

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РЕСПУБЛИКИ АРМЕНИЯ  
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ АРМЕНИИ**

**СИМОНЯН АВЕТИС САМВЕЛОВИЧ**

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА И РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ  
НЕОСЕСИММЕТРИЧНОЙ ГЛУБОКОЙ ВЫТЯЖКИ ЛИСТОВОГО  
МОЛИБДЕНА**

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук по  
специальности 05.16.02 – “Металлургия”

**ЕРЕВАН – 2017**

---

**ՀՀ ԿՐԹՈՒԹՅԱՆ ԵՎ ԳԻՏՈՒԹՅԱՆ ՆԱԽԱՐԱՐՈՒԹՅՈՒՆ  
ՀԱՅԱՍՏԱՆԻ ԱԶԳԱՅԻՆ ՊՈԼԻՏԵԽՆԻԿԱԿԱԿԱՆ ՀԱՄԱԼՍԱՐԱՆ**

**ԱՎԵՏԻՍ ՍԱՄՎԵԼԻ ՍԻՄՈՆՅԱՆ**

**ԹԵՐԹԱՑԻՆ ՍՈԼԻԲԴԵՆԻ ՈՉ ԱՌԱՆՅՔԱՀԱՄԱՉՍՓ ԽՈՐ ԱՐՏԱԶԳՄԱՆ  
ԳՈՐԾԸՆԹԱՑԻ ՍՈՂԵԼԱՎՈՐՈՒՄԸ ԵՎ ՏԵԽՆՈԼՈԳԻԱՑԻ ՄՇԱԿՈՒՄԸ**

**Ե-16.02** -<<Մետալուրգիա>> մասնագիտությամբ տեխնիկական գիտությունների  
թեկնածուի զիտական աստիճանի հայցման ատենախոսության

**ՄԵՂՍԱԳԻՐ**

**ԵՐԵՎԱՆ – 2017**

Тема диссертации утверждена в Государственном инженерном университете Армении (Политехник).

Научный руководитель: докт. техн. наук, проф. Э.А. НАЗАРЯН  
Официальные оппоненты: докт. техн. наук, проф. В.Ю. ЛАВРИНЕНКО  
докт. техн. наук, проф. М.В. МАРТИРОСЯН  
Ведущая организация: НАН РА Институт Механики

Защита диссертации состоится 30 июня 2017г. в 15<sup>00</sup> ч. на заседании Специализированного совета “Металлургия и материаловедение” (шифр 031), действующего при Национальном политехническом университете Армении, по адресу: 0009, г. Ереван, ул. Теряна, 105.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НПУА.  
Автореферат разослан 30 мая 2017г.

Ученый секретарь Специализированного совета 031, докт. техн. наук, профессор



А.М. Оганесян

---

Ատենախոսության թեման հաստատվել է Հայաստանի պետական ճարտարագիտական համալսարանում (Պոլիտեխնիկ):

Գիտականնդեկավար՝ տեխ. գիտ. դոկտոր, պրոֆ. Է.Ա. ՆԱԶԱՐՅԱՆ

Պաշտոնականընդհմախոսներ՝

տեխ. գիտ. դոկտոր, պրոֆ.

Վ.Յու.ԼԱՎՐԻՆԵՆԿՈ

տեխ. գիտ. դոկտոր, պրոֆ.

Ս.Վ. ՄԱՐՏԻՐՈՍՅԱՆ

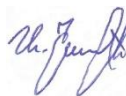
Առաջատարկազմակերպություն՝ «ՀՀԳԱԱ» Մեխանիկայիինստիտուտ

Ատենախոսության պաշտպանությունը կայանալու է 2017թ. հունիսի 30-ին, ժամը 15<sup>00</sup>-ին Հայաստանի ազգային պոլիտեխնիկական համալսարանում գործող ՀՀ ԲՈՀ-ի «Մետալուրգիա և նյութագիտություն» մասնագիտական խորհրդի (դասիչ 031) նիստում: Հասցեն՝ 0009, ք. Երևան, Տերյանի.,105:

Ատենախոսությանը կարելի է ծանոթանալ ՀԱՊՀ-ի գրադարանում:

Մեղմագիրն առաքված է 2017թ. մայիսի 30-ին:

031 մասնագիտական խորհրդի գիտական քարտուղար, տեխ. գիտ. դոկտոր, պրոֆ.



Ս.Ս. Հովհաննիսյան

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Молибден является одним из наиболее перспективных металлов для создания жаропрочных конструкций, применяемых в различных отраслях техники. Изделия из молибденовых сплавов находят широкое применение в различных устройствах, работающих в условиях высокой температуры, радиационного облучения, в средах высокоскоростных плазменных и газовых потоков, в контакте с агрессивными средами. Сплавы на основе молибдена используются в камерах сгорания и в соплах ракетных двигателей, где температуры достигают до 2000°С и более.

Аналогичная ситуация имеет место при высокотемпературной кристаллизации из расплава тугоплавких диэлектриков. В этих процессах контейнеры в виде лодочек, изготовленные из листового молибдена, работают в контакте с расплавом при температуре до 2100°С.

Из проведенного предварительного анализа состояния технологии изготовления контейнеров следует, что оптимизация конструкции и разработка технологии формообразования контейнеров-лодочек из листового молибдена, являются ***актуальными научно-техническими проблемами***, а дальнейшее развитие метода высокотемпературной кристаллизации в значительной степени зависит от решения задач технологического характера.

**Цель работы.** Разработка технологии несесимметричной глубокой вытяжки листового молибдена для изготовления контейнеров-лодочек, применяемых в процессах роста оптически прозрачных тугоплавких монокристаллов из расплава методом горизонтально направленной кристаллизации (ГНК), позволяющая повысить качество выращиваемых монокристаллов и технико-экономические показатели процесса роста.

Для достижения поставленной цели в диссертационной работе сформулированы и решены следующие основные задачи:

1. Разработка оптимальной конструкции контейнера-лодочки, с учетом закономерностей протекания физико-химических процессов на фронте роста при выращивании оптически прозрачных тугоплавких монокристаллов методами ГНК и технологическим рекомендациям изготовления коробчатых деталей несесимметричной вытяжкой.
2. Теоретический анализ процесса осесимметричной глубокой вытяжки при обобщенном плоском напряженном состоянии, с учетом взаимозависимого изменения толщины материала и деформационного упрочнения и установление закономерностей распределения параметров качества (точности и прочности) по высоте вытягиваемых изделий.
3. Анализ различных математических моделей описания процессов деформационного упрочнения и установление взаимосвязи между параметрами степенного закона деформационного упрочнения и механических свойств и показателей деформационных характеристик.
4. Разработка альтернативной методики и анализ процесса несесимметричной глубокой вытяжки для определения полей напряжений, позволяющих раскрыть механику формоизменения и обосновать увеличение предельных степеней деформаций по сравнению с осесимметричной вытяжкой.

5. Интенсификация процессов формоизменения листовых металлов, изготовленные методами порошковой металлургии с низкими показателями деформационных характеристик, путем создания температурного поля с определенным градиентом и напряженно деформированного состояния (НДС). Анализ процесса изгиба листового молибдена в условиях двухслойного листового пакета.
6. Численное моделирование и анализ характера изменения НДС при вытяжке неосесимметричных тонкостенных оболочек типа прямоугольных коробок и контейнеров-лодочек.
7. Экспериментальные исследования по определению влияния неучтенных при теоретическом анализе и численном моделировании факторов на процесс неосесимметричной вытяжки, выбор технологических смазок, определение усилия и работы деформирования. Разработка типового технологического процесса глубокой вытяжки контейнеров-лодочек.

**Предмет исследования.** Процесс осесимметричной и неосесимметричной глубокой вытяжки с учетом взаимозависимого изменения толщины материала и деформационного упрочнения. Разработка типового технологического процесса глубокой вытяжки деталей типа контейнеров лодочек, применяемые при выращивании монокристаллов тугоплавких диэлектриков из расплава методом ГНК.

**Методы исследования.** В работе использованы взаимно дополняющие, аналитические, численные и экспериментальные методы исследования стационарных и нестационарных процессов вытяжки при наличии и отсутствии осевой симметрии деформирования. Теоретические методы анализа основаны на безмоментной теории оболочек с применением теории пластического течения изотропного упрочняющегося материала, деформирующейся в условиях обобщенного плоского напряженного состояния. Для количественной оценки явления деформационного упрочнения применена феноменологическая модель, основанной на аппроксимации результатов экспериментального исследования степенной функцией. Предельно возможные степени формоизменения определялись по критерию разрушения, согласно которой принимается равенство предела прочности деформируемого материала наибольшему растягивающему напряжению на внутренней границе пластической области. Анализ нестационарных процессов при вытяжке коробчатых и цилиндрических деталей выполнены методами компьютерного моделирования. Этим же методом установлено качественная картина распределения толщин по образующему и биссектрисе готовых изделий.

Экспериментальные исследования по определению температурных полей при формообразовании, а так же параметры характеризующие величины плоскостной анизотропии листового молибдена выполнены в лабораторных условиях. При проведении физических экспериментов применены современные прессовое оборудование и измерительная техника.

**Автор защищает:**

1. Математическая модель, устанавливающая взаимосвязь между механическими свойствами листового молибдена с учетом нормальной

- анизотропии и зависимостями, характеризующие деформационное упрочнение
2. Уточненная модель изгиба листового молибдена в условиях двухслойного листового пакета, позволяющая определить геометрические и механические характеристики изгибаемых слоев, при котором листовый молибден может находиться в условиях двухосного сжатия и накопить значительные величины эффективной деформации.
  3. Альтернативная модель анализа НДС при формоизменения угловой части заготовки, позволяющая раскрыть механизм деформирования, обосновать и определить теоретически возможную степень деформаций при неосесимметричной вытяжке.
  4. Развитие методики расчетов параметров точности и прочности, позволяющей оценить качество жаропрочных изделий типа контейнеров - лодочек, изготовленных из листового молибдена неосесимметричной вытяжкой.

### **Научная новизна:**

- Установлена взаимосвязь между механическими свойствами листового молибдена, определяемые по результатам испытаний образцов на одноосное растяжение с учетом нормальной анизотропии и параметрами в степенном законе деформационного упрочнения, позволяющая проведение анализа НДС при взаимозависимом изменения толщины материала и деформационного упрочнения.
- На основе анализа процессов вытяжки, протекающие в условиях обобщенного плоского напряженного состояния (объемное деформированное состояние) выявлены характерные особенности и уточнены основные технологические показатели, а именно величина предельной степени деформаций и распределение параметров точности и прочности по высоте вытягиваемых деталей.
- Развита основная положения неосесимметричной вытяжки листового металла, заключающееся в разработке альтернативной модели формоизменения угловой части заготовки, позволяющий обосновать и определить теоретически возможную величину степени деформаций в зависимости от вида НДС и механических свойств применяемых материалов.
- Уточнена и развита методика расчета величин и распределения накопленных деформаций по биссектрисе угловой части коробчатых деталей, на основе чего стало возможным оптимизация конструкции и технологии неосесимметричной вытяжки деталей типа контейнеров-лодочек.
- Развита теория изгиба листовых металлов с низкими показателями деформационных характеристик, в условиях двухслойного листового пакета, позволяющая определить толщину и механические свойства слоев при котором становится возможным достижение значительных степеней деформаций без разрушения.

## **Практическая значимость**

На основе развитых и уточненных методик анализа НДС, численного моделирования и экспериментальных исследований процесса неосесимметричной вытяжки листового молибдена:

- впервые разработаны оптимальная конструкция контейнера-лодочки и термомеханические режимы интенсификации процесса неосесимметричной вытяжки путем деформирования листового молибдена в условиях двухслойного листового пакета при наличии температурного поля с определенным градиентом,
- расчетными и экспериментальными методами установлены величины и распределения деформаций по толщине и параметров прочности, позволяющие прогнозировать качество жаропрочных изделий типа прямоугольных коробок,
- разработаны, изготовлены и опробованы в производственных условиях средства технологического оснащения (СТО) и оборудование для реализации процесса неосесимметричной вытяжки листового молибдена при изготовлении контейнеров-лодочек, применяемые в процессах ГНК.

## **Реализация работы**

Научно обоснованные технологические рекомендации по силовой и термической интенсификации процессов вытяжки листового молибдена положены в основу разработанного типового технологического процесса глубокой вытяжки коробчатых деталей типа контейнеров лодочек. Эффективность разработанного типового технологического процесса обоснованно при выращивании тугоплавких диэлектрических монокристаллов типа лейкосапфира, методами ГНК в которых использованы контейнера лодочки изготовленные глубокой вытяжкой.

**Апробация работы.** Основные результаты и положения диссертации докладывались и обсуждались на следующих конференциях и семинарах:

1. 13-ой Международной научно-практической конференции “Технология упрочнения, нанесение покрытий и ремонта: теория и практика” (Санкт-Петербург, 12-15 апреля 2011 г.);
2. 12-ой Международной конференции “Высокие технологии, фундаментальные исследования” (Санкт-Петербург, 8-11 декабря 2011 г.);
3. Международной научно-технической конференции “Машиностроительные технологии и техника автоматизации-2012”, Ереван, 09-15 июля 2012г.
4. 11-ом Международном конгрессе “Машины технологии материалы” (Варна, Болгария, 16-19 сентября 2014 г.);
5. 17-ой Международной научно-практической конференции “Технология упрочнения, нанесение покрытий и ремонта: теория и практика” (Санкт-Петербург, 14-17 апреля 2015 г.);
6. 12-ом Международном конгрессе “Машины технологии материалы” (Варна, Болгария, 16-19 сентября 2015 г.);
7. 12-ом международном конгрессе (зимняя сессия) “Машины технологии материалы” (Боровец, Болгария, 16-19 марта 2016 г.).
8. 13-ом международном конгрессе (зимняя сессия) “Машины технологии материалы” (Боровец, Болгария, 16-19 марта 2017 г.)

9. На научных семинарах кафедры металлургии и материаловедения Национального Политехнического университета Армении и Ереванского Государственного Университета.

**Публикации.** Основные результаты диссертации отражены в 6 статьях (в том числе одна статья без соавторов), опубликованных в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК и 8 научных работ, опубликованных в сборниках трудов международных научно-технических конференций.

### **Структура и объем диссертации**

Диссертация состоит из введения, 4-х глав, общих выводов, библиографического списка, включающего 101 наименование. Диссертация изложена на 123 страницах машинописного текста, содержит 45 рисунков и 3-х таблиц.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснована актуальность темы, сформулированы цель и задачи исследования, научная новизна, практическая ценность и основные научные положения выносимые на защиту.

**В первой главе** проведен анализ современного состояния исследований в области глубокой вытяжки изделий коробчатой формы из листового молибдена. Рассмотрены некоторые общие сведения о тугоплавких металлах, применяемых при создании жаропрочных конструкций. Приведены существующие технологии получения листового молибдена методами порошковой металлургии. Классифицированы факторы, влияющие на характеристики технологической пластичности листового молибдена. Приведены результаты анализа справочной и научно-технической литературы по учету влияния сил трения, изгиба и спрямления на радиусных кромках деформирующих инструментов, изменения толщины и деформационного упрочнения на поля напряжений и деформаций, при осесимметричной и не осесимметричной вытяжке.

Рассмотрен состояние теоретического анализа процесса неосесимметричной вытяжки, выполненные приближенным инженерным методом с применением деформационной теории пластичности, с применением условия пластичности по гипотезе постоянства максимальных касательных напряжений (условие пластичности Треска-Сен Венана). В существующих теоретических решениях по определению предельных степеней деформаций при отсутствии осевой симметрии деформирования использованы идеально жестко пластическая модель деформируемого материала.

В реальных условиях формоизменения листового металла, процессы деформирования происходят при плоском напряженном состоянии при котором деформация в направлении толщины принимается равным нулю. Такое состояние может реализоваться лишь в том случае, когда две главные нормальные напряжения равны по абсолютной величине и противоположны по знаку (в условиях плоского напряженного состояния имеет место плоская деформация). Следовательно, в реальных процессах формоизменения листового металла толщина заготовки в пластической области будет переменной, являясь некоторой функцией от координат.

Поэтому становится необходимой и целесообразной математически корректная постановка задачи формоизменения листового металла в условиях отсутствия осевой симметрии пластической области, на основе чего станет возможным определение предельной величины коэффициента вытяжки и обоснование механизма формоизменения, свободных от изложенных противоречий.

В последнем разделе первой главы приведены исходные уравнения и изложена общая методика теоретического анализа исследования напряженно деформированного состояния тонкостенных осесимметричных оболочек, позволяющая получить замкнутые аналитические решения с учетом взаимозависимого влияния изменения толщины материала и деформационного упрочнения на процессы формоизменения.

**Во второй главе** проведен аналитическое моделирование процесса осесимметричной вытяжки листового молибдена (рис. 1.).

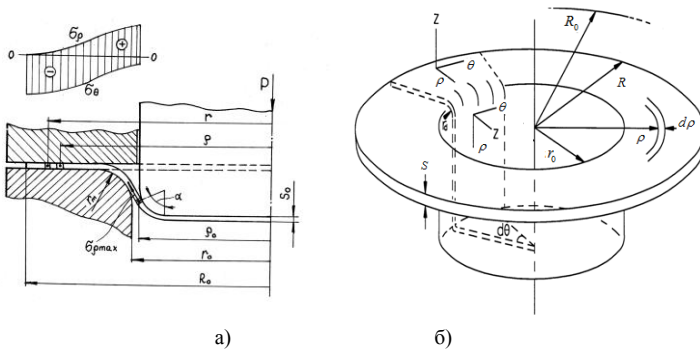


Рис.1. Схема процесса (а) и выбор координат при осесимметричной вытяжке (б)

Для характеристики изменения напряжения текучести в процессе пластической деформации(деформационное упрочнение), согласно гипотезе о существовании диаграммы деформированного состояния, независимой от вида напряженного состояния, обосновано феноменологическая зависимость напряжений текучести от накопленной деформации в виде степенной функции

$$\sigma_i = A \varepsilon_i^n, \quad (1)$$

где  $A$  и  $n$  – являются параметрами деформационного упрочнения и связаны с механическими свойствами деформируемого материала следующими зависимостями:  $A = \sigma_b e^n n^{-n}$ ,  $n = \ln(1 + \delta)$ . ( $\sigma_b$ ,  $\delta$  - соответственно предел прочности и относительная величина равномерного удлинения при испытании применяемого материала на одноосное растяжение ).

Теоретический анализ выполнен по безмоментной теории оболочек с применением теории пластического течения.

Согласно принятой методике обосновано, что в главных направлениях напряженно деформированное состояние(НДС) целесообразно и удобно рассматривать на девиаторной плоскости цилиндра пластичности Мизеса в



двумерной косоугольной системе координат. При этом исходные уравнения теории пластического течения при плоском напряженном состоянии, а именно: уравнение равновесия с учетом изменения толщины материала, условие пластичности Мизеса, условие постоянства объема, уравнение связи напряжений и приращений (скоростей) деформаций приводятся к единой структуре в виде дифференциальной зависимости между приращениями меридиональных напряжений и эквивалентной деформацией (интенсивность деформаций).

$$d\sigma_\rho = \sigma_s \overline{d\varepsilon_i}. \quad (2)$$

При выводе (2) использованы следующие зависимости для меридиональных и окружных напряжений, удовлетворяющие условию пластичности Мизеса(4) и уравнений связи между напряжениями и прращениями(скоростями) деформаций

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

$$\sigma_\rho^2 - \sigma_\rho \sigma_\theta + \sigma_\theta^2 = \sigma_s^2. \quad (4)$$

Интегрирование дифференциального уравнения (2) с учетом (1) и (3) приводит к следующему распределению компонент главных деформаций

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_\rho &= \frac{1+n}{2} \left( 1 + \cos 2\varphi - \frac{\sqrt{3}}{3} \sin 2\varphi \right); \\ \varepsilon_\theta &= -\frac{1+n}{2} \left( \cos 2\varphi + \frac{\sqrt{3}}{3} \sin 2\varphi \right); \\ \varepsilon_z &= -\frac{1+n}{2} \left( 1 - \frac{2\sqrt{3}}{3} \sin 2\varphi \right). \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

Для выяснения физической сущности параметра  $\varphi$  рассмотрены две различные интерпретации полученного решения. Если рассматривать деформированное состояние различных материальных элементов, то зависимости (5) описывают распределения компонент главных деформаций на данном этапе деформирования (переменные Эйлера). Если же рассматривать деформированное состояние фиксированного материального элемента, то параметр  $\varphi$  показывает характер изменения вектора эквивалентной деформации во времени (характер накопления деформаций в рассматриваемом материальном элементе) или историю накопления деформаций (переменные Лагранжа).

При наибольших размерах пластической области реализуются следующие схемы напряженно-деформированных состояний: при  $\varphi = -\pi/6$ ,  $\varepsilon_\theta = 0$ , а  $\varepsilon_\rho$  и  $\varepsilon_z$  равны по величине и противоположны по знаку, т.е. имеет место чистый сдвиг или плоская деформация в плоскости  $(\rho; z)$ , при  $\varphi = 0$ ,  $\varepsilon_\rho$  положительна, а  $\varepsilon_\theta$  и  $\varepsilon_z$  - отрицательны и численно равны  $\varepsilon_\rho/2$ , т.е. реализуется деформация линейного растяжения, при,  $\varphi = \pi/6$ ,  $\varepsilon_z = 0$ , а  $\varepsilon_\rho$  и  $\varepsilon_\theta$  равны по величине и противоположны

по знаку, т.е. реализуется чистый сдвиг или плоская деформация в плоскости  $(\rho; \theta)$ , при  $\varphi = \pi/3$ ,  $\varepsilon_\theta$  отрицательна, а  $\varepsilon_\rho$  и  $\varepsilon_z$  положительны и численно равны  $\varepsilon_\theta/2$ , т.е. реализуется деформация линейного сжатия.

На рис. 2. Приведены графики распределения напряжений и деформаций, а также относительной толщины с учетом и без учета деформационного упрочнения для начального этапа осесимметричной вытяжки.

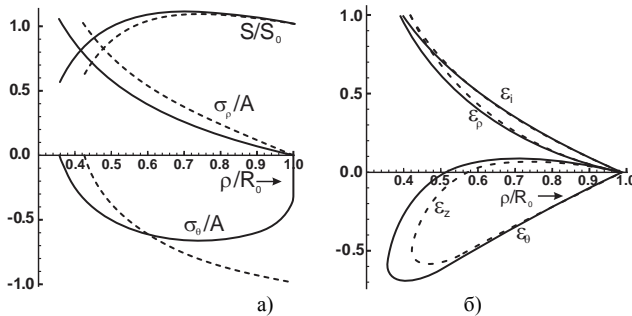


Рис.2 Распределения безразмерных величин главных напряжений и относительной толщины (а), главных деформаций и эквивалентной деформации (б) по ширине пластической области (--- для идеально жестко-пластической модели, — с учетом упрочнения  $n = 0.2$  )

Установлено, что на начальном этапе формообразования наблюдается особенность распределения деформации по толщине на периферийной зоне заготовки. В диапазоне  $\pi/6 \leq \varphi \leq \pi/3$  деформация по толщине положительна, а далее принимает отрицательное значение.

В последнем разделе второй главы проведена теоретическая оценка распределения прочностных и точностных параметров (параметров качества) по высоте вытягиваемых изделий. Доказано, что проблема оценки показателей точности линейных и диаметральных размеров, а также итоговых величин показателя сопротивления деформированию сводится к анализу нестационарных полей векторов эквивалентных деформаций. На основе этого получена распределение компонент деформаций и показателя сопротивления деформированию в конце вытяжки (рис.3.)

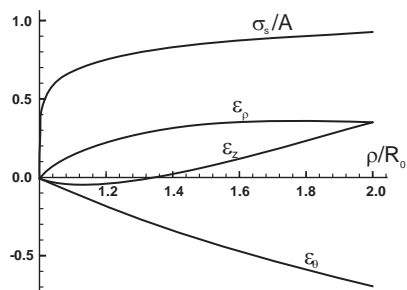


Рис.3.Распределения компонент деформаций и показателя сопротивления деформированию в конце вытяжки

**В третьей главе** проведен аналитическое моделирование процесса неосесимметричной вытяжки листового молибдена. Показано, что одним из возможных вариантов формообразования листового молибдена является его деформирование в условиях двухслойного листового пакета, состоящего из внутреннего, молибденового слоя и наружного, из листовой стали с высокими показателями технологической пластичности.

При предположении отсутствия относительного проскальзывания между слоями, получены аналитические зависимости для окружных и радиальных напряжений, на основе чего стало возможным определение приближенного радиуса нейтрального слоя для суммарной толщины листового пакета

$$\rho_n \approx \left( R r \exp \frac{\sigma_k}{A} \right)^{1/2}, \quad (6)$$

где  $R$  и  $r$  – соответственно наружный и внутренний радиусы листового пакета,  $\sigma_k$  – нормальное контактное напряжение между слоями,  $A$  – параметр в степенном законе деформационного упрочнения.

На основе анализа полученных результатов установлено, что для наружного слоя наиболее целесообразно, согласно ГОСТ 1542-71, использование тонколистовой легированной конструкционной стали общего назначения марки 25ХГСА толщиной 0,8 мм ( $\sigma_b \approx 690 \text{ МПа}$ ,  $\delta \approx 0,18$ ).

Проведен теоретический анализ процесса глубокой вытяжки коробчатых деталей. В отличие от общепринятой модели деформирования, увеличение предельной степени деформации в угловой части коробчатых деталей обосновано на основе предположения о росте окружных сжимающих напряжений по биссектрисе на периферийной части заготовки. Из (4) следует, что окружные напряжения по абсолютной величине могут возрастать при одновременном росте по абсолютной величине меридиональных напряжений. Используя ранее установленное взаимосвязь между относительной координатой рассматриваемого элемента заготовки и параметром деформированного состояния, получена выражение для теоретически возможной (предельной) величины коэффициента вытяжки для угловой части заготовки

$$K = \frac{R}{r} \Rightarrow \exp\left(1 + \frac{1}{\sqrt{3}}\right) \approx 4,84 \quad (7)$$

Для обоснования полученной величины коэффициента вытяжки принимается, что главные напряжения (3), имея максимальные значения на биссектрисе угловой части, убывают в направлении к границе жестко-пластической зоны определенным подобным образом, на основе чего становится возможным представить компоненты нормальных напряжений в виде

$$\sigma_\rho = \sigma_s \frac{2}{\sqrt{3}} \cos\left(\varphi + \frac{\pi}{6}\right) \times F(\theta); \quad \sigma_\theta = -\sigma_s \frac{2}{\sqrt{3}} \sin \varphi \times F(\theta). \quad (8)$$

Первые множители в (8) характеризуют распределение главных нормальных напряжений по биссектрисе углового участка заготовки, а второй – определяет характер уменьшения этих напряжений при увеличении полярного угла в пределах  $0 \leq \theta \leq \pi/2$ .

На рис.4. представлены распределение НДС по биссектрисе угловой части заготовки

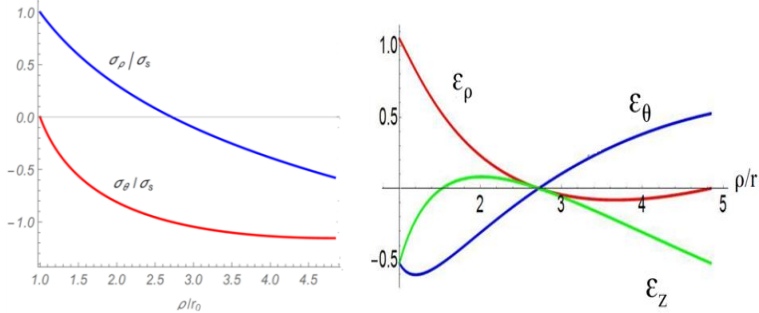


Рис.4. Распределения главных нормальных напряжений (а) и компонент главных деформаций (б) по биссектрисе углового участка при вытяжке прямоугольных коробок

Используя исходные уравнения равновесия при отсутствии осевой симметрии деформирования, для жестко-пластической модели деформируемого материала, для начального этапа деформирования устанавливается следующее распределение для компонент напряжений в угловой части заготовки

$$\left. \begin{aligned} \sigma_\rho &= \sigma_s \frac{2}{\sqrt{3}} \cos\left(\varphi + \frac{\pi}{6}\right) \times \cos \theta; \\ \sigma_\theta &= -\sigma_s \frac{2}{\sqrt{3}} \sin \varphi \times \cos \theta; \\ \tau_{\rho\theta} &= \pm \sigma_s \frac{1}{\sqrt{3}} \sin \theta. \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

На основе установленной взаимосвязи между величиной и характером распределения касательных и окружных напряжений (9) становится возможным

обоснование прироста по абсолютной величине окружных сжимающих напряжений на периферийной части заготовки.

На рис. 5. представлено распределение компонент нормальных и касательных напряжений по биссектрисе углового участка при вытяжке прямоугольных коробок

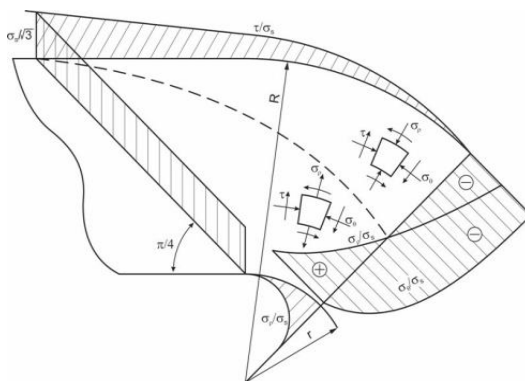


Рис.5. Распределение компонент нормальных и касательных напряжений по биссектрисе углового участка при вытяжке прямоугольных коробок

Установленное поле напряжений для угловой части заготовки позволяет обосновать количественную оценку (7). Из рис. 5. следует также, что при неосесимметричной вытяжке во фланцевой зоне существуют две схемы обобщенного плоского напряженного состояния: в части фланца примыкающее к отверстию матрицы реализуется двухосное разноименное напряженное состояние  $1 \leq \rho/r \leq 2,718$ ;  $\sigma_\rho \sigma_\theta \leq 0$ ;  $\sigma_\rho \geq 0$ ;  $\sigma_\theta \leq 0$ , а при  $2,718 \leq \rho/r \leq 4,84$  напряженное состояние меняет знак и становится двухосно одноименным  $\sigma_\rho \sigma_\theta \geq 0$ ;  $\sigma_\rho \leq 0$ ;  $\sigma_\theta \leq 0$ .

**В четвертой главе** проведено экспериментальные исследования и компьютерное моделирование процесса неосесимметричной глубокой вытяжки, а также оптимизация технологического процесса и разработка типового технологического процесса вытяжки контейнеров лодочек из листового молибдена.

По результатам испытания плоских образцов на одноосное растяжение и вытяжки цилиндрических деталей из круглых заготовок установлено, что оптимальным температурным режимом деформирования листового молибдена толщиной 0.5-0.7мм колеблется в пределах 300-350°C, а среднее значение коэффициента и показателя анизотропии соответственно равны-  $\bar{\mu} = 0,477$ ;  $\bar{R} = 0,912$ , которые рассчитаны на основе следующих зависимостей

$$R = \frac{\bar{\mu}}{1 - \bar{\mu}}, \quad \bar{\mu} = \frac{1}{2} \left( \frac{1}{2} \mu_0 + \mu_{45} + \frac{1}{2} \mu_{90} \right), \quad (10)$$

где  $\mu_0, \mu_{45}, \mu_{90}$  – соответственно коэффициенты поперечной деформации образцов, расположенные вдоль проката, перпендикулярно и под углом 45°. На рис.6 показаны

цилиндрические детали вытянутые из круглых заготовок листового молибдена в условиях оптимального температурного градиента



Рис.6. Цилиндрические детали, вытянутые из листового молибдена с применением дифференциального нагрева.

Компьютерное моделирование проведено на основе программного комплекса PAM-STAMP, в котором в качестве исходных данных использованы механические и физические свойства листового молибдена. Результаты компьютерного моделирования установили качественное соответствие распределения толщин по образующей при вытяжке цилиндрических деталей и по биссектрисе – при вытяжке коробчатых деталей. На рис.7 приведены взаимное расположение пуансона, матрицы, прижима и заготовки при отсутствии и наличии осевой симметрии деформирования.

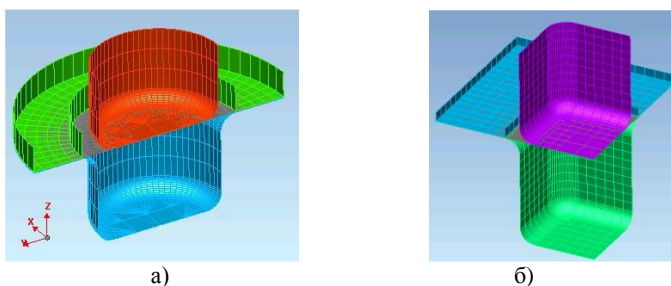


Рис.7. Конечно-элементные модели пуансона, прижима, матрицы и заготовки для осесимметричной (а) и неосесимметричной (б) вытяжки, созданные в программе PAM-STAMP

Оптимизация технологического процесса неосесимметричной вытяжки листового молибдена, выполнено на основе построения оптимального контура исходной заготовки (при котором вытянутая деталь имеет одинаковую высоту по периметру) и температурно силовых режимов деформирования. На рис. 8. представлено взаимное расположение контейнера и плоской листовой заготовки для определения оптимального контура заготовки

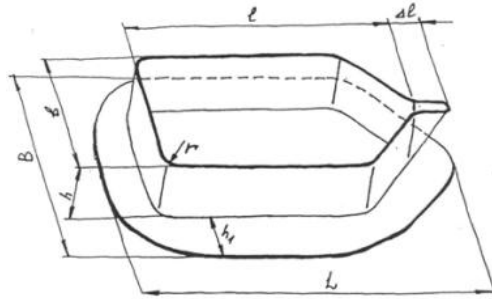


Рис.8 Взаимное расположение контейнера и плоской листовой заготовки.

Разработано и изготовлено экспериментальное устройство (штамп) для вытяжки контейнеров размерами 280x220x47 мм из листового молибдена толщиной 0.7мм, снабженной нагревательным и прижимными устройствами в котором реализовано процесс вытяжки контейнеров в условиях деформирования двухслойного листового пакета. На рис. 9. показано разработанный типовой технологический процесс неосесимметричной вытяжки листового молибдена

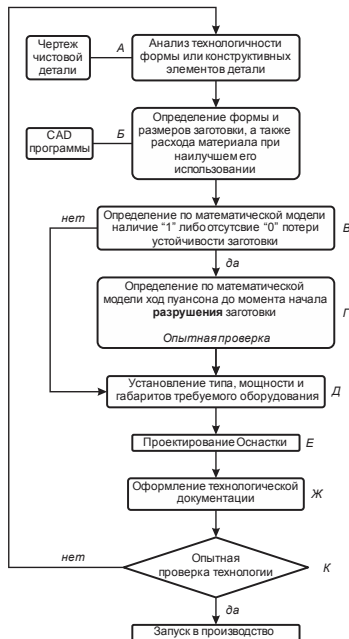


Рис.9. Последовательность процедур при проектировании технологического процесса глубокой вытяжки листовых молибденовых заготовок

## ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. Взаимодополняющими аналитическими, численными и экспериментальными методами проведено моделирование процессов глубокой вытяжки полых цилиндрических и коробчатых деталей из листового молибдена толщиной 0,5 мм и 0,7 мм, изготовленные методами порошковой металлургии с определенными свойствами нормальной анизотропии.
2. С учетом основных технологических факторов, влияющих на процессы глубокой вытяжки, а именно изменение толщины и деформационного упрочнения, для конечного формоизменения при наличии и отсутствии осевой симметрии деформирования, на основе теории пластического течения получены замкнутые аналитические решения для полей напряжений и деформаций.
3. Для процессов глубокой вытяжки, протекающие в условиях обобщенного плоского напряженного состояния, показано что, на девиаторной плоскости цилиндра пластичности Мизеса накопление деформаций носит нестационарный характер. Дана количественная оценка степени нестационарности, на основе чего проведен анализ механизма роста эффективной деформации с целью обеспечения требуемых физико-механических характеристик и структуры готовых изделий.
4. Аналитическими методами и экспериментальными исследованиями установлен закономерность изменения предела текучести при формоизменении листового молибдена и показано, что наиболее точно деформационное упрочнение описывается степенной зависимостью между напряжением текучести и накопленной (эффективной) деформацией. На основе экспериментально установленных механических свойств исходного листового молибдена определены постоянные параметры в степенном законе деформационного упрочнения.
5. По результатам анализа аналитических решений выявлены определенные характерные особенности глубокой вытяжки, а именно: для жестко-пластической модели деформируемого материала предельная степень деформаций не может превышать величину – 2,475 при осесимметричной вытяжке и – 4,84 при неосесимметричной вытяжке. Установлен линейный характер влияния параметра деформационного упрочнения на указанные показатели.
6. Предложена новая методика для определения главных напряжений по биссектрисе в угловой части заготовки при неосесимметричной вытяжке, позволяющий обосновать увеличение предельной степени деформаций на основе роста, по абсолютной величине, окружных сжимающих напряжений в условиях формоизменения заготовки при обобщенном плоском напряженном состоянии с учетом взаимозависимого изменения толщины материала и деформационного упрочнения.
7. Разработана методика и дана количественная оценка погрешностей линейных размеров и показателя сопротивления деформированию при глубокой вытяжке цилиндрических и коробчатых деталей из листового молибдена. На девиаторной плоскости цилиндра пластичности Мизеса определены векторные поля эквивалентных деформаций для начальной и конечной стадий процесса глубокой



вытяжки, и на основе отображения этих полей в материальную среду деформируемой заготовки определены распределения параметров точности и прочности по высоте вытягиваемых деталей.

8. На основе данных о физико-химических процессах, происходящих при росте тугоплавких диэлектриков из расплава, распределений температурных полей и остаточных напряжений, а также особенностей деформирования листового молибдена в условиях двухслойного листового пакета разработаны оптимальная конструкция контейнеров двух типоразмеров – 40 x 100 x 200 мм и 50 x 160 x 320 мм и технология глубокой вытяжки из заготовок толщиной, соответственно 0,5 мм и 0,7 мм согласно ТУ48-19-472-90.
9. Разработана конструкция и изготовлено устройство (штамп) для глубокой вытяжки из листового молибдена неосесимметричных-коробчатых деталей типа контейнеров-лодочек, с возможностью обеспечения оптимальных значений температурного градиента- около 300° С на краю фланца заготовки и около 60° С на пуансоне. Проведены экспериментальные исследования на гидравлическом прессе усилием 160 МН, определены технологическое усилие и работа деформирования, а также оптимальный диапазон изменения скорости перемещения ползуна.

#### **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ ОТРАЖЕНО В ПУБЛИКАЦИЯХ**

1. Назарян Э.А., Симонян А.С. Учет упрочнения в процессах холодного пластического формоизменения металлов // Вестник: Сборник научных трудов. – Ч 2. - Ереван, Государственный Инженерный Университет Армении (Политехник). - 2013.- N 2. - С.422-428.
2. Назарян Э.А., Аракелян М.М., Симонян А.С. Особенности формоизменения листового металла при осесимметричной вытяжке // Материалы 13-ой Международной научно-практической конференции “Технологии упрочнения...от нано до макроуровня”. - 2011, Санкт-Петербург, 12-15 апреля. - С. 378-383.
3. Назарян Э.А., Аракелян М.М., Симонян А.С. Теоретическое исследование параметров качества в процессе вытяжки цилиндрической детали // Заготовительные производства в машиностроении.- М. - 2015. – N 5.- С. 24-30.
4. Назарян Э.А., Аракелян М.М., Симонян А.С. Определение параметров качества при вытяжке цилиндрических деталей // Материалы 17-ой Международной научно-практической конференции “Технологии упрочнения от нано до макроуровня”. - Санкт-Петербург, 14-17 апреля, 2015. - С. 211-218.
5. Nazaryan E.A., Arakelyan M.M., Simonyan A.S. Investigation of the Parameters of the Quality at an axe Symmetric Drawing // International Journal for Science, Techniques and Innovations for the Industry “Machines Technologies Materials”, 2016.- N. 1X, issue 1.- P.11-14.
6. Назарян Э.А., Аракелян М.М., Симонян А.С. Анализ процесса изгиба двухслойного листового пакета. // Заготовительные производства в машиностроении.- М., 2014.-N 8.- С.19-23.
7. Nazaryan E.A., Arakelyan M.M., Simonyan A.S. Analysis of the Process of Bending the Two-Layer Packade // Inernational Virtual Journal for Science,Techniques

- and Inovations International Virtual Journal for science. Techniques and Inovations for the Idustry. XI International Congress Machines. Technologies. Materials, 2014.- issue 8. - P. 34-37, and // Proceedings of International Congress Machines. Technologies. Materials, 2014.- Issue 8.- P. 6-9.
8. Назарян Э.А., Аракелян М.М., Симонян А.С. Анализ процесса вытяжки коробчатых деталей, заготовительные производства в машиностроении.- М.: 2016.- N 3. - С.18-21.
  9. Nazaryan E.A., Arakelyan M.M., Simonyan A.S. Analysis of the Deep Drawing Process of Box-shaped Parts // International Journal for science Techniques and Innovations for the Industry (Machines, Technologies, Materials MTM), 2016.- Issue 1.- ISSN 1313-0226, Bulgaria. - P. 44-45.
  10. Назарян Э.А., Аракелян М.М., Симонян А.С. Аналитическая модель неосесимметричной вытяжки // Заготовительные производства в машиностроении.- М.: 2016.- N 8.- С.10-13.
  11. Симонян А.С. Анализ процесса неосесимметричной вытяжки // Вестник НПУА: Металлургия, Материаловедение, Недропользование. - 2016.- N 2.- С.39-47.
  12. Nazaryan E.A., Arakelyan M.M., Simonyan A.S. Analytical Model Non Axe Symmetric Drawing // International Journal for science Techniques and Innovations for the Industry (Machines, Technologies, Materials MTM), 2017.- Issue 1.- ISSN 1313-0226.- Bulgaria. - P.43-46.
  13. Назарян Э.А., Симонян А.С., Мкртчян О.А. Разработка оптимальной конструкции и технологии формообразования контейнеров из листового молибдена // Сборник трудов Международной научно-технической конференции “Машиностроительные технологии и техника автоматизации” – 2012. - Ереван, 09-15 июля, 2012. - С. 142-146.
  14. Назарян Э.А., Аракелян М.М., Симонян А.С. Оптимизация конструкции и разработка технологии глубокой вытяжки контейнеров для выращивания монокристаллов // Сборник статей “Высокие технологии, фундаментальные исследования”.- Санкт-Петербург, 2011.- С. 171-173.

## ԱՄՓՈՓԱԳԻՐ

Մոլիբդենը պատկանում է տեխնիկայի տարբեր բնագավառներում օգտագործվող հրակայուն կոնստրուկցիաների ստեղծման համարկ իրառվող առավել հեռանկարային մետաղների թվին: Մոլիբդենից պատրաստված արտադրատեսակները լայնկիրառություն են գտնում բարձր ջերմաստիճաններում, ռադիացիոն ճառագայթման, բարձր արագության պլազմային և գազային հոսքերում ու ագրեսիվ միջավայրերում աշխատող տարբեր սարքավորումներում: Մոլիբդենի հիմքի վրա ստեղծված համաձուլվածքները օգտագործվում են այրման խցիկներում և հրթիռային շարժիչներում, որտեղ ջերմաստիճանը հասնում է 2000°C և ավել մեծությունների: Նման վիճակ է նաև դժվարահալ մեկուսիչների հալույթից բարձր ջերմաստիճանային բյուրեղացումը: Այդ գործընթացներում թերթային մոլիբդենից պատրաստված կոնտեյներները աշխատում են 2100°C ջերմաստիճանում անմիջապես հալույթի հետ կոնտակտի պայմաններում:

**Աշխատանքի նպատակն է՝** հորիզոնական ուղղորդված բյուրեղացման մեթոդներով հալույթից միաբյուրեղների աճեցման գործընթացներում օգտագործվող նավակաձև կաղապարների պատրաստման համար կիրառվող թերթային մոլիբդենի ռչառանցքահամաչափ արտաձգման գործընթացի մշակումը, որը թույլ է տալիս բարձրացնել աճեցվող միաբյուրեղների որակը և աճեցման պրոցեսի տեխնիկա-տնտեսական ցուցանիշները:

**Առաջին գլխում** կատարված է թերթային մոլիբդենից ոչ առանցքա համաչափ արտաձգման պրոսեցների ուսումնասիրման ժամանակակից հետազոտությունների վիճակի վերլուծությունը: Դիտարկված են հրակայուն կոնստրուկցիաների ստեղծման նպատակով օգտագործվող դժվարահալ մետաղների ընդհանուր մի քանի տեղեկություններ: Բերված են թերթային մոլիբդենի փոշեմետալուրգիայի մեթոդներով ստացման գործող տեխնոլոգիաները: Բերված են պլաստիկության հոսքի տեսության ընդհանուր հավասարումները և շարադրված է բարակապատ առանցքահամաչափ թաղանթների տեսական հետազոտությունների ընդհանուր մեթոդիկան, որը թույլ է տալիս ստանալ լարումների և դեֆորմացիաների բաշխման օրինաչափությունները հաշվի առնելով նյութի հաստության փոփոխության և դեֆորմացիոն ամրացման փոխկապակցվածք և ույթները:

**Երկրորդ գլխում** շարադրված են թերթային մոլիբդենի առանցքահամաչափ արտաձգման վերլուծական մեթոդներով կատարված մոդելավորման արդյունքները: Պլաստիկ դեֆորմացման գործընթացում, որպես հոսունության սահմանի բնութագիր, հիմնավորված է ֆենոմենոլոգիական առնչություններում օգտագործվող հոսունության սահմանի կախումը կուտակված դեֆորմացիաներից աստիճանային ֆունկցիայի տեսքով: Լարումների և դեֆորմացիաների դաշտերի համար ստացված են վերլուծական

առնչություններ, որոնց հիման վրա հաստատված են առանցքահամաչափ արտաձգման մի շարք բնութագրական առանձնահատկություններ: Ստացված առնչությունների հիման վրա որոշված են գլանաձև դետալների ծնիչի ուղղությամբ ամրության և ճշտության բաշխման օրինաչափությունները:

**Երրորդ գլխում** շարադրված է թերթային մոլիբդենի ոչ առանցքահամաչափ արտաձգման վերլուծական մեթոդներով կատարված մոդելավորման արդյունքները: Տույց է տրված, որ թերթային մոլիբդենի հնարավոր ձևագոյացման տարբերակներից է հանդիսանում նրա դեֆորմացումը երկշերտ մոմենտով ծռման պայմաններում, բաղկացած ներքին մոլիբդենի շերտից և արտաքին տեխնոլոգիական պլաստիկության բարձր ցուցանիշներով օժտված թերթային պողպատից: Նշված դեպքի համար լուծված է երկշերտ մոմենտով ծռման մոտավոր խնդիրը: Տույց է տրված մոլիբդենի դեֆորմացման հնարավորությունը անհավասարաչափ երկառանցք լարումների դաշտում:

**Չորրորդ գլխում** բերված են ոչ առանցքահամաչափ արտաձգման փորձարարական հետազոտությունների և համակարգչային մոդելավորման արդյունքները, ինչպես նաև տեխնոլոգիական գործընթացի օպտիմալացման թերթային մոլիբդենից նավակաձև կաղապարների արտաձգման տիպային տեխնոլոգիայի մշակման արդյունքները:

Հարթ նմուշների միառանցք ձգման փորձարկման և կլոր նախապատրաստվածքներից գլանաձև դետալների արտաձգման արդյունքներով, հաստատված է 0.5-0.7 մմ հաստությամբ թերթային մոլիբդենի դեֆորմացման ջերմային ռեժիմները:

Համակարգչային մոդելավորումը կատարված է PAM-STAMP համալիր ծրագրի հիման վրա, որտեղ որպես նախնական տվյալներ օգտագործված են թերթային մոլիբդենի ֆիզիկո-մեխանիկական հատկությունները:

Թերթային մոլիբդենի ոչ առանցքահամաչափ արտաձգման տեխնոլոգիական պրոցեսի օպտիմալացումը իրականացված է դեֆորմացման ջերմային և ուժային ռեժիմների և նախնական նախապատրաստվածքի պարագծի օպտիմալացման ճանապարհով:

280x220x47 մմ չափերով 0.7 մմ հաստության թերթային մոլիբդենից նավակաձև և կաղապարների արտաձգման համար նախագծված և պատրաստված է փորձարարական հարմարանք (դրոշմ), որն օժտված է տաքացման և սեղման հարմարանքներով: Նշված հարմարանքում իրականացված է մոլիբդենի երկշերտ արտաձգման գործընթացի հնարավորությունը և մշակված է թերթային մոլիբդենի ոչ առանցքահամաչափ արտաձգման գործընթացի տիպային տեխնոլոգիական գործընթացը:

## SUMMARY

### PROCESS MODELING AND TECHNOLOGY DEVELOPMENT OF NON-AXIS SYMMETRIC DEEP DRAWING OF SHEET MOLYBDENUM

Molybdenum is considered one of the most promising metals for heat-resistant construction development, which are applied in various technology fields. The products made of molybdenum are widely used in various devices that work in high-temperature and radiation conditions, in high speed plasma and gas flows and in aggressive media. Molybdenum-based alloys are used in combustion chambers and rocket engines, where the temperature reaches up to 2000°C and more. A similar situation is usual for high-temperature crystallization from refractory dielectrics' melt. In these processes the sheet molybdenum made containers work in contact with the melt at 2100°C temperature.

The goal of the work is technology development of non-axis symmetric deep drawing of sheet molybdenum for boat-shaped container fabrication. The latter are used in the growth processes of optically transparent single crystals from the melt, by horizontally directed crystallization (HDC) method, which allows to increase the quality of cultivated single crystals and the techno-economic indicators of growth process.

In the **first** chapter the analysis of researches' current state in the area of non-axis symmetric deep drawing of sheet molybdenum is carried out. Some general information on refractory metals are discussed, which are used in fabrication of heat-resistant constructions. The existing technologies of sheet molybdenum obtainment by powder metallurgy method are given. The general equations of plastic flow theory are introduced and the theoretical analysis's general methodology of stress strain state is represented, which allows to get the distribution patterns of stresses and deformations, taking into account the interrelated phenomena of material thickness change and deformation hardening.

In the **second** chapter the analytical modeling of axis symmetric drawing of sheet molybdenum is represented. In plastic deformation processes as a yield border characteristic feature, the yield border (used in phenomenological dealings) dependence on accumulated deformations is justified in the form of stair function. The analytical dependencies for stress and strain fields are achieved, on the basis of which the characteristic features, accompanying the process of axis symmetric drawing, are determined. By the dependencies achieved the distribution of accuracy and strength parameters along the generator of drawn cylindrical parts are determined.

In the **third** chapter the analytical modeling of non-axis symmetric drawing of sheet molybdenum process is carried out. It is shown that one of the possible variants of sheet molybdenum forming is its deformation under the two-layer sheet package; the latter is comprised of an inner molybdenum layer and an outer sheet steel layer of high technological plasticity. For this case a simplified task of two-layer sheet package bending momentum is solved. The possibility of sheet molybdenum deformation under two axis stress state conditions is shown.

In the **fourth** chapter experimental analyses and computer modeling of non-axis symmetric deep drawing process, also technological process optimization and typical technological process development of boat-shaped containers from sheet molybdenum are carried out.

The optimal thermal regime for 0.5-0.7 mm thickness sheet molybdenum deformation is determined, being based on the results obtained from the experimental observations of flat samples on single axis tension and drawing of cylindrical parts from round blanks.

The computer modeling is conducted on PAM\_STAMP complex program in which the mechanical and physical parameters of sheet molybdenum are used as initial data.

The technological process optimization of non-axis symmetric sheet molybdenum drawing is realized on the basis of optimal contour formation's initial blank and temperature-force modes of deformation.

An experimental device (die) is designed and fabricated for container drawing from sheet molybdenum of 0.7 mm thickness (the size is 280x220x47 mm) with heat and pressing (blank holder) tools. The container drawing process under two layer sheet package deformation conditions and also typical technological process of non-axis symmetric of sheet molybdenum drawing is realized in the stamp.

A handwritten signature in black ink, appearing to be 'A. Wang', located in the lower right quadrant of the page.