

НАПРЯЖЕНИЯ И ДЕФОРМАЦИИ ЛИСТОВОГО МОЛИБДЕНА  
ПРИ ПЛОСКОМ НАПРЯЖЕННОМ СОСТОЯНИИ С УЧЕТОМ  
ДЕФОРМАЦИОННОГО УПРОЧНЕНИЯ

Назарян Э. А., Аракелян М. М.

Է.Ա. Նազարյան, Մ.Մ. Արակելյան

Հարթ լարվածային վիճակում թերթային մոլիբդենի լարումները և դեֆորմացիաները հաշվի առնելով դեֆորմացիոն ամրացումը

Ապացուցված է, որ թերթային նյութի միառանցք կամ երկառանցք լարված վիճակների փորձարկումների ընթացքում չափվող դեֆորմացիայի բաղադրիչները իրենցից ներկայացնում են դեֆորմացիաների տարածության մեջ որոշակի վեկտոր-ֆունկցիայի պրոեկցիաներ: Հաստատված է, որ վեկտոր-ֆունկցիայի մոդուլը հավասար է էֆեկտիվ դեֆորմացիայի (դեֆորմացիաների ինտենսիվություն) մեծությանը, իսկ նրա փոփոխությունը նկարագրում է նախապատրաստվածքի դիտարկվող էլեմենտում վերջավոր դեֆորմացիաների կուտակման օրինաչափությունները: Վեկտոր-ֆունկցիայի ուղղությունը միարժեք որոշվում է լարված վիճակով և կախված լարումների հարաբերությունից կարող է փոփոխվել 0-ից 360° սահմաններում: Լարված վիճակների փոփոխություններով հնարավոր է դառնում կառավարել դեֆորմացիաների կուտակման բնույթը: Այսպիսով հնարավոր է իրականացնել 2-5% հարաբերական երկարացում ունեցող թերթային մոլիբդենի խոր արտաձգում, ապահովելով 60-80% դեֆորմացիայի աստիճաններ:

Է.Ա. Nazaryan, М.М. Arakelyan

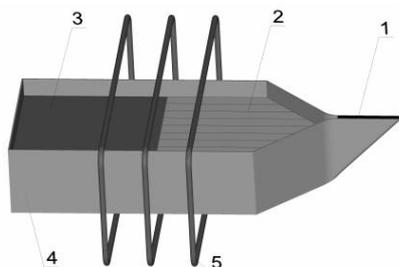
**Stresses and strains of sheet molybdenum at the plane strain in the case of strain hardening.**

Based on this scientifically established concept, the head of the project has provided in previous works that the magnitude of component deformation, usually measured in single or biaxial exertion conditions during test, represent a projection of some vector-function in the deformation space. It is established that the module of the vector-function is numerically equal to the size of the effective deformation (intensive deformation), while its change describes the character of accumulation of the total deformation in the element under consideration and its initial blank. The direction of the vector-function is unambiguously determined by the scheme of stress condition and, depending on it, can take any value between 0 and 360 degrees. Thus it is possible to manage the character of accumulation of deformation by changing the scheme of stress condition. Thereby it is possible to realize the process of deep drawing of molybdenum sheet with levels of deformation up to 60-80%, with an initial expansion lengthening characteristic of molybdenum sheet being no more than 2-5%.

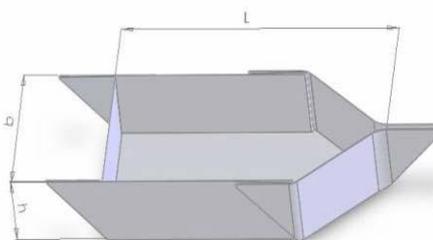
Доказано, что величины компонент деформаций, обычно измеряемые при испытаниях листового материала в одноосном либо двухосном напряженных состояниях, представляют собой в пространстве деформаций проекции некоторой вектор-функции. Установлено, что модуль вектор-функции численно равен величине эффективной деформации (интенсивность деформаций), а его изменение описывает характер накопления итоговой деформации в рассматриваемом элементе исходной заготовки. Направление вектор-функции однозначно определяется схемой напряженного состояния и в зависимости от этого может принимать любые значения от 0 до 360°. Становится возможным управление характером накопления деформаций путем изменения схемы напряженного состояния. Тем самым, становится возможной реализация процесса глубокой вытяжки листового молибдена со степенями деформации 60-80% при исходной величине относительного удлинения листового молибдена не более 2-5%.

## Введение

Одним из перспективных методов выращивания оптически прозрачных тугоплавких монокристаллов является метод горизонтально направленной кристаллизации (метод Багдасарова), сущность которого заключается в следующем [1] фиг. 1, (1 – затравка, 2 – кристалл, 3 – расплав, 4 – контейнер, 5 – нагреватель).



Фиг.1



Фиг. 2

В контейнер, имеющий форму лодочки, помещают кристаллизующее вещество, расплавляют его путём перемещения контейнера сквозь зону нагрева и закристаллизовывают. Процесс выращивания тугоплавких монокристаллов характеризуется критическими по величине и градиенту значениями температур, достигающими соответственно  $2000^{\circ}\text{C}$  и  $100^{\circ}\text{C}/\text{мм}$ , чем и обусловлено применение листового молибдена для изготовления контейнеров.

В настоящее время контейнеры в форме лодочек изготавливают из металлокерамического листового молибдена толщиной 0,5мм методом изгиба с применением пламенного нагрева (фиг.2).

Существующая конструкция и технология изготовления контейнеров имеет ряд недостатков, препятствующих образованию требуемого фронта кристаллизации и получению высококачественных монокристаллов.

1. При перемещении контейнера с расплавом через зону температурного градиента происходит искажение фронта кристаллизации, связанное с переменным теплообменом между расплавом и стенками контейнера.
2. В угловых участках выращенные кристаллы перенапряжены и при охлаждении часто растрескиваются. Практика показывает, что в результате этого эффективность процесса снижается на 30-40%.
3. При пламенном нагреве происходит окисление листового молибдена, что приводит к образованию микротрещин и утечке расплава.
4. Способ изготовления контейнеров нетехнологичен и имеет большую трудоемкость изготовления.

Анализ различных аспектов процесса горизонтально направленной кристаллизации показывает, что проблема повышения качества монокристаллов и эффективность производства в основном связаны с технологическим уровнем изготовления контейнеров.

Контейнеры в форме лодочек представляют собой тонкостенные неосесимметричные оболочки, основным технологическим процессом изготовления которых является глубокая вытяжка.

Однако низкие показатели штампуемости листового молибдена не позволяют применять традиционные методы глубокой вытяжки.

Целью настоящей работы является исследование механических свойств и технологических характеристик листового молибдена в условиях одноосного и двухосного напряженных состояний и разработка на этой основе новой технологии глубокой вытяжки контейнеров, обеспечивающей оптимальные условия протекания физической кинетики на фронте роста.

### **Напряжения и деформации при пластическом формоизменении осесимметричных тонкостенных оболочек и их представление**

При пластическом формоизменении осесимметричных тонкостенных оболочек из листового металла в качестве исходной удобно рассматривать срединную поверхность, делящую толщину материала пополам. В данной работе использованы системы прямоугольных координат с осью  $z$ , проходящей в направлении толщины по нормали к срединной поверхности; осью  $\rho$ , проходящей в меридиональном направлении и совпадающей с касательной к линии пересечения срединной поверхности с меридиональной плоскостью, и осью  $\theta$ , проходящей в окружном направлении и перпендикулярной к обеим осям  $z$  и  $\rho$ . Принимается, что касательные напряжения на контактных поверхностях заготовки и инструмента малы по сравнению с нормальными напряжениями и ими можно пренебречь, а радиусы кривизны в меридиональном и окружном направлениях намного больше толщины материала. При таких допущениях главные напряжения в процессе формоизменения совпадают с главными осями скоростей (приращений) деформаций и справедливо применение безмоментной теории оболочек.

В рамках принятых допущений уравнения связи напряжений и скоростей (приращений) деформаций можно представить в виде

$$\frac{\sigma_\rho - \sigma_z}{\sigma_\theta - \sigma_z} = \frac{d\varepsilon_\rho - d\varepsilon_z}{d\varepsilon_\theta - d\varepsilon_z} \quad (1)$$

где  $\sigma_\rho$ ,  $\sigma_\theta$ ,  $\sigma_z$  – напряжения, действующие соответственно в меридиальном, окружном и перпендикулярном к толщине направлениях, а  $d\varepsilon_\rho$ ,  $d\varepsilon_\theta$ ,  $d\varepsilon_z$  – компоненты приращений деформаций в тех же направлениях.

В условиях больших пластических деформаций металлы практически несжимаемы и на любом этапе формоизменения приращения главных деформаций удовлетворяют условию постоянства объема.

$$d\varepsilon_\rho + d\varepsilon_\theta + d\varepsilon_z = 0 \quad (2)$$

Из уравнений (1) и (2) для плоского напряженного состояния ( $\sigma_z \approx 0$ ) следует

$$\frac{ds}{s} = \frac{\sigma_\rho + \sigma_\theta}{\sigma_\rho - 2\sigma_\theta} \frac{d\rho}{\rho} \quad (3)$$

где  $d\varepsilon_z = \frac{ds}{s}$ ,  $d\varepsilon_\theta = \frac{d\rho}{\rho}$ ,  $s$  – текущая толщина элемента заготовки;  $ds$  – изменение толщины элемента с координатой  $\rho$  при его перемещении в очаге пластических деформаций на  $d\rho$ .

Уравнение равновесия элемента осесимметричной оболочки с учетом изменения толщины имеет вид

$$\rho \frac{d\sigma_\rho}{d\rho} + \sigma_\rho \left( 1 + \frac{\rho ds}{s d\rho} \right) - \sigma_\theta = 0 \quad (4)$$

Из совместного решения уравнений (3) и (4) с использованием условия пластичности Мизеса для плоского напряженного состояния

$$\sigma_\rho^2 - \sigma_\rho \sigma_\theta + \sigma_\theta^2 = \sigma_s^2 \quad (5)$$

следует

$$\rho \frac{d\sigma_\rho}{d\rho} + \frac{2\sigma_s^2}{\sigma_\rho - 2\sigma_\theta} = 0 \quad (6)$$

Уравнение (6) можно интегрировать в частных случаях ( $\sigma_s = \text{const}$ ) и выразить зависимость меридионального напряжения от координаты в виде неявной функции. Попытки интегрировать уравнение (6) с учетом деформационного упрочнения, связаны с принятием дальнейших упрощающих допущений, основным из которых является принятие постоянства толщины деформируемого материала. Такое допущение равносильно утверждению, что пластическое формоизменение листового металла происходит в условиях плоской деформации, что в принципе, исключает возможность решения задач, в которых реализуется пластическое плоское напряженное состояние.

Из условия постоянства объема (2) следует, что приращения деформаций взаимосвязаны и могут быть представлены в двумерной системе координат на плоскости. В качестве такой плоскости рассмотрим  $\pi$ -плоскость цилиндра пластичности, где начало координат соответствует состоянию заготовки до деформирования, а геометрическое место точек, соответствующих последовательным деформированным состояниям, представляет собой путь деформации. При этом радиальные пути деформаций соответствуют пропорциональному изменению главных деформаций во времени. В общем случае текущие конечные деформации представляют собой проекции вектор-функции  $\bar{\varepsilon}_i$  на координатные оси, а путь деформации описывается вектор-функцией  $\bar{\varepsilon}_i(\rho)$  ( $\rho$  – некоторый параметр времени), скорости деформации  $d\bar{\varepsilon}_i/d\rho$  совпадают с касательной к пути деформации.

Модуль текущей величины  $d\varepsilon_i$  численно равен интенсивности приращений деформаций [2].

$$|d\bar{\varepsilon}_i| = d\varepsilon_i = \frac{2}{\sqrt{3}} \sqrt{d\varepsilon_\rho^2 + d\varepsilon_\rho d\varepsilon_\theta + d\varepsilon_\theta^2} \quad (7)$$

Приращения главных деформаций могут быть представлены в тригонометрической форме, удовлетворяющей условиям (2) и (7)

$$d\varepsilon_\rho = d\varepsilon_i \cos \varphi; d\varepsilon_\theta = d\varepsilon_i \cos(\varphi + 2\pi/3); d\varepsilon_z = d\varepsilon_i \cos(\varphi + 4\pi/3) \quad (8)$$

где  $\varphi$  представляет собой угол вида деформированного состояния и может меняться в пределах  $0 \leq \varphi \leq 2\pi$ .

Из совместного решения (1), (2) и (8) устанавливаются зависимости меридиональных и окружных напряжений от угла вида деформированного состояния.

$$\sigma_\rho = \sigma_s \frac{2}{\sqrt{3}} \cos(\varphi + \pi/6); \sigma_\theta = -\sigma_s \frac{2}{\sqrt{3}} \sin \varphi \quad (9)$$

удовлетворяющие условию пластичности Мизеса (5).

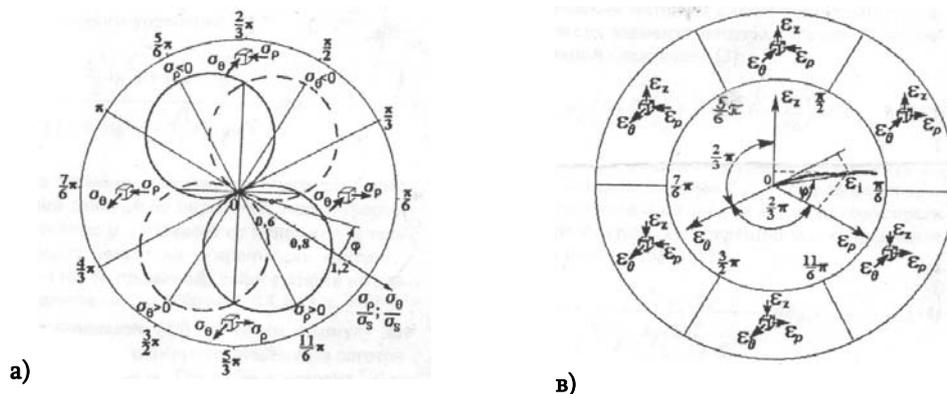
Зависимости (10) представляют собой окружности радиусом  $\sigma_s/\sqrt{3}$ , центры которых находятся на линиях  $\varepsilon_\rho = 0$ ,  $\varepsilon_\theta = 0$  и проходят через начало координат. С учетом зависимостей (9) и условий (3), (8) уравнение равновесия (6) можно преобразовать и представить на  $\pi$ -плоскости в достаточно простой форме:

$$d\sigma_\rho = \sigma_s d\varepsilon_i \quad (10)$$

Таким образом, система уравнений, характеризующих пластическое формоизменение осесимметричных тонкостенных оболочек, отображается на  $\pi$ -плоскости в виде линейной зависимости между скоростями изменения меридионального напряжения и интенсивности деформаций. Коэффициентом пропорциональности в (10) является истинное напряжение текучести деформируемого материала, которое в условиях холодной деформации удобно представить в виде степенной зависимости от величины накопления деформации

$$\sigma_s = A\varepsilon_i^n \quad (11)$$

На фиг.3 представлены взаимосвязанные напряженные (а) и деформированные (в) состояния осесимметричной оболочки, которые в принципе возможно реализовать при плоском напряженном состоянии [2].



Фиг. 3

Для облегчения интерпретации полученных результатов начало отсчета совмещено с осью  $\varepsilon_\rho$ , а увеличение угла  $\varphi$  принято против часовой стрелки. При изменении  $0 \leq \varphi \leq 2\pi$  радиальные лучи делят  $\pi$ -плоскость на 12 секторов с центральными углами, равными  $\pi/6$ .

Если путь деформации совпадает с осью  $\varepsilon_\rho$ , то  $\varepsilon_\rho$  – деформация растяжения (положительная), а  $\varepsilon_\theta$  и  $\varepsilon_z$  – деформации сжатия (отрицательные), численно равные  $\varepsilon_\rho/2$ , поэтому деформированное состояние такое же, как в образце, испытываемом на растяжение вдоль оси  $\varepsilon_\rho$ . Этот тип деформации можно назвать чистым растяжением. Если путь деформации противоположен по направлению оси  $\varepsilon_\rho$  ( $\varphi = \pi$ ), то деформация изменяет знак на обратный и соответствует чистому сжатию, поскольку в этом случае  $\varepsilon_\theta$  и  $\varepsilon_z$  – деформации растяжения (положительные), численно равные  $\varepsilon_\rho/2$ . Вдоль путей деформации  $\varphi = \pi/6$  и  $\varphi = 7\pi/6$ , компонента деформации  $\varepsilon_z = 0$ , а  $\varepsilon_\rho$  и  $\varepsilon_\theta$  равны по величине и противоположны по знаку, то есть имеет место чистый сдвиг или плоская деформация в плоскости  $\rho, \theta$ . Аналогичные рассуждения допустимы, очевидно, и вдоль осей  $\varepsilon_\theta$  и  $\varepsilon_z$ , а также в обратных и перпендикулярных к ним направлениях. Таким образом, пути деформации с углами -  $\varphi = \pi/6$ ,  $\varphi = \pi/2$ ,  $\varphi = 5\pi/6$ ,  $\varphi = 7\pi/6$ ,  $\varphi = 3\pi/2$  и  $\varphi = 11\pi/6$  соответствуют чистому сдвигу или плоской деформации.

Пути деформации с углами -  $\varphi = 0$ ,  $\varphi = 2\pi/3$  и  $\varphi = 4\pi/3$  соответствуют чистому растяжению, а пути деформации с углами -  $\varphi = \pi/3$ ,  $\varphi = \pi$  и  $\varphi = 5\pi/3$  – чистому сжатию.

При изменении угла вида деформируемого состояния в пределах  $0 \leq \varphi \leq 2\pi$  вектор-функция  $\overline{\varepsilon}_i$  ( $\rho$ ) поочередно становится либо параллельной, либо перпендикулярной к координатным осям  $\varepsilon_\rho$ ,  $\varepsilon_\theta$  и  $\varepsilon_z$ , вследствие чего компоненты деформации по этим осям изменяются в пределах от единицы до нуля.

### Глубокая вытяжка цилиндрических деталей

Легко показать, что все типы деформаций при глубокой вытяжке цилиндрической детали полностью характеризуются лучами, занимающими одну треть системы координат  $5\pi/3 \leq \varphi \leq \pi/3$ , представленной на фиг. 3.

При глубокой вытяжке краевой элемент исходной заготовки деформируется в условиях простого сжатия в окружном направлении ( $\varphi = \pi/3$ ) на всем протяжении процесса формоизменения, а  $\varepsilon_\rho$  и  $\varepsilon_z$  – деформации растяжения,

численно равные  $\varepsilon_\theta/2$ . У торца пуансона, на оси симметрии радиальные и окружные напряжения равны (растягивающие), а путь деформации соответствует направлению  $\varphi = 5\pi/3$ . Область в интервале  $\pi/6 \leq \varphi \leq \pi/3$  соответствует увеличению исходной толщины заготовки, а область  $11\pi/6 \leq \varphi \leq \pi/6$  соответствует уменьшению исходной толщины заготовки. Имеют место два линейных сжатия –  $\varphi = \pi/3$  и  $\varphi = 5\pi/3$  в окружном направлении и по толщине, две плоские деформации –  $\varphi = \pi/6$  и  $\varphi = 11\pi/6$  и одно линейное растяжение –  $\varphi = 0$ . В начальной стадии процесса вытяжки материал испытывает двухосное растяжение в плоскости  $\rho, \theta$ , в результате чего в направлении  $\varphi = 5\pi/3$  наблюдается равномерное утонение.

В некоторых элементах фланца радиальное растягивающее напряжение становится равным по величине окружному сжимающему напряжению, в результате чего происходит чистый сдвиг или плоская деформация в плоскости  $\rho, \theta$  ( $\varphi = \pi/6$ ). По мере сокращений края фланца разные элементы попадают в зону плоской деформации, поэтому формоизменение заготовки носит явно выраженный немонотонный характер.

По мере увеличения высоты вытягиваемой детали, вследствие наличия пуансона, предотвращающего сокращение в окружном направлении ( $\varepsilon_\theta = 0$ ), пути деформации занимают область  $11\pi/6 \leq \varphi \leq \pi/3$ .

Представление уравнений пластического плоского напряженного состояния на  $\pi$ - плоскости позволяет без дальнейших упрощающих допущений рассматривать задачи деформирования осесимметричных оболочек при взаимосвязанном и самоорганизованном изменении толщины и деформационного упрочнения.

Интегрируя (10) с учетом степенной зависимости истинного напряжения от величины накопленной деформации (11) имеем:

$$\sigma_\rho = \frac{A}{n+1} \varepsilon_i^{n+1} + C \quad (12)$$

где постоянная интегрирования находится из граничного условия, по которому для краевого элемента заготовки  $\varepsilon_i = \varepsilon_{\pi/3}$ ,  $\varphi = \pi/3$  и  $\sigma_\rho = 0$  (краевой элемент деформируется в условиях линейного сжатия на протяжении всего процесса формоизменения).

Приравнивая выражения для меридиональных напряжений (10) и (12), получим:

$$\left| \varepsilon_i^{n+1} - \varepsilon_{\pi/3}^{n+1} \right| = (1+n) \varepsilon_i^n \frac{2}{\sqrt{3}} \cos(\varphi + \pi/6), \quad (13)$$

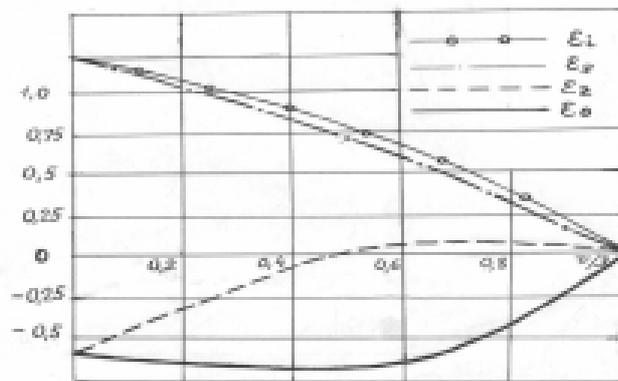
Результаты проведенного анализа позволяют по-новому рассмотреть процесс деформирования фланца при глубокой вытяжке, разделив его на два этапа.

На первом этапе по мере опускания пуансона происходит образование очага пластических деформаций от внутренней границы к внешней, при этом элементы заготовки в радиальном направлении растягиваются. Наибольший размер пластической зоны зависит от параметра деформационного упрочнения и определяется зависимостью:

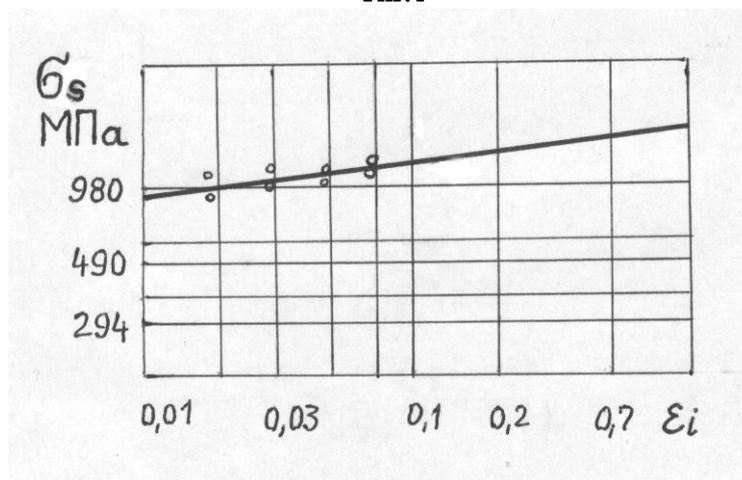
$$\frac{R_0}{r_0} = \exp\left[(1+n)\left(1/4 + \sqrt{3\pi}/9\right)\right] \quad (14)$$

где  $R_0$  и  $r_0$  - соответственно радиусы исходной заготовки и матрицы.

На фиг. 4 представлены графики изменения интенсивности и компонент деформации для первого этапа деформирования ( $\varepsilon_{\pi/3} = 0$ ) при изменении параметра деформированного состояния в диапазоне  $0 \leq \varphi \leq \pi/3$  и  $n=0,2$ .



Фиг.4



Фиг.5

Из этих графиков следует, что на начальном этапе деформирования вблизи внешнего контура образовывается некоторая зона утолщения, свидетельствующая о том, что усилие прижима воспринимается некоторой кольцевой зоной до начала перемещения края фланца.

### Методика и результаты экспериментальных исследований

Эксперименты проводили на листовом молибдене толщиной 0,5 мм и 99,9% химической чистоты, при содержании примесей в массовых долях не более: Al – 0,004, Fe – 0,01, Ni – 0,005, Si – 0,01, C – 0,01, O<sub>2</sub> – 0,008, Ca – 0,005.

Для определения зависимостей истинных напряжений от истинных деформаций, из листового молибдена вырезались образцы размерами 50x5x0,5 мм для испытания на одноосное растяжение [4]. Рассчитывали предел прочности  $\sigma_b$  и полное относительное удлинение  $\delta$ .

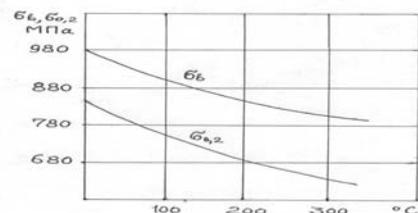
Скорость деформирования во всех испытаниях составляла 0,015 м/сек. По результатам испытаний строилась в логарифмических координатах зависимость  $\sigma_s$  от логарифмической деформации  $\varepsilon_i = l_n F_0 / F$ , где  $F_0$  и  $F$  – начальная и текущая площади поперечного сечения соответственно. Прямолинейный характер графика позволяет аппроксимировать зависимость  $\sigma_s - \varepsilon_i$  степенной функцией (11) (фиг. 5).

Для листового молибдена  $A=1080$  МПа;  $n=0,048$ . Величины  $A$  и  $n$  определены графически следующим образом:  $n$  – угловой коэффициент прямой  $\sigma_s = \sigma_s(\varepsilon_i)$  в логарифмических координатах,  $A$  – значение истинного напряжения при  $\varepsilon_i = 1$  или  $A = \sigma_s$  при  $\varepsilon_i = 1$ .

Механические свойства листового молибдена рассчитывались по известным соотношениям  $\sigma_b = A \cdot n^n \cdot \exp n$  и  $\delta = \exp n - 1$  ( $\sigma_b = 980$  МПа;  $\delta \approx 5\%$ ).

Способность листового молибдена к глубокой вытяжке определяли методом вытяжки цилиндрической детали по величине предельного коэффициента вытяжки  $m = d/D$ , где  $D$  – наибольший диаметр заготовки, не разорвавшейся при испытании,  $d$  – средний диаметр детали после вытяжки.

Листовой молибден при температуре 20 °С, в зависимости от содержания примесей и степени предварительной деформации, может быть как пластичным, так и хрупким. Несмотря на то, что молибден является тугоплавким металлом, его механические свойства существенно изменяются при сравнительно небольшом увеличении температуры [1] (фиг 6).



Фиг. 6



Фиг. 7

В связи с тем, что листовой молибден обладает большой теплопроводностью и малой теплоемкостью, он нагревается и остывает быстрее, чем сталь, поэтому в экспериментах нагревали также матрицу. Эксперименты проводили на штампе с нагревателем и регулируемым прижимом при разных скоростях деформирования. Усилие прижима создавалось посредством резинового буфера, который был вынесен из зоны нагрева. Регулированием удельного усилия прижима в пределах  $4 \div 6$  МПа предотвращали образование гофр. Исследовали влияние дифференциального нагрева на предельный коэффициент вытяжки за счет теплопередачи от матрицы к периферийной части фланца и охлаждения пуансона. Установлено, что увеличение степени формоизменения достигается вследствие снижения сопротивления деформированию фланца при сохранении исходной прочности в опасном сечении [5]. Испытания на вытяжку проводили на универсальной испытательной машине усилием 350 КН с возможностью регулирования скорости деформирования в диапазоне 0,002-0,015 м/сек. Стабильно качественные детали получали при  $m=0,6$  и диаметре матрицы 40 мм (фиг.7). Наиболее эффективными смазками при глубокой вытяжке листового молибдена с нагревом до 350 °С являются водные графитовые препараты.



Фиг.8



Фиг. 9

Эти препараты наносили на нагретую заготовку. Смазка быстро высыхала и оставляла сухую тонкую пленку графита, которая удерживалась на заготовке в процессе вытяжки.

Контур оптимальной заготовки для вытяжки контейнеров определяли экспериментальным методом последовательных приближений до получения изделия одинаковой высоты по периметру при исключении возможности перенапряжения в опасном сечении. На фиг. 8 показан контейнер в форме лодочки размерами 100x215x45мм, полученный глубокой вытяжкой из листового молибдена толщиной 0,5мм с коэффициентом вытяжки в угловых участках  $m=0,5$

при угловом радиусе 30мм. На фиг. 9 показан контейнер с выращенным монокристаллом лейкосапфира.

#### **Выводы:**

1. Разработан новый аналитический метод исследования напряженно-деформированного состояния при формоизменении осесимметричных тонкостенных оболочек, основанный на анализе путей деформаций в  $\pi$  - плоскости цилиндра пластичности.
2. Показана возможность теоретического анализа немонотонных процессов деформирования при взаимосвязанном и самоорганизованном изменении толщины и деформационного упрочнения.
3. Установлено, что пути деформации при формоизменении осесимметричных тонкостенных оболочек в общем случае являются криволинейными и могут оставаться прямыми только для краевых элементов, свободных от действия меридиональных напряжений.
4. Установлено, что величины компонент деформаций, обычно измеряемые при испытаниях листового металла в одноосном либо двухосном напряженных состояниях, представляют собой в  $\pi$  - плоскости проекции некоторой вектор-функции (эффективной деформации) и не могут служить характеристиками штампуемости листового металла.
5. Установлено, что для увеличения допустимых степеней деформации и стабилизации качества изделий вытянутых из листового молибдена целесообразно применение дифференциального нагрева.

#### **ЛИТЕРАТУРА**

1. Багдасаров Х.С. Высокотемпературная кристаллизация из расплава. М.: Физматлит. 2004.160 с.
2. Назарян Э.А., Константинов В.Ф. Кинематика деформирования в формоизменяющих операциях листовой штамповки.// Вестник Машиностроения. 1999. № 2. С. 35-41.
3. Назарян Э.А., Аракелян М.М. Предельное формоизменение при деформировании осесимметричных оболочек.// Заготовительные производства в машиностроении. 2004 .№ 5. С. 24-27.
4. Назарян Э.А., Аракелян М.М. О технологических свойствах листового молибдена.// Изв. НАН РА и Государственного Инженерного Университета Армении, сер. техн. наук, 2003. Т. LVI. № 1.С. 36-39.
5. Назарян Э.А., Аракелян М.М. Способ изготовления контейнеров для выращивания монокристаллов. Патент Республики Армения. № 1502A2 от 26.01.2004.

Академия Проблем Качества РА  
Ереванский Государственный Университет

Поступила в редакцию  
22.03.2006