



**Негосударственное частное образовательное учреждение
высшего образования
«Технический университет УГМК»**

**МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ
К ВЫПОЛНЕНИЮ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ ПО ДИСЦИПЛИНЕ
ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ**

Направление подготовки

22.03.02 Metallurgy

Профиль подготовки

Metallurgy of non-ferrous metals

Уровень высшего образования

Applied Bachelor

Рассмотрено на заседании кафедры Metallurgy

Одобрено Методическим советом университета 30 июня 2021 г., протокол № 4

г. Верхняя Пышма
2021

Задания и методические указания к выполнению лабораторных работ составлены в соответствии с рабочей программой дисциплины «Обработка металлов давлением».

Код направления и уровня подготовки	Название направления	Реквизиты приказа Министерства образования и науки Российской Федерации об утверждении и вводе в действие ФГОС ВО	
		Дата	Номер приказа
22.03.02	Металлургия	04.12.2015	1427

Автор – разработчик /Дата создания/	Непряхин С.О., к.т.н.	
Заведующий кафедрой «Металлургия» /Дата утверждения/	Мастюгин Сергей Аркадьевич, д-р техн. наук, доцент	
Продолжительность дисциплины	108 часов (3 ЗЕ)	
Место проведения	Учебные аудитории Технического университета УГМК	
Цель дисциплины	<p>После завершения дисциплины, обучающиеся будут способны: - анализировать технологические процессы обработки металлов давлением;</p> <p>- проводить расчеты основных технологических параметров;</p> <p>- подбирать оборудование и технологическую схему для производства конкретного типа металлопродукции;</p> <p>- анализировать оптимальность применения рассматриваемой технологии производства в зависимости от критерия оптимальности.</p>	

Лабораторные работы по дисциплине предусмотрены в объеме 16 часов (очная форма обучения) и в объеме 2 часов (заочная форма обучения). Они имеют целью под руководством преподавателя на практике закрепить обучающимся, полученных на лекциях теоретических знаний.

Лабораторные работы для очной формы обучения

Код раздела, темы	Номер лабораторной работы	Тема лабораторной работы	Время на проведение (час.)
2	1	Определение угла захвата при прокатке	2
4	2	Расчет формоизменения металла при прокатке в калибрах простой формы	6
6	3	Расчет силы волочения листа	8
Всего:			16

Лабораторные работы для заочной формы обучения

Код раздела, темы	Номер лабораторной работы	Тема лабораторной работы	Время на проведение (час.)
2	1	Определение угла захвата при прокатке	2
			2

Методика выполнения работ

Лабораторная работа № 1. Тема: Определение угла захвата при прокатке

Тип практического занятия - лабораторная работа в составе группы

Устные вопросы по теме лабораторной работы:

- угол захвата в начальный момент и при установившемся процессе прокатки;
- способы повышения захватывающей способности валков;
- условие устойчивости раската в калибре.

Лабораторная работа:

- выбор основного и вспомогательного оборудования, составление схемы прокатки;
- выбор и подготовка материалов (выбор модельного материала и придание ему необходимой формы и размеров);
- выполнение опытов по прокатке клиновидных образцов начальных размеров на гладкой бочке валков;
- обработка и обобщение полученных результатов лабораторной работы;

- подготовка вывода по работе;
- оформление индивидуального отчета;
- защита отчета.

Результатом успешного выполнения лабораторной работы студентом считается:

- умение экспериментально подтвердить теоретические положения;
- умение выбирать и готовить исходные материалы, выбирать оборудование и составлять схему прокатки;
- умение выполнять работу по определению фактического угла захвата;
- умение обрабатывать и обобщать полученные результаты лабораторной работы, оформлять индивидуальный отчет;
- умение готовить предложения для принятия обоснованного решения.

Лабораторная работа № 2. Тема: Расчет формоизменения при прокатке в калибрах простой формы

Тип практического занятия - лабораторная работа в составе группы

Устные вопросы по теме лабораторной работы:

- классификация калибров;
- влияние технологических параметров на уширение металла.

Лабораторная работа:

- выбор основного и вспомогательного оборудования, составление схемы прокатки;
- выбор и подготовка материалов (выбор модельного материала и придание ему необходимой формы и размеров);
- выполнение опытов по прокатке образцов заданных размеров в сортовых калибрах простой формы;
- обработка и обобщение полученных результатов лабораторной работы;
- подготовка вывода по работе;
- оформление индивидуального отчета;
- защита отчета.

Результатом успешного выполнения лабораторной работы студентом считается:

- умение экспериментально подтвердить теоретические положения;
- умение выбирать и готовить исходные материалы, выбирать оборудование и составлять схему прокатки;
- умение выполнять работу по расчету формоизменения металла (уширение металла);
- умение обрабатывать и обобщать полученные результаты лабораторной работы, оформлять индивидуальный отчет;
- умение готовить предложения для принятия обоснованного решения.

Лабораторная работа № 3. Тема: Расчет силы волочения листа

Тип практического занятия - лабораторная работа в составе группы

Устные вопросы по теме лабораторной работы:

- суть процесса волочения;
- влияние угла наклона волокна на напряженно-деформированное состояние металла в очаге деформации.

Лабораторная работа:

- выбор основного и вспомогательного оборудования, составление маршрутов волочения;
- выбор и подготовка материалов (выбор модельного материала и придание ему необходимой формы и размеров);
- выполнение расчетов маршрутов волочения и определение силы волочения при различных сочетаниях технологических параметров;
- обработка и обобщение полученных результатов лабораторной работы;
- подготовка вывода по работе;
- оформление индивидуального отчета;
- защита отчета.

Результатом успешного выполнения лабораторной работы студентом считается:

- умение экспериментально подтвердить теоретические положения;
- умение выбирать и готовить исходные материалы, выбирать оборудование и составлять маршруты волочения;
- умение выполнять работу по расчету силы волочения листа;
- умение обрабатывать и обобщать полученные результаты лабораторной работы, оформлять индивидуальный отчет;
- умение готовить предложения для принятия обоснованного решения.

Методика проведения лабораторных работ по дисциплине «Обработка металлов давлением»

1. Лабораторная работа №1. Определение угла захвата при прокатке

Общие сведения

Процесс пластической деформации металла между двумя или несколькими вращающимися валками называется прокаткой.

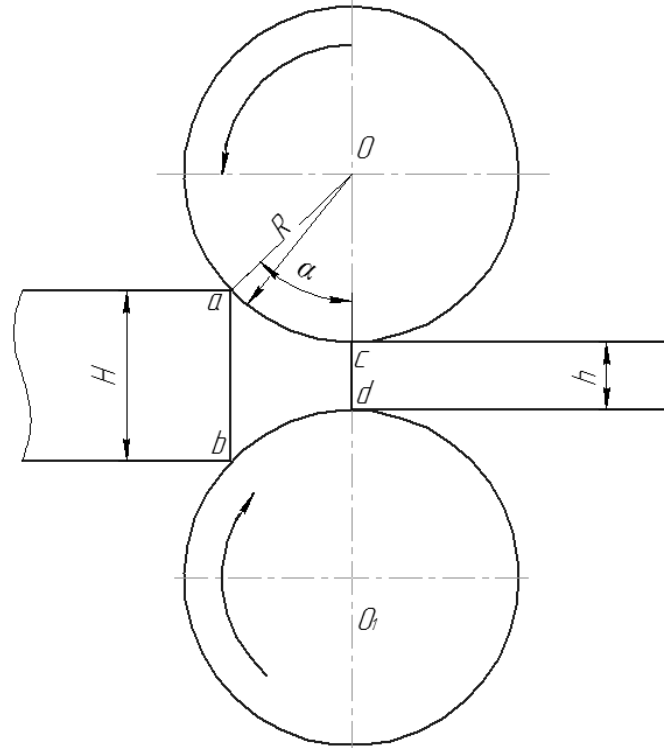


Рисунок 1.1 - Схема очага деформации при прокатке

Дуга ac на схеме (а также дуга bd) называется дугой захвата или дугой контакта. Соответствующий ей центральный угол α называется углом захвата. Часть прокатываемой полосы, которая подвергается пластической деформации, называется очагом деформации. На схеме область полосы, ограниченная сечениями ab , cd и дугами ac и bd называется геометрическим очагом деформации. Сечение ab образует плоскость входа в очаг деформации, а сечение cd - плоскость выхода из очага деформации. Геометрический очаг деформации является идеализацией. Область полосы, которую занимает реальный или физический очаг деформации больше геометрического очага деформации, и её границы заранее неизвестны.

При прокатке величина угла захвата не может увеличиваться бесконечно. Пределы, до которых при данном диаметре валков можно увеличивать обжатие $\Delta h = H - h$, а следовательно и угол захвата α , могут быть установлены в результате рассмотрения равновесия системы сил, действующих со стороны валков на прокатываемую полосу в момент её соприкосновения передним торцом с валками. При этом в точке, положение которой определяется величиной угла захвата α , будут действовать две силы: радиальная

(нормальная) P и сила трения (касательная) T . Обе эти силы могут быть разложены на составляющие P_x , T_x , P_y , T_y по осям X и Y (см. рис.1.2).

Составляющие радиальных и касательных сил, направленные по оси Y , будут вызывать обжатие полосы. Составляющие сил по оси X направлены в разные стороны: составляющая T_x силы трения T будет стремиться втянуть полосу в валки, а составляющая P_x радиальной силы P - вытолкнуть её из валков.

Очевидно, что соотношение между величинами P_x и T_x будет определять возможность или невозможность осуществления захвата полосы валками. При $T_x > P_x$ захват полосы произойдёт. При $T_x = P_x$ будет иметь место равновесие системы: вращающиеся валки не будут ни втягивать полосу в межвалковое пространство, ни отталкивать её от себя.

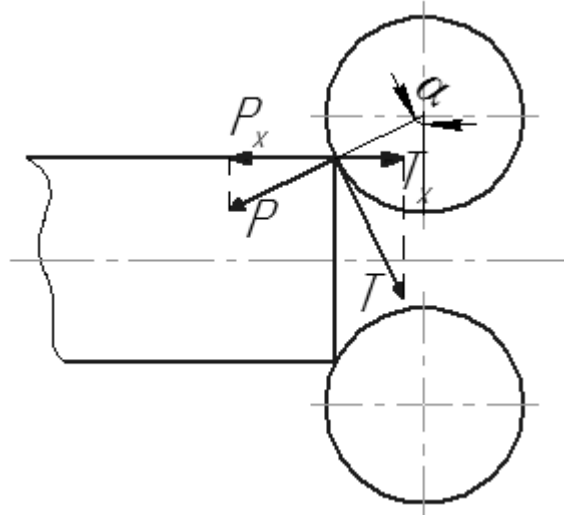


Рисунок 1.2 - Схема сил, действующих на полосу в момент захвата её валками

Запишем уравнения равновесия сил, действующих в направлении оси X : $2T_x = 2P_x$, или $T_x = P_x$; но $T_x = T \cos \alpha$, $P_x = P \sin \alpha$; следовательно, можно записать $T \cos \alpha = P \sin \alpha$.

Вспомним, что по закону Кулона радиальная сила P связана с силой трения T соотношением

$$T = fP,$$

где f - коэффициент трения.

Тогда предыдущее выражение можно записать так

$$fP \cos \alpha = P \sin \alpha \text{ или } \sin \alpha / \cos \alpha = f, \text{ откуда } \operatorname{tg} \alpha = f.$$

Поскольку осуществление захвата полосы валками возможно лишь при условии $T_x > P_x$, то на основании полученных соотношений для этого должно удовлетворяться неравенство $\operatorname{tg} \alpha < f$.

Тангенс угла (в пределах осуществимых при прокатке углов захвата) приблизительно равен значению его угла, выраженному в радианах. Поэтому можно записать

$$\alpha < f. \tag{1.1}$$

При установившемся процессе прокатки, то есть, когда весь очаг деформации заполнен металлом и имеются недеформируемые концы полосы (см. рис.1.1), можно провести аналогичные рассуждения. Если считать, что нормальные напряжения на контактной поверхности полосы с валками распределены равномерно по дуге захвата, то равнодействующая сила P переместится к середине длины очага деформации. Точка её приложения будет определяться уже половиной угла захвата $\alpha/2$. При этом условии установившийся процесс прокатки становится осуществим при условии

$$\alpha/2 < f. \quad (1.2)$$

Таким образом, осуществимость захвата полосы валками и установившегося процесса определяется неравенствами (1.1) и (1.2). Предельными, очевидно, будут соотношения, соответствующие состоянию, при котором $T_x = P_x$. В этом случае начнётся буксование валков по полосе, то есть валки будут вращаться, а полоса будет неподвижной.

Устойчивость полос от сваливания при прокатке в калибрах является одним из факторов, ограничивающих режимы деформации металла. Критерием устойчивости раската в калибре является отношение осей полосы неравноосного сечения a . Для обеспечения устойчивого положения раската в калибре необходимо, чтобы выполнялось условие [1]:

$$[a]_{\min} \leq a \leq [a]_{\max}, \quad (1.3)$$

где $[a]_{\min}$ и $[a]_{\max}$ - минимально и максимально допустимые отношения осей раската.

Выполнение левой части неравенства (1.3) обеспечивает устойчивое положение полосы равноосного сечения в неравноосном калибре (например, квадрата в овальном калибре), а выполнение правой части неравенства гарантирует от сваливания неравноосной полосы в равноосном калибре (например, овала в квадратном калибре).

Значения $[a]_{\min}$ и $[a]_{\max}$ зависят от ряда технологических факторов и рассчитываются по формулам (см. [1, с. 106-113]).

Настоящая работа проводится с целью:

- определение фактического угла захвата и возможность свободного захвата в процессе прокатки;
- проанализировать условия устойчивости при прокатке по различным схемам калибров.

В выводах по работе следует сделать заключение о выполнении условия захвата и условия устойчивости.

Работа выполняется по общему алгоритму, представленному в [1], который описывается ниже.

При расчете заданы тип стана (непрерывный или последовательный), схема прокатки, размеры калибра и прокатываемой в нем полосы до и после прохода ($H_0, B_0, B_{вр0}, B_{д0}, C_0, S_0$ и др. и $H_1, B_1, B_{вр1}, B_{д1}, C_1, S_1$ и др.), температура металла перед прокаткой t , диаметр валков по буртам $D_б$, частота вращения валков n , марка прокатываемой стали, материал и состояние поверхности валков.

Расчет выполняют в следующей последовательности:

1. По известным размерам калибров и полос определяют безразмерные параметры, характеризующие форму очага деформации при прокатке по заданной схеме $1/\eta, A, a_0, a_1, \delta_0$ и др. [1, прил.3].

2. Определяют фактический угол захвата по формуле

$$\alpha = 2 \arcsin \sqrt{(1/\eta - 1)/2A}.$$

3. Для определения среднестатистических и максимально допустимых углов захвата и отношений осей полос рассчитывают:

- а) окружную скорость валков по дну калибра $V_* = \pi D \times n / 60$;

б) дополнительные геометрические параметры: $a_3 = B_0/B_d$ - степень заземления полосы при прокатке в ящичных, шестиугольных и плоских овальных калибрах; R/B_0 - относительная кривизна боковой поверхности овальной полосы, задаваемой в калибр; $\text{tg}\phi_0$ - выпуск предыдущего по ходу прокатки ящичного калибра; r/H_1 - приведенный радиус закругления в вершине калибра; B_0/B_k - относительная ширина полосы, задаваемой в калибр; δ_{B_0} - степень заполнения выпуска предыдущего по ходу прокатки ящичного калибра;

в) задают коэффициенты, характеризующие марку прокатываемой стали и состояние поверхности валков [1, с. 107].

4. Рассчитывают среднестатистические углы захвата $\bar{\alpha}$ и отношения осей полос [1, табл. 3.11, 3.12] и с учетом коэффициентов K_α и K_a определяют максимально допустимые углы захвата и отношения осей полос по формулам:

$$[\alpha] = K_\alpha \bar{\alpha}, \quad [a]_{\max} = K_a \bar{a},$$

где $[\alpha]$, \bar{a} и $[a]_{\max}$ рассчитывают для схем прокатки, указанных в [1, табл. 3.11 и 3.12].

5. Для определения допустимых углов захвата при прокатке прямоугольных и круглых полос на гладкой бочке валков применяют формулу

$$[\alpha] = \text{arctg}[K_1 K_2 K_3 (1,05 - 0,0005t)],$$

где K_1 , K_2 и K_3 - коэффициенты, учитывающие соответственно влияние материала валков, марки прокатываемой стали и скорости прокатки [1, с. 111].

Максимально допустимые отношения осей прямоугольной полосы, прокатываемой на гладких валках, можно принимать равным 2,0-2,2.

6. В случае прокатки квадратной полосы в неравноосном калибре рассчитывают минимально допустимые по условиям устойчивости отношения осей полос $[a]_{\min}$ по формулам, полученным в результате анализа геометрических соотношений в момент захвата:

для шестиугольных и плоских овальных калибров

$$[a]_{\min} = (1 + (1/\eta) / [a_3]) \delta_1,$$

для ящичных калибров

$$[a]_{\min} = (\text{tg}\phi + (1/\eta) / [a_3]) \delta_1,$$

для овальных калибров

$$[a]_{\min} = (1/\eta) \delta_1 / (B_0 / B_k),$$

где допустимое значение (B_0/B_k) и допустимая степень заземления полосы, при которой не происходит сваливания раската в калибре $[a_3]$, определяются по формулам:

для шестиугольного калибра [1, рис. 3.4]

$$[a_3] = 1 / (1 - 2,657r / H_0'),$$

для плоского овального калибра

$$[a_3] = 1 / (1 - 2,833r / H_0')$$

для ящичного калибра

$$[a_3] = 1 / \left(1 - 2 \frac{r}{H_0} \frac{1 - \operatorname{tg} \varphi / 2}{1 + \operatorname{tg} \varphi / 2} \right),$$

для овального калибра

$$\left[\frac{B_0}{B_k} \right] = 0,135 - 0,15\delta_1 + \left[0,28 + \frac{2,2}{A + 10} + (1,862 + 0,0045A) \frac{r}{H_0} \right] \times$$

$$\times \left[1,114 - \frac{0,041}{(\delta_1 - 0,3)^2} \right].$$

7. Проверяют условия захвата и устойчивости:

$$\alpha \leq [\alpha], \quad [a]_{\min} \leq a \leq [a]_{\max}.$$

В отчёте необходимо отметить цели работы, привести эскизы калибров, для которых выполняется расчет; записать условия осуществления захвата полосы валками и устойчивости полосы в калибре. Кратко описать алгоритм расчета для выбранной системы калибров. На основе полученных данных отчёта сделать вывод о возможности захвата полосы валками и об устойчивости раската в калибре.

Таблица 1.1 - Задания для расчета по лабораторной работе № 1

№ Вариан	Система калибров	Размеры калибра и полосы до прохода						Размеры калибра и полосы после прохода						t, °C	Диаметра валков по буртам D _б , мм	Частота вращения валков n, об/мин	Марка стали	Матери ал валков	Состоя ние поверх ности валков
		H ₀	B ₀	B _{вр0}	B _{д0}	C ₀ или R	S ₀	H ₁	B ₁	B _{вр1}	B _{д1}	C ₁ или R	S ₁						
1	Овал-ребровой овал	42,9	94,2	115,3		91,5	2	66,5	52,4	53,2		34,1	2	1100	428	27,3	45	сталь	гладкая
2	Квадрат-овал	47,7	46	47,2		37	4,7	26,5	47,9	50,5		34,5	4,5	1100	325,5	72,8	35ГС	чугун	гладкая
3	Овал-квадрат	17,5	40	37,5		30	4,5	25,1	25	24		19,5	3,6	950	316,4	148,1	10	чугун	гладкая
4	Ящичный- ящичный кв.	103,5	148	162	150		10	73	156	162	150		10	1050	540	109	40X	сталь	гладкая
5	Ромб-квадрат	82,9	121	136			10	82	82,7	100		65	10	1075	540	109	У7	сталь	гладкая
6	Квадрат- шестиугольный	18,8	18	19,1		14,5	3,5	9	20,8	22	15,7		1,9	1020	318,1	308,5	10	чугун	гладкая
7	Ящичный-ромб	84	95	98	84		10	82,9	121	136			10	988	540	109	12ХН3А	сталь	гладкая
8	Овал-круг	9,7	19,7	23,5		18,2	1	12,5					1	1000	319	712,6	12ХН3А	сталь	гладкая
9	Круг-овал	12,5					1	8,2	15,8	17,6		12,7	1	1045	319	868,1	4X13	сталь	гладкая
10	Ящичный- ящичный кв.	87,7	130	146,8	129,7		2	98,1	98,1	108,6	90		2	1150	528	9,8	45	чугун	гладкая
11	Ребровой овал- овал	69,6	55,7	56		31,5	2	32,6	81,1	98,5		87	2	1080	428	25	10	сталь	гладкая
12	Овал-ребровой овал	15	37,3	43,7		40	2	24,9	18,9	19,8		13	2	1200	210	736	Ст3	чугун	гладкая

13	Ящичный кв. - ящичный	98,4	98,4	108,2	88		5	68,1	106,9	117,8	105		5	1000	575	14,8	У7	сталь	гладкая
14	Ящичный кв. - овал	57,7	58	63,3	53		4	33,7	80,7	95,4		84	4	1090	446	60,7	35ГС	сталь	гладкая
15	Овал-ребровой овал	45,7	96	117,7		90,1	2	69,6	55,6	55,7		31,5	2	1030	428	23	4X13	сталь	гладкая

1. Лабораторная работа №2. Расчет формоизменения металла при прокатке в калибрах простой формы

Общие сведения

Теоретические исследования [1] показали, что деформация металла в различных калибрах простой формы имеет общие закономерности, что позволило создать общую методику (единые алгоритмы) расчета формоизменения металла при прокатке по различным системам калибров. Поэтому методика проведения настоящей работы одинакова для всех калибров простой формы.

Лабораторная работа проводится с целью:

- проследить за характером и особенностями формоизменения металла при прокатке по различным системам калибров;
- теоретически определить коэффициенты вытяжки λ , уширения β и степень заполнения калибров δ_1 .

При расчете заданы: размеры равноосных сечений и калибров (см. рис. 3.4 и 3.14 [1]): большего – $C_0, H_0, B_0, B_{д0}, r_0$ и др., меньшего – $C_1, H_1, B_1, B_{д1}, r_1$ и др.; размеры неравноосных калибров (рисунок 2.1) $H_{вр2}, B_{вр2}, B_{д2}, R_2, r_2$ и др.; начальные диаметры валков D_{01} и D_{02} ; температура металла t , марка прокатываемой стали и состояние поверхности валков.

Расчет выполняют в следующей последовательности:

1. Принимают ориентировочно обжатие в неравноосном калибре $1/\eta_2$, после чего рассчитывают высоту неравноосного калибра $H_2 = \frac{H_0}{1/\eta_2}$ и отношение его осей $a_{к2}$ по формулам, полученным в результате преобразования выражений [1, с. 73-74]:

для овального калибра

$$a_{к2} = \sqrt{\frac{4R_2}{H_2} - 1},$$

для плоского овального калибра

при $H_2 < 2R$

$$a_{к2} = \frac{B_{д2}}{H_2} + \sqrt{\frac{4R_2}{H_2} - 1},$$

при $H_2 = 2R$

$$a_{к2} = \frac{B_{д2}}{H_2} + \frac{2R_2}{H_2},$$

для шестиугольного калибра

$$a_{к2} = 1 + \frac{B_{д2}}{H_2},$$

для ромбического калибра

$$a_{к2} = \frac{\text{tg } \beta}{2},$$

для ящичного калибра

$$a_{к2} = \frac{B_{д2}}{H_2} + \text{tg } \phi_2,$$

где R_2 - радиус овального или плоского овального калибра; β - угол ромбического калибра; $\text{tg } \phi_2$ - выпуск ящичного калибра.

Затем находят в неравноосном калибре приведенный диаметр валков $A = \frac{D_{02}}{H_2} - 1$, коэффициент уширения β_2 по формуле (3.24) [1, с. 86] и ширину полосы $B_2 = B_0\beta_2$. Если получится,

что $V_2 \leq H_1$ или $H_2 \geq V_1$, то принимают $1/\eta_2' = 1/\eta_2 + 0,05$ и расчет повторяют сначала. Если же значение $1/\eta_2$ будет больше 2 при $V_2 \leq H_1$ или $H_2 \geq V_1$, то в данном случае необходимо соответствующим образом изменить размеры равноосных калибров или неравноосного калибра, так как при заданных условиях решение нельзя найти. Если же получится, что $V_2 > H_1$ или $H_2 < V_1$, то определяет степень заполнения неравноосного калибра $\delta_2 = V_2/(a_{к2}H_2)$ и отношение осей полосы $a_2 = V_2/H_2$. Далее в меньшем равноосном калибре находят коэффициент обжатия $1/\eta_1 = V_2/H_1$, после чего рассчитывают коэффициент уширения β_1 и ширину полосы в этом калибре $V_1' = H_2\beta_1$.

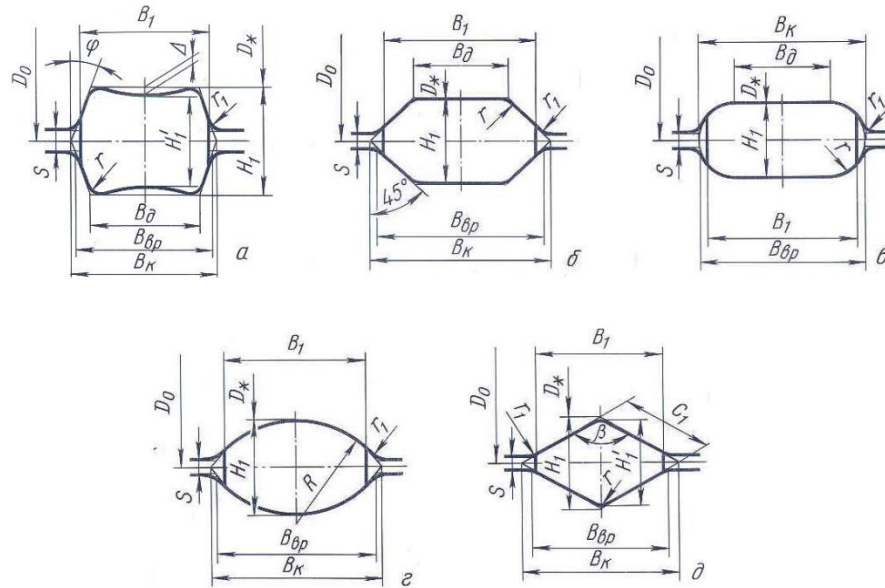


Рисунок 2.1 - Неравноосные калибры:
 а – ящичный; б – шестиугольный; в – плоский овальный;
 г – овальный; д – ромбический

2. Затем определяют относительное отклонение заданной ширины полосы от расчетной

$$\Delta' = \frac{B_1 - B_1'}{B_1} = 1 - \frac{B_1'}{B_1}.$$

Если получится, что $\Delta' < 0,001$, то расчет окончен. В противном случае принимают $1/\eta_2'' = 1/\eta_2' + 0,1$ и повторяют весь расчет вновь, определяя B_2 , V_1'' и Δ'' .

Если при повторном расчете снова получится $\Delta'' > 0,001$, то определяют коэффициент обжатия во 2-м проходе $1/\eta_2^x$ по формуле хорд методом итераций

$$1/\eta_2^x = 1/\eta_2' - \Delta' (1/\eta_2'' - 1/\eta_2') / (\Delta'' - \Delta')$$

и для полученного $1/\eta_2^x$ находят β_2 , V_2 и Δ^x .

Если получится $1/\eta_2^x < 1$, то опять решение не найдено, поэтому необходимо соответствующим образом изменить размеры равноосных калибров или неравноосного калибра.

Если получится, что $|\Delta^x| < 0,001$, то решение найдено и расчеты окончены. Если же $|\Delta^x| > 0,001$, то присваивают полученное значение $1/\eta_2^x = 1/\eta_2$, если $|\Delta'| > |\Delta''|$ или если $|\Delta'| < |\Delta''|$, то $1/\eta_2^x = 1/\eta_2''$, и повторяют расчеты.

В отчёте необходимо отметить цели работы, привести эскизы калибров, для которых выполняется расчет. Кратко описать алгоритм расчета для выбранной системы калибров. На основе полученных данных отчёта сделать вывод о влиянии различных факторов на уширение металла при прокатке.

Таблица 2.1 - Задания для расчета по лабораторной работе №2

№ Варианта	Схема прокатки	Размеры большего равноосного калибра и полосы							Размеры меньшего равноосного калибра и полосы						
		H ₀	B ₀	B _{вр0}	B _{д0}	C ₀ или R	S ₀	r	H ₁	B ₁	B _{вр1}	B _{д1}	C ₁ или R	S ₁	r
1	Круг-овал-круг	12,5	12,5	13,4			1	1	10	10	10,7			1	1
2	Ящичный кв.-овал-ребровой овал	73,7	73,7	81,5	67,2		2	8	69,6	55,6	55,6		31,5	2	7
3	Ребровой овал-овал-ребровой овал	42,4	32,3	33,8		22	4	4	32,5	24,7	25,8		16	4	3
4	Квадрат-ромб-квадрат	82	96	100		65	10	14	64,7	65	76		51,5	10	10
5	Ящичный кв. – ящичный-ящичный кв.	91,5	91,5	101,3	83,4		2	10	69,7	69,7	77	63,5		2	7
6	Ребровой овал-овал-круг	14,3	11,4	11,4		6,5	1	1,5	10		10,7			1	1
7	Круг-овал-круг	17,5	17,5	18,5			2	2	14	14	14,7			2	1
8	Квадрат-овал-квадрат	47,7	46	47,2		37	4,7	5,5	36	35,1	36		27,8	3,3	4
9	Ящичный кв.-овал-ребровой овал	69,7	69,7	77	63,5		2	7	66,5	53,2	53,2		34,1	2	5,5
10	Ребровой овал-овал-ребровой овал	69,6	55,6	55,6		31,5	2	7	52,4	41,8	41,8		23,7	2	5
11	Ребровой овал-овал-ребровой овал	55,4	42,1	44,2		28	4	5	42,4	32,3	33,8		22	4	4
12	Квадрат-овал-квадрат	36	35,1	36		27,8	3,3	4	25,1	25,2	24		19,5	3,6	3
13	Ребровой овал-овал-ребровой овал	66,5	53,2	53,2		34,1	2	5,5	50,6	40,4	40,5		25,9	1,5	4
14	Ящичный кв. – ящичный-ящичный кв.	98,1	98,1	108,6	89,4		2	10	73,7	73,7	81,5	67,2		2	8
15	Ящичный кв.-овал-ребровой овал	57,7	58	63,3	53		4	7	55,4	42,1	44,2		28	4	5

Продолжение таблицы 2.1

№ Варианта	Температура t, °С	Начальный диаметр валков в 1-м проходе D ₀₁ , мм	Начальный диаметр валков во 2-м проходе D ₀₂ , мм	Размеры неравноосного калибра					Марка стали	Материал валков	Состояние поверхност и валков
				H _{вр}	B _{вр}	r	B _д	C или R			
1	1100	320	320	3,6	17,6	1		12,7	45	сталь	гладкая
2	1100	430	430	21,9	117,7	8		90,1	35ГС	чугун	гладкая
3	950	450	450	6,5	43,7	3		40	10	чугун	гладкая
4	1050	530	530	25	110	12		60	40X	сталь	гладкая
5	1075	530	430	31,2	109,2	8	96,8		У7	сталь	гладкая
6	1020	320	320	3,5	19,4	2		15,1	10	чугун	гладкая
7	988	212	212	4,9	24	2		17	12ХН3А	сталь	гладкая
8	1000	330	330	11	50,5	8		34,5	12ХН3А	сталь	гладкая
9	1045	430	430	20,5	115,3	10		91,5	4Х13	сталь	гладкая
10	1150	430	430	15,3	98,5	6		87	45	чугун	гладкая
11	1080	450	450	10,6	75,1	5		71	10	сталь	гладкая
12	1200	320	320	6,5	37,5	5		30	Ст3	чугун	гладкая
13	1000	390	390	14,95	94,2	8		82,7	У7	сталь	гладкая
14	1090	430	430	33,05	117,1	8	103,9		35ГС	сталь	гладкая
15	1030	450	450	14,9	95,4	7		84	4Х13	сталь	гладкая

3. Лабораторная работа № 3. Расчет силы волочения листа

Общие сведения

Для решения технологических задач обработки металлов давлением (ОМД), когда имеет место плоское (или близкое к нему) деформированное состояние, с успехом может быть применен метод линий скольжения. В соответствии с этим методом в области пластической деформации строится сетка линий скольжения и определяется напряженное, а также деформированное состояние. Краевые задачи, которые возникают при построении сетки линий скольжения и расчете напряженного состояния, обычно решаются численным методом.

В настоящей работе рассматривается методика решения задачи волочения полосы, показаны формулы, позволяющие построить сетку линий скольжения и найти силу волочения, давление на волоку, а также показатели напряженного состояния.

Схема процесса волочения полосы показана на рис. 3.1. При протягивании через клиновую волоку с прямыми образующими, которые наклонены к оси волочения под углом δ , полоса испытывает пластическую деформацию; толщина полосы уменьшается с размера h_0 до h_1 ; полоса перемещается со скоростью V_0 до деформации и со скоростью V_1 после деформации.

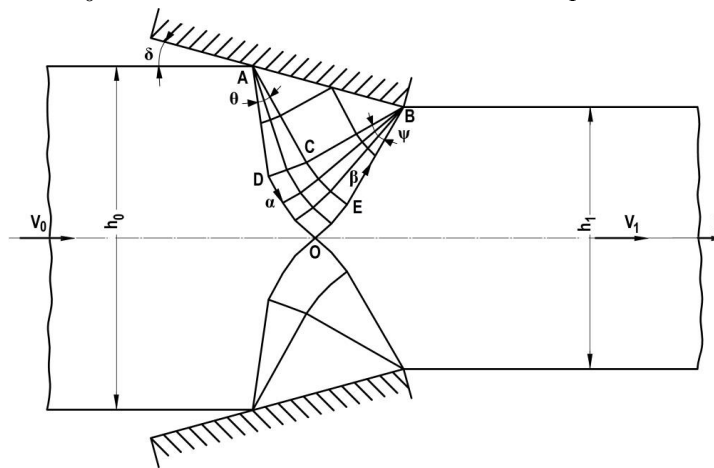


Рисунок 3.1 - Схема волочения полосы

При решении задачи использованы следующие общие и частные допущения: материал идеально пластический и несжимаемый; течение плоское; инструмент абсолютно гладкий (трение на поверхности волоку отсутствует). Кроме того, в решении принято, что вдоль поверхности волоку АВ (рис.3.1) действует однородно распределенное $\sigma_n = const$.

Цель лабораторной работы:

- для заданных значений δ и θ , для каждого сочетания этих параметров построить сетку линий скольжения;
- определить коэффициент вытяжки λ , рассчитать необходимые характеристики напряженного состояния (напряжение волочения, давление на волоку, показатели напряженного состояния σ/T и т.п.);
- по результатам расчета устанавливается зависимость характеристик напряженного состояния от параметров процесса δ и λ .

Ниже приводятся формулы и алгоритм решения задачи в соответствии с указанной схемой.

Расчетные формулы для решения задачи волочения полосы

В качестве исходных величин выбираются углы δ и θ , а также шаговый угол α , в соответствии с которым устанавливаются линии скольжения α и β в центрированных областях ACD и BCE (делятся дуги CD и CE на отдельные участки) и решается задача Римана в области CDOE (рис.3.2). Поскольку $\psi = \theta + \delta$, то угол α должен быть выбран так, чтобы углы δ и θ были кратны ему. При этом следует учесть, что точность расчетов зависит от величины α : чем меньше α , тем выше точность решения задачи Римана конечно-разностным методом. Как показывает

практика решения задач методом линий скольжения, достаточно высокая точность достигается, когда шаговый угол не превышает значения $\pi/30$. Заметим, что в расчетные формулы (в частности, в уравнения Генки) значения углов подставляются в радианной мере.

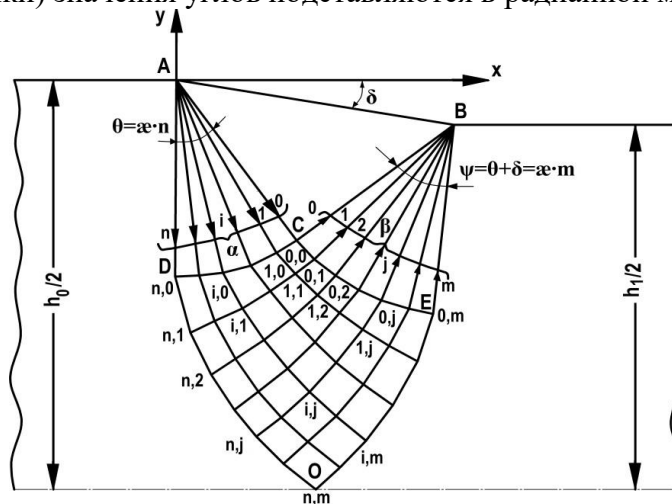


Рисунок 3.2 – Сетка линий скольжения

Для удобства записи расчетных формул используется обычная для метода линий скольжения система обозначений: линии α и β нумеруются (рис.2); координаты узлов сетки, а также физические величины в узлах обозначаются с использованием двух индексов, первый из которых является номером линии α , второй - номером линии β ; для обозначения переменных номеров линий α и β используются соответственно буквы i и j . Если в качестве нулевых линий α и β принять соответственно линии CE и CD, то линия α DO будет иметь максимальный номер

$$n = \theta / \alpha, \quad (1)$$

а линия β EO максимальный номер $m = \psi / \alpha = (\theta + \delta) / \alpha$; легко заметить, что

$$m = n + \delta / \alpha. \quad (1a)$$

Расчет углов φ координат узлов и коэффициента λ

Поскольку положение точки O неизвестно, то начало координат целесообразно поместить в точку A.

Легко видеть, что вдоль линий CD и CE угол φ меняется при переходе от одного узла к другому на величину α . Отсюда очевидны следующие формулы:

$$\text{для CD } \varphi_{i,0} = \varphi_c - \alpha i = -\pi/4 - \delta - \alpha i; \quad (2)$$

$$\text{для CE } \varphi_{0,j} = \varphi_c + \alpha j = -\pi/4 - \delta + \alpha j. \quad (3)$$

Величины i и j в формулах (2) и (3), а также в последующих формулах ограничиваются соответственно значениями n и m .

При расчете φ в узлах области CDOE удобно использовать следующее свойство: при переходе от одной линии скольжения к другой линии того же семейства вдоль любой линии скольжения, второго семейства угол φ меняется на одну и ту же величину. Поэтому для точки (i, j) , расположенной на i -й линии α , можно записать аналогично (3):

$$\varphi_{i,j} = \varphi_{i,0} + \alpha j. \quad (3a)$$

Используя (2), можно окончательно установить

$$\varphi_{i,j} = \varphi_c + \alpha(j-i) = -\pi/4 - \delta + \alpha(j-i). \quad (4)$$

Координаты узлов линии CD легко установить из элементарных геометрических представлений:

$$x_{i,0} = R \cos \varphi_{i,0}, \quad y_{i,0} = R \sin \varphi_{i,0}. \quad (5)$$

При записи этих формул принято обозначение $R = |AC| = |AD| = |CB|$, а также учтено, что $\varphi_{i,0} < 0$ и $y_{i,0} < 0$.

Заметив, что линии β образуют с осью x угол $\varphi + \pi/2$, нетрудно найти координаты узлов линии CE:

$$x_{0,j} = x_B - R \cos(\pi/2 + \varphi_{0,j}), \quad y_{0,j} = y_B - R \sin(\pi/2 + \varphi_{0,j})$$

или окончательно

$$x_{0,j} = x_B + R \sin \varphi_{0,j}, \quad y_{0,j} = y_B - R \cos \varphi_{0,j}. \quad (6)$$

Здесь $x_B = \sqrt{2}R \cos \delta$, $y_B = -\sqrt{2}R \sin \delta$ - координаты точки B.

Для расчета координат в области CDOE необходимо использовать дифференциальные уравнения линий скольжения

$$\frac{dy}{dx} = \operatorname{tg} \phi \quad (\text{для } \alpha), \quad \frac{dy}{dx} = -\operatorname{ctg} \phi \quad (\text{для } \beta).$$

Представив эти уравнения в конечно-разностной форме, можно записать для малого криволинейного четырехугольника $(i-1, j-1) - (i, j-1) - (i, j) - (i-1, j)$:

$$\left. \begin{aligned} \frac{y_{i,j} - y_{i,j-1}}{x_{i,j} - x_{i,j-1}} &= \operatorname{tg} \frac{\varphi_{i,j} + \varphi_{i,j-1}}{2}, \\ \frac{y_{i,j} - y_{i-1,j}}{x_{i,j} - x_{i-1,j}} &= -\operatorname{ctg} \frac{\varphi_{i,j} - \varphi_{i-1,j}}{2} \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

Решая эти уравнения относительно $x_{i,j}$, $y_{i,j}$ и учитывая, что, $\varphi_{i,j-1} = \varphi_{i,j} - \alpha$, $\varphi_{i-1,j} = \varphi_{i,j} + \alpha$ можно записать

$$\left. \begin{aligned} x_{i,j} &= \frac{Bx_{i-1,j} - y_{i-1,j} - Ax_{i,j-1} + y_{i,j-1}}{B-A}, \\ y_{i,j} &= \frac{A(Bx_{i-1,j} - y_{i-1,j}) - B(Ax_{i,j-1} - y_{i,j-1})}{B-A}, \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

где приняты обозначения

$$A = \operatorname{tg}(\varphi_{i,j} - \alpha/2); \quad B = -\operatorname{ctg}(\varphi_{i,j} + \alpha/2). \quad (8, a)$$

Координаты узлов в области CDOE определяются по формулам (8) путем последовательных расчетов, выполняемых вдоль линий скольжения: определив по (5) и (6) координаты узлов на линиях CD и CE и, следовательно, зная координаты точек (1,0) и (0,1), можно с помощью (8) рассчитать координаты точки (1,1); далее, по координатам точек (1,1) и (0,2) рассчитываются с помощью тех же формул координаты точки (1,2) и т.д. вдоль первой линии α ; затем таким же образом устанавливаются координаты узлов вдоль второй линии α и т.д. пока не будет рассмотрена вся область CDOE. Расчет заканчивается отысканием координат точки (n, m) , т.е. точки 0, после чего легко рассчитать коэффициент вытяжки λ :

$$\lambda = h_0 / h_1 = \frac{y_A - y_0}{y_B - y_0},$$

или окончательно

$$\lambda = \frac{y_{n,m}}{y_{n,m} - y_B}. \quad (9)$$

Расчет характеристик напряженного состояния

Для отыскания гидростатического напряжения σ_c необходимо составить граничное условие для поверхности ADO. Напряжения, действующие на ней, показаны на рис.3.3: вдоль линии скольжения ADO действует максимальное касательное напряжение τ_s , а по нормали - гидростатическое напряжение σ (направление τ_s соответствует реакции со стороны мысленно

отброшенной части полосы, препятствующей скольжению материальных частиц вдоль ADO; направление σ соответствует правилу знаков, принятому для напряжений).

В соответствии с методикой численного решения, изложенной в п.1, криволинейные участки линии DO заменяются хордами; гидростатическое напряжение на каждом отрезке принимается постоянным и равным среднему значению. Рассмотрим линию DO и ее произвольный отрезок $(n,j-1-n,j)$ (рис.3.3,б). Усредненное на этом отрезке гидростатическое напряжение $\bar{\sigma}_{n,j} = 1/2(\sigma_{n,j-1} + \sigma_{n,j})$. Согласно уравнению Генки

$$\sigma_D - 2\tau_S \varphi_D = \sigma_{n,j-1} - 2\tau_S \varphi_{n,j-1} = \sigma_{n,j} - 2\tau_S \varphi_{n,j},$$

откуда легко найти $\sigma_{n,j-1}$, $\sigma_{n,j}$ и далее $\bar{\sigma}_{n,j}$:

$$\bar{\sigma}_{n,j} = \sigma_D - 2\tau_S \left(\varphi_D - \frac{\varphi_{n,j-1} + \varphi_{n,j}}{2} \right).$$

В соответствии с (3,а) $\varphi_{n,j} = \varphi_{n,0} + \alpha j$ и $\varphi_{n,j-1} = \varphi_{n,0} + \alpha(j-1)$.

Тогда поскольку $\varphi_{n,0} = \varphi_D$, окончательно будет

$$\bar{\sigma}_{n,j} = \sigma_D + \tau_S \alpha (2j-1). \quad (10)$$

Горизонтальная проекция силы, действующей на рассматриваемом отрезке (напомним, что при плоском течении принято рассматривать силы, приходящиеся на единицу ширины полосы), будет (рис.3,3,б):

$$P_j = -\bar{\sigma}_{n,j} (y_{n,j-1} - y_{n,j}) - \tau_S (x_{n,j} - x_{n,j-1}). \quad (11)$$

Горизонтальная составляющая силы, действующей на DO, определяется как сумма сил, рассчитанных на каждом отрезке:

$$P_{DO} = \sum_{j=1}^m P_j = -\sum_{j=1}^m \bar{\sigma}_{n,j} (y_{n,j-1} - y_{n,j}) - \tau_S \sum_{j=1}^m (x_{n,j} - x_{n,j-1}).$$

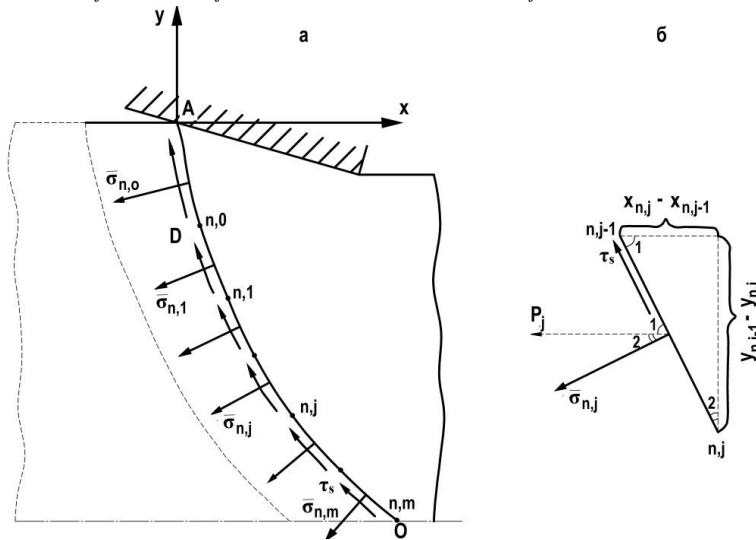


Рисунок 3.3 – Схема к составлению граничного условия

Учитывая (10), а также заметив, что $\sum_{j=1}^m (y_{n,j-1} - y_{n,j}) = y_{n,0} - y_{n,m} = y_D - y_0$

и $\sum_{j=1}^m (x_{n,j} - x_{n,j-1}) = x_{n,m} - x_{n,0} = x_0 - x_D$, можно представить P_{DO} в виде

$$P_{DO} = -\sigma_D (y_D - y_0) - \tau_S (x_0 - x_D) - \tau_S \alpha \sum_{j=1}^m (2j-1) (y_{n,j-1} - y_{n,j}) \quad (12)$$

Вдоль прямой линии скольжения AD гидростатическое напряжение одинаково и равно σ_D . Горизонтальная проекция силы, действующей на AD, определяется аналогично (11):

$$P_{AD} = -\sigma_D(y_A - y_D) - \tau_S(x_D - x_A) = \sigma_D y_D - \tau_S x_D. \quad (13)$$

Теперь нетрудно составить граничное условие для поверхности ADO:

$$P_{ADO} = P_{AD} + P_{DO} = 0.$$

После подстановки (12) и (13) и проведения очевидных преобразований, получится

$$-\sigma_D y_0 + \tau_S x_0 + \tau_S \varkappa \sum_{j=1}^m (2j-1)(y_{n,j-1} - y_{n,j}) = 0. \quad (14)$$

Из (14) легко найти σ_D и далее с помощью уравнений Генки определить гидростатическое напряжение в любой точке сетки линий скольжения. Для расчета напряжения волочения и давления на волоку необходимо определить σ_C . Для линии CD следует $\sigma_C + 2\tau_S \varphi_C = \sigma_D - 2\tau_S \varphi_D$, откуда с учетом (14) нетрудно найти

$$\sigma_C = \tau_S \left\{ \frac{1}{y_0} \left[x_0 + \varkappa \sum_{j=1}^m (2j-1)(y_{n,j-1} - y_{n,j}) \right] - 2\theta \right\}$$

или окончательно

$$\sigma_C = \tau_S \left\{ \frac{1}{y_0} \left[x_0 - \varkappa(y_D - y_0) + 2\varkappa \sum_{j=1}^m j(y_{n,j-1} - y_{n,j}) \right] - 2\theta \right\}. \quad (15)$$

После отыскания σ_C становится возможным расчет характеристик напряженного состояния. Действительно, используя тригонометрические подстановки, можно определить компоненты тензора напряжения в любом узле сетки линий скольжения: также становится возможным расчет силовых условий процесса волочения. В дальнейшем ограничимся определением таких важных для инженерных расчетов величин, как давление на волоку и напряжение волочения. Кроме того, рассмотрим расчет показателя напряженного состояния $k = \frac{\sigma}{T}$ на оси полосы и в приконтактном слое, что позволит установить диапазон изменения этой величины, а также составить представление о схеме напряженного состояния (величина $\frac{\sigma}{T}$ имеет важное значение при выяснении возможности разрушения в процессе пластической деформации).

Определив по (15) σ_C , легко рассчитать нормальное напряжение σ_n , действующее на поверхности волоки (заметим, что в области ABC гидростатическое напряжение σ одинаково и равно σ_C , угол $\gamma = \pi/2 - \delta$, а угол $\varphi = -\pi/4 - \delta$): $\sigma_n = \sigma_C - \tau_S$.

Напряжение σ_n отрицательно (сжимающее напряжение). Для удобства инженерных расчетов под давлением на волоку понимают положительную величину $p_e = |\sigma_n|$. Тогда

$$p_e = |\sigma_C - \tau_S|. \quad (16)$$

Составив условие равновесия $\Sigma X=0$ для протягиваемой полосы (рис.3.4, где p_e - напряжение, действующее со стороны волоки на полосу), нетрудно найти

$$P = 2p_e |AB| \sin \delta,$$

где P- сила волочения; $|AB|$ - длина поверхности волоки. Учитывая, что напряжение волочения

$p = P/h_1$, а также учитывая связи $|AB| \sin \delta = \frac{1}{2}(h_0 - h_1)$ и $\lambda = h_0/h_1$, окончательно можно записать

$$P = p_e (\lambda - 1). \quad (17)$$

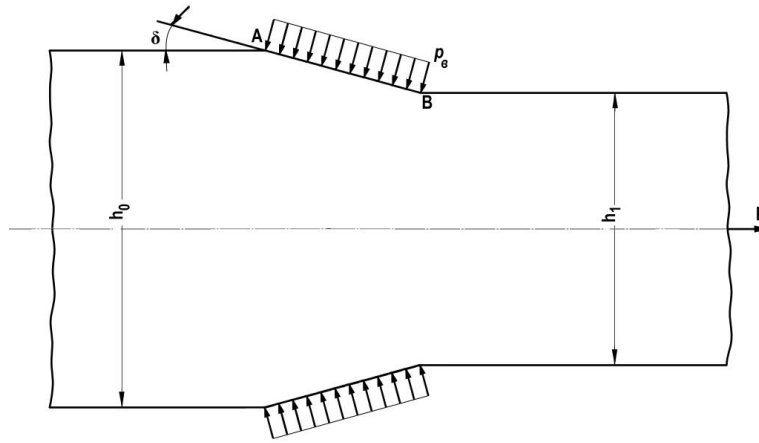


Рисунок 3.4 - Схема действия внешних сил на полосу

Переходя к безразмерным величинам, как это принято в расчетах ОМД, легко получить следующие расчетные формулы

$$p_b / 2\tau_s = \frac{1}{2} |\sigma_c / \tau_s - 1|, \quad (16,a)$$

$$n = p_e / 2\tau_s (\lambda - 1). \quad (17,a)$$

В последней формуле $n = p_e / 2\tau_s$ - коэффициент напряженного состояния.

При расчете показателя напряженного состояния $k = \frac{\sigma}{T}$ необходимо учесть, что для идеально пластичного материала $\tau = \tau_s$. Тогда $\frac{\sigma}{T} = \frac{\sigma}{\tau_s}$ и расчет сводится к отысканию гидростатического напряжения.

В области ABC напряженное состояние однородно, поэтому показатель напряженного состояния в приконтактном слое $\left(\frac{\sigma}{T}\right)_k = \frac{\sigma_c}{\tau_s}$.

В соответствии с (15)

$$\left(\frac{\sigma}{T}\right)_k = \frac{\sigma_c}{\tau_s} = \frac{1}{y_0} \left[x_0 - \alpha(y_D - y_0) + 2\alpha \sum_{j=1}^m j(y_{n,j-1} - y_{n,j}) \right] - 2\theta \quad (15,a)$$

Для расчета показателя напряженного состояния на оси полосы необходимо найти σ_0 .

$$\sigma_0 - 2\tau_s \varphi_0 = \sigma_D - 2\tau_s \varphi_D, \quad \sigma_c + 2\tau_s \varphi_c = \sigma_D - 2\tau_s \varphi_D$$

нетрудно вычислить σ_0 :

$$\sigma_0 = \sigma_c + 2\tau_s(2\theta + \delta).$$

Показатель напряженного состояния в центре полосы $\left(\frac{\sigma}{T}\right)_u$ будет

$$\left(\frac{\sigma}{T}\right)_u = \frac{\sigma_0}{\tau_s} = \frac{\sigma_c}{\tau_s} + 4\theta + 2\delta \quad (18)$$

Таким образом, формулы (15,a) и (18) позволяют определить показатель напряженного состояния в приконтактных и центральных слоях полосы и судить о схеме напряженного состояния в них.

В отчёте необходимо отметить цели работы, провести расчеты коэффициентов вытяжки и напряженного состояния, определить координаты линий скольжения в зависимости от заданных углов δ и θ ; по рассчитанным координатам построить сетку линий скольжения. Кратко описать

алгоритм расчета для выбранной системы калибров. При анализе полученных значений технологических параметров сделать выводы о влиянии угла наклона волокна на напряженное состояние металла и коэффициент вытяжки.

Таблица 3.1 – Задания для расчетов по лабораторной работе № 3

Номер варианта	Угол наклона волокна δ	Угол веера семейства линий скольжения α θ
1	15	9
2	18	18
3	12	15
4	21	12
5	9	15
6	15	21
7	18	9
8	12	18
9	21	18
10	9	3
11	15	18
12	18	15
13	12	12
14	21	9
15	9	18