

ՀԱՅԱՍՏԱՆԻ ՀԱՆՐԱՊԵՏՈՒԹՅԱՆ ԳԻՏՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ԱԶԳԱՅԻՆ ԱԿԱԴԵՄԻԱ  
ՄԵԽԱՆԻԿԱՅԻ ԻՆՍՏԻՏՈՒՏ

ՔԱՀՐԻԶԻ ՄՈՀԱՄՄԱԴ

ՀԻՂՐԱՄԵԽԱՆԻԿԱԿԱՆ ԴԵՖՈՐՄԱՑՄԱՄԲ ԳԼԱՆԱՅԻՆ ԹԱՂԱՆԹՆԵՐԻ ՊԼԱՍՏԻԿ  
ՁԵՎԱՓՈԽՄԱՆ ՊՐՈՑԵՍՆԵՐԻ ՄՈԴԵԼԱՎՈՐՈՒՄԸ

Ա.02.04 - «ԴԵՖՈՐՄԱՑՎՈՂ ՊԻՆԴ ՄԱՐՄՆԻ ՄԵԽԱՆԻԿԱ» մասնագիտությամբ  
տեխնիկական գիտությունների թեկնածուի գիտական աստիճանի  
հայցման ատենախոսության

Ս Ե Ղ Մ Ա Գ Ի Ր

ԵՐԵՎԱՆ– 2012

---

НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК РЕСПУБЛИКИ АРМЕНИЯ  
ИНСТИТУТ МЕХАНИКИ

КАХРИЗИ МОХАММАД

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ПЛАСТИЧЕСКОГО ФОРМОИЗМЕНЕНИЯ  
ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ОБОЛОЧЕК ГИДРОМЕХАНИЧЕСКИМ  
ДЕФОРМИРОВАНИЕМ**

**А В Т О Р Е Ф Е Р А Т**

Диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук  
по специальности 01.02.04 «МЕХАНИКА ДЕФОРМИРУЕМОГО ТВЕРДОГО  
ТЕЛА»

ЕРЕВАН – 2012

Ատենախոսության թեման հաստատվել է Երևանի պետական  
համալսարանում

Գիտական ղեկավար՝

տեխ.գիտ.դոկտոր Է.Ա.Նազարյան

Պաշտոնական ընդդիմախոսներ՝

տեխ.գիտ.դոկտոր, պրոֆեսոր

Ռ.Ս.Կիրակոսյան

Ֆ.Ս.գ.թ., պրոֆեսոր, Մ.Վ.Բելուբեկյան

Առաջատար կազմակերպություն՝ Հայաստանի Պետական  
ճարտարագիտական Համալսարան (Պոլիտեխնիկ)

Պաշտպանությունը կայանալու է «01» հունիսի 2012 թ. ժամը 14<sup>00</sup> -ին ՀՀ ԳԱԱ  
Մեխանիկայի ինստիտուտում գործող, Մեխանիկայի - 047 մասնագիտական  
խորհրդում (հասցեն՝ 0019, Մարշալ Բաղրամյանի պող. 24բ. e-mail:  
avsah@mechins.sci.am):

Ատենախոսությանը կարելի է ծանոթանալ ՀՀ ԳԱԱ Մեխանիկայի  
ինստիտուտի գրադարանում:

Սեղմագիրը առաքված է « 27 » ապրիլի 2012 թ.

Մասնագիտական խորհրդի  
գիտական քարտուղար, Ֆ.Ս.գ.թ.



Ա.Վ.Սահակյան

Тема диссертации утверждена в Ереванском государственном университете

Научный руководитель:

Доктор техн.наук Э.А.Назарян

Официальные оппоненты:

Доктор техн.наук, профессор, Р.М. Киракосян

К.ф.м.н, профессор М.В.Белубемян

Ведущая организация:  
(Политехник)

Государственный Инженерный Университет Армении

Защита состоится « 01 » июня 2012 г. в 14<sup>00</sup> часов

на заседании Специализированного совета, Механика- 047 в Институте механики

НАН РА по адресу: 0019. г.Ереван, пр. Маршала Баграмяна 24б, e-mail:

avsah@mechins.sci.am

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института механики НАН РА.

Автореферат разослан « 27 » апреля 2012 г.

Ученый секретарь

Специализированного совета д.ф.м.н.



А.В.Саакян

## Общая характеристика работы

**Актуальность темы:** в условиях современного уровня научно-технического прогресса развитие машиностроения характеризуется совершенствованием существующих и разработкой новых технологических процессов, способствующих повышению качества изделий и эффективности производства.

Среди всего многообразия машиностроительных технологий сравнительно широкое распространение получили методы холодного пластического формоизменения изделий из заготовок типа цилиндрических оболочек с использованием в качестве деформирующих элементов эластичных, жидких и газообразных сред. Особенностью этих видов формоизменения являются универсальность деформирующего инструмента, а в ряде случаев значительное расширение технологических возможностей процесса формоизменения. Деформирование материалов жидкостью позволяет избежать резкой концентрации нагрузок, равномерно прокладывать деформирующее усилие и создавать благоприятные схемы напряженно-деформированного состояния.

Деформирование жидкостью наиболее эффективен при формоизменении изделий сложных конфигураций, которые часто невозможно изготовить традиционными методами в инструментальных (жестких) устройствах. Поэтому становится актуальным исследование и разработка новых прогрессивных технологических процессов формоизменения, позволяющих значительно снизить материалоемкость и трудоемкость при одновременном обеспечении требуемых показателей качества изделий. В автомобилестроении и самолетостроении актуальной остается проблема создания легких структур, отвечающих одновременно требованиям экономичности, прочности и жесткости конструкций.

Основным отличительным признаком формоизменения тонкостенных структур под действием давления жидкости является то, что форма изделия по длине заготовки может быть различного поперечного сечения по сравнению с методом прессования, где форма поперечного сечения должна быть постоянной по длине изделия.

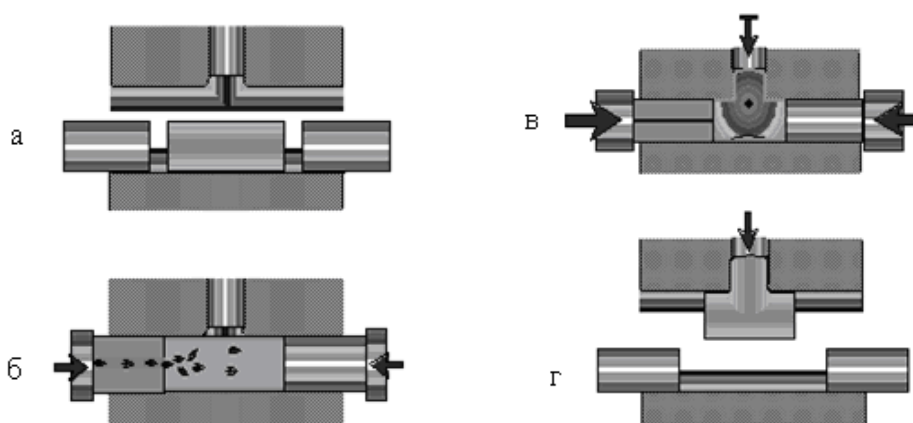


Рис.1. Последовательность гидромеханического формоизменения трубной заготовки, а-размещение трубы, б- герметизация и заполнение жидкостью, в- давление и осевое перемещение материала, г- снятие готового изделия.

Характерная схема гидромеханического формоизменения изделий из тонкостенных структур представлена на рис.1. Длительность процесса при этом составляет около 10-15 сек., которое согласно принятой классификации считается как медленный процесс, поэтому в работе динамические эффекты не учитываются.

Реализация процесса гидромеханического формоизменения тонкостенных структур ограничена с одной стороны возможностью достижения определенных степеней деформации, обусловленной механическими свойствами и деформационными характеристиками применяемых материалов, с другой стороны – потерей устойчивости, обусловленной размерными характеристиками исходных трубных заготовок (рис.2).

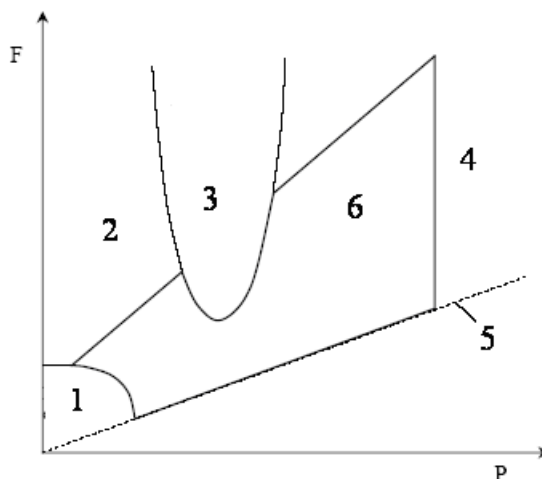


Рис.2. Возможные области процесса гидромеханического деформирования (1-упругая деформация, 2-складкообразование, 3-потеря устойчивости, 4-разрыв, 5-уплотнение, 6-область формоизменения, F-осевое усилие, P-внутреннее давление).

Возможные варианты потери устойчивости, разрыва и складкообразования в настоящей работе не рассматриваются, в связи с тем, что эти процессы достаточно сложны и могут составлять предмет отдельных исследований.

**Цель и основные задачи исследования:** моделирование стационарных и нестационарных процессов формоизменения цилиндрических оболочек под действием внутреннего давления и осевого усилия. Разработка математических моделей описания процессов с учетом изменения толщины материала и деформационного упрочнения. Сопоставление результатов, полученных взаимодополняющими методами моделирования и экспериментальных исследований. Для достижения поставленной цели сформулированы и решены следующие основные задачи:

1. Критический анализ существующих моделей и методов описания процессов холодного пластического формоизменения цилиндрических оболочек с учетом изменения толщины и деформационного упрочнения.
2. Моделирование процессов формоизменения трубчатых изделий с отводами. Определение критических величин осевого усилия и внутреннего давления с учетом изменения толщины материала и деформационного упрочнения, при наличии и отсутствии контактного трения.
3. Моделирование процесса формоизменения цилиндрических заготовок в изделия квадратного поперечного сечения. Определение минимальных величин углового радиуса в зависимости от условий контактного трения. Установление

предельных величин давления при заданных исходных и конечных размерах заготовки и изделия.

4. Моделирование начального этапа процесса вытяжки с учетом изменения толщины и деформационного упрочнения. Установление предельной величины коэффициента формоизменения. Определение, по теории течения, несущей способности кольцевого диска, применяемое в приспособлениях для реализации процесса деформирования.
5. Численное моделирование нестационарных процессов формоизменения трубчатых изделий с отводами. Экспериментальные исследования по определению деформационных характеристик сплавов цветных металлов в условиях одноосного растяжения. Обоснование работоспособности и достоверности модели по согласию расчетов с результатами экспериментальных исследований.

При решении поставленных задач использованы современные методы теории механики деформируемого твердого тела, деформационная теория пластичности и теория пластического течения, математические методы теории аппроксимации функций, методы анализа стационарных и нестационарных процессов, методы конечных элементов (МКЭ). Взаимозависимое изменение толщины материала и деформационного упрочнения моделированы путем интегрирования дифференциальных уравнений, отображенных на девиаторной плоскости цилиндра пластичности. Методика экспериментальных исследований разработана с учетом возможности адекватного сопоставления результатов эксперимента с численными результатами аналитической модели.

**Научная новизна работы заключается в следующем:** Получена и обоснована новая обобщенная математическая модель, позволяющая описывать стационарные и нестационарные процессы пластического деформирования цилиндрических оболочек в изделия с отводами и квадратного поперечного сечения с учетом влияния трения, изменения толщины материала и деформационного упрочнения.

Предложены схемы определения полей напряжений и деформаций при использовании различных условий пластичности. Разработана аналитическая модель определения несущей способности цилиндрических узлов деформирующего устройства. Разработан пакет программного обеспечения, реализующий предложенные методы моделирования в зависимости от условий формоизменения.

Проведено экспериментальное исследование по определению механических свойств и деформационных характеристик используемых материалов. Установлена область устойчивой деформации при формоизменении трубной заготовки в изделие с отводами в зависимости от соотношения размерных характеристик готового изделия и заготовки.

**Практическая ценность** результатов работы заключается в технологических рекомендациях по применению разработанных моделей и закономерностях, устанавливающих взаимосвязь между приложенной осевой нагрузкой и величиной внутреннего давления.

**Достоверность результатов работы** подтверждается корректным использованием теоретических и экспериментальных методов обоснования полученных результатов,

выводов и рекомендаций, а также основывается на согласованности данных, полученных разными взаимно дополняющими методами, в том числе, экспериментами на достаточно широком спектре изменения механических свойств материалов и размерных характеристиках исследуемых образцов.

**Апробация результатов работы:**

Основные результаты докладывались на следующих международных и национальных конференциях:

- International Deep Drawing Research Group, IDDRG -2010 Conference , Graz, Austria, 31 May 02 June, 2010;
- 13-ая Международная научно-практическая конференция «Технологии... от нано до макроуровня», 12-15 апреля 2011 года, Санкт-Петербург;
- VII Международная конференция «Проблемы динамики взаимодействия деформируемых сред» , 19-23 апреля 2011 года, Горис-Степанакерт;
- 14<sup>th</sup> International conference MPTN, Turkey, 2010;
- 10<sup>th</sup> Engineering Conference of Manufacturing and production, 7-9 march, 2010, Technical University of Babul, Iran Islamic Republic;
- The first national conference performance research of Iran water resources , 11-13 May, 2009, Kermanshah Industrial University, Iran Islamic Republic;
- 11<sup>th</sup> Engineering conference of Manufacturing and production, 19-21 october, 2010, Tabriz University , Iran Islamic Republic;
- Общем научном семинаре кафедры механики Ереванского государственного университета и института механики НАН РА.

**Публикации:** по теме диссертации опубликовано 12 работ в изданиях, рекомендованных ВАК.

**Объем работы:** диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, выводов и списка использованных источников.

Работа содержит 110 страниц текста, включая 48 рисунков, 5 таблиц и 116 наименований библиографии.

**Основное содержание работы:** во введении обоснована актуальность решаемой проблемы, описаны отличительные характерные особенности процесса формоизменения цилиндрических оболочек гидромеханическим деформированием от других процессов холодного деформирования, сформулированы цель и задачи исследования.

Первая глава содержит критический анализ математических моделей описания поведения цилиндрической оболочки при больших пластических деформациях. Рассмотрены основные уравнения пластического состояния, а именно: уравнение равновесия с учетом и без учета изменения толщины материала, уравнения связи напряжений и деформаций (приращения деформаций), условие постоянства объема, а также разные математические модели связи эффективного напряжения от эффективной деформации (закон деформационного упрочнения). Приведены критерии пластического течения при плосконапряженном и плоскодеформированном состояниях. Показано, что по существующим методикам нет возможности получения замкнутых аналитических решений задач при плоском напряженном состоянии с

учетом взаимозависимого изменения толщины материала и деформационного упрочнения. В конце главы обоснованы цель и задачи проводимых исследований.

В первом разделе второй главы рассмотрен процесс формоизменения цилиндрической оболочки при одновременном действии осевого сжатия и внутреннего давления (Т-Hydro forming) (рис.3). Показано, что в указанных условиях

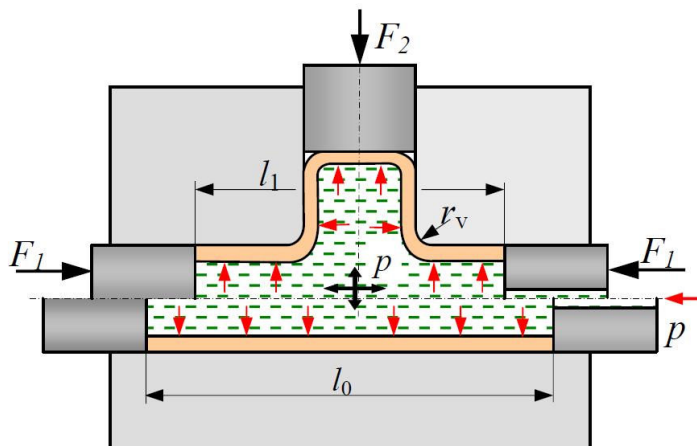


Рис. 3. Формоизменение трубной заготовки при осевом сжатии и внутреннем давлении.

формоизменение трубной заготовки с цилиндрическим отводом того же диаметра является нестационарным процессом, и разные участки заготовки деформируются в различных напряженных состояниях (рис.4).

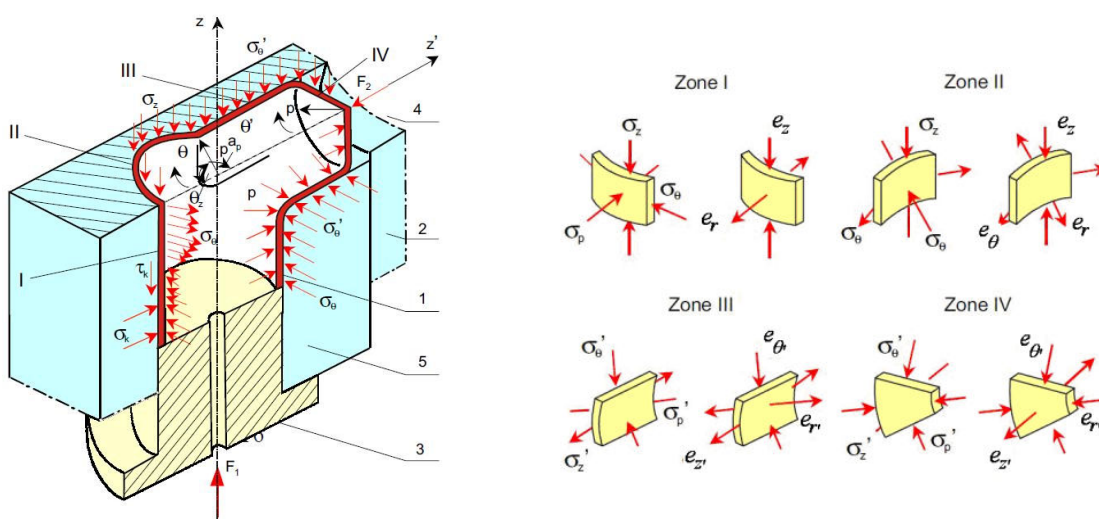


Рис.4. Напряженно деформированное состояние при формоизменении Т-образного изделия.

С целью моделирования сложного процесса пластического течения Т-образных изделий рассмотрены упрощенные схемы формоизменения цилиндрической оболочки и получены соответствующие формулы для расчета величины внутреннего давления в зависимости от размерных характеристик трубной заготовки и деформационных характеристик деформируемого материала.

- а) При свободном формоизменении .
- б) При формоизменении под действием внутреннего давления и осевого сжатия.

Показано, что во втором случае формоизменения, возможен вариант изготовления изделий с постоянной толщиной стенки.

$$а) \quad P = \frac{2}{\sqrt{3}} k \left( \frac{2}{\sqrt{3}} \ln \frac{r}{r_0} \right)^n t_0 \frac{r_0}{r^2}; \quad (1)$$

$$б) \quad P = \frac{1}{\sqrt{3}} k \left( \frac{2}{\sqrt{3}} \ln \frac{r}{r_0} \right)^n \frac{t_0}{r}; \quad (2)$$

В формулах (1) и (2)  $r, t$  и  $r_0, t_0$  - соответственно конечные и начальные величины радиуса и толщины трубной заготовки. При выводе (1) и (2) использован степенной закон зависимости эквивалентного напряжения от эквивалентной деформации

$$\sigma_s = k \varepsilon^n, \quad (3)$$

где  $k$  и  $n$  - параметры деформационного упрочнения, связанные с механическими свойствами деформированных материалов соотношениями:

$$k = \sigma_b e^n n^{-n}; \quad n = \ln(1 + \delta). \quad (4)$$

В (4)  $\sigma_b$  и  $\delta$  - соответственно напряжение предела прочности и величина относительного удлинения при одноосном растяжении.

Во втором разделе второй главы рассмотрен процесс формоизменения цилиндрической оболочки в изделие квадратного поперечного сечения под действием внутреннего давления. Задача решена с использованием критерий пластического течения Треска и Мизеса в условиях плоского деформированного состояния. Показано, что в общем случае очаг пластических деформаций состоит из контактной зоны и зоны свободного формоизменения. По мере уменьшения углового радиуса, вследствие уменьшения зоны свободного формоизменения, протяженность контактной зоны увеличивается. С применением критерий течения Треска получена формула для расчета внутреннего давления в зависимости от размерных характеристик изделия, деформационных характеристик материала и величины контактного трения.

$$P = \frac{t/r}{1 + t/r - \mu x/r} \cdot \sigma_s, \quad (5)$$

где  $x/r$  - безразмерная величина длины контактной зоны,  $t/r$  - относительная толщина заготовки,  $\mu$  - коэффициент трения,  $\sigma_s$  - напряжение предела текучести материала.

Рассмотрена аналогичная задача с применением критерия текучести Мизеса. При взаимозависимом изменении толщины материала и деформационного упрочнения, уравнения пластического состояния для контактной зоны сводятся к дифференциальной зависимости

$$\frac{\mu}{t_0} P = k \beta^{n+1} n \varepsilon_\theta^{n-1} \frac{d\varepsilon_\theta}{dx}, \quad (6)$$

где  $\varepsilon_\theta$  - окружная деформация,  $d\varepsilon_\theta/dx$  - градиент окружной деформации,  $k$  и  $n$  - параметры, определяемые по соотношениям (4),  $\mu$  - коэффициент трения,  $t_0$  - исходная толщина стенки трубной заготовки,  $\beta$  - коэффициент Лодэ. Интегрирование (6) при разложении  $\varepsilon_\theta^{n-1}$  в степенной ряд позволяет получить формулу для расчета внутреннего давления

$$\frac{\mu P}{k \beta^{n+1} n t_0} = \frac{1}{n} \varepsilon_\theta^n + \sum_{i=1}^{\infty} \frac{(-1)^i}{i!} \cdot \frac{1}{i+n} \varepsilon_\theta^{i+n} + c_0, \quad (7)$$



где  $c_0$  - постоянная интегрирования, определяемая из равенства  $\varepsilon_\theta$  на границе контактной зоны и зоны свободного изгиба.

В третьей главе приводится теоретическая модель, основанная на теории пластического течения, описывающая поведение материала в процессах осесимметричного формоизменения в условиях больших пластических деформаций с учетом взаимозависимого изменения толщины материала и деформационного упрочнения. Показано, что вследствие условия постоянства объема

$$\varepsilon_\rho + \varepsilon_\theta + \varepsilon_z = 0; \quad (d\varepsilon_\rho + d\varepsilon_\theta + d\varepsilon_z = 0), \quad (8)$$

три главные деформации, описывающие деформированное состояние рассматриваемого элемента (материальной частицы), не являются независимыми и их можно представить в двумерной системе координат.

Теоретическая модель основана на отображении напряженно-деформированного состояния материала на девиаторной плоскости цилиндра пластичности Мизеса. В указанной плоскости взаимозависимое изменение толщины материала и деформационного упрочнения полностью описывается вектор-функцией  $\bar{\varepsilon}(P)$  ( $P$  - некоторый параметр времени), модуль которого численно равен эквивалентной деформации, а проекции на косоугольные координатные оси представляют собой компоненты главных деформаций. Геометрическое место точек, соответствующих последовательным деформированным состояниям рассматриваемого элемента (материальной частицы), представляет собой путь деформации и описывает характер накопления деформаций в данном элементе. Радиальные пути деформации соответствуют пропорциональному изменению деформаций с постоянным отношением главных деформаций  $\varepsilon_\rho, \varepsilon_\theta, \varepsilon_z$ . Скорость деформации определяется дифференциальным коэффициентом  $d\bar{\varepsilon}/dP$ , а направление вектора  $d\bar{\varepsilon}/dP$  совпадает с касательной к пути деформации.

Для решения поставленных задач использованы следующие базовые уравнения:

- Критерий текучести Мизеса

$$\sigma_s = \left\{ \frac{1}{2} [(\sigma_\rho - \sigma_\theta)^2 + (\sigma_\theta - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_\rho)^2] \right\}^{1/2}, \quad (9)$$

где  $\sigma_\rho, \sigma_\theta, \sigma_z$  - главные напряжения в радиальном, окружном направлениях и по толщине, соответственно. Напряжение текучести в (9) зависит от величины эквивалентной деформации, которая определяется следующим образом

$$\varepsilon_i = \left\{ \frac{2}{9} [(\varepsilon_\rho - \varepsilon_\theta)^2 + (\varepsilon_\theta - \varepsilon_z)^2 + (\varepsilon_z - \varepsilon_\rho)^2] \right\}^{1/2}, \quad (10)$$

где  $\varepsilon_\rho, \varepsilon_\theta, \varepsilon_z$  - главные деформации в тех же направлениях, удовлетворяющие условию (8).

Соотношения между напряжениями и приращениями (скоростями) главных деформаций имеют вид

$$\frac{d\varepsilon_\rho - d\varepsilon_\theta}{\sigma_\rho - \sigma_\theta} = \frac{d\varepsilon_\theta - d\varepsilon_z}{\sigma_\theta - \sigma_z} = \frac{d\varepsilon_z - d\varepsilon_\rho}{\sigma_z - \sigma_\rho} = \frac{3 d\varepsilon_i}{2 \sigma_s}, \quad (11)$$

где  $d\varepsilon_i$  - интенсивность приращения главных деформаций, которая определяется соотношением

$$d\varepsilon_i = \left\{ \frac{2}{9} \left[ (d\varepsilon_\rho - d\varepsilon_\sigma)^2 + (d\varepsilon_\theta - d\varepsilon_z)^2 + (d\varepsilon_z - d\varepsilon_\rho)^2 \right] \right\}^{1/2}, \quad (12)$$

В условиях плоского напряженного состояния ( $\sigma_z = 0$ ) из (11) следует

$$d\varepsilon_\rho = \frac{2\sigma_\rho - \sigma_\theta}{2\sigma_\theta - \sigma_\rho} d\varepsilon_\theta; \quad d\varepsilon_z = \frac{\sigma_\rho + \sigma_\theta}{\sigma_\rho - 2\sigma_\theta} d\varepsilon_\theta; \quad (13)$$

Уравнение равновесия элемента, вырезанного главными сечениями из осесимметричной нагруженной оболочки переменной толщины, имеет вид:

$$\rho \frac{d\sigma_\rho}{d\rho} + \sigma_\rho \left( 1 + \frac{\rho ds}{s d\rho} \right) - \sigma_\theta = 0, \quad (14)$$

где  $s$  и  $ds$  - текущая толщина и ее приращение, соответственно.

Приращение главных деформаций в окружном направлении и в направлении толщины связаны с приращениями радиуса  $d\rho$  и толщины  $ds$  соотношениями

$$d\varepsilon_\theta = d\rho/\rho; \quad d\varepsilon_z = ds/s; \quad (15)$$

С учетом зависимостей (9), (13) и (15), после некоторых преобразований уравнение (14) принимает вид

$$\rho \frac{d\sigma_\rho}{d\rho} + \frac{2\sigma_s^2}{2\sigma_\theta - \sigma_\rho} = 0; \quad (16)$$

В существующих моделях дальнейшее решение задачи связано с принятием следующих упрощающих допущений:

- принимается идеально жестко-пластическая модель деформируемого материала ( $\sigma_s = const$ ), которое позволяет выразить зависимость радиального напряжения от координаты рассматриваемого элемента в виде неявной функции;

- принимается, что формоизменение происходит без изменения толщины.

В обоих случаях решение поставленных задач прямым методом становится невозможным.

В математической модели решаемых задач приращения главных деформаций представлены на девиаторной плоскости цилиндра пластичности Мизеса в тригонометрической форме

$$d\varepsilon_\rho = d\varepsilon_i \cos \varphi, \quad d\varepsilon_\theta = d\varepsilon_i \cos \left( \varphi + \frac{2}{3} \pi \right); \quad d\varepsilon_z = d\varepsilon_i \cos \left( \varphi + \frac{4}{3} \pi \right), \quad (17)$$

где  $\varphi$  - угол вида деформированного состояния.

Из сопоставления зависимостей (13) и (17) для радиальных и окружных напряжений получены

$$\sigma_\rho = \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_s \cos \left( \varphi + \frac{\pi}{6} \right), \quad \sigma_\theta = -\frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_s \sin \varphi, \quad (18)$$

удовлетворяющие критерию текучести Мизеса (9). С учетом (15), (17) и (18) уравнение равновесия (16) представляется на девиаторной плоскости в достаточно простой форме

$$d\sigma_\rho = \sigma_s d\varepsilon_i. \quad (19)$$

Система уравнений, характеризующих пластически плоское напряженное состояние, отображается на девиаторной плоскости в виде круговых диаграмм напряженно-деформированного состояния (рис.5).

Проблема интегрирования (19) при заданном законе деформационного упрочнения заключается в том, что в общем случае интенсивность приращения

деформаций  $d\varepsilon_i$  не равняется приращению интенсивности деформаций, определяемое дифференцированием (10).

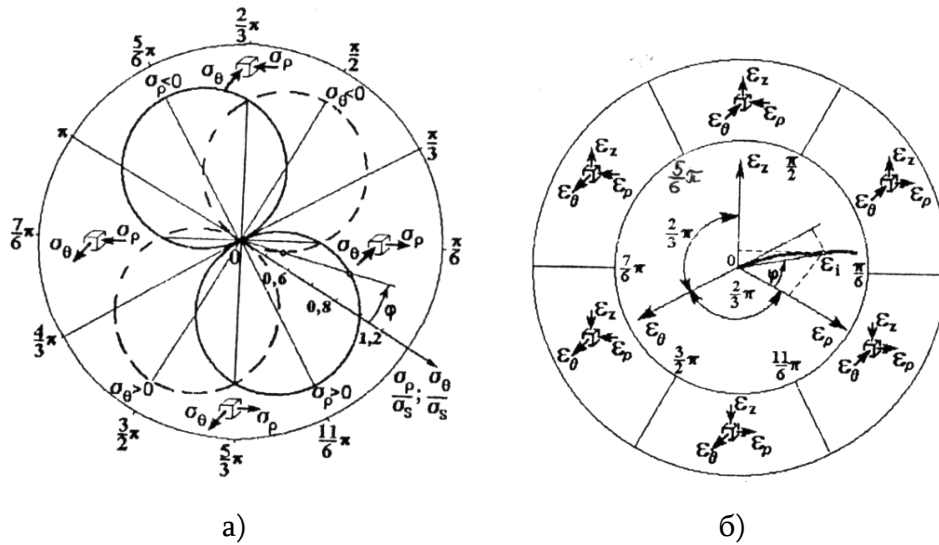


Рис.5. Напряженные (а) и деформированные (б) состояния на девиаторной плоскости цилиндра пластичности Мизеса.

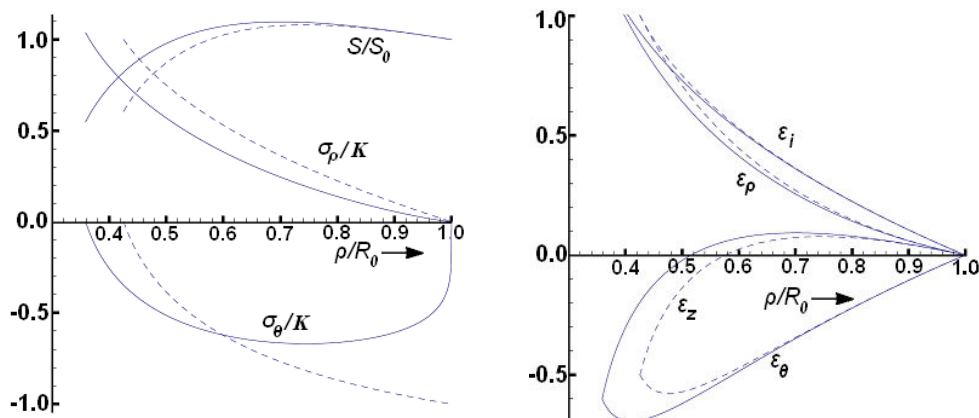
При решении осесимметричных задач по теории течения, в условиях плоского напряженного состояния принимается, что приращение главных деформаций отнесены к текущему деформированному состоянию, а их суммирование приводит к текущим величинам логарифмических деформаций

$$\varepsilon_\rho = \ln \frac{d\rho}{dr}; \quad \varepsilon_\theta = \ln \frac{\rho}{r}; \quad \varepsilon_z = \ln \frac{s}{s_0}, \quad (20)$$

где  $\rho, s$  и  $r, s_0$  - текущая координата и толщина рассматриваемого элемента в деформированном и исходном состояниях соответственно.

В математической модели для учета деформационного упрочнения при интегрировании (19) использованы степенная зависимость эквивалентного напряжения от эквивалентной деформации (3).

Процесс формоизменения цилиндрического отвода моделирован в виде начального этапа вытяжки круглого изделия из плоской листовой заготовки, что позволило по описанной методике установить напряженно-деформированное состояние и определить характерные особенности процесса формоизменения (Рис.6).



а)

б)

Рис.6 Распределение напряжений (а) и деформаций (б) в начальном этапе вытяжки ( $n = 0$ ;  $n = 0.2$ )

Для наибольшей величины степени формоизменения установлена зависимость относительного радиуса от параметра деформационного упрочнения

$$\frac{R_0}{a} = \exp \left[ (1+n) \left( \frac{1}{4} + \frac{\sqrt{3}}{9} \pi \right) \right] \approx \exp[0.854(1+n)]. \quad (21)$$

Расчеты по формуле (21) показывают, что указанная величина значительно меньше результатов, установленных другими авторами по деформационной теории пластичности. Компоненты главных деформаций с учетом взаимозависимого изменения толщины и деформационного упрочнения, имеют вид

$$\begin{aligned} \varepsilon_\rho &= \frac{1+n}{2} \left( 1 + \cos 2\varphi - \frac{\sqrt{3}}{3} \sin 2\varphi \right), \\ \varepsilon_\theta &= -\frac{1+n}{2} \left( \cos 2\varphi + \frac{\sqrt{3}}{3} \sin 2\varphi \right), \\ \varepsilon_z &= -\frac{1+n}{2} \left( 1 - \frac{2\sqrt{3}}{3} \sin 2\varphi \right); \end{aligned} \quad (22)$$

Рассмотрено также начальное пластическое состояние диска постоянной толщины под действием внутреннего давления (рис.7).

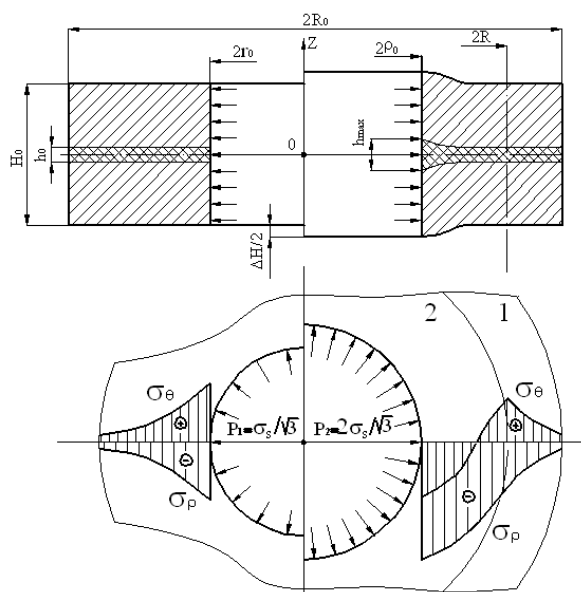


Рис.7. Форма и распределения напряжений в начальном (слева) и деформированном (справа) состояниях (1-упругая область, 2-пластическая область).

Необходимость анализа подобных задач обосновывается тем, что в экспериментальных устройствах для реализации процесса гидромеханического деформирования применяются различные узлы и детали в виде толстостенных колец и цилиндров, находящихся под действием давлений, достигающих более  $10^3$  МПа.

Задача решена по теории течения и на основе установленных полей напряжений и деформаций, определены взаимосвязь координаты и толщины в исходном и деформированном состояниях кольцевого диска.

$$\begin{aligned} \rho/r &= \exp\left[\frac{1+n}{2}\left(\cos 2\varphi + \frac{\sqrt{3}}{3}\sin 2\varphi\right)\right], \\ h/h_0 &= \exp\left[\frac{1+n}{2}\left(1 - \frac{2\sqrt{3}}{3}\sin 2\varphi\right)\right]. \end{aligned} \quad (23)$$

Получена формула для определения конечной величины относительного осевого смещения в зависимости от размерных характеристик кольцевого диска

$$\frac{\Delta H}{H_0} = \frac{r_0^2(\rho_0^2/r_0^2 - 1)}{R^2(1 - \rho_0^2/R^2)}; \quad (24)$$

В четвертой главе приведены методика и результаты моделирования гидромеханического деформирования цилиндрических оболочек методом конечных элементов (МКЭ). Моделирование проведено с применением программного обеспечения ABAQUS/EXPLICIT, для конечно-элементной модели при формоизменении цилиндрической оболочки в крестообразное изделие (рис.8). Размеры, физические и механические свойства, условия трения и закон деформационного упрочнения для моделирования приведены в таблице 1. В таблице 2 приведены величины внутреннего давления и давление на контрпунсоне.

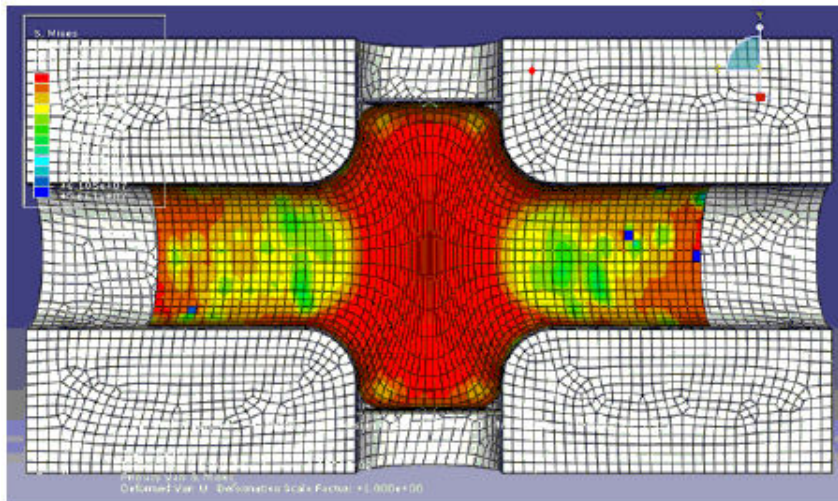


Рис.8. Конечно-элементная модель формоизменения цилиндра в крестообразное изделие.

Таблица 1.

Таблица 2.

Свойства	Ед измерения
Модуль Юнга	$124 \cdot 10^3$ МПа
Козф. Пуассона	0,3
Напр. текучести	160 МПа
Напр. течения	$500 \varepsilon^{0,35}$
Козф. трения	0,1
Диаметр	54 мм
Толщина	1,65 мм

Контр. Пуансон, МПа	Внутр. давление, МПа	Время, сек.
3	12	0,002
5	22,5	0,01
5	22,5	0,03

Рассмотрен процесс изменения нагрузок для разных величин радиуса сопряжения крестообразных изделий. Получены графики зависимости изменения толщины от величины осевого перемещения и показано, что в исследуемом диапазоне радиусов сопряжения, относительная толщина изменяется в пределах  $1.55 \div 1.65$ . Для тех же величин радиусов сопряжения моделирована зависимость осевого усилия от осевого перемещения и показано, что величина радиуса сопряжения слабо влияет на осевое усилие (рис.9.)

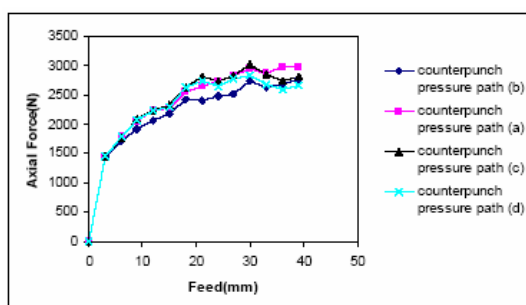


Рис.9. Зависимость осевого усилия от осевого перемещения.

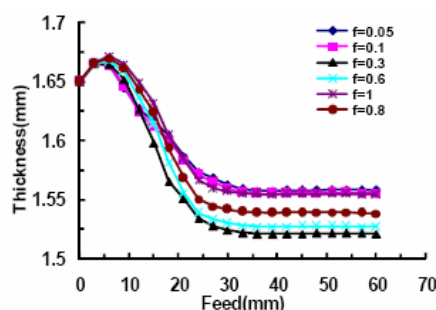


Рис.10. Зависимость относительной толщины от осевого перемещения при разных коэффициентах трения.

Проведено также моделирование изменения толщины от осевого перемещения для разных коэффициентов трения и установлено, что при изменении коэффициента трения в диапазоне от 0.05 до 1 относительная толщина меняется от 7 до 10 процентов (рис.10).

На основе численного моделирования установлено, что при прочих равных условиях минимальное изменение относительной толщины соответствует значению коэффициента трения, равному 0.3.

В пятой главе приведены результаты экспериментальных исследований. В первом разделе на основе стандартной методики исследован характер зависимости эквивалентного напряжения от эквивалентной деформации при одноосном растяжении образцов, вырезанных из трубной заготовки (рис.11)

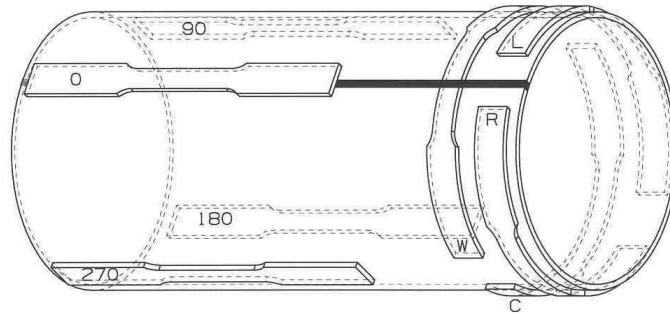
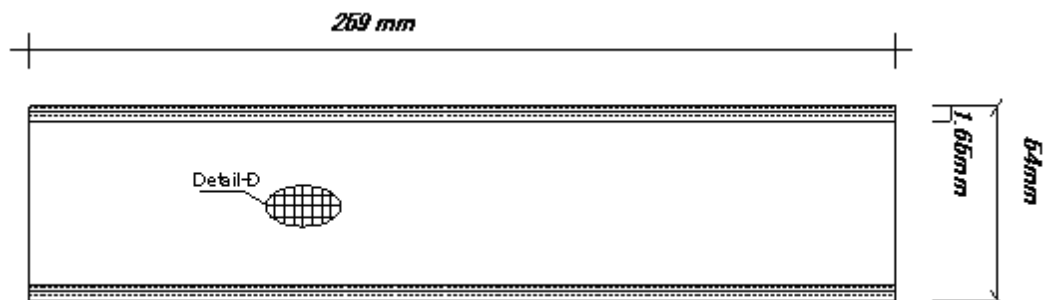


Рис.11. Схема расположения образцов для одноосного растяжения на трубной заготовке.

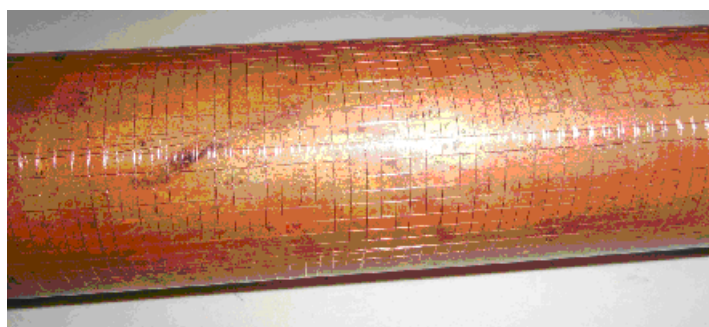
На основе диаграммы условных напряжений установлена кривая течения, которая использована как для определения параметров деформационного упрочнения, так и для обоснования закона деформационного упрочнения.

Во втором разделе, в разработанном устройстве проведены эксперименты по формоизменению трубной заготовки в Т-образное изделие.

Приведены перечень необходимого оборудования, инструментов и контрольно-измерительной аппаратуры. В экспериментах использованы медные трубные заготовки диаметром 54 мм, толщиной стенки 1.65 мм и длиной 269 мм, на которых нанесены риски с размерами ячеек 3х3 мм (рис.12).



а)



б)

Рис.12. Трубная заготовка с квадратной сеткой, чертеж (а) и образец(б).

Измерения размеров сетки в деформированных образцах проведены на инструментальном микроскопе с 50-и кратным увеличением. Определены компоненты окружной и осевой деформации, а компонента деформации по толщине вычислена из

условия постоянства объема. Т-образное изделие с характерными расположениями осей координат и сечений показано на рис.13

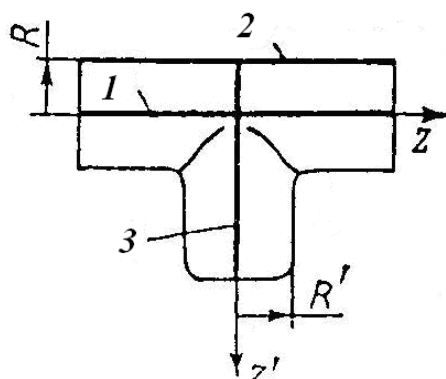


Рис.13. Т-образное изделие для определения компонент деформаций.

В указанных сечениях проведено измерение искаженных крестообразных сеток и определены величины и распределения окружных, осевых и меридианальных деформаций (рис.14)

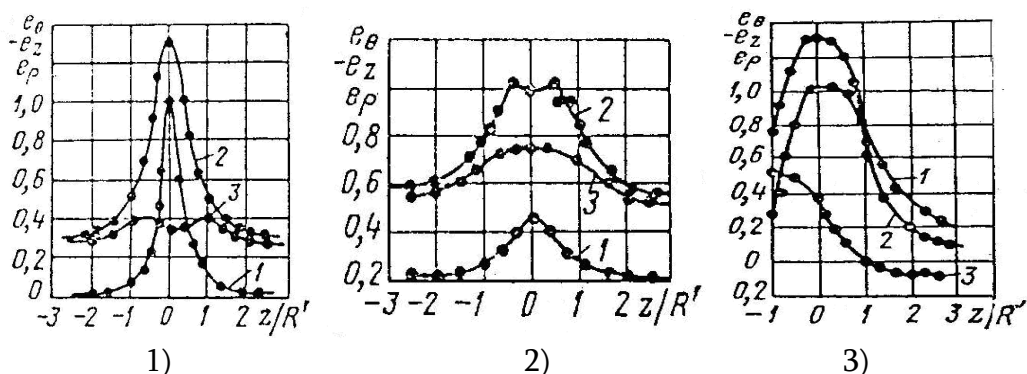


Рис.14. Распределение компонент деформаций в характерных сечениях.

**Выводы:**

1. Разработана аналитическая модель описания процесса гидромеханического формоизменения. Модель основана на деформационной теории пластичности с учетом изменения толщины материала и деформационного упрочнения.
2. Рассчитаны начальные величины внутреннего давления при свободном формоизменении, при одновременном действии внутреннего давления и осевого усилия при наличии и отсутствии трения, в случаях формоизменения трубной заготовки с отводом и в изделиях квадратного поперечного сечения.
3. Нестационарные процессы гидромеханического формоизменения цилиндрических оболочек моделированы по теории пластического течения. Показано, что исходные уравнения, описывающие пластическое плоское напряженное состояние при осевой симметрии отображаются на девиаторной плоскости цилиндра пластичности в виде простой дифференциальной зависимости между приращениями радиального напряжения и эквивалентной деформации.
4. На основе разработанной модели установлены поля напряжений и деформаций на начальном этапе осесимметричной вытяжки с учетом изменения толщины и деформационного упрочнения и показано, что при формоизменении



цилиндрических оболочек с учетом изменения толщины и деформационного упрочнения предельная степень формоизменения для идеально жестко-пластической модели не может превышать величину 2,25. Решена задача пластического формоизменения кольцевого диска под действием внутреннего давления и показано, что относительное утолщение внутреннего контура в осевом направлении не может превышать 15%.

5. Проведено моделирование процесса гидромеханического формоизменения крестообразных изделий из цилиндрических оболочек методом конечных элементов (МКЭ). Результаты моделирования показывают, что с уменьшением коэффициента трения, уменьшается осевое усилие сжатия.
6. Установлено, что распределение толщины в зоне отводов является сложной функцией и зависит как от коэффициента трения, так и от величины осевого перемещения материала. Показано, что минимальная величина относительной толщины соответствует коэффициенту трения, равному 0,3.
7. По стандартной методике определены деформационные характеристики и механические свойства при одноосном растяжении. Показано, что деформационные характеристики для образцов, вырезанных из трубных заготовок, достаточно точно аппроксимируются степенными зависимостями.
8. Разработано и изготовлено устройство для реализации экспериментов по гидромеханическому формоизменению цилиндрических заготовок в изделия с отводами. Определены компоненты главных деформаций на характерных сечениях изделия.

#### **Основное содержание диссертации опубликовано в работах:**

1. B.Abbasi, M.Kahrizi, E.Nazaryan, M.Moosavi, The digital studying of surface groove on the Pipe hydro forming process in cross shaped joint production, The First National Conference of Performance Research of Iran Water Resource, 11-13 May, 2009, Kerman shah Regional Water Company, Islamic Republic of Iran, pp.1-9 (Оригинал на персидском языке).
2. B.Abbasi, M.Kahrizi, E.Nazaryan, M.Moosavi, The filling investigation of die corner and thickness dispensation in pipe hydro forming by controlled wrinkling, The First National Conference of Performance Research of Iran Water Resource, 11-13 May, 2009, Kerman shah Regional Water Company, Islamic Republic of Iran, pp.1-8 (Оригинал на персидском языке).
3. B.Abbasi, M.Kahrizi, E.Nazaryan, M.Moosavi, Pipe hydro forming process for water distribution pipe production, The First National Conference of Performance Research of Iran Water Resource, 11-13 May, 2009, Kerman shah Regional Water Company, Islamic Republic of Iran, pp.1-10 (Оригинал на персидском языке).
4. B.Abbasi, M.Kahrizi, E.Nazaryan, M.Moosavi, The finite element studying of pipe hydro forming process to produce of cross shaped, 10 th Engineering of Construction an Manufacturing Iran, 2-4 March, 2009, Technical University of Babul, Islamic Republic of Iran pp.1-8 (Оригинал на персидском языке).

5. B.Abbasi, M.Kahrizi, E.Nazaryan, M.Moosavi, Effect of friction and Surface grooves of counterpunch on thickness distribution in pipe hydro forming process, 19-21 october , 2010, Tabriz University, Islamic Republic of Iran pp.1-11 (Оригинал на персидском языке).
6. B.Abbasi, M.Kahrizi, M.Moosavi, Improvement of die corner filling and thickness distribution in cross shape tube hydro forming by wrinkling control, 14 th International Conference MPTN, Turkey,2010 pp.1-6.
7. Р.М. Авакян, М.М.Аракелян, Э.А.Назарян, М.Кахризи, Механика формоизменения кольцевого диска // Известия НАН РА, Механика, 63, № 4, 2010, стр.43-50.
8. Э.А.Назарян, М.Кахризи, Формоизменение кольцевого диска //Заготовительные производства в машиностроении, №12, 2010, Москва, стр.22-26.
9. E.A.Nazaryan, R.M. Avakyan, M.M.Arakelyan, M.Kahrizi, Mechanics of Forming Ring Discs, International Deep Drawing Research Group, JDDRG-2010 Conference, Graz, Austria, pp.779-787.
10. Э.А.Назарян, М.Кахризи, А.Ж.Хандамян, Особенности формоизменения трубной заготовки при осевом сжатии и внутреннем давлении, Труды VII Международной конференции, сентябрь 19-23, 2011, Горис-Степанакерт, стр.309-313.
11. Э.А.Назарян, М.Кахризи, Особенности формоизменения листового металла при осесимметричной вытяжке, Материалы 13-ой Международной научно-практической конференции «Технологии... от нано до макро уровня», 12-15 апреля, 2011 г., Санкт-Петербург, стр.378-383.
12. Мохаммад Кахризи, Моделирование процесса формоизменения тонкостенной цилиндрической оболочки внутренним давлением, Вестник Инженерной Академии Армении, VIII, том № 4, 2011, Ереван, стр.730-733.

## Ա մ փ ո փ ու մ

Ժամանակակից գիտատեխնիկական առաջընթացի պայմաններում մեքենաշինության տարբեր ճյուղերում լայն տարածում են ստացել սնամեջ նախապատրաստվածքներից պլաստիկ ձևափոխման մեթոդներով մեքենամասերի պատրաստման տեխնոլոգիաները, որոնցում որպես դեֆորմացնող էլեմենտներ կիրառվում են հեղուկ, գազային և առաձգական միջավայրեր:

Պլաստիկ ձևափոխման նման տեխնոլոգիական պրոցեսների հատկանշական առանձնահատկություններից է դեֆորմացնող գործիքների ունիվերսալությունը, որը բացառում է արտաքին բեռի կտրուկ ներգործությունը, ապահովում է բավական բարենպաստ լարված դեֆորմացված վիճակներ և ստեղծում է նոր տեխնոլոգիական հնարավորություններ:

Հեղուկ միջավայրերով դեֆորմացման տեխնոլոգիաները առավել նպատակահարմար ու շահավետ է կիրառել բարդ ձևի սնամեջ, բարակապատ մեքենամասերի պլաստիկ ձևափոխման պրոցեսներում, որոնք հնարավոր չէ իրականացնել այլ մեթոդներով: Նշված տեխնոլոգիաները ունեն ցածր նյութա և աշխատատարություն և համապատասխանում են մեքենամասերին ներկայացվող անհրաժեշտ որակի և ճշտության չափանիշներին:

Հիդրամեխանիկական մեթոդներով բարակապատ կառուցվածքների պլաստիկ ձևափոխման իրականացման հնարավորությունը սահմանափակված է մի կողմից սահմանային դեֆորմացիաներով, կախված օգտագործվող նյութերի մեխանիկական և տեխնոլոգիական հատկություններից մյուս կողմից՝ կայունության կորուստով, պայմանավորված սնամեջ նախապատրաստվածքների չափային բնութագրերով:

Կայունության կորստի հնարավոր տարբերակները և նյութի քայքայման օրինաչափությունները բավական բարդ պրոցեսներ են և կարող են հանդիսանալ առանձին հետազոտությունների առարկա, այդ պատճառով նշված երևույթները ներկա աշխատանքում չեն դիտարկվում:

Ատենախոսությունը նվիրված է առանցքային ուժի և ներքին ճնշման համատեղ ազդեցության պայմաններում գլանային թաղանթների պլաստիկ ձևափոխման ստացիոնար և ոչ ստացիոնար պրոցեսների մոդելավորմանը: Նշված պրոցեսների մաթեմատիկական մոդելների մշակմանը, հաշվի առնելով նյութի հաստության և դեֆորմացիոն ամրացման փոխկապակցված փոփոխությունը:

Ձևակերպված նպատակի իրականացման համար, օգտագործելով պլաստիկության տարբեր տեսություններ դիտարկվել են պլաստիկ ձևափոխման մի շարք խնդիրներ, որոնց մոդելավորման ընթացքում հաշվի են առնվել ինչպես արտաքին ուժերի համատեղ ազդեցությունը, այնպես էլ շփման ուժերը և դեֆորմացիոն ամրացումը: Ուսումնասիրվել են գլանային թաղանթներից քառակուսի ընդլայնական կտրվածքով իրերի ձևափոխման պրոցեսները, կիրառելով պլաստիկության տարբեր պայմաններ: Ներքին ճնշման որոշման համար ստացվել են հաշվարկային բանաձևեր, կախված գլանային թաղանթների հարաբերական չափերից և նյութերի դեֆորմացիոն բնութագրերից:

Դրված խնդիրների լուծման ընթացքում օգտագործվել են դեֆորմացվող պինդ մարմնի մեխանիկայի ժամանակակից մեթոդները, ֆունկցիաների մոտարկման մաթեմատիկական մեթոդները, ստացիոնար և ոչ ստացիոնար պրոցեսների վերլուծության մեթոդները և վերջավոր տարրերի մեթոդները:

Աշխատանքում ցույց է տրված, որ հաստության փոփոխության և դեֆորմացիոն ամրացման փոխկապակցված պրոցեսները նպատակահարմար է դիտարկել Միզեսի պլաստիկության գլանի դեվիատորային հարթության վրա, էկվիվալենտ դեֆորմացիաների կուտակման օրինաչափությունների ուսումնասիրման հիման վրա: Նկարագրված մեթոդներով ստացվել են կայուն պլաստիկ դեֆորմացիաների ինտեգրալ չափանիշի - ձևափոխության աստիճանի հաշվարկային բանաձևեր: Ապացուցվել է, որ հարթ լարվածային վիճակում տարանջան լարումների ազդեցության պայմաններում, նախապատրաստվածքի որոշակի տիրույթում իրականանում է նյութի հաստության աճ: Որոշվել է հաստության առավելագույն աճի մեծությունը և հարաբերական կորրոկինատը, կախված դեֆորմացիոն ամրացման չափանիշներից:

Աշխատանքի գիտական նորույթը կայանում է գլանային թաղանթների պլաստիկ դեֆորմացման ստացիոնար և ոչ ստացիոնար պրոցեսներ նկարագրման ընդհանրացված մաթեմատիկական մոդելների հիմնավորման և կիրառման մեջ:

Մշակվել և իրականացվել են գլանային թաղանթներից ելուստներով իրերի դեֆորմացման պրոցեսների, վերջավոր տարրերի մեթոդներով, թվային մոդելավորում: Մոդելավորման ընթացքում փոփոխվել են ինչպես ելուստների լծորդման շառավիղները, այնպես էլ առանցքային ուժի և ներքին ճնշման մեծությունների հարաբերությունը: Որոշվել են կայուն դեֆորմացման տիրույթները կախված նշված գործոններից և շփման գործակցից:

Օգտագործվող նյութերի մեխանիկական հատկությունների և դեֆորմացիոն բնութագրերի որոշման նպատակով, խողովակաձև նախապատրաստվածքներից կտրված նմուշների միառանցք ձգման փորձերով, իրականացվել են փորձարարական հետազոտություններ: Փորձերի արդյունքների մշակման հիման վրա որոշվել է նյութի հոսունության և ամրության սահմանները ու հավասարաչափ հարաբերական երկարացումը: Օգտագործելով նշված մեխանիկական հատկությունները, աշխատանքում հիմնավորված մեթոդներով հաշվարկվել են դեֆորմացիոն ամրացման բնութագրերը, որոնք օգտագործվել են ինչպես անալիտիկ մեթոդներով ստացված հաշվարկային բանաձևերում, այնպես էլ թվային մեթոդներում:

Իրականացվել են խողովակաձև նախապատրաստվածքներից մեկ կամ երկու ելուստով իրերի հիդրամեխանիկական մեթոդներով դեֆորմացման փորձեր: Փորձերի իրականացման համար մշակվել և պատրաստվել են համապատասխան տեխնոլոգիական սարքավորումներ: Իրականացված փորձերի արդյունքների մշակման հիման վրա, ելուստներ ունեցող իրերի բնութագրական հատկություններում ստացվել են գլխավոր դեֆորմացիաների բաշխման օրինաչափությունները:

Անալիտիկ և թվային մեթոդներով մոդելավորման արդյունքները հաստատված են փորձարարական հետազոտություններով:

## **Kahrizi Mohammad**

Modeling of Plastic Forming Processes for Cylindrical Shells by Hydro mechanical Deformation

### **R e s u m e**

In the competitive scientific and technological progress in various branches of engineering are widely used technology of machine parts by methods of plastic deformation in which the elements are used as the deforming liquid, gaseous and elastic medium.

A characteristic feature of such technological processes of plastic deformation is the universality of the deforming tool, which excludes sharp application of the external load, provides a sufficiently favorable stress-strain state and create new technological capabilities.

Deformation of liquid media technology most appropriate and advantageous to apply in the processes of plastic deformation of complex, hollow parts of machines that can not be realized by other methods. These technologies have a low consumption of materials and labor intensity are consistent with indicators of quality and precision machine parts imposed.

Realization of the plastic deformation of thin-walled structures hydro mechanical methods is limited to one side of the limit strains, depending on the mechanical and technological properties of the materials used, on the other side the loss of stability caused by the dimensional characteristics of the hollow billet.

Possible variants buckling and fracture patterns of the material rather complex process and can be made the subject of separate studies, so these effects in the present work are not considered.

The thesis is devoted to the modeling of stationary and non stationary processes of plastic deformation of cylindrical shells under the simultaneous action of axial compression and internal pressure, the development of mathematical models of these processes taking into account the interdependent changes in material thickness and strain hardening.

Scientific novelty of the work lies in the validation and application of the generalized mathematical model describing the stationary and non stationary processes of plastic deformation of cylindrical shells.

In solving the tasks of modern methods in mechanics of solid deformable body, the mathematical methods of approximation of functions, methods, and finite element analysis of stationary and non stationary processes.

To implement the stated purpose of using a different theory of plasticity, considered a number of problems of plastic deformation, in the simulation which takes into account both the combined influence of external forces and the contact friction and strain hardening. Using different conditions of plasticity to study the processes of forming cylindrical shells in the product of square cross section. To determine the internal pressure are obtained the calculation formulas that take into account the relative sizes of cylindrical shells and deformation characteristics of materials.

In this paper shown as it is appropriate to consider the interrelated changes in thickness and strain hardening on the basis of the study patterns of accumulation of equivalent strain in the deviatoric plane cylinder plasticity.

Described methods to obtain formulas for the degree of deformation as integral index of stable plastic deformation. It is proved that under conditions of plane stress with oppositely stressed state in a particular field blanks realized increase in thickness of the material. Taking into account the strain hardening parameters determined maximum value and the relative increase in the thickness coordinate.

We also consider the stress state of thick annular disc under internal pressure. The necessity study such problems based on the fact that a number of parts and components have the form of hydro-mechanical devices, and an annular disk under the influence of sufficiently high internal pressures. As against existing solutions for the new formulation and solution of problems described method yielded comparable with the experimental dimensions of the plastic region and the axial displacement.

Designed and realized a numerical simulation of deformation processes of products with a cylindrical shell of finite element methods. When modeling the change processes as the radii of the pair, and the ratios of internal pressure and axial force. The areas of stability of deformation depend on these factors and the coefficient of friction.

In order to determine the mechanical properties and processing characteristics of the materials used are implemented experimental studies on the uni axial tensile specimens cut from the billets. Based on the processing of the results of experiments determined the limits of strength, durability and uniform elongation.

Using these mechanical properties were calculated characteristics of strain hardening, which are used in the calculation formulas derived analytically and in numerical methods.

Are realized deformation experiments on hydro mechanical products with one or two spikes of tubular billets for the implementation of experiments designed and manufactured the appropriate technological device. Based on the processing of the results of experiments implemented in specific sections of the products are obtained from the spikes of the distribution of main deformations.

Results of modeling of analytical and numerical methods are confirmed by experimental studies.

