

На правах рукописи



**Логунов Леонид Петрович**

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

Специальность: 05.07.02 - Проектирование, конструкция и производство  
летательных аппаратов

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание учёной степени  
кандидата технических наук

**Москва - 2018**

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)».

**Научный руководитель:** **Чумадин Анатолий Семёнович** - доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Технология производства летательных аппаратов» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)».

**Официальные оппоненты:** **Баскаков Владимир Дмитриевич** - доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Технологии ракетно-космического машиностроения» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)».

**Марьин Сергей Борисович** - доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Технология самолётостроения» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет».

**Ведущая организация:** Федеральное государственное унитарное предприятие «Научно-производственное объединение «Техномаш».

Защита состоится «26» июня 2018 г. в 10:00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.125.10 в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» по адресу: г. Москва, А-80, ГСП-3, Волоколамское шоссе, д. 4.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» [https://mai.ru/events/defence/index.php?ELEMENT\\_ID=90954](https://mai.ru/events/defence/index.php?ELEMENT_ID=90954).

Автореферат разослан «  » \_\_\_\_\_ 2018 г.

Учёный секретарь

диссертационного совета Д 212.125.10

кандидат технических наук, доцент

Денискина Антонина Робертовна

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования.** В изделиях ракетно-космической техники широко применяются осесимметричные детали, изготавливаемые из листовых заготовок. К ним относятся: обшивки днищ топливных баков и герметичных отсеков, днища лейнеров и баков высокого давления, различные детали ёмкостей пневмогидравлических систем, в том числе фланцы, патрубки, разделительные диафрагмы и др. К деталям ракетно-космической техники предъявляются высокие требования по массе, прочности, точности и герметичности.

В производстве указанных деталей широко используются традиционные методы листовой штамповки, такие как вытяжка, формовка, обтяжка, гибка. Однако постоянное совершенствование конструкций деталей и повышение эксплуатационных требований вызывают необходимость совершенствования технологий их изготовления.

Традиционные технологии обладают рядом существенных недостатков. 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 в условиях мелкосерийного производства, характерного для изделий ракетно-космической техники.

В последние годы все большее распространение для изготовления подобных деталей получают технологии локального деформирования, в том числе технология ротационной вытяжки. Наиболее полно исследована проекционная ротационная вытяжка по правилу «синуса», которая, в силу особенностей процесса, не обеспечивает достижение заданных характеристик деталей, в том числе необходимого распределения толщины и механических свойств. Возможности ротационной вытяжки с отклонением от правила «синуса» изучены недостаточно, чтобы использовать её на практике.

Другой задачей, связанной с изготовлением крупногабаритных деталей, является изготовление листовых заготовок требуемых размеров. Отечественная металлургическая промышленность производит листы из алюминиевых сплавов шириной не более 2,0...3,0 м, а 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 используемая технология изготовления отрицательно влияет на эксплуатационные свойства деталей: прочность и герметичность снижаются, а масса увеличивается.

Таким образом, работа на тему «Комплексная методика совершенствования технологии ротационной вытяжки элементов конструкций топливных баков ракетно-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 цилиндрических деталей и нецилиндрических деталей проецированием по правилу «синуса».

Практически отсутствуют работы, связанные с ротационной вытяжкой нецилиндрических деталей с отклонением от правила «синуса» и, как следствие, отсутствуют методики и методы расчёта основных технологических параметров указанной обработки. Это ограничивает возможности проектирования новых технологий ротационной обработки, в том числе в области ракетно-космического производства.

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

Предмет исследования - процессы ротационной вытяжки элементов конструкции топливных баков.

**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.

**Задачи исследования:**

1. Анализ известных технологий; методик проектирования технологических процессов и методов расчета технологических параметров при ротационной вытяжке. Выявление недостатков традиционных методов изготовления.

2. Теоретические исследования процессов ротационной вытяжки, в том числе:

- определение предельных возможностей обработки с отклонением от правила «синуса»;

- уточнение напряжённо-деформированного состояния в очаге пластической деформации при изготовлении конусообразных деталей;

- моделирование деформационного упрочнения материала деталей после комбинированной ротационной обработки.

3. Экспериментальные исследования ротационной вытяжки:

- подтверждение пределов возможной обработки конических деталей с отклонением от правила «синуса»;

- подтверждение соответствия напряжённо-деформированного состояния в очаге пластической деформации разработанной теоретической модели;

- экспериментальное определение изменений механических характеристик ( $\sigma_v$ ,  $\sigma_{0,2}$ ) и микроструктуры материалов деталей после ротационной вытяжки.

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

5. Разработка методик проектирования и расчёта технологических параметров новых разновидностей ротационной вытяжки.

6. Технологическая отработка, включающая разработку технологических процессов изготовления деталей топливных баков, проектирование и изготовление технологической оснастки.

**Научная новизна** диссертации.

Разработана комплексная методика совершенствования процессов ротационной вытяжки элементов конструкций топливных баков с улучшенными свойствами, включающая:

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

- новую методику расчёта напряжённо-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.

**Теоретическая значимость** 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.

**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 элементов конструкций использовалась компьютерная 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 признана победителем и награждена дипломом второй 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 четырёх приложений. Общий объём работы составляет 155 страниц, включая 110 рисунков и 19 таблиц. Список литературы содержит 120 наименований.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертации и изложена степень её разработанности, сформулированы цель и задачи исследования, научная новизна и практическая значимость. Дано описание применявшихся методов исследования. Сформулированы положения, выносимые на защиту. Обоснована степень достоверности полученных результатов исследования и представлена апробация результатов работы.

**В первой главе** проведён конструктивно-технологический анализ осесимметричных деталей, используемых в ракетно-космической технике, изготовление которых возможно методами ротационной вытяжки. Сформулированы целевые функции и основные требования к показателям качества деталей ракетно-космической техники.

Проанализированы существующие технологии изготовления деталей днищ. Сделан вывод, что 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 слесарных доводочных и подгоночных, а также фрезерных и сварочных работ;
- используемый комплекс технологического оборудования занимает большие производственные площади и требует значительных затрат энергии.

Технология ротационной вытяжки применяется аэрокосмическими предприятиями ведущих стран мира, в частности, при изготовлении днищ ракеты-носителя «Ариан 5» в Германии, «Boeing» в США, «Mitsubishi Heavy Industries» в Японии, Корейским космическим агентством и другими. Процесс ротационной вытяжки с соблюдением правила «синуса»:  $S = S_0 \sin \alpha$ , где  $S$  – толщина детали,  $S_0$  – толщина заготовки,  $\alpha$  – половина величины угла конусности оправки; разработан достаточно подробно. Имеются разнообразные теоретические и экспериментальные данные по определению основных технологических параметров. Но, анализ показал, что практически отсутствуют работы, в которых рассматривается обработка с отклонением от правила «синуса». Не исследованы вопросы потери устойчивости фланца заготовки, что ограничивает возможности управления толщиной стенки получаемой детали. Не выяснено влияние отклонений обработки от правила «синуса» на эксплуатационные свойства готовых

деталей, а именно на микроструктуру и механические характеристики, в частности сплавов 1201 и АМгб, что не позволяет количественно оценить степень деформационного упрочнения материала после ротационной вытяжки.

**Во второй главе** выполнены теоретические исследования технологий ротационной вытяжки.

**В первой части** исследована потеря устойчивости фланца заготовки при ротационной вытяжке с отклонением от правила «синуса». Под потерей устойчивости понимается такое неблагоприятное и неконтролируемое изменение формы деформируемой заготовки, которое приводит к появлению дефектов в виде волнистости, складок, гофров и (или) ограничивает возможности дальнейшего формообразования. Сформулирована гипотеза о возможности ротационной вытяжки с отклонением от правила синуса, согласно которой 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 параметры гофра, не превышает определённого значения.

На рис.1 изображена схема, иллюстрирующая возникновение сжимающих меридианных напряжений во фланце заготовки, при ротационной вытяжке с переутонением стенки детали. Перемещение элементарного объёма металла с конического участка заготовки во фланец вызовет перемещение его нижней границы на величину  $x$ , которую можно определить из выражения:

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

где  $x$  – перемещение нижней границы фланца;  $S_0$  и  $S_1$  – соответственно исходная толщина и толщина заготовки в процессе обработки,  $\alpha$  – угол, касательный к оправке;  $R$  и  $R_1$  – радиус нижней границы фланца и радиус начала обработки с отклонением от правила «синуса».

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.

Напряжённое состояние фланца определялось путём совместного решения системы, состоящей из уравнения равновесия и приближённого условия пластичности:

$$\begin{cases} \rho \frac{d\sigma_m}{d\rho} + \sigma_m - \sigma_\theta = 0 \\ \sigma_s = \sigma_m - \sigma_\theta \end{cases} \quad (2)$$

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



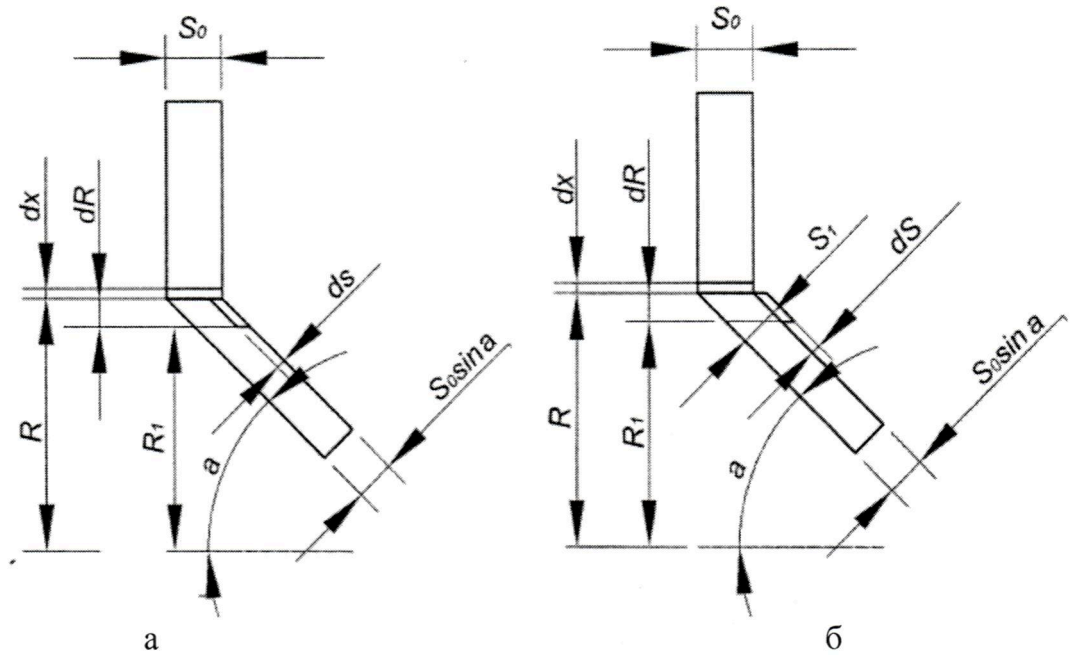


Рисунок 1 - Схемы смещённых объёмов:  
а - при переутонении стенки; б - при недоутонении стенки

Из совместного решения системы уравнений (2) после интегрирования:

$$\sigma_m = \pm \sigma_s \ln\left(\frac{R_0}{R}\right), \quad (3)$$

(4)

где  $R_0$  – внешний радиус фланца.

Работу внешней силы, необходимую для перемещения нижней границы фланца на величину  $x$ , можно определить из выражения:

$$A_{вне} = 2\pi R S_0 \sigma_s \ln\left(\frac{R_0}{R}\right) x \quad (5)$$

На рис.2а изображена модель фланца в начальный момент потери устойчивости с образованием радиальных гофров.

Предположим, что на нижней границе фланца радиусом  $R$  гофры отсутствуют, а их высота линейно возрастает с увеличением радиуса. Тогда изгибающий момент в гофре можно оценить выражением:

$$M_{изг} = \sigma_s S_0^2 \frac{R_0 - R}{4} \quad (6)$$

Предположим, что предельная величина, при которой деформирование фланца невозможно из-за появления гофров, определяется суммарным углом изгиба -  $\Phi_1 = \sum \varphi_i$ , величину которого примем в качестве критерия возможности дальнейшей обработки. Тогда работу внутренних сил можно определить из формулы:

$$A_{вну} = \sigma_s S_0^2 \frac{(R_0 - R)\Phi_1}{4} \quad (7)$$

где  $\Phi_1$  – суммарный угол изгиба гофров,  $\varphi_i$  – угол изгиба гофра.

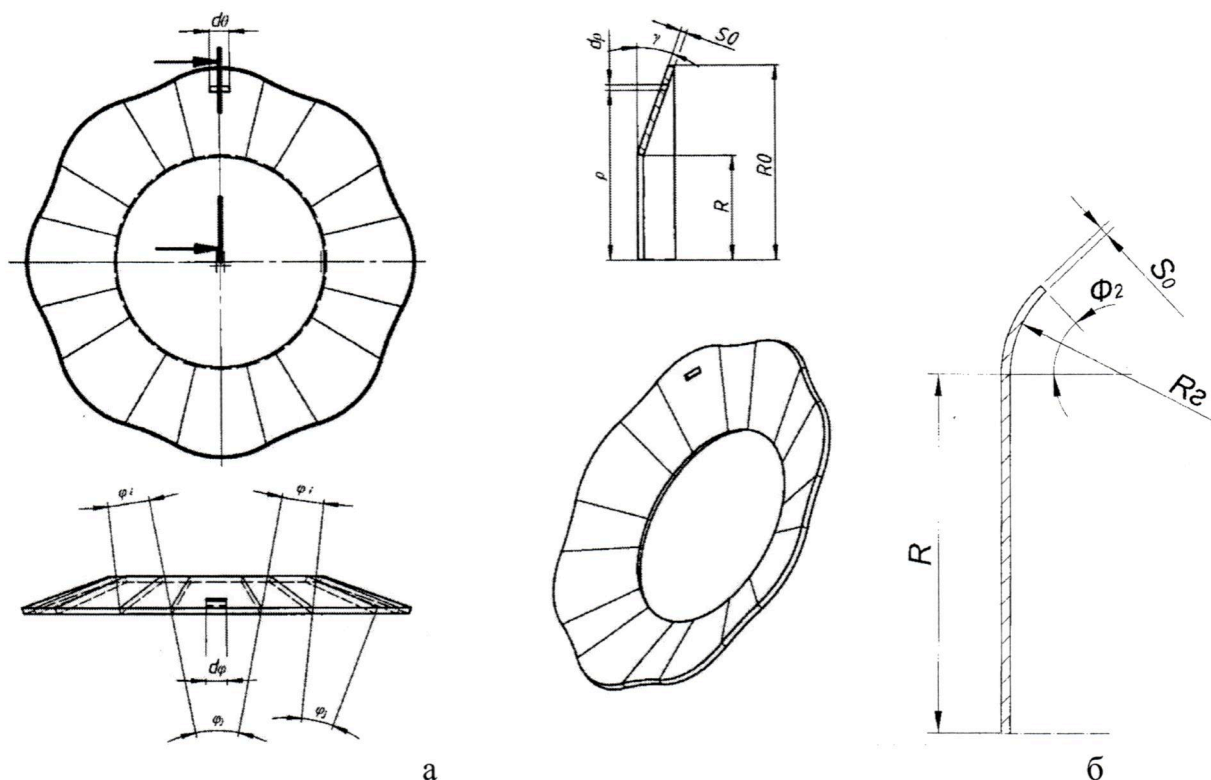


Рисунок 2 - Схемы потери устойчивости фланца с образованием:  
 а - радиальных гофров; б – кольцевого гофра

Приравнявая в соответствии с методом баланса работ, работы внешних и внутренних сил, можно оценить 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:

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

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

Во втором случае потери устойчивости фланца образуется кольцевой гофр. В этом случае изгибающий момент можно оценить выражением:

$$M_{изг} = \sigma_s S_0^2 \frac{\pi(R_0 + R)}{4} \quad (9)$$

В качестве критерия возможности дальнейшей обработки в этом случае примем величину предельного угла изгиба  $\Phi_2$ . Тогда работа внутренних сил при изгибе будет равна:

$$A_{вну} = \sigma_s S_0^2 \frac{\pi\Phi_2(R_0 + R)}{4} \quad (10)$$

Приравнявая работы внешних и внутренних сил, получим:

$$x_2 = S_0 \Phi_2 \frac{(R^* + 1)}{8 \ln R^*} \quad (11)$$

Сравнивая величины  $x_1$  и  $x_2$  можно смоделировать потерю устойчивости фланца с образованием гофров различного вида и возможность дальнейшей обработки.

На рис.3 и 4 представлены графики зависимостей допустимых относительных степеней отклонения толщины от принятых критериев  $\Phi_1$  и  $\Phi_2$  и относительной ширины фланца обрабатываемой заготовки -  $R^*$ .

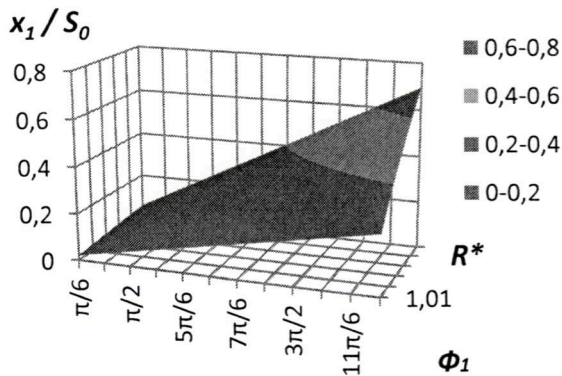


Рисунок 3 – Зависимость  $x_1/S_0$  от  $\Phi_1$  и  $R^*$

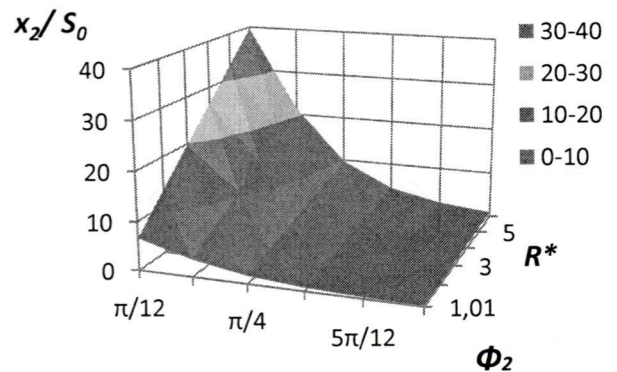


Рисунок 4 – Зависимость  $x_2/S_0$  от  $\Phi_2$  и  $R^*$

Разработана методика проектирования технологических процессов, которая позволяет изготавливать детали типа конусообразных обшивок с утолщениями новым способом ротационной вытяжки с отклонением от правила «синуса». Методика основана на графоаналитическом методе и проводится в последовательности от детали к заготовке. Расчёт связан с разбиением заготовки на отдельные участки и выполнением поверочного расчёта возможности обработки с использованием формул (8) и (11). Приведён пример расчёта основных технологических параметров для конкретной детали. Выведена формула, позволяющая определить предельную величину радиуса  $R_n$ , при которой в соответствии с принятым критерием возможно появление радиальных гофров:

$$R_n = \frac{S_0^2 \Phi_1 (R^* - 1) \sin \alpha}{8\pi (S_0 \sin \alpha - S_1) \ln R^*}; \quad (12)$$

где  $R_n$  – радиальное перемещение ролика при обработке с отклонением от правила «синуса».

**Во второй части** проведён анализ напряжённо-деформированного состояния в очаге пластической деформации конических заготовок методом координатных сеток. Схемы для определения параметров напряжённо-деформированного состояния представлены на рис.5.

Главные компоненты тензора деформаций определялись по формулам:

$$\varepsilon_1 = \ln \left\{ \frac{1}{2} \left[ \sqrt{\left(\frac{l_z}{2\delta}\right)^2 + \left(\frac{l_r}{2\delta}\right)^2} + 2\frac{R_j}{r_{i,j}} + \sqrt{\left(\frac{l_z}{2\delta}\right)^2 + \left(\frac{l_r}{2\delta}\right)^2} - 2\frac{R_j}{r_{i,j}} \right] \right\} \quad (13)$$

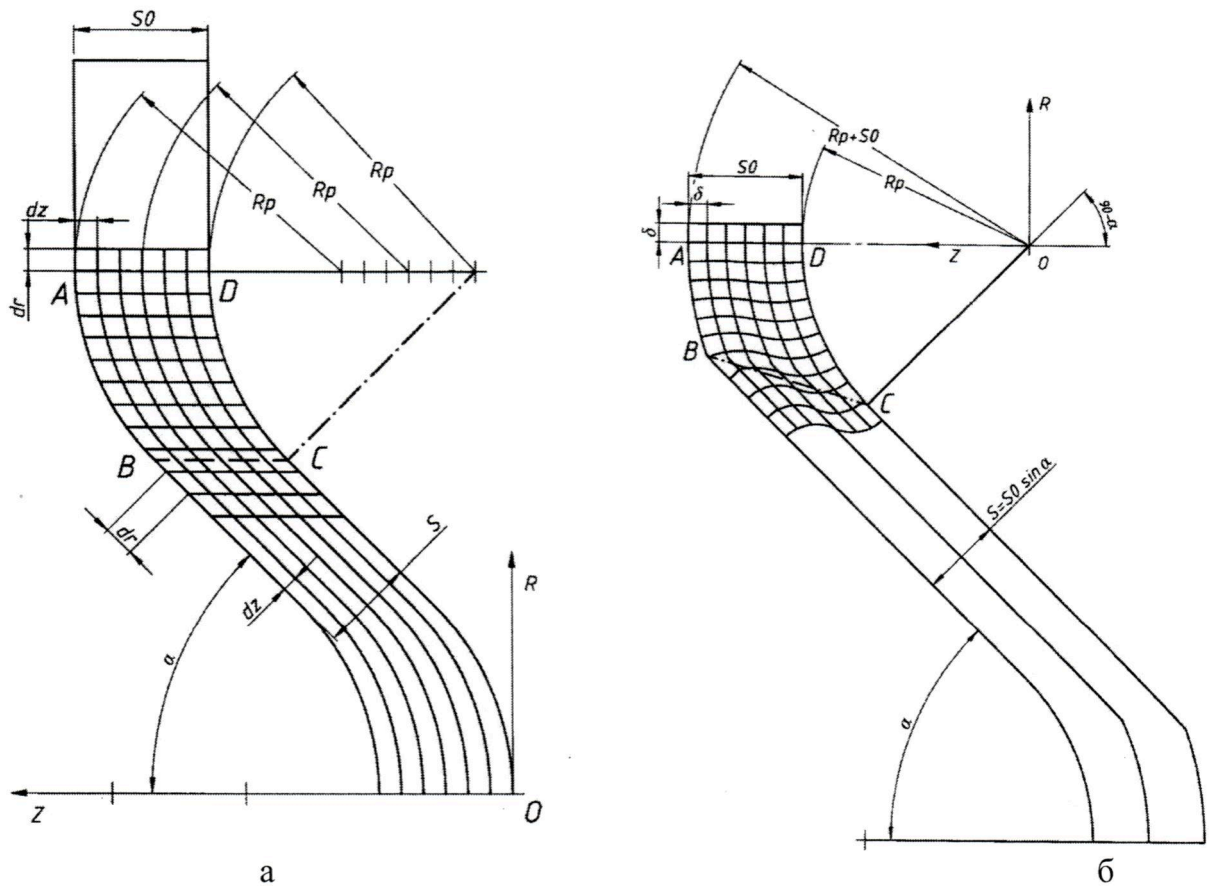
$$\varepsilon_2 = \ln \left\{ \frac{1}{2} \left[ \sqrt{\left(\frac{l_z}{2\delta}\right)^2 + \left(\frac{l_r}{2\delta}\right)^2} + 2\frac{R_j}{r_{i,j}} - \sqrt{\left(\frac{l_z}{2\delta}\right)^2 + \left(\frac{l_r}{2\delta}\right)^2} - 2\frac{R_j}{r_{i,j}} \right] \right\} \quad (14)$$

$$\varepsilon_3 = \ln \frac{r_{i,j}}{R_j} \quad (15)$$

где -  $l_r$  и  $l_r$  – длины хорд координатной сетки,  
 $r_{i,j}$  и  $z_{i,j}$  – координаты узлов сетки после деформации,  
 $R_j$  – радиальная координата соответствующего узла до деформации,  
 $\delta$  – размер ячейки координатной сетки.

Основным недостатком известной модели «чистого сдвига» является несоблюдение граничных условий, заключающееся в наличии сдвиговых напряжений на свободной границе АВ и на границе DC очага пластической деформации.

Для устранения указанного несоответствия сформулирована гипотеза о характере пластических деформаций в локальном очаге при ротационной вытяжке, в соответствие которой разработана уточнённая модель пластических деформаций. По уточнённой модели построена координатная сетка, представленная на рис.5б. Результаты расчётов распределения накопленной деформации  $\varepsilon_i$  и  $\varepsilon_{icp}$  при обработке по правилу «синуса» при  $R_p/S_0 = 2$  и  $\alpha = \pi/4$  по уточнённой модели представлены на рис. 6, где  $R_p$  – радиус скругления ролика.



а  
 б  
 Рисунок 5 - Схемы координатных сеток при ротационной вытяжке:  
 а - по модели «чистого сдвига»; б – по уточнённой модели

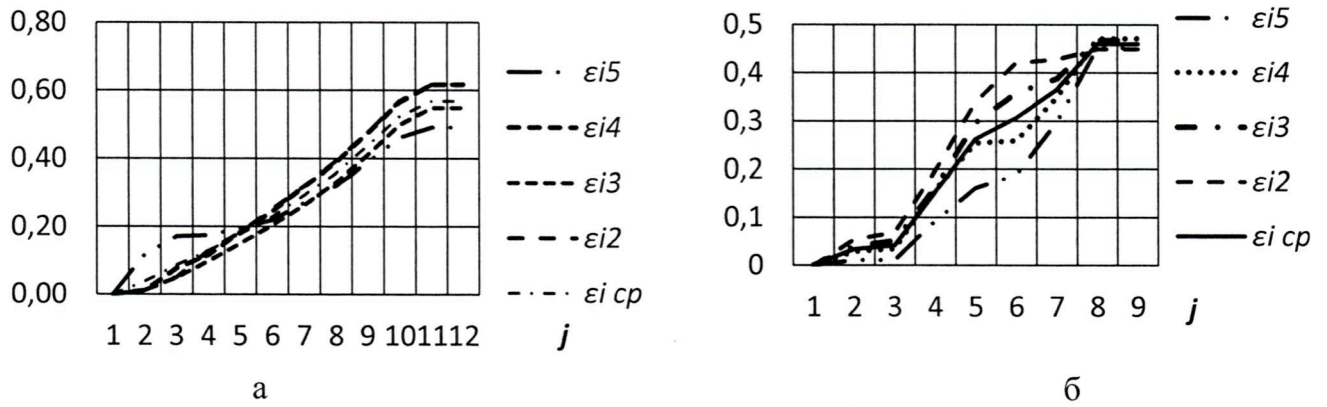


Рисунок 6 - Графики распределения накопленной деформации  $\epsilon_i$  и  $\epsilon_{icp}$  по линиям тока:  
 а - по правилу «синуса»; б - с переутономением 10% в момент  $\tau_3$

Представлена методика расчёта распределения накопленных деформаций конической заготовки при обработке с отклонением от правила «синуса». Методика основана на графоаналитическом методе и связана с построением координатной сетки в соответствии с принятой гипотезой распределения напряжений на границах очага деформации и равенстве площадей ячеек координатной сетки в процессе обработки. Результаты расчёта представлены на схеме процесса ротационной вытяжки с переутономением стенки в различные моменты времени на рис.7, и на рис.8, на котором изображена координатная сетка в один из моментов времени.

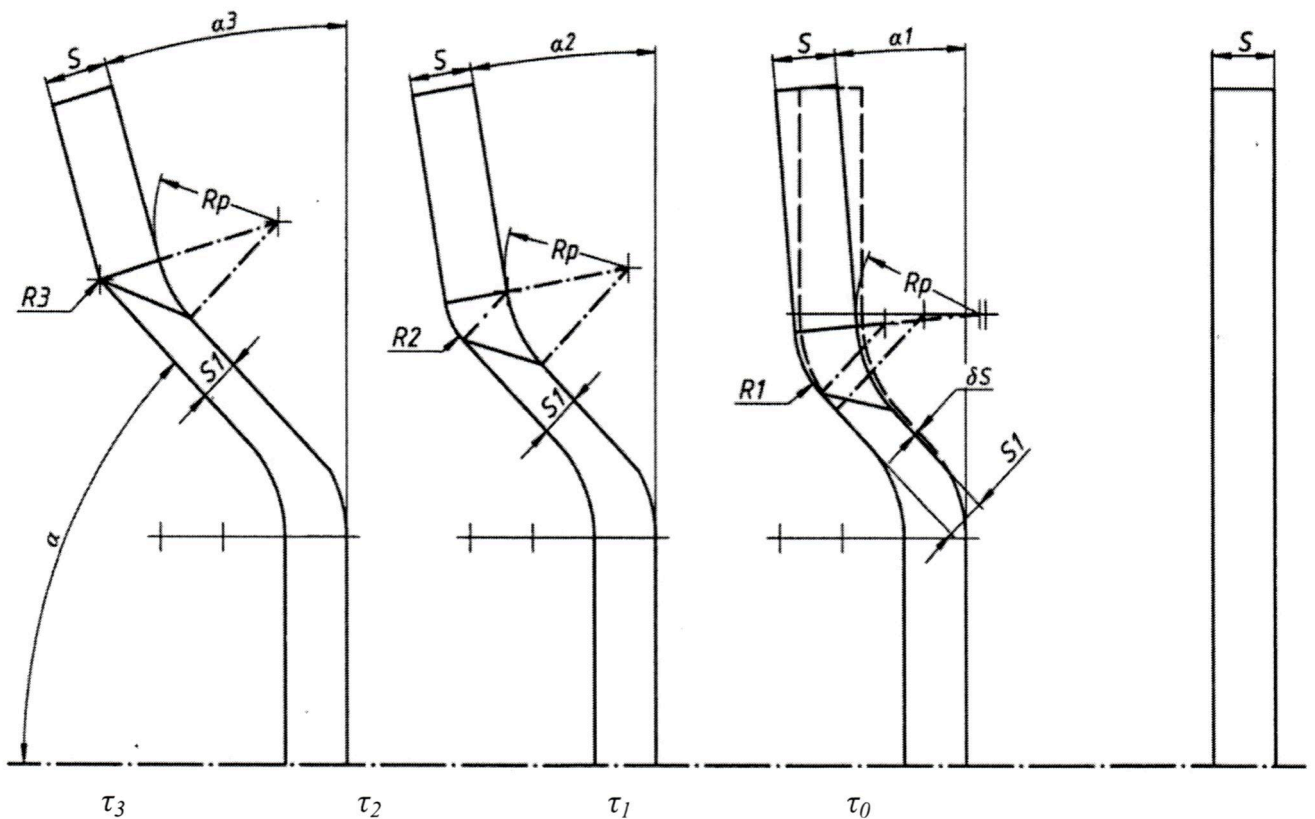


Рисунок 7 - Схема процесса ротационной вытяжки с переутономением стенки

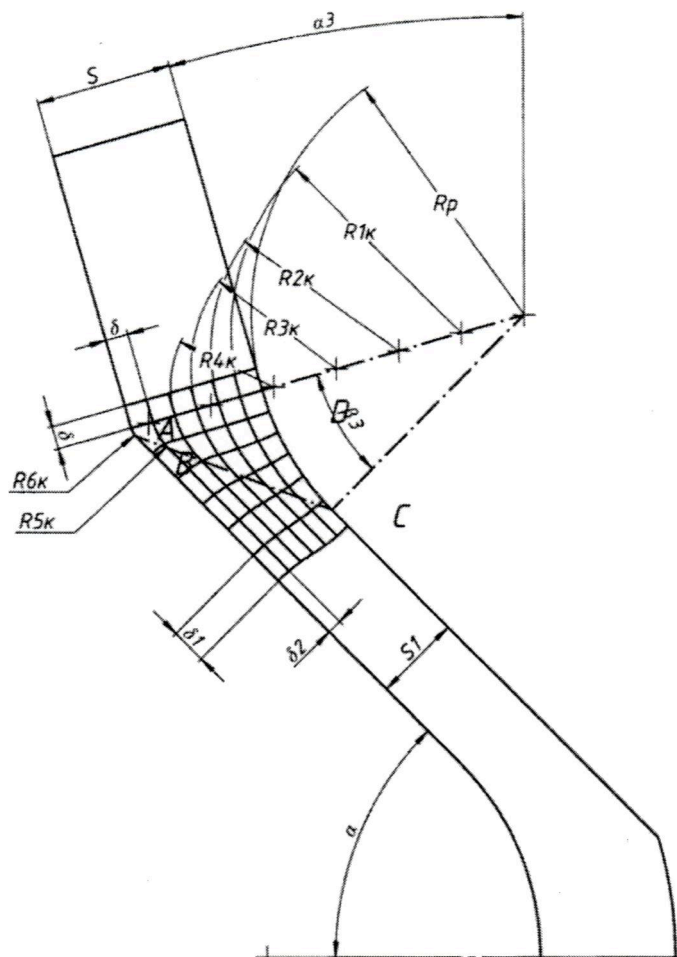


Рисунок 8 - Схема координатной сетки в момент  $t_3$

Методика позволяет определить распределение механических свойств материала, как по толщине детали, так и по образующей детали в зависимости от основных технологических параметров: величины зазора между оправкой и деформирующим роликом и от радиуса скругления ролика.

**В третьей части** разработаны математические модели и методика расчёта локального деформационного упрочнения деталей новым запатентованным способом комбинированной обработки с использованием ротационной вытяжки. Методика расчёта локального упрочнения основана на определении распределения толщин заготовки в процессе обработки, связанного с различными траекториями деформирующего ролика, вычислении накопленных деформаций и определении механических свойств материала в соответствии с кривыми упрочнения.

С использованием разработанных параметрических объёмных моделей выполнены расчёты по упрочнению материала заготовки из сплава АМгб для двух вариантов траектории деформирующего ролика с учётом условия, чтобы суммарная накопленная деформация не превышала рекомендуемой для сплава АМгб величины  $\epsilon_i \leq 0,4$ . Полученные распределения временного напряжения –  $\sigma_b$  и условного предела текучести –  $\sigma_{0,2}$  в сечении гофра после упрочнения по вариантам 1 и 2 представлены на рис.9 и 10 соответственно.

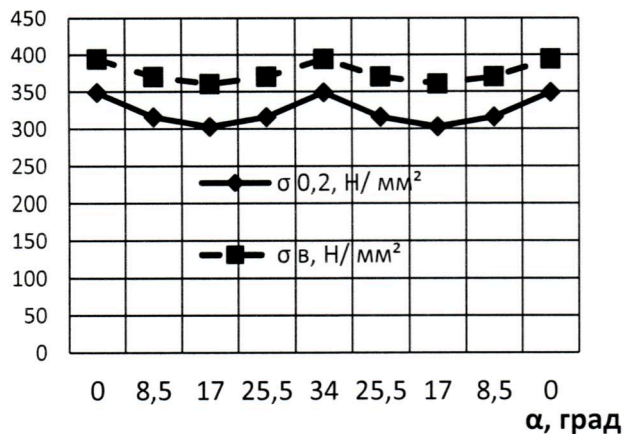


Рисунок 9 – Распределение напряжений при упрочнении по варианту 1

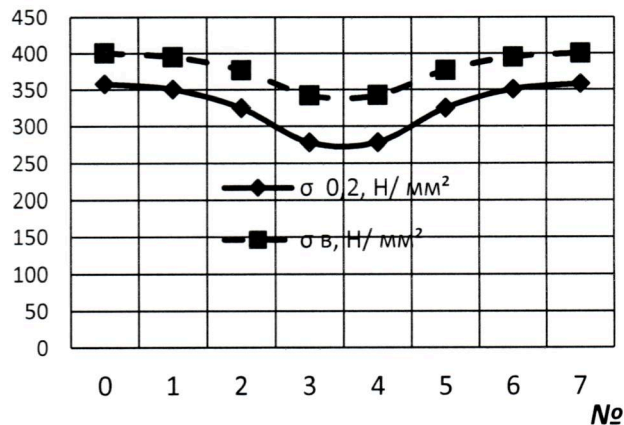


Рисунок 10 – Распределение напряжений при упрочнении по варианту 2

Сравнение двух вариантов упрочнения показало, что неравномерность накопленной деформации по варианту 2 существенно больше, чем по варианту 1, а минимальное упрочнение меньше (278 Н/мм<sup>2</sup> и 303 Н/мм<sup>2</sup> соответственно). Поэтому первый вариант упрочнения является предпочтительным.

**В третьей главе** приведены результаты экспериментальных исследований.

Проведены экспериментальные исследования пластического течения металла при обработке конических деталей с отклонением от правила «синуса». Фотографии детали №1 и образца с координатной сеткой представлены на рис.11.

Результаты экспериментальных исследований методом координатной сетки показали, что во всём исследованном диапазоне степеней деформации при ротационной вытяжке конических деталей имеет место сочетание сдвиговых и изгибных деформаций, что хорошо согласуется с результатами теоретических исследований.

Рисунок 11 - Деталь №1 и образец с координатной сеткой

Рисунок 12 – Эскиз фланца

15

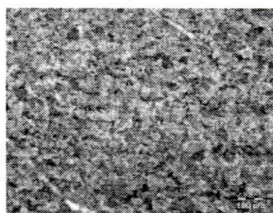
С целью определения пределов возможностей изготовления с отклонением от правила «синуса» экспериментально исследовано изготовление детали типа фланец из алюминиевого сплава 1201 АМ. На рис.12 представлен эскиз фланца.

Проведены исследования материала фланцев после ротационной вытяжки на определение предела прочности, предела текучести и относительного удлинения, а также металлографические исследования макро- и микроструктуры. Механические свойства сплава 1201 Т1, полученные при испытаниях образцов на растяжение, соответствовали требуемым значениям по всем параметрам.

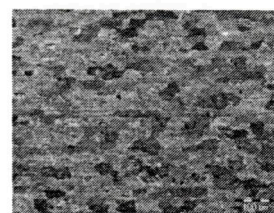
Микроструктура материала фланца на различных участках представлена на рис.13.



Зона без обработки



Зона А-Б



Зона Г-Д

Рисунок 13 - Микроструктура материала фланца из сплава 1201Т1

Проведены экспериментальные исследования изготовления широких листов по новому запатентованному способу, которые показали принципиальную возможность его реализации. При этом, прочностные свойства листа из сплава АМг6 возрастали, а пластические свойства – уменьшались. После обработки выявлено увеличение однородности микроструктуры листа в долевом и поперечном направлениях.

**В четвёртой главе** даны технологические рекомендации и описание практического внедрения результатов теоретических и экспериментальных исследований при отработке изготовления деталей ответственного назначения.

На рис.14 представлена фотография диафрагмы диаметром 800 мм из сплава А6М, изготовленной по разработанному технологическому процессу. На рис.15 диафрагма изображена в процессе обработки.

На рис.16 и 17 представлены некоторые виды дефектов, которые появлялись в процессе отработки технологии изготовления диафрагмы.

На рис.18 представлена фотография серийных деталей типа фланец из сплава 1201 Т1.

На рис.19...21 представлены некоторые виды дефектов, которые появлялись в процессе отработки технологии изготовления фланца.



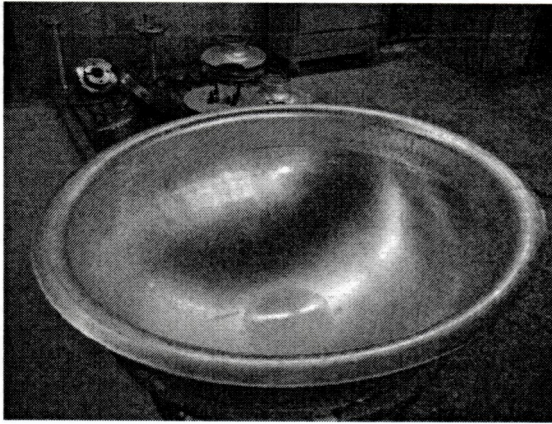


Рисунок 14 - Диафрагма

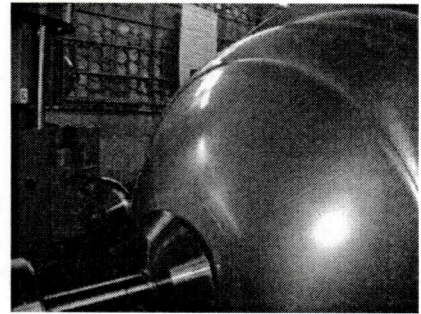


Рисунок 15 - Диафрагма в процессе обработки



Рисунок 16 - Дефект в виде кольцевого гофра

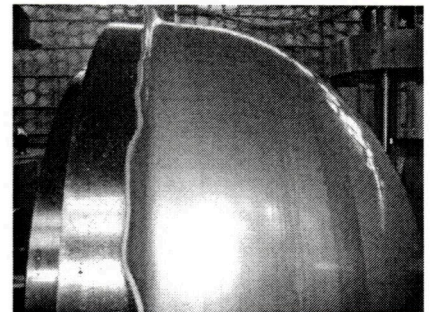


Рисунок 17 - Дефект в виде радиальных гофров

В результате экспериментальных работ по изготовлению крупногабаритных обшивок днищ из алюминиевых сплавов ротационной вытяжкой получена деталь диаметром 3,0 м из заготовки толщиной 6,0 мм из сплава АМг6, фотография которой представлена на рис.22.

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%. Отработанная технология изготовления фланцев обеспечила изготовление с допусками по толщине, не превышающими 0,05 мм (не более 1%), и отклонениями от теоретического контура не более 1,2%.



Рисунок 18 - Фланцы из сплава 1201 T1

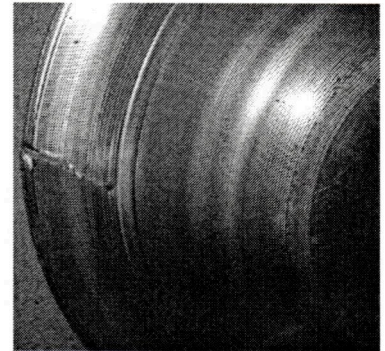


Рисунок 19 - Трещина на краю фланца

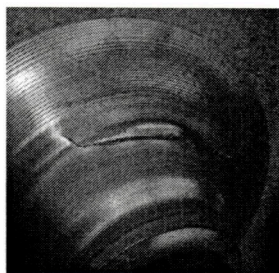


Рисунок 20 - Трещина на радиусной части фланца



Рисунок 21 - Отслоение металла на внешней поверхности фланца

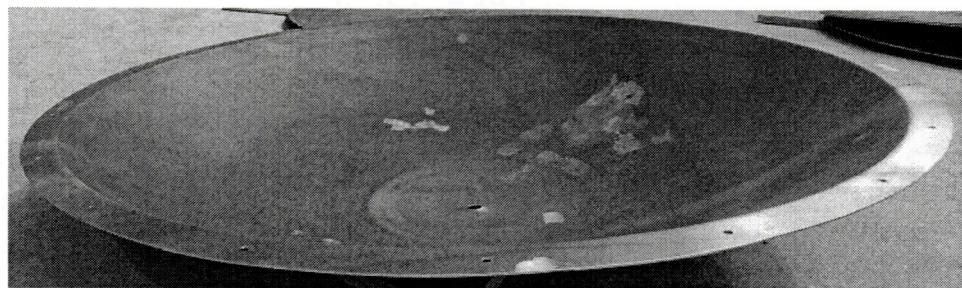


Рисунок 22 - Обшивка днища Ø 3000 мм

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В современных условиях постоянно повышаются требования к качеству деталей ракетно-космической техники. 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, основанная на представлении 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 обшивками, 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.

## **Список работ, опубликованных автором по теме диссертации**

### **Публикации в изданиях, рекомендованных перечнем ВАК РФ**

1. 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.
2. 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.
3. 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.
4. 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.

### **Патенты на изобретения**

5. Способ ротационной вытяжки: патент 2 490 085 РФ, МПК<sup>7</sup>В 21 D 22/14 / Л.П. Логунов, А.В. Поздняков, М.С. Ромашин – 2013. Бюл. №23.
6. Способ изготовления металлического листа: патент 2 494 829РФ, МПК<sup>7</sup>В 21 С 37/02, В 21 D 35/00 / А.В. Воронков, Л.П. Логунов, А.В. Поздняков, М.С. Ромашин, А.С. Чумадин – 2013. Бюл. №28.

### **Публикации в других научных изданиях**

7. Логунов Л.П. Исследование ротационной вытяжки конических деталей методом координатных сеток / Л.П.Логунов //XLII Академические чтения по космонавтике. Сборник тезисов. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2018. С.364.
8. 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.
9. 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.
10. Чумадин А.С. Ротационная вытяжка листовых заготовок с отступлением от закона «синуса» / А.С.Чумадин, Л.П.Логунов //Научные труды. Вып.18 (90). - М.: Изд-во МАТИ, 2011. С.95-100.

11. 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.

12. Чумадин А.С. Возможности изготовления тонкостенных оболочек вытяжкой и ротационной вытяжкой / А.С.Чумадин, Л.П.Логунов, Е.С.Шемонаева, Д.А.Батурин // Научные труды. Вестник МАТИ. – 2014. Вып.22 (94). С.113-118.

13. Чумадин А.С. Ротационный обжим тонкостенных труб / А.С.Чумадин, Л.П.Логунов // XL Академические чтения по космонавтике. Научное издание. Сборник тезисов. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2015. С.413.