

1544772

Московский ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции,
ордена Трудового Красного Знамени Государственный Технический
университет имени Н.Э.Баумана

На правах рукописи

Попов Игорь Петрович

РАЗРАБОТКА ПРОЦЕССОВ ЛИСТОВОЙ ШТАМПОВКИ И МЕТОДОВ ИХ
ПРОЕКТИРОВАНИЯ ДЛЯ ДЕТАЛЕЙ С ЗАДАНЫМИ РАЗМЕРАМИ ПО
ТОЛЩИНЕ

Специальность 05.03.05 - Процессы и машины обработки давлением

И. Попов

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

И. Попов

И. Попов

Москва 1994

Работа выполнена в Самарском ордена Трудового Красного Знамени
Государственном аэрокосмическом университете имени академика
С.П. Королева

НТБ МГТУ им. Н.Э. Баумана



1544772

Попов И.П. Разработка проц

Официальные оппоненты

доктор технических наук, профессор
доктор технических наук, профессор
доктор технических наук, профессор

А.М. Дмитриев
В.И. Ершов
С.С. Соловцов

Ведущее предприятие: Акционерное общество СМПО "Металлист "

Защита диссертации состоится " 8 " сентября 1994г.
в 14 30 час. на заседании совета Д053.15.05
при Московском ордена Ленина, ордена Октябрьской революции и
ордена Трудового Красного Знамени государственном аэрокосмическом
университете имени Н.Э. Баумана
2-я Бауманская

Ваш отзыв
печатью, проси
С диссерт
Н.Э. Баумана
Авторефер

Ученый се
специального с
к.т.н., доцент

Подп. к печати
тир. 100 экз. 1

1544772

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Современное развитие машиностроения связано с применением ресурсооберегающих технологий. Такое направление научно-технического прогресса является обоснованным не только с экономической, но и с экологической точки зрения. В листовой штамповке одной из самых эффективных статей экономии, экологической эффективности являются повышение выхода годного штампуемого металла, уменьшение трудоемкости изготовления деталей путем сокращения числа переходов штамповочных операций или последующей механической обработки. Это достигается путем получения штампованной детали с близкой к заданной толщиной стенки.

Согласование заданных (эксплуатационных) и технологически возможных толщин повышает эксплуатационные характеристики деталей, их качество и несущую способность.

В зависимости от назначения детали заданная толщина может иметь разнотолщинность от нуля до 40 - 60%. Такие детали широко применяют в конструкциях различного назначения: в двигателях летательных аппаратов (стенки камер сгорания, насадки, рубашки, диффузоры), емкостях высокого давления (детали типа днищ), в товарах народного потребления.

В настоящее время существуют приемы согласования заданных и технологических толщин деталей. Однако они не носят научно-обоснованного характера, что вызывает большие издержки производства. Это заключается в увеличении времени подготовки производства с проведением дополнительных экспериментов, или проектировании технологий без учета сбережения материальных ресурсов.

Таким образом большое распространение деталей с различными заданными изменениями толщин и отсутствие научно-обоснованной технологии получения штампованных деталей с толщинами, согласованными с заданными, делают проектирование технологических процессов листовой штамповки, обеспечивающих изменение толщины заготовки, актуальной народнохозяйственной проблемой.

Работа проводилась в рамках программы "Авиационная технология" утвержденной постановлением № 186/390 от 09.10.79 г., программы, утвержденной постановлением Совета Министров СССР и ЦК КПСС № 160-54 от 16.02.79 г. (приказ Минвуза РСФСР №40 СС от 23.05.79 г.), программы "Научеёмкие технологии" (приказ комитета по науке, высшей школе и технической политики Российской Федерации от 18. 2.

В диссертации обобщены результаты работ автора, связанные с решением указанной проблемы.

Цель работы. Проведение совокупности научно обоснованных решений по разработке методики проектирования технологических процессов листовой штамповки для деталей с заданными размерами по толщине, позволяющих достичь экономии металла, снизить трудоемкость штамповки и повысить эксплуатационные характеристики изделий.

Поставленная цель достигнута путем комплексного проведения теоретических и технологических исследований с использованием приближенных методов решения и различных способов формообразования.

Научная новизна заключается в разработке методики проектирования технологических процессов листовой штамповки деталей с заданными размерами по толщине.

Получены научно обоснованные технологические решения с учетом направленного изменения толщины заготовки. Решения базируются на минимизации функционала, обеспечивающего равномерное приближение технологически возможной толщины к заданной. Варьирование производится по технологическим параметрам, в качестве которых использованы: исходная толщина плоской заготовки, граничные условия, геометрия штамповой оснастки, механические свойства материала заготовки в рамках выбранной модели формообразования, основанной на использовании традиционных операций листовой штамповки: вытяжки, обжима, отбортовки, протяжки, осадки.

Установлены на основе кинематических и статических решений с использованием приближенных последовательных методов разложения решения в степенной ряд аналитические зависимости для определения толщины штампованной детали.

Составлен типовой классификатор деталей с различным характером изменения толщины стенки. Установлено, что базовой моделью, характеризующей реликтовые признаки изменения толщины стенки детали, полученной после штамповки, является уравнение второй степени.

Разработан метод определения заданной толщины, необходимой штампованному полуфабрикату, по основным геометрическим размерам механически обработанной детали, заданным в прямоугольной, полярной или смещенной системах координат.

Установлены основные факторы, влияющие на толщину штампован-

ной детали, а также степень их влияния.

Практическая ценность. Разработана методика проектирования технологического процесса с направленным изменением толщины заготовки. Она позволяет научно-обоснованно на стадии проектирования согласовать заданную и технологическую толщины деталей.

Разработаны новые способы штамповки, конструкция штампового инструмента для процессов производства осесимметричных деталей, позволяющие расширить диапазон приемов согласования толщины технологического и эксплуатационного характера, улучшить качество штампованного полуфабриката и повысить техникоэкономические показатели производства.

Результаты диссертационной работы использованы в руководящих технических материалах, нашли отражение в курсах лекций, лабораторных работах студентов специальности II.08 (обработка металлов давлением).

Разработанная методика, способы штамповки в комплексе обеспечивают:

- уменьшение расхода штампуемых материалов до 20 - 30%,
- снижение трудоемкости процесса штамповки до 30 - 50%,
- уменьшение массы изделий и узлов из штампованных деталей,
- повышение эксплуатационных характеристик деталей.

На защиту выносятся:

1. Комплексные научно-обоснованные технические решения, которые послужили основой создания методики проектирования технологических процессов листовой штамповки с учетом направленного изменения толщины заготовки.
2. Физически обоснованный метод расчета направленного формоизменения толщины заготовки для согласования её с заданной толщиной детали. Метод по своей сути относится к вариационной задаче и базируется на минимизации функционала, обеспечивающего наилучшее равномерное приближение заданных и технологически возможных толщин. Барьирование производится в рамках основных способов формообразования листовой штамповки по технологическим параметрам, в качестве которых используются: геометрические размеры исходной заготовки, граничные условия, геометрия штамповой оснастки, механические свойства материала.
3. Аналитические зависимости, позволяющие определять оптимальные параметры, повышающие коэффициент использования металла, предельное формоизменение листовых заготовок в операциях вытяжки, обжима

отбортовки, осадки, протяжки.

4. Модели формообразования, которые решают проблему получения толщины штампованной детали, близкой к заданной с разнотолщи́нностью, достигающей 40 – 50%. В моделях используются новые способы формообразования, защищенные авторскими свидетельствами.
5. Метод расчета толщины детали на основе кинематического и статического решений. Решения представлены в виде кусочно-линейных функций. Процедура решений использует способы последовательного приближения. Проведена оценка погрешности метода, которая согласована с возможностями существующих в настоящее время способов штамповки.
6. Метод определения заданной толщины для штампованной детали по геометрическим размерам механически обработанной детали с учетом необходимых требований: гладкости образующей срединной поверхности, возможности беспрепятственного удаления детали из штампа.
7. Классификация деталей по заданной толщине. Показано, что основной классификации является многочлен второго порядка, которому присущи реликтовые признаки изменения толщины детали.
8. Метод установления границ применимости выбранных технологических процессов по относительной толщине исходной плоской заготовки, по величине максимальной разнотолщинности, по коэффициентам формообразования.

Реализация работы в промышленности. Результаты работы внедрены на ряде предприятий. К диссертации приложены акты внедрения на сумму около 0.9 млн. рублей в год в ценах 1991 года.

Публикации. Основное содержание работы опубликовано в монографии, учебном пособии, 18-ти авторских свидетельствах на изобретения, 20-и статьях. Сделаны доклады на пяти научно-технических конференциях в том числе и международной.

Результаты работы выставлялись на ВДНХ СССР / 1980г / и отмечены серебряной и бронзовой медалями.

Исследования автора проводились в рамках научных направлений, которые развиваются на кафедрах МТ-6 МГТУ им. Н.Э. Баумана, ОМД СГАУ им. С.П. Королева. Они опираются на результаты работ Попова Е.А., Овчинникова А.Г., Арышенского Ю.М., Чистякова В.П., Матвеева А.Д., Ильюшина А.А., Шофмана Л.А., Титлянова А.Е., Ву О.М., Норицына Н.А., Соловьева С.С., Кафтаюглу В. и др.

В исследованиях принимали участие работники СГАУ им. С.П. Королева [Чистяков В.П.], Маслов В.Д. и др.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, выводов, списка литературы, приложений с материалами о внедрении и программ расчета на ЭВМ. Работа изложена на 290 страницах машинописного текста, содержит 160 рисунков, 33 таблицы 240 наименований в списке использованных источников.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Введение. В нем обоснована актуальность темы диссертации и цель работы.

В первой главе представлены типовые изделия, которые имеют разные по характеру изменения толщины стенки. Толщина изделия определена эксплуатационными характеристиками, само изделие получено из штампованной детали. Такие изделия встречаются в конструкциях летательных аппаратов, сосудов высокого давления, товарах народного потребления / рис. /. Рассмотрено состояние теории и практики формообразования осесимметричных деталей из листа для определения толщины стенки и её регулирования. Фактор необходимости оценки изменения толщины листовой заготовки в процессах формообразования отмечался ещё в работах 30-х годов нашего столетия, когда начались интенсивные разработки технологических основ листовой штамповки и теории.

Проведен анализ трудов советских и зарубежных ученых, которые в процессах формообразования учитывали толщину заготовки и её изменение. В частности рассмотрены работы А.А. Ильюшина, Е.А. Попова, Л.А. Шофмана, А.Д. Матвеева, О.В. Попова, Н.Н. Малинина, А.Е. Титлянова, Ву О.М., Кафтаноглу В., Б.П. Зворона, Н.А. Норичина, М.Н. Горбунова.

Из работ этих авторов следует, что наиболее полно учет толщины в процессах листовой штамповки проводится, если вести расчет с учетом моментного состояния заготовки, в котором действуют как изгибающие моменты, так перерезывающие силы по толщине деформируемой заготовки. Сравнение результатов технологических параметров, а также величины и характера изменения толщины заготовки по моментному и безмоментному состоянию говорит о незначительной разнице между ними, не превышающей для относительных толщин меньше 0.1 величины 5-7%. Однако, с уменьшением радиуса скругления эта величина растёт и может составлять несколько десятков процентов. Разработанная Поповым Е.А. методика учета изгиба проста и достаточно

точна для технических расчетов.

Как следует из обзора, определение толщины заготовки можно производить либо по деформационной теории, либо по теории течения. Последняя дает результаты, которые ближе к опытным данным, её применение базируется на использовании полной системы уравнений, куда входят уравнения равновесия с учетом изменения толщины, уравнения связи напряжения и скоростей деформации, геометрические соотношения, определяющие деформации, геометрические соотношения, определяющие деформации, условие постоянства объема, величина накопленной интенсивности деформации, кривая аппроксимации упрочнения материала.

В такой системе условие пластичности удовлетворяется автоматически, если в интенсивность скоростей деформаций подставить значение скоростей деформаций, выраженных через напряжения. Система не имеет квадратур, поэтому решается численно. Трудами Б.П. Звороно, Кафтаноглу В., Ву Ф.М., А.Е. Титляновым и другими разработана единая методика расчета, согласно которой заготовка разбивается на достаточное число колец / участков /, на границах которых определяются все перемещения и толщина. В виду малости рассматриваемого участка перемещения можно считать меняющимся по линейному закону. Это обстоятельство позволяет дифференциальные уравнения представить в конечных разностях и получить систему алгебраических уравнений.

Система решается от участка к участку, от стадии к стадии процесса. Чтобы облегчить расчет, шаг стадии процесса принимают совпадающим с шагом элементов, на которые разбита заготовка, что делает обоснованной замену бесконечных приращений деформаций конечными величинами. Количество процедур расчета полной системы пропорционально произведению числа участков на число стадий процесса. Число участков не совпадает с естественными границами, обусловленными геометрией инструмента или заготовки, выбирается условно и результат произведения составляет большое число. Задача резко усложняется, так как система сводится к решению нелинейного уравнения. Нахождение корня уравнения с математической точки зрения проводится различными методами. Например метод деления пополам, метод Ньютона и др. Процедура вычисления носит характер последовательных приближений, в котором наиболее ответственным является выбор нулевого решения. Таким образом объем вычислений по заданной про-

цедуре резко возрастает, и без использования ЭВМ решение не представляется возможным.

Несмотря на указанные выше преимущества теории течения, благодаря работам Е.А. Попова, А.Д. Матвеева, А.Г. Овчинникова, И.А. Норицина, Л.А. Шофмана и других, наибольшее распространение получила деформационная теория. Используя условие постоянства напряжений, найденные без учета изменения толщины заготовки и упрочнения, можно с достаточной точностью определить толщину заготовки на последней стадии. Однако теория требует знания одной из деформаций. Широкое распространение рассмотренной теории объясняется тем, что полученные результаты имеют погрешности, не превышающие тех, которые несут принятые допущения: безмоментное состояние заготовки, аппроксимация кривой упрочнения, плоская схема напряжений, условия трения.

Из научно-технического обзора следует, что величины толщин и критических значений деформаций по толщине зависят от механических свойств материала и схемы напряженно-деформированного состояния. В схемах напряженного состояния сжатия широко используется критерий С.П. Тимошенко, растяжения — критерий А.Д. Томленова.

Установлено, что применение традиционных способов формообразования может обеспечить получение детали с разнотолщиностью до 40 — 60% и отклонением от исходного значения толщины на 25 — 30%.

В настоящее время существуют приемы согласования заданной толщины детали с технологически возможной. Теоретически разработанным является прием, основанный на решении задачи обратным методом, когда известна функция изменения толщины детали и по ней определяют необходимые для этого напряжения. К таким случаям можно отнести известные решения по деформационной теории, когда не учитывается изменение толщины заготовки / последняя принята постоянной/, когда фактором, обеспечивающим заданную толщину, является предел текучести материала, зависящий от температуры на операции осадки.

В листовой штамповке имеют место прямые методы решения, когда толщина детали жестко связана с параметрами процесса, например, вытяжка-протяжка. Однако с технической точки зрения реализация рассмотренных приемов согласования затруднена, не обладает универсальностью, имеет приближенный характер.

Интуитивный характер носят приемы согласования толщин, основанные на выборе числа переходов, исходной толщины заготовки и

других параметров процесса (трения, геометрии инструмента, граничных условий).

В данной главе подчеркивается, что наиболее эффективным при согласовании толщин, является прием, связанный с выбором способов штамповки. Разработанные в настоящее время способы и устройства, основанные на операциях вытяжки, обжима, отбортовки, осадки, позволяют получать детали с различной толщиной. Однако отсутствие рекомендаций по их выбору, границам применимости является сдерживающим фактором для их научно-обоснованного использования.

Из научно-технического обзора следует, что достижение поставленной в работе цели позволяет значительно на величину до 20-30% повысить выход годного металла. Однако, сделать это можно путем комплексной увязки технологии и теории, выполнив изложенную ниже программу работ.

1. Разработка метода расчета направленного формоизменения толщины заготовки для согласования её с заданной толщиной детали. Установление обобщенного математического условия, обеспечивающего это согласование.

2. Разработка метода расчета толщины детали, полученной в процессах листовой штамповки на основе приближенных кинематического и статического решений.

3. Проведение анализа новых основных способов штамповки (вытяжка с усеченным коническим прижимом, последующая вытяжка с активными силами трения, обжим полого цилиндрического стакана с дном, совмещенный с осадкой, отбортовкой) для определения толщины детали.

4. Разработка способа пересчета толщины детали, полученной механической обработкой, в заданную толщину для штампованной детали.

5. Создание классификации штампованных деталей по характеру изменения толщины стенки.

6. Установление основных технологических процессов штамповки, применяемых для направленного изменения толщины заготовки с использованием новых способов штамповки (выявление границ их применимости, определение основных технологических параметров, обеспечивающих эффективное регулирование толщины).

7. Разработка способов обработки результатов замеров толщины, установление базовой модели аппроксимации.

8. Проведение экспериментальных исследований для проверки

разработанных положений методики, теоретических результатов.

9. Подтверждение опытно-промышленной проверкой и внедрение в производство основных научных положений, рекомендаций и выводов диссертации.

Во второй главе разработаны теоретические основы расчета направленного изменения толщины заготовки в процессах листовой штамповки. Исходя из цели работы сформулирована постановка задачи, которая символически можно выразить в следующем виде:

$$V - V_g + V_{min}, \quad (1)$$

где V - объем штампованной детали с технологически возможной толщиной,

V_g - объем детали с заданной для штамповки толщиной,

V_{min} - минимальный технологически обусловленный объем.

Показано, что минимальный отход будет иметь место, если выполняется условие

$$\int (S - S_g)^2 = \min, \quad (2)$$

где S, S_g - соответственно технологически возможная и заданная для штампованной детали толщина.

Выражение (2) по своей сути является функционалом, минимизацию которого проводим по неизменным в процессах штамповки параметрам. Условие (2) будет выполняться, если имеет место следующее соотношение

$$\frac{\partial}{\partial \Delta x} \int (S - S_g)^2 = 0, \quad (3)$$

где Δx - параметры минимизации.

Решение вариационной задачи проводится в рамках выбранной модели формообразования, основанной на операциях вытяжки, обжима, отбортовки, осадки, протяжки. В работе приведена классификация заданных толщин и соответствующие им возможные модели штамповки. Исследования показали, что характер изменения заданной толщины штампованной детали можно аппроксимировать уравнением второго порядка с использованием ортогональных полиномов Чебышева. Уравнение положено в основу классификации деталей по заданной толщине, которая может быть:

- постоянной,
- увеличивающейся к торцу детали,
- уменьшающейся к торцу детали (прямолинейная, выпуклая, вогнутая).

Из рисунка видно, что многие штампованные детали подвергаются механической обработке. В этом случае размеры механически обработанной детали задаются в прямоугольной системе координат. В работе предложен метод определения заданной толщины детали с использованием зависимости

$$S_{pi} = S_{mi} + |S_{mi} - S_{pi}|_{\max},$$

где S_{pi} — заданная для штамповки толщина детали,

S_{mi} — толщина детали с учетом механического припуска относительно средней поверхности,

S_{pi} — рассчитанная по уравнению аппроксимации толщина для детали с учетом припуска под механическую обработку.

Координаты образующей срединной поверхности определяются с учетом следующих требований:

- достаточной гладкости поверхности (отсутствие при деформировании радиусов свободного изгиба),
- свободного извлечения штампованного полуфабриката из оснастки без искажения его формы.

Наиболее полно выявленным требованиям удовлетворяет уравнение третьей степени, полученное на основе метода наименьших квадратов.

Уравнение, аппроксимирующее толщину детали с учетом механического припуска, представлено многочленом второго порядка

$$S_{pi} = \sum_{k=0}^2 \beta_k \varphi_k(x_i), \quad (4)$$

где β_k — линейно-независимые коэффициенты,

φ_k — многочлены Чебышева.

Линейные коэффициенты рассчитываются по формуле

$$\beta_k = \frac{\sum_{i=1}^n S_{mi} \varphi_k(x_i)}{\sum_{i=1}^n \varphi_k^2(x_i)}.$$

Как показано в работе, наиболее эффективными параметрами минимизации являются: толщина исходной плоской заготовки, геометрия штамповой оснастки, граничные условия, коэффициент анизотропии. Решение системы (3) возможно, если определена толщина штампованной детали. Толщина устанавливается в результате анализа напряженно-деформированного состояния, который проводится в рамках деформационной теории и использования безмоментного состояния с тра-

ditionными для листовой штамповки допущениями. Исходными для анализа являются уравнения в полярной системе координат

$$\rho \frac{d\sigma_r}{d\rho} + \sigma_r \left(1 + \frac{ds}{d\rho} \frac{\rho}{s}\right) - \sigma_\theta = \frac{t_0 \sigma_N \rho}{\sin \alpha s},$$

$$\frac{\sigma_N}{s} = \frac{\sigma_r}{R_r} + \frac{\sigma_\theta}{R_\theta},$$

$$\sigma_r = - \frac{1}{1+\mu} \frac{\sigma_\theta}{R_\theta} (\Delta R_\theta - \frac{\mu}{1-\mu} \Delta R_s),$$

$$\sigma_\theta = \frac{1}{1+\mu} \frac{\sigma_\theta}{R_\theta} (\Delta R_\theta - \frac{\mu}{1-\mu} \Delta R_s),$$

$$\Delta R_\theta = \sqrt{\frac{2}{1+\mu}} \sqrt{2(1-\mu) \Delta R_s^2 + \Delta R_\theta^2 + \Delta R_s \Delta R_\theta}, \quad (5)$$

$$\sigma_\theta = K \epsilon_\theta^n,$$

$$\Delta R_r = \ln \frac{dR_r}{dR_N},$$

$$\Delta R_s = \ln \frac{R}{s},$$

$$\Delta R_\theta = \ln \frac{s}{s_N},$$

$$\Delta R_\theta + \Delta R_s + \Delta R_r = 0.$$

$$z = \rho + u, \quad h_N = h + w,$$

здесь u, w — перемещения элемента в процессе деформации по осям ρ и h ,

dR, s — длина и толщина рассматриваемого элемента,

dR_N, s_N — исходные длина и толщина рассматриваемого элемента заготовки,

ρ, z — конечные и исходные радиусные координаты рассматриваемого элемента,

α — угловая координата,

$\Delta R_r, \Delta R_\theta, \Delta R_s$ — деформации в радиальном, тангенциальном направлениях и по толщине заготовки,

K, n — константы схематизированной диаграммы напряжений,

f_{tr}, μ — коэффициенты трения и трансверсальной анизотропии,

$\sigma_r, \sigma_\theta, \sigma_N$ — напряжения в радиальном, тангенциальном направлениях и в направлении толщины заготовки,

R_r, R_θ — радиусы кривизны в радиальном и тангенциальном нап-

равлениях,
 h_N, h - исходные и конечные координаты рассматриваемого элемента по высоте.

Как правило, размеры заготовки, её профиль даются в прямоугольной системе координат (ρ_N, h_N) . Соотношение её размеров можно представить в виде функции

$$h_N = \varphi(z) \quad \text{или} \quad (6)$$

$$z = \psi(h_N). \quad (7)$$

Для штампованной детали примем соотношение

$$h = f(\rho) \quad \text{или} \quad (8)$$

$$\rho = g(h). \quad (9)$$

Аналитические зависимости для определения толщины детали получены на основе методики, предложенной Е.А. Поповым, которая основана на кинематических и статических решениях. Однако для них, как показали исследования, наиболее рациональным является использование методов последовательных приближений, основанных на разложении решения в степенной ряд и представлении решения в виде кусочно-линейной функции. В качестве нулевого решения используется соотношение толщин детали и заготовки, найденных из оценочных решений, и близкое к единице.

Решение для напряжений имеет вид

$$\sigma_{\rho i,j} = \sigma_{\rho i,j}^0 + \sum_{i=1}^n \sigma_{\rho i,j}^1 (\rho_{i+1,j} - \rho_{i,j}), \quad (10)$$

где $\sigma_{\rho i,j}^0$ - значение меридионального напряжения на границе рассматриваемого участка,

$\sigma_{\rho i,j}^1$ - значение производной меридионального напряжения в средней части рассматриваемого участка $\rho_{i,j}$.

Производная выражения (10) определяется из уравнения равновесия

$$\sigma_{\rho i,j}^1 = \frac{\sigma_{\rho i,j}^0 - \bar{\sigma}_{\rho i,j}}{\rho_{i,j}} + f_{rp} \frac{\bar{\sigma}_{\rho i,j}}{s_{ij} \sin \alpha_{i,j}},$$

где

$$\sigma_{\rho i,j}^0 = \mu \sigma_{\rho i,j} \pm \sqrt{\sigma_s^2 - (1 - \mu) \sigma_{\rho i,j}^2},$$

$$\bar{\sigma}_{\rho i,j} = \frac{\sigma_{\rho i,j}}{\rho_{i,j}} + \frac{\sigma_{\rho i,j}^1}{\rho_{i,j}},$$

где i - номер характерного элемента заготовки,
 j - номер операции или стадии формообразования.

За характерные элементы принимаются границы образующих поверхностей элементарной формы.

Решения для перемещения в горизонтальном направлении представлены в виде

$$u_{ij} = u_{i,j} + \sum_{k=1}^{n-1} u'_{i,j} (\rho_{i+1,j} - \rho_{i,j}), \quad (II)$$

где u_{ij} - перемещение на границе рассматриваемого участка,

$u'_{ij} = \frac{du_{ij}}{d\rho}$ - значение производной перемещения в средней части рассматриваемого участка $\rho_{i,j}$.

Значение производной находится с использованием кинематических соотношений, полученных из условия постоянства объема

$$u'_{ij} = \frac{\rho_{ij}}{\rho_{ij} + u_{ij}} \frac{s_{op}}{s_n} \frac{\sqrt{1+(f'_{ij})^2}}{\sqrt{1+(\varphi'_{ij})^2}} - 1, \quad (I2)$$

где

$$f_{ij} = f(\rho_{ij}), \quad f'_{ij} = f'(\rho_{ij}),$$

$$\varphi_{i,j} = \varphi(\rho_{i,j} + u_{i,j}), \quad \varphi'_{i,j} = \varphi'(\rho_{i,j} + u_{i,j}).$$

s_{op} - среднее значение заданной толщины детали,

s_n - толщина исходной плоской заготовки.

По аналогии с последними двумя зависимостями решение для перемещения в вертикальном направлении принимает вид

$$w_{ij} = w_{i,j} + \sum_{k=1}^{n-1} w'_{i,j} (h_{i+1,j} - h_{i,j}), \quad (I3)$$

где

$$w'_{ij} = 1 - \frac{s_{op}}{s_n} \frac{\theta_{ij}}{r_{i,j}} \frac{\sqrt{1+(\theta'_{ij})^2}}{\sqrt{1+(w'_{ij})^2}}. \quad (I4)$$

Решения (II), (I3) охватывают все виды перемещений элементов поверхностей осесимметричных деталей в том числе сферической, цилиндрической, конической оболочек. Найденные величины перемещений используются для расчета приращения деформаций

$$\Delta \varepsilon_{\rho_{ij}} = \ln / \frac{\rho_{ij}}{\rho_{ij} + u_{ij}} / , \quad (I5)$$

$$\Delta \varepsilon_{r_{ij}} = \ln / \frac{\sqrt{1+(\theta'_{ij})^2}}{(1-w'_{ij}) \sqrt{1+(w'_{ij})^2}} / . \quad (I6)$$

С использованием уравнений связи напряжений и приращения деформаций находится

$$\Delta e_{s,i,j} = L_{i,j} \Delta e_{0,i,j}, \quad (17)$$

$$S_{i,j} = S_N / \frac{\rho_{ij}}{\rho_j + U_{ij}} / L_{i,j}, \quad (18)$$

где

$$L_{i,j} = (1 - \mu) \frac{1 + (\frac{\sigma_e}{\sigma_p})_{i,j}}{\mu (\frac{\sigma_p}{\sigma_e})_{i,j} - 1}$$

В работе показано, что в зависимости от выбранной модели решение вариационной задачи целесообразно проводить для одного, двух или трех параметров варьирования. Наиболее прост случай, когда в качестве варьируемого параметра используется исходная толщина плоской заготовки. Этот случай может иметь место, когда для достижения заданной толщины заготовки другие параметры определены из условий задачи. Параметр исходной толщины при решении уравнения (3) определится для многостадийного процесса формулой

$$S_N = \frac{\sum_{i=1}^n S_i \exp(e_{s,i,N=0-N}) \Delta e_{i,N}}{\sum_{i=1}^n \exp(2e_{s,i,N=0-N}) \Delta e_{i,N}}, \quad (19)$$

где $\Delta e_{i,N}$ - длина образующей рассматриваемого участка,
 $e_{s,i,N=0-N}$ - суммарная деформация по толщине для элемента от нулевой до стадии с индексом N .

Кроме исходной толщины, другие параметры могут быть взяты из граничных условий, геометрии штамповой оснастки, показателей анизотропии материала. Возможность целенаправленно менять показатели анизотропии показана в работах Ю.М. Арышенского, Ф.В. Гречникова. Несмотря на многочисленность варьируемых параметров, их влияние на толщину происходит в рамках, так называемого, малого параметра. Это позволяет линеаризовать функцию толщины, разложив её в ряд Тейлора относительно выбранных параметров. При использовании двух параметров варьирования, одним из которых должна быть исходная толщина заготовки, решение имеет вид

$$S_N = \frac{\sum_{i=1}^n (\varphi^2 \psi \Delta \rho)_{i,N} \sum_{i=1}^n (\varphi \psi \Delta \rho)_{i,N} -}{\sum_{i=1}^n (\varphi^2 \psi \Delta \rho)_{i,N}^2} \rightarrow$$

$$= \frac{\sum_{i=1}^n s_{\psi} (\varphi \Delta \rho)_{i,N} \cdot \sum_{i=1}^n (\varphi^2 \psi^2 \Delta \rho)_{i,N}}{\sum_{i=1}^n (\varphi^2 \psi^2 \Delta \rho)_{i,N} \cdot \sum_{i=1}^n (\varphi^2 \Delta \rho)_{i,N}},$$

(20)

$$\Delta \rho_i = \frac{\sum_{i=1}^n s_{\psi} (\varphi \psi \Delta \rho)_{i,N} - S_N \sum_{i=1}^n (\varphi^2 \psi \Delta \rho)_{i,N}}{S_N \sum_{i=1}^n (\varphi^2 \psi^2 \Delta \rho)_{i,N}}, \quad (21)$$

здесь

$$\varphi_{i,N} = \exp [e_{\psi i, N=0 \rightarrow N}(\rho_0)],$$

$$\psi_{i,N} = \frac{\partial}{\partial \rho} [e_{\psi i, N=0 \rightarrow N}(\rho_0)],$$

где ρ_0 — исходное (нулевое) значение варьируемого параметра, относительно которого происходит разложение в ряд толщины.

В работе получены решения для следующих пар варьируемых параметров:

- исходная толщина плоской заготовки и показатель трансверсально-изотропного тела,
- исходная толщина и величина относительного принудительного изменения толщины на границе,
- исходная толщина и коэффициент трения,
- исходная толщина и геометрия штамповой оснастки.

Варьируемые параметры оказывают влияние либо на соотношение напряжений, либо на величину деформации и перемещения. В зависимости от этого и определяются величины функции, учитывающей частную производную по варьируемому параметру. Варьирование коэффициента трансверсальной анизотропии производится через функцию, учиты-

1544772

вающую соотношение напряжений. Такой же подход используется при варьировании коэффициента трения. Принудительное изменение толщины оказывает влияние на величину перемещения. Варьируемыми параметрами геометрии штамповой оснастки могут быть только те, которые не оказывают влияния на конечные размеры штампованной детали. К ним могут относиться радиусы кривизны пуансона, матрицы на промежуточных переходах, угол наклона образующих рабочих поверхностей, зазор между пуансоном и матрицей.

В работе используются модели, которые полностью реализуют возможности формообразования. Поэтому коэффициенты вытяжки, диаметр заготовки выбраны из этого условия. При таком подходе влияние этих параметров на относительную толщину по средним значениям не превышает 7%.

При варьировании геометрических параметров необходимо учитывать их влияние как на перемещения, так и напряжения. В качестве геометрических параметров можно задать любой коэффициент, входящий в функции $\varphi, \psi, \lambda, \theta$. Например, при варьировании параметра, определяющего функцию относительного зазора, частную производную можно найти по формуле:

$$\psi_{i,j} = \frac{\partial}{\partial \alpha} [\Delta z_{i,j}(\alpha_n)] = \frac{1}{z_{i,j}} \frac{\partial z_{i,j}}{\partial \alpha},$$

где $z_{i,j} = a_0 + a_1 h_j + a_2 h_j^2$ зазор между матрицей и пуансоном, переменный по высоте детали.

Возможности направленного изменения толщины заготовки возрастают при использовании трех варьировемых параметров, одним из которых является исходная толщина заготовки, другая пара может быть выбрана из одной или разных областей: граничных условий, геометрии штамповой оснастки, механических свойств.

В этом случае система (3) представлена тремя уравнениями, и решение имеет вид

$$\Delta R_2 = \Delta R F_1 - F_2, \quad (22)$$

$$\Delta R = -\frac{R_1}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{R_1}{2}\right)^2 - R_2}, \quad (23)$$

$$S_N = \frac{a_1 + \Delta R \theta_2 + \Delta R \theta_3}{B_3 + A_4} \quad (24)$$

$$R_1 = \frac{A_1 + A_2}{B_1 + B_2}, \quad R_2 = \frac{A_4 + A_3}{B_1 + B_2},$$

$$A_1 = 2\theta_6\theta_1 - \theta_3\theta_6F_1 + \theta_3\theta_4F_2 + 2\theta_5\theta_2F_1 - 2\theta_1\theta_6F_2,$$

$$A_2 = -2\theta_8\theta_2F_1F_2 + 2\theta_7\theta_3F_1F_2 - \theta_4\theta_1 - \theta_1\theta_4F_1 - \theta_7\theta_8F_2,$$

$$A_3 = \theta_3\theta_2 - 2\theta_5\theta_2F_1 + \theta_9\theta_4F_2^2 - \theta_7\theta_3F_2^2,$$

$$A_4 = -\theta_1\theta_6 + \theta_1\theta_7F_2 + \theta_3\theta_6F_2,$$

$$B_1 = \theta_4\theta_2 + 2\theta_2\theta_7F_1 + \theta_8\theta_2F_1^2 - \theta_7\theta_3F_1^2,$$

$$B_2 = -\theta_4\theta_8 - \theta_7\theta_8F_1 - \theta_3\theta_4F_1,$$

$$B_3 = \theta_3 + 2\Delta P_1\theta_6 + \Delta P_1^2\theta_4,$$

$$B_4 = 2\Delta P_2\theta_3 + 2\Delta P_1\Delta P_2\theta_7 + \Delta P_2^2\theta_9.$$

$$F_1 = \frac{\theta_3\theta_4 - \theta_2\theta_7}{\theta_2\theta_8 - \theta_3\theta_7}, \quad F_2 = \frac{\theta_2\theta_5 - \theta_3\theta_6}{\theta_2\theta_8 - \theta_3\theta_7}$$

В приведенных выражениях приняты следующие обозначения

$$\theta_1 = \sum_{i=1}^N S_{g_i} (\varphi \Delta \rho)_{i,N}, \quad \theta_6 = \sum_{i=1}^N (\varphi^2 \psi_i \Delta \rho)_{i,N},$$

$$\theta_2 = \sum_{i=1}^N S_{g_i} (\varphi \psi_i \Delta \rho)_{i,N}, \quad \theta_7 = \sum_{i=1}^N (\varphi^2 \psi_i \psi_i^2 \Delta \rho)_{i,N},$$

$$\theta_3 = \sum_{i=1}^N S_{g_i} (\varphi \psi_i^2 \Delta \rho)_{i,N}, \quad \theta_8 = \sum_{i=1}^N (\varphi^2 \psi_i^2 \Delta \rho)_{i,N},$$

$$\theta_4 = \sum_{i=1}^N (\varphi^2 \psi_i^2 \Delta \rho)_{i,N}, \quad \theta_9 = \sum_{i=1}^N (\varphi^2 \Delta \rho)_{i,N},$$

$$\theta_5 = \sum_{i=1}^N (\varphi^2 \psi_i^2 \Delta \rho)_{i,N}, \quad (\psi_i)_{i,N} = \frac{\partial}{\partial \Delta P_1} [c_{i,N \rightarrow 0 \rightarrow N}(P_0, P_{20})],$$

$$(\psi_i^2)_{i,N} = \frac{\partial}{\partial \Delta P_2} [c_{i,N \rightarrow 0 \rightarrow N}(P_0, P_{20})].$$

Следует подчеркнуть то важное обстоятельство, что значения частных производных как для случая двух, так и трех параметров определяются с использованием одинаковых зависимостей.

Возможность использования двух или трех параметров при решении вариационной задачи представлена большим числом их различных сочетаний и потому требует применения системного анализа проектируемого процесса.

Следует отметить то обстоятельство, что задача имеет решение независимо от способа штамповки, так как функционал (2) имеет минимум для любой модели формообразования, если в параметры варьирования входит толщина исходной плоской заготовки.

В третьей главе рассматриваются вопросы проектирования технологических процессов с учетом направленного изменения толщины заготовки с использованием основных формообразующих операций вытяжки. Показано, что наиболее универсальными моделями вытяжки являются для первого перехода вытяжка в штампе с усеченным коническим прижимом, для второго – вытяжка с активными силами трения и возможным принудительным утонением торца заготовки. Представленные модели, кроме возможностей направленного изменения толщины, обладают повышенной степенью формообразования на 10-20%.

Установлены границы применимости выбранных моделей, как по относительной толщине исходной заготовки, так и по величине максимальной разнотолщинности.

При вытяжке в штампе с усеченным коническим прижимом, как показали исследования, критическая толщина заготовки определена стадией формовки плоской заготовки в коническую чашу. Между коэффициентом вытяжки и критической относительной толщиной установлены зависимости на основе приближенного условия потери устойчивости, предложенные Л.А. Шофманом.

$$K_0 = \frac{K_1}{2 - \sqrt{K_1^2 \sin^2 \alpha_k - (1 - \sin^2 \alpha_k)}}, \quad (25)$$

$$\text{где} \quad K_1 = \frac{\sin^2 \alpha_k}{-20 \bar{S}_N + \sqrt{20 \bar{S}_N^2 (1 - \sin^2 \alpha_k) - \sin^2 \alpha_k^2}}, \quad (26)$$

где $\bar{S}_N$ – относительная толщина заготовки,
 α_k – угол конусности матрицы,

K_p - коэффициент вытяжки.

Полученные результаты проверялись экспериментально. Для этой цели использовалась штамповая оснастка с оптимальным углом конусности $\alpha_k = 25^\circ$ и различными геометрическими размерами пуансонов и матриц. Материалом для заготовок служили сплавы на медной основе. Результаты показывают, что для относительных толщин $0.009 + 0.012$ предельный коэффициент вытяжки, ограниченный потерей устойчивости, может достичь значения 2.6. Для более толстых заготовок коэффициент ограничен обрывом дна. Исследования показали, что с ростом относительной толщины заготовки наблюдается уменьшение предельного коэффициента вытяжки. Используя критерий Л.Д. Томленова, установлена возможность однопереходной модели вытяжки для получения детали с максимальной разнотолщинностью

$$\Delta S_{\max} = S_n [K_p^{1/\mu} - \exp(\gamma_n^{1/\mu-2})], \quad (27)$$

где μ - показатель анизотропии трансверсально-изотропного металла,

γ_n - показатель степенной аппроксимации кривой упрочнения металла.

Фактор использования операции вытяжки в штампе с усеченным коническим прижимом дает наиболее благоприятную возможность получения элор, увеличивающих значения толщин к торцу детали. Однако это не исключает использования модели для других видов заданных толщин, например, для постоянных. В работе определены обобщенные варьируемые параметры для однопереходной модели, основанной на вытяжке в штампе с усеченным коническим прижимом. Ими являются толщина исходной плоской заготовки и коэффициент трения.

Результаты теоретического анализа подтверждены экспериментально. В качестве заданных толщин использовались значения, полученные при вытяжке для разных материалов и условий (Ст.3, БрХ-08). Исследования показали, что с изменением величины и характера заданной толщины меняются и значения варьируемых параметров. Так уменьшение коэффициента трения связано с получением более равномерной толщины детали, получение заданной толщины с разнотолщинностью, оцениваемой формулой (27), дает значения коэффициентов трения в пределах 0.1 - 0.2.

Исследования показали, что использование двухоперационной мо-

дели, основанной на операциях вытяжки с активными силами трения на последующем переходе и возможным принудительным утонением торца заготовки имеет больше возможностей для направленного изменения её толщины. Это проявляется в разнотолщинности, коэффициенте вытяжки, форме детали. Анализ последующей операции вытяжки показал, что минимальная критическая толщина заготовки определена первой операцией вытяжки, а предельный коэффициент – обрывом на заготовки.

Использование в штампе устройства, создающего активные силы трения, снижает напряжения в опасном сечении и позволяет увеличить коэффициент вытяжки или снизить величину утонения. Это обстоятельство является дополнительным фактором для регулирования толщины. В работе проведены исследования по выявлению факта увеличения коэффициента вытяжки. Установлено, что максимальное значение коэффициента вытяжки получит, если создать такие условия, что рост усилия вытяжки на дно заготовки будет компенсироваться ростом активных сил трения за счет высоты её цилиндрической части. Полученные результаты теоретического анализа говорят о возможности увеличения коэффициента вытяжки на 10–12%. Данные подтверждены экспериментально на сплавах типа АДО по специально разработанной методике. Для рассматриваемой модели установлены границы области её использования в зависимости от относительной толщины заготовки в случае, когда устройство содержит упругое металлическое кольцо. В основу положено неравенство

$$\frac{\sigma_{\text{кк}}}{E_{\text{кк}}} \geq \frac{\Delta \delta_{\text{кк}}}{r_{\text{кк}}}, \quad (28)$$

где $\sigma_{\text{кк}}, E_{\text{кк}}$ – предел прочности, модуль упругости материала кольца, $r_{\text{кк}}$ – внутренний радиус кольца,

$\Delta \delta_{\text{кк}}$ – приращение толщины на кромке заготовки.

Соотношение дало возможность установить максимальную относительную толщину заготовки, не превышающую 0.01.

Установлено, что обобщенными варьируемыми параметрами для вытяжки последующих переходов, кроме исходной толщины плоской заготовки, являются радиус скругления пуансона первого перехода и величина принудительного утонения на заключительных стадиях вытяжки последующего перехода. В работе приведены решения для расчета одного, двух, трех параметров варьирования двухоперационной модели. Полученные решения подтверждены экспериментом. Модель с активными

силами трения дает возможность в рамках двух и трехпараметрической задачи получать детали с толщиной стенки, которая не более чем на 10% отличается от заданного постоянного значения для материала Л63. Интересно отметить то обстоятельство, что решения двух и трехпараметрической задачи могут совпадать, если один из параметров варьирования не оказывает значительного влияния на толщину.

При решении вариационной задачи с использованием операций вытяжки достаточно применить дискретную модель с 6-7 характерными элементами и 2-4 стадиями формообразования.

Последние определены положениями исходной заготовки, детали и промежуточными стадиями, на которых действуют наибольшие напряжения.

В четвертой главе установлены возможности направленного изменения толщины заготовки с использованием операций вытяжки и обжима. Модель, основанная на этих операциях, является наиболее универсальной как для деталей с цилиндрическим торцом, так и деталей с расширяющейся юбочной частью.

При обжиге границы применимости процесса обусловлены критической относительной толщиной перед началом гофрообразования в виде кольцевых или продольных складок. Исследования показали, что продольные складки образуются в зоне обжима деталей конического типа при развитой в тангенциальном направлении пластической деформации. Для деталей с ярко выраженной выпуклой формой поверхности неустойчивость наблюдается в виде кольцевых складок в цилиндрической части. С использованием энергетического критерия С.П. Тимошенко, получена аналитическая зависимость для этого вида неустойчивости при обжиге-осадке

$$\frac{S}{S_0} = \frac{S_0}{S_0} \exp\left(\frac{\pi^2 \alpha}{3} - \rho_{e, 4 \rightarrow 0 \rightarrow 2} \sqrt{1 - \mu^2}\right), \quad (29)$$

где $\rho_{e, 4 \rightarrow 0 \rightarrow 2}$ — интенсивность деформации, полученной цилиндрической частью заготовки на операции вытяжки.

Результаты расчета по формуле (29) правильно отражают характер изменения толщины заготовки в момент неустойчивости для разных материалов (латуни, дуралюмина, углеродистой стали).

Образование кольцевых складок для полрой заготовки с дном и расширяющейся юбочной частью имеет другой механизм. Это объясняется тем, что складка образуется в месте скругленного перехода цилин-

дрической части в юбочную. Критерием неустойчивости взято равенство радиуса переходной части радиусу свободного изгиба при условии максимальных значений напряжений $\sigma_0 = \sigma_s = -\sigma_s$. В расчете используются известные формулы для радиуса свободного изгиба, полученные Е.А. Поповым.

Обжим заготовки, у которой в донной части имеется отверстие происходит с одновременной отбортовкой. Диссертантом выполнены исследования, которые приводят к выводу, что получение деталей с отбортованными кромками, перпендикулярными цилиндрическому борту, происходит с величиной раздачи, близкой к единице.

Проведенные для обжима исследования дают возможность использовать техпроцесс штамповки, в котором операция обжима совмещена с отбортовкой, а для деталей типа цилиндрического стакана — с операцией осадки.

Модель штамповки, основанная на операциях вытяжки и последующего обжима, совмещенного с отбортовкой, осадкой дает возможность получать детали оживальной формы с цилиндрическим бортом, с бортом выпукло-вогнутой поверхности, без борта. Для них в работе приведены зависимости дополняющие (6 + 17), позволяющие установить толщину штампованных деталей по используемому в работе методу. Зависимости проверились на деталях типа полусферы, стенки камеры сгорания из материалов ВТ-14, БрХ-08 (см. рисунок).

В рамках рассматриваемой модели установлены оптимальные параметры варьирования, условия их использования.

В работе показано, что вариационная задача имеет место для одного, двух и трехпараметрического вариантов. Приведены области их применения. Выявлено, что для двухпараметрической модели в качестве варьируемых параметров целесообразно использовать радиус скругления пуансона на первой операции вытяжки или деформацию по толщине, имеющую место в результате принудительного утолщения на границе.

При этом установлено, что функция Ψ в уравнениях (20, 21) в первом случае определяется для элементов заготовки, находящихся в зоне радиуса скругления пуансона первого перехода

$$\Psi_{\theta, z} = \frac{\partial \Delta \rho_{s, z}}{\partial z} = \frac{K_{\theta}}{K_{\theta n}} \left(\frac{\sigma_{\theta, z}}{K} \right)^{\frac{1-n}{n}} \frac{\partial \sigma_{\theta, z}}{\partial z} \quad (30)$$

где $\sigma_{\theta, z}$ — приращение деформации по толщине в зоне скругле-

ния пуансона на операции вытяжки,

K - коэффициент степенной аппроксимации кривой упрочнения,

K_μ - коэффициент, учитывающий анизотропию материала,

r_n - радиус скругления пуансона на операции вытяжки,

$\sigma_{\phi,1}$ - меридиональное напряжение, действующее в донной части заготовки при вытяжке,

r_0 - исходное значение радиуса скругления пуансона.

Для случая использования в качестве варьируемого параметра деформации по толщине, происходящей в результате принудительного утолщения, функция имеет вид

$$\psi_{i,4} = \frac{\partial}{\partial \Delta \epsilon_{sv,4}} \cdot \frac{\sqrt{1-\mu^2} \cdot \epsilon_{ei,4} \rightarrow 0 \rightarrow 1}{\sqrt{1 + \left(\frac{\Delta \epsilon_{\phi}}{\Delta \epsilon_s} \right)_{i,4}^2 + 2\mu \left(\frac{\Delta \epsilon_{\phi}}{\Delta \epsilon_s} \right)_{i,4}}} \quad (31)$$

где $\Delta \epsilon_{s,i,4}$, $\Delta \epsilon_{\phi,i,4}$ - приращения деформаций по толщине и в тангенциальном направлении на стадии обжима-осадки,

$\Delta \epsilon_{s,i,4}$ - величина принудительного утолщения элемента на границе,

$\Delta \epsilon_{sv,4}$ - исходная величина принудительного утонения,

$\Delta \epsilon_{s,i,4 \rightarrow 0 \rightarrow 1}$ - интенсивность деформации по толщине на стадии обжима-осадки.

Зависимости (30,31) используются и для трехпараметрической модели. Они входят составной частью в решения (22 + 24), при этом принимается условие $(\psi)_{i,N} = \psi_{5,3}$, $(\psi)_{i,N} = \psi_{4,4}$.

Проверка полученных решений в рамках модели, основанной на операциях вытяжки и последующего обжима, совмещенного с отбортовкой и осадкой, проводилась на деталях типа полусфер и типа сопла камер сгорания ЖРД. Кроме того в результате исследования установлено, что решение вариационной задачи, основанной на двухоперационной модели, можно связать с моделью, имеющей большее число переходов, что вариационная задача, связанная с минимизацией функционала (2) обеспечивает минимальные энергетические затраты.

В этой главе приведены также данные расчета заданной толщины по размерам механически обработанной детали на основе приведенного в работе метода и с использованием зависимости (4).

В пятой главе приведены методика проектирования технологического процесса с учетом направленного изменения толщины заготовки,

результаты опытно-промышленного опробования и внедрения. Методика составлена по результатам исследований, приведенных в предыдущих главах, и отличается от традиционной тем, что в ней расчет технологических параметров производится с учетом получения толщины детали, которая соответствовала бы заданной. Для этого используются во-первых, выбор модели формообразования (операций и способов штамповки), во-вторых, определение основных технологических параметров, в том числе и варьируемых. Условно первый этап можно характеризовать как этап системного анализа, второй – как этап количественного определения технологических параметров. Такая методика не меняет традиционного принципа проектирования технологических процессов.

В этой главе приведены исследования, осуществленные в промышленных условиях. Они имеют большое значение для деталей ответственного назначения, применяемых в конструкциях жидкостных реактивных двигателей, в авиационной технике, так как результаты экспериментов обеспечивали кратчайший путь по практической реализации.

Приведены результаты исследования и внедрения пяти деталей ЖРД различного назначения и размеров из сплава ВрХ-08. Новые технологии позволили не только повысить выход годного до 30% (экономить до 100кг материала на одну деталь), но и в несколько раз снизить трудоемкость на операциях штамповки, благодаря использованию новых способов формообразования.

Детали авиационной техники представлены полусферами (25ХГСА), форсажной камерой (ХН60ВТ), форсункой (ХН70Ю) самолетного двигателя. Новые технологии спроектированы с учетом требований к заданной толщине и позволили не только повысить выход годного материала и снизить трудоемкость, но и для форсунки значительно снизить трудоемкость механической обработки.

Следует подчеркнуть, что в промышленных условиях проведены исследования, подтверждающие надежность получения заданных толщин, в которых используется методика, основанная на методах математической статистики.

Опыт внедрения деталей для товаров народного потребления показал, что разработанная методика проектирования может быть распространена на детали, заданная толщина которых обусловлена не только эксплуатационными, но и организационными условиями, связанными с переходом на новые способы штамповки.

В работе приведены данные, что результаты промышленных исследований подтвердили разработанную методику проектирования, и используемые в ней методы расчета.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. В работе на основе проведенных исследований даны научно-технологические решения, которые положены в основу создания методики проектирования технологических процессов листовой штамповки для деталей с заданными размерами по толщине. Результаты внедрения показывают, что использование методики и приемов расчета ускоряет научно-технический прогресс в отраслях машиностроения и авиационно-космической техники.

2. Разработан метод направленного изменения толщины заготовки благодаря комплексной увязке теоретических и технологических решений и по своей сути относится к вариационной задаче, так как базируется на минимизации функционала, обеспечивающего наилучшее равномерное приближение технологически возможной толщины штампованной детали к заданной.

Варьирование производится по технологическим параметрам, в качестве которых используются: толщина плоской заготовки, граничные условия, геометрия штамповой оснастки, механические свойства материала заготовки в рамках выбранной модели формообразования, основанной на использовании традиционных операций листовой штамповки (вытяжки, обжима, отбортовки, протяжки, осадки).

Эффективность технологических решений в значительной степени обусловлена разработанными новыми способами формообразования, устройствами, которые защищены авторскими свидетельствами, патентами и применяются в промышленности.

3. Выявлено, что решение вариационной задачи несет в себе признаки, обеспечивающие минимальные энергетические затраты для технологического процесса.

4. Установлено, что заданную толщину штампованной детали определяют её эксплуатационные характеристики, минимальная трудоемкость процесса штамповки, требования с позиций организации производства.

Разработаны методы определения заданной толщины для штампованной детали по геометрическим размерам механически обработанной детали. Заданные размеры по толщине определены с учетом необходи-

мх требований, предъявляемых к штампованным деталям: гладкости образующей срединной поверхности, возможности беспрепятственного удаления детали из штампа.

5. Аналитические зависимости для определения толщины штампованной детали получены на основе кинематических и статических решений. Для них, как показали расчеты, наиболее рациональным является использование приближенных последовательных методов, основанных на разложении решения в степенной ряд и представлении решения в виде кусочно-линейной функции. В качестве нулевого решения используется соотношение средних толщин детали и заготовки, найденное из оценочных решений и близкое к единице.

6. Установлено, что оптимальной степенью уравнивания регрессии с использованием ортогональных полиномов Чебышева для обработки результатов замеров толщины является многочлен второго порядка. Он положен в основу классификации деталей по заданной толщине, которая может быть:

- постоянной,
- увеличивающейся к торцу детали,
- уменьшающейся к торцу детали.

7. Разработанные в настоящее время способы штамповки позволяют решить проблему получения толщины штампованной детали близкой к заданной толщине даже при разнотолщинности, достигающей 40-50%. К таким способам в первую очередь следует отнести вытяжку в штампе с усеченным коническим прижимом, последующую вытяжку с активными силами трения, вытяжку с последующим обжимом, осадкой, отбортовкой и др.

Выбранным методам решения по своей точности и возможностям удовлетворяют существующие в настоящее время традиционные способы штамповки деталей с заданной толщиной стенки.

8. Установлены границы применимости выбранных процессов: по относительной толщине исходной плоской заготовки, по величине максимальной разнотолщинности, по коэффициентам формообразования. Так для штампа с усеченным коническим прижимом относительная толщина исходной плоской заготовки ограничена потерей устойчивости заготовки при формовке её в чашу. Она не должна быть меньше 0.008 при угле конусности 25-30°. Относительная толщина исходной плоской заготовки при использовании активных сил трения в штампе последующих переходов ограничена упругими свойствами материала кольца. Она не превышает 0.01. При обжиме границы обусловлены поте-

рей устойчивости заготовки в виде гофрообразования. Кольцевые гофры наблюдаются при осадке, продольные – при обжиге деталей конического типа.

Исследования показали, что согласовывая параметры, устанавливающие границы применимости технологических процессов по толщине и коэффициентам формообразования, можно выбрать такие процессы, которые дают значительную экономию ресурсов, как по материалу на величину до 20–30%, так и по трудоемкости – в несколько раз.

9. Определены обобщенные варьируемые параметры. Для вытяжки первого перехода ими являются толщина исходной плоской заготовки и коэффициент трения, для двухпереходной вытяжки – толщина исходной плоской заготовки, радиус скругления пуансона первого перехода, величина принудительного утонения. Для модели, основанной на операциях вытяжки и последующего обжима, осадки, отбортовки обобщенными параметрами варьирования являются относительная толщина плоской заготовки, радиус скругления пуансона, величина принудительного утонения.

10. Разработанная методика проектирования технологических процессов листовой штамповки и используемые в ней методы расчета толщин, параметров варьирования дают результаты, которые согласуются с данными эксперимента, как в лабораторных, так и в промышленных условиях с погрешностью до 10–15%. Методика обладает универсальностью, так как решение вариационной задачи можно проводить для многооперационного процесса, насчитывающего больше двух операций. Она подтвердила свою практическую ценность, так как позволяет научно-обоснованно на стадии проектирования согласовать заданную и технологическую толщины деталей. Методика использовалась при создании новых технологических процессов, которые нашли применение в различных отраслях промышленности с экономическим эффектом около 0.9 млн. руб. в ценах 1991 года (треть из которого заслуга соискателя).

Основные положения диссертации опубликованы в 52 работах, в том числе:

1. Маслов В.Д., Чистяков В.П., Попов И.П. Изготовление емкостей высокого давления // *Авиационная промышленность.* – 1984. – №7. – С.38–39.

2. Маслов В.Д., Чистяков В.П., Попов И.П. Повышение равномерности толщины стенки штампованных конических оболочек // *Кузнечно-штамповочное производство.* – 1986. – №6. – С.14.

3. Маслов В.Д., Попов И.П., Гостев А.И. Снижение металлоемкости штампованных конических оболочек // Вестник машиностроения. - 1988. - №1. - С.48-50.

4. Маслов В.Д., Попов И.П. Малопереходная штамповка высоких конических деталей // Вестник машиностроения. - 1988. - С.41-42.

5. Маслов В.Д., Попов И.П. Интенсификация последующих переходов вытяжки конических деталей // Кузнечно-штамповочное производство. 1988. - №5. - С.18-19.

6. Маслов В.Д., Попов И.П., Карпукhin А.Н. Новая схема формообразования внутренней стенки сопла // Авиационная промышленность. - 1990. - №1. - С.12-14.

7. Попов И.П. Экспериментальное исследование вытяжки титановых сплавов при коэффициенте вытяжки $m = 0.62$ // Стали и сплавы цветных металлов: Межвуз. сб. - Куйбышев, 1974. - С.57-61.

8. Попов И.П. Определение силовых параметров процесса калибровки полусфер // Стали и сплавы цветных металлов: Межвуз. сб. - Куйбышев, 1974. - С.46-52.

9. Попов И.П. Влияние коэффициента трения на процесс осадки тонкостенной трубы в жестком контейнере // Теория и технология обработки металлов давлением. Межвуз. сб. - Куйбышев: Куйбышевский авиац. ин-т, - 1975. - С.65-68.

10. Попов И.П., Маслов В.Д. Устойчивость формоизменения цилиндрической оболочки в жестком контейнере // Теория и технология обработки металлов давлением. Межвуз. сб. - Куйбышев: Куйбышевский авиац. ин-т, - 1978. - С.78-80.

11. Попов И.П. Анализ процесса штамповки полусфер вытяжкой и обжимом // вопросы пластического формоизменения при производстве летательных аппаратов и двигателей. Межвуз. сб. - Куйбышев: Куйбышевский авиац. ин-т, - 1979. - С.65-71.

12. Попов И.П. Анализ процессов листовой штамповки авиационных двигателей с учетом изменения толщины заготовки. - Самара, 1992. - 115с. Рукопись представлена Самарским авиационным институтом. - Деп. в ВНИТИ 26.05.92, №1735-В-92.

13. Попов И.П., Маслов В.Д., Чистяков В.П. Совершенствование технологии штамповки деталей сужающейся формы // Авиационная промышленность. - 1984. - №4. - С.30-31.

14. Попов И.П., Маслов В.Д. Использование метода возмущения при определении технологических параметров штамповки авиационных деталей // Известия вузов. Авиационная техника. - 1985. - №4. -

15. Попов И.П., Маслов В.Д., Чистяков В.П. Штамповка равнопрочных сферических днищ // Кузнечно-штамповочное производство. - 1986. - №5. - С.18-19.

16. Попов И.П. Исследование процессов листовой инструментальной штамповки деталей авиационной техники: Лабораторный практикум. - Куйбышев: Куйбышевский авиац. ин-т, 1988. - 48с.

17. Попов И.П. Анализ процессов листовой штамповки авиационных деталей с учетом изменения толщины заготовки. - Самара, 1992. - 115с. Рукопись представлена Самарским авиационным институтом. - Деп. в ВИНТИ, 1992, №1735-В-92.

18. Чистяков В.П., Маслов В.Д., Попов И.П. Штамповка камер сгорания // Авиационная промышленность. - 1981. - №9. - С.21.

19. Чистяков В.П., Попов И.П., Маслов В.Д. Штамповка облочков сопла // Авиационная промышленность. - 1984. - №2. - С.13-14.

20. Чистяков В.П., Маслов В.Д., Попов И.П. Штамповка конических оболочек из цилиндрических заготовок с дном // Вестник машиностроения. - 1984. - №9. - С.52-54.

Новые технические решения, реализованные в работе, защищены авторскими свидетельствами на изобретения: №550200, №633646, №811573, №852407, №867470, №1038007, №1050778, №1125843, №1132407, №1266607, №1304956, №1349836, №1400723, №1454545, №1666242, №1700846.