

1548960

На правах рукописи

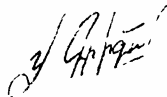
ГРИГОРЯН Вардан Вальтерович

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ И ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ  
РАЗМЕРОВ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ДЕТАЛЕЙ БЕЗ ФЛАНЦА ПРИ  
ОДНОПЕРЕХОДНОЙ ВЫТЯЖКЕ ЛИСТОВЫХ ЗАГОТОВОК

05.03.05. - Процессы и машины обработки давлением

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук



Москва - 1995

**Работа выполнена в Московском Государственном Техническом  
Университете имени Н.Э.Баумана.**

**Научный руководитель** - Засл. деятель науки и техники РФ,  
доктор технических наук,  
профессор Овчинников А.Г.

**Официальные оппоненты** - доктор технических наук,  
профессор Матвеев Д.Д.

- кандидат технических наук,  
доцент Ильин Л.Н.

**Ведущее предприятие** - ГП НПО "Техномаш"

Защита диссертации состо-  
да в 14<sup>30</sup> часов на заседании д  
в Московском Государственном  
умана по адресу: 107005, Моск

Ваш отзыв на автореферат  
чатку, просим направлять в у

С диссертацией можно  
им.Н.Э.Баумана.

Автореферат разослан 16

Ученый секретарь диссертаци  
совета, к.т.н., доцент

1548960

---

Подписано к печати 10.11.95.

Тираж 100 экз.

Типо

---

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. В общей совокупности задач обеспечения качества изделий важнейшее значение имеет достижение точности геометрических размеров и формы цилиндрических деталей. Точность улучшает технологичность деталей при выполнении сборки, обеспечивает возможность автоматизации и повышение срока службы. Особое значение точность имеет при ремонте изделий - многократной сборке-разборке для увеличения стойкости деталей и снижения их себестоимости. Классы деталей для которых решается задача: детали пневмо-гидросистем, газовой и химической аппаратуры, электроннолучевых трубок, измерительных оптических приборов, цоколи нормально-осветительных ламп, втулки шлангов насосов и др.

Совершенствование конструкции приборов, машин и аппаратуры с целью повышения надежности и точности работы обуславливает применение в их узлах цилиндрических деталей с ужесточенными допусками на геометрические размеры и отклонения формы. Совпадение заданных и технологически возможных размеров при вытяжке цилиндрических деталей повышает эксплуатационные характеристики деталей, их качество и несущую способность. Однако существующие методики расчетов вытяжки позволяют лишь определить критические степени деформации и напряжения и не учитывают возможности оценки достижения заданной точности. Практически отсутствуют также теоретические разработки в данном направлении. Поэтому разработка методики проектирования технологического процесса вытяжки, позволяющей получить заданную точность детали, является актуальной задачей.

Применяемые в настоящее время методы обеспечения точности основаны на эмпирических и табличных зависимостях, и поэтому не учитывают многообразия параметров и факторов процесса вытяжки. И в настоящее время при необходимости изготовления точных деталей вводят дополнительные операции калибровки и правки или экспериментальным путем доводят рабочие размеры инструмента; все эти действия приводят к увеличению трудоемкости изготовления деталей и инструмента, существенному снижению экономических и других показателей, ухудшению конкурентоспособности изделия. Для оценки влияния различных факторов на точность размеров деталей необходимо математическое моделирование процесса вытяжки, позволяющее с приемлемой точностью рассчитать технологическую операцию, а также прогнозировать появления тех или иных отклонений от задан-

НТБ МГТУ им. Н.Э. Баумана



1548960

Григорян В.В. Разработка

ных геометрических параметров деталей.

На технологический процесс вытяжки и на формирование конечных размеров деталей влияет целый ряд факторов: физико-механические свойства и размеры заготовки, условия трения, сила прижима, коэффициент вытяжки, радиусы скруглений кромок матрицы и пуансона, которые может учесть математическая модель процесса вытяжки.

Целью работы является разработка методики определения и повышения точности размеров цилиндрических деталей без фланца при однопереходной вытяжке на базе исследования точности поперечных размеров и формы деталей и расчет исполнительных размеров матрицы и пуансона для изготовления деталей повышенной точности и увеличения износостойкости инструмента при исключении систематических погрешностей.

В соответствии с поставленной целью основными научными задачами работы являются:

- разработка математической модели и программы автоматизированного расчета процесса осесимметричной вытяжки торцовой заготовки с использованием торцевых координат;
- разработка методики расчета точности поперечных размеров осесимметричных деталей без фланца, изготавливаемых за одну вытяжку цилиндрическим и фасонным пуансоном;
- оценка влияния основных параметров процесса осесимметричной вытяжки (коэффициентов вытяжки и трения, физико-механических свойств материала детали, относительной и исходной толщины заготовки) на точность поперечных размеров;
- экспериментальное исследование точности деталей, изготавливаемых цилиндрическим и фасонным пуансоном;
- разработка методики расчета размеров рабочих частей штампов для заданной точности деталей;
- разработка новых конструкций рабочих частей штампов, повышающих точность деталей.

Методы исследования. В работе применяются расчетно-аналитические и экспериментальные методы исследования.

Расчетно-аналитические методы исследования основаны на безмоментной теории оболочек с использованием полярных, цилиндрических и тороидальных координат, теории пластического течения, теории упругости, основ строительной механики и итерационного

метода решения системы уравнений с применением ЭВМ.

Экспериментальные исследования проводились в лабораторных условиях на универсально-испытательной машине УИМ-50 с применением контрольно-измерительных приборов: толщингера, микрометра, штангенциркуля. Обработка результатов экспериментов производилась на основе теории вероятностей, математической статистики, численного анализа с использованием ЭВМ.

Научная новизна. Создана модель формирования отклонения размеров и формы деталей как результат воздействия комплекса технологических и конструктивных параметров и факторов, физико-механических свойств и размеров заготовки.

Разработана математическая модель взаимосвязи конечных значений поперечных размеров деталей с основными параметрами и факторами процесса вытяжки, вызывающими отклонения от номинальных размеров.

Проведен анализ напряженно-деформированного состояния участков на скруглениях матрицы и пуансона в процессе вытяжки, осуществленный с использованием уравнений равновесия и соотношении теории упруго-пластических деформаций упрочняющегося тела в тороидальных координатах.

Теоретически выявлена и экспериментально подтверждена возможность увеличения точности поперечных размеров цилиндрических деталей (на 2 качества) путем исключения упругого изменения размера деталей и использования нового пуансона.

Практическая ценность. Разработанная программа автоматизированного расчета процесса однопереходной вытяжки цилиндрических деталей на языке Turbo Pascal 6.0 позволяет определить напряженно-деформированное состояние в каждой точке вытягиваемой заготовки в любой момент времени, конечные размеры и качество их точности полученной цилиндрической детали, а также оптимальные значения относительного зазора, относительного радиуса скругления и коэффициентов трения и вытяжки...

Предложена методика конструирования пуансона, обеспечивающего повышение точности размеров (на 2 качества) для деталей с диаметрами 30-180 мм путем исключения следующих погрешностей: неравномерности толщины детали по ее высоте, деформаций разгрузки и др.

Даны практические рекомендации по использованию программы и методики в лабораторных и производственных условиях.

Апробация работы. Основные разделы диссертации доложены и обсуждены:

- на научно-технической конференции "Механика и новые технологии". г.Севастополь. 1995 г.;
- на Юбилейной конференции, посвященной 165-летию МГТУ им.Н.Э.Баумана. г.Москва. 1995 г.;
- на научных семинарах кафедры "Физико-механические процессы и оборудование автоматизированной обработки давлением" МГТУ им.Н.Э.Баумана в 1993-1995 гг.

Публикации. Основные положения работы опубликованы в 2-х печатных работах

Объем работы. Диссертация состоит из введения, 5-ти глав, с двух выводов, списка литературы и приложения. Работа изложена на 142 страницах и содержит 120 страниц машинописного текста, 35 рисунков, 9 таблиц, список литературы из 152 наименований.

## КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулирована цель и дана общая характеристика работы.

В первой главе на основе литературных источников дано состояние вопроса, установлена актуальность решаемой задачи - технологического обеспечения точности размеров и формы цилиндрических деталей, изготовленных однопереходной вытяжкой из листовых заготовок.

Рассмотрены используемые для изготовления цилиндрических деталей различные материалы заготовки и способы вытяжки, из которых наиболее распространенным способом вытяжки является вытяжка жестким пуансоном.

Освещены различные методы исследования процесса осесимметричной вытяжки, раскрыты их преимущества и недостатки.

Отмечен большой вклад А.Д.Матвеева, А.Г.Овчинникова, Е.А.Попова, С.С.Соловцова, А.Д. Томленова, Л.А. Шофмана, С.П.Яковлева, в развитии инженерной теории вытяжки.

Дан анализ аналитического и графического методов исследования полей линий скольжения применительно к операциям листовой штамповки.

При решении многих задач пластического течения используют численные методы решения исходных дифференциальных уравнений.

Расчеты осесимметричных процессов формоизменения листовых заготовок можно выполнить путем последовательного применения процедуры вычисления параметров отдельного элемента заготовки и метода итераций. Такая единая методика разработана Д. Ву, Б. Кафтаноглу, А. Е. Титляновым.

Представлены данные по точности размеров цилиндрических деталей таких исследователей как М. Ф. Зубцов, В. И. Кухтаров, В. П. Медведев, С. М. Поляк, В. П. Романовский и др.

Отмечено их сравнительное единообразие с точки зрения учета факторов, влияющих на точность, а также указана их противоречивость. Основными факторами названы конечные размеры деталей, толщина и диаметр исходного материала. Установлено, что ни в одной работе данные по точности не связаны со всеми основными параметрами процесса вытяжки, такими как вид материала, коэффициенты трения и вытяжки, сила прижима, радиус скругления рабочих частей матрицы и пуансона, влияние пластической и упругой деформации, изменение температуры заготовки.

На основе анализа литературных и производственных данных выявлены возможные отклонения формы и размеров цилиндрических деталей, являющиеся результатом воздействия ряда технологических факторов. Описаны существующие мероприятия по их предотвращению.

Вторая глава посвящена исследованиям источников плавления погрешностей.

Основным видом оборудования для вытяжных операций являются кривошипные и гидравлические прессы, погрешности работы которых сводятся в основном к упругим деформациям станины и ползуна и зазорам между ползуном и направляющими, влияющие на формообразование деталей.

Рассмотрено влияние материала, длины, и термообработки направляющих ползуна на точность его движения.

Важной проблемой для изготовления деталей с заданной точностью является определение минимально допустимой жесткости прессы.

Качество изготовления штампа в значительной мере определяет точность размеров и форму изготавливаемых деталей. Вопросы стойкости штампов тесно связаны с достижимой и экономически целесообразной точностью штамповочных операций, так как ускоренный износ штампов приводит к понижению точности штампованных деталей.

Рассмотрено влияние используемых материалов для деталей вы-

тяжных штампов, методов их упрочнения и конструктивно-технологических особенностей штампов на точность размеров и формы вытягиваемых деталей.

При вытяжке особое значение для обеспечения размеров и формы приобретают стабильность механических свойств, физико-химического состояния и минимальная разнотолщинность штампуемого металла.

Показано, что способы получения листов оказывают влияние на процесс формирования размеров деталей.

Присутствие каждого отдельного химического элемента, входящего в состав штампуемого металла, существенно влияет на технологический процесс вытяжки и, следовательно, на конечные размеры и форму вытягиваемых деталей.

С уменьшением размеров зерна по сравнению с оптимальным возрастает сопротивление деформированию, увеличиваются упругие деформации, определяющие точность размеров штампованных деталей, повышается износ рабочих поверхностей пуансонов и матриц.

Наиболее благоприятной структурой сталей для вытяжных операций является феррит или феррит с небольшим содержанием пластинчатого перлита, который снижает ее пружинение, чем и обеспечивается получение деталей с более точными размерами.

Рассмотрено влияние анизотропии металла на конечные размеры деталей.

Рассмотрено использование различных смазочных материалов и их влияние на точность вытягиваемых деталей.

Сделаны предварительные выводы о степени влияния каждого из перечисленных факторов на точность деталей.

В третьей главе представлена методика проведения теоретических и экспериментальных исследований.

Для проведения теоретического исследования необходимо математическое моделирование процесса вытяжки с учетом контактного трения, изменения толщины, анизотропии и упрочнения материала.

Расчетная схема, примененная при моделировании процесса вытяжки согласуется с безэлементной теорией оболочек.

Исследование проводили в рамках механики сплошной среды при использовании положений варианта пластического течения, предложенного Р.Хиллом для случая трансверсально-изотропного материала.

Деформируемая заготовка по условиям деформации разделена на

пять характерных участков:

- плоский фланцевый, находящийся под прижимом ;
- тороидальный на рабочей кромке матрицы ;
- конический, не соприкасающийся с инструментом ;
- тороидальный на рабочей кромке пуансона ;
- плоский, донный, под плоским торцом пуансона .

Математическую модель процесса создают для каждого из пяти характерных участков, с использованием метода последовательных нагружений и вычислительного метода итераций.

Число этапов, на которое разбивается процесс, ограничивают двадцатью этапами.

При моделировании процесса используют уравнения равновесия, соотношения логарифмических деформаций, приращений интенсивности деформаций с приращениями главных напряжений, аппроксимированную функцию кривой упрочнения, соотношения Леви-Лоде.

Расчет компонентов напряженно-деформированного состояния начинают с элемента, для которого известны граничные условия.

Используя значения логарифмических деформаций (1) с соблюдением условия несжимаемости материала (2) для каждого элемента определяют приращения логарифмических деформаций при переходе от (j-1)-ого к j-му этапу нагружения (3):

$$\varepsilon_{ij} = \ln \frac{X_{ij}}{X_0} \quad (1); \quad d\varepsilon_r + d\varepsilon_\theta + d\varepsilon_t = 0 \quad (2); \quad d\varepsilon_i = \varepsilon_{ij} - \varepsilon_{i,j-1} \quad (3).$$

Для каждого фиксированного элемента подсчитывают значения приращения интенсивности деформаций:

$$d\bar{\varepsilon} = \sqrt{\frac{2(2+\bar{R})}{3(1+2\bar{R})} [(1+\bar{R})(d\varepsilon_\theta^2 + d\varepsilon_t^2) + 2\bar{R} d\varepsilon_\theta d\varepsilon_t]} \quad (4)$$

При упруго-пластическом подходе связь деформаций и напряжений задают в линейном виде и представляют в виде соотношений Леви-Лоде с учетом анизотропии штампуемого материала:

$$\sigma_\theta - \sigma_r = \frac{2(2+\bar{R})}{3(1+2\bar{R})} \frac{\bar{\sigma}}{d\bar{\varepsilon}} [(1+\bar{R}) d\varepsilon_\theta + \bar{R} d\varepsilon_t]; \quad (5)$$

$$\sigma_t - \sigma_r = \frac{2(2+\bar{R})}{3(1+2\bar{R})} \frac{\bar{\sigma}}{d\bar{\varepsilon}} [\bar{R} d\varepsilon_\theta + (1+\bar{R}) d\varepsilon_t] \quad (6)$$

Представленные уравнения с уравнениями равновесия, преобразованные к конечно-разностному виду образуют замкнутую систему. Процедура вычисления носит характер последовательных приближений со степенью точности 0.2%.

Окончанию последовательного расчета элементов участка соответствует выход элемента за пределы границ участка.

После выявления компонентов напряженно-деформированного состояния на основе закона А.А. Ильюшина о разгрузке определяют деформации разгрузки после снятия нагрузки:

$$\epsilon_{\theta i}^p = \frac{1}{E} \left[ G_{\theta}^p - \sqrt{(G_i^p + G_t^p)} \right]_i \quad (7)$$

Далее определяются изменения размеров цилиндрической детали при разгрузке, изменении температуры и вызванные износом инструмента.

Результирующее изменение размеров детали будет равно:

$$\Delta d_i = \Delta d_i^p + \Delta d_i^T + \Delta d_i^H + \Delta d_i^{t^o} + \Delta d_i^C, \quad (8)$$

где  $\Delta d_i^p, \Delta d_i^T, \Delta d_i^H, \Delta d_i^{t^o}, \Delta d_i^C$  - изменение размеров, вызванные соответственно: с деформациями разгрузки, неравномерностью толщины, износом инструмента, изменениями температуры заготовки и случайными погрешностями.

Для подтверждения достоверности математической модели проведен факторный эксперимент на основе несимметричного, насыщенного плана Рехтшафнера.

В качестве исследуемых параметров, определяющих формоизменение заготовки, были приняты толщина стенки  $t$  и внешний диаметр  $d$ . Предварительными исследованиями установлено, что при формоизменении доминирующими являются следующие факторы:  $z/t_o$  - относительный зазор между пуансоном и матрицей,  $(t_o/D)100$  - относительная толщина заготовки ( $t_o, D$  - соответственно исходная толщина и диаметр заготовки),  $K$  - коэффициент вытяжки.

Значимость параметров модели проверяли по критерию Стьюдента.

Проверка гипотезы адекватности и математической модели реальному процессу вытяжки проводилась по критерию Фишера.

В процессе исследования использовали круглые заготовки из латуни Л62 и коррозионно-стойкой стали 12Х18Н9, предварительно вырубленные из ленточного материала.

Эксперименты проводили на универсальной испытательной машине УИМ-50 с номинальным усилием 0.5 МН. Скорость перемещения плунжера поддерживалась постоянной и равной 20 мм/мин.

В качестве деформирующего инструмента использовали вытяжной штамп. При измерениях пользовались микрометром, толщиномером и штангенциркулем.

В четвертой главе разработаны теоретические основы определения точности, изложена разработанная математическая модель операции вытяжки и методика определения конечных размеров деталей.

Плоский фланцевый участок разбивается на 20 кольцевых элементов. Определяют исходный и текущий радиусы  $(i+1)$ -го элемента, логарифмические тангенциальные деформации, деформации по толщине, приращения деформаций при переходе от  $(j-1)$ -ой к  $j$ -ой стадии.

Интенсивность деформаций определяется как сумма значений интенсивности деформаций элемента на предыдущем этапе и приращения интенсивности деформаций:

$$\varepsilon_{i+1,j} = \varepsilon_{i+1,j-1} + d\varepsilon_{i+1,j} \quad (9)$$

Используя соотношения Леви-Лодэ для трансверсально-изотропного материала, уравнение равновесия, преобразованное к конечноразностному виду запишется так:

$$(G_z t)_{i+1,j} = (G_z t)_{ij} + 0,5 \left[ \left( \frac{G_\theta - G_z}{\rho} t \right)_{i+1,j} + \left( \frac{G_\theta - G_z}{\rho} t \right)_{ij} + \frac{2\mu t_{i+1,j}}{t_0} (G_{t_{i+1,j}} + G_{t_{ij}}) \right] (\rho_{i+1,j} - \rho_{ij}) \quad (10)$$

Систему уравнений решают итерационным методом. В данной системе условие пластичности (энергетическое условие Мизеса-Генки)

$$G_s = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(G_z - G_\theta)^2 + (G_\theta - G_t)^2 + (G_t - G_z)^2}$$

соблюдается автоматически благодаря уравнениям (4) и соотношениям Леви-Лодэ (5) и (6).

Из уравнения (10) определяется первое приближение растягивающего напряжения, сравнивая которое с предыдущим, должно удовлетвориться следующее неравенство:

$$\left| \frac{G_{z_{i+1,j}} - G_{z_{i+1,j}}^*}{G_{z_{i+1,j}}} \right| \leq 0,002 \quad (11)$$

При невыполнении этого условия уточняется значение толщины  $t$ , которое ранее задавалось произвольно, по следующим формулам:

$$d\varepsilon_{t_{i+1,j}}^* = \frac{1}{\bar{R}} \left[ \frac{3(1+2\bar{R})}{2(2+\bar{R})} \cdot \frac{d\bar{\varepsilon}}{\bar{G}} (G_\theta - G_z) - (1+\bar{R}) d\varepsilon_\theta \right]_{i+1,j}, \quad (12)$$

$$\varepsilon_{t_{i+1,j}}^* = \varepsilon_{t_{i+1,j-1}} + d\varepsilon_{t_{i+1,j}}^*, \quad (13)$$

$$t_{i+1,j} = t_0 e^{\varepsilon_{t_{i+1,j}}^*} \quad (14)$$

Процесс итерации повторяют до выполнения условия (11). Расчет определенного элемента заканчивают при его переходе на скругленную кромку матрицы, т.е. при выходе за пределы участка. Аналогичным образом рассчитывают искомые параметры для оставшихся элементов на всех этапах.

Далее рассчитывают тороидальный участок. Данный участок разбивают на 36 кольцевых элементов. Перемещение элемента задают как изменение угла между нормалью элемента по толщине и осью симметрии.

Для определения параметров напряженно-деформированного состояния элементов тороидальных участков на матрице и пуансоне используют тороидальные координаты.

Тороидальные участки на скруглениях матрицы и пуансона рассматривают соответственно как внутреннюю и внешнюю четверти тора, относительные деформации для которых равны:

$$\epsilon'_\varphi = \frac{\partial u}{\partial \varphi}; \quad \epsilon'_\theta = \mp \frac{U \sin \varphi + W \cos \varphi}{\rho_0 \mp \rho \sin \varphi}, \quad (15)$$

где  $u, w$  - перемещения соответственно в направлениях координатных кривых  $\varphi$  и  $\psi$  (верхний и нижний знаки присваивают соответственно уравнениям для участков на матрице и пуансоне);

$$U = t_{i,j,k} - t_{ij}; \quad W = (\tau_{i(m)} + t_{ij}/2)(\varphi_{i,j+1} - \varphi_{ij}).$$

Логарифмические деформации определяются:

$$\text{а) деформация по толщине} \quad \epsilon_{\rho_{i+1,j}} = \rho_n \frac{t_{i+1,j}}{t_0}; \quad (16)$$

$$\text{б) тангенциальная деформация} \quad \epsilon_{\theta_{i+1,j}} = \rho_n \frac{1}{1 - \epsilon_{\theta_{i+1,j}}}; \quad (17)$$

Уравнения равновесия элемента в дифференциальной форме:

$$\frac{\partial G_\varphi}{\partial \varphi} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \tau_{\varphi\varphi}}{\partial \varphi} + \frac{\sin \varphi}{\rho_0 \mp \rho \sin \varphi} (G_\varphi - G_\theta) + \frac{G_\varphi - G_\theta}{\rho} \frac{\cos \varphi \tau_{\varphi\varphi}}{\rho_0 \mp \rho \sin \varphi} = 0 \quad (18)$$

$$\frac{\partial \tau_{\varphi\varphi}}{\partial \varphi} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial G_\theta}{\partial \varphi} + \frac{\cos \varphi}{\rho_0 \mp \rho \sin \varphi} (\pm G_\theta - G_\varphi) + \frac{2 \tau_{\varphi\varphi}}{\rho} \frac{\sin \varphi \tau_{\varphi\varphi}}{\rho_0 \mp \rho \sin \varphi} = 0 \quad (19)$$

Влияние изгиба учи павт следующим выражением:

$$G\varphi = 0,85 \frac{\bar{c} t}{2z_m/t+1} \quad (20)$$

Заменяя в уравнениях (18) и (19) касательные напряжения  $\tau_{\varphi}$  через  $\mu G\varphi$ , учитывая (20) и преобразовывая их к конечно-разностному виду, получаем полную систему уравнений, которая решается по аналогии с предыдущим участком.

При определении напряженно-деформированного состояния конического участка в качестве параметра, определяющего номера этапов, задается перемещение (ход) пуансона  $\Delta S$ :

$$\Delta S = \Delta R(n+20)/20, \quad (21)$$

$n$  - количество элементов переходящих в конический участок в течение процесса вытяжки. Перемещение пуансона на  $j$ -ом этапе равно:

$$S_j = S_{j-1} + \Delta S \quad (22)$$

где  $S_{j-1}$  - перемещение пуансона до  $(j-1)$ -го этапа.

Учитывая (22), а также геометрические параметры инструмента и заготовки угол  $\varphi_j$  между нормалью к элементу и осью симметрии равен:

$$\varphi_{ij} = \arcsin \left[ (ab + \sqrt{a^2 b^2 - (a + (S-b))^2 (b - (S-b))^2}) / (a^2 + (S-b)^2) \right], \quad (23)$$

где  $a = r_m + r_n + z$ ;  $b = r_m + r_n + t_{ij}$ .

Далее определяются окружные и меридиональные радиусы кривизны поверхности первого элемента, находящийся на стыке границ тороидального участка на пуансоне и конического участка:

$$R_{\varphi_{ij}} = R_{\theta_{ij}} = r_n + \frac{t_{ij}}{2} \quad (24)$$

Текущий радиус рассматриваемого элемента равен:

$$r_{i+j} = r_{ij} + \left( \frac{R_{\varphi_{i+j}} + R_{\theta_{ij}}}{2} \right) (\sin \varphi_{i+j} - \sin \varphi_{ij}). \quad (25)$$

Остальные уравнения, необходимые для получения замкнутой системы, идентичны уравнениям (9)-(14). Далее проверяется условие (11) и при положительном исходе рассчитывается следующий элемент, при отрицательном необходимо уточнение значений окружного и меридионального радиусов и угла, принятых в первом приближении аналогичным параметрам первого элемента, текущей толщины элемента, также принятой произвольно.

На донном участке материал вытягивается в условиях двухос-

ного напряженного состояния - растягивающих меридиональных и тангенциальных напряжений.

Участок разбивают на 20 кольцевых элементов. Первым считается элемент, находящийся в центре круга, для которого необходимо задать начальное условие:

$$\text{при } \vartheta_i = 0 \quad \varepsilon_{r_{0i}} = \frac{\bar{\varepsilon}_{0i}}{2} = - \frac{\varepsilon_{t_{0i}}}{2} = \varepsilon_{\theta_{0i}}.$$

Значения исходного и текущего радиусов определяется:

$$R_{i+1} = R_0 + i \Delta R; \quad (26)$$

$$\vartheta_{i+1,j} = 1 / \sqrt{\vartheta_{ij}^2 - (R_{i+1}^2 - R_i^2) \frac{2t_0}{t_{i+1,j} + t_{ij}}}. \quad (27)$$

Далее используют уравнения (3)-(11).

Уравнение равновесия выглядит следующим образом:

$$(\bar{G}_r t)_{i+1,j} = (\bar{G}_r t)_{ij} + \frac{1}{2} \left[ \left( \frac{\bar{G}_\theta - \bar{G}_r t}{\vartheta} \right)_{i+1,j} + \left( \frac{\bar{G}_\theta - \bar{G}_r t}{\vartheta} \right)_{ij} \right] (\vartheta_{i+1,j} - \vartheta_{ij}). \quad (28)$$

Одной из важнейших причин, определяющих изменение размера детали, является упругая деформация после снятия деформирующего усилия и удаления детали из штампа.

При решении данной задачи принимают гипотезу о полной разгрузке деформируемого тела (предполагается полное отсутствие остаточных деформаций).

Деформируемую заготовку разбивают на 3 участка:

1) участок сформированный при переменном очаге деформации (при возрастании растягивающего напряжения до максимальной величины);

2) участок сформированный при переменном очаге деформации (при убывании значения растягивающего напряжения);

3) кольцевой участок у открытого торца.

Для первого и второго участков значение тангенциальной составляющей деформации разгрузки равно:

$$\varepsilon_{\theta_i}^P = - \frac{\bar{G}_{\theta_i}^P - \nu \bar{G}_{r_i}^P}{E}. \quad (29)$$

Так как у наружного кольцевого участка в течение всего процесса отсутствует растягивающее напряжение и  $-\bar{G}_\theta^P = \bar{G}$  тангенциальная деформация разгрузки на третьем участке:

$$\varepsilon_{\theta_i}^p = \frac{\bar{\sigma}_i}{E} \quad (30)$$

Для первого участка в уравнении (29) используют максимальное значение растягивающего напряжения, возникающее при перемещении края фланца на расстояние  $\xi = 0.607 \cdot R_a$  ( $R_a$  - радиус заготовки), для всех элементов этого участка.

В уравнении (29) (для второго участка) значения напряжений соответствуют максимальному значению растягивающего напряжения для каждого рассматриваемого элемента в отдельности в течение процесса вытяжки и определены при расчете математической модели.

Имея значения тангенциальной деформации определяют изменение размера каждого элемента после разгрузки:

$$\Delta d_i^p = \varepsilon_{\theta_i}^p \cdot d, \quad (31)$$

где  $d$  - диаметр детали.

Рассмотрены влияние некоторых существенных факторов, в частности, изменение температуры детали и инструмента в процессе вытяжки, неточность размера и износ инструмента, а также случайные изменения параметров процесса на конечные размеры деталей.

В пятой главе проведено экспериментальное подтверждение математической модели и результаты опробывания разработанного способа конструирования пуансона, повышающего точность деталей.

Сопоставление экспериментальных значений толщин и диаметров по высоте детали с расчетными показало, что их несовпадение составляет не более 7.5 % (для толщины) и 9 % (для диаметра).

Представлены графические зависимости параметров формоизменения заготовки  $t_0$  и  $D$  от основных технологических факторов процесса: относительного зазора -  $z/t_0$ , коэффициента вытяжки -  $k$ , относительной толщины -  $(t_0/D)100$  и исходной толщины заготовки -  $t_0$ .

Значения толщин и диаметров деталей получены соответственно для латуни Л62 (12 и 9-й ~~к~~ квалитеты точности) и для стали 12Х18Н9 (11 и 10-14 квалитеты точности).

Выявленные законы изменения геометрических размеров деталей и причины такого изменения позволили наметить пути уменьшения влияния рассмотренных факторов на точность размеров цилиндрических деталей.

В соответствии с результатами теоретических и экспериментальных исследований был спроектирован фасонный пуансон. Диаметр пуансона в каждом определенном сечении равен:

$$d_{n_i} = d_n \pm \Delta d_i,$$

где  $\sigma_n$  - ном.нальный диаметр детали;

$\Delta \sigma_i$  - результирующая величина погрешности в данном сечении, определяемая из уравнения (8).

По совокупности полученных значений построены экспериментальные графики и составлена сравнительная таблица влияния формы пуансона на точность размеров.

При вытяжке фасонным пуансоном достигалась точность диаметральных размеров на 2 качества выше, а отклонения значений толщины по всей высоте детали почти не отличались от тех же значений при использовании цилиндрического пуансона.

#### ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

1. На основе выполненных исследований даны научно-обоснованные решения, состоящие в возможности теоретического определения, повышения и обеспечения заданной точности цилиндрических деталей без фланца, внедрение которых ускоряет научно-технический прогресс в технологии штамповки указанных деталей из листовых заготовок, обеспечивает увеличение износостойкости инструмента и производительности, а также способствует ритмичности работ и снижает себестоимость деталей.

2. На основании результатов исследований выявлены основные технологические и конструктивные факторы, непосредственно влияющие на отклонения размеров цилиндрических деталей при вытяжке, и источники их появления, проведен их анализ. Дана качественная оценка влияния факторов на точность размеров, которая позволяет выявить из них наиболее существенные: физико-механические свойства материала, погрешность изготовления штампа, износ штампа, пластические и упругие деформации заготовки, температурные деформации. Влияние этих факторов следует учитывать при проектировании детали и технологического процесса.

3. Разработана методика анализа напряжений деформированного состояния заготовки при вытяжке с использованием пошагового метода нагружения на основе теории течения и безмоментной теории оболочек с учетом тороидальных координат. Созданы математические модели: процесса вытяжки деталей из листовых заготовок, учитывающие основные параметры процесса деформирования и процесса формирования точности размеров с учетом изменения толщины детали, физико-механических свойств и анизотропии заготовки, контактного трения, геометрических параметров инструмента, коэффициента вы-

тяжки. Модель реализована в виде программы для ЭВМ (с использованием итерационного метода решения). Математическая модель позволяет определить распределение напряжений и деформаций в деформируемой заготовке в течение всего процесса, что необходимо для определения изменения размеров при разгрузке детали и, тем самым, появляется возможность прогнозировать отклонения размеров вытягиваемой детали и оптимизировать технологический процесс вытяжки.

4. Разработана методика расчета точности размеров деталей с учетом их разгрузки (после снятия деформирующего усилия). Исключение упругого изменения размеров позволяет в среднем увеличить точность поперечных размеров деталей на 2 качества.

5. Показано, что определяющее влияние на характер формирования отклонений размеров оказывает геометрические размеры инструмента (радиус скругления кромки матрицы, зазор между пуансоном и матрицей), заготовки (относительная толщина, толщина и допуск на нее) и коэффициенты трения и вытяжки. При выборе определенных значений перечисленных параметров для проектирования технологического процесса вытяжки можно значительно уменьшить величину отклонения от назначенных размеров цилиндрической детали.

6. Благодаря исключению утонения верхней части вытягиваемой заготовки детали значительно уменьшились нормальные напряжения на калибрующей поясok вытяжной матрицы. Это обеспечило увеличение износостойкости матрицы (в 3-5 раз) при сохранении требуемой точности деталей.

7. Теоретически и экспериментально исследовано влияние технологических параметров на конечные размеры деталей. Установлено, что

- уменьшение относительного зазора до  $z/t=1.2$  и коэффициента вытяжки до  $k=1.6$  при увеличении исходной и относительной толщин заготовки соответственно до  $t=0.4$  мм и  $(t/D)100=0.4$  приводит к наименьшим отклонениям от требуемых значений толщины детали: для латуни - от 3.6 % у доньшка до 10.5 % у свободного края; для коррозионно-стойкой стали от 3.1 до 9.4 %;
- при уменьшении значений всех перечисленных выше параметров соответственно до  $z/t=1.2$ ,  $k=1.6$ ,  $t=0.2$  мм,  $(t/D)100=0.3$  максимальные отклонения диаметров от требуемых - 0.6 % для латуни и 0.7 % для коррозионно-стойкой стали.

8. Удовлетворительная сходимость полученных теоретических результатов с данными, известными из литературы, а также экспериментальными данными, позволяет рекомендовать разработанную математическую модель к использованию в САПР ТП. Математическая модель может быть использована автономно для анализа и определения оптимального сочетания параметров технологического процесса вытяжки.

9. Установлена возможность повышения точности размеров цилиндрической детали за счет исключения влияния непостоянства толщины по высоте и деформаций разгрузки; для этого предложен способ конструирования фасонного пуансона, позволивший увеличить точность поперечных размеров деталей в среднем на 2 качества по сравнению с результатами при использовании цилиндрического пуансона.

10. Разработанная методика и математическая модель были использованы в МЭЛЗ при разработке технологических процессов вытяжки цоколей ламп накаливания Е27 и деталей оптики электронно-лучевой трубки. Ожидаемый технический и технологический результат: увеличение точности поперечных размеров, износостойкости штампов, производительности и коэффициента загрузки оборудования, снижение себестоимости.

Основное содержание работы отражено в следующих работах:

1. Григорян В.В. Влияние изменения толщины и упругого пружинения на точность цилиндрических деталей при вытяжке // Исследования в области теории, технологии и оборудования штамповочного производства : Сборник научных трудов. - Тула, 1995. - С.24-28.

2. Ковалев В.Г., Григорян В.В. Экспериментальное определение размеров деталей при вытяжке // Вестник машиностроения. -1995. -№8. - С.36-38.