

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ  
ФЕДЕРАЦИИ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО  
ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«ДОНСКОЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Факультет Технологии машиностроения  
Кафедра Технологии формоизменения и художественная обработка материалов

ТЕОРИЯ ОБРАБОТКИ МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ

Методические указания  
к практическим работам  
(часть 1)

Ростов- на - Дону  
ДГТУ  
2022

УДК 621.7.01

Составители: Е.А. Ефремова, А.С. Пасхалов, И.А. Церна

В методических указаниях приведены сведения о содержании лабораторных работ по дисциплине «Теория обработки металлов давлением», требования, предъявляемые к их оформлению и список рекомендуемой литературы.

Методические указания предназначены главным образом для бакалавров всех форм обучения направления 15.03.01 «Машиностроение» (ОПОП «Информационные технологии обработки металлов давлением»), а также магистрантов направления 15.04.02 «Технологические машины и оборудование».

УДК 621.7.01

Печатается по решению редакционно-издательского совета  
Донского государственного технического университета

Научный редактор доктор техн. наук, профессор А.В. Вовченко

Ответственный за выпуск зав. кафедрой «Технологии  
формообразования и художественная обработка материалов»  
канд. техн. наук, доцент Г.В. Чумаченко

---

В печать \_\_\_\_\_.\_\_\_\_.20\_\_\_\_ г.  
Формат 60×84/16. Объем \_\_\_\_ усл.п.л.  
Тираж \_\_\_\_ экз. Заказ № \_\_\_\_.

---

Издательский центр ДГТУ  
Адрес университета и полиграфического предприятия:  
344000, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1

© Донской государственный  
технический университет, 2022

## Введение

Сущность метода линий скольжения заключается в построении сеток линий скольжения в пластических областях деформируемого тела. Линии скольжения — это естественный рисунок, который появляется на поверхности заготовки при ее растяжении. Такой реальный рисунок называется линиями Чернова-Людерса.

Эти линии - следы сдвиговых деформаций. Они совпадают с траекториями действия максимальных главных касательных напряжений. Из этого вытекают четыре их основных свойства:

- линии скольжения непрерывны;
- линии скольжения образуют два семейства, как угодно густо покрывающие очаг деформации;
- линии скольжения одного семейства ортогональны линиям скольжения другого семейства;
- линии скольжения пересекают траектории главных нормальных напряжений под углом  $\pi/4$ .

Поле линий скольжения можно построить, аналитически используя приближенные методы построения линий скольжения при помощи численного интегрирования уравнений характеристик. Такое решение возможно только для небольшого класса задач. Можно построить численно с использованием функций Бесселя. Такое решение используется для задач внедрения пуансона в пластину, волочение листа через клиновидную матрицу, выдавливание в клиновую полость.

В основном, большинство задач объемной штамповки решаются с использованием графических методов построения сетки линий скольжения.

При анализе формоизменения задача заключается в том, чтобы определить положение в рассматриваемом сечении тела точек контакта жестких зон. Эти точки являются точками раздела течения металла. В сечении такая точка может быть только одна, в которой равны все компоненты тензора напряжений, определяемые по обеим сеткам линий скольжения, расположенным по обе стороны от этой точки. В этой точке должны быть равны гидростатические давления двух построенных полей.

## Практическая работа № 1

1.1. Тема: Решение задач ОМД методом линий скольжения.

1.2. Цель работы: изучить методику решение задач ОМД методом линий скольжения.

### 1.3. Методика графического построения поля линии скольжения

#### 1.3.1. Графическое построение поля линий скольжения

Перед построением поля линий скольжения для задачи осадки полосы бесконечной длины шириной « $L$ » и высотой « $h$ » шероховатыми плитами (см. рис 1.1) необходимо задать граничные условия в виде соотношений между нормальными и касательными напряжениями на контактных поверхностях деформирующего инструмента и заготовки.

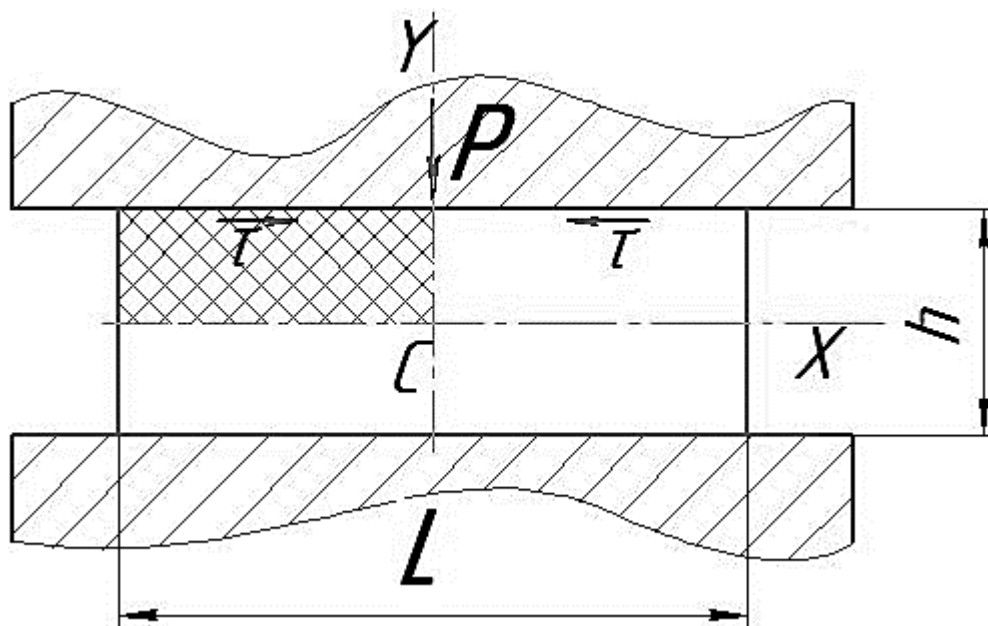


Рисунок 1.1 – Схема осадки полосы бесконечной длины шириной « $L$ » и высотой « $h$ » шероховатыми плитами

Для графического построения поля линий в рассматриваемой задаче принимаем коэффициент трения на контактной поверхности равным  $\mu = 0,5$  (см. рис 1.1), следовательно, касательные напряжения « $\tau$ » являются максимальными.

Задача рассматривается в плоскости  $XOY$ . Так как полоса в направлении третьей оси имеет значительный размер, принимаем, что деформация в направлении оси  $Z$  равна нулю.

Весь процесс построения будем разбивать на несколько шагов.

Первым шагом (см. рис.1.2) является выделение  $1/4$  сечения полосы с центром в точке  $D$  (заштрихованная часть рис 1.1.) и определения всех граничных условий.

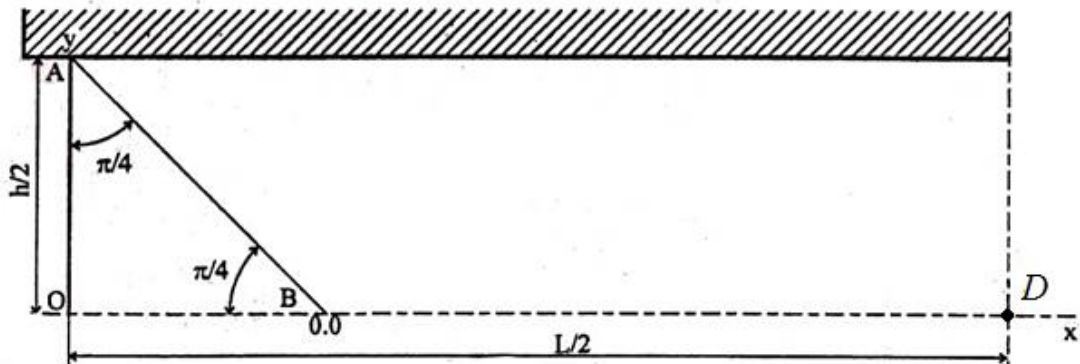


Рисунок 1.2 – Схема первого шага построения поля линий скольжения для осадки полосы бесконечной длины шириной « $L$ » и высотой « $h$ » шероховатыми плитами

Так как боковая поверхность является свободной, то линии скольжения к ней подходят под углом  $45^\circ$ . На оси ставим точку  $(0.0)$ . Полученный треугольник  $AOB$  является полем однородного напряженного состояния.

На втором шаге (см. рис.1.3.) проведем из точки  $A$  радиусом  $AB$  дугу окружности до пересечения с контактной поверхностью штампа в точке  $C$ . Полученная часть окружности « $A - B - C$ » называется центрированным веером.

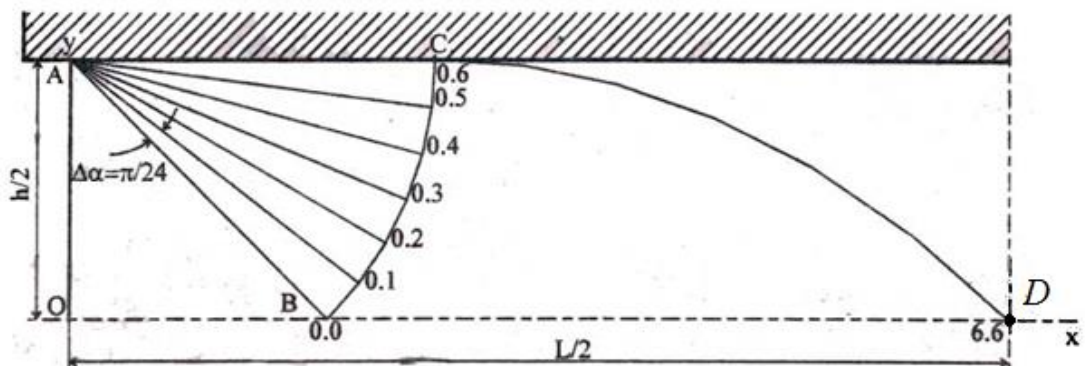


Рисунок 1.3 – Схема второго шага построения поля линий скольжения для осадки полосы бесконечной длины шириной « $L$ » и высотой « $h$ » шероховатыми плитами

Построенный сектор делим на отдельные сектора с шагом  $\Delta\alpha = \pi/24$ . Заменяем дуги прямыми линиями и присваиваем индексы: 0.0-0.1; 0.1-0.2; 0.2-0.3; 0.3-0.4; 0.4-0.5; 0.5-0.6 (см. рис. 1.3).

На третьем шаге (см. рис. 1.4) начинаем построение сетки линий скольжения путем проведения линий, перпендикулярных к начальным линиям. Для этого опускаем перпендикуляр к отрезку 0.0-0.1, проводим линию до пересечения с осью симметрии. Получаем треугольник 0.0- 0.1 - 1.1.

Аналогичные построения делаем, проведя перпендикуляры к отрезкам: 0.1-0.2; 0.2-0.3; 0.3-0.4; 0.4-0.5; 0.5-0.6.

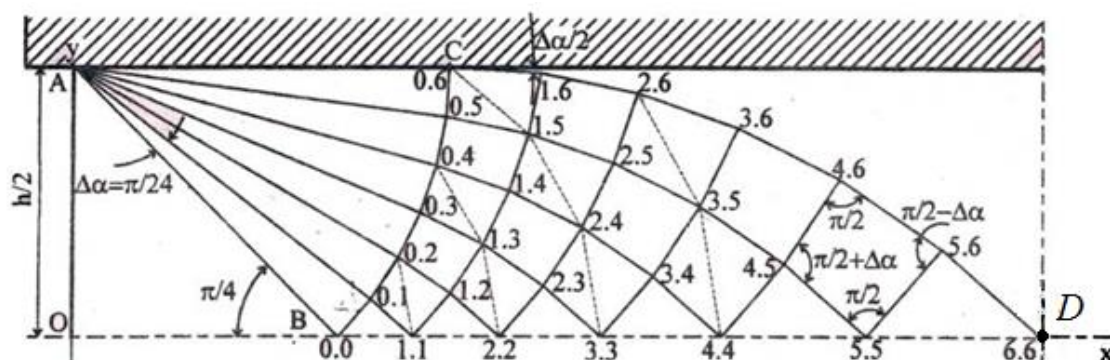


Рисунок 1.4 – Схема третьего шага построения поля линий скольжения для осадки полосы бесконечной длины шириной «L» и высотой «h» шероховатыми плитами

Для дальнейшего построения сетки линий скольжения проводим перпендикуляр к отрезку 0.1.-1.1 до пересечения с линией выходящей из точки 0.2. (см. рис. 1.4). Получаем четырехугольник, имеющий по два прямых угла ( $\pi/2$ ) и два угла, равных соответственно ( $\pi/2 + \Delta\alpha$ ) и ( $\pi/2 - \Delta\alpha$ ). Остальное построение делаем аналогично приведенной методики.

К горизонтальной оси симметрии ОХ линии скольжения подходят под углами ( $\pi/2 + \Delta\alpha/2$ ) и ( $\pi/2 - \Delta\alpha/2$ ), т.е. при графическом построении ячеек сетки линий скольжения вносится погрешность, зависящая от угла  $\Delta\alpha$ .

При построении все узловые точки полученных ячеек обозначаются двумя цифрами, соответствующими пересекающимся линиям скольжения. Причем точке «В» присваивается индекс 0.0. (см. рис. 1.1 - рис.1.4.).

Построенная сетка состоит из двух семейств линий скольжения  $\alpha$  и  $\beta$ . Построение поля заканчивается выходом одной из линий на ось симметрии в точке 6.6. Размер поля линий скольжения зависит от геометрических параметров процесса. Согласно принятым граничным условиям одна из линий скольжения ( $\alpha$ ) пересекает контактную поверхность под углом  $\pi/2$ , а другая ( $\beta$ ) является касательной. Угол между этими двумя линиями будет равен  $\pi/2$ .

Построенное поле линий скольжения состоит из двух областей: абсолютно жесткой и пластической. Границей этих областей является ломанная линия 0.6-1.6-2.6-3.6-4.6-5.6-6.6. Сетка покрывает всю пластическую область.

#### **1.4. Методика графического построения годографа скоростей, основанных на свойствах линий скольжения.**

Годограф скоростей (план скоростей) строится после построения поля линий скольжения в физической плоскости.

Построение годографа начинается с выбора полюса векторов скоростей в точке  $O_1$ , из которого проводим вертикальную линию  $O_1A'$  равную скорости перемещения инструмента в выбранном масштабе. Для проверки правильности построения точку  $O_1$  располагаем под полем линий скольжения точно под точкой  $O'$ . Откладываем отрезок  $O_1A$  равный высоте полосы  $h$ . Из точки  $A'$  и точки  $O_1$  проводим линию параллельную 5.6-6.6 и ей перпендикулярную, получаем треугольник  $A'-6'.6'-O^1$ . Далее радиусом  $A'-6'.6'$  проводим дугу окружности и делим построенный сектор на отдельные сектора с шагом  $\Delta\alpha = \pi/24$ . Количество точек на дуге должно соответствовать количеству точек, расположенных на линии разграничивающей пластическую и жесткую зоны, построенного поля линий скольжения (см рис.1.5).

Скорость вдоль линии  $(6'.6'-O'.6')$  отображает скорость перемещения точек, расположенных на линии  $(0.6-6.6)$  в физической плоскости. Дальнейшее построение на годографе производим аналогично построению поля линий

скольжения в физической плоскости поскольку сетка годографа является ортогональной сетке поля линий скольжения.

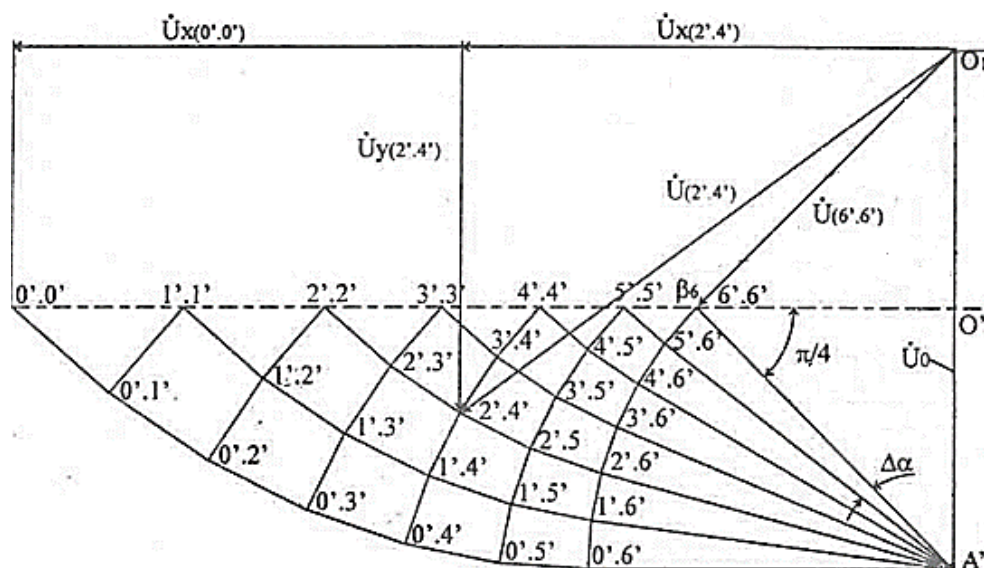


Рисунок 1.4 – Схема построения годографа скоростей скольжения для осадки полосы бесконечной длины шириной «L» и высотой «h» шероховатыми плитами

Линия, ограничивающая годограф ( $A'-O'.6'-O'.O'$ ), является отображением точек, лежащих на дуге окружности центрированного веера, построенного поля линий скольжения.

Луч, проведенный из полюса  $O_1$  к любой узловой точке годографа, например,  $(2'.4')$ , является вектором скорости смещения точки  $(2\ 4)$  поля линий скольжения. Вертикальные и горизонтальные компоненты составляющих скорости точки  $(2-4)$  определяются векторами, приведенными на рисунке 1.5.

### 1.5. Методика расчета напряжений и построения эпюр их распределения

После построения сетки поля линий скольжения, компоненты напряжений в узловых точках можно определить по индексам этих точек и углу  $\Delta\alpha$  на который разбивался сектор построенного поля линий (в нашем случае  $\Delta\alpha = \pi/24$ ).

Нормальные ( $\sigma_x$  и  $\sigma_y$ ) и касательные ( $\tau_{xy}$ ) напряжения можно определить по формулам:

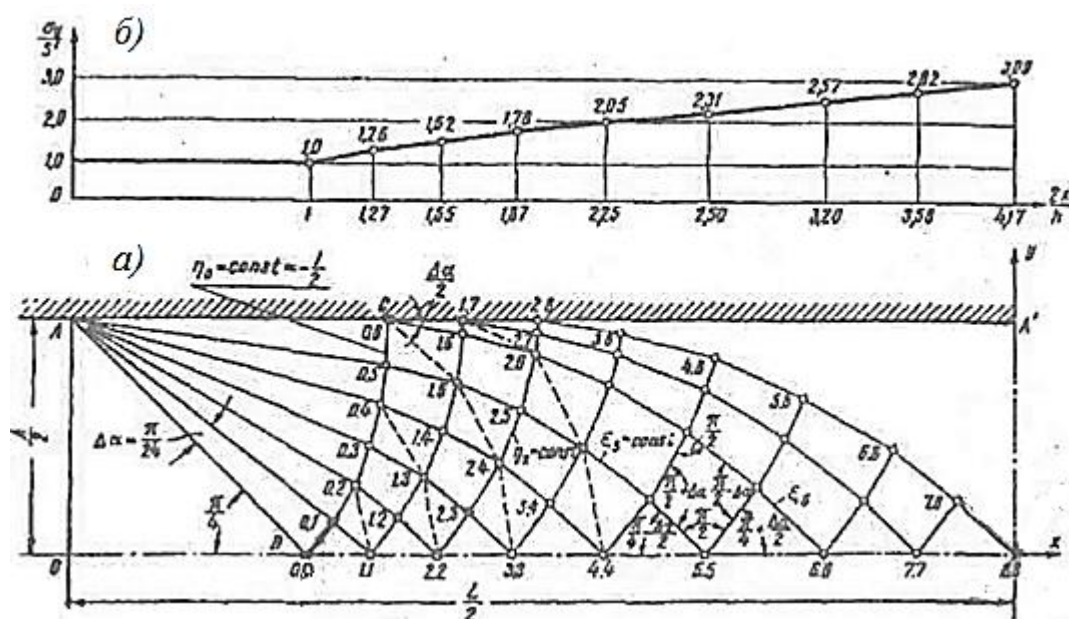
$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \end{Bmatrix} = 0,5 \times S' \{ -1 - (l + k) \times 2 \times \Delta\alpha \pm \cos[(l - k) \times 2 \times \Delta\alpha] \}$$



$$S' = 2K = \frac{2 \times \sigma_s}{\sqrt{3}};$$

$K$  - пластическая постоянная пластичности деформируемого материала;

По результатам расчета напряжений строим эпюры напряжений. Пример построения эпюры нормальных напряжений  $\sigma_y$  для точек, расположенных на оси симметрии заготовки приведен на рисунке 1.5.б.



Пример расчета нормальных напряжений в точке с индексами 2.5 приведен далее:

$$\begin{aligned}\sigma_x &= 0,5 \times S' \{-1 - (2+5) \times 2 \times \pi/24 + \cos[(2-5) \times 2 \times \pi/24]\} = \\ &= 0,5 \times S' \{-1 - 7 \times 2 \times \pi/24 + \cos[-3 \times 2 \times \pi/24]\} = \\ &= 0,5 \times S' \{-1 - (7/12)\pi + \cos(-\pi/4)\} = -1,06 S' \\ \sigma_y &= 0,5 \times S' \{-1 - (2+5) \times 2 \times \pi/24 - \cos[(2-5) \times 2 \times \pi/24]\} = \\ &= 0,5 \times S' \{-1 - 7 \times 2 \times \pi/24 - \cos[-3 \times 2 \times \pi/24]\} = \\ &= 0,5 \times S' \{-1 - (7/12)\pi - \cos(-\pi/4)\} = -1,76 S'\end{aligned}$$

## 1.6. Контрольные задания

1.7.1 Построить графически поле лилий скольжения, годограф скоростей, определить напряжения и построить эпюру нормальных напряжений для задачи для задачи осадки полосы бесконечной длины шириной « $L$ » и высотой « $h$ » шероховатыми плитами. Варианты заданий приведены в таблице 1.1.

Таблица 1.1 - Варианты заданий для задачи осадки полосы бесконечной длины шириной « $L$ » и высотой « $h$ » шероховатыми плитами.

Размеры полосы, мм	Номера вариантов									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$0,5h$	50	40	35	53	40	55	60	50	60	35
$0,5L$	185	150	155	205	165	210	220	200	200	170

## Практическая работа № 2

2.1. Тема: Определение точки раздела течения металла в процессах обработки металлов давлением методом линий скольжения.

2.2. Цель работы: изучить методику определения точки раздела течения металла методом линий скольжения на примере штамповки поковки в открытом штампе

### **1.3. Методика определение точки раздела течения металла в процессах обработки металлов давлением методом линий скольжения.**

Методика определение точки раздела течения металла методом линий скольжения на примере штамповки поковки в открытом штампе. Процесс штамповки поковки в открытом штампе разделяется на три периода. Первый период заключается в осадке заготовки с началом истечения металла в отверстие. Второй период характеризуется течением металла в различных направлениях, в результате чего заполняются углубления полости штампа при одновременном вытеснении части металла в заусенец. Третий период штамповки заключается в вытеснении излишка металла в заусенец.

Рассмотрим вторую стадию штамповки заготовки, когда металл из полости штампа начинает вытекать в два горизонтальных щелевых отверстия из полости в облойную канавку образуя заусенец с одновременным истечением металла в два расположенных симметрично в осевом направлении щелевых отверстия (см. рис.2.1). Следовательно, эта стадия имеет две степени свободы течения, за счет чего образуются две зоны пластической деформации соприкасающихся друг с другом в точке раздела течения.

Согласна приведённого рисунка 1 процесс является симметричным, поэтому для определения точки раздела течения достаточно рассмотреть  $1/4$  часть сечения заготовки в которой делаем построение поля линий скольжения.

Принимаем, что в направлении, перпендикулярном рассматриваемому сечению, деформация отсутствует и сопротивление внешнего трения на боковых

поверхностях щелевых отверстий равно нулю.

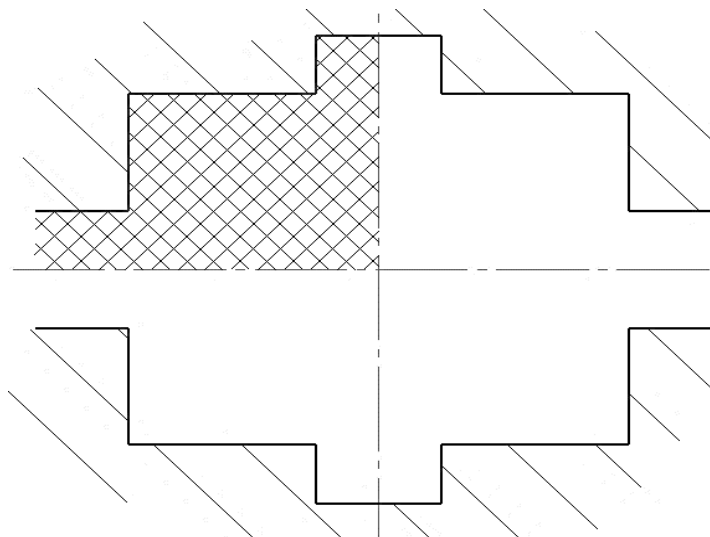


Рисунок 2.1 - Схема процесса объемной штамповки поковки в открытом штампе с использованием элементов выдавливания.

Определим точку контакта жёстких зон (см. рис..2.2.), которая является точкой раздела течения (при  $l=l_3$ ).

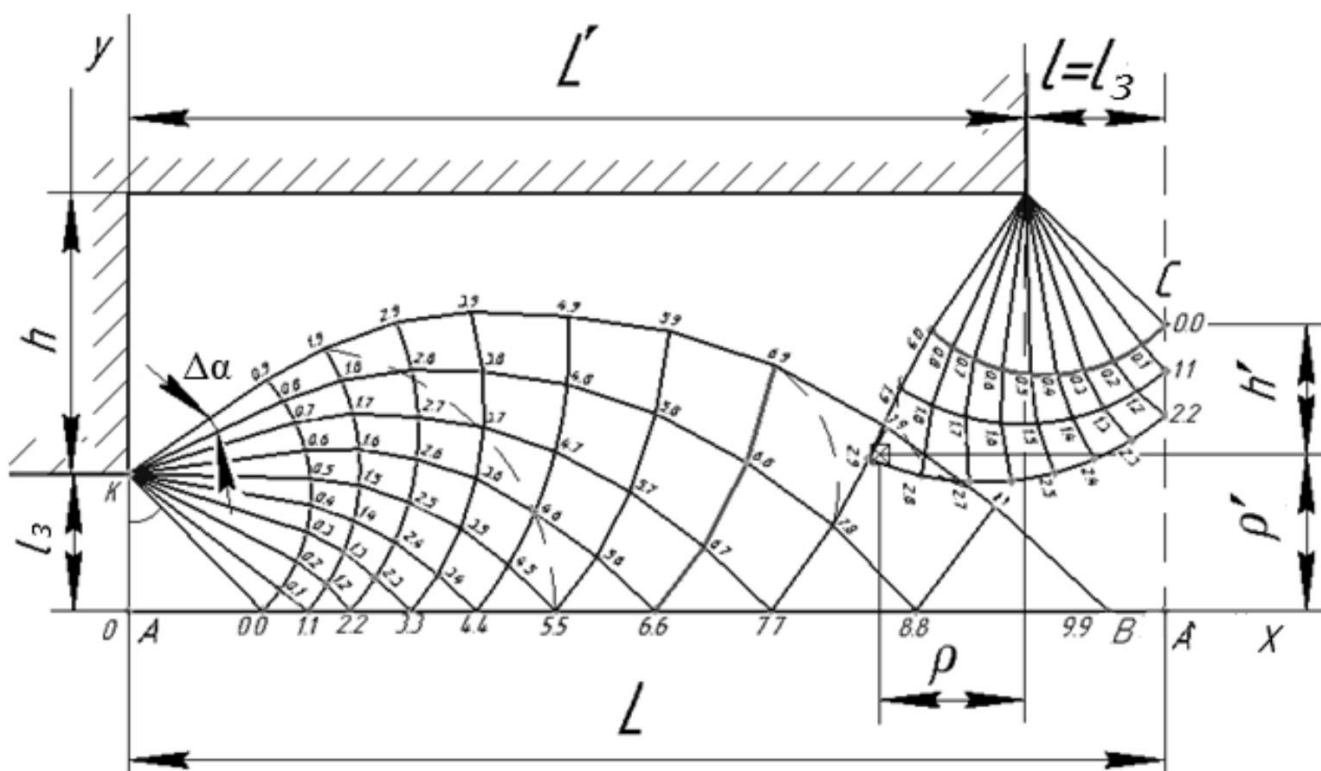


Рисунок 2.2 – Определение точки раздела течения и изобар по построенным полям линий скольжения при объемной штамповке в открытом штампе

Построение поля линий скольжения начинается из двух точек К и М, так как они находятся на границах свободных поверхностей, следовательно, известны граничные условия (см рис. 2.2).

Для определения точки раздела течения В, строим отдельно два поля линий скольжения, MCWBM и KANBK.

На каждой сетке наносим ломаные пунктирные линии, вдоль которых гидростатическое давление постоянно (например: 5.8-4.9; 5.5-4.6-3.7-2.8-1.9) – изобары. Каждая изобара образована диагоналями четырехугольных ячеек построенной сетки и проходит через узловые точки, у которых сумма двух индексов одинакова.

Для двух сеток линий скольжения равенство гидростатических давлений соблюдается только в одной точке, общей для двух сеток линий скольжения, в которой эти поля накладываются друг на друга.

Если при построении координаты двух узловых точек  $a_1$  и  $a_2$  не совпадают в точке В (см. рис. 2.3), то точка раздела определяется по формуле:

$$\rho = \frac{\rho_1 \times \bar{l} + \rho_2}{1 + \bar{l}}$$

где  $\bar{l} = \frac{l}{l_3}$

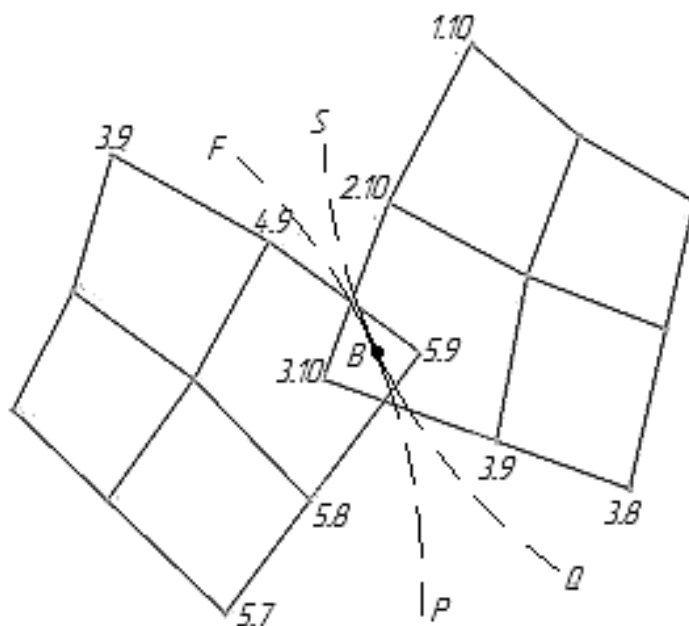


Рисунок 2.3 – Схема к определению точки раздела течения

Возможно допущение погрешности (по построению), когда в точке В сумма индексов, отсчитываемых по каждой из двух сеток, отличается на одну единицу. Например, для изобары SQ проходящей через точку В сумма индексов равна  $3+10=13$ , а для изобары PF эта сумма:  $5+9=14$ .

Погрешности, вносимые построением, уменьшаются с уменьшением угла  $\Delta\alpha$  и увеличением отношения  $l/l_3$ .

Каждая точка раздела течения (при плоской деформации), представляет след прямой линии, перпендикулярной к рассматриваемому сечению тела.

При осесимметричной деформации проекция поверхности раздела течения на плоскость перпендикулярную приложению внешней силы, имеет форму окружности радиуса  $\rho$ .

Передвигая одну из сеток линий скольжения по отношению к другой, можно определить расстояние  $\rho$ , соответствующее различным отношениям  $L/l$  или  $h_n/h_3$ .

#### Список рекомендуемой литературы

1. Качанов Л.М. Основы теории пластичности / Качанов Л.М. М.: Наука, ГРФМЛ, 1969. – 420 с.
2. Томлёнов А.Д. Теория пластического деформирования металлов / Томлёнов А.Д. М.: Металлургия, 1972. – 408 с.
3. Сторожев М.В., Попов Е.А. Теория обработки металлов давлением / М.В. Сторожев, Е.А. Попов. Учебник для вузов. Изд. 4-е, перераб. и доп. М.: Машиностроение. 1977. – 423 с.
4. Стенанский Л.Г. Расчёты процессов обработки металлов давлением / Стенанский Л.Г. М.: Машиностроение, 1979. – 215 с.
5. Шофман Л.А. Основы расчёта процессов штамповки и прессования / Шофман Л.А. М.: Машгиз. 1961. – 340 с.
6. Колмогоров В.Л. Механика процессов обработки металлов давлением / Колмогоров В.Л. Учебник для вузов. М.: Металлургия. 1986. – 688 с.
7. Резников Ю.Н. Инженерная механика твёрдого тела / Резников Ю.Н., Ефремова Е.А., Вовченко А.В.: Учеб. пособие. Ростов-на - Дону: Издательский центр ДГТУ. 1998. - 167с.