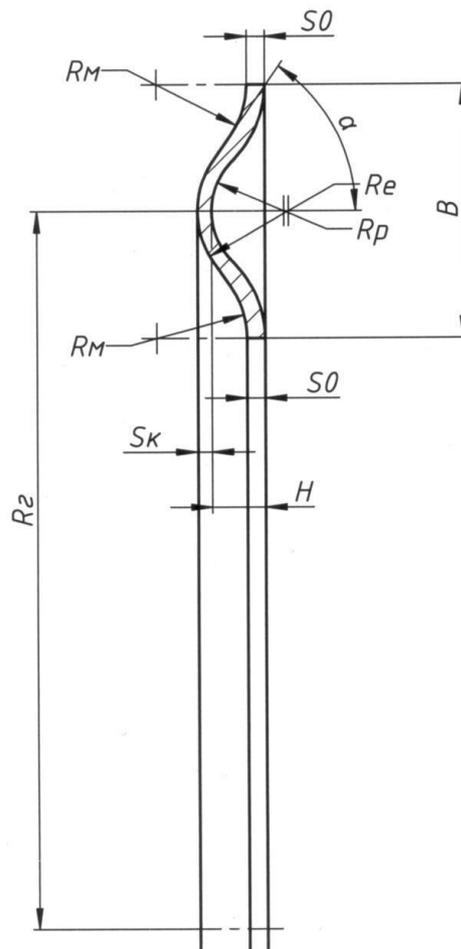


Рис.2.36. Расчётная схема формовки гофра ротационной вытяжкой

Учитывая сложность и громоздкость вычисления переменной толщины гофра при вытяжке путём решения системы уравнений с дифференциальным и с трансцендентными уравнениями, распределение толщины гофра получим по следующей методике. Построим 3-х мерную адаптивную модель гофра. Для заданных геометрических параметров:  $S_0$ ;  $R_m$ ;  $R_p$ ;  $R_2$ ;  $B$ , предполагая в первом приближении, что свободная поверхность гофра ограничена радиусом  $R_e$  и задавая глубину гофра  $H$ , из условия равенства объёмов плоского кольца шириной  $B$  и гофра, путём подбора можно получить толщину в вершине гофра –  $S_k$  и соответствующее распределение толщины. Повторив вычисления для различных величин  $H$ , можно проследить изменение толщины в процессе вытяжки гофра.

На рис.2.37 показано изменение толщины гофра  $S_k$  в вершине от его глубины  $H$  для параметров:  $S_0 = 1$ ;  $R_m = 5$ ;  $R_p = 4$ ;  $R_2 = 40$ ;  $B = 14,1$ .

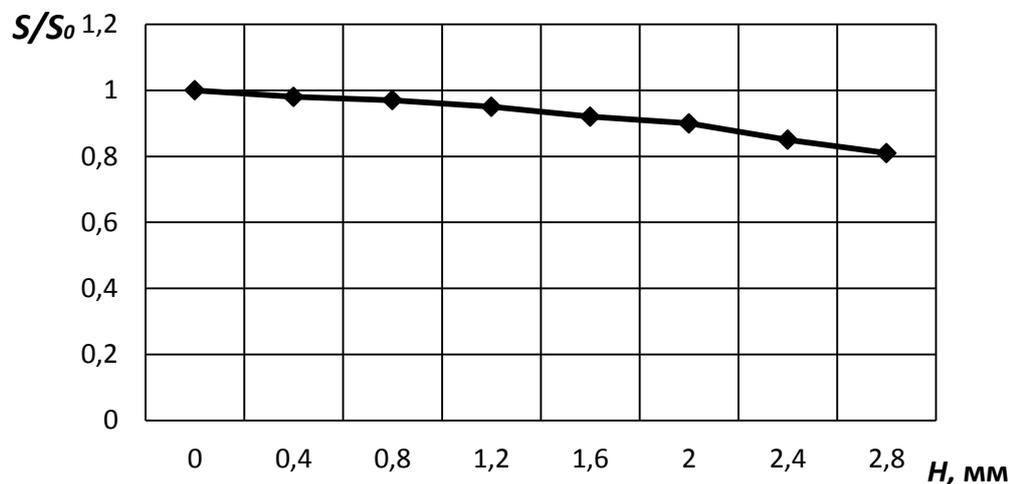


Рис.2.37. Зависимость толщины гофра  $S_k$  в вершине от его глубины  $H$

На рис.2.38 показано изменение толщины гофра в рассматриваемом примере, при глубине вытяжки  $H = 2,8$  мм.

Предполагая, что заготовка деформируется в условиях плоского деформированного состояния величины главных относительных деформаций можно определить из выражений (2.47), (2.49), а интенсивность деформаций – из выражения (2.51). Эпюры распределения относительной толщины стенки гофра, накопленной степени деформации и относительного увеличения напряжения текучести, полученные при втором способе формовки, представлены на рис. 2.39.

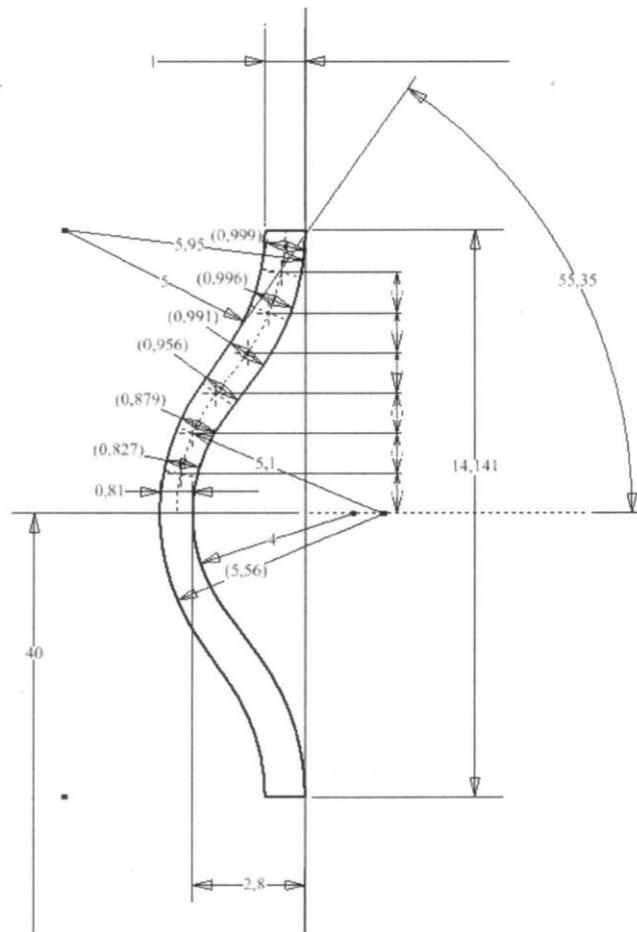


Рис.2.38. Распределение толщины стенки гофра

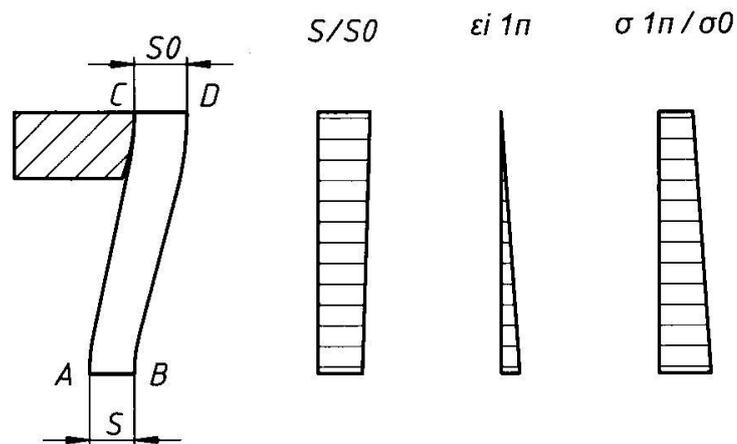


Рис.2.39. Эпюры распределения величин после первого перехода по второму способу

На втором переходе обработки гофр раскатывается роликом на плоской оправке в обратном направлении, и заготовка вновь становится плоской. Соответствующие эпюры распределения, представлены на рис.2.40.

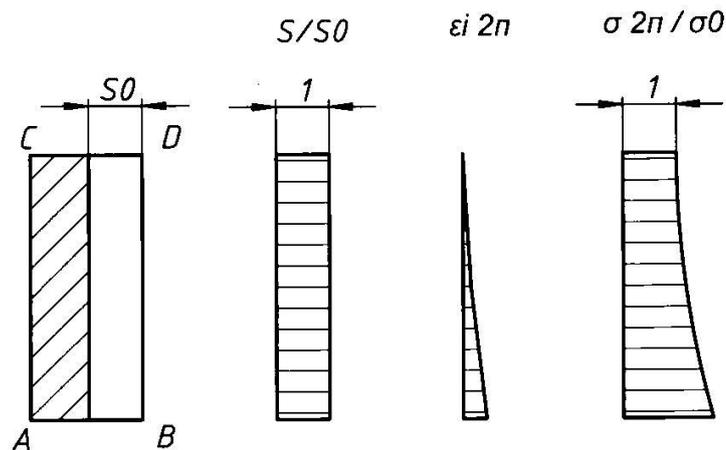


Рис.2.40. Эпюры распределения величин после второго перехода по второму способу

На третьем переходе обработки гофр раскатывается на оправке, канавки которой радиально смещены относительно канавок первой оправки на величину, равную половине ширины гофра. Соответствующие эпюры распределения, представлены на рис.2.41.

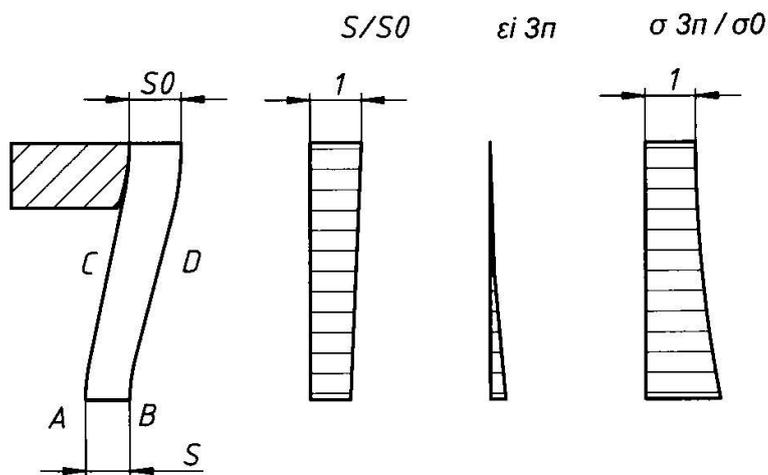


Рис.2.41. Эпюры распределения величин после третьего перехода по второму способу

На четвёртом переходе обработки гофр раскатывается роликом на плоской оправке, и в результате получаем плоскую нагартованную заготовку. Соответствующие эпюры распределения, представлены на рис.2.42.

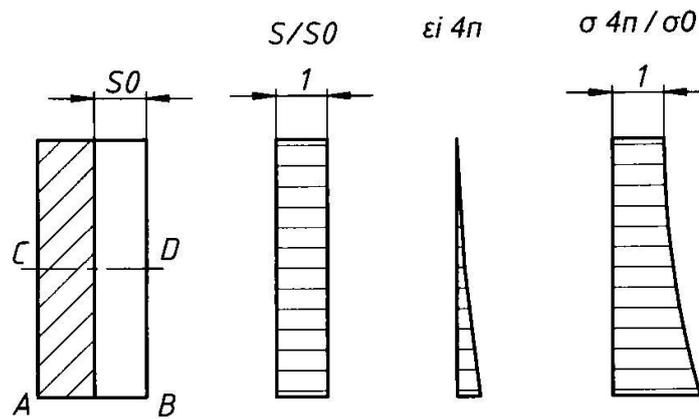


Рис.2.42. Эпюры распределения величин после четвёртого перехода по второму способу  
 Результаты расчета для рассматриваемого примера представлены в таблице 2.9 и на графиках рис.2.43...2.46.

Таблица 2.9 – Распределения расчётных величин вдоль половины гофра

$N$	0	1	2	3	4	5	6	7
$S / S_0$	0,810	0,827	0,879	0,956	0,991	0,996	0,999	1,000
$\epsilon_1$	0,190	0,173	0,121	0,044	0,009	0,004	0,001	0,000
$\epsilon_{i 1n}$	0,219	0,200	0,140	0,051	0,010	0,005	0,001	0,000
$\epsilon_{i 2n}$	0,219	0,200	0,140	0,051	0,010	0,005	0,001	0,000
$\epsilon_{i 1n} + \epsilon_{i 2n}$	0,438	0,400	0,279	0,102	0,021	0,009	0,002	0,000
$\epsilon_{i 3n}$	0,000	0,001	0,005	0,010	0,051	0,140	0,200	0,219
$\epsilon_{i 4n}$	0,000	0,001	0,005	0,010	0,051	0,140	0,200	0,219
$\epsilon_i$	0,438	0,401	0,289	0,122	0,122	0,289	0,402	0,438
$\sigma_{0,2}, \text{ Н/мм}^2$	358	350	325	278	278	325	350	358
$\sigma_B, \text{ Н/мм}^2$	401	395	377	342	342	377	395	401

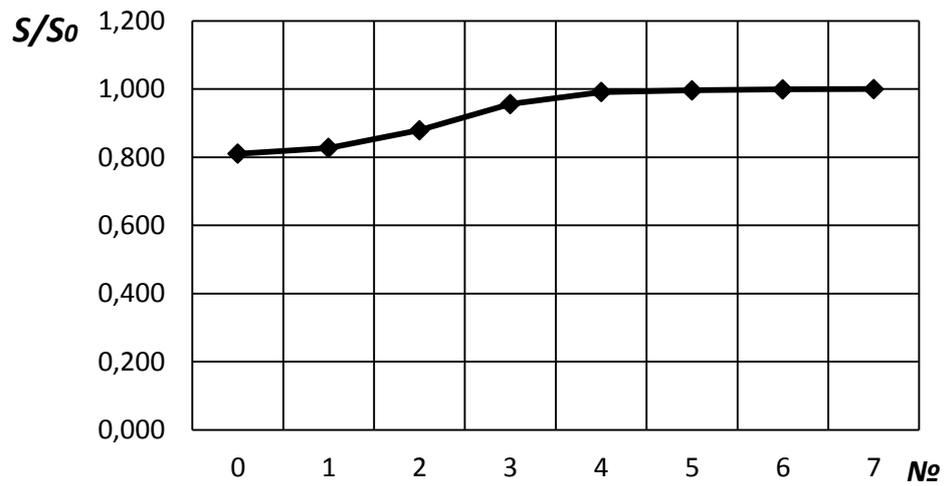


Рис.2.43. Распределение толщины гофра по способу 2



Рис.2.44. Распределение накопленной деформации после переходов 1 и 2 вдоль гофра по способу 2

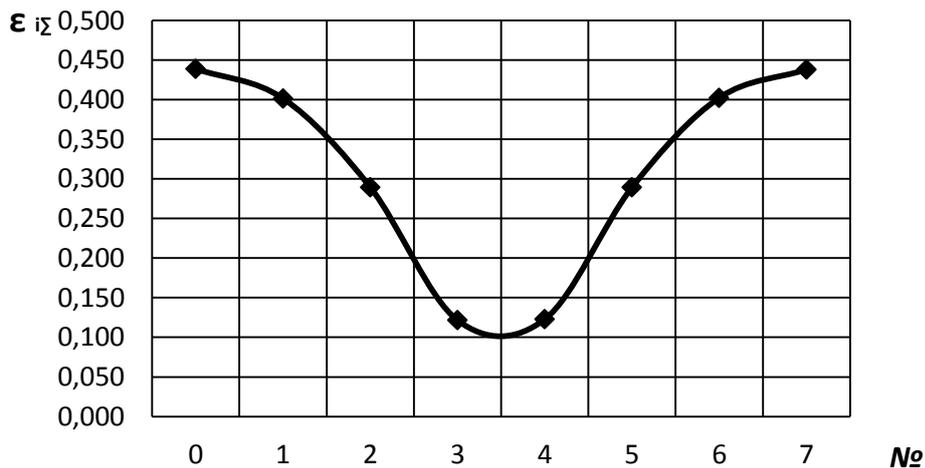


Рис.2.45. Распределение накопленной деформации после четырёх переходов вдоль гофра по способу 2

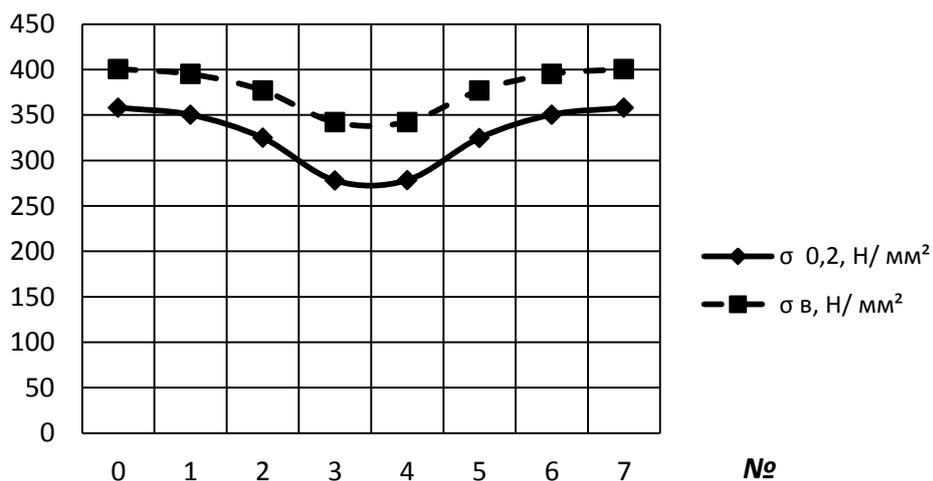


Рис.2.46. Распределение  $\sigma_B$  и  $\sigma_{0,2}$  вдоль гофра по способу 2 после четырёх переходов

Сравнение двух вариантов способа упрочнения показывает, что при практически одинаковых максимальных утонениях стенок гофров (17% и 19%):

- максимальная накопленная деформация по варианту 2 на 10% больше максимальной накопленной деформации по варианту 1, а минимальная накопленная деформация на 66% меньше соответствующей величины при реализации варианта 1. Таким образом, неравномерность накопленной деформации по варианту 2 существенно больше, чем по варианту 1;

- максимальное упрочнение по показателю  $\sigma_B$  по варианту 2 практически совпадает с соответствующей величиной по варианту 1 (401 Н/мм<sup>2</sup> и 394 Н/мм<sup>2</sup>), а минимальное упрочнение по варианту 2 меньше, чем по варианту 1 (342 Н/мм<sup>2</sup> и 361 Н/мм<sup>2</sup> соответственно);

- максимальное упрочнение по показателю  $\sigma_{0,2}$  по варианту 2 практически совпадает с соответствующей величиной по варианту 1 (358 Н/мм<sup>2</sup> и 349 Н/мм<sup>2</sup>), а минимальное упрочнение по варианту 2 меньше, чем по варианту 1 (278 Н/мм<sup>2</sup> и 303 Н/мм<sup>2</sup> соответственно).

Учитывая изложенное, можно отметить, что первый вариант способа упрочнения отличается от второго варианта более равномерным упрочнением с меньшей степенью накопленной деформации. Поэтому первый вариант способа упрочнения является предпочтительным.

Оценим возможное уменьшение массы обшивки днища, изготовленной ротационной вытяжкой с упрочнением по рассматриваемому способу, в сравнении с обшивкой, изготовленной по применяемой технологии. Учитывая, что толщина обшивки  $S$  обратно пропорциональна напряжению текучести материала  $\sigma_{0,2}$ , можно записать равенство:

$$S_n \sigma_{0,2n} = S_n \sigma_{0,2n} \quad (2.57)$$

где  $S_n$  и  $S_n$  – толщины деталей,

$\sigma_{0,2n}$  и  $\sigma_{0,2n}$  – напряжения текучести по новой и применяемой технологии.

Относительное уменьшение массы обшивки  $\Delta M$  в % можно определить из уравнения:

$$\Delta M = \left( \frac{S_n}{S_n} - 1 \right) 100 = \left( \frac{\sigma_{0,2n}}{\sigma_{0,2n}} - 1 \right) 100 \quad (2.58)$$

После подстановки значений  $\sigma_{0,2n} = 303$  Н/мм<sup>2</sup> и  $\sigma_{0,2n} = 226$  Н/мм<sup>2</sup> в (2.58) для сплава АМг6 получим  $\Delta M = 34\%$ .

## 2.4. Выводы по главе 2

Теоретические исследования процесса ротационной вытяжки позволили установить новые закономерности локального пластического деформирования тонкостенных заготовок.

1. Предложен и исследован новый энергетический критерий потери устойчивости фланца заготовки, который позволяет производить количественную оценку возможностей отступления от правила «синуса», что в практическом плане дает возможность рассчитать количество технологических переходов и операций при изготовлении конкретной детали и снизить затраты на технологическую подготовку производства.

2. Разработана методика проектирования технологического процесса изготовления ротационной вытяжкой с отклонением от правила «синуса» конусообразных оболочек с утолщениями.

3. Разработана уточнённая модель процесса ротационной вытяжки осесимметричных деталей из листовых заготовок, базирующаяся на представлении кинематики пластического течения металла как суперпозиции деформаций изгиба и сдвига в условиях плоского деформированного состояния. Установлена немонотонность процесса деформирования заготовки в локальном очаге деформации, которая оказывает существенное влияние на распределение накопленных деформаций и упрочнение материала.

4. Разработана методика, позволяющей смоделировать изменение прочностных характеристик материала после деформационного упрочнения. Исследован процесс и закономерности комбинированной ротационной обработки деталей типа обшивок днищ, обеспечивающие повышенные механические характеристики днища и их равнопрочность. Упрочнение материала по предложенному способу позволит уменьшить массу обшивок днищ до 34%.

### ГЛАВА 3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ РОТАЦИОННОЙ ВЫТЯЖКИ

В ходе экспериментальных исследований необходимо было подтвердить теоретические расчеты, в том числе решить следующие задачи:

-выявить методом координатных сеток деформированное состояние в очаге пластической деформации при РВ конических деталей, как при соблюдении правила «синуса», так и при отклонениях от него;

-исследовать явление потери устойчивости фланца заготовки при РВ с отклонением от правила «синуса»;

-исследовать изменение механических свойств различных алюминиевых сплавов после ротационной вытяжки;

-исследовать изменение микроструктуры материалов после РВ.

Среди известных методов экспериментального исследования можно отметить изучение деформаций по искажению различных сеток или кружков, нанесённых на деформируемых поверхностях деталей; метод тензометрии; метод изучения линий скольжения; метод микроструктурного анализа и другие. В настоящей работе использовались методы координатных сеток, микроструктурного анализа и испытаний на растяжение.

Экспериментальные исследования ротационной вытяжки проводились на специальном станке с ЧПУ модели *PNC 108S* фирмы *Leifeld*, Германия. Станок позволяет изготавливать детали из заготовок диаметром до 1,0 м и толщиной до 6 мм.

В качестве технологической оснастки использовались различные стальные оправки цилиндрической, конической и сферической формы, закалённые до твёрдости *HRC* от 32 до 64, со шлифованной рабочей поверхностью с параметром шероховатости  $R_a$  0,63.

В качестве рабочего инструмента использовались закалённые до твёрдости *HRC* 62...64, шлифованные с параметром шероховатости  $R_a$  0,63 ролики с радиусами при вершине 12, 10 и 2 мм. РВ осуществлялась по одно роликовой схеме.

В качестве измерительных инструментов использовались стандартные измерительные приборы: микрометр ГОСТ 6507, штангенциркуль ГОСТ 166, штангенрейсмас ГОСТ 164, стенкомер ГОСТ 11358 с индикатором часового типа ГОСТ 15593 с погрешностью измерений 0,01 мм, а также ультразвуковой толщиномер модели *Parametric NDT 25 Multi Plus* фирмы *Olympus* с погрешностью измерений 0,01 мм. Механические характеристики образцов исследовались на универсальном измерительном автоматизированном комплексе *TIRATest 2300*. Исследования и фотографирование макроструктуры на макротемплетах и

микроструктуры на шлифах проводились с помощью микроскопов *OLYMPUS BX51MB* и *OLYMPUS SZX10* при увеличении от  $10^x$  до  $200^x$ .

Определение механических свойств образцов, вырезанных из полуфабрикатов и деталей, проводили в соответствии с ГОСТ 1497 «Металлы. Методы испытаний на растяжение» и ГОСТ 11701 «Металлы. Методы испытаний на растяжение тонких листов и лент».

Исследование микроструктуры образцов проводили в соответствии с ГОСТ 21073.0 «Металлы цветные. Определение величины зерна. Общие требования» и ГОСТ 21073.1 «Металлы цветные. Определение величины зерна методом сравнения со шкалой микроструктур».

### 3.1. Экспериментальные исследования ротационной вытяжки конических деталей

Для подтверждения предположений и результатов теоретических исследований проведены экспериментальные исследования пластического течения металла при РВ конических деталей с отклонением от правила «синуса» методом координатных сеток.

Схема РВ конической детали представлена на рис.3.1.

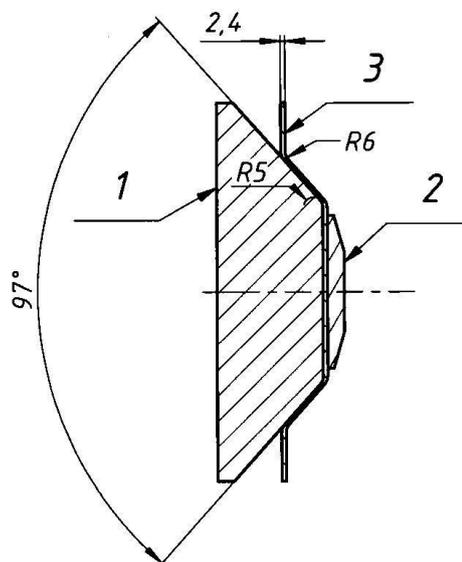


Рис.3.1. Схема экспериментов по РВ конической детали:

1 – оправка, 2 – прижим, 3 – деталь

В качестве исходной заготовки использовались плоские круги диаметром 200 мм из отожжённого алюминиевого листа марки АМг6М ГОСТ 21631 номинальной толщиной 2,5 мм.

Допустимое отклонение толщины листа нормальной точности в состоянии поставки составляет 0,26 мм. Фактическая толщина партии заготовок из 6 штук составляла  $2,4_{-0,08}$  мм. Измерения проводили ультразвуковым толщиномером модели А1209 с погрешностью 0,01 мм. Механические свойства листа в состоянии поставки: предел прочности при растяжении —  $\sigma_b \geq 315$  Н/мм<sup>2</sup>, условный предел текучести  $\sigma_{0,2} \geq 155$  Н/мм<sup>2</sup>, относительное удлинение —  $\delta \geq 15\%$ . Параметр шероховатости поверхностей исходного листа  $R_a 2,5$  мкм.

Эскиз заготовки для исследования РВ конических деталей представлен на рис.3.2.

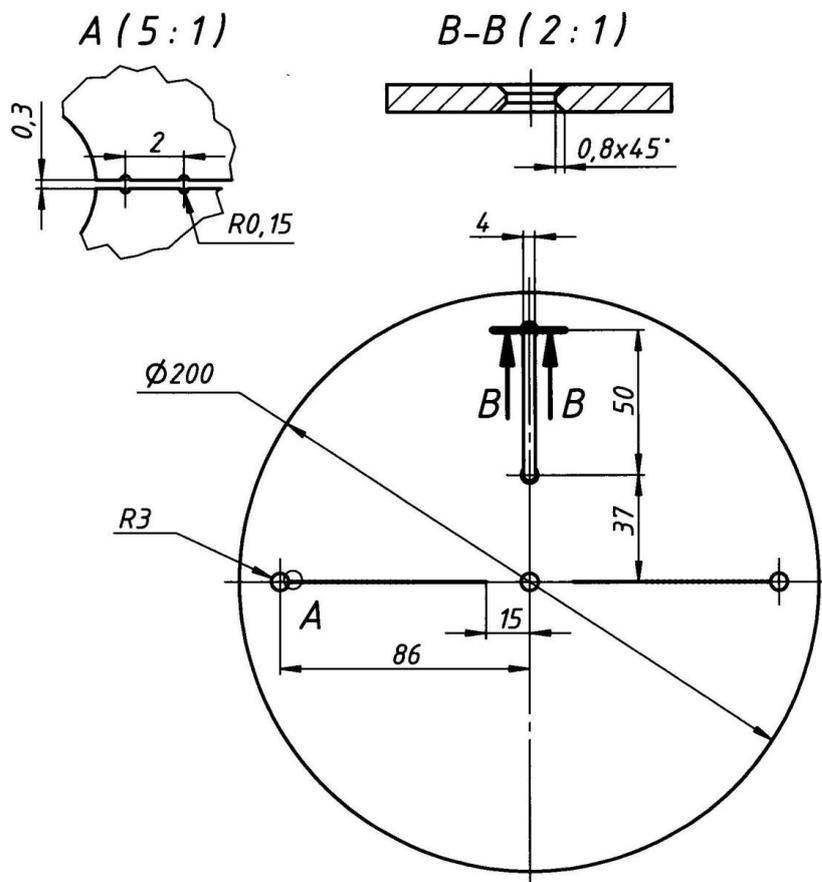


Рис.3.2. Заготовка для исследования РВ конических деталей

В заготовке методом электроэрозионной обработки вырезали радиальный паз шириной 4 мм с радиусными концевыми закруглениями, предназначенными для закрепления в нём продолговатого листового образца, эскиз которого представлен на рис.3.3.

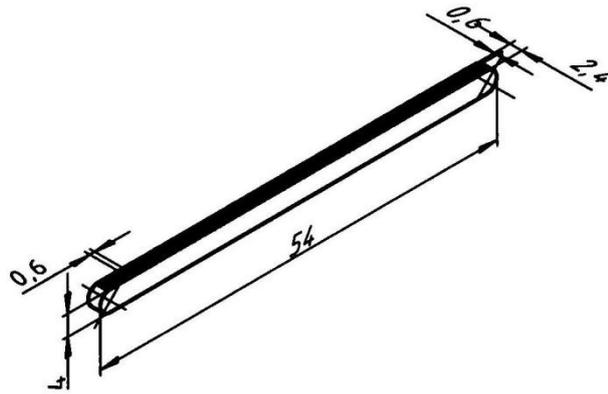


Рис.3.3. Схема образца с координатной сеткой до обработки

На боковых поверхностях образца методом царапания наносили тонкие риски с помощью специального приспособления. Погрешность шага нанесения рисок не превышала 0,05 мм. Риски образовали квадратную координатную сетку с шагом 0,6 мм. Образец по посадке с натягом до 0,05 мм запрессовывался в паз заготовки, а его концевые радиусные участки раскернивались с двух сторон в фасках радиусных частей паза. При этом получалось достаточно надёжное закрепление образца в пазе заготовки. Дополнительно электроэрозионной резкой проволокой диаметром 0,3 мм в заготовке изготавливались два узких щелевых паза, на боковых поверхностях которых прорезались риски с шагом 2 мм.

Исследования проводились на шести деталях с различными отклонениями толщины детали от правила «синуса», представленными в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Отклонения толщин деталей от правила «синуса»

№ детали	1	2	3	4	5	6
отклонение по толщине, мм	0	0,1	0,2	-0,2	-0,1	0,2
отклонение по толщине, %	0	5,6	11,1	-11,1	-5,6	11,1

Фотографии деталей №№1...6 после РВ в двух проекциях представлены на рис.3.4...3.9.



Рис.3.4. Образец №1



Рис.3.5. Образец №2



Рис.3.6. Образец №3



Рис.3.7. Образец №4



Рис.3.8. Образец №5



Рис.3.9. Образец №6

На фотографиях, представленных на рис.3.10 изображены координатные сетки образцов №№1...5, извлечённых из деталей после РВ с различными отклонениями от правила «синуса».

На фотографии рис.3.11 изображена предварительная разметка детали №2 перед вырезкой образцов для проведения механических испытаний после обработки.

На фотографии рис.3.12 изображены нестандартные образцы, использовавшиеся для проведения механических испытаний на растяжение.

На фотографиях рис.3.13 представлены образцы после проведения механических испытаний на растяжение.

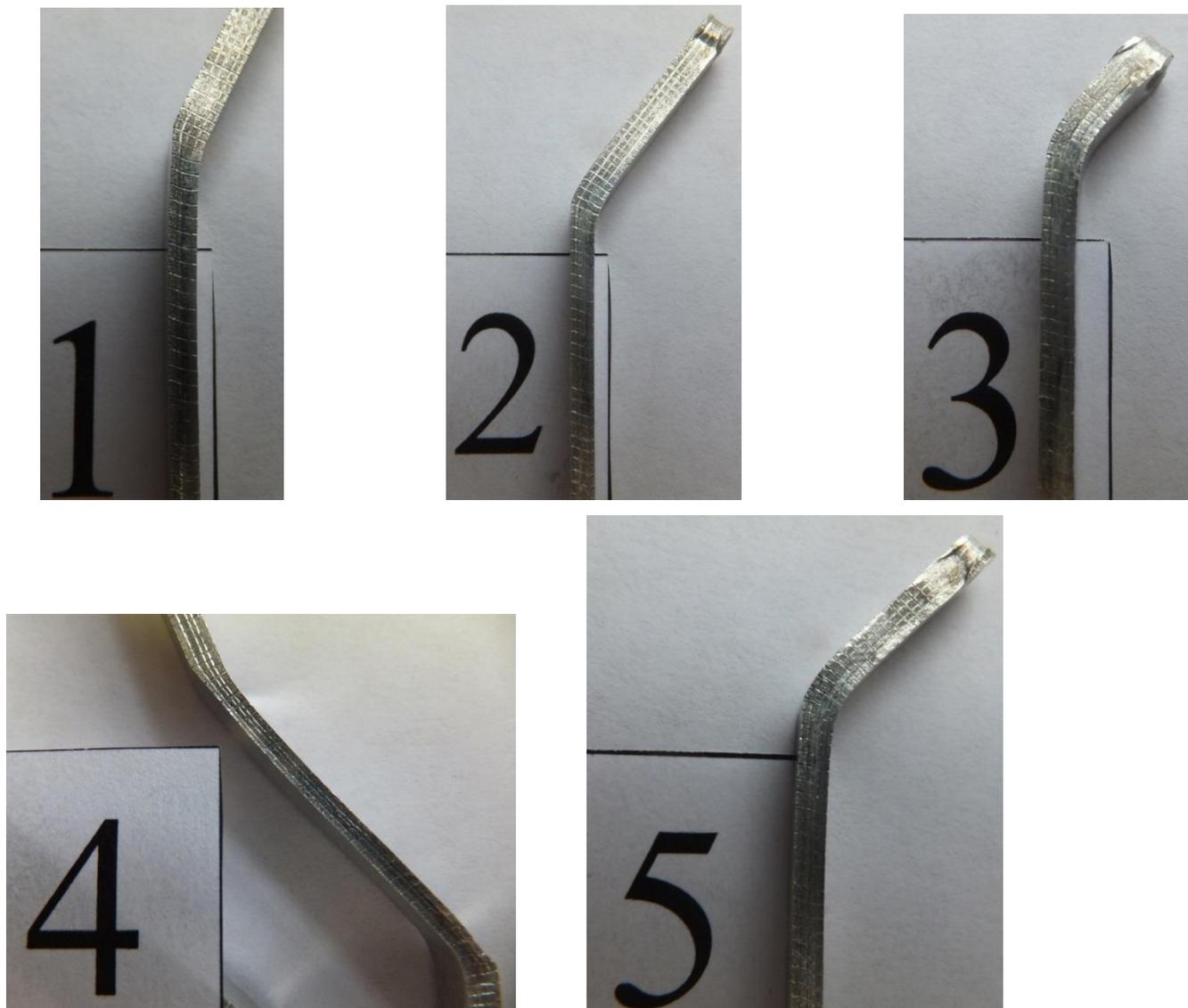


Рис.3.10 Образцы с координатной сеткой после обработки



Рис.3.11. Схема вырезки образцов



Рис.3.12. Образцы для проведения механических испытаний на растяжение

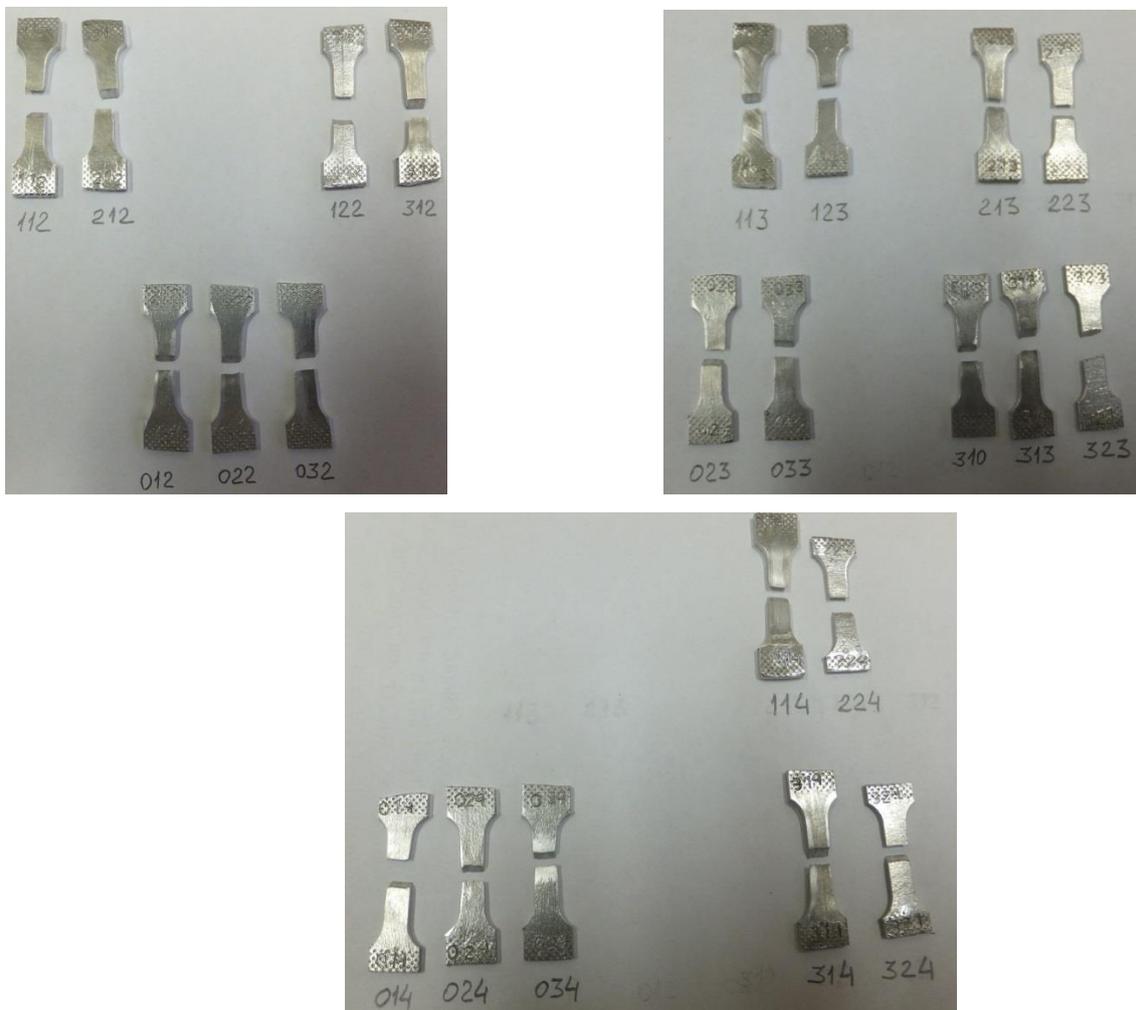


Рис.3.13. Образцы после испытаний на растяжение

В таблице 3.2 представлены результаты испытаний на растяжение нестандартных образцов, вырезанных из детали №2 в соответствии со схемой, изображённой на рис.3.11.

Таблица 3.2 - Механические свойства сплава АМг6 до и после обработки

№ образца	Толщина, мм	Ширина, мм	Временное сопротивление, Н/мм <sup>2</sup> (кгс/мм <sup>2</sup> )	Предел текучести, Н/мм <sup>2</sup> (кгс/мм <sup>2</sup> )
112	2,40	5,1	358 (36,5)	213 (21,7)
122	1,92	5,1	408 (41,6)	335 (34,1)
212	2,41	5,0	348 (35,5)	203 (20,7)
222	1,88	5,1	418 (42,6)	316 (32,2)
312	2,40	5,1	366 (37,3)	216 (22,0)
322	1,91	5,1	419 (42,7)	327 (33,3)
012	1,90	5,0	425 (43,3)	332 (33,8)
022	1,92	5,0	423 (43,1)	332 (33,8)
032	1,85	5,0	428 (43,6)	344 (35,1)

Анализ результатов механических испытаний материала показал:

1. В исходном состоянии в продольном, поперечном и угловом (45° к направлению прокатки) направлениях средняя величина временного сопротивления разрыву  $\sigma_b = 36,4$  кгс/мм<sup>2</sup>, а условного предела текучести  $\sigma_{0,2} = 21,5$  кгс/мм<sup>2</sup>. Анизотропия указанных механических свойств не превышала 6%.

2. После РВ со степенью утонения 20% средняя величина временного сопротивления  $\sigma_b = 42,3$  кгс/мм<sup>2</sup>, а предела текучести  $\sigma_{0,2} = 33,2$  кгс/мм<sup>2</sup>. По сравнению с исходным состоянием  $\sigma_b$  увеличилась на 16%, а  $\sigma_{0,2}$  увеличилась на 55%. Анизотропия указанных механических свойств, практически не изменилась, и не превышала 9%.

3. Сравнение полученных результатов с результатами других авторов [80] показало, что величина временного сопротивления  $\sigma_b$  превышала значение, полученное по формуле (2.42), на 9%, а величина предела текучести  $\sigma_{0,2}$  практически совпала с величиной, рассчитанной по формуле (2.43).

Сравнение экспериментальных значений  $\sigma_{0,2}$  с расчетными значениями по формуле:  $\sigma_{0,2} = 57,4 \varepsilon^{0,23}$ , предложенной в работе [30] показало, что экспериментальные величины предела текучести  $\sigma_{0,2}$  до 22% меньше расчетного значения. Таким образом, предложенная в

работе [80] кривая упрочнения для сплава АМг6М, в большей степени соответствует полученным экспериментальным данным.

Также были проведены измерения заготовок после обработки с различными отклонениями от правила «синуса». На рис.3.14 и рис. 3.15 представлены схемы измерений заготовок, полученных соответственно после обработки с недоутономением и с переутономением.

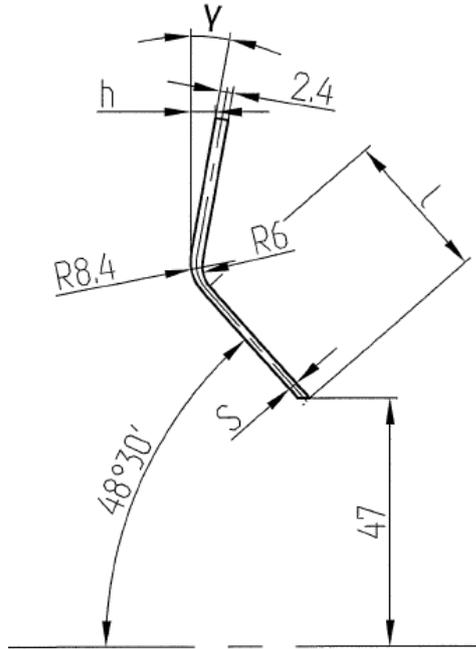


Рис. 3.14. Схема измерений заготовки после обработки с недоутономением

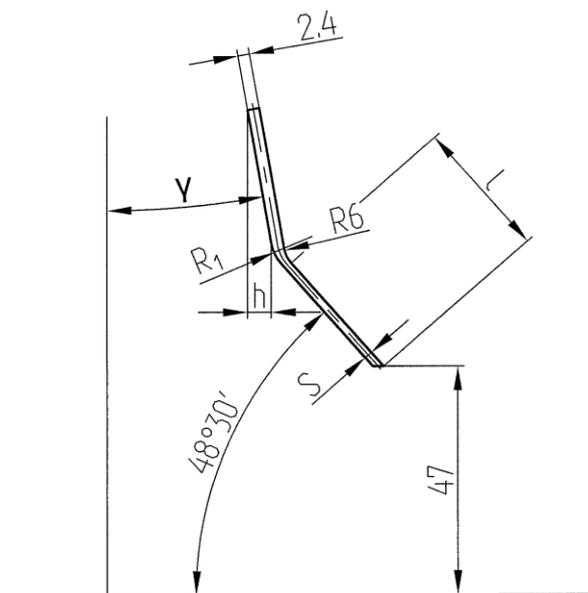


Рис. 3.15. Схема измерений заготовки после обработки с переутономением

Результаты измерений заготовок после обработки с различными степенями отклонений от правила «синуса» представлены в таблице 3.3. В таблице 3.3 представлены также высоты гофров  $h_T$ , определённые по методике, изложенной в подразделе 2.1. Измеренные значения высот гофров обозначены  $h_Э$ . Отклонения  $\Delta h$  экспериментальных значений высот гофров от теоретических определялись по формуле:

$$\Delta h = (h_Э/h_T - 1)100 \quad (3.1)$$

Таблица 3.3 – Размеры заготовок после обработки

№ образца	1	2	3	4	5	6
$S$ , мм	1,8	1,9	2,0	1,6	1,7	2,0
$\Delta S$ , %	0	5,6	11,1	-11,1	-5,6	11,1
$h_Э$ , мм	0,8	4,4	3,9	14,0	6,2	3,6
$h_T$ , мм	0	3,9	4,6	11,0	7,1	4,6
$\Delta h$ , %	-	12,8	-15,2	27,3	-12,7	-21,7

В ходе экспериментальных исследований установлено следующее.

1. Ячейки координатной сетки, имевшие до обработки форму квадратов, после РВ приобретают форму вытянутого криволинейного четырёхугольника, две противоположные стороны которого прямолинейны и параллельны образующим полученных конических поверхностей, а две другие стороны являются криволинейными линиями.

2. В зонах радиуса скругления оправки и в очаге пластической деформации между деформирующим роликом и оправкой ячейки координатной сетки приобретают формы криволинейных переменных четырёхугольников.

3. При всех исследованных степенях деформации в конической зоне линии координатной сетки в продольном направлении оставались параллельными и эквидистантными между собой.

4. При всех исследованных степенях деформации изгиб образцов в тангенциальном направлении отсутствовал.

5. Площади ячеек координатной сетки после обработки практически не изменялись.

6. При РВ с переутонением наблюдался переход плоской формы фланца в коническую форму с вершиной, направленной в сторону вершины конической оправки. Угол конусности фланца уменьшался при увеличении степени переутонения. При этом при степени переутонения более 20% коническая поверхность фланца теряла устойчивость с образованием волновой поверхности.

7. При РВ с недоутонением наблюдался постепенный переход плоской формы фланца в коническую форму с вершиной, направленной в сторону противоположную вершине

конической оправки. Угол конусности фланца уменьшался при уменьшении степени недоутонения.

Результаты экспериментальных исследований методом координатной сетки показали, что во всём исследованном диапазоне степеней деформации при РВ конических деталей имеет место сочетание сдвиговых и изгибных деформаций, что хорошо согласуется с результатами теоретических исследований. Отклонение экспериментально определённых высот гофров от теоретических значений не превышало 27,3%.

### **3.2. Экспериментальные исследования изготовления деталей типа фланец**

С целью определения пределов возможностей изготовления с отклонением от правила «синуса» экспериментально исследовано изготовление детали типа фланец. На рис.3.16 изображена 3D-модель, а на рис.3.17 - эскиз фланца.

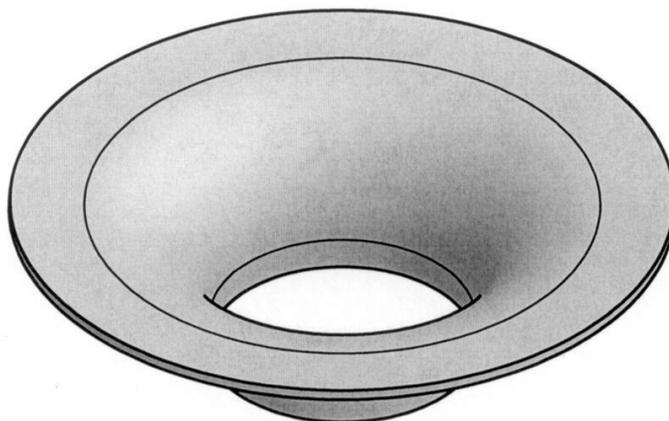


Рис. 3.16. Модель фланца

Фланцы изготавливались из круглой листовой заготовки толщиной 6,5 мм из алюминиевого сплава 1201 АМ ОСТ 1 90271. Исходное состояние материала заготовки – отожжённое. Детали изготавливались на одной оправке много переходной ротационной вытяжкой без промежуточных термообработок. После ротационной вытяжки фланцы были подвергнуты закалке и искусственному старению. Технологическая оснастка, применявшаяся при изготовлении фланцев, изображена на рис.3.18.

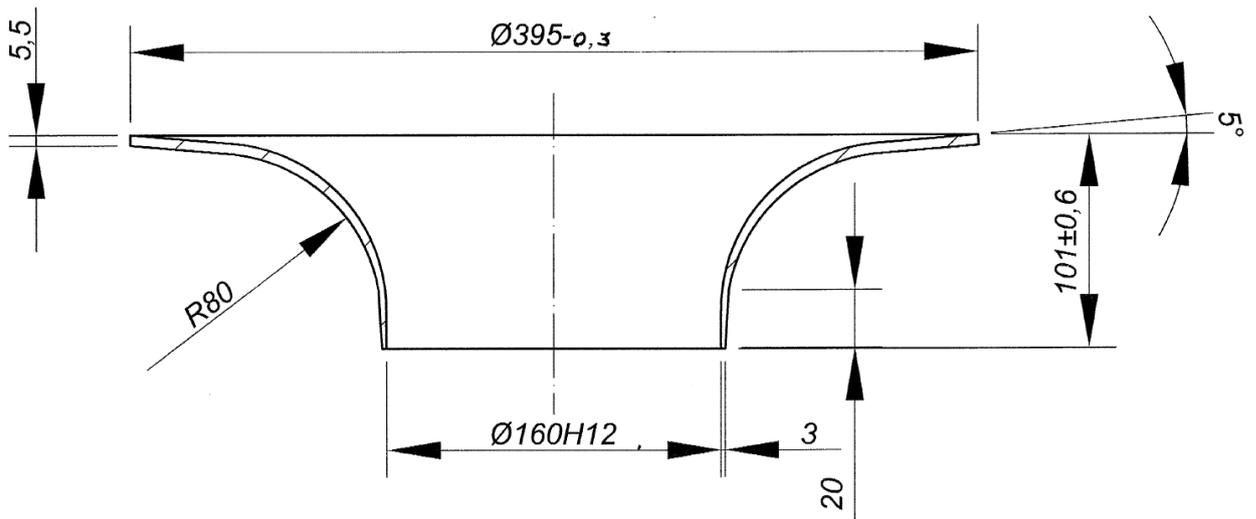


Рис. 3.17. Эскиз фланца



Рис.3.18. Технологическая оснастка для изготовления фланца

На рис.3.19 представлены фланца фланцы после обрезки донной части.

Одной из сложных технологических задач, решённых при изготовлении фланца, была задача обеспечения требуемой толщины стенки на торовом участке. По требованию конструкторской документации она должна быть не менее 4,5 мм. После ряда проведённых экспериментов с различными траекториями движения деформирующего ролика необходимую толщину удалось обеспечить.

Схема измерений толщины фланца изображена на рис.3.20. Средние величины толщины стенки фланца и отклонения по толщине по результатам изготовления трёх деталей представлены в таблице 3.4.



Рис.3.19. Фланцы из сплава 1201Т1

Таблица 3.4 – Толщина  $S$  фланца, мм

№ п/п	А	Б	В	Г	Д	Е	Ж
I	4,85	4,85	5,21	5,51	5,52	5,45	5,56
II	4,75	4,85	5,22	5,51	5,47	5,42	5,57
III	4,76	4,85	5,24	5,52	5,50	5,44	5,54
IV	4,82	4,81	5,18	5,52	5,50	5,46	5,50
средняя	4,80	4,84	5,21	5,52	5,50	5,44	5,54
$\Delta S_{\max}$ , мм	0,05	0,03	0,03	0,01	0,03	0,02	0,04
$\Delta S_{\max}$ , %	1,0	0,6	0,6	0,2	0,5	0,4	0,7

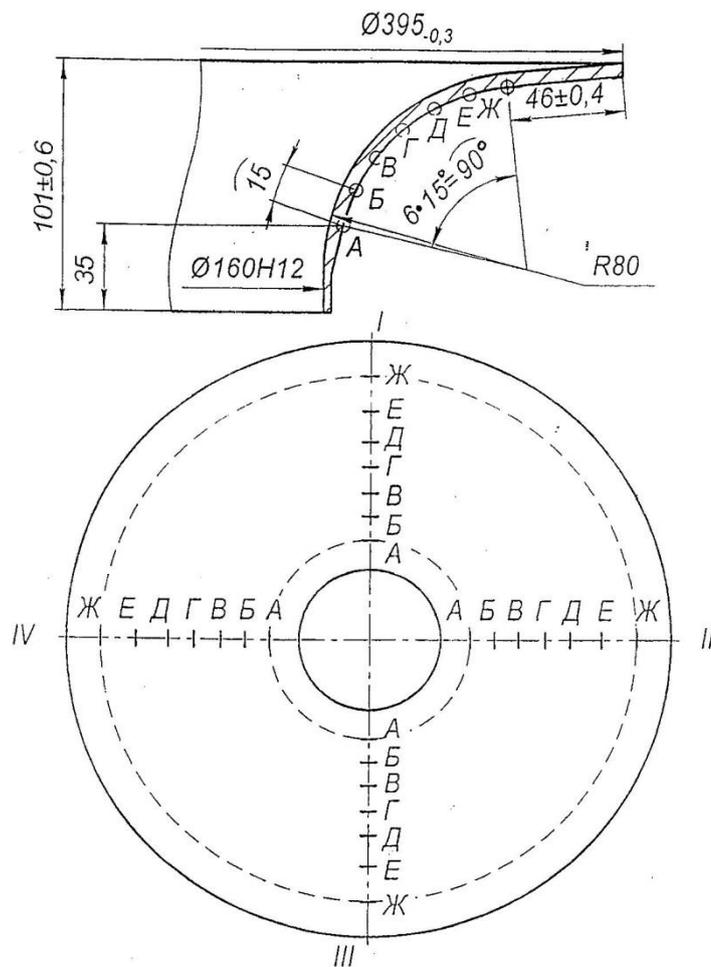


Рис.3.20. Схема измерений толщины фланцев

Для подтверждения работоспособности в эксплуатационных условиях были проведены исследования материала фланцев после ротационной вытяжки на трёх образцах на определение механических свойств: предела прочности, предела текучести и относительного удлинения, а также металлографические исследования макро- и микроструктуры.

Схема вырезки образцов для механических испытаний и металлографических исследований представлена на рис.3.21. Учитывая размеры и сложную форму фланца, механические испытания проводились на нестандартных образцах. На рис.3.22 дан эскиз образца 1, а на рис.3.23 - эскиз образца 2. Фотографии образцов представлены на рис. 3.24 и 3.25.

Результаты испытаний образцов представлены в таблице 3.5

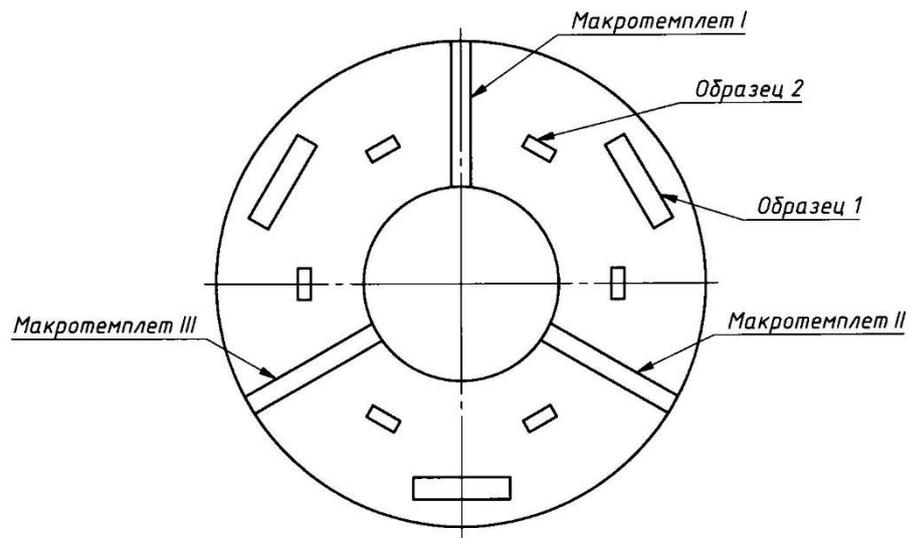


Рис.3.21. Схема вырезки образцов из фланца

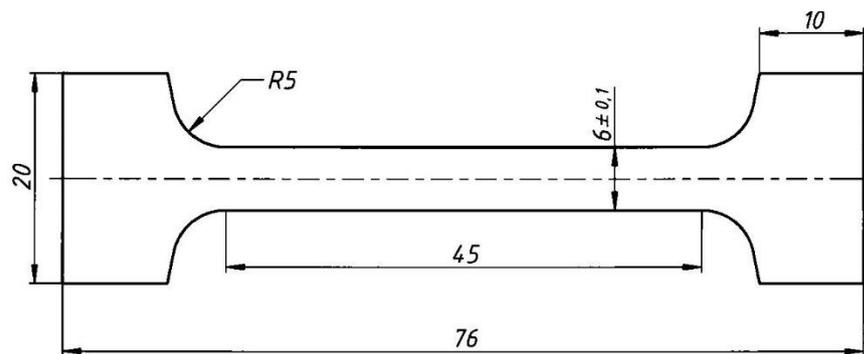


Рис.3.22. Эскиз образца 1

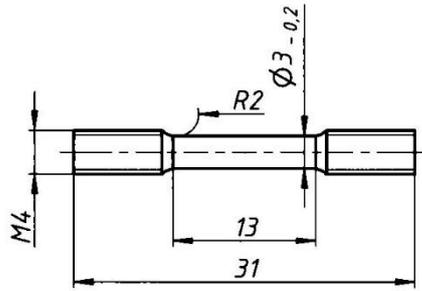


Рис.3.23. Эскиз образца 2

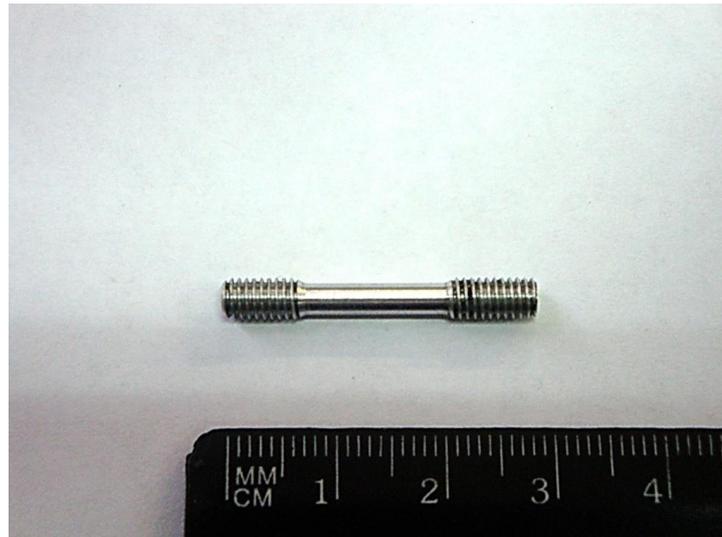


Рис.3.24. Образец 2



Рис.3.25. Образец 1

Таблица 3.5 - Механические свойства образцов из сплава 1201 Т1 после ротационной вытяжки и закалке с искусственным старением

Тип образца	№	Временное сопротивление, $\sigma_v$ ; Н/мм <sup>2</sup>	Предел текучести, $\sigma_{0,2}$ ; Н/мм <sup>2</sup>	Относительное удлинение, $\delta$ ; %
1	1	376	278	7,3
1	2	418	265	12,0
1	3	393	287	10,0
2	1	392	274	13,3
2	2	407	276	11,0
2	3	401	265	11,0
2	4	394	286	13,3
2	5	400	271	12,0
2	6	394	284	12,0

Анализ данных таблицы 3.5 показывает, что механические свойства образцов, вырезанных из фланца, соответствуют требованиям ОСТ 1 90271.

На трёх макротемплетах, вырезанных из фланца проведено исследование и фотографирование макроструктуры материала после ротационной вытяжки и закалки. Фотографии макроструктуры представлены на рисунке 3.26. При исследовании установлено, что макроструктуры всех трёх образцов идентичны и соответствуют второму баллу шкалы эталонов. Макроструктура образцов плотная, дефектов не обнаружено. На участке 1 зерно имеет форму, вытянутую в осевом направлении, на участках 2, 3, 4 структура равноосная.

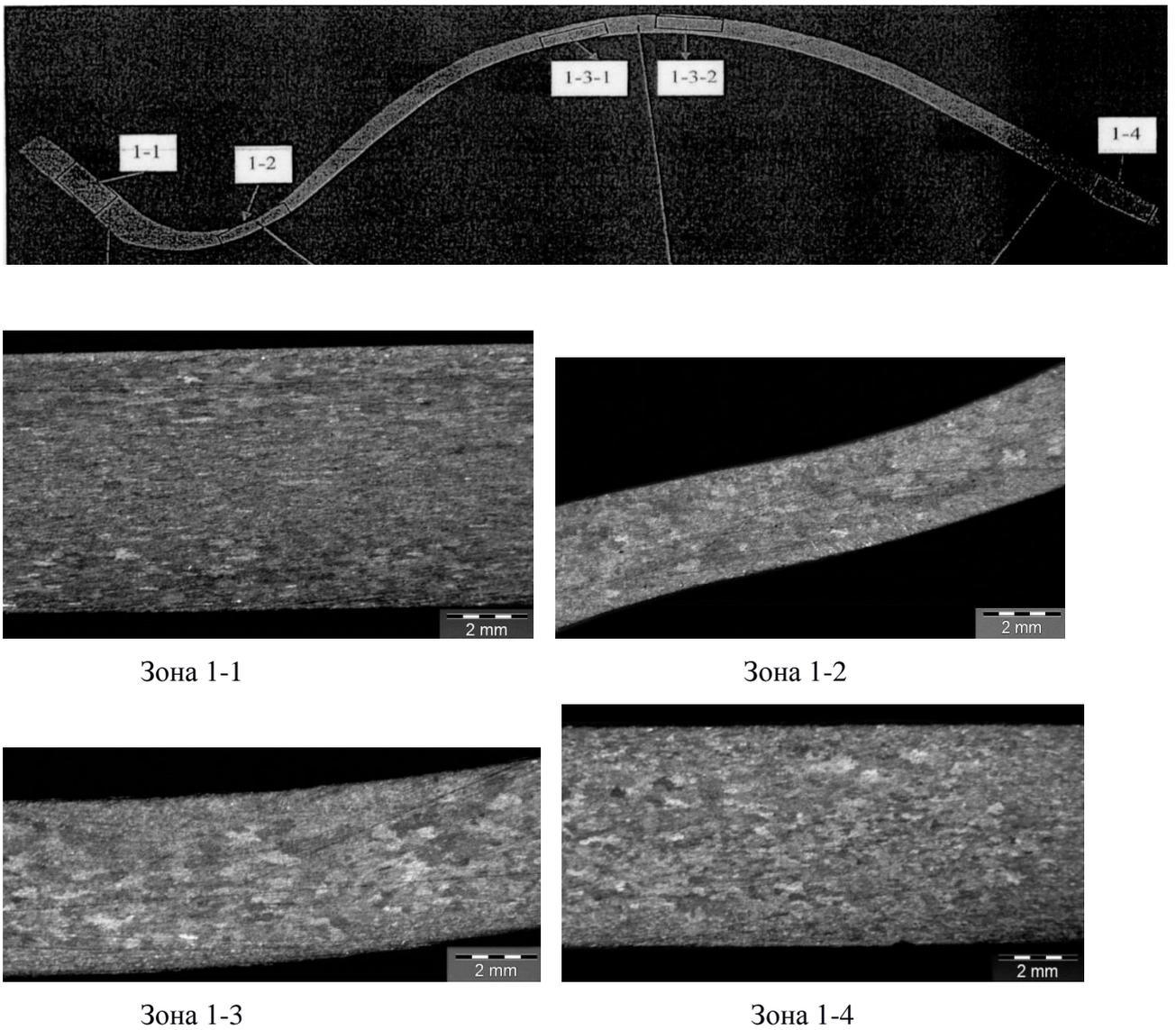
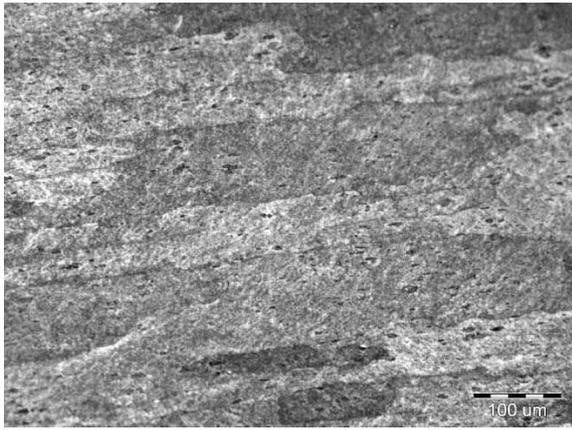
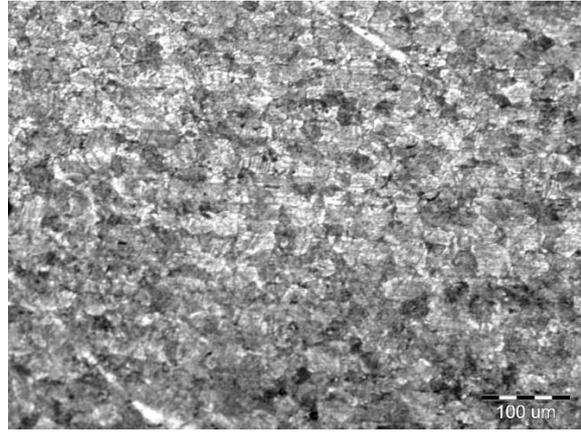


Рис.3.26. Схема вырезки микрошлифов и макроструктура фланца из 1201Т в различных зонах

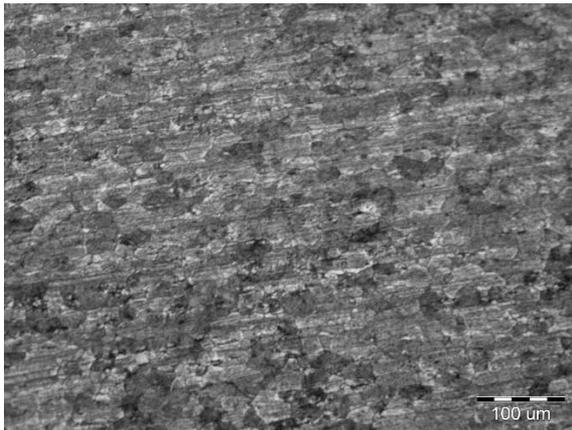
Исследование микроструктуры материала после ротационной вытяжки и закалки проводилось на шлифах, вырезанных из макротемплетях, по разметке, указанной на рис. 3.26. Микрошлифы дополнительной закалке не подвергались. Микроструктура материала фланца на различных участках, указанных на рис.3.26, представлена на рис.3.27.



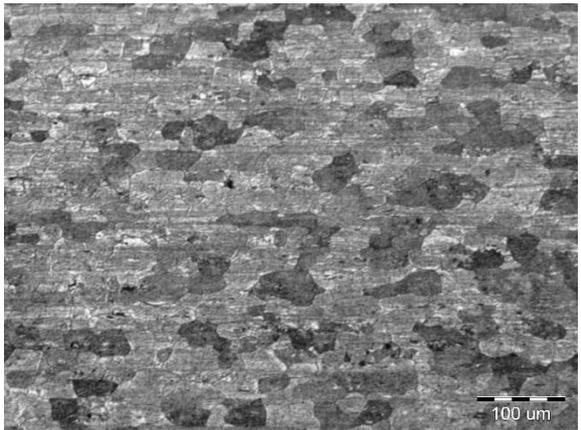
Зона 1-1



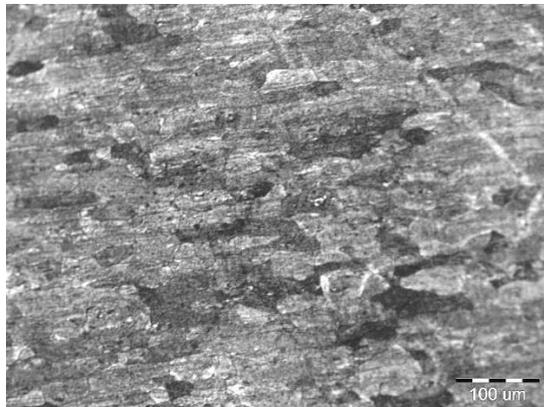
Зона 1-2



Зона 1-3-1



Зона 1-3-2



Зона 1-4

Рис.3.27. Микроструктура материала фланца из сплава 1201Т после РВ

По результатам исследования установлено:

- микроструктура образцов соответствует структуре сплава 1201Т1;
- дефектов металлургического характера не обнаружено;
- на участках 1-2, 1-3-1, 1-3-2 микроструктура равноосная;
- на участках 1-1 и 1-4 микроструктура имеет различную степень деформации.

После сварки фланцев и днища проведен радиографический контроль сварных швов и испытания днищ на прочность и герметичность. Результаты всех испытаний положительные, протоколы испытаний представлены в приложении.

По результатам экспериментальных исследований составлен отчет, согласованный с ведущими отраслевыми предприятиями: ОАО «Композит» и «НПО «Техномаш», представленный в приложениях А, Б, В.

### **3.3. Экспериментальные исследования изготовления широких листов**

Автором настоящей работы в соавторстве разработан способ изготовления широких металлических листов [95]. Предлагаемый способ поясняется схемой, изображенной на рис.3.28. Способ изготовления металлического листа заключается в предварительной гибки листовой заготовки на листогибочной машине в промежуточную цилиндрическую заготовку 1, которую подвергают ротационной вытяжке с преднамеренным утонением стенки. В процессе вытяжки длина заготовки 1 увеличивается пропорционально степени утонения. Особенностью способа является то, что согнутую заготовку 1 закрепляют на оправке 2 стягивающими устройствами 3, которые после ротационной вытяжки снимают. Для снятия остаточных деформаций, накопленных в процессе РВ, и восстановления пластических свойств материала заготовку подвергают термической обработке, в частности, для алюминиевых сплавов - высокому отжигу. После РВ заготовку разгибают на специальной гибочной машине в плоский лист и подвергают правке. При необходимости, на одном из торцов цилиндрической заготовки с помощью деформирующего ролика на оправке отгибают фланец, с помощью которого обрабатываемая заготовка упором прижимается к оправке. Вместо стягивающих устройств согнутую заготовку по продольному стыку можно сварить прерывистым или непрерывным сварным швом, который вместе с отогнутым фланцем удаляют перед разгибанием цилиндрической заготовки в плоский лист. Таким образом, можно изготовить необходимые широкие листы, не выпускаемые в настоящее время металлургической промышленностью.

При реализации способа изготовления металлического листа ротационной вытяжкой практический интерес представляет изменение механических свойств листа после РВ. С целью определения характеристик листов, изготовленных в соответствии со способом по патенту РФ № 2 494 829, провели экспериментальные исследования по определению механических свойств металла. При нормальных условиях испытаний определялись значения временного сопротивления разрыву  $\sigma_b$ , условного предела текучести  $\sigma_{0,2}$ , относительного удлинения после разрыва  $\delta$  на пропорциональных образцах по ГОСТ 11701.

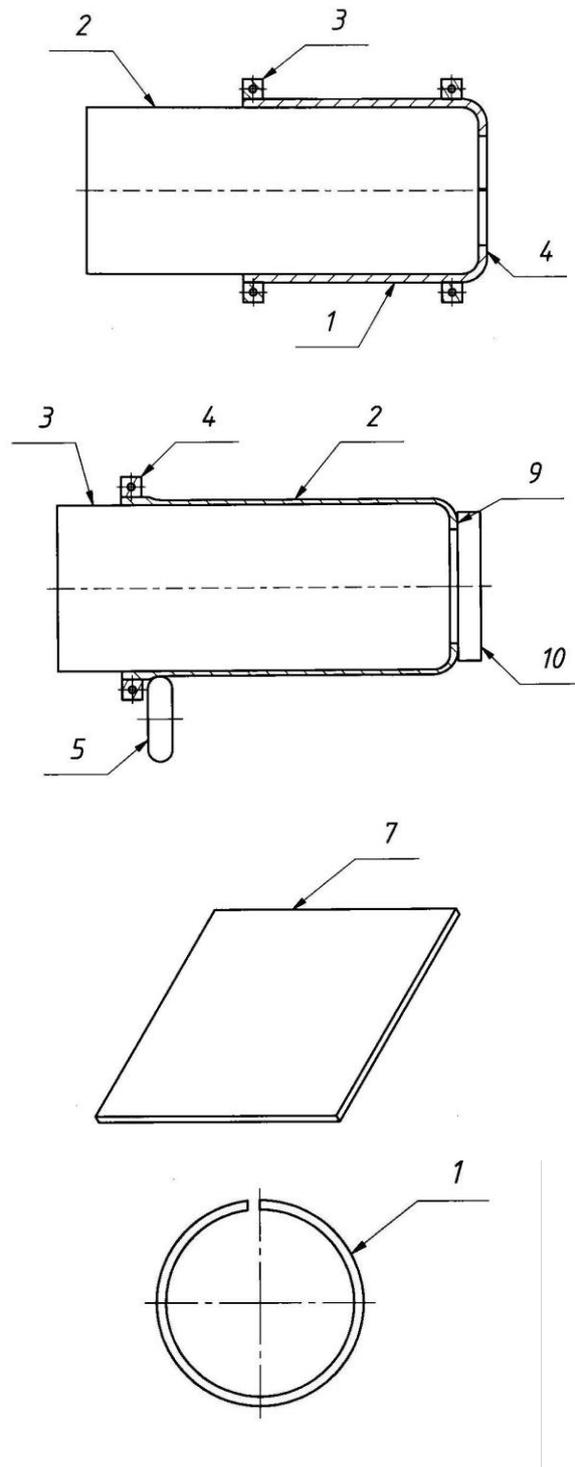
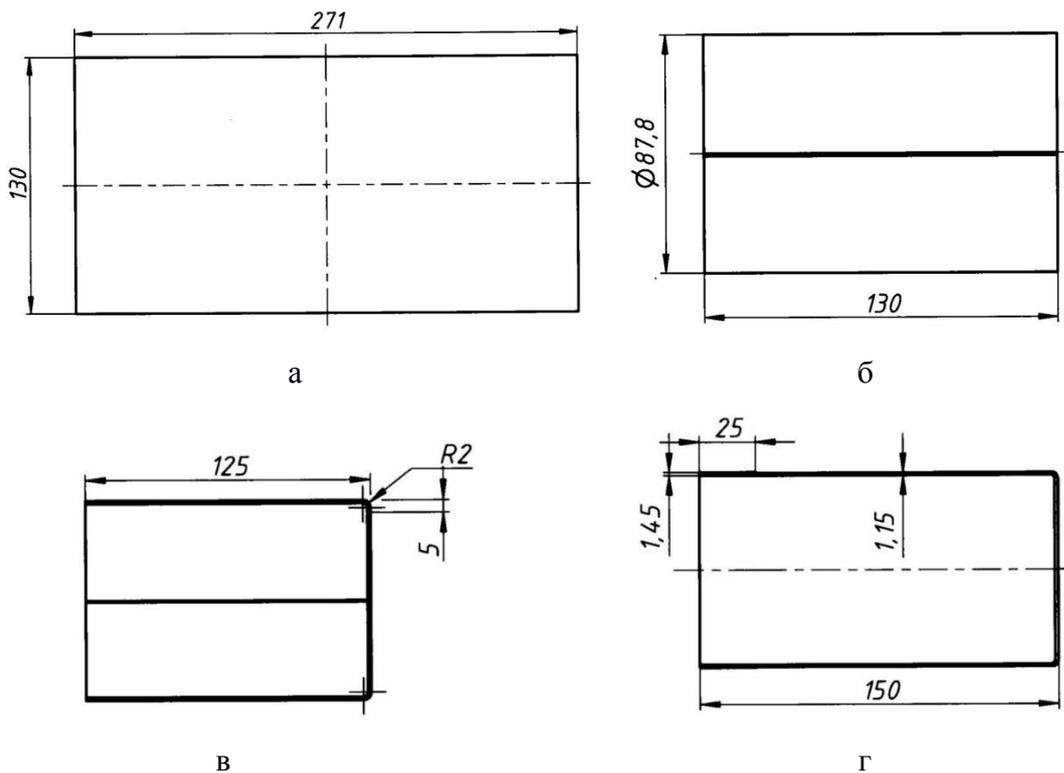


Рис.3.28. Схема способа изготовления широких листов

Схема проведения экспериментов представлена на рис.3.29, на котором изображены: а) исходная заготовка, б) заготовка после гибки на трёх валковой гибочной машине, в) заготовка с отогнутым фланцем, г) заготовка после РВ.



а – исходная заготовка; б – заготовка после гибки;

в - заготовка после отбортовки края;

г - заготовка после ротационной вытяжки

Рис.3.29. Схема эксперимента по изготовлению листовой детали

Фотография листовых деталей после РВ в свободном состоянии представлена на рис.3.30. На фотографии видно, что деталь после РВ имеет небольшую закрутку торцевых сечений цилиндра относительно друг друга, что указывает на наличие деформаций при РВ не только в продольном, но и в тангенциальном направлении.



Рис.3.30. Листовая деталь после обработки в свободном состоянии

Исследования проводили на образцах из листов алюминиевого сплава марки АМг6М ОСТ 1 92000 толщиной 1,45 мм. Материал в состоянии поставки имел отожжённое состояние. Испытания проводили на образцах, вырезанных в продольном и поперечном направлениях, а также под углом  $45^\circ$  к направлению прокатки и РВ. Схема вырезки образцов из листовой детали после РВ и разгибания представлена на рис.3.31. Стрелкой НРВ обозначено направление течения металла при ротационной вытяжке.

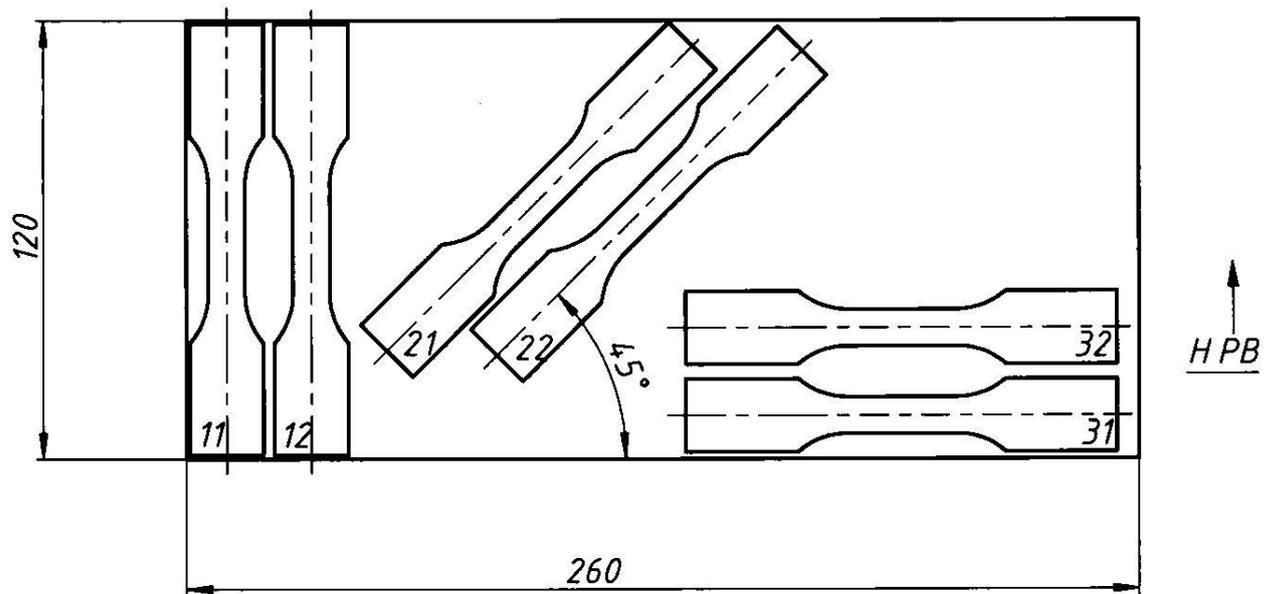


Рис.3.31. Схема вырезки образцов из листовой детали

Для сравнения испытания проводили в двух состояниях материала: на образцах, вырезанных из листов в состоянии поставки, на образцах, вырезанных из листов, подвергнутых РВ со степенью деформации 21%. РВ осуществлялась по прямой схеме роликом с радиусом скругления 6 мм. При РВ заготовка фиксировалась на оправке винтовым хомутом и прижимом задней бабки станка. Шероховатость поверхностей заготовок после РВ не превышала показателя  $R_a 2.5$ , что соответствует шероховатости в состоянии поставки.

Эскиз пропорционального образца, изготовленного в соответствии с ГОСТ11701 для проведения механических испытаний на растяжение представлен на рис.3.32. Испытания проводили в соответствии с ГОСТ1497.

Фотография образцов после испытаний на растяжение в состоянии поставки представлена на рис.3.33, а после РВ – на рис.3.34.

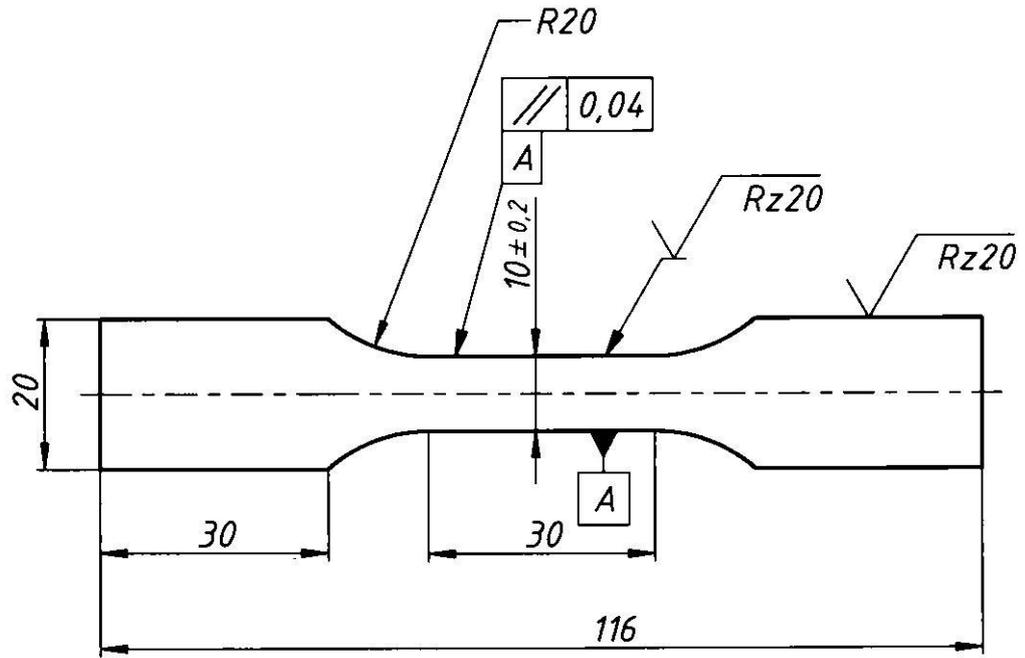


Рис.3.32. Эскиз образца для испытаний листов на механические свойства

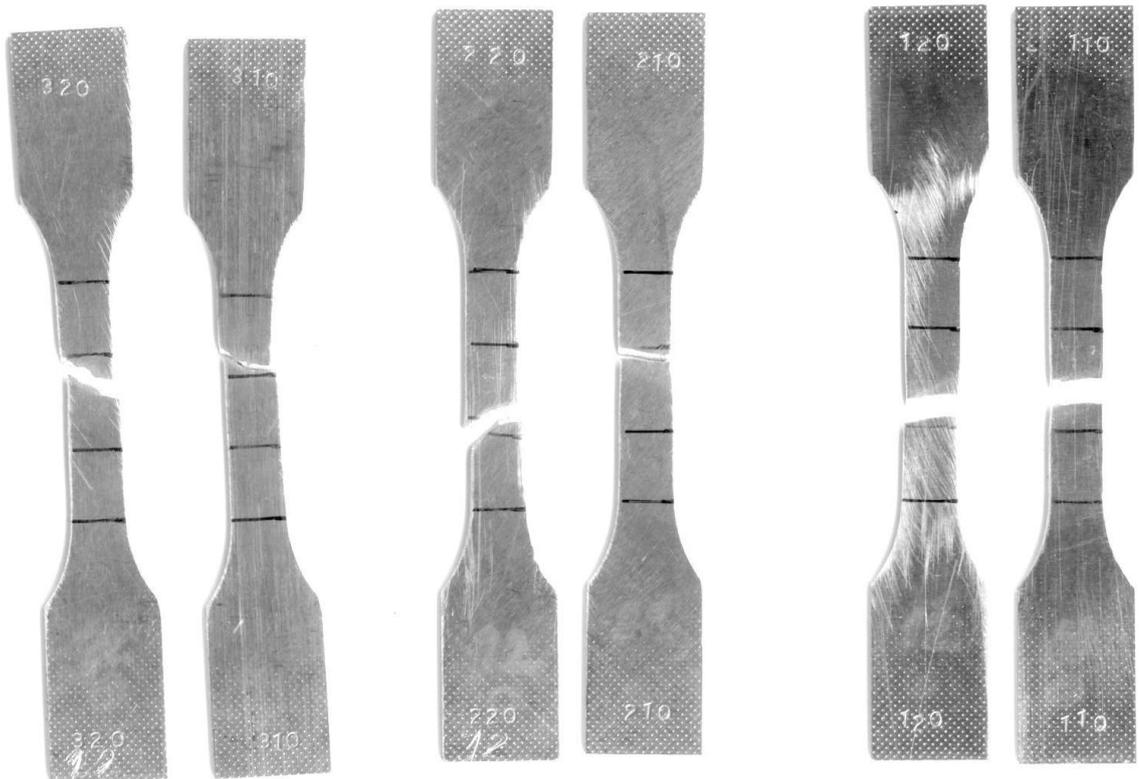


Рис.3.33. Образцы после испытаний на механические свойства листов в состоянии поставки



Рис.3.34. Образцы после испытаний листов на механические свойства  
после РВ

Результаты исследований механических свойств металла, представлены в таблицах 3.6 и 3.7.

Таблица 3.6 - Механические свойства образцов в исходном состоянии

№ образца	Толщина, мм	Ширина, мм	Площадь сечения, мм <sup>2</sup>	Временное сопротивление, $\sigma_b$ , Н/мм <sup>2</sup>	Предел текучести, $\sigma_{0,2}$ , Н/мм <sup>2</sup>	Относительное удлинение, %	Относительное сужение, %
110	1,45	10,0	14,5	358,4	193,0	23,0	13,9
120	1,45	10,0	14,5	360,1	194,4	23,5	13,7
210	1,45	10,0	14,5	361,4	193,0	23,0	13,9
220	1,45	10,0	14,5	355,6	177,6	23,0	13,9
310	1,45	10,0	14,5	364,6	193,7	22,5	13,7
320	1,45	10,0	14,5	363,7	192,8	22,5	13,7

Таблица 3.7 - Механические свойства образцов после ротационной вытяжки

№ образца	Толщина, мм	Ширина, мм	Площадь сечения, мм <sup>2</sup>	Временное сопротивление, $\sigma_0,2$ , Н/мм <sup>2</sup>	Предел текучести, $\sigma_{0,2}$ , Н/мм <sup>2</sup>	Относительное удлинение, %	Относительное сужение, %
11*	1,15	10,0	11,5	410,8	290,8	13,5	8,6
12*	1,15	10,0	11,5	410,8	294,1	12,0	8,2
21*	1,18	10,0	11,8	416,4	311,8	13,0	8,8
22*	1,15	10,0	11,5	406,8	287,7	13,5	10,6
31*	1,15	10,0	11,5	417,0	307,4	13,0	8,2
32*	1,15	10,0	11,5	417,6	287,7	13,0	8,6

Анализ результатов испытаний показал, что в состоянии поставки отожжённые листы из сплава АМг6М практически изотропны в плоскости листа и характеризуются следующими средними величинами:  $\sigma_0,2 = 36,1$  кгс/мм<sup>2</sup>;  $\sigma_{0,2} = 19,1$  кгс/мм<sup>2</sup>;  $\delta = 22,9\%$ ;  $\psi = 13,8\%$ . После РВ и разгибания образцов до плоского состояния соответствующие средние величины составили:  $\sigma_0,2 = 41,3$  кгс/мм<sup>2</sup>;  $\sigma_{0,2} = 29,7$  кгс/мм<sup>2</sup>;  $\delta = 13,0\%$ ;  $\psi = 8,8\%$ . Таким образом, после обработки  $\sigma_0,2$  увеличилось на 14,6%;  $\sigma_{0,2}$  увеличилось на 55,5%;  $\delta$  уменьшилось на 43,2%;  $\psi$  уменьшилось на 36%. При этом, практически сохранилась изотропия механических свойств в плоскости листа.

Сравнение полученных экспериментальных результатов с теоретическими расчётами по формулам, предложенным в работе [80] показывает, что экспериментально полученный условный предел текучести на 4,4% меньше, а временное сопротивление на 11,9% больше соответствующих теоретических значений, что можно считать хорошим совпадением.

Были проведены исследования микроструктуры образцов из сплава АМг6М в исходном состоянии и после ротационной вытяжки. На рис.3.35 представлены фотографии при увеличении  $100\times$  микроструктуры сплава АМг6М в состоянии поставки. На рис.3.35а изображена микроструктура в долевом, а на рис.3.35б - в поперечном направлении. На рис.3.36 представлены фотографии микроструктуры сплава АМг6М после РВ, также в долевом - рис.3.36а и в поперечном направлении - рис.3.36б.



а – долевое направление

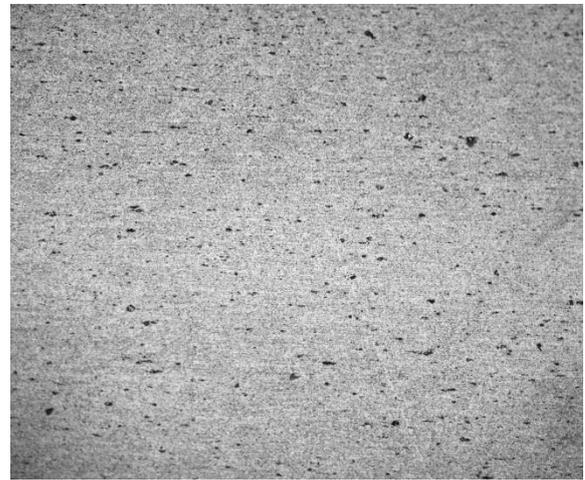


б – поперечное направление

Рис.3.35. Микроструктура сплава АМг6М в состоянии поставки.



а – долевое направление



б – поперечное направление

Рис.3.36. Микроструктура сплава АМг6М после РВ

Анализ фотографий микроструктуры показывает, что после обработки микроструктура в долевом направлении практически не изменилась, а в поперечном направлении вид микроструктуры стал больше похож виду микроструктуры в долевом направлении. Можно предположить, что при увеличении степени деформации микроструктура сплава будет сходна в долевом и поперечном направлении.

Таким образом, проведённые экспериментальные исследования показали принципиальную возможность реализации способа изготовления широких листов. При этом, прочностные свойства листа возрастают, пластические свойства – уменьшаются. После обработки увеличивается однородность микроструктуры листа в долевом и поперечном направлениях.

### 3.4. Выводы по главе 3

В результате проведённых экспериментальных исследований подтверждена адекватность разработанных теоретических моделей ротационной вытяжки деталей. При этом были получены следующие результаты:

1. Выявлены предельные возможности обработки конических деталей с отступлением от правила «синуса». Экспериментально подтверждена потеря устойчивости фланца заготовки, причем при обработке с переутонением стенки заготовки наблюдалось образование радиальных гофров, а при обработке с недоутонением - образование кольцевых гофров.

2. Подтверждено соответствие напряжённо-деформированного состояния в очаге пластической деформации при РВ конусообразных деталей разработанной расчетной модели. Во всём исследованном диапазоне формоизменений наблюдалось сочетание изгибных и сдвиговых деформаций.

3. Определено изменение механических свойств заготовки после ротационной вытяжки имеющимся данным. Полученные экспериментальные данные хорошо согласуются с данными других авторов.

## ГЛАВА 4. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ И ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ

### 4.1. Изготовление детали типа диафрагма

Полученные результаты теоретических и экспериментальных исследований использовались при отработке технологии изготовления деталей типа диафрагма. Фотография одной из диафрагм представлена на рис.4.1.



Рис.4.1. Диафрагма

Конструктивно диафрагма представляет собой тонкостенную оболочку двойной кривизны, особенностями которой является переменная толщина стенки и очень высокие требования по точности изготовления. При диаметре диафрагмы 800 мм толщина стенки уменьшается от 2,9 мм в куполе до 2,6 мм по краю, при этом допуск на толщину стенки составляет  $\pm 0,1$  мм. Диафрагма изготавливалась из алюминиевого листа марки А6М толщиной 3,5 мм ГОСТ 21631 - 76. Для изготовления диафрагмы применялась комбинированная обработка, при которой вытяжкой в инструментальном штампе была изготовлена специально рассчитанная заготовка, которая после отжига была подвергнута ротационной вытяжке с целью получения окончательной формы и распределения требуемой толщины.

Заготовку, предназначенную для ротационной вытяжки диафрагмы, изготавливали вытяжкой на гидропрессе двойного действия в инструментальном штампе за две операции.

Исходные заготовки - плоские круги диаметром 1225 мм из отожжённого алюминиевого листа марки А6М номинальной толщиной 3,5 мм ГОСТ 21631. Допустимое отклонение толщины листа повышенной точности от номинала в состоянии поставки составляет 0,3 мм. Фактическая толщина партии заготовок из 10 штук составляла 3,48-0,10 мм. Механические свойства листа в состоянии поставки предел прочности при растяжении —  $\sigma_s \geq 60$  Н/мм<sup>2</sup>, относительное удлинение —  $\delta \geq 30\%$ . Параметр шероховатости поверхностей исходного листа  $R_a$  2,5 мкм.

На первой операции вытяжки получали полуфабрикаты с вытянутой спрофилированным пуансоном центральной частью глубиной 180 мм в матрице с отверстием  $\varnothing$  712 мм. Диаметр полуфабриката после вытяжки составлял  $\varnothing$  1197 мм. Вытяжка производилась со смазкой поверхностей пуансона и матрицы.

На второй операции вытяжки получали полуфабрикаты с вытянутой центральной частью глубиной 333 мм в матрице с отверстием  $\varnothing$  808 мм. Вытяжка производилась со смазкой поверхностей пуансона и матрицы. Максимальное утонение заготовки после вытяжки составило 0,43 мм. Диапазон распределения толщин полуфабриката после вытяжки от 2,96 мм до 3,26 мм, что существенно больше допустимого отклонения толщин между соседними поясами детали по требованиям конструкторской документации, составлявшего  $\pm 0,05$  мм.

Полученный после вытяжки полуфабрикат подвергался полному отжигу для снятия остаточных напряжений.

Ротационная вытяжка диафрагмы осуществлялась на специальном станке фирмы Leifeld модели PNC 108S. Фотография станка с оправкой представлена на рис.4.2, а обрабатываемая заготовка в процессе РВ – на рис.4.3.



Рис.4.2. Оправка для РВ диафрагмы



Рис.4.3. Диафрагма в процессе РВ

В процессе отработки технологии изготовления диафрагм возник ряд проблем, которые были успешно решены. Так как возможности управления толщиной заготовки в процессе вытяжки в инструментальном штампе весьма ограничены, распределение толщины заготовки, полученной в результате выполнения операций вытяжки, отличалось от распределения, необходимого для соблюдения правила «синуса» при РВ. Поэтому РВ диафрагмы выполнялась с отклонением от правила «синуса». На начальном этапе отработки это привело к появлению ряда дефектов, которые представлены ниже.

На рис.4.4 изображен дефект в виде волновой поверхности на средней части диафрагмы, полученный при РВ с переутонением стенки детали.

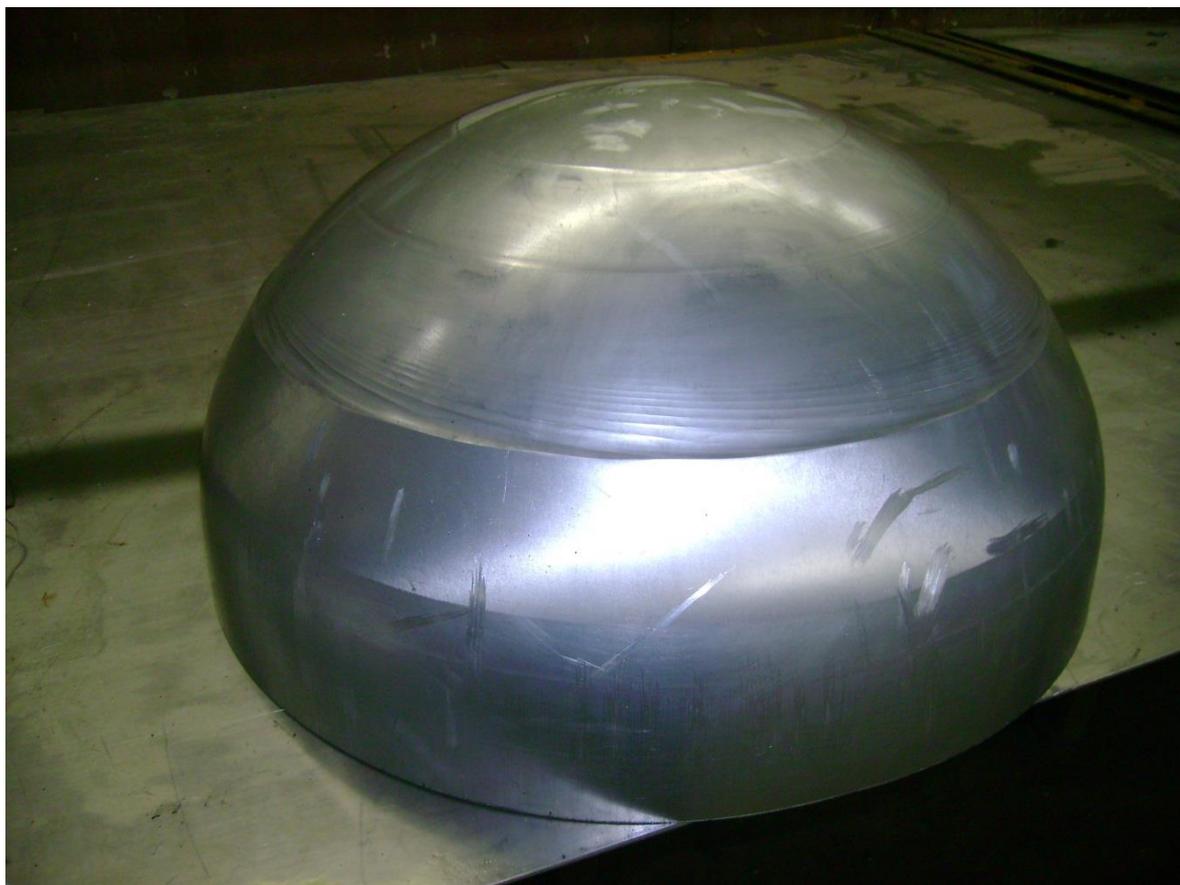


Рис.4.4. Дефект в виде волновой поверхности

На рис.4.5 представлен дефект в виде кольцевого гофра, полученного при РВ с переутонением стенки детали из-за обратного по отношению к направлению перемещения ролика течения металла, ограниченного прижимом.

На рис.4.6 представлен дефект в виде радиальных гофров, возникших при потере устойчивости фланца диафрагмы в процессе РВ.

На рис.4.7 изображено разрушение диафрагмы с образованием трещины в зоне фланца.

На рис.4.8 представлена фотография диафрагмы №2 диаметром 600 мм. Особенностью, выявленной при изготовлении диафрагмы №2, явилось проявление макроструктуры сплава А6М после РВ и термообработки, изображённой на рис.4.9.

С использованием теоретических и экспериментальных результатов, полученных в настоящей работе, разработано два технологических процесса, по которым успешно изготовлены установочные партии диафрагм двух типоразмеров.



Рис.4.5. Дефект в виде кольцевого гофра



Рис.4.6. Дефект в виде радиальных гофров



Рис.4.7. Трещины диафрагмы в зоне фланца



Рис.4.8. Диафрагма №2



Рис.4.9. Макроструктура диафрагмы №2

Отработанная технология изготовления разделительных диафрагм топливных баков с применением ротационной вытяжки обеспечила изготовление деталей с допусками по толщине, не превышающими по разным поясам от 0,05 до 0,1 мм, и отклонениями от теоретического контура не более 0,1%.

Трудоёмкость и длительность обработки технологии изготовления диафрагм была сокращена в 2...3 раза по сравнению с технологией, применявшейся ранее.

#### 4.2. Изготовление детали типа фланец

Для отработки технологии изготовления фланцев из алюминиевого сплава 1201 было разработано технологическое указание, по которому проведён комплекс работ. В ходе отработки технологии изготовления фланцев наблюдался ряд дефектов, представленных на фотографиях. На рис.4.10 изображён дефект в виде трещины на краю фланца, а на рис. 4.11 – в виде трещины на радиусной части фланца.



Рис.4.10. Трещина на краю фланца



Рис.4.11. Трещина на радиусной части фланца

На рис.4.12 изображён дефект в виде отслоения металла на обрабатываемой поверхности, связанный с высокой степенью упрочнения и понижением пластичности поверхностных слоев.



Рис.4.12. Отслоение металла на внешней поверхности фланца

На рис.4.13 изображён дефект в виде повышенной шероховатости внутренней поверхности фланца в результате неполного прилегания к оправке.



Рис.4.13. Шероховатость внутренней поверхности фланца

В результате отработки режимов и траектории движения деформирующего ролика был разработан техпроцесс изготовления фланцев из алюминиевого сплава 1201. Готовые детали, соответствующие требованиям конструкторской документации, представлены на рис.4.14.

Отработанная технология изготовления фланцев топливных баков с применением ротационной вытяжки обеспечила изготовление деталей с допусками по толщине, не

превышающими 0,05 мм (не более 1%), и отклонениями от теоретического контура не более 1,2%.



Рис.4.14. Фланцы из сплава 1201Т1

Техпроцесс внедрён в производство. Сравнение технологий изготовления фланца по старой и новой технологии представлено в таблице 4.1. В настоящее время по отработанной технологии серийно изготавливаются детали ответственного назначения. Расчётный экономический эффект от внедрения технологии изготовления фланцев может составить 0,6 млн. рублей. Кроме того, внедрение новой технологии изготовления фланцев позволит снизить трудоёмкость изготовления деталей на 90% и сократить производственный цикл на 95%. Результаты внедрения оформлены техническим решением и отчётом, представленными в приложениях А, Б, В.

Таблица 4.1 - Сравнение технологий изготовления фланца

Параметр	Штамповка	Ротационная вытяжка
Количество формовочных операций	10	1
Количество операций термообработки	4	1
Относительная трудоёмкость, %	100	10
Выход годной продукции, %	27	96
Ожидаемый годовой экономический эффект, млн. руб.	-	0,6

### 4.3. Изготовление крупногабаритной обшивки днища

На рис.4.15 представлена фотография обшивки сферического днища из сплава АМг6 диаметром 3,0м, полученная из заготовки толщиной 6,0 мм после ротационной вытяжки. В настоящее время проводятся дальнейшие работы по отработке технологии изготовления различных по форме крупногабаритных днищ из разных алюминиевых сплавов диаметром до 4,0 м способами ротационной вытяжки.



Рис.4.15. Обшивка днища  $\Phi$  3,0 м

Выполненные расчёты показали, что замена технологии изготовления обшивок днищ методом обтяжки с последующей сваркой 3...5 секторов на ротационную вытяжку из широкой заготовки позволит сократить протяжённость сварных швов каждого днища на 43...61% (на 9,5...19 м). Кроме того, за счёт исключения тепловых компенсаторов продольных стыков масса каждой обшивки снизится на 1,5...3 кг.

В приложении Г представлен выполненный по отраслевой методике расчёт ожидаемого годового экономического эффекта от внедрения разработанного технологического процесса ротационной вытяжки обшивок днищ топливных баков. В качестве базы для сравнения принят используемый в настоящее время технологический процесс, предусматривающий изготовление секторов обшивок на обтяжном прессе с их последующим фрезерованием и аргонодуговой сваркой. Разработанный технологический процесс позволит получить ожидаемый годовой экономический эффект в размере около 3,8 млн. рублей, снизить трудоёмкость изготовления обшивок на 28%, высвободить около 300 м<sup>2</sup> производственных площадей. Кроме того, предварительные расчёты показали, что внедряемая технология, снизит производственный цикл изготовления днищ в 2...3 раза, исключит затраты на капитальный ремонт и эксплуатацию комплекса морально устаревшего и физически изношенного оборудования ориентировочно в объеме свыше 20 млн. рублей, а также сократится потребность в квалифицированных

производственных рабочих дефицитных специальностей – жестянщиков, сварщиков, фрезеровщиков, и повысится надежность и качество днищ ракет-носителей за счёт сокращения длины сварных швов и повышения герметичности конструкции.

В целом, внедрение новой технологии изготовления днищ позволит получить качественные детали с комплексом улучшенных свойств, а также снизить затраты и сроки технологической подготовки производства.

#### 1.4. Технологические рекомендации и выводы

Выполненные исследования позволили сформулировать рекомендации, на основе которых разработаны технологии изготовления и спроектирована технологическая оснастка для изготовления пяти деталей ответственного назначения с требуемыми эксплуатационными свойствами. В ходе экспериментальных работ отработаны технологии изготовления ротационной вытяжкой с отклонением от правила «синуса» трёх деталей: двух типоразмеров диафрагм из алюминиевого сплава А6М и фланцев – из алюминиевого сплава 1201.

Из-за отсутствия сравнительных данных экономический эффект от внедрения технологии изготовления новых диафрагм подсчитать трудно, но время отработки новой технологии по сравнению со временем отработки технологии изготовления диафрагм размерностью в 1,5 раза меньшей удалось сократить в несколько раз. При этом были получены высокие показатели точности: по толщине отклонения не превышали 0,05 мм, а отклонения по форме детали от теоретического контура не превышали - 0,3 мм. Последующие испытания диафрагм подтвердили достижение требуемых параметров.

Ожидаемый годовой экономический эффект от внедрения новой технологии изготовления фланцев из сплава 1201 может составить 0,6 млн. рублей в год. При этом внедрение разработанного технологического процесса изготовления фланца позволило заменить 10-ти переходную штамповку в двух инструментальных штампах с четырьмя промежуточными термообработками на одну операцию много переходной ротационной вытяжки с использованием значительно более простой и менее затратной в проектировании и изготовлении оснастки. Выход годной продукции был увеличен с 27% до 96%. Трудоёмкость операции обработки давлением уменьшена в 12 раз. При этом были улучшены качественные показатели детали: была получена однородная мелкозернистая структура материала при увеличении показателей  $\sigma_v$  и  $\sigma_{0,2}$ .

Проведённые исследования позволили сформулировать технологические рекомендации по ротационной вытяжке деталей с отклонениями от правила «синуса»:

1. При выборе толщины исходной заготовки целесообразно расчётную толщину округлять в большую сторону до сортамента ближайшего типоразмера, так как возможности обработки с переутонением стенки выше возможности обработки с недоутонением.

2. При появлении на поверхности изготовленных деталей дефектов типа плавной «волнистости» рекомендуется уменьшить степень деформации за один проход, а операцию разбить на несколько переходов.

3. Ротационная вытяжка с переутонением связана с увеличением нагрузок на деформирующий ролик по сравнению с ротационной вытяжкой по правилу «синуса», что требует применения более мощных приводов и конструкции станка большой жесткости.

4. Возможна ротационная вытяжка цилиндров незамкнутого профиля, но для исключения краевого волнообразования рекомендуется выполнение технологической прихватки в виде прерывистого сварного шва с зачисткой заподлицо.

5. При проектировании технологической оснастки для ротационной вытяжки рекомендуется:

- смоделировать обработку в соответствии с методикой, изложенной в подразделе 2.1 для того, чтобы исключить аварийные ситуации, связанные с изгибами фланца заготовки,

- при обработке с переутонением стенки задний прижим проектировать максимально возможного диаметра и предусматривать его надёжную фиксацию для исключения обратного течения обрабатываемого металла из-под ролика.

Выполненные исследования и практический опыт, полученный при изготовлении ротационной обработкой давлением ряда деталей, позволяют сформулировать направления дальнейших исследований.

В ряде экспериментов наблюдалось появление волнообразных поверхностных дефектов типа «волнистости» при некоторых режимах обработки материала марки А6М. Аналогичное явление наблюдалось и др. исследователями. Требуется детально описать указанное явление и разработать его модель, позволяющую прогнозировать появление указанного дефекта поверхности.

Большой практический интерес представляет исследование обратного течения металла из-под деформирующего ролика в процессах ротационной обработки давлением с отклонением от правила «синуса» при изготовлении нецилиндрических деталей. Это явление может, во-первых, приводить к геометрическим искажениям обработанных поверхностей тонкостенных деталей, а, во-вторых, определяет требования к силовым параметрам заднего прижима станка. Наблюдавшееся обратное течение металла при изготовлении деталей типа фланец и диафрагма, значительно затрудняло процесс отработки.

Необходимо проведение дальнейших исследований влияния режимов обработки и геометрии деформирующих роликов на процессы образования гофров при ротационной вытяжке.

Целесообразно проведение дальнейших работ по уточнению предельных критериев обрабатываемости при вытяжке в условиях образования гофров для различных материалов.

Усовершенствованная технология ротационной вытяжки с отклонением от правила «синуса» может найти применение при изготовлении облегчённых, высокопрочных, точных и герметичных изделий типа баков, ёмкостей, антенн и т.п. в различных отраслях промышленности.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В современных условиях постоянно повышаются требования к качеству деталей ракетно-космической техники: по массе, по прочностным показателям, по точности геометрических параметров и по герметичности. Анализ существующих способов изготовления деталей топливных баков ракет-носителей показал преимущества процессов ротационной вытяжки по сравнению с традиционными технологиями листовой штамповки. Однако, известная ротационная вытяжка по правилу «синуса» не обеспечивает изготовление деталей с требуемыми параметрами.

Проведённые исследования процессов ротационной вытяжки элементов конструкции топливных баков ракет-носителей позволили установить неизвестные ранее закономерности, связанные с отклонением от правила «синуса». Разработанная на этой основе комплексная методика совершенствования процессов ротационной вытяжки позволяет обеспечить производство элементов конструкций топливных баков с улучшенными свойствами. Таким образом, поставленная в работе цель достигнута.

В диссертационной работе получены следующие результаты:

1. Разработана математическая модель образования гофров, и методика проектирования процессов ротационной вытяжки с использованием критерия, учитывающего потерю устойчивости фланца заготовки, позволяющая расширить возможности управления толщиной стенки изготавливаемых деталей в пределах  $\pm 15\%$ , а также рассчитать необходимое количество переходов при обработке.

2. Теоретически разработана и экспериментально подтверждена уточнённая модель деформирования, в соответствии с которой пластические деформации при ротационной вытяжке являются суперпозицией деформаций изгиба и сдвига. Уточнённая модель деформирования применима как при обработке по правилу «синуса», так и при обработке с отклонением от него. Разработанная на основе уточнённой модели методика расчета позволяет определять распределение механических характеристик по толщине стенки и по образующей элементов конструкций после обработки.

3. Обосновано внедрение запатентованного способа локального деформационного упрочнения. Разработанный метод расчёта подтвердил возможность повышения прочностных характеристик сплава АМгбМ:  $\sigma_b$  на 8,2%, а  $\sigma_{0,2}$  на 34,1 %, и уменьшение массы обшивок днищ до 34%, по сравнению с изготовленными по существующей технологии.

4. Обосновано внедрение запатентованного способа изготовления крупногабаритных деталей, исключающего применение сварных заготовок, позволяющего снизить массу обшивок

днищ на 2...3% и увеличить их герметичность до 60%, что особенно важно для баков с криогенными компонентами.

5. Разработана технология изготовления разделительных диафрагм топливных баков с применением ротационной вытяжки, обеспечившая изготовление деталей с допусками по толщине, не превышающими 0,05...0,1 мм и отклонениями от теоретического контура не более 0,1%.

6. Внедрение технологического процесса ротационной вытяжки обшивок днищ позволит получить на одном предприятии ожидаемый годовой экономический эффект около 3,8 млн. руб., снизить трудоёмкость изготовления на 28%, высвободить около 300 м<sup>2</sup> производственных площадей. Кроме того, сократятся сроки и затраты на экспериментально-доводочные работы и на технологическую подготовку производства.

В целом, внедрение результатов исследований в серийное производство повысит конкурентоспособность отечественной ракетно-космической техники.

Работа выполнена в рамках «Федеральной космической программы РФ 2016-2025 г. г.».

Автор выражает благодарность сотрудникам ГКНПЦ им. М. В. Хруничева и кафедры «Технология производства летательных аппаратов» МАИ за всестороннюю помощь, оказанную при проведении работ.

## СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

### Принятые сокращения

РВ - ротационная вытяжка

ЧПУ - числовое программное управление

### Геометрические величины

$D, R, L, S, H$  - диаметр, радиус, длина, толщина, ширина, м

$F$  – площадь, м<sup>2</sup>

$V$  – объём, м<sup>3</sup>

$\rho$  - радиус кривизны, м

$\alpha, \beta, \gamma$  – углы, рад

$R_p$  - радиус рабочей части деформирующего инструмента, мм

### Напряжения, силы

$\sigma_b$  - предел прочности (временное сопротивление), Н/мм<sup>2</sup>

$\sigma_{0,2}$  - условный предел текучести, Н/мм<sup>2</sup>

$\sigma_s$  - напряжение текучести, Н/мм<sup>2</sup>

$\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{xz}$  - компоненты тензора напряжений, Н/мм<sup>2</sup>

$\sigma_m$  - меридианные напряжения, Н/мм<sup>2</sup>

$\sigma_\theta$  - тангенциальные напряжения, Н/мм<sup>2</sup>

$E$  - модуль упругости 1-го рода (модуль Юнга), Н/мм<sup>2</sup>

$P$  – сила, Н

$P_x, P_y, P_z$  - компоненты силы в прямоугольной системе координат, Н

### Перемещения, деформации, скорости деформации

$\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$ , - главные компоненты логарифмических линейных деформаций,

$\gamma_{xy}, \gamma_{yz}, \gamma_{zx}$  - относительные деформации сдвига

$\delta$  - относительное удлинение образца, %

$\psi$  - относительное сужение образца, %

$\varepsilon$  - относительное утонение образца, %

$\varepsilon_i$  - интенсивность деформаций

## Технологические параметры

$T$  - температура, °C

$\tau$  – время, с

$f$  - подача ролика, мм/об

$\Omega$  - частота вращения заготовки, об/мин

$\Delta z$  - величина зазора между роликом и оправкой, мм

## Прочие величины

$n$  - показатель деформационного упрочнения

$\mu$  - коэффициент трения

$R_a$  - показатель шероховатости поверхности, мкм

$HRC$  - показатель твёрдости по Роквеллу

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аверкиев, Ю.А., Аверкиев А.Ю. Технология холодной штамповки / Ю.А.Аверкиев, А.Ю.Аверкиев. М.: Машиностроение, 1989. – 200 с.
2. Арзамасов, Б.Н. Конструкционные материалы: справочник / Б.Н.Арзамасов, В.А.Брострем. М.: Машиностроение, 1990. – 688 с.
3. Баркая, В.Ф. Формоизменение листового металла / В.Ф.Баркая, С.Е.Рокотан, Ф.И.Рузанов. М.: Металлургия, 1976. – 294 с.
4. Безухов, Н.И. Приложение методов теории пластичности к решению инженерных задач / Н.И.Безухов, О.В.Лужин. М.: Высшая школа, 1974. - 200 с.
5. Вольмир, А.С. Устойчивость деформируемых систем / А.С.Вольмир. М.: Наука, 1967. -984 с.
6. Воронцов, А.Л. Теория и расчёты процессов обработки металлов давлением / А.Л.Воронцов. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014. т.1 – 396 с., т.2 – 441 с.
7. Воронцов, А.Л. Технологические задачи теории пластичности / А.Л.Воронцов. М.: Машиностроение, 2006. т.1 – 474 с.; т.3 – 475 с.
8. Воронцов, А.Л. Теория малоотходной штамповки / А.Л.Воронцов. М.: Машиностроение, 2005. – 859 с.
9. Головлёв, В.Д. Расчёты процессов листовой штамповки. Устойчивость формообразования тонколистового металла / В.Д.Головлёв. М.: Машиностроение, 1974. – 136 с.
10. Гредитор, М.А. Давильные работы и ротационное выдавливание / М.А.Гредитор. М.: Машиностроение, 1971. – 239 с.
11. Дель, Г.Д. Технологическая механика / Г.Д.Дель. М.: Машиностроение, 1978. – 174 с.
12. Джонсон, У. Теория пластичности для инженеров / У.Джонсон, П.Меллор. М.: Машиностроение, 1979. – 567 с.
13. Зубцов, М.Е. Листовая штамповка / М.Е.Зубцов. Л.: Машиностроение, 1980. – 432 с.
14. Избранные главы по авиа- и ракетостроению / А.С.Чумадин, В.И.Ершов, В.А.Барвинок и др. – М.: Наука и технологии, 2005. - 656 с.
15. Ильюшин, А.А. Пластичность. Основы общей математической теории / А.А.Ильюшин. М.: АН СССР, 1963. – 207 с.
16. Ильюшин, А.А. Пластичность / А.А.Ильюшин. М.: Гостехиздат, 1948. - 376 с.
17. Капорович, В.Г. Обкатка металлоизделий в производстве / В.Г.Капорович. М.: Машиностроение, 1973. – 168с.
18. Каргин, В.Р. Экспериментальное исследование процессов деформации при обработке давлением / В.Р.Каргин, Б.В.Каргин. Самара: Самарский государственный аэрокосмический университет, 2010. – 49 с.
19. Качанов, Л.М. Основы механики разрушения / Л.М.Качанов. М.: Наука, 1974. - 312 с.
20. Ключников, В.Д. Устойчивость упругопластических систем / В.Д.Ключников. М.: Наука, 1980.
21. Ковка и штамповка: Справочник: в 4 т. / Под ред. Г.А.Навроцкого. М.: Машиностроение, 1983. – 496 с.
22. Ковка и штамповка: Справочник / Под ред. Е.И.Семёнова. М.: Машиностроение, т.4. 1987. - 544с.
23. Ковка и штамповка: Справочник. Т.4. Листовая штамповка / Под общ. ред. С.С.Яковлева. М.: Машиностроение, 2010. – 732с.
24. Колмогоров, В.Л. Механика обработки металлов давлением / В.Л.Колмогоров. М.: Металлургия, 1986. – 688 с.
25. Корольков, В.И. Технология и оборудование процессов ротационной вытяжки / В.И.Корольков. Воронеж: Изд-во ВГТУ, 1999. 115 с.
26. Кроха, В.А. Упрочнение металлов при холодной пластической деформации: Справочник / В.А.Кроха. М.: Машиностроение, 1980. – 157 с.
27. Кроха, В.А. Кривые упрочнение металлов при холодной деформации / В.А.Кроха. М.: Машиностроение, 1968. – 131 с.

28. Листовая штамповка. Расчет технологических параметров. Справочник / В.И.Ершов, О.В.Попов, А.С.Чумадин и др. – М.: Изд-во МАИ, 1999. - 516 с.
29. Малинин, Н.Н. Прикладная теория пластичности и ползучести / Н.Н.Малинин. М.: Машиностроение, 1975. – 400 с.
30. Мельников, Э.Л. Холодная штамповка днищ / Э.Л.Мельников. М.: Машиностроение, 1976. – 184 с.
31. Методология научных исследований в авиа- и ракетостроении / В.И.Круглов, В.И.Ершов, А.С.Чумадин, В.В.Курицына. – М.: Логос, 2011. – 432 с.
32. Могильный, Н.И. Ротационная вытяжка оболочковых деталей на станках / Н.И.Могильный. М. Машиностроение, 1983. – 192 с.
33. Моисеев, В.А. Технология производства жидкостных ракетных двигателей / В.А.Моисеев, В.А.Тарасов, В.А.Колмыков, А.С.Филимонов. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2008. – 381 с.
34. Надаи, А. Пластичность и разрушение твердых тел (пер с англ.) / А.Надаи. М. ИЛ, 1954, 647 с.
35. Новик, Ф.С. Оптимизация процессов технологии металлов методами планирования экспериментов / Ф.С.Новик, Я.Б.Арсов. М. Машиностроение; София. Техника, 1980. – 304 с.
36. Пановко, Я.Г. Устойчивость и колебания упругих систем / Я.Г.Пановко, И.И.Губанова. М. Наука 1963. - 336 с.
37. Погорелов, А.В. Геометрические методы в нелинейной теории упругих оболочек / А.В.Погорелов. М. Наука 1967. - 280 с.
38. Полухин, П.И. Сопротивление пластической деформации металлов и сплавов / П.И.Полухин., Г.Я.Гун, А.М.Галкин. М.: Металлургия, 1976. – 488 с.
39. Попов, Е.А. Основы теории листовой штамповки / Е.А.Попов. М.: Машиностроение, 1977. – 278 с.
40. Попов, Е.А. Технология и автоматизация листовой штамповки / Е.А.Попов, В.Г.Ковалёв, И.Н.Шубин. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2003. – 480 с.
41. Попов, О.В. Изготовление цельнометаллических тонкостенных деталей переменного сечения / О.В.Попов. М.: Машиностроение, 1974.
42. Работнов, Ю.Н. Механика деформируемого твердого тела / Ю.Н.Работнов. М.: Наука, 1979. - 774 с.
43. Ренне, И.П. Теоретические основы экспериментальных методов исследования деформаций методом сеток в процессах обработки металлов давлением / И.П.Ренне. Тула: Изд-во ТПИ, 1976. – 96 с.
44. Романовский, В.П. Справочник по холодной штамповке. 6-е изд. / В.П.Романовский. Л.: Машиностроение, 1979. – 520 с.
45. Смирнов-Аляев, Г.А. Сопротивление материалов пластическому деформированию / Г.А.Смирнов-Аляев. Л.: Машиностроение, 1978. – 368 с.
46. Смирнов-Аляев, Г.А. Экспериментальные исследования в обработке металлов давлением / Г.А.Смирнов-Аляев, В.П.Чикидовский. Л.: Машиностроение, 1972, 359 с.
47. Степанский, Л.Г. Расчеты процессов обработки металлов давлением / Л.Г.Степанский. М.: Машиностроение, 1979. – 215 с.
48. Сторожев, М.В. Теория обработки металлов давлением / М.В.Сторожев, Е.А.Попов. М.: Машиностроение, 1977. – 423 с.
49. Теория пластических деформаций металлов / Е.П.Унксов, У.Джонсон, В.Л.Колмогоров и др. - М.: Машиностроение, 1983. - 598 с.
50. Теория обработки металлов давлением. Вариационные методы расчета усилий и деформаций / И.Я.Тарновский, А.А.Поздеев, О.А.Гонаго и др. - М.: Metallurgizdat, 1963. – 672 с.
51. Технология обработки давлением цветных металлов и сплавов / А.В.Зиновьев, А.И.Колпашников, П.И.Полухин и др. - М.: Металлургия, 1992. – 512 с.

52. Томленов, А.Д. Теория пластического деформирования металлов / А.Д.Томленов. М.: Металлургия, 1972. - 408 с.
53. Томсен, Э. Механика пластической деформации при обработке металлов / Э.Томсен, Ч.Янг, Ш.Кобояши. М.: Машиностроение, 1969. – 504 с.
54. Уик, Ч. Обработка металлов без снятия стружки. (пер. с англ.) / Ч.Уик. М.: Мир, 1965. - 543 с.
55. Хван, Д.В. Технологические испытания металлов / Д.В.Хван. Воронеж: Изд-во Воронежского университета, 1992. – 152с.
56. Хилл, Р. Математическая теория пластичности / Р.Хилл. М.: Гостехиздат, 1956. - 407с.
57. Холодная объемная штамповка: Справочник / Под ред. Г.А.Навроцкого. М.: Машиностроение, 1973. – 496 с.
58. Чиченёв, Н.А. Методы исследования процессов обработки металлов давлением / Н.А.Чиченёв, А.Б.Кудрин, П.И.Полухин. М.: Металлургия, 1977. – 311 с.
59. Чумадин, А.С., Теория и расчёты процессов листовой штамповки. – М.: «Экспосервис «ВИП», 2014. - 216 с.
60. Чумадин, А.С. Избранные главы по авиа- и ракетостроению / А.С.Чумадин, В.И.Ершов, В.А.Барвинок и др. М.: Наука и технологии, 2005. – 656 с.
61. Юдин, Л.Г. Ротационная вытяжка цилиндрических оболочек / Л.Г.Юдин, С.П.Яковлев. М.: Машиностроение, 1984. – 128 с.
62. Яковлев, С.С. Ротационная вытяжка с утонением стенки осесимметричных деталей из анизотропных трубных заготовок на специализированном оборудовании / С.С.Яковлев, В.И.Трегубов, С.П.Яковлев. М.: Машиностроение, 2009. – 265 с.
63. Драбик, А.Н. Анализ напряженного и деформированного состояний вращающегося диска в упругопластической постановке / А.Н.Драбик, В.И.Трегубов, А.В.Чарин // Известия ТулГУ. Серия. Механика деформируемого твёрдого тела и обработка металлов давлением. - Тула: Изд-во ТулГУ. - 2007. Вып.4. - С. 188-198.
64. Драбик, А.Н. Оценка напряженного состояния заготовки, примыкающей к радиусу закругления ролика, при ротационной вытяжке конических деталей / А.Н.Драбик, В.И.Трегубов // Известия ТулГУ. Серия. Механика деформируемого твёрдого тела и обработка металлов давлением. - Тула: Изд-во ТулГУ. - 2007. - Вып.4. - С. 173-182.
65. Вальтер, А.И. Исследование эффекта проскальзывания при ротационной вытяжке роликовым инструментом / А.И.Вальтер, П.И.Маленко // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. - 2006. №3. - С. 10-11.
66. Грязев, М.В. Технологии изготовления полых осесимметричных сложно профильных деталей / М.В.Грязев, С.С.Яковлев, В.И.Трегубов, К.С.Ремнёв // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. - 2012. - №12. - С. 3-6.
67. Воронцов, А.Л. Общий метод теоретического расчёта изменения макроструктуры металла пластической деформацией / А.Л.Воронцов // Производство проката. - 2005. - №8. - С. 2-9.
68. Дель, Г.Д. Моделирование операций ротационной вытяжки с утонением / Г.Д.Дель, В.И.Корольков // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. - 1996. - №3. - С. 23-26.
69. Дмитриев, А.М. Аппроксимация кривых упрочнения металлов / А.М.Дмитриев, А.Л.Воронцов // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. – 2002. - №6. - С.16-21.
70. Калпакчиоглы, С. Максимальное утонение стенок при раскатке труб / С. Калпакчиоглы // Конструирование и технология машиностроения. Труды американского общества инженеров-механиков. - 1964. - Т.86. сер. В. - №1
71. Косов, Д.С. Ротационная вытяжка крупногабаритных деталей машин / Д.С.Косов, В.П.Свидерский, В.С.Дмитриев // МГОУ-XXI - Новые технологии. - 2002. - С. 29-31.
72. Косов, Д.С. Технология деформирующей обработки с локальным нагревом / Д.С.Косов, В.П.Свидерский // МГОУ-XXI - Новые технологии. Вып.1 М. - 2002. - С. 31-35.

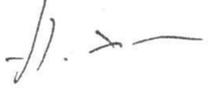
73. Лавров, А.Ф. Применение процессов ротационной вытяжки для изготовления осесимметричных деталей / А.Ф.Лавров, С.С.Яковлев, А.Н.Драбик // Известия ТулГУ. Серия. Технические науки. Тула: Изд-во ТулГУ. - 2009. - Вып. 2. -Часть 1. - С. 139-144.
74. Лисунец, Н.Л. Исследование влияния технологических факторов ротационной вытяжки на качество заготовок сложно профильных деталей из коррозионностойких и жаропрочных сталей / Н.Л.Лисунец, А.П.Коликов, А.А.Качалин // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. 2006. №5. С.24...26.
75. Логунов, Л.П. Ротационная вытяжка полусферических деталей постоянной толщины / Л.П.Логунов //Труды XXXVI Академических чтений по космонавтике. Секция «Наукоёмкие технологии в ракетно-космической технике». - М.: Изд-во ГКНПЦ им. М.В.Хруничева. - 2012. - С. 159-162.
76. Попов, С.М. Устойчивость свободно опертых пластинок за пределами упругости / С.М.Попов // Инженерный сборник. Институт механики АН СССР. - Т. IX. -1951. - С. 65-98.
77. Свицерский, В.П. Особенности оборудования и оснастки для комбинированной деформирующей обработки с локальным нагревом корпусов РКТ / В.П.Свицерский, Д.С.Косов // Наукоёмкие технологии производства РКТ. - Вып.2. - Москва, "Сатурн-С". – 2002. - С. 39-44.
78. Сулиман, М.Г. Влияние технологических и конструкторских факторов на точность размеров тонкостенных оболочек, получаемых ротационным выдавливанием / М.Г.Сулиман, Н.В.Коробова // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. - 2000. - № 12. - С. 6-7.
79. Ткачёв, А.В. Исследование устойчивости оболочек в операциях ротационной вытяжки / А.В.Ткачёв, В.И. Корольков // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. - №1(2). – 2010. - С. 560-563.
80. Трегубов, В.И. Изменение механических свойств при РВ цилиндрических деталей / В.И.Трегубов, А.Е.Белов, В.А.Корольков // Межвузовский сборник научных трудов «Аэродинамика, механика и технология авиастроения». - Воронеж: Воронежский государственный технический университет. - 2001. - С. 56-60.
81. Логунов, Л.П. Исследование ротационной вытяжки конических деталей методом координатных сеток / Л.П.Логунов // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. - 2018. - № 2. - С.11-20.
82. Логунов, Л.П. Исследование ротационной вытяжки методом координатной сетки / Л.П.Логунов // XLII Академические чтения по космонавтике. Сборник тезисов. - М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана. - 2018. - С.364.
83. Логунов, Л.П. Исследование очага пластической деформации при ротационной вытяжке конических деталей методом координатной сетки / Л.П.Логунов // XLI Академические чтения по космонавтике. Сборник тезисов. - М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана. - 2017. - С. 454-455.
84. Логунов, Л.П. Исследование процесса ротационной вытяжки. Перспективные подходы и технологии проектирования и производства деталей и изделий аэрокосмической техники / Л.П.Логунов // Сборник трудов молодёжной научно-технической конференции. Под общ. ред. А.Л. Галиновского. – М.: Диона, 2017. С. 68-70.
85. Чумадин, А.С. Ротационный обжим тонкостенных труб / А.С.Чумадин, Л.П.Логунов // XL Академические чтения по космонавтике. Научное издание. Сборник тезисов. – М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана. - 2015. - С.413
86. Чумадин, А.С. Ротационная вытяжка листовых заготовок с отступлением от закона «синуса» / А.С.Чумадин, Л.П.Логунов // Научные труды. - Вып.18 (90). - М.: МАТИ. - 2011. - С. 95-100.
87. Чумадин, А.С. Исследование ротационной вытяжки конических деталей из листовых сварных заготовок / А.С.Чумадин, А.В.Воронков, Л.П.Логунов // Технология авиаракетостроения. Научные труды. Вестник МАТИ. - 2012. - Вып.19 (91). - С. 192-194.

88. Чумадин, А.С. Возможности изготовления тонкостенных оболочек вытяжкой и ротационной вытяжкой / А.С.Чумадин, Л.П.Логунов, Е.С.Шемонаева, Д.А.Батулин // Научные труды. Вестник МАТИ, 2014. Вып.22 (94). - С. 113-118
89. Чумадин, А.С. Ротационная вытяжка деталей из фольги / А.С.Чумадин, Л.П.Логунов, Н.В.Ульвис // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. - 2011. - №2. - С. 25-28.
90. Чумадин, А.С. Расчёт силовых параметров при раскатке труб / А.С.Чумадин, Л.П.Логунов, Хейн Вин Зо // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. - 2012. - №1. - С. 3-8.
91. Чумадин, А.С. Изготовление тонкостенных деталей из труб ротационным деформированием / А.С.Чумадин, В.Ю.Астапов, Л.П.Логунов // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. - 2011. - №3. - С. 28-31.
92. Чумадин, А.С. Ротационная вытяжка гофрированных заготовок / А.С.Чумадин, В.И.Ершов, С.А.Жарков // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. - 1996. - №11. - С. 21-23.
93. Яковлев, С.С. Ротационное формоизменение конических деталей из анизотропных материалов / С.С.Яковлев, Д.В.Дудка // Известия ТулГУ, Технические науки. - Вып.3. - Тула: Изд-во ТулГУ. - 2010. - С. 3-11.
94. Яковлев, С.С., Механические свойства деталей, изготавливаемых ротационной вытяжкой / С.С.Яковлев, В.И.Трегубов, К.С.Ремнёв // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. - 2012. - №12. - С. 35-39.
95. Яковлев, С.П. Силовые режимы ротационной вытяжки конических деталей из анизотропных материалов / С.П.Яковлев, А.Н.Драбик, С.С.Яковлев // Известия ТулГУ. Технические науки. - Тула: Изд-во ТулГУ. - 2010. - Вып.1. - С. 37-44.
96. Ястребов, В.Ф. Определение силовых параметров процесса ротационного выдавливания / В.Ф.Ястребов, Н.М.Бородин // Обработка металлов давлением в машиностроении. - Харьков: ХГУ. - 1972. - Вып.8. - С. 25-34.
97. Патент 2 490 085 РФ, МПК<sup>7</sup> В 21 D 22/14. Способ ротационной вытяжки / Логунов Л. П., Поздняков А. В., Ромашин М. С. – 2013. Бюл. № 23.
98. Патент 2 494 829 РФ, МПК<sup>7</sup> В 21 С 37/02, В 21 D 35/00. Способ изготовления металлического листа / Воронков А. В., Логунов Л. П., Поздняков А. В., Ромашин М. С., Чумадин А. С. – 2013. Бюл. № 28.
99. ГОСТ 11701-84. Металлы. Методы испытаний на растяжение тонких листов и лент. - М.: Госстандарт СССР, 1986.
- 100.ГОСТ 18970-84. Обработка металлов давлением. Ковка и штамповка. Термины и определения. - М.: Госстандарт СССР, 1986.
- 101.ГОСТ 1497-84. Металлы. Методы испытаний на растяжение. - М.: Госстандарт СССР, 1986.
- 102.Avitzur, B. Handbook of Metal-Forming Processes / B.Avitzur //John Wiley and Sons, Inc., Canada. - 1983.
- 103.Avitzur, B. Analysis of power spinning of cones / B.Avitzur, C.T.Yang // Transactions of the ASME, Journal of Engineering for Industry 82. - 1960. - P. 231-245.
- 104.Chen, M. D., Forecast of shear spinning force and surface roughness of spun cones by employing regression analysis / M.D.Chen // International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2001, №41. - P. 1721-1734.
- 105.Chen, M. D. Effects of over-roll thickness on cone surface roughness in shear spinning / M.D.Chen, R.Q.Hsu, K.H.Fuh // Journal of materials processing technology, 159. - 2005, 1. - P. 1-8.
- 106.Hayama, M., Analysis of Working Force in Shear Spinning of Cones / M.Hayama // Bulletin of the Faculty of Engineering, Yokohama National University, Vol. 26, March, 1977. - P. 99-116.
- 107.Hayama, M., Study on the Spinnability of Aluminum and it's Alloys / M.Hayama // Proceeding of the 1st International Conference on Rotary Metal-Working Processes, London, UK, November 20-22, 1979. – P. 207 – 216.

108. Hayama, M. Experimental Study of Shear Spinning / M.Hayama, T.Murota, H.Kudo // Bulletin of JSME 8/31. - 1965. – P. 453 – 460.
109. Kalpakcioglu, S. On the mechanics of sheer spinning / S.Kalpakcioglu // Transaction of the ASME. Journal of Engineering for industry Ser. B. 83, May, 1961. - P. 125-130.
110. Kalpachio gly, S. An application of theory to an engineering problem power spinning / S.Kalpakcioglu // Fundamental deformation process. Sracuse. №1, Univ. Press. - 1964.
111. Kegg, R. L. A new test method for determination of spinnability of metals / R.L.Kegg // Trans. ASME. Journal of engineering for industry. Ser. B. May. - 1961. - P. 119-124.
112. Kim, C. A lower upper-bound solution for shear spinning of cones / C.Kim, S.Y.Jung, J.C.Choi // International Journal of Mechanical Sciences. - №45. – 2003. - 11. – P. 1893-1911.
113. Kobayashi, S., A theory of shear spinning of cones/ S.Kobayashi, I.K.Hall, E.G.Thomsen // Transactions of the ASME. Journal of engineering for Industry. - №81. - 1961. – P. 485-495.
114. Kobayashi, S. Instability in the conventional spinning of cones / S.Kobayashi // Transactions of the ASME. Journal of Engineering for Industry 85. - 1963. – P. 44-48.
115. Murata, M. Truncated Cone Spinning of Sheet Metal / M.Murata, N.O'Hara // Proceedings of the 9th International Conference on Sheet Metal. – 2001. - Leuven, Belgium. – P. 199-204.
116. Lu, X. Three dimensional FE analysis on flange bending for TC4 alloy during Shear Spinning / X.Lu, S.Zhang, H.Hou, J.Li, L.Zhou // J. Mater. Sci. Technol., 2006, №6, Vol. 22. - P. 855-859.
117. Furrer, D. Aluminum-lithium Cylinders / D.Furrer, R.Noel // Advanced Materials and Processes, vol. 151, no. 5. - 1997. - P. 59-60.
118. Jurkovic, M. Analysis and modeling of spinning process without wall-thickness reduction / M.Jurkovic, Z.Jurkovic, M. Mahmic // METABK 2006, №45 (4). - P. 307-312.
119. Schroder, P. Fertigung von Behälterboden durch Drucken / P.Schroder // Industric-Anzeiger, 1982, 84, N.79. – P. 178-184.
120. Wong, C. C., A review of spinning, shear forming and flow forming processes / C.C.Wong, T.A.Dean, J.Lin // International Journal of Machine Tools and Manufacture. - №43. - 2003. – P. 1419-1435.

## Приложение А

1309 *Направлен: дир. ЗГНПЦ, 515, 144, 158, 22, 18, 23, 43, 167, 140, 29, 141, 145, 13923, 140 21*  
 УТВЕРЖДАЮ КБ «Салют» *отр. К 24, К 212, К 223* УТВЕРЖДАЮ  
 08437 Зам. генерального директора ГКНПЦ – 148 Зам. генерального директора ГКНПЦ –  
 генеральный конструктор КБ «Салют» 27.02.14 директор РКЗ  
 к/с. *Гребенкина*

 Ю.О. Бахвалов 2014 г. «14» 02 2014 г.  
 СОГЛАСОВАНО Начальник 1653 ВП МО РФ  
 Первый зам. генерального директора ОАО «Композит» *Соболев* М.Ш. Насибулин 2014 г.  
*Иск. Протокол-17* *Без сепарат* *в ОТД 148, К/5-10* *с 25.02.14* А.Н. Тимофеев 2014 г. «25» 02 2014 г.  
 СОГЛАСОВАНО Зам. генерального директора ГКНПЦ  
 по науке НПО «Техномаш» по качеству  
 А.В. Бараев 2014 г. « » *Шуриков* Ю.Л. Крупин 2014 г.

Техническое решение № 140 - ДКМ - 1 - 14  
 Об изготовлении ротационной вытяжкой фланцев 8С812КМ-0217-31

В настоящее время фланцы 8С812КМ-0217-31 изготавливаются штамповкой в инструментальных штампах за 10 переходов.

С целью повышения качества и надёжности указанных фланцев, а также снижения трудоёмкости и сокращения цикла изготовления принимается

## РЕШЕНИЕ

- 140/18 1. РКЗ разработать технологическую документацию и изготовить партию деталей 8С812КМ-0217-31 методом ротационной вытяжки.

Выполнено.

- 140 2. РКЗ совместно с КБ «Салют» провести исследования материала детали 8С812КМ-0217-31 после ротационной вытяжки на трёх образцах на определение механических свойств: предела прочности, предела текучести и относительного удлинения, а также металлографические исследования макро- и микроструктуры. РКЗ представить результаты радиографического контроля сварных швов фланцев 8С812КМ-0217-31 на двух днищах 8С812КМ-0217-0 и баках 8С812КМ-0210-0 и результаты испытаний баков 8С812КМ-0210-0 на прочность и герметичность. Результаты исследований согласовать с ОАО «Композит» и НПО «Техномаш».

Срок: январь 2014 г.

## Приложение А продолжение

ТР № 140-ДКМ-Р-14

-2-

136

3. КБ «Салют» по положительным результатам исследований ввести в КД разрешение на изготовление деталей 8С812КМ-0217-31 методом ротационной вытяжки по ОСТ 92-1634-76 без дополнительной стеновой отработки.

Срок: февраль 2014 г.

От КБ «Салют»

Зам. генерального конструктора

В.П. Молочев

30.01.14

Начальник отделения К24

Н.Г. Александров

28.01.14

Начальник отделения К21

А.В. Минаков

28.1.14

Начальник отдела К212

С.М. Кириллов

28.01.14

Начальник отдела К223

А.Е. Шумов

28.01.14

Начальник отдела К114

Е.И. Самашов

28.1.14

От РКЗ

Главный инженер

А.В. Воронков

27.01.14

Зам. директора по качеству

А.Ф. Рубан

27.01.14

Зам. директора по производству

А.Н. Цацурин

Начальник производства

В.Ю. Монахов

27.1.14

Главный конструктор

А.Н. Щербаков

28.01.14

Главный технолог

М.С. Ромашин

Главный металлург

А.Ю. Журавлёв

Главный сварщик

В.А. Капралов

Начальник отдела №170

Л.П. Логунов

От 1653 ВП МО РФ

Печенин Е.С.

18.02.14

От НПО «Техномаш»

Начальник отделения 220

Г.Г. Кривенко

12.02.2014.

И.о. начальника отдела

В.В. Миронов

12.02.2014.

От ОАО «Композит»

Начальник отделения

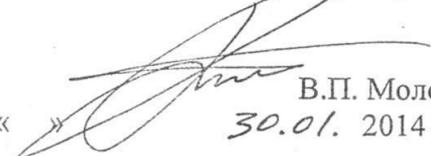
П.Г. Лапин

Ведущий научный сотрудник

Р.И. Доброжинская

## Приложение Б

УТВЕРЖДАЮ  
Зам. генерального конструктора ГКНПЦ

  
В.П. Молочев  
« » 30.01. 2014 г.

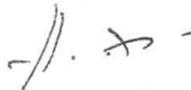
УТВЕРЖДАЮ  
Первый зам. директора РКЗ –  
главный инженер РКЗ

  
А.В. Боронков  
« » 2014 г.

СОГЛАСОВАНО  
Первый зам генерального  
директора ОАО «Композит»  
исх. №9103-150 от 25.02.2014

« » А.Н. Тимофеев  
2014 г.

СОГЛАСОВАНО  
Зам. генерального директора  
по науке НПО «Техномаш»

  
« » А.В. Бараев  
2014 г.

Отчёт  
по результатам исследования фланцев 8С812КМ-0217-31,  
изготовленных методом ротационной вытяжки.

Объект исследований.

Образцы 2Э8С812КМ-0217-31-01; -02; -03 партия №1 и фланцы 8С812КМ-0217-31, партия №2А, №2/2, № 2/3, изготовленные в соответствии с требованиями чертежа 8С812КМ-0217-31 и инструкции 15Е6-И191 «Технические требования к изготовлению деталей и сборок из сплава 1201». Указанные детали изготовлены из листа 1201АМ 6,5 ОСТ 1 90271-78, плавка 13046-15 и плавка 13046-25 соответственно, ротационной вытяжкой по ТУК №170.005-2013 в цехе №18 РКЗ, подвергнуты закалке и искусственному старению в соответствии с п.1 технических требований чертежа 8С812КМ-0217-31 в цехе №29 РКЗ.

Объём исследований.

1. Определение механических свойств материала фланцев 8С812КМ-0217-31, изготовленных ротационной вытяжкой, на образцах на соответствие гр.2 ОСТ 92-1019-81 (п.1 технических требований чертежа 8С812КМ-0217-31).

## Приложение Б продолжение

2. Дополнительные исследования макро- и микроструктуры материала образцов, изготовленных ротационной вытяжкой.
3. Определение толщины заготовок в состоянии поставки и минимальной толщины фланцев 8С812КМ-0217-31 после ротационной вытяжки.
4. Радиографический контроль сварных швов в днище 8С812КМ-0217-0 и в баке 8С812КМ-0210-0 изд.93548 и 93549 с приваренными, изготовленными ротационной вытяжкой фланцами 8С812КМ-0217-31 на соответствие требованиям 15Е6-ТУ12.
5. Испытания бака 8С812КМ-0210-0 изд.93548 и 93549 на прочность и герметичность в соответствии с требованиями 8С812КМ-0210-0ТУ.

## Результаты исследований.

1. Механические свойства материала: предел прочности (временное сопротивление)  $\sigma_b$ , условный предел текучести  $\sigma_{0,2}$  и относительное удлинение  $\delta$ , полученные на девяти образцах соответствуют требованиям ОСТ 1-90271-78 и гр.2 ОСТ 92-1019-81 (см. приложение 1).
2. При исследовании макроструктуры на трёх макротемплетах и микроструктуры материала на четырёх шлифах, вырезанных из макротемплета, дефектов не обнаружено (см. приложение 1).
3. Толщина листов в состоянии поставки по ОСТ 1 90271-78 и ГОСТ 21631-76 составляет 6,5<sub>0,41</sub> мм. Фактическая толщина листов в состоянии поставки составляла 6,5<sub>0,1</sub> мм. В соответствии с п.2 ТТ чертежа 8С812КМ-0217-31 в зоне R80 допускается утонение до 4,5 мм. Минимальная толщина в партии деталей 8С812КМ-0217-31 после ротационной вытяжки в зоне R80 составляла 4,72 мм (см. приложение 6).
4. Сварные швы фланцев 8С812КМ-0217-31 с обшивками в днище 8С812КМ-0217-0 и в баках 8С812КМ-0210-0 на изд. 93548 и 93549 соответствуют требованиям 15Е6-ТУ12 (см. приложение 2).
5. Прочность и герметичность баков 8С812КМ-0210-0 изд. 93548 и 93549 соответствуют требованиям 8С812КМ-0210-0ТУ (см. приложение 3).

## Вывод.

Метод ротационной вытяжки позволяет осуществлять формообразование фланцев 8С812КМ-0217-31 из материала 1201 АМ. Исследованные образцы и детали 8С812КМ-0217-31 соответствуют всем требованиям, предъявляемым конструкторской и нормативно-технической документацией.

## Мероприятия.

1. Учитывая положительные результаты проведённых исследований, КБ «Салют» ввести в 15Е6-И191 разрешение на изготовление деталей из материала 1201АМ методом ротационной вытяжки по ОСТ 92-1634-76, а в ТТ чертежа 8С812КМ-0217-31 ввести ссылку на изготовление по 15Е6-И191.
2. Учитывая возможность поставки листов на нижнем пределе по толщине (6,09мм), а также расчёты на прочность (см. приложение 4), КБ «Салют» уточнить в

## Приложение Б окончание

п.2 ТГ чертежа 8С812КМ-0217-31 величину допускаемого утонения в зоне R80 до 4,0 мм.

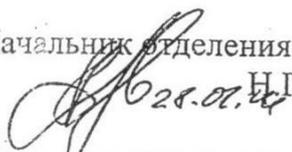
Приложения.

1. Протокол №143 от 06.12.2013 отдела К223 КБ «Салют», на 5 л.
2. Протоколы № 3408, №3764, №2504, №3203 рентгеновской лаборатории РКЗ, на 2 л.
3. Протоколы №59 и №79 предъявительских испытаний цеха №73 РКЗ, на 2 л.
4. Расчёт на прочность фланца 8С812КМ-0217-31, на 1 л.
5. ТУК №170.005-2013, на 2 л.
6. Протоколы измерений толщин фланца 8С812КМ-0217-31, на 3 л.

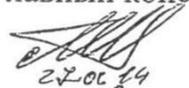
От КБ «Салют»

От РКЗ

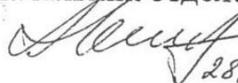
Начальник отделения К24

  
Н.Г. Александров

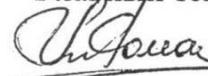
Главный конструктор

  
А.Н. Щербаков

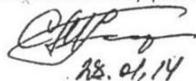
Начальник отделения К21

  
А.В. Минаев

Главный технолог

  
М.С. Ромашин

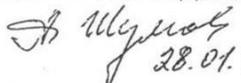
Начальник отдела К212

  
С.М. Кириллов

Главный металлург

  
А.Ю. Журавлёв

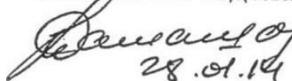
Начальник отдела К223

  
А.Е. Шумов

Главный сварщик

  
В.А. Капралов

Начальник отдела К114

  
Е.И. Самашов

Начальник отдела №170

  
Л.П. Логунов

## Приложение В

ТЕЛ:

25 ФЕВ 2014 11:21 СТР1

ТР № 170-ДКМ-1-14



Открытое акционерное общество  
«КОМПОЗИТ»

Пионерская ул., д. 4, г. Королёв, Московская область,  
Россия, 141070 Телеграф БЕРЕЗА

тел. (495) 513-2222, 513-2223  
конт. 513-2256, факс (495) 516-0617  
E-mail: info@kompozit-mv.ru

ОКПО 56897835, ОГРН 1025002043813, ИНН / КПП 5018078448 / 501801001

25.02.14. исх. № 9103-150

на № 170/35 от 19.02.14

Заместителю генерального директора  
ФГУП ГКНПЦ им. М. В. Хруничева –  
директору РКЗ В. А. Петрику  
Новозаводская ул., д.18, г. Москва,  
121809

Уважаемый Владимир Андреевич!

Сообщаем, что настоящим письмом согласованы без замечаний решения № 170-ДКМ-1-14 об изготовлении ротационной вытяжкой фланцев 8С812КМ-0217-31 и отчет по результатам исследования фланцев 8С812КМ-0217-31, изготовленных методом ротационной вытяжки.

Первый заместитель  
генерального директора

А.Н. Тимофеев

Исп. Р.И. Доброжинская  
т/ф: 8(495) 513-22-17

## Приложение Г

Расчёт ожидаемого экономического эффекта  
от внедрения технологии ротационной вытяжки обшивок днищ  
топливных баков

Для изготовления обшивок днищ разработан техпроцесс ротационной вытяжки обшивок, что обеспечит по сравнению с заменяемым техпроцессом (изготовление секторов обшивок на обтяжном прессе с их последующим фрезерованием и сваркой) снижение трудоёмкости, экономию материалов и высвобождение производственных площадей.

## Исходные данные

№	Показатели			До внедрения	После внедрения
	Наименование	Обозначение	Единица измерения		
1	Годовой объём выпуска	$A$	шт.	460	460
2	Себестоимость изготовления одной обшивки, включая стоимость материалов и заработной платы	$C$	млн. руб.	0,0315	0,0217
3	Трудоёмкость изготовления одной обшивки	$\tau$	нормо-час	21,5	15,4
4	Балансовая стоимость оборудования	$K_{OB}$	млн. руб.	80	200
5	Пред производственные затраты	$K_{ПЗ}$	млн. руб.	-	12
6	Стоимость производственных площадей	$K_{пп}$	млн. руб.	201,6	64,8
7	Капитальные вложения	$K$	млн. руб.	281,6	276,8
8	Снижение трудоёмкости	$\Delta\tau$	нормо-час/ год	-	2806

Ожидаемый годовой экономический эффект от внедрения новой технологии изготовления обшивок составит:

$$\mathcal{E} = \left[ \left( C_1 + E_H \frac{K_1}{A} \right) - \left( C_2 + E_H \frac{K_2}{A} \right) \right] A;$$

где  $C$  – себестоимость изготовления одной детали до и после внедрения,  
 $E_H = 0,15$  – нормативный коэффициент эффективности капитальных вложений,  
 $K$  – капитальные вложения до и после внедрения:

$$K = K_{OB} + K_{ПЗ} + K_{ПП}$$

Ожидаемый годовой экономический эффект:

$$\mathcal{E} = \left[ \left( 0,0315 + 0,15 \frac{281,6}{460} \right) - \left( 0,0217 + 0,15 \frac{276,8}{460} \right) \right] 460 = 3,8; \text{ млн. руб.}$$