

4558546

на правах рукописи

ЕВСЮКОВ СЕРГЕЙ АЛЕКСАНДРОВИЧ

РАЗРАБОТКА ПРОЦЕССОВ И МЕТОДОВ ПРОЕКТИРОВАНИЯ
ЛИСТОВОЙ ШТАМПОВКИ ДЕТАЛЕЙ ИЗ ТРУБНЫХ ЗАГОТОВОК

Специальность 05.03.05 - Процессы и машины обработки
давлением

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук



Москва - 1998 г.

Работа выполнена в Московском государственном техническом
Университете имени Н. Э. Баумана

Научный консультант:

Заслуженный деятель науки и техники Российской Федерации
доктор технических наук, профессор Семенов Е. И.

Официальные оппоненты:

Заслуженный деятель науки и техники Российской Федерации
доктор технических наук, профессор Матвеев А. Д.
доктор технических наук, профессор Степанский Л. Г.
доктор технических наук, профессор Ковалев В. Г.

Ведущая организация: НПО "ВПТИТЯЖМАШ"

Защита состоится 27 мая 1998 г. в 14-30 часов
на заседании Ученого Совета Д053.15.05 при
нахождении:

в здании ул. д. 5.

Судебная в библиотеке

в одном экземпляре, заверенный
по указанному адресу.

27 мая 1998 г.

1558516

h

Семенов В. И.

Объем 2,0 п. л. Тираж 100 экз.
Типография МГТУ им. Н. Э. Баумана

НА ДОМ
НЕ ВЫДАЕТСЯ

Актуальность проблемы. Важнейшими задачами, стоящими перед промышленностью, являются повышение качества, выпускаемой продукции, экономия материала и повышение производительности труда. Ресурсосберегающее 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 является повышение коэффициента использования металла. Это достигается путем максимального приближения объема исходной заготовки к объему требуемого изделия.

В современной технике существует большой класс деталей, отличающихся наличием большого центрального отверстия. Это различные конические переходники для соединения трубопроводов, фланцы, шайбы, прокладки, диски трения и т.д. Значительной экономии металла в штамповочном производстве, при их изготовлении, можно добиться за счет применения трубной заготовки вместо листовой и цельнокатанной. При этом коэффициент использования металла повышается в несколько раз и, соответственно, уменьшается обработка резанием.

Эффективность технологического процесса в листовой штамповке, кроме коэффициента использования металла (КИМ), оценивается по коэффициенту формоизменения, который достигает за один рабочий ход прессы. Значительно увеличить этот показатель можно за счет совмещения двух и более операций в одном технологическом переходе. В частности, совмещение в одном переходе таких операций как обжим и раздача позволяет практически удвоить допустимый коэффициент формоизменения, что сокращает цикл изготовления продукции и увеличивает производительность труда. Кроме того, в использовании деталей, полученных совмещением операций обжима и раздачи в качестве заготовки для последующего деформирования, содержатся значительные неиспользованные резервы для расширения номенклатуры деталей, изготавливаемых с высоким КИМ. Отметим также, что сокращение числа переходов штамповки является эффективным путем решения проблем автоматизации производства.

Однако, штамповку деталей из трубной заготовки за счет совмещения операций обжима и раздачи еще недостаточно широко применяют в промышленности. Поэтому многие производственные детали, для изготовления которых было бы рационально применение трубной заготовки, в настоящее время все еще получают традиционными способами, что требует большой трудоемкости, больших ресурсо- и энергозатрат, сни-

91585516

НТБ МГТУ им. Н.Э. Баумана



1558516

Евсюков С.А. Разработка пр

МГТУ
им. Н.Э. Баумана
БИБЛИОТЕКА

жает качество и производительность, увеличивает себестоимость изделий. Это во многом объясняется ограниченностью разработанных технологических схем штамповки и отсутствием надежных рекомендаций, как для расчета многих технологических параметров самих процессов (особенно многопереходных), так и для проектирования штамповой оснастки. Следует отметить, что при проектировании последующих переходов штамповки необходимо учитывать влияние технологической наследственности предыдущих переходов штамповки, которая выражается в переменной толщине, упрочнения (для холодного деформирования) и температуры (для горячего деформирования) заготовки. Существенно сдерживает внедрение таких процессов, также отсутствие оборудования для получения цилиндрических трубных заготовок и их нагрева.

В связи с этим большой практический и научный интерес представляют разработка и исследование технологических процессов, основанных на использовании совмещения операций обжима и раздачи трубной заготовки. Поэтому создание научно-обоснованных, инженерных методик расчета подобных процессов является актуальной, крупной научно-технической задачей, внедрение которых вносит значительный вклад в ускорение научно-технического прогресса.

Объектом исследования в данной работе являются процессы листовой штамповки, в которых на первом переходе в результате совмещения операций обжима и раздачи из трубной заготовки получается конический полуфабрикат, а на последующих - полученный полуфабрикат подвергается дальнейшему деформированию. При этом, в зависимости от соотношения геометрических размеров, может осуществиться или вытяжка, или отбортовка, или их совмещение в одних процессах, или же дополнительные операции обжима и раздачи в других процессах.

Цель и задачи исследования.

Целью работы является разработка и внедрение ресурсосберегающих технологических процессов изготовления изделий из трубных заготовок в холодном и горячем состоянии.

Для достижения поставленной цели в работе необходимо было решить следующие задачи:

- 1 - разработать новые технологические схемы штамповки, значительно расширяющие номенклатуру деталей, получаемых с высоким КИМ.
- 2 - совершенствование метода анализа задач обработки металлов давлением, основанного на совместном решении уравнений равновесия и условия пластичности, применительно к процессам деформирования

трубных заготовок; и, в частности, разработки методики определения напряженно-деформированного состояния заготовки в формоизменяющих операциях листовой штамповки с учетом объемности схемы напряженно-деформированного состояния;

3 - разработать методику анализа напряженного состояния заготовок, имеющих исходную переменную толщину и переменные механические свойства вдоль образующей в основных формоизменяющих операциях листовой штамповки;

4 - разработать методику учета неравномерности и нестационарности температурного поля заготовки в операциях горячей листовой штамповки;

5 - исследование закономерностей формоизменения в совмещенном процессе обжим-раздача в условиях холодной и горячей деформации, а также определение соотношения коэффициентов обжима и раздачи в этом процессе.

6 - провести анализ изменения размеров заготовки в формоизменяющих операциях листовой штамповки, в том числе с учетом объемности схемы напряженно-деформированного состояния;

7 - исследование изменения температуры заготовки в операциях обжима и раздачи при горячем деформировании трубной заготовки, а также установления оптимальных параметров деформирования сварного шва, обеспечивающих достижение максимальной степени деформации и минимальной анизотропии свойств.

8 - опробование и внедрение разработанных в работе положений по совершенствованию технологии изготовления изделий из цилиндрической трубной заготовки и методов проектирования штампов в промышленных условиях.

Научная новизна.

Разработана методика исследования формоизменяющих процессов листовой штамповки с учетом влияния технологической наследственности предыдущих переходов штамповки.

Создана методика анализа напряженно-деформированного состояния заготовки в формоизменяющих операциях листовой штамповки с учетом объемности схемы напряженно-деформированного состояния.

Предложена математическая модель и методика анализа напряженно-деформированного состояния заготовок в операциях горячей листовой штамповки в условиях неравномерного и нестационарного температурного поля.

Разработаны классификации процессов листовой штамповки и технологических факторов, учитываемых при их анализе.

Использован новый для горячей листовой штамповки подход к решению краевых задач теплопроводности (метод компенсированных объемов), сочетающий преимущества методов конечных элементов и конечных разностей.

Новые технические решения защищены 10-ю патентами СССР и России.

Основные положения вынесенные автором на защиту.

- теоретические зависимости, полученные при анализе напряженного и деформированного состояний заготовок в основных формоизменяющих операциях листовой штамповки (обжим, раздача, вытяжка и отбортовка), в том числе с учетом объемности схемы напряженно-деформированного состояния;

- математические модели и результаты анализа напряженно-деформированного состояния заготовок в операциях горячей листовой штамповки в условиях неравномерного и нестационарного температурного поля;

- методика анализа напряженного состояния заготовки, имеющей переменное упрочнение и толщину, в формоизменяющих операциях листовой штамповки;

- результаты исследования распределения температуры в очаге деформации в операциях обжима и раздачи при горячей деформировании цилиндрической трубной заготовки;

- новые ресурсосберегающие технологические процессы получения изделий из цилиндрической трубной заготовки с использованием совмещения формоизменяющих операций листовой штамповки, а также оборудование для их осуществления и результаты внедрения в промышленность;

- результаты исследования деформирования сварного шва в условиях горячей деформации.

Достоверность результатов. Теоретические исследования выполнены с использованием методов, принятых в механике сплошных сред и теории пластичности. Экспериментальные исследования проводили на основе теории инженерного эксперимента с проверкой адекватности теоретических формул реальным процессам деформирования по статистическому критерию Стьюдента. При этом погрешность аналитических зависимостей, полученных в ходе теоретических исследований составила при расчете геометрических размеров не более 3%. Расхождение при определении сил деформирования, являющихся интегральной оценкой

напряженного состояния, составляет 10-15%. Эксперименты неоднократно дублировали и сравнивали с аналогичными данными других исследователей, что показало их высокую воспроизводимость.

Точность математического моделирования подтверждена применением фундаментальных законов тепло-массообмена с соответствующими граничными условиями и современных численных методов реализации математических моделей; использованием достоверных результатов, полученных другими исследователями и экспериментальными данными, показывающими их хорошее качественное совпадение, при численной сходимости в пределах 10-15 %.

Достоверность теоретических данных подтверждена также практическим использованием результатов работы.

Практическая ценность. Разработаны экономичные технологические процессы изготовления широкой номенклатуры деталей с большим центральным отверстием из трубной заготовки и методики их проектирования; реализующие уточненные математические модели формирующих операций листовой штамповки, и позволяющие, с достаточной для практики точностью, определять необходимые технологические параметры без предварительного проведения технологических проб.

Предложена новая классификация технологических процессов, позволяющая разрабатывать новые схемы технологических процессов, основанных на совмещении операций листовой штамповки совмещенных или разделенных во времени.

На основании проведенных исследований разработаны девять новых способов штамповки (получены патенты), запатентована конструкция штампа и предложено специализированное оборудование для получения и нагрева цилиндрических трубных заготовок.

Реализация работы в промышленности. Результаты работы были использованы для разработки технологических процессов получения пустотелых деталей с конической и фасонной боковой поверхностями, а также процессов изготовления плоских фланцев и дисков трения. Указанные технологические процессы внедрены в промышленных условиях на НПО "Криогенмаш", ММЗ "Сатурн" и ПО ЧЗПТ.

Апробация работы. Основные положения диссертации были доложены и обсуждены на научных семинарах кафедр "Машины и автоматизация обработки давлением" и "Технология конструкционных материалов" ИГТУ им. Н. Э. Баумана в 1985-1998 г.г. По материалам работы были сделаны доклады на Всесоюзных научно-технических конференциях "Современные

проблемы технологии машиностроения" (Москва 1986 г.) и "Прогрессивные ресурсосберегающие технологические процессы в холоднштамповочном производстве; САПР штамповой оснастки в сельхозмашиностроении" (Ростов-на-Дону 1990 г.). На Всероссийских конференциях "Юбилейная научно-техническая конференции МГТУ им. Н.Э.Баумана" (Москва 1993) "Оборудование и процессы обработки давлением: юбилейная научно-техническая конференция посвященная 100-летию со дня рождения профессора А.И.Зими́на" (Москва 1995). Образцы деталей, полученных на основании разработок диссертации, экспонировались на ВДНХ СССР на трех всесоюзных выставках: "Криогеника-85" (диплом), "Научно-техническое творчество молодежи" 1986 г., "Автоматизация заготовительного производства" 1988 г.

Публикации. По теме диссертации опубликованы 37 печатных работ, в том числе 10 патентов.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, восьми глав, общих выводов, списка литературы и приложений. Работа содержит 144 рисунка, 76 таблиц, список литературы из 174 наименований. Общий объем работы 432 страницы.

Во введении обоснована актуальность и сформулированы цель и задачи работы, изложена научная новизна, практическая значимость и результаты, выносимые на защиту.

В первой главе проводится обзор работ, посвященных изучению операций обжима, раздачи, вытяжки и отбортовки, а также совмещению операций обжима с раздачей и вытяжки с отбортовкой. Кроме того, проводится обзор работ, посвященных вопросам изучения теплообмена заготовки со штампом в процессе деформирования, а также вопросам моделирования контактного теплообмена.

Среди работ, посвященных анализу напряженного состояния, выделены те, в которых рассматриваются заготовки, имеющие исходные неравномерные механические свойства и переменную толщину стенки.

Так при определении напряженного состояния в операциях обжима и раздачи для заготовок, имеющих исходную переменную толщину стенки, в ряде работ О.В.Попова, В.И.Ершова, В.Н.Ойхели задаются изменением толщины в виде достаточно простой аналитической функции, что позволяет получить замкнутые решения, учитывающие влияние основных факторов процесса.

Рассматривая второй и последующие переходы вытяжки без промежуточного отжига, неравномерность упрочнения и толщины заготовки

учитывают осредненно или введением дополнительного коэффициента (Е. А. Попов, Л. А. Шофман). Имеется анализ достаточно строго учитывающий неравномерность упрочнения материала по высоте вытянутого станкана, но только для стационарного очага деформирования (В. Ф. Константинов).

Вопрос о влиянии неравномерности толщины стенки и механических свойств материала на напряженное состояние заготовки при отбортовке изучен недостаточно.

Работы по изучению совмещения операций обжима и раздачи носят, в основном, экспериментальный характер, причем практические рекомендации не однозначны (В. Н. Фролов, М. Н. Горбунов, Е. А. Попов, Г. М. Дегтярев, Б. Н. Березовский, Г. А. Розов, А. П. Суворов).

Все перечисленные решения получены с учетом того, что схема напряженного состояния является плоской. Решения, учитывающие объемность схемы напряженного состояния отсутствуют.

При достаточно широком освещении в технической литературе вопросов, связанных с изменением толщины стенки заготовки в операциях обжима и раздачи, вопрос об изменении длины образующей изучен недостаточно, причем высота исходной заготовки определяется по чертежу готовой детали из условия постоянства объема. (Д. А. Аверкиев, М. Н. Горбунов). Интегрирование уравнений связи напряжений и деформаций проводится приближенно, с осреднением подинтегральных функций и введением дополнительных коэффициентов (Е. А. Попов, Ю. А. Розов). При этом схема напряженного состояния принимается плоской.

Все исследования процессов теплообмена в операциях обработки металлов давлением можно условно разделить на три основных направления: первое - теплообмен между заготовкой и инструментом; второе - теплопроводность и распределение температуры в самой заготовке; третье - теплопроводность и распределение температуры в инструменте. Несмотря на то, что первое является, большей частью, причиной перераспределения температур во втором и третьем случаях, оно менее развито, тогда как по второму и третьему направлению имеются достаточно отработанные и обоснованные методики.

Принято, что исследование контактного теплообмена предполагает расчленение процесса на элементы как во времени, так и в пространстве, т. е. расчленение контактной системы на два независимых объекта (поковку и инструмент) и их самостоятельный расчет (Б. Ф. Трахтенберг, Л. Д. Демидов, М. С. Кенис).

Необходимость расчленения процесса теплопередачи в пространстве вызывается тем, что тепловой контакт сопровождается изменением размеров элементов тел и их смещением по контактным поверхностям, что позволяет на каждом этапе осреднять характерные размеры деформируемого тела и выделять участки контактной поверхности, на которых можно осреднить температуру контакта и мощность контактного воздействия. При этом контур контактной поверхности инструмента и поковки "конструируется" из набора элементарных фигур (линия, плоскость, круг, цилиндр, конус), для которых интегрирование фундаментального решения по контуру позволяет выразить температуру в явном виде через известные функции. Получаемая для горячей штамповки конфигурация тел, чаще всего, позволяет перейти при анализе температурного поля к одномерной задаче, что возможно, если радиус кривизны стенки превышает ее толщину в 5-10 раз (Е.М. Макушок, А.С. Матусевич, В.П. Северденко, В.М. Сегал).

Теплофизические коэффициенты на всем интервале изменения температур каждого контактирующего тела или на отдельных этапах, при элементарном решении задачи, принимаются постоянными.

Важным условием контактного взаимодействия, определяющим количественный результат расчета в наибольшей степени, является установление относительной идеальности контакта. В реальных процессах горячей обработки металлов давлением теплообмен между горячим деформируемым металлом и относительно холодным инструментом осуществляется через пограничный слой, который в общем случае имеет сложное строение и может быть представлен как совокупность различных прослоек.

При рассмотрении контактной задачи теплопроводности слой окалины обычно заменяют термическим сопротивлением с нулевой теплоемкостью (Л.Д. Демидов).

Однако есть решения (Э.М. Гольфарб, В.Г. Чупейдо), в которых прослойка рассматривается как массивное тело. Показано, что в этом случае прослойка ослабляет действие источника тепла трения на поверхности заготовки, по сравнению со случаем нулевой теплоемкости промежуточного слоя.

В других решениях действие промежуточного слоя заменяют слоем основного металла эквивалентной толщины, т.е., увеличивают толщину поковки на величину эквивалентного слоя. При этом прослойка смазочного материала между штампом и заготовкой толщиной 0,1 мм эквива-

лентна примерно 1 мм материала поковки (А. А. Шадский, В. К. Орлов, М. А. Тылкин, Д. И. Васильев, А. М. Рогов).

Рассматривая задачу теплового взаимодействия нагретой заготовки с инструментом при наличии слоя окалины и смазки Г. Я. Гун показал, что данную задачу можно свести к решению более простой задачи охлаждения заготовки (граничные условия 3-го рода) с приведенным коэффициентом теплоотдачи, характеризующим условия теплообмена при наличии промежуточного слоя вещества.

Аналитические методы решения краевых задач теплопроводности, разработанные на основе математического анализа распространяются только на относительно простые случаи.

Диапазон задач, решаемых с помощью численных методов на основе ЭВМ, значительно шире. Разработке этих методов посвящено большое количество работ.

Наибольшее распространение, при решении краевых задач теплопроводности, получили метод конечных разностей (МКР) и метод конечных элементов (МКЭ).

Следует отметить, что численные значения распределения температуры в заготовке для операций горячей штамповки, рассчитанные с помощью МКЭ и МКР, имеют достаточно близкое совпадение (А. Н. Перетяtko, А. Н. Митрофанов).

В конце главы сделаны выводы и сформулированы цели и задачи исследований.

Глава 2 посвящена анализу и классификации технологических процессов листовой штамповки, основанных на использовании формоизменяющих операций и их совмещений.

Предложенная матрица морфологических сочетаний формоизменяющих операций листовой штамповки позволила системно описать имеющиеся технологические процессы и выявить новые, неизвестные совмещения операций, которые можно осуществить за один этап деформирования. На основании этой матрицы удалось предложить несколько новых схем штамповки, существенно расширяющих номенклатуру деталей с центральным отверстием, получаемых с высоким КИМ.

На основе этой морфологической матрицы удалось предложить девять новых (получены патенты) способов штамповки, существенно расширяющих номенклатуру деталей с большим центральным отверстием, получаемых с высоким КИМ из трубной заготовки.

Разработана классификация и выполнен анализ технологических

факторов, учитываемых при рассмотрении напряженно-деформированного состояния заготовки в формоизменяющих операциях листовой штамповки. Показано, что наряду со схемой напряженно-деформированного состояния, присущей каждой операции, можно выделить три фактора, оказывающих существенное влияние на процесс формообразования. Это исходная толщина заготовки S_0 , исходное напряжение текучести σ_0 , исходная температура заготовки T_0 . Каждый из этих факторов в очаге деформации может быть принят при анализе процесса деформирования постоянным или переменным. Также постоянными или переменными могут быть приняты при анализе операций листовой штамповки значения толщины S напряжения текучести σ_s и температуры заготовки T в очаге деформации в процессе формоизменения. Учет других технологических факторов, таких как форма и размеры очага деформации, величина формоизменения и трение происходит при совместном решении уравнений равновесия с условием пластичности автоматически.

Установлено, что можно выделить всего 18 подобных сочетаний технологических параметров, которые возможны при анализе формоизменяющих операций листовой штамповки.

Проведенный литературный обзор показал, что к настоящему времени аналитические решения для четырех основных формоизменяющих операций листовой штамповки (обжим, раздача, вытяжка, отбортовка) получены лишь для 18 указанных сочетаний. В данной работе аналитические решения получены еще для 20 сочетаний. Что в сумме охватывают примерно половину всех возможных сочетаний основных технологических параметров. Это позволяет предположить существование еще достаточно большого числа технологических процессов, которые подлежат разработке и теоретическому исследованию. При этом получение новых аналитических решений следует ожидать, прежде всего, при анализе процессов, для которых существенно влияние предшествующего деформирования, неравномерности и нестационарности температурного поля и объемности схемы напряженно-деформированного состояния.

В таблицах, помещенных во второй главе, отмечены имеющиеся аналитические решения для указанных 18 сочетаний технологических параметров, а также решения, полученные в работе при анализе напряженного и деформированного состояний заготовки.

В главе 3 изложена методика определения напряженно-деформированного состояния заготовки, основанная на решении уравнений равновесия совместно с условием пластичности Треска-Сен-Венана. При этом

кривая упрочнения аппроксимируется линейной функцией.

Интенсивность деформаций заменяется максимальной по модулю логарифмической деформацией в тангенциальном направлении. Использование логарифмических деформаций обусловлено свойством аддитивности, которым они обладают.

Уравнения равновесия получают при проектировании всех сил, действующих на произвольный элемент пространственной оболочки на нормаль к срединной поверхности и на касательную к срединной поверхности в меридиональном направлении. При этом, согласно допущениям инженерного метода, меридиональные и тангенциальные напряжения осредняются по толщине.

Нормальное напряжение σ_z также осредняют по толщине и определяют из следующих соображений. Поскольку σ_z в большинстве формоизменяющих операций листовой штамповки изменяется от σ_k на контактной поверхности, до нуля на свободной поверхности, в работе σ_z определяется из выражения:

$$\sigma_z = 0.5\sigma_k = 0.5S \left(\frac{\sigma_p}{R_p} + \frac{\sigma_\theta}{R_\theta} \right) \quad (1)$$

Условие пластичности Треска-Сен-Венана, для рассматриваемых в работе процессов листовой штамповки, в зависимости от соотношения величин главных нормальных напряжений, можно записать в одном из следующих видов:

$$\sigma_p - \sigma_\theta = \pm \sigma_s \quad \text{при} \quad \sigma_{cp} = \sigma_z \quad (2)$$

$$\sigma_\theta - \sigma_z = \pm \sigma_s \quad \text{при} \quad \sigma_{cp} = \sigma_p \quad (3)$$

При этом если в очаге деформации для операций вытяжки и отбортовки реализуется только одно из условий (2) или (3), то в операциях обжима и раздачи очаг деформации распадается на две зоны, в каждой из которых реализуется свое условие пластичности. Условием перехода от одной зоны к другой является равенство меридионального и нормального напряжений. В работе получены зависимости для определения радиусов, разграничивающих эти зоны и проанализированы границы их возможного изменения.

Уравнение связи напряжений и приращений деформации совместно с

условием постоянства объема позволяют получить уравнения (4) и (5), интегрирование которых в конечных пределах дает возможность, для монотонных процессов, получить изменения размеров заготовки в формирующих процессах листовой штамповки с учетом объемности схемы напряженного состояния.

$$\frac{dS}{S} = \frac{\delta_{\theta} + \delta_{\rho} - 2\delta_z}{\delta_{\rho} + \delta_z - 2\delta_{\theta}} \frac{d\rho}{\rho} \quad (4)$$

$$\frac{dl}{l} = \frac{2\delta_{\rho} - \delta_{\theta} - \delta_z}{2\delta_{\theta} - \delta_{\rho} - \delta_z} \frac{d\rho}{\rho} \quad (5)$$

Обосновано допущение о линейном характере изменения толщины заготовки при совмещенном процессе обжим-раздача.

Изложена методика схематизации свойств материала, с целью учета теплового режима в очаге деформации.

Одним из рассматриваемых в работе процессов является двухпереходный процесс получения плоских фланцев, который предполагает для своего осуществления нагрев заготовки перед каждым переходом штамповки, т.е. в данном случае можно говорить о том, что деформационное упрочнение материала заготовки отсутствует. Таким образом можно принять, что заготовка поступающая на позицию штамповки после нагревательного устройства, имеет вдоль образующей одинаковую температуру и механические свойства.

Однако в процессе взаимодействия со штамповым инструментом и деформации температура отдельных участков заготовки изменяется, причем неодинаково, что приводит к изменению температуры элементов заготовки вдоль очага деформации. Механические свойства материала заготовки, в частности напряжение текучести, в очаге деформации становятся переменными. Причем переменными не только во времени, вследствие естественного охлаждения, но и переменными в пространстве вдоль образующей, т.е. переменными в самом очаге деформации вследствие различной продолжительности контакта с инструментом. Таким образом решение задачи определения механических характеристик материала заготовки (напряжения текучести) зависит от решения задачи о распределении температуры заготовки в очаге деформации.

Температура каждого элемента заготовки определяется в своем

очередь с одной стороны температурой, которую он имел при съеме с нагревательного устройства, с другой стороны тем количеством теплоты, которое этот элемент получает или отдает за время от момента съема с нагревательного устройства до момента окончания штамповки на очередном переходе. Причем некоторые явления, такие как теплообмен за счет теплопроводности, излучение, конвекция способствуют понижению температуры, а другие, такие как пластическое формоизменение и работа внешних сил трения, приводят к повышению температуры. Окончательная температура определяется соотношением указанных факторов. Точный учет всех этих факторов в их взаимосвязи достаточно сложен и требует проведения численного моделирования, которое описывается ниже (главе 6). В третьей же главе дается оценка влияния каждого фактора на изменение температуры по отдельности, и на этой основе строится феноменологическая математическая модель, описывающая изменение напряжения текучести в очаге деформации и позволяющая провести анализ формоизменения заготовки на каждом переходе штамповки.

$$\sigma_s = \sigma_{sц} + D\delta, \quad (6)$$

где $\sigma_{sц}$ - значение напряжения текучести в цилиндрической, недеформированной части заготовки;

D - коэффициент пропорциональности ("температурного упрочнения");

δ - тангенциальная деформация.

Глава 4 посвящена теоретическому анализу напряженного состояния заготовки в операциях, являющихся составными частями многопереходных (в том числе совмещенных) процессов получения деталей из цилиндрических трубных заготовок.

Анализ совмещенного процесса обжима-раздачи включает определение соотношения размеров очагов пластической деформации этих операций при проведении этого процесса без ограничения одной из операций. Критерием для определения границы раздела принято равенство меридиональных напряжений, действующих на границе зон обжима и раздачи. Напряжения в каждой из зон определены путем решения уравнения равновесия совместно с условием пластичности при использовании линейной аппроксимации кривой упрочнения (напряжение текучести как функция от логарифмической деформации в тангенциальном направлении).

$$\delta_p^{ab} = -(1+b) [\delta_{T_0} (1 - r/\rho) + \Pi (\ln R_0/\rho + 1) - r/\rho \Pi (\ln R_0/\rho + 1)] \quad (7)$$

$$\delta_p^{ab} = (1+b) [\delta_{T_0} \ln \rho/R + \Pi \ln \rho/R \ln r/R_0] \quad (8)$$

где δ_{T_0} и Π - параметры кривой упрочнения

Из равенства формул (7) и (8) при $\rho=R_0$ после упрощения получена формула, позволяющая выразить в явном виде связь коэффициента раздачи с коэффициентом обжима:

$$\ln K_p = (1 + \Pi/\delta_{T_0}) (1 - 1/K_0) - \frac{\Pi}{\delta_{T_0} K_0} \ln K_0 \quad (9)$$

Аналогичная формула получена для условий горячего деформирования. При этом использовали феноменологическую, математическую модель процесса (6) (глава 3).

Расчеты коэффициента раздачи K_p по формуле (9) при различных значениях коэффициента обжима, проведенные для четырех основных групп материалов, применяемых в листовой штамповке и отличающихся различной интенсивностью упрочнения материала заготовки, показали, что с увеличением интенсивности упрочнения материала заготовки в очаге деформации, характеризуемой отношением Π/δ_{T_0} , расхождение между K_p и K_0 увеличивается. В целом же соотношение между K_p и K_0 для всех групп материалов отличаются незначительно. Также показано, что с увеличением суммарной степени деформации расхождение между K_p и K_0 увеличивается, при этом коэффициент раздачи преобладает над коэффициентом обжима как в условиях холодной так и горячей деформации, что приводит к уменьшению длины образующей заготовки.

Решение уравнения равновесия совместно с условием пластичности с учетом объемности схемы напряженного состояния, при условии того, что δ_2 находится из выражения (1), позволили получить формулы для определения меридионального напряжения в основных формоизменяющих операциях листовой штамповки:

$$\delta_p = (1+b) \delta_2 \left((1 - r_0/\rho) + \frac{Scos\alpha}{2\rho} \ln \frac{2\rho - Scos\alpha}{2r_0 - Scos\alpha} \right) \quad \begin{matrix} \text{отбортовка} \\ \text{и обжим} \end{matrix} \quad (10)$$

$$\sigma_p = -(1+b)\sigma_s \left(\frac{R}{\rho} - 1 \right) + \frac{Scos\alpha}{2\rho} \ln \frac{2R - Scos\alpha}{2\rho - Scos\alpha} \quad \begin{matrix} \text{вытяжка и} \\ \text{раздача} \end{matrix} \quad (11)$$

Второе слагаемое в квадратных скобках в уравнениях (10) и (11) показывает влияние на меридиональное напряжение относительной толщины заготовки. Далее анализируется влияние на напряженное состояние рассмотренных технологических факторов, в том числе и относительной толщины заготовки.

Для расширения номенклатуры получаемых изделий в работе предложены способы штамповки, использующие конический полуфабрикат, полученный с помощью совмещения обжима и раздачи, в качестве заготовки для последующего деформирования. При этом степень деформации заготовки на первом переходе штамповки на различных участках будет различной. Это приводит к тому, что толщина заготовки и, в случае деформирования в условиях холодной деформации, упрочнение ее материала вдоль образующей будут переменными. При более точном анализе напряженно-деформированного состояния, это необходимо учитывать.

Если после первого перехода штамповки, коническую заготовку подвергать обжиму или раздаче или тому и другому, для получения плоского фланца, то направление и знаки деформаций, получаемые элементами заготовки на втором переходе, будут совпадать по направлению и знаку с деформациями, полученными ими на первом переходе штамповки. В этом случае суммарная деформация определяется сложением деформаций 1-го и второго переходов, а формулы для меридиональных напряжений второго перехода аналогичны формулам для первого.

В операциях отбортовки и вытяжки направления тангенциальных деформаций на втором переходе будут противоположны деформациям, полученным заготовкой на первом переходе штамповки, поэтому для определения суммарной деформации в работе использовано свойство аддитивности логарифмических деформаций. На основании этого выражение для результирующей деформации в операции отбортовки коническим пуансоном принимаем в виде:

$$\delta = \delta_1 + \delta_2 = \ln \frac{R_0 \rho}{(\rho - h \sin \alpha)^2} \quad (12)$$

где R_0 , ρ — радиус исходной трубной заготовки и текущий радиус.

δ1, δ2 - тангенциальные деформации на первом и втором переходах,
h - перемещение пуансона

При выводе соотношения (12) использовалось условие равенства длины развертки борта и ширины отбортовываемой части.

В результате решения уравнения равновесия совместно с условием пластичности получена формула, позволяющая определять величину меридионального напряжения в любой точке отбортовываемого участка в зависимости от хода пуансона:

$$\begin{aligned} \delta_p = (1+b) \left\{ \frac{m}{m-\rho} \left[\delta_{\tau 0} \left(1 - \frac{r + h \sin \alpha}{\rho} \right) + \Pi \left[\ln \frac{R_0 \rho}{(\rho - h \sin \alpha)^2} + 1 + \right. \right. \right. \\ \left. \left. + \frac{2h \sin \alpha}{\rho} \ln \frac{\rho - h \sin \alpha}{r} \right] - \frac{r + h \sin \alpha}{\rho} \Pi \left(\ln \frac{R_0 (r + h \sin \alpha)}{r^2} + 1 \right) \right\} - \\ - \frac{\rho}{m-\rho} \left[\frac{\delta_{\tau 0}}{2} + \Pi \left(\frac{1}{2} \ln \frac{R_0 \rho}{(\rho - h \sin \alpha)^2} + \frac{1}{4} + \frac{2h \sin \alpha}{\rho} + \right. \right. \\ \left. \left. + \left(\frac{h \sin \alpha}{\rho} \right)^2 \ln \frac{\rho - h \sin \alpha}{r} \right) - \frac{(\rho - h \sin \alpha)^2}{2\rho^2} \left(\delta_{\tau 0} + \right. \right. \\ \left. \left. + \Pi \left(\ln \frac{R_0 (r + h \sin \alpha)}{r^2} + \frac{1}{2} + \frac{4h \sin \alpha}{r + h \sin \alpha} \right) \right) \right] \right\} \quad (13) \end{aligned}$$

Формула (12) учитывает переменность исходной толщины стенки и упрочнения вдоль образующей. Получены также формулы, учитывающие эти факторы отдельно. Проведен их анализ и сравнение.

При анализе операции вытяжки заготовки, имеющей переменную толщину и упрочнение, необходимо учитывать различные знаки тангенциальных деформаций, полученных элементами заготовки в зоне обжима и раздачи. С учетом сказанного, выражения для суммарной деформации в зонах обжима и раздачи принимали в виде:

$$\delta = \delta_1 + \delta_2 = \ln \frac{2R_0 h \sin \alpha + \rho^2}{R_0 \rho} \quad \text{зона раздачи:} \quad (14)$$

$$\delta = \delta_1 + \delta_2 = \ln \frac{R_0}{\rho} \quad \text{зона обжима} \quad (15)$$

где R_0 - радиус вытяжной матрицы.

Ввиду различия результатов по формулам (14) и (15) необходимо разбиение очага деформации при анализе напряженного состояния заготовки при вытяжке на соответствующие зоны.

Решение уравнения равновесия совместно с условием пластичности с учетом (14) и (15) позволило получить выражения для определения меридионального напряжения в каждой из зон в зависимости от хода пуансона соответственно:

$$\sigma_p^0 = \frac{1+b}{b} \left\{ \sigma_{r0} \left[1 - \left(\frac{\rho}{\sqrt{R^2 - a}} \right)^b \right] + \Pi \left(\ln \frac{a+\rho^2}{R_0 \rho} + \frac{1}{b} \right) - \right. \\ \left. - \left(\frac{\rho}{\sqrt{R^2 - a}} \right)^b \Pi \left(\ln \frac{R^2}{R_0 \sqrt{R^2 - a}} + \frac{1}{b} \right) \right\} + \\ + \frac{2q\mu}{(1-b) \sin \alpha} \left[\frac{\sqrt{R^2 - a}}{S} \left(\frac{\rho}{\sqrt{R^2 - a}} \right)^b - \frac{\rho}{S} \right] \quad (16)$$

$$\sigma_p^{00} = \frac{1+b}{b} \left\{ \sigma_{r0} \left[1 - \left(\frac{\rho}{\sqrt{R^2 - a}} \right)^b \right] + \Pi \left(\ln \frac{R_0}{\rho} - \frac{1}{b} \right) + \right. \\ + \frac{2\Pi}{b} \left(\left(\frac{\rho}{\sqrt{R^2 - a}} \right)^b - \left(\frac{\rho}{\sqrt{R^2 - a}} \right)^b \Pi \left(\ln \frac{R^2}{R_0 \sqrt{R^2 - a}} + \frac{1}{b} \right) \right) \right\} + \\ + \frac{2q\mu}{(1-b) \sin \alpha} \left[\frac{\sqrt{R^2 - a}}{S} \left(\frac{\rho}{\sqrt{R^2 - a}} \right)^b - \frac{\rho}{S} \right] \quad (17)$$

Формулы (16), (17) позволяют учесть только переменность упрочнения. В работе получены зависимости, позволяющие учесть также переменность исходной толщины заготовки и их совместное действие.

В конце главы сделаны выводы.

Глава 5 посвящена получению и анализу зависимостей, позволяющих определять изменения размеров заготовки в формоизменяющих операциях листовой штамповки.

В операциях обжима и вытяжки длина образующей заготовки увеличивается, а в операциях раздачи и отбортовки уменьшается. Поэтому суммарная длина образующей заготовки в совмещенных процессах обжима-раздачи и вытяжки-отбортовки может как уменьшиться, так и увеличиться. Все зависит от соотношения зон соответствующих операций.

В работе изменение толщины и длины образующей заготовки в меридиональной плоскости в каждой операции определяется из уравнения связи напряжений и приращений деформаций, которое с учетом постоянства объема преобразуется к виду (4) и (5).

Подставив в эти формулы выражения для определения напряжений в операциях обжима, раздачи, вытяжки и отбортовки, и проинтегрировав их в соответствующих пределах получим зависимости, позволяющие определять изменения первоначальной толщины и длины образующей заготовки в основных формоизменяющих операциях листовой штамповки с учетом объемности схемы напряженного состояния.

$$\frac{S_0}{S_k} = [K_0^T] \left[\frac{K_0 + \frac{(1+b)}{(1-b-Scos\alpha/R_0)}}{K_0^T + \frac{(1+b)}{(1-b-Scos\alpha/R_0)}} \right] - \left[\frac{3 - 2Scos\alpha/R_0}{1-b-Scos\alpha/R_0} \right] \quad (18)$$

$$\frac{S_0}{S_k} = [K_p^T]^2 \left[\frac{\ln K_p + \frac{2-Scos\alpha/2R_0}{(1+b)(1-Scos\alpha/2R_0)}}{\ln \frac{K_p}{K_p^T} + \frac{2-Scos\alpha/2R_0}{(1+b)(1-Scos\alpha/2R_0)}} \right] - \frac{3}{(1+b)(1-Scos\alpha/2R_0)} \quad (19)$$

$$\frac{h^0}{L^0} = (K_0) \frac{1+2b}{1-b} x \quad (20)$$

$$\left[\frac{(1-b)K_0 + 1 + b - SK_0 \cos \alpha / 2R_0}{(2 - SK_0 \cos \alpha / 2R_0) K_0} \right]^{1-b} \left[\frac{1+2b}{2+2b - SK_0 \cos \alpha / R_0} - \frac{1+2b}{2R_0 (1+b) / SK_0 \cos \alpha - 1} \right]^3$$

$$\frac{L^p}{h^p} = K_p \left[1 - \frac{(1+b)(1 - S \cos \alpha / 2R_0)}{(2 - S \cos \alpha / 2R_0)} \ln K_p \right]^{\frac{3}{1+b} (1+b)(1 - S \cos \alpha / 2R_0)} \quad (21)$$

В тех случаях когда δ_z принимается равным нулю, решение уравнения (18), (19), (20) и (21) упрощаются и принимают вид:

$$\frac{S_0}{S_x} = [K_p^T]^z \left[\frac{\ln K_p + \frac{2}{1+b}}{\ln \frac{K_p}{K_p^T} + \frac{2}{1+b}} \right]^{\frac{3}{1+b}} \quad (22)$$

$$\frac{S_0}{S_x} = [K_o^T] \left[\frac{K_o + \frac{(1+b)}{(1-b)}}{\frac{K_o}{K_o^T} + \frac{(1+b)}{(1-b)}} \right]^{\frac{3}{1-b}} \quad (23)$$

$$\frac{h^0}{L^0} = (K_0)^{\frac{1+2b}{1-b}} \left[\frac{(1-b)K_0 + 1 + b}{2K_0} \right]^{\frac{3}{1-b}} \quad (24)$$

$$L^p / h^p = K_p \left[1 - \frac{1+b}{2} \ln K_p \right]^{\frac{3}{1+b}} \quad (25)$$

В пятой главе проведен анализ влияния каждого технологического фактора на изменение конечных размеров заготовки. В конце главы

сделаны выводы.

Глава 6 посвящена моделированию теплообмена между заготовкой и штампом (моделированию изменения температуры заготовки в процессе деформирования).

Как было показано в первой главе, использование метода конечных разностей (МКР) при решении нестационарных задач для тел со сложной геометрией вызывает по сравнению с методом конечных элементов (МКЭ) определенные трудности. В то же время преимущества МКЭ при анализе тел со сложной геометрической поверхностью и нерегулярной сеткой сопровождается недостатком, заключающимся в необходимости использования меньших значений шага по времени, а также в сложности определения самих этих значений шага.

Исходя из сказанного, представляется целесообразным разработка такого подхода к численным решениям краевых задач теплопроводности ОМД, который сочетает положительные стороны МКР и МКЭ.

В качестве такого подхода в работе используется методом контрольных объемов (МКО), в основе которого заложено интегральное сохранение энергии для контрольных объемов (КО), созданных вокруг каждого расчетного узла.

Основная разница между МКО и другими численными методами, например, классическими МКР и МКЭ, заключается в том, что переход от дифференциального уравнения к конечно-разностным осуществляется по разному.

МКО является конечно-разностным методом с использованием кусочно-линейной аппроксимации профилей. Конечно-разностные уравнения получаются путем интегрирования дифференциальных соотношений в микрообласти (в подобласти), определяемой в результате разбиения всей расчетной области.

Важнейшим свойством МКО является то, что в нем заложено точное интегральное сохранение таких величин как масса, количество движения и энергии на любой группе КО и, следовательно, на всей расчетной области. Причем это свойство хорошо проявляется не только в предельном случае большого числа узловых точек, но и при сильно ограниченном их количестве. Это означает, что даже решения на грубых сетках удовлетворяют точным интегральным балансам.

Согласно расчетной схеме заготовка и ограничивающее ее пространство, включая матрицу и пуансон, принимаются как один континуум. Этот континуум представляется как конечное число КО, для каждого из

которых будут соблюдены интегральные законы сохранения.

Построение контрольных объемов следующее. Сначала на сплошную среду (континуум) (на всю область) наносится сетка. В общем случае она может быть произвольной. В середине каждой линии, соединяющей узловую точку 1 с соседними узловыми точками, проводятся перпендикулярные линии. Их пересечения создают вокруг точки многоугольник, (контрольный объем (КО)). При этом в КО, на которые разбивают твердые тела как континуумы, согласно поставленной задаче теплопроводности, должны соблюдаться только интегрального закона сохранения энергии.

Конструкции матрицы, пуансона и форма заготовки, а также соответствующие им граничные условия теплообмена, позволяют рассматривать краевую задачу теплопроводности в осесимметричной постановке. В данном случае, КО представляют собой кольцевые объемы с сечением в виде многоугольника.

При составлении тепловых балансов все КО, представляющие штамп и заготовку, можно разделить на две группы. Первой из них принадлежат КО, расположенные в центральной части, а второй - контрольные объемы, расположенные на границе областей, их называют соответственно центральными и граничными КО. Такое деление удобно, из-за того, что каждая группа КО требует специфического подхода при составлении уравнений сохранения. В работе описана процедура получения разностных уравнений для каждого из указанных КО.

Имея разностные уравнения для всех элементарных объемов, получим систему алгебраических уравнений, которая решается.

При моделировании процесса теплового взаимодействия нагретой заготовки со штамповым инструментом в процессе горячей листовой штамповки были приняты следующие допущения:

- 1) Процесс деформирования заготовки разбивали на 5 этапов продолжительностью 0,05 сек каждый.

- 2) Принято, что переход заготовки от одного этапа к другому, т.е. из предыдущего положения в последующее, осуществляется мгновенно.

- 3) Форма заготовки на каждом этапе не изменяется.

- 4) Начальное распределение температур на последующем этапе равно распределению температур в конце предыдущего этапа.

- 5) В пределах времени каждого этапа происходит перераспределение тепла (температуры) между элементами заготовки, штамповой ос-

настки и окружающей среды.

6) Определение перераспределения тепла в пределах этапа осуществляем с учетом излучения, конвекции, теплопроводности, работы пластической деформации и работы против внешних сил трения.

7) Потери тепла заготовкой за счет теплоотдачи в инструмент определяем по закону Ньютона.

8) Потери тепла на излучение и конвекцию определяем по закону Ньютона

9) Выделение тепла за счет работы пластической деформации учитываем следующим образом. Трубную заготовку разбиваем на 10 равных частей (в общем случае на n -частей) 5 - в зоне обжима и 5 - в зоне раздачи. Для каждой из этих частей определяем величину средней интенсивности деформаций δ (максимальную по модулю деформацию - тангенциальную деформацию) и количество выделившегося при этом теплоты

$$Q_d = (0,85 + 0,95) \delta_s \Delta V \delta \quad (26)$$

Считая, что это теплота распределяется по выделенному объему заготовки равномерно, определяли вызванное им изменение температуры и прибавляли это значение температуры к значениям температурного поля заготовки в конце каждой стадии деформирования

$$\Delta T = \frac{0,9 \delta_s \delta}{\rho c} \quad (27)$$

10) Выделение теплоты за счет работы внешних сил трения учитывалось, как рекомендует Г.Я.Гунь, за счет изменения (увеличения) приведенной температуры окружающей среды T_c в граничных условиях III-го рода (п.8) по формуле:

$$\Delta T_c = 0,5 V_f \mu \delta_s / \alpha \quad (28)$$

При этом (по аналогии с Кобаяши) принимали, что теплота от трения распределяется между заготовкой и инструментом поровну.

11) Численные значения теплофизических величин принимали постоянными, т.е. не зависящими от температуры и выбирали из справочной литературы.

12) Исходную температуру заготовки и штампа принимали постоянной по всему объему.

В шестой главе приведены результаты моделирования распределе-

ния температуры в трубной заготовке в процессе деформирования от стадии к стадии при различных значениях исходной температуры заготовки.

Количественный анализ полученных температурных полей заготовок, позволяет сделать вывод о снижении температуры и, следовательно, повышении механических характеристик материала участков заготовки, с увеличением степени деформации которую эти участки получили (с увеличением времени контакта с инструментом). При осреднении температуры и механических характеристик материала заготовки по всему сечению получается, что торец заготовки на 35-55°C холоднее ее цилиндрической части и, следовательно, напряжение текучести на 15-20% выше.

Таким образом, можно говорить о том, что математическое моделирование подтвердило ранее, сделанное предположение о наличии в процессе горячего обжима-раздачи трубной заготовки "температурного упрочнения".

В главе 7 приведены результаты экспериментального исследования технологических процессов получения деталей из цилиндрических трубных заготовок.

Описана методика проведения экспериментальных исследований. Общие положения, конструкции применяемой экспериментальной оснастки, используемое оборудование, порядок проведения и обработки экспериментов, статистические критерии.

Эксперименты проводили на заготовках, полученных из безшовных и сварных труб различного диаметра с различной толщиной стенки, а также на плоских сварных образцах и сварных обечайках. В качестве материала использовали нержавеющую сталь 12Х18Н10Т, Ст.3, Сталь 65Г, сплав ЭП669-ИД, как наиболее характерные материалы для рассматриваемых деталей.

Исследования процессов холодного деформирования проводили на универсальных испытательных машинах УИМ-50 и УИМ-100. Скорость перемещения рабочих органов испытательных машин в 10-20 раз меньше скорости ползуна механического пресса, но это различие, как было показано многими предыдущими исследователями, несущественно влияет на характер процесса деформирования в условиях холодной деформации материала.

Исследование процессов горячего деформирования проводили на кривошипном чеканочном прессе усилием 10 МН, на кривошипном прессе

КД2126, усилием 630 кН и на гидравлическом прессе П6324 усилием 250 кН.

Влияние режимов деформирования на трещинообразование и максимальную степень деформации сварного шва изучали на испытательной машине "Instron".

Для замера геометрических размеров использовали штангенциркуль с ценой деления 0.05 мм и индикаторную головку часового типа с ценой деления 0.01 мм.

Регистрацию силы деформирования по ходу ползуна осуществлялась с помощью записывающего силоизмерительного устройства испытательных машин.

При экспериментальном исследовании процессов обжима-раздачи было установлено, что величина формоизменения в рассматриваемых технологических процессах ограничивается или потерей устойчивости с образованием кольцевой складки в срединной части заготовки (для заготовок из нержавеющей стали), или разрывом кройки в зоне раздачи (Ст.3, Сталь 65Г). Допустимый коэффициент формоизменения в совмещенном процессе обжима-раздачи может быть определен как произведение допустимых коэффициентов в отдельных операциях обжима и раздачи. Процесс может быть осуществлен на сварных заготовках. В случае качественной сварки и пластичного материала допустимый коэффициент формоизменения определяется потерей устойчивости в цилиндрической части заготовки, разрыва кройки не наблюдается (сталь 12Х18Н10Т, сплав ЭП969-ИД). В тоже время менее пластичные металлы и не оптимальные режимы сварки и деформирования приводят к разрыву кройки в зоне сварного шва, даже в условиях горячей деформации (Ст.3, Сталь 65Г).

Влияние основных технологических параметров, скорости и температуры деформирования на прочность сварного шва дисков трения определяли на плоских сварных образцах, разрываемых на испытательной машине "Instron", поперечное сечение которых соответствовало поперечному сечению дисков трения. В результате испытаний были установлены оптимальные режимы деформирования сварного шва.

Изменение температуры трубной заготовки в процессе деформирования записывали с помощью хромель-алюмелиевых термопар с раздельным спаем и регистрирующей аппаратуры. Использование раздельного спая обусловлено относительно высокой скоротечностью процесса (порядка 0.25-0.3 с). В работе для записи изменения температуры был

использован 12 -канальный осциллограф марки М1062-4. При его использовании фиксируют не значение ТЭДС, а величину падения напряжения на шлейфе. Поэтому для получения значений температуры производили тарировку шлейфов осциллографа с подключенными термопарами. Тарировку термопар производили статически по эталонной термопаре. Записывали изменение температуры в точках, расположенных на расстоянии 0.2 мм и 0.6 мм от контактной поверхности и на расстоянии 5 мм от свободного торца заготовки. Нагрев заготовок осуществляли в электропечи. Температуру нагрева контролировали с помощью эталонной термопары, установленной в печи.

После обработки и расшифровки осциллограмм, записанных в процессе деформирования, были построены зависимости, показывающие изменение температуры в двух выбранных точках в очаге деформации в процессе деформирования. Полученные данные сравнивали с теоретическими графиками изменения температуры, полученными по методике, описанной в главе 6. Как следует из анализа графиков, характер теоретического изменения температуры соответствует экспериментальному. Численное совпадение рассматриваемых зависимостей в пределах 10-15% позволяет сделать вывод о приемлимости допущений, принятых при создании математической модели процесса.

В главе 8 изложены разработанные на основании результатов теоретических и экспериментальных исследований малоотходные технологические процессы штамповки из цилиндрической трубной заготовки, а также рекомендации по их проектированию. Описаны конструкции новых (патент) штампов и оборудования для гибки и нагрева цилиндрических обечаек.

Рассматриваемые технологические процессы содержат следующие технологические этапы:

- резка листа на полосовые заготовки (при отсутствии соответствующей трубы или полосовой стали);
- гибка исходной полосы определенных размеров в цилиндрическую обечайку на гибочном полуавтомате;
- стыковая сварка концов цилиндрической обечайки;
- нагрев до необходимой температуры штамповки на нагревательной установке;
- обжим с раздачей цилиндрической заготовки с приданием ей формы усеченного конуса в штампе;
- осадка конусного полуфабриката в плоское кольцо с последую-

щей калибровкой полотна в конечный момент деформирования в штампе;
- отбортовка внутренней горловины или получение наружного цилиндрического пояса с помощью операции вытяжки;

В зависимости от конфигурации конкретной детали, некоторые из перечисленных операций, например отрезка полосы, гибка, сварка (при наличии необходимых труб) могут отсутствовать, некоторые, например нагрев, повторяться неоднократно.

Проектирование указанных технологических процессов начинают с чертежа готовой детали, и последовательно определяют размеры промежуточных полуфабрикатов и исходной заготовки, с учетом свободного формоизменения и действия технологических факторов на всех переходах штамповки.

В главе 8 рассмотрены также результаты внедрения предложенных разработок в промышленность.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Предложенные в работе схемы штамповки деталей из трубных заготовок, основанные на использовании трубных заготовок деформируемых с помощью совмещения операций обжима и раздачи, в качестве заготовок для последующих переходов штамповки, реализованы при разработке технологических процессов и штампов, что значительно расширяет номенклатуру деталей с большим центральным отверстием, изготавливаемых с высоким коэффициентом использования металла. До настоящего времени отсутствовали методики проектирования таких технологических процессов штамповки, что затрудняло эффективное внедрение. Поэтому тема работы является актуальной.

В работе решена крупная народнохозяйственная задача по разработке процессов и методов проектирования листовой штамповки деталей с большим отверстием, что вносит значительный вклад в ускорение научно-технического прогресса, путем обеспечения большой экономии металла и повышения качества изделий.

2. Предложенная методика теоретического анализа, состоящая в совместном решении уравнений равновесия и условия пластичности, применимая для рассматриваемых в работе формоизменяющих операций листовой штамповки (обжим, раздача, вытяжка и отбортовка), отлича-

ется возможность дополнительно учитывать влияние на напряженное состояние заготовки как неравномерности исходного упрочнения материала и исходной толщины стенки, так и объемность схемы напряженно-деформированного состояния заготовки.

3. Разработана методика анализа процессов деформирования трубных заготовок, нагретых до температур горячего деформирования, позволяющая учитывать неравномерность и нестационарность температурного поля в очаге деформации. Распределение температуры по объему заготовки получают с помощью математического моделирования методом "компенсированных объемов", что позволяет получить распределение механических характеристик материала. Найденные значения механических характеристик материала аппроксимируют аналитическими функциями, которые необходимы при анализе формоизменения заготовки с помощью совместного решения уравнений равновесия и условия пластичности.

4. Теоретически и экспериментально показано, что отношение зон обжима к зоне раздачи, при проведении совмещенного процесса без ограничения, уменьшается с увеличением суммарного коэффициента формоизменения как в условиях холодной, так и в условиях горячей деформации, что приводит к уменьшению первоначальной длины образующей заготовки на 10-12%. Причем материал заготовок практически не влияет на соотношение зон обжима и раздачи.

На основе указанных соотношений следует выбирать диаметр исходной заготовки и осуществлять процесс наименее энергоемким образом.

5. Новые аналитические зависимости, полученные в работе, позволяют более точно описать законы распределения толщины стенки заготовки вдоль образующей и изменение конечной длины заготовки в меридиональной плоскости для операций обжима, раздачи, вытяжки и отбортовки. Показано, что закон распределения толщины стенки заготовки в операциях обжима и раздачи близок к линейному и не зависит от свойств материала.

Зависимости для определения конечных размеров заготовки, полученные с учетом объемности схемы напряженно-деформированного состояния, по сравнению с зависимостями, полученными из условия равенства ϵ_x нулю, повышают точность расчетов на 10-30 %. При этом точность расчетов, при определении длины образующей в операциях обжима-раздачи, составляет 2 % от первоначальной длины.

6. Экспериментальные исследования и математическое моделирование перераспределения температур между нагретой до температуры горячей деформации заготовкой и штампом, при штамповке на кривошипном прессе, позволили выявить существенную неоднородность и нестационарность температурного поля заготовки в процессе деформирования. При этом средние по сечению значения напряжения текучести в отдельных участках заготовки могут отличаться в 1,3-1,7 раза, что соответствует принятым математическими моделями. В моделях учтено выделение теплоты в результате пластической деформации и трения.

Сравнение теоретических и экспериментальных зависимостей изменения температуры нагретой заготовки в процессе деформирования в операциях обжима и раздачи показало их адекватность, расхождение не превышает 10-15 %.

7. Внедрение в производство разработанных технологических процессов получения конических переходников для соединения трубопроводов из труб стандартных размеров, основанных на запатентованных способах штамповки, обеспечило повышение коэффициента использования металла в НПО "Криогенмаш" от 3 до 4 раз.

Разработанные технологические и конструктивные схемы получения конических переходников решают проблему мелкосерийного производства, позволяя приблизить себестоимость единичных деталей к себестоимости серийных, а также обеспечивают достаточную гибкость производства и быстрый переход от одного типоразмера к другому.

8. Внедрение процесса деформирования раскатанной кольцевой обечайки с помощью совмещения операций обжима-раздачи позволило при производстве авиационных двигателей на ММЗ "Сатурн" добиться экономии высоколегированной стали на каждой из четырех деталей от 50 кг до 100 кг и одновременно исключить операцию сварки, что существенно повысило надежность изделия.

9. Проблема низкой стойкости дисков трения и большого отхода металла при их изготовлении решена на основе исследований деформирования сварных трубных заготовок.

Внедрение новой технологии осуществлено на Чебоксарском заводе промышленных тракторов. С января 1994 г. АО "Промтрактор" полностью перешел на новую технологию. Экономия материала на одном диске достигает 7,14 кг, что в пересчете на годовую программу составляет более 750 тонн, а коэффициент использования металла достигает 95%. Кроме того, благодаря новой технологии, износ дисков снизился в 2,5

раза.

Для промышленного применения разработанного технологического процесса получения дисков трения используют специально созданные штампы, обеспечивающие высокое качество изделий.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ДИССЕРТАЦИИ ИЗЛОЖЕНЫ В РАБОТАХ.

1. Штамповка поковок типа плоских колец и фланцев / Ильинич Д. А., Кондратенко В. Г., Евсюков С. А. и др. // Кузнечно-штамповочное производство. - 1985. - N 4. - С. 6-7.
2. Штамповка деталей типа конических переходников / Евсюков С. А., Ильинич Д. А., Кондратенко В. Г. и др. // Кузнечно-штамповочное производство. - 1985. - N 4. - С. 14-15.
3. Афанасенко С. В., Евсюков С. А., Фомченков А. Т. Штамповка плоских фланцев и конических переходников из трубных заготовок и обечаек // Современные проблемы технологии машиностроения: Тез. докл. Всесоюзной научно-технической конференции. - Москва, 1986. - С. 84-85.
4. Афанасенко С. В., Кондратенко В. Г., Евсюков С. А. Штамповка полых конических деталей в единичном и мелкосерийном производстве // Кузнечно-штамповочное производство. - 1987. - N 4. - С. 18-19.
5. Суворов А. П., Лысов В. С., Евсюков С. А. Изготовление дисков сцепления по малоотходной технологии // Прогрессивные ресурсосберегающие технологические процессы: Тез. докл. Всесоюзной научно-технической конференции. - Ростов-на-Дону, 1990. - С. 32-34.
6. Малоотходная технология изготовления фрикционных дисков / Суворов А. П., Евсюков С. А., Ярыгин В. П. и др. // Тракторы и сельскохозяйственные машины. - 1991. - N 9. - С. 48-50.
7. Лысов В. С., Суворов А. П., Евсюков С. А. Изготовление штампосварных заготовок дисков трения // Сварочное производство. - 1992. - N 2. - С. 26-28.
8. Евсюков С. А., Бочаров В. А., Суворов А. П. Совмещение операций обжима и раздачи // Известия вузов. Машиностроение. - 1992. - N 10-12. - С. 106-110.

9. Евсюков С. А. Метод изготовления штампосварных дисков // Повышение качества и эффективности технологических процессов формообразования изделий машиностроения: Тез. докл. Юбилейной научно-технической конференции МГТУ им. Н. Э. Баумана. - Москва, 1993. - С. 8.
10. Евсюков С. А. Штамп для изготовления плоских колец типа дисков трения // Кузнечно-штамповочное производство. - 1994. - № 8. - С. 28.
11. Евсюков С. А. Обжим-раздача цилиндрических трубных обечаек в условиях горячей деформации // Известия вузов. Машиностроение. - 1994. - № 7-9. - С. 126-130.
12. Евсюков С. А., Суворов А. П. Гибочный полуавтомат для изготовления цилиндрических обечаек // Кузнечно-штамповочное производство. - 1994. - № 10. - С. 30.
13. Евсюков С. А. Отбортовка горловин на заготовках, имеющих анизотропное упрочнение // Кузнечно-штамповочное производство. - 1994. - № 11. - С. 17-19.
14. Евсюков С. А., Анализ и классификация технологических факторов и процессов листовой штамповки // Вестник машиностроения. - 1994. - № 11. - С. 43-46.
15. Евсюков С. А., Суворов А. П. Полуавтоматическая установка для нагрева цилиндрических обечаек // Кузнечно-штамповочное производство. - 1994. - № 11. - С. 26-27.
16. Евсюков С. А., Штамповка деталей типа плоских колец // Вестник машиностроения. - 1994. - № 12. - С. 31-32.
17. Евсюков С. А. Штамповка конических переходников // Кузнечно-штамповочное производство. - 1994. - № 12. - С. 8-12.
18. Евсюков С. А. Определение высоты заготовки для штамповки конических переходников // Известия вузов. Машиностроение. - 1995. - № 7-9. - С. 64-69.
19. Евсюков С. А. Влияние объемности схемы напряженного состояния на изменение толщины заготовки // Оборудование и процессы обработки давлением: Материалы Всероссийской юбилейной научно-технической конференции "100-летие со дня рождения профессора А. И. Зимина" - Москва, 1995. - С. 112-120.
20. Бочаров Ю. А., Евсюков С. А., Суворов А. П. Штамповка заготовок дисков трения // Оборудование и процессы обработки давлением: Материалы Всероссийской юбилейной научно-технической конференции.

"100-летие со дня рождения профессора А.И.Зими́на" .-Москва, 1995. - С.150-154.

21. Евсюков С.А. К вопросу о выборе условия пластичности в формоизменяющих операциях листовой штамповки // Оборудование и процессы обработки давлением: Материалы Всероссийской юбилейной научно-технической конференции "100-летие со дня рождения профессора А.И.Зими́на" .-Москва, 1995. - С.112-120.
22. Евсюков С.А. Изменение размеров при отбортовке // Исследования в области теории, технологии и оборудования штамповочного производства: Труды Тульского Государственного университета. - Тула, 1996. - С. 56-61.
23. Евсюков С.А. Влияние напряженного состояния на изменение длины образующей заготовки // Вестник МГТУ. Сер. Машиностроение. - 1996. - №2. - С.94-100.
24. Евсюков С.А. Изменение длины образующей заготовки при отбортовке // Вестник машиностроения. -1996. -№9. -С.31-33.
25. Патент СССР N1806887 Способ изготовления деталей типа плоских колец /С.А.Евсюков, А.П.Суворов, В.С.Лысов, - Оpubл. 07.04.93. Бюл. N13.
26. Патент России N2041756 Штамп для изготовления плоских колец типа дисков трения из конических заготовок / С.А.Евсюков, А.П.Суворов, - Оpubл. 20.08.95. Бюл. N23.
27. Патент России N2060084 Способ получения переходников с наружным цилиндрическим пояском / С.А.Евсюков. - Оpubл. 20.05.96. Бюл. N14.
28. Патент России N2060085 Способ получения деталей типа плоских фланцев с внутренней горловиной / С.А.Евсюков. - Оpubл. 20.05.96. Бюл. N14.
29. Патент России N2060086 Способ получения переходников с внутренним цилиндрическим пояском / С.А.Евсюков. - Оpubл. 20.05.96. Бюл. N14.
30. Патент России N2060087 Способ получения деталей типа плоских фланцев с наружным цилиндрическим пояском / С.А.Евсюков. - Оpubл. 20.05.96. Бюл. N14.
31. Патент России N2087232 Способ получения переходников с внутренней горловиной / С.А.Евсюков: - Оpubл. 20.08.97. Бюл. N 23.
32. Патент России N2087233 Способ получения переходников с внутренней горловиной / С.А.Евсюков. - Оpubл. 20.08.97. Бюл. N 23.
33. Патент России N2087234 Способ получения переходников с наружным

- цилиндрическим пояском /С. А. Евсюков. - Оpubл. 20.08.97. Бюл. N 23.
34. Патент России N2087235 Способ получения переходников с наружным цилиндрическим пояском /С. А. Евсюков. - Оpubл. 20.08.97. Бюл. N 23.
35. Алхименков А. Н., Евсюков С. А. Рациональная штамповка конических сепараторов // Производство подшипников. - 1997. - N1. - С. 3-4.
36. Евсюков С. А. Получение износостойких дисков трения // Надежность и контроль качества. - 1997. - N6. - С. 39-43.
37. Евсюков С. А. Применение комбинаторных морфологических методов для разработки новых способов листовой штамповки // Вестник машиностроения. - 1997. - N6. - С. 46-48.