

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
**«Национальный исследовательский технологический университет
«МИСиС»
НОВОТРОИЦКИЙ ФИЛИАЛ**

Кафедра металлургических технологий и оборудования

Н.Г. Куницина

**РАСЧЕТЫ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ
ОБРАБОТКИ МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ**

Методические указания
для проведения практических занятий по дисциплине
«Обработка металлов давлением»
для студентов направления подготовки 22.03.02 Металлургия
очной и заочной форм обучения

Новотроицк, 2020 г.

УДК 669.771
ББК 34.62
К 91

Рецензенты:

*И.о. зам. начальника по производству ЛПЦ-1 АО «Уральская Сталь»
Н.И. Синдянов*

*Зав. кафедрой металлургических технологий и оборудования
Новотроицкого филиала ФГАОУ ВО НИТУ «МИСиС»,
к.т.н., доцент А.Н. Шаповалов*

Куницина Н.Г. Расчеты основных параметров технологических процессов обработки металлов давлением: методические указания для проведения практических занятий по дисциплине «Обработка металлов давлением» для студентов направления подготовки 22.03.02 Металлургия очной и заочной форм обучения - Новотроицк: НФ НИТУ «МИСиС», 2020. 56 с.

Задачей методических указаний является закрепление знаний и умений расчета основных деформационных и энергосиловых параметров процессов прокатки, прессования, волочения иковки. Приведены основные математические зависимости, описывающие процесс пластической деформации в различных процессах ОМД, примеры решения задач, задачи для самостоятельного решения и справочный материал, необходимый для проведения расчетов.

Рекомендовано Методическим советом НФ НИТУ «МИСиС»

© Новотроицкий филиал
ФГАОУ ВО «Национальный
исследовательский
технологический университет
«МИСиС», 2020.

Содержание

Введение	4
1 Прокатка. Основные характеристики процесса	5
1.1 Определение коэффициентов деформации при прокатке.....	5
1.2 Определение коэффициента трения при горячей и холодной.....	14
прокатке.....	14
1.3 Определение параметров продольного течения металла в очаге.....	19
деформации	19
1.4 Определение параметров поперечного течения металла в очаге.....	24
деформации	24
1.5 Определение энергосиловых параметров прокатки	27
2 Прессование. Основные характеристики процесса	32
2.1 Определение деформационных и энергосиловых параметров.....	32
прессования.....	32
3 Волочение. Основные характеристики процесса.....	39
3.1 Определение деформационных и энергосиловых параметров.....	39
волочения	39
4 Ковка. Основные характеристики процесса	46
4.1 Определение деформационных и энергосиловых параметров при осадке	
и протяжке.....	46
Список использованных источников	52
Приложение А. Табличные данные для определения сопротивления	53
металла деформации	53
Приложение Б. Химический состав марок стали.....	54

Введение

Обработка металлов давлением является одним из способов получения готовых изделий. Сущность процессов обработки давлением состоит в придании металлу определенной формы. При этом изменяются также свойства и структура металла. В основные промышленные процессы обработки металлов давлением входят: прокатка, прессование, волочение, ковка и штамповка.

Прокатка среди указанных видов является самым производительным процессом производства готовых изделий из металла, хорошо поддающимся механизации и автоматизации. Прокаткой получают большое число готовых профилей: рельсы, балки, уголки, швеллеры, лист, ленту, трубы, колеса и др., а также заготовки дляковки, штамповки, прессования и волочения. Прокат является наиболее массовым видом конструкционных материалов и находит широкое применение в машиностроении, металлообработке, строительстве, на транспорте и других отраслях народного хозяйства страны. Кроме того, прокат используют и в самом металлургическом производстве на ремонтно-эксплуатационные нужды и для дальнейшего передела в трубы, рельсовые скрепления и пр.

Прессование в последние годы все шире распространяется для получения разнообразных сплошных и полых профилей из цветных металлов, сталей и сплавов.

Ковку применяют для изготовления крупных поковок из слитков, а также средних и мелких поковок из прокатанной заготовки.

Для массового производства мелких и средних поковок применяют объемную штамповку на прессах или молотах.

Процессы обработки давлением непрерывно совершенствуются; при этом преследуются многие цели, важнейшие из которых – улучшение качества продукции, снижение расходного коэффициента металла и энергозатрат, повышение производительности труда. Совершенствование идет как по пути создания новых технологий и конструкций оборудования, так и посредством оптимизации режимов деформации на действующем оборудовании.

Методические указания разделены по темам практических занятий, каждая из которых содержит теоретическое введение, примеры решения типовых задач, а также задачи для самостоятельного решения.

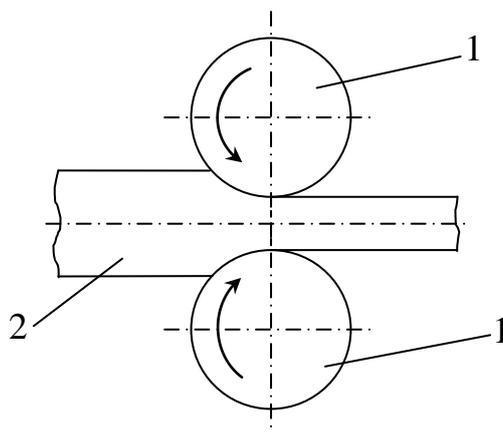
1 Прокатка. Основные характеристики процесса

1.1 Определение коэффициентов деформации при прокатке

Прокатка относится к числу основных способов обработки металлов давлением. Методом прокатки получают изделия самой разнообразной формы: тонкие и толстые листы, профили квадратного и круглого сечений, уголки, швеллеры, двутавровые балки, рельсы, трубы и многие другие.

Прокаткой называется процесс пластической деформации металла между двумя или несколькими вращающимися валками.

Наиболее распространенным видом прокатки является продольная прокатка (рисунок 1). Обрабатываемое тело, в общем случае называемое полосой, пропускается между двумя валками, вращающимися в противоположные стороны. При прохождении между валками толщина полосы уменьшается, а длина и ширина увеличиваются.



1 – валки; 2 – полоса

Рисунок 1 – Схема процесса продольной прокатки

Прокатка бывает горячей и холодной. Горячая прокатка распространена шире, чем холодная. Нагретый металл при высоких температурах обладает пониженным сопротивлением деформации и повышенной пластичностью. Холодная прокатка применяется для получения относительно тонких изделий с высококачественной поверхностью. Иногда находит применение обработка в области промежуточных температур – так называемая теплая прокатка.

Следует отметить, что прокатка служит не только для получения изделий определенной формы, но и в значительной степени способствует повышению механических свойств металла.

Выше было сказано, что в процессе прокатки изменяются линейные размеры полосы – толщина, ширина и длина. Рассмотрим систему показателей, которые характеризуют величину деформации в каждом из этих направлений.

Изменение толщины полосы характеризуется величиной абсолютного и относительного обжатия, а также коэффициентом обжатия.

Абсолютное обжатие – разность между исходной и конечной толщинами полосы

$$\Delta h = h_0 - h_1, \quad (1)$$

где Δh – абсолютное обжатие, мм;

h_0 – толщина полосы перед проходом, мм;

h_1 – толщина полосы после прохода, мм.

Условное относительное обжатие – отношение абсолютного обжатия к первоначальной толщине полосы

$$\varepsilon_h = \frac{\Delta h}{h_0}, \quad (2)$$

где ε_h – условное относительное обжатие.

Истинное относительное обжатие – определяется как натуральный логарифм отношения исходной толщины полосы к конечной

$$\delta_h = \ln \frac{h_0}{h_1}, \quad (3)$$

где δ_h – истинное относительное обжатие.

Относительное обжатие определяется в долях единицы или в процентах; в последнем случае результаты расчета по формулам (2) и (3) умножаются на 100 %.

Коэффициент обжатия – отношение начальной толщины полосы к конечной

$$\frac{1}{\eta} = \frac{h_0}{h_1}, \quad (4)$$

где $\frac{1}{\eta}$ – коэффициент обжатия.

Изменение поперечных размеров полосы называется уширением. Показатели уширения аналогичны показателям высотной деформации.

Абсолютное уширение – разность между конечной и исходной ширинами полосы

$$\Delta b = b_1 - b_0, \quad (5)$$

где Δb – абсолютное уширение, мм,
 b_1 – ширина полосы после прохода, мм;
 b_0 – ширина полосы перед проходом, мм.

Условное относительное уширение – отношение абсолютного уширения к начальной ширине полосы

$$\varepsilon_b = \frac{\Delta b}{b_0}, \quad (6)$$

где ε_b – условное относительное уширение.

Истинное относительное уширение – натуральный логарифм отношения конечной ширины полосы к начальной

$$\delta_b = \ln \frac{b_1}{b_0}, \quad (7)$$

где δ_b – истинное относительное уширение.

Условное и истинное относительное уширение также определяется в долях единицы либо в процентах.

Коэффициент уширения – отношение ширины полосы после прохода к исходной ширине полосы

$$\beta = \frac{b_1}{b_0}, \quad (8)$$

где β – коэффициент уширения.

Изменение продольных размеров полосы называется удлинением. Это изменение характеризуют следующие показатели.

Абсолютное удлинение – разность между конечной и исходной длинами полосы

$$\Delta l = l_1 - l_0, \quad (9)$$

где Δl – абсолютное удлинение, мм;

l_1 – длина полосы после прохода, мм;

l_0 – длина полосы перед проходом, мм.

Условное относительное удлинение – отношение абсолютного удлинения к начальной длине полосы

$$\varepsilon_1 = \frac{\Delta l}{l_0}, \quad (10)$$

где ε_1 – условное относительное удлинение.

Истинное относительное удлинение – натуральный логарифм отношения конечной длины полосы к исходной

$$\delta_1 = \ln \frac{l_1}{l_0}, \quad (11)$$

где δ_1 – истинное относительное удлинение.

Величины Δl , ε_1 и δ_1 редко применяются на практике для характеристики продольной деформации, однако очень широко используется показатель, называемый *коэффициентом удлинения* или *коэффициентом вытяжки* – отношение длины полосы после прохода к начальной длине полосы

$$\lambda = \frac{l_1}{l_0}, \quad (12)$$

где λ – коэффициент вытяжки.

Если технологический процесс прокатки включает несколько проходов полосы через валки, то в этом случае различают *частные коэффициенты вытяжки* (в каждом проходе) и *общий коэффициент вытяжки*

$$\lambda_{\text{общ}} = \frac{l_k}{l_0}, \quad (13)$$

где $\lambda_{\text{общ}}$ – общий коэффициент вытяжки при прокатке;

l_k – конечная длина полосы после прокатки, мм.

Общий коэффициент вытяжки можно определить и из другого выражения

$$\lambda_{\text{общ}} = \lambda_1 \cdot \lambda_2 \cdot \lambda_3 \cdot \dots \cdot \lambda_n, \quad (14)$$

где $\lambda_1 \div \lambda_n$ – частные вытяжки в проходах;

n – число проходов.

Существует также понятие *среднего коэффициента вытяжки* в нескольких проходах. Под величиной среднего коэффициента вытяжки подразумевается такой коэффициент вытяжки, который был бы в том случае, если бы коэффициенты вытяжки во всех проходах были одинаковыми. Тогда можно записать:

$$\lambda_{\text{общ}} = \lambda_{\text{ср}} \cdot \lambda_{\text{ср}} \cdot \lambda_{\text{ср}} \cdot \dots \cdot \lambda_{\text{ср}} = \lambda_{\text{ср}}^n. \quad (15)$$

Из формулы (15) получаем величину среднего коэффициента вытяжки

$$\lambda_{\text{ср}} = \sqrt[n]{\lambda_{\text{общ}}}, \quad (16)$$

где $\lambda_{\text{ср}}$ – средний коэффициент вытяжки при прокатке.

Условные относительные деформации, рассчитываемые по формулам (2), (6) и (10), применяются для характеристики малой пластической деформации по трем направлениям. Эти характеристики относятся к текущему (мгновенному) состоянию. Для характеристики больших деформаций ($\varepsilon > 15\%$) в результате значительных изменений формы проката следует использовать истинные (логарифмические) деформации.

Относительная деформация совпадает с истинной, если $\frac{\Delta h}{h_0} < 0,15$. При больших деформациях разница между относительной и истинной деформациями значительна.

При любом процессе обработки металлов давлением, в том числе и при прокатке, объем тела изменяется незначительно. Поэтому в теории пластической деформации принимается *условие постоянства объема металла*: объем тела при пластической деформации остается неизменным. В действительности объем тела в процессе пластической деформации не остается неизменным. Так при горячей обработке литого металла происходит его уплотнение в результате заваривания раковины, пустот, микротрещин и, соответственно, некоторое уменьшение объема металла. При холодной обработке давлением, наоборот, происходит некоторое увеличение объема в результате образования микротрещин. Однако все эти изменения незначительны, и ими можно пренебречь.

Уравнение постоянства объема широко используется в расчетах изменения формы тел при всех процессах обработки давлением.

Тогда имеем

$$V_0 = V_1, \quad (17)$$

где V_0, V_1 – соответственно объем полосы до и после прохода в клетки, мм^3 .

Т.к. объем тела представляет произведение площади поперечного сечения тела на его длину, то

$$F_0 \cdot l_0 = F_1 \cdot l_1, \quad (18)$$

где F_0, F_1 – площадь поперечного сечения полосы до и после прохода в клетки соответственно, мм^2 .

Для прямоугольной полосы условие постоянства объема выглядит наиболее простым образом и представляет следующее выражение

$$h_0 \cdot b_0 \cdot l_0 = h_1 \cdot b_1 \cdot l_1, \quad (19)$$

откуда следует с учетом формул (4), (8) и (12)

$$\left(\frac{h_1}{h_0}\right) \cdot \left(\frac{b_1}{b_0}\right) \cdot \left(\frac{l_1}{l_0}\right) = \eta \cdot \beta \cdot \lambda = 1. \quad (20)$$

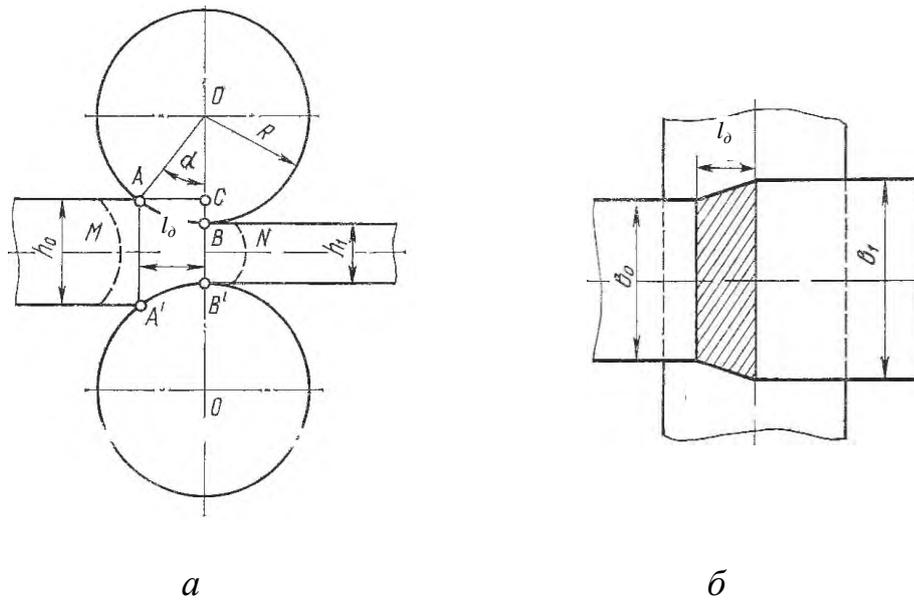
Т.е. коэффициенты деформации в трех основных направлениях связаны между собой условием постоянства объема металла.

Исходя из выражения (18) можно получить

$$\lambda = \frac{l_1}{l_0} = \frac{F_0}{F_1}. \quad (21)$$

Таким образом, коэффициент вытяжки характеризует не только изменение длины полосы, но и изменение ее площади поперечного сечения.

В процессе прокатки полоса подвергается деформации не одновременно по всей длине, а только на некотором участке, называемом *очагом деформации*, который характеризуется продольным (рисунок 2, а) и поперечным (рисунок 2, б) сечениями.



а – продольный разрез очага деформации;
 б – поперечный разрез очага деформации
 Рисунок 2 – Очаг деформации при прокатке

При упрощенном описании процесса прокатки за очаг деформации принимают область, ограниченную дугами окружностей валков АВ и А'В', плоскостями входа металла в валки АА' и выхода металла из валков ВВ' и боковыми границами полосы. Это так называемый геометрический очаг деформации.

Однако экспериментальные исследования показывают, что пластическая деформация распространяется и на зоны, прилегающие к геометрическому очагу деформации, называемые внеконтактными зонами деформации. Поэтому *фактический очаг деформации* (область, заключенная между линиями М и N) больше геометрического и включает в себя внеконтактные зоны.

Основными понятиями, относящимися к геометрическому очагу деформации, относятся следующие:

- *дуга захвата* (дуга контакта АВ), по которой металл соприкасается с валками. Горизонтальную проекцию дуги захвата принимают за *длину очага деформации*

$$l_d = \sqrt{R \cdot \Delta h} \quad (22)$$

где l_d – длина очага деформации, мм;

R – радиус валков клетки, мм, равный

$$R = \frac{D}{2}, \quad (23)$$

где D – диаметр валков, мм;

- *угол захвата* (угол контакта) – угол, соответствующий дуге захвата:

$$\alpha = \arccos\left(1 - \frac{\Delta h}{D}\right), \quad (24)$$

где α – угол захват, град.

Задача 1. Заготовка толщиной 300 мм, шириной 600 мм и длиной 4000 мм прокатывается с абсолютным обжатием 50 мм. Абсолютное уширение при этом составило 20 мм. Определить размеры заготовки после прокатки и коэффициенты деформации.

Решение. Определяем толщину заготовки после прокатки, используя формулу (1):

$$h_1 = h_0 - \Delta h = 300 - 50 = 250 \text{ мм.}$$

Ширину заготовки после прокатки можно определить по формуле (5):

$$b_1 = b_0 + \Delta b = 600 + 20 = 620 \text{ мм.}$$

В условии задачи абсолютное удлинение не дано, поэтому определить длину заготовки аналогично толщине и ширине по формуле (9) невозможно. Однако длину можно определить, используя условие постоянства объема металла, выраженное формулой (19):

$$l_1 = \frac{h_0 \cdot b_0 \cdot l_0}{h_1 \cdot b_1} = \frac{300 \cdot 600 \cdot 4000}{250 \cdot 620} = 4645 \text{ мм.}$$

Коэффициент обжатия, уширения и удлинения (вытяжки) определяем по формулам (4), (8) и (12):

$$\frac{1}{\eta} = \frac{h_0}{h_1} = \frac{300}{250} = 1,200;$$

$$\beta = \frac{b_1}{b_0} = \frac{620}{600} = 1,033;$$

$$\lambda = \frac{l_1}{l_0} = \frac{4645}{4000} = 1,161.$$

Задачи для самостоятельного решения

Задача 2. Определить условное и истинное относительные обжатия при обжатии заготовки с толщины 250 мм на толщину 220 мм.

Задача 3. Заготовка шириной 350 мм подвергается прокатке с абсолютным обжатием 30 мм. Длина заготовки в процессе прокатки увеличилась на 1600 мм. Относительное обжатие составило 25 %, относительное уширение 12 %. Определить начальные толщину и длину заготовки, конечные размеры после прокатки и коэффициенты деформации.

Задача 4. Определить исходные размеры заготовки, если в процессе прокатки с относительным обжатием 20 % получили полосу толщиной 120 мм, шириной 600 мм и длиной 4300 мм. При этом коэффициент уширения составил 1,05.

Задача 5. Заготовка толщиной 210 мм, шириной 600 мм и длиной 5000 мм прокатывается с относительным обжатием 27 %. Относительное удлинение при этом составило 25 %. Определить размеры заготовки после прокатки и истинные относительные деформации.

Задача 6. Полосу прокатывают в непрерывном трехклетевом стане. Коэффициент вытяжки в первом проходе составил 1,2; во втором 1,23, в третьем 1,18. Рассчитать средний коэффициент вытяжки в проходах.

Задача 7. Заготовка толщиной 110 мм, шириной 530 мм и длиной 3500 мм прокатывается в 4 прохода без уширения. Определить общий и средний коэффициенты вытяжки, если абсолютное обжатие в первом проходе 25 мм, во втором 20 мм, в третьем 15 мм, в четвертом 10 мм.

Задача 8. Полосу с начальными толщиной 250 мм, шириной 700 мм и длиной 5000 мм прокатали за четыре прохода на двухвалковой клети с относительным обжатием в первом проходе 26 % и абсолютным уширением в первом проходе 50 мм. Коэффициент вытяжки в третьем проходе при этом составил 1,21; в четвертом 1,3; средний коэффициент вытяжки за четыре прохода 1,25. Рассчитать коэффициент вытяжки во втором проходе.

Задача 9. Полоса начальной толщины 100 мм за четыре раза обжимается без уширения до конечной толщины 20 мм. Рассчитать общий коэффициент вытяжки.

Задача 10. Полосу начальной толщиной 150 мм, шириной 350 мм, длиной 3000 мм прокатали за несколько проходов до толщины 30 мм. Конечная ширина

полученной полосы 370 мм. Средний коэффициент вытяжки при прокатке составил 1,67. Определить число проходов при прокатке заданной полосы.

Задача 11. Рассчитать длину очага деформации при прокатке полосы толщиной 230 мм с относительным обжатием 25 % на валках диаметром 850 мм.

Задача 12. В клети, диаметр валков которой равен 700 мм, прокатывается полоса начальной толщиной 100 мм с абсолютным обжатием 20 мм. Определить угол захвата при прокатке данной полосы и конечную толщину после прокатки.

Задача 13. Полосу толщиной 80 мм прокатывают в двухклетевом стане в рабочих валках диаметром 900 мм; на входе в стан полоса имеет размеры $h_0 \times b_0 \times l_0 = 140 \times 1400 \times 10000$ мм, а на выходе из первой клети толщина полосы 100 мм. Определить размеры очага деформации в клетях стана.

1.2 Определение коэффициента трения при горячей и холодной прокатке

В любом процессе обработки металлов давлением смещаемый объем деформируемого тела стремится к некоторому перемещению по поверхности инструмента. При этом возникают силы трения, затрудняющие это перемещение. Такое трение называется *контактным* или *внешним*. Трение присутствует в любом процессе пластической деформации и сказывается на ходе обработки, затрудняя процесс деформации и увеличивая энергосиловые параметры. Под влиянием сил трения в ряде случаев усилие деформации возрастает в несколько раз по сравнению с тем усилием, которое обусловлено истинным сопротивлением металла деформации. Чем больше трение, тем большее усилие нужно для деформации и тем больше расход энергии на деформацию. Кроме того, при действии сил трения металл деформируется неравномерно, что приводит к разнородности его структуры, возникновению растягивающих напряжений в металле, которые иногда приводят к нарушению сплошности изделия. От характера и величины сил трения зависит степень износа инструмента (валков) и качество поверхности изделия.

Трение при пластической деформации в процессах обработки металлов давлением существенно отличается от трения в узлах механизмов и машин и трения, возникающего при перемещении одного тела по поверхности другого.

При обработке давлением создаются некоторые специфические условия, которые и приводят к различию между трением пластической деформации и обычным трением скольжения:

а) высокие удельные давления на поверхности контакта инструмента с металлом, превышающие иногда 2500 МПа, в тоже время даже в самых тяжело нагруженных подшипниках прокатных станов удельные давления в 5 – 10 раз ниже;

б) высокая температура (при горячей обработке), вызывающая изменение физико-химического состояния контактной поверхности металла (образование окалины);

в) постоянное обновление поверхности деформируемого металла в связи с его пластическим течением.

Трение скольжения характеризуют *коэффициентом трения*, оценивающим силовое воздействие двух контактирующих тел при их перемещении относительно друг друга.

Коэффициент трения зависит от многих технологических факторов процесса пластической деформации, таких как материал инструмента, температура и скорость деформации, химический состав деформируемого металла, наличие смазки и др., которые либо увеличивают, либо уменьшают его.

Существует огромное количество формул для определения коэффициента трения в процессе прокатки, которые учитывают влияние на него различных факторов. Наиболее оптимальной для горячей прокатки является формула Б.П. Бахтинова – М.М. Штернова, в соответствии с которой коэффициент трения определяется, исходя из условия влияния на него температуры и скорости прокатки, а также материала валков и деформируемого металла

$$f = k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 \cdot (1,05 - 0,0005 \cdot T_{np}), \quad (25)$$

где f – коэффициент трения;

k_1 – коэффициент, учитывающий материал валков;

k_2 – коэффициент, учитывающий влияние скорости прокатки на коэффициент трения;

k_3 – коэффициент, характеризующий марку стали;

T_{np} – температура металла при прокатке, $^{\circ}\text{C}$.

Если прокатка осуществляется на стальных валках, то коэффициент $k_1=1$, если на чугунных валках, то $k_1=0,8$.

Коэффициент, учитывающий влияние скорости прокатки определяется по графику:

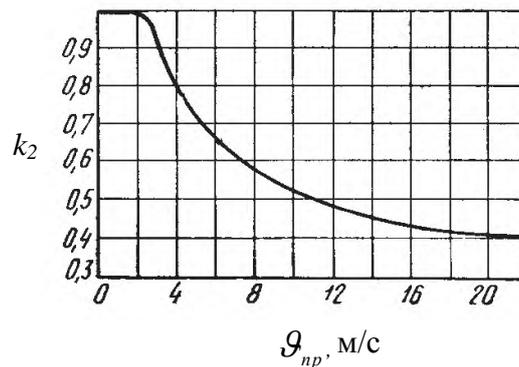


Рисунок 3 – Значения коэффициента k_2 для расчета коэффициента трения по уравнению Б.П. Бахтинова – М.М. Штернова

Для более точного расчета коэффициента k_2 можно использовать следующую формулу

$$k_2 = 1,67 \cdot v_{пр}^{-0,25} - 0,4, \quad (26)$$

где $v_{пр}$ – скорость прокатки, м/с.

Из рисунка 3 видно, что при скоростях прокатки менее 2 м/с коэффициент $k_2 = 1$; при скоростях более 20 м/с коэффициент $k_2 = 0,4$.

Скорость прокатки следует отличать от скорости деформации. Скорость прокатки – это скорость, с которой металл выходит из валков. Скорость деформации – это изменение степени деформации в единицу времени, определяемая при прокатке по формуле А.И. Целикова

$$\xi = \frac{v_{пр} \cdot \varepsilon_h}{l_d}. \quad (27)$$

Коэффициент, характеризующий марку стали рассчитывается по формуле:

$$k_3 = 0,97926 + [C] \cdot (0,0031 \cdot [Ni] + 0,00175 \cdot [W]) + 0,02457 \cdot [Mn] + 0,02144 \times \\ \times [Cr] + 0,001 \cdot [Mo], \quad (28)$$

где [...] – содержание данного элемента в стали, %.

Для упрощения расчета коэффициента k_3 можно использовать данные таблицы 1.

Таблица 1 – Значения коэффициента k_3 для расчета коэффициента трения по уравнению Б.П. Бахтинова – М.М. Штернова

Стали	Типичная марка	k_3
Углеродистые	Ст1	1,00
Ледебуритные	P18, X12	1,10
Перлитно-мартенситные	ШХ15	1,30
Аустенитные	X13H4Г9	1,40
Аустенитные с включениями феррита или ледебурита	X18H10T	1,44
Ферритные	X17Ю5	1,55
Аустенитные с включениями карбидов	X15H60	1,62

Для холодной прокатки при определении коэффициента трения можно воспользоваться формулой А.П. Грудева

$$f = \frac{K_{cm} \cdot [1 + (0,4 + \varepsilon_h) \cdot R_z]}{1 + 0,25 \cdot \sqrt{v_{50}} - 0,005 \cdot v_{50}} \cdot \left[0,07 - \frac{0,1 \cdot \vartheta_b}{2 \cdot (1 + \vartheta_b) + 3 \cdot \vartheta_b^2} \right], \quad (29)$$

где K_{cm} – коэффициент, учитывающий природу смазки;

v_{50} – коэффициент вязкости смазки при 50 °С, мм²/с;

R_z – высота неровностей на поверхности валков, мкм;

ϑ_b – скорость вращения валков, м/с.

Коэффициент, учитывающий природу смазки, определяется по таблице 2.

Таблица 2 – Влияние смазки на коэффициент трения при холодной прокатке.

Вид смазки	K_{cm}
Машинное масло	1,35
Веретенное масло	1,25
Вода	1,00
Эмульсия	1,00
Керосин	1,00
Хлопковое масло	0,90
Касторовое масло	0,90
Пальмовое масло	0,90

Задача 14. Рассчитать коэффициент трения при прокатке полосы из стали марки 09Г2С, нагретой до температуры 1090 °С со скоростью 3 м/с на стальных валках.

Решение. Т.к. прокатка осуществляется на стальных валках, то коэффициент, учитывающий материал валков $k_1 = 1$.

Скорость прокатки по условию задачи находится в интервале между 2 м/с и 20 м/с, поэтому с целью наиболее точного определения коэффициента k_2 воспользуемся формулой (26):

$$k_2 = 1,67 \cdot 9_{\text{пр}}^{-0,25} - 0,4 = 1,67 \cdot 3^{-0,25} - 0,4 = 0,69.$$

Для нахождения коэффициента k_3 используем формулу (28).

Химический состав стали 09Г2С: Углерода – 0,12 %; никеля – 0,3 %; марганца – 1,5 %; хрома – 0,3 %.

$$k_3 = 0,97926 + [C] \cdot (0,0031 \cdot [Ni] + 0,00175 \cdot [W]) + 0,02457 \cdot [Mn] + 0,02144 \times \\ \times [Cr] + 0,001 \cdot [Mo] = 0,97926 + 0,12 \cdot (0,0031 \cdot 0,3 + 0,00175 \cdot 0) + 0,02457 \cdot 1,5 + \\ + 0,02144 \cdot 0,3 + 0,001 \cdot 0 = 1,024.$$

Т.к. по условию задачи температура прокатки составляет 1090 °С, то следовательно для определения коэффициента трения необходимо воспользоваться формулой (25) для горячей прокатки:

$$f = k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 \cdot (1,05 - 0,0005 \cdot T_{\text{пр}}) = 1 \cdot 0,869 \cdot 1,024 \cdot (1,05 - 0,0005 \cdot 1090) = 0,45$$

Задачи для самостоятельного решения

Задача 15. На двухвалковой клети прокатали сталь марки 15ХСНД на чугунных валках со скоростью 3 м/с. Температура прокатки составила 1160 °С. Рассчитать коэффициент трения при горячей прокатке данной полосы.

Задача 16. Определить температуру заготовки из стали 10, при которой она прокатывается в клети на стальных валках с толщины 250 мм на толщину 210 мм. Скорость деформирования 5 м/с; коэффициент трения 0,3.

Задача 17. Рассчитать коэффициент трения по формулам Б.П. Бахтинова – М.М. Штернова и А.П. Чекмарева – В.А. Николаева при прокатке заготовки из стали 30 с толщины 150 мм на толщину 100 мм на чугунных валках с насечкой диаметром 950 мм со скоростью 6 м/с при температуре 1200 °С, если скорость вращения валков 5,7 м/с; твердость материала валков 45 ед. по Шору; угол захвата 0,32 рад. Сравнить полученные результаты.

Задача 18. Прокатывают ленту из нержавеющей стали толщиной 5 мм в холодном состоянии. Определить коэффициент трения, если толщина ленты после прокатки 3,5 мм; скорость вращения валков 10 м/с; валки смазываются машинным маслом; коэффициент вязкости смазки 20 мм²/с; высота неровностей на поверхности валков 3 мкм.

Задача 19. Полосу начальной толщиной 7 мм прокатали в холодном состоянии в клети, скорость вращения валков которой составляла 6 м/с. Прокатка производилась с использованием эмульсии с вязкостью 16 мм²/с. При неровности валков 2 мкм коэффициент трения составил 0,07. Определить конечную толщину полосы после деформации.

1.3 Определение параметров продольного течения металла в очаге деформации

Так как объем металла при деформации остается постоянным, то через любое поперечное сечение очага деформации в единицу времени должно проходить одинаковое количество металла. Это условие в теории прокатки называется *условием постоянства секундных объемов*.

Объем металла, проходящий через любое поперечное сечение очага деформации в единицу времени (секунду), составляет

$$\frac{F_i \cdot l_i}{\tau} = F_i \cdot v_i, \quad (30)$$

где F_i – площадь поперечного сечения полосы в произвольном сечении, мм²;
 l_i – продольное перемещение полосы через это сечение за время τ , мм;
 v_i – скорость движения полосы в данном сечении, м/с.

Т.е. условие постоянства секундных объемов

$$F_i \cdot v_i = \text{const},$$

$$F_0 \cdot v_0 = F_i \cdot v_i = F_1 \cdot v_1, \quad (31)$$

где $v_0, v_1 = v_{\text{пр}}$ – соответственно скорости движения полосы на входе и на выходе из валков, м/с.

Площади поперечного сечения полосы по мере продвижения ее от плоскости входа в валки к плоскости выхода из валков уменьшаются. Поэтому, чтобы

сохранилось равенство секундных объемов, скорости частиц в соответствующих сечениях должны постепенно возрастать.

Из выражения (31) можно выразить

$$\begin{aligned} \vartheta_1 &= \vartheta_{\text{пр}} = \frac{F_0 \cdot \vartheta_0}{F_1}, \\ \vartheta_1 &= \vartheta_{\text{пр}} = \lambda \cdot \vartheta_0. \end{aligned} \quad (32)$$

Таким образом, скорость выхода полосы из валков больше скорости входа полосы в валки на величину коэффициента вытяжки.

Кроме этого, исследования показывают, что при установившемся процессе прокатки скорость выхода полосы из валков больше окружной скорости валков, а скорость входа полосы в валки меньше окружной скорости валков. Это связано с тем, что при обжатии полосы по высоте частицы металла вынуждены перемещаться в продольном направлении. При этом некоторое количество металла выжимается вперед по ходу прокатки; скорость этих частиц, полученная в результате деформации, суммируется с окружной скоростью валков. Другая часть смещенного объема металла отжимается назад, против хода прокатки; скорость этих частиц вычитается из окружной скорости валков. Т.е. в очаге деформации есть зона попятного движения металла или *зона отставания* (где скорость полосы меньше окружной скорости валков) и зона попутного движения металла или *зона опережения* (где соотношение скоростей обратное) (рисунок 4).

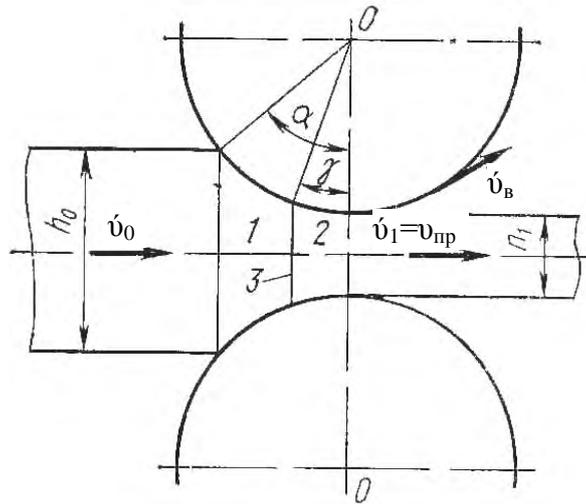
Сечение, где скорости движения полосы и валков одинаковы, называется *нейтральным сечением*. Его положение в очаге деформации характеризуется величиной нейтрального угла.

Следовательно, *опережение* – это превышение скорости выхода металла из валков по сравнению с их окружной скоростью, а *отставание* – уменьшение скорости входа металла в валки по сравнению с их окружной скоростью. На рисунке 5 представлена диаграмма, отражающая соотношение скоростей валков и металла на всем протяжении очага деформации.

Опережение:

$$S_{\text{hl}} = \frac{\vartheta_{\text{пр}} - \vartheta_{\text{в}}}{\vartheta_{\text{в}}}, \quad (33)$$

где S_{hl} – опережение.



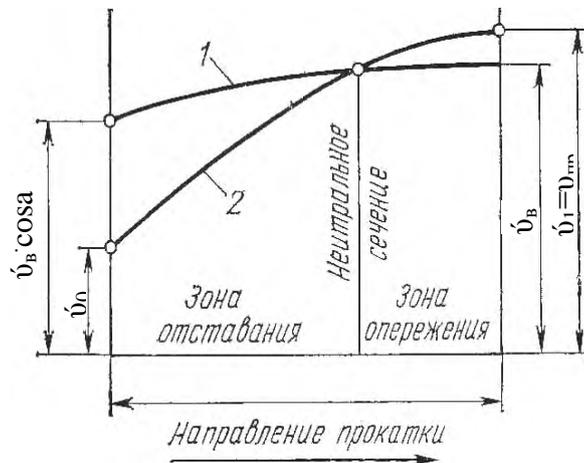
1 – зона отставания; 2 – зона опережения; 3 – нейтральное сечение

Рисунок 4 – Зоны отставания и опережения в очаге деформации

Опережение можно выразить в процентах

$$S_{hl} = \frac{v_{пр} - v_B}{v_B} \cdot 100\% .$$

Обычно величина опережения составляет 2 ÷ 6%.



1 – горизонтальная составляющая окружной скорости валков;

2 – скорость металла

Рисунок 5 – Соотношение скоростей валков и металла в очаге деформации

Отставание

$$S_{h0} = \frac{\vartheta_B \cdot \cos \alpha - \vartheta_0}{\vartheta_B \cdot \cos \alpha} = 1 - \frac{\vartheta_0}{\vartheta_B \cdot \cos \alpha}. \quad (34)$$

С учетом формул (32) и (33) формула (34) преобразуется к виду

$$S_{h0} = 1 - \frac{\vartheta_1}{\lambda} \cdot \frac{1 + S_{h1}}{\vartheta_1 \cdot \cos \alpha} = 1 - \frac{1 + S_{h1}}{\lambda \cdot \cos \alpha}. \quad (35)$$

В теории прокатки основное внимание уделяется исследованию опережения. Это объясняется тем, что опережение экспериментально и аналитически определяется проще, чем отставание. С другой стороны именно величина опережения необходима для решения ряда практических задач, когда требуется достаточно точно определить скорость выхода полосы из валков (скорость прокатки). Если же известно опережение, то отставание нетрудно рассчитать по формуле (35).

Опережение является чувствительным кинематическим показателем процесса прокатки. Изменение любого геометрического или физического фактора прокатки отражается на величине опережения. На величину опережения сказываются такие параметры, как диаметр валков, на которых осуществляется процесс прокатки; величина абсолютного обжатия; толщина полосы; угол захвата; коэффициент трения и пр.

Влияние всех этих параметров на опережение выражается формулой С. Экелунда, по которой и производят расчет опережения процесса прокатки

$$S_{h1} = \frac{\gamma^2}{2} \cdot \left(\frac{D}{h_1} - 1 \right), \quad (36)$$

где γ – нейтральный угол (рисунок 3), град.

Для нахождения нейтрального угла можно воспользоваться формулой С. Экелунда – И.М. Павлова

$$\gamma = \frac{\alpha}{2} \cdot \left(1 - \frac{\alpha}{2 \cdot \beta} \right), \quad (37)$$

где β – угол трения, град, определяемый из выражения

$$\beta = \arctg f. \quad (38)$$

Задача 20. Рассчитать опережение при прокатке заготовки толщиной 350 мм с абсолютным обжатием 50 мм на валках диаметром 1000 мм, если коэффициент трения составил 0,35.

Решение. Определяем угол захвата при прокатке данной заготовки по формуле (24)

$$\alpha = \arccos\left(1 - \frac{\Delta h}{D}\right) = \arccos\left(1 - \frac{50}{1000}\right) = 18,2^\circ.$$

Угол трения в соответствии с формулой (38)

$$\beta = \arctg f = \arctg(0,35) = 19,3.$$

Тогда по формуле (37) нейтральный угол будет равен

$$\gamma = \frac{\alpha}{2} \cdot \left(1 - \frac{\alpha}{2 \cdot \beta}\right) = \frac{18,2}{2} \cdot \left(1 - \frac{18,2}{2 \cdot 19,3}\right) = 4,8^\circ.$$

Находим толщину заготовки после прохода между валками, учитывая формулу (1)

$$h_1 = h_0 - \Delta h = 350 - 50 = 300 \text{ мм.}$$

По формуле (36) определяем величину опережения. Для того, чтобы перевести градусу углов в радианы необходимо соответствующие градусы поделить на 57,3; т.к. в одном радиане – 57,3 градуса

$$S_{h1} = \frac{\gamma^2}{2} \cdot \left(\frac{D}{h_1} - 1\right) = \frac{4,8^2 / 57,3^2}{2} \cdot \left(\frac{1000}{300} - 1\right) = 0,008 \text{ или } 0,8 \text{ \%}.$$

Задачи для самостоятельного решения

Задача 21. Определить величину опережения и отставания при прокатке заготовки со скоростью 5 м/с, если скорость вращения валков 4,85 м/с; коэффициент вытяжки 1,250, а угол захвата 20° .

Задача 22. Рассчитать скорость вращения валков при прокатке полосы толщиной 200 мм с относительным обжатием 20% на валках диаметром 850 мм со скоростью 6 м/с, если коэффициент трения 0,42.

Задача 23. На одноклетевом стане прокатали полосу толщиной 210 мм, длиной 4800 мм с относительным обжатием 15 % без уширения. Найти величину отставания при прокатке указанной полосы при следующих условиях: диаметр валков 900 мм; валки – стальные; скорость прокатки 5,5 м/с; температура прокатки 1270°C ; марка обрабатываемой стали Ст10.

Задача 24. При $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ в чугунных валках с диаметром 800 мм прокатали полосу из стали марки 25 размерами $120 \times 150 \times 4000$ мм на полосу с размерами $90 \times 160 \times 5000$ мм. Скорость вращения валков 2,5 м/с; коэффициент трения 0,45. Определить кинематические параметры прокатки: опережение, отставание, скорость входа металла в валки, скорость выхода металла из валков (скорость прокатки) и скорость деформации.

1.4 Определение параметров поперечного течения металла в очаге деформации

Металл в очаге деформации течет не только в продольном направлении, но и в поперечном. Деформация металла в поперечном направлении называется *уширением*.

Уширение при прокатке может быть свободным, ограниченным и вынужденным. Свободным называют уширение прямоугольной полосы, прокатываемой в валках с гладкой цилиндрической бочкой. При свободном уширении частицы металла, перемещающиеся в поперечном направлении, не встречают никаких внешних препятствий в виде стенок калибров (имеет место лишь обычное контактное трение). При ограниченном уширении поперечное перемещение прокатываемого металла ограничивается боковыми гранями калибра. Вынужденным называют уширение, вызванное формой калибра, обуславливающей неравномерное обжатие прокатываемой полосы по ее ширине.

Уширение в большинстве случаев представляет собой отрицательное явление. Оно снижает общую вытяжку и вызывает в боковых кромках полосы значительные напряжения растяжения. Уширение имеет большое значение для процесса прокатки и поэтому должно приниматься во внимание.

Величина уширения зависит от многих факторов: геометрических, физических и механических. К геометрическим факторам относят величину абсолютного обжатия, диаметр валков, ширину и толщину полосы. К механическим факторам относят наличие внешних зон прокатываемого металла, натяжение, подпор. К физическим – коэффициент трения. Все факторы, влияющие на коэффициент трения (температура, материал и шероховатость валков, скорость прокатки и т.п.), влияют тем самым на величину уширения. С увеличением обжатия, диаметра валков, трения уширение увеличивается; с увеличением толщины, ширины и натяжения полосы уширение уменьшается.

Определение величины уширения с учетом всех факторов, влияющих на него, является сложной задачей. Поэтому большинство формул для подсчета уширения содержат только основные факторы, а действие остальных учитывается соответствующими коэффициентами.

Из числа формул, предложенных для численного определения величины свободного уширения, наибольшее распространение получили следующие.

Формула В.Б. Бахтинова

$$\Delta b = 1,15 \cdot \frac{\Delta h}{2 \cdot h_0} \cdot \left(1_d - \frac{\Delta h}{2 \cdot f} \right). \quad (39)$$

Формула С.И. Губкина

$$\Delta b = \left(1 + \frac{\Delta h}{h_0} \right) \cdot \left(f \cdot 1_d - \frac{\Delta h}{2} \right) \cdot \frac{\Delta h}{h_0}. \quad (40)$$

Формула А.И. Целикова – А.И. Гришкова

$$\Delta b = 0,54 \cdot C_\sigma \cdot C_b \cdot \left(1_d - \frac{\Delta h}{2 \cdot f} \right) \cdot \ln \frac{h_0}{h_1}, \quad (41)$$

где C_σ – коэффициент, учитывающий влияние натяжения на уширение;

C_b – коэффициент, учитывающий влияние ширины полосы на уширение.

Коэффициент, учитывающий влияние натяжения на уширение определяется выражением

$$C_\sigma = 1 - \frac{2 \cdot \sigma_0}{\sigma_s}, \quad (42)$$

где σ_0 – величина заднего натяжения полосы (натяжения, приложенного к заднему концу полосы), МПа;

σ_s – сопротивление металла деформации, МПа.

Коэффициент, учитывающий влияние ширины полосы на уширение

$$C_b = 4 \cdot (1 - \varepsilon_h) \cdot \left(\frac{b_0}{1_d} - 0,15 \right) \cdot e^{1,5 \cdot \left(0,15 - \frac{b_0}{1_d} \right)} + \varepsilon_h. \quad (43)$$

Следует отметить, что уширение, подсчитанное по формулам, не является абсолютно точным. Отклонение расчетной величины уширения от практической

объясняется тем, что уширение металла при прокатке, как было сказано выше, зависит от значительного количества факторов, которые все весьма трудно учесть при выводе формул уширения.

Задача 25. Определить уширение металла при следующих условиях прокатки: размеры полосы до прокатки $h_0 \times b_0 \times l_0 = 110 \times 150 \times 4200$ мм; относительное обжатие 18 %; диаметр валков 880 мм; коэффициент трения 0,3.

Решение. Определяем абсолютное обжатие, используя формулу (2)

$$\Delta h = \varepsilon_h \cdot h_0 = 0,18 \cdot 110 = 20 \text{ мм.}$$

Радиус валков в соответствии с формулой (23)

$$R = \frac{D}{2} = \frac{880}{2} = 440 \text{ мм.}$$

Тогда длина очага деформации при прокатке полосы составит, учитывая формулу (22)

$$l_d = \sqrt{R \cdot \Delta h} = \sqrt{440 \cdot 20} = 94 \text{ мм.}$$

Определим уширение по формуле (39)

$$\Delta b = 1,15 \cdot \frac{\Delta h}{2 \cdot h_0} \cdot \left(l_d - \frac{\Delta h}{2 \cdot f} \right) = 1,15 \cdot \frac{20}{2 \cdot 110} \cdot \left(94 - \frac{20}{2 \cdot 0,3} \right) = 6 \text{ мм.}$$

Величина уширения по формуле (40):

$$\Delta b = \left(1 + \frac{\Delta h}{h_0} \right) \cdot \left(f \cdot l_d - \frac{\Delta h}{2} \right) \cdot \frac{\Delta h}{h_0} = \left(1 + \frac{20}{110} \right) \cdot \left(0,3 \cdot 94 - \frac{20}{2} \right) \cdot \frac{20}{110} = 4 \text{ мм.}$$

По формуле (1) толщина полосы после прокатки

$$h_1 = h_0 - \Delta h = 110 - 20 = 90 \text{ мм.}$$

По условию задачи натяжение полосы отсутствует, следовательно, коэффициент $C_\sigma = 1$. Коэффициент C_b рассчитаем по формуле (43):

$$C_b = 4 \cdot (1 - \varepsilon_h) \cdot \left(\frac{b_0}{l_d} - 0,15 \right) \cdot e^{1,5 \cdot \left(0,15 - \frac{b_0}{l_d} \right)} + \varepsilon_h = 4 \cdot (1 - 0,18) \cdot \left(\frac{150}{94} - 0,15 \right) \times \\ \times e^{1,5 \cdot \left(0,15 - \frac{150}{94} \right)} + 0,18 = 0,722.$$

Тогда в соответствии с формулой (41) величина уширения

$$\Delta b = 0,54 \cdot C_\sigma \cdot C_b \cdot \left(l_d - \frac{\Delta h}{2 \cdot f} \right) \cdot \ln \frac{h_0}{h_1} = 0,54 \cdot 1 \cdot 0,722 \cdot \left(94 - \frac{20}{2 \cdot 0,3} \right) \cdot \ln \frac{110}{90} = 5 \text{ мм.}$$

м.

Задачи для самостоятельного решения

Задача 26. Прокатывается заготовка толщиной 180 мм, шириной 300 мм из стали марки 20 с относительным обжатием 24 % на стальных валках диаметром 900 мм со скоростью 4 м/с. Рассчитать уширение металла в процессе прокатки и конечную ширину полосы, если температура прокатки 1170 °С.

Задача 27. На одноклетевом стане прокатали три полосы из стали 35ГС толщиной 200 мм на чугунных валках диаметром 850 мм. Ширина первой полосы 300 мм; второй 500 мм; третьей 650 мм. Определить уширение каждой полосы при прокатке, если абсолютное обжатие 50 мм; скорость деформации 7 с^{-1} ; температура деформации 1200 °С. Сделать вывод о влиянии исходной ширины заготовки на величину абсолютного уширения.

Задача 28. Определить коэффициент вытяжки при холодной прокатке заготовки размерами 7×250×3000 мм с абсолютным обжатием 2 мм на валках диаметром 900 мм, скорость вращения которых 8 м/с. Дополнительные данные: к валкам подается эмульсия; высота неровностей на поверхности валков 3 мкм; коэффициент вязкости смазки 17 мм²/с.

Задача 29. Заготовка толщиной 250 мм подвергается прокатке на двухвалковой клетки. Рассчитать ширину заготовки после прокатки, если относительное обжатие 20 %; диаметр валков 790 мм; коэффициент трения 0,33; относительное уширение 5 %.

1.5 Определение энергосиловых параметров прокатки

К энергосиловым параметрам прокатки относятся усилие, момент, мощность и работа прокатки.

Правильное определение усилия прокатки необходимо для проведения расчетов оборудования рабочей линии стана на прочность и выбора оптимального технологического режима горячей или холодной прокатки.

Усилие прокатки можно определить измерением при помощи специальных датчиков или по формуле

$$P = P_{\text{ср}} \cdot F_{\text{к}}, \quad (44)$$

где P – усилие прокатки в данном проходе, МН;

P_{cp} – среднее давление металла на валки в очага деформации, МПа;

F_k – горизонтальная проекция поверхности контакта металла с валками (контактная площадь), m^2 .

При прокатке полос прямоугольного сечения в цилиндрических валках определение контактной площади не представляет затруднений. В этом случае форма поверхности касания в плане может быть принята за трапецию с основаниями b_0 и b_1 и высотой l_d (рисунок 2,б (заштрихованная область)).

Следовательно, площадь контактной поверхности определяется по формуле

$$F_k = \frac{b_0 + b_1}{2} \cdot l_d = b_{cp} \cdot l_d, \quad (45)$$

где b_{cp} – средняя ширина полосы в очаге деформации, мм.

При прокатке в валках металл оказывает внутреннее сопротивление деформации. Усилие, которое возникает между металлом и валком, должно преодолеть это внутреннее сопротивление металла и заставить металл изменить свою форму. Усилие в зоне контакта металла с валками, отнесенное к единице площади поверхности этого контакта, называют средним контактным давлением.

На величину среднего контактного давления при прокатке влияют целый ряд факторов: механические свойства металла, толщина полосы, диаметр валков, температура металла, скорость прокатки и другие факторы.

Среднее давлением может быть определено по формуле А.И. Целикова

$$P_{cp} = 1,15 \cdot n_\sigma \cdot \sigma_s, \quad (46)$$

где n_σ – коэффициент, учитывающий влияние напряженного состояния в очаге деформации;

σ_s – сопротивление металла деформации, МПа.

Сопротивление пластической деформации при обработке давлением также зависит от ряда факторов: химического состава металла, температуры, при которой деформируется металл, скорости и степени деформации металла.

Сопротивление металла деформации можно найти по формуле Л.В. Андрюка – Г.Г. Тюленева:

$$\sigma_s = K \cdot \sigma_0 \cdot \xi^a \cdot (10 \cdot \varepsilon_n)^b \cdot \left(\frac{T_{\text{пр}}}{1000} \right)^c, \quad (47)$$

где K, a, b, c – коэффициенты для конкретной марки стали;

σ_0 – базовое сопротивление металла деформации, полученное методом растяжения при следующих условиях: $\varepsilon = 10\%$; $\xi = 1 \text{ c}^{-1}$; $T = 1000^\circ\text{C}$.

Коэффициенты K, a, b, c для различных марок стали приведены в приложении А.

Крутящий момент, действующий на валки в процессе прокатки, называется моментом прокатки. Момент прокатки – один из основных энергосиловых параметров процесса, т.к. обуславливает мощность двигателя прокатного стана и размеры основных узлов стана. Умение определять момент прокатки дает возможность рассчитывать оптимальные режимы деформации металла при прокатке.

Момент прокатки обычно определяют, исходя из общего усилия прокатки по формуле

$$M_{\text{пр}} = 2 \cdot P \cdot \psi \cdot l_d, \quad (48)$$

где $M_{\text{пр}}$ – момент прокатки, МНм;

ψ – коэффициент, показывающий какую часть от длины очага деформации составляет плечо приложения полного давления. Определяется по формуле Бровмана

$$\psi = 0,5 - 0,1 \cdot \varepsilon_n. \quad (49)$$

Если известна величина крутящих моментов, то определение мощности и работы прокатки не представляет затруднений.

Мощность прокатки рассчитывается по формуле

$$N_{\text{пр}} = \frac{M_{\text{пр}} \cdot \vartheta_{\text{в}}}{R}, \quad (50)$$

где $N_{\text{пр}}$ – мощность прокатки, МВт.

Работа прокатки складывается из работы, затраченной на деформацию прокатываемого металла, работы, идущей на преодоление трения металла о поверхность валков, дополнительной работы, идущей на преодоление сил трения в движущихся частях стана в процессе прокатки.

Работа прокатки рассчитывается по формуле

$$A_{\text{пр}} = \frac{M_{\text{пр}} \cdot l_1}{(1 + S_{\text{hl}}) \cdot R}, \quad (51)$$

где $A_{\text{пр}}$ – работа прокатки, МДж.

Задача 30. Рассчитать сопротивление металла деформации при прокатке полосы толщиной 200 мм из стали марки 45. Условия прокатки: относительное обжатие 25 %; скорость прокатки 3 м/с; температура прокатки 1150 °С; диаметр валков 1200 мм.

Решение: используя формулу (2) находим абсолютное обжатие

$$\Delta h = \varepsilon_h \cdot h_0 = 0,25 \cdot 200 = 50 \text{ мм.}$$

По формулам (23) и (22) определяем радиус валков и длину очага деформации

$$R = \frac{D}{2} = \frac{1200}{2} = 600 \text{ мм;}$$

$$l_d = \sqrt{R \cdot \Delta h} = \sqrt{600 \cdot 50} = 173 \text{ мм.}$$

Скорость деформации при прокатке данной полосы составит с учетом формулы (27)

$$\xi = \frac{v_{\text{пр}} \cdot \varepsilon_h}{l_d} = \frac{3 \cdot 0,25}{173 \cdot 10^{-3}} = 4,3 \text{ с}^{-1}.$$

Для стали 45 коэффициенты Л.В. Андреева – Г.Г. Тюленева $K=1$; $a=0,143$; $b=0,173$; $c=-3,05$. Базовое сопротивление металла деформации для стали 45 87,4 МПа. Тогда сопротивление металла деформации по формуле (47)

$$\sigma_s = K \cdot \sigma_0 \cdot \xi^a \cdot (10 \cdot \varepsilon_h)^b \cdot \left(\frac{T_{\text{пр}}}{1000} \right)^c = 1 \cdot 87,4 \cdot 4,3^{0,143} \cdot (10 \cdot 0,25)^{0,173} \times \\ \times \left(\frac{1150}{1000} \right)^{-3,05} = 82,5 \text{ МПа.}$$

Задачи для самостоятельного решения

Задача 31. Прокатывается полоса из стали марки 15Г на стальных валках с абсолютным обжатием 25 мм. Рассчитать сопротивление металла деформации при прокатке полосы, если относительное обжатие 30 %; скорость деформации 5 с⁻¹; диаметр валков 800 мм; коэффициент трения 0,42.

Задача 32. Определить сопротивление металла деформации при горячей обработке давлением заготовки из стали 40Х с относительным обжатием 25 % , если скорость деформации 6 с^{-1} ; температура деформации $1180 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Расчет вести по методике Л.В. Андреюка – Г.Г. Тюленева. Уточнить эмпирические коэффициенты, характеризующие сопротивление деформации заданной марки стали.

Задача 33. На одноклетевом стане прокатали заготовку шириной 300 мм с абсолютным обжатием 20 мм на валках диаметром 900 мм. При этом абсолютное уширение составило 5 мм; сопротивление металла деформации 90 МПа; коэффициент напряженного состояния 1,185. Определить полное усилие прокатки.

Задача 34. Определить полное усилие деформирования при горячей прокатке заготовки из стали марки 40Х. Исходные данные: начальная толщина заготовки 200 мм; относительное обжатие 20 %; диаметр чугунных валков 700 мм; скорость прокатки 2,5 м/с; температура прокатки $1100 \text{ }^{\circ}\text{C}$; коэффициент напряженного состояния 1,179.

Задача 35. Найти момент прокатки, если известно, что при прокатке полосы шириной 350 мм с абсолютным обжатием 50 мм и относительным обжатием 20 % на валках диаметром 750 мм сопротивление металла деформации составило 78 МПа; абсолютное уширение 20 мм и коэффициент напряженного состояния 1,190.

Задача 36. При прокатке заготовки толщиной 120 мм, длиной 3000 мм с относительным обжатием 25 % на валках диаметром 850 мм со скоростью 4 м/с получили коэффициент трения 0,35 и усилие прокатки 3 МН. Прокатка проводится без уширения. Рассчитать мощность и работу при прокатке данной заготовки.

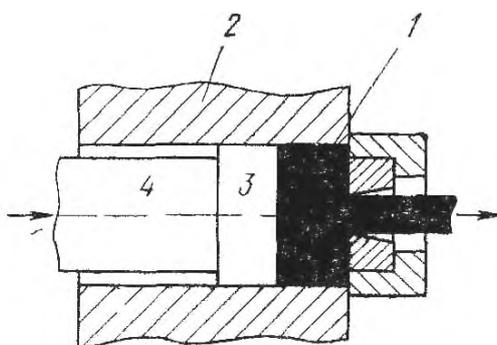
2 Прессование. Основные характеристики процесса

2.1 Определение деформационных и энергосиловых параметров прессования

При прессовании металл, заключенный в приемнике–контейнере, выдавливается через отверстие в матрице и получает форму поперечного сечения, соответствующего форме отверстия матрицы.

Прессование применяют для производства сплошных и полых профилей, труб. Также получают поковки, имеющие форму стержня постоянного и переменного сечения и др.

Различают два основных вида прессования: с прямым и обратным истечением.



1 – металл; 2 – контейнер; 3 – пресс-шайба; 4 - пуансон

Рисунок 6 – Схема прессования с прямым истечением металла

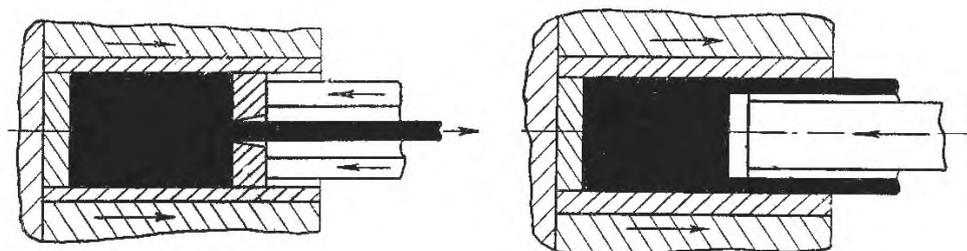


Рисунок 7 – Схема прессования с обратным истечением металла

При прессовании с прямым истечением (рисунок 6) течение металла происходит в том же направлении, что и перемещение пуансона. Металл перемещается относительно стенок контейнера при отсутствии перемещения матрицы относительно стенок. При прессовании с обратным истечением заготовка перемещается относительно стенок контейнера и на контактной поверхности появляются силы трения, затрудняющие ее перемещение.

При прессовании с обратным истечением (рисунок 7,а и 7,б) металл течет в сторону, противоположную перемещению пуансона. Особенностью этого прессования является отсутствие перемещения заготовки относительно стенок контейнера на большей части контактной поверхности; только вблизи матрицы имеется перемещение металла относительно стенок. Поэтому влияние трения на усилие прессования и течение металла в этом процессе значительно меньше, чем при прессовании с прямым истечением.

Иногда применяют совмещенное прессование, при котором прямое и обратное истечение металла происходят одновременно или последовательно.

Прессование обладает следующими преимуществами по сравнению с другими процессами обработки металлов давлением – прокаткой, волочением, ковкой:

1. Механическая схема деформации (всестороннее сжатие с одной деформацией растяжения), характеризующая процесс прессования, является схемой, обеспечивающей наибольшую пластичность деформируемого металла. Поэтому прессованием можно деформировать малопластичные по природе металлы и сплавы, которые другими методами деформировать невозможно.

2. Прессованием можно получать сплошные и полые профили очень сложной формы поперечного сечения (рисунок 8) – трубы с наружными и внутренними продольными и поперечными ребрами, полые профили с несколькими каналами сложной формы и т.п. Размеры и форму поперечного сечения можно плавно или ступенчато изменять по длине профиля.

3. При прессовании легко осуществляется переход с одного профиля на другой простой заменой матрицы. Поэтому прессование целесообразно применять при мелкосерийном производстве даже таких профилей, которые можно изготавливать прокаткой.

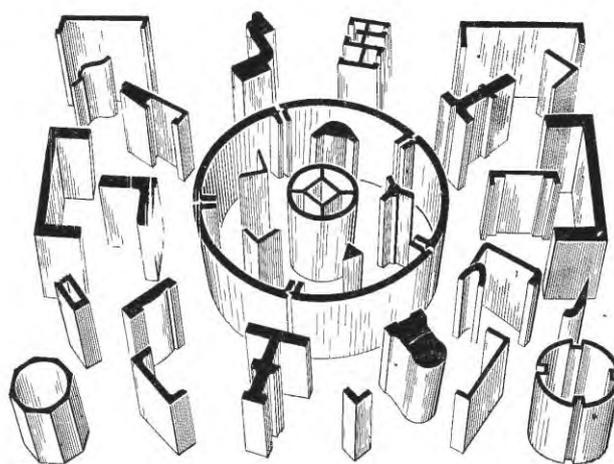


Рисунок 8 – Прессованные профили

4. При прессовании обеспечивается высокая точность размеров сечения по сравнению с горячей прокаткой, т.к. упругие деформации инструмента ничтожны.

Вместе с тем прессование имеет следующие недостатки, которые ограничивают область его применения:

1. Механическая схема деформации, обеспечивающая высокую пластичность, требует повышенного усилия для деформации. Это создает тяжелые условия службы матрицы. При прессовании нагретого металла усилие снижается, но условия службы инструмента ухудшаются. В связи с этим инструмент изготавливают из сложнолегированных сплавов, производят частую его смену.

2. Прессованные изделия характеризуются значительной неравномерностью свойств по сечению и длине в результате неравномерности деформации (более резко выраженной, чем при прокатке). Степень неравномерности деформации, а, следовательно, и свойств изделий зависит от следующих основных факторов:

- 1) температуры прессуемого металла и инструмента;
- 2) трения на поверхностях контакта металла с инструментом;
- 3) степени деформации;
- 4) скорости прессования и истечения;
- 5) прочностных свойств прессуемого металла.

Для снижения усилия прессования металлов с повышенной прочностью прессование осуществляют при высоких температурах. Вследствие этого неизбежно значительное охлаждение периферийных слоев металла, соприкасающихся с инструментом, особенно в обжимающей части пластической зоны вблизи матрицы. Внутренние слои (более горячие) имеют пониженное сопротивление деформации и стремятся переместиться быстрее наружных, что приводит к неравномерности деформации по сечению. Выравнивание скоростей течения по сечению прутка вследствие его целостности приводит к появлению дополнительных напряжений растяжения в наружных слоях и сжатия в центральных.

При прессовании температура неодинакова и по длине прутка: задний конец обычно имеет пониженную температуру по сравнению с передним — из-за большей длительности контакта с инструментом. В связи с этим предлагают нагревать заготовку неравномерно: наружные слои и ее задний конец до более высокой температуры по сравнению с внутренними слоями и передним концом. Это компенсирует неравномерность охлаждения при прессовании. Однако при значительном перепаде температуры по сечению наружные слои горячее внутренних и могут течь быстрее их. В результате во внутренних слоях появятся дополнительные напряжения растяжения, что может привести к внутренним разрывам.

Трение, как и во всех процессах обработки металлов давлением, увеличивает неравномерность деформации и требуемое усилие. Трение сдерживает течение металла периферийных слоев. Для снижения трения при прессовании применяют смазку инструмента или заготовки. При прессовании нагретого металла смазка должна иметь незначительную теплопроводность, чтобы уменьшить охлаждение поверхности заготовки и нагрев инструмента. Смазка уменьшает трение, а следовательно, и неравномерность деформации и усилие.

Степень деформации при прессовании оценивают коэффициентом вытяжки, равным отношению площади сечения заготовки к площади сечения готового изделия, т. е.

$$\lambda_{\text{прес}} = \frac{F_0}{F_1}, \quad (52)$$

где $\lambda_{\text{прес}}$ – коэффициент вытяжки при прессовании;

F_0 и F_1 – соответственно площадь поперечного сечения заготовки до прессования и после прессования, мм².

Или степень деформации оценивается истинной деформацией, являющейся натуральным логарифмом коэффициента вытяжки:

$$\delta_{\text{прес}} = \ln \frac{F_0}{F_1}, \quad (53)$$

где $\delta_{\text{прес}}$ – истинная деформация при прессовании.

Оба показателя степени деформации являются условными. В действительности степень деформации различна по сечению и по длине прутка.

Повышение степени деформации увеличением сечения заготовки или уменьшением сечения изделия приводит к неравномерности деформации. Однако при высоких степенях деформации разница в свойствах частей прессованного изделия, получивших различную степень деформации, будет уменьшаться в связи с уменьшением интенсивности упрочнения с ростом степени деформации. Поэтому прессование осуществляют большими степенями деформации для получения изделий с равномерными свойствами. Если прессованное изделие в дальнейшем не подвергается обработке давлением (прокатка, волочение), то вытяжка должна быть не менее десятикратной; если прессуют заготовку для дальнейшей обработки давлением, то вытяжка должна быть не менее пятикратной.

Скорость прессования ϑ_n и скорость истечения ϑ_k согласно условию постоянства секундных объемов связаны между собой аналогично выражению (31) отношением

$$\vartheta_n \cdot F_0 = \vartheta_k \cdot F_1, \quad (54)$$

где ϑ_n – скорость течения металла в контейнере (скорость хода пуансона), м/с;
 ϑ_k – скорость истечения металла из матрицы, м/с.

Скорость прессования определяет длительность контакта прессуемого металла с инструментом. При прессовании с нагревом заготовки для уменьшения охлаждения металла и разогревания инструмента скорость прессования должна быть большой (чем больше скорость, тем равномернее деформация). Однако при повышении скорости прессования увеличивается сопротивление деформации и требуемое усилие. При прессовании сплавов, имеющих узкий температурный интервал пластичности, увеличение скорости прессования приводит к снижению пластичности в связи с повышением температуры из-за выхода тепла деформации.

3. При прессовании по сравнению с прокаткой получается больший расход металла из-за необходимости осуществлять прессование не до конца, оставляя пресс-остаток.

Указанные преимущества и недостатки прессования ограничивают область его применения производством профилей из малопластичных металлов и сплавов, профилей сложной формы, при мелкосерийном изготовлении профилей.

Усилие прессования складывается из следующих основных составляющих:

- а) усилия, затрачиваемого на формоизменение металла в обжимающей части;
- б) усилия, затрачиваемого на перемещение частиц металла в пластической зоне, т.е. в объеме слитка вне обжимающей части;
- в) усилий на преодоление трения по контактными поверхностям контейнера и матрицы.

Полное усилие прессования – сумма этих составляющих.

Силовые условия прессования определяются свойствами деформируемого металла, температурным режимом, размерами заготовки, скоростью и степенью деформации, величиной контактного трения, геометрией инструмента. К сожалению, в настоящее время еще не разработана методика, позволяющая связать все эти факторы в математическое выражение для определения усилий прессования. Поэтому приходится методами расчета, лишь приближенно отражающими условия деформации.

Хорошие результаты при определении усилия выдавливания металла с прямым истечением дает формула Е.П. Унксова, которая имеет следующий вид:

$$P_{\text{прес}} = F_0 \cdot \sigma_s \cdot \left[\frac{2 \cdot l_0}{D_0} + \frac{1}{\alpha} \cdot \ln \frac{F_0}{F_1} + 4 \cdot \frac{f \cdot l_k}{D_1} \right], \quad (56)$$

где $P_{\text{прес}}$ – усилие прессования, МН;

σ_s – сопротивление металла пластической деформации при прессовании, МПа;

l_0 – длина заготовки в момент начала выхода металла из формующей цилиндрической части матрицы, мм;

D_0, D_1 – соответственно диаметр заготовки и диаметр изделия (диаметр цилиндрической части очка матрицы), мм;

α – угол при вершине конуса матрицы, рад;

l_k – длина цилиндрической части очка матрицы, мм.

Задача 37. Рассчитать усилие при прессовании заготовки диаметром 200 мм, длиной 500 мм на круглый профиль диаметром 60 мм, если угол конуса матрицы 70° , длина калибрующего очка матрицы 20 мм, сопротивление металла деформации 90 МПа, коэффициент трения 0,1.

Решение: Определяем площади поперечного сечения исходной заготовки и готового изделия. Из геометрии известно, что площадь круга определяется из выражения

$$F_0 = \frac{\pi \cdot D_0^2}{4} = \frac{3,14 \cdot 200^2}{4} = 31400 \text{ мм}^2;$$

$$F_1 = \frac{\pi \cdot D_1^2}{4} = \frac{3,14 \cdot 60^2}{4} = 2826 \text{ мм}^2.$$

В одном радиане 57,3 градуса. Поэтому для того, чтобы перевести угол конуса матрицы в радианы, необходимо заданное значение поделить на 57,3

$$\alpha = \frac{70}{57,3} = 1,22 \text{ рад.}$$

Усилие прессования находим по формуле (56)

$$\begin{aligned} P_{\text{прес}} &= F_0 \cdot \sigma_s \cdot \left[\frac{2 \cdot l_0}{D_0} + \frac{1}{\alpha} \cdot \ln \frac{F_0}{F_1} + 4 \cdot \frac{f \cdot l_k}{D_1} \right] = \\ &= 31400 \cdot 10^{-6} \cdot 90 \cdot \left[\frac{2 \cdot 500}{200} + \frac{1}{1,22} \cdot \ln \frac{31400}{2826} + 4 \cdot \frac{0,1 \cdot 20}{60} \right] = 20,08 \text{ МН.} \end{aligned}$$

Задачи для самостоятельного решения

Задача 38. Заготовка диаметром 30 мм подвергается прессованию на круглый профиль диаметром 20 мм. Определить коэффициент вытяжки и истинную деформацию при прессовании данной заготовки.

Задача 39. Определить коэффициент вытяжки и истинную деформацию при прессовании заготовки диаметром 100 мм на прямоугольный профиль размерами 60×70 мм.

Задача 40. Определить истинную деформацию и сопротивление металла деформации при прессовании заготовки диаметром 250 мм, длиной 600 мм, если коэффициент вытяжки составил 2,5; усилие прессования 15 МН; угол конуса матрицы 65° ; длина калибрующего очка 25 мм; коэффициент трения 0,2.

Задача 41. Круглая заготовка диаметром 80 мм прессуется со скоростью 4 м/с на профиль с сечением равнобокой трапеции со сторонами 60 и 70 мм и высотой 50 мм. Рассчитать скорость истечения металла из матрицы в процессе прессования.

Задача 42. Круглая заготовка диаметром 20 мм и длиной 700 мм подвергается прессованию с коэффициентом вытяжки равным 4. Рассчитать усилие прессования, если полуугол конуса матрицы 60° , длина калибрующего очка матрицы 10 мм, сопротивление металла деформации 105 МПа, коэффициент трения 0,12.

Задача 43. Заготовка диаметром 50 мм подвергается прессованию на круглый профиль диаметром 35 мм. Определить коэффициент вытяжки и истинную деформацию при прессовании данной заготовки.

3 Волочение. Основные характеристики процесса

3.1 Определение деформационных и энергосиловых параметров волочения

Волочение металлов применяют при производстве изделий малых сечений и относительно большой длины – проволоки, труб малого диаметра и с тонкой стенкой.

Широко применяют также волочение относительно крупных сечений горячекатаных прутков с целью повышения точности размеров сечения и улучшения качества поверхности. Волочение изделий почти всегда осуществляют в холодном состоянии. При горячей прокатке трудно обеспечить высокую точность размеров сечения в основном из-за упругих деформаций клеток и их деталей; поверхность горячекатаных прутков покрыта окалиной, частично вдавленной в поверхность прутка. При волочении после удаления окалины поверхность прутков улучшается, точность размеров повышается.

Таким образом, пластическая обработка металла волочением имеет ряд явных преимуществ перед другими способами производства изделий. Основные из них следующие:

1. Получение изделий с размерами поперечного сечения высокой точности и высоким качеством поверхности;
2. Возможность изготовления полых и сплошных изделий, производство которых другими способами не всегда представляется возможным (например, прутки значительной длины);
3. В сочетании с термической обработкой волочение обеспечивает придание изделиям высоких механических свойств.

Исходным материалом при волочении является катанка, прутки и трубы, получаемые горячей прокаткой или прессованием.

При волочении передний конец заготовки заостряют, вставляют в коническое отверстие волоки меньшего диаметра, чем заготовка, захватывают клещами и протягивают через волоку (рисунок 9). При этом площадь сечения прутка уменьшается, длина увеличивается.

Волочение отличается от других процессов обработки металлов давлением тем, что коэффициент вытяжки при волочении ограничивается прочностью выходящего конца изделия и практически не превышает 1,3-1,5.

Важнейшей характеристикой процесса волочения является напряжение волочения. Оно используется для проверки надежности применяемых и разработки новых режимов волочения, для определения усилия волочения с целью подбора соответствующего волочительного оборудования.

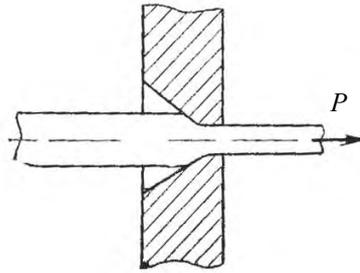


Рисунок 9 – Схема волочения круглого сплошного профиля

Напряжением волочения называется продольное напряжение растяжения, возникающее от действия приложенной внешней силы в переднем вышедшем из очага деформации конце обрабатываемого изделия.

Напряжение волочения определяется по формуле:

$$\sigma_{\text{вол}} = \frac{P}{F_1}, \quad (57)$$

где $\sigma_{\text{вол}}$ – напряжение волочения, МПа;

P – усилие волочения (усилие, прикладываемое к прутку), МН;

F_1 – площадь поперечного сечения изделия после волочения, м².

На основании многочисленных экспериментальных данных можно считать, что основное влияние на напряжение и усилие волочения оказывают следующие факторы:

- сопротивление металла деформации (прочностные характеристики протягиваемого металла);
- величина деформации за проход (переход);
- форма продольного профиля канала волокни;
- условия трения на контактной поверхности (свойства смазки и способ ее ввода в зону деформации);
- форма начального и конечного поперечного сечения протягиваемого изделия;
- противонапряжение (которое прикладывают к заднему концу заготовки для снижения трения);
- скорость и температура волочения;
- диаметр протягиваемого изделия.

Напряжение волочения должно быть меньше величины сопротивления пластической деформации металла после его выхода из деформационной зоны. В противном случае пластическая деформация будет происходить и после выхода

металла из волокни, что может привести к образованию шейки и разрыву переднего конца обрабатываемого изделия, что недопустимо.

Напряжение волочения определяют либо экспериментально, либо по теоретическим, полуэмпирическим и эмпирическим формулам.

Упрощенная формула И.Л. Перлина для определения напряжения волочения сплошных круглых профилей

$$\sigma_{\text{вол}} = \frac{1}{\cos^2 \frac{\alpha + \rho}{2}} \cdot \left\{ \sigma_{\text{сcc}} \cdot \frac{a + 1}{a} \cdot \left[1 - \left(\frac{D_1}{D_0} \right)^{2 \cdot a} \right] + \sigma_{\text{д}} \cdot \left(\frac{D_1}{D_0} \right)^{2 \cdot a} \right\}, \quad (56)$$

где α – угол канала волокни, град;

ρ – угол трения (угол, под которым на поверхности заготовки в очаге деформации действует напряжение трения), град;

$\sigma_{\text{сcc}}$ – среднее значение сопротивления металла деформации, МПа;

$\sigma_{\text{д}}$ – напряжение противонапряжения, МПа;

D_1, D_0 – диаметр соответственно протянутого изделия и заготовки, мм.

a – коэффициент, равный

$$a = \cos^2 \rho \cdot (1 + f \cdot \text{ctg} \alpha_{\text{np}}), \quad (57)$$

где f – коэффициент трения;

α_{np} – приведенный угол канала волокни, град.

Приведенный угол учитывает влияние на напряжение волочения калибрующего участка волочильного канала и определяется по формуле

$$\text{tg} \alpha_{\text{np}} = \frac{(D_0 - D_1) \cdot \text{tg} \alpha}{(D_0 - D_1) + 2 \cdot l_{\text{к}} \cdot \text{tg} \alpha}, \quad (58)$$

где $l_{\text{к}}$ – длина калибрующего участка волочильного канала (рисунок 9), мм, определяемая по формуле:

$$l_{\text{к}} = D_1 \cdot m \quad (59)$$

где m – коэффициент, выбираемый в пределах (0,1-1,5).

Степень деформации при волочении определяется выражением:

$$\varepsilon_{\text{вол}} = \frac{F_0 - F_1}{F_0} = \frac{D_0^2 - D_1^2}{D_0^2}, \quad (60)$$

где $\varepsilon_{\text{вол}}$ – степень деформации при волочении;

F_0 – площадь поперечного сечения исходной заготовки, мм².

Степень деформации можно изменить за счет изменения начального сечения, за счет изменения конечного сечения или одновременного изменения того и другого сечения.

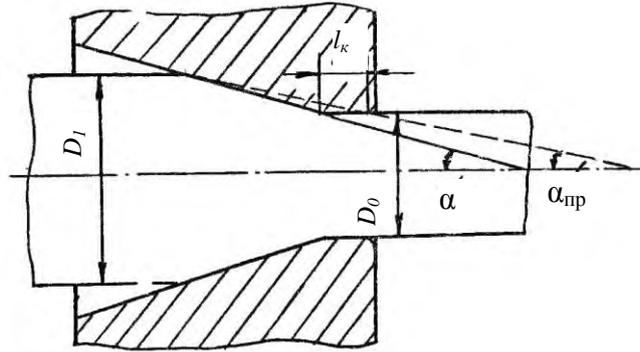


Рисунок 10 – Схема к определению приведенного угла волокни

Величина деформации влияет на напряжение волочения как непосредственно (в соответствии с формулой), так и вследствие изменения сопротивления деформации обрабатываемого металла, а также изменения размеров контактной поверхности.

Так, при увеличении степени деформации возрастает величина среднего сопротивления деформации, что вызывает рост напряжения волочения.

Среднее сопротивление деформации определяется из выражения:

$$\sigma_{\text{сcc}} = \frac{\sigma_{s0} + \sigma_{s1}}{2}, \quad (61)$$

где σ_{s0} и σ_{s1} – сопротивление деформации металла соответственно до и после деформации, МПа.

Сопротивление деформации металла после волочения определяется из выражения:

$$\sigma_{s1} = \sigma_{s0} + b \cdot (\varepsilon_{\text{вол}} \cdot 100)^c, \quad (62)$$

где b, c – коэффициенты для конкретной марки стали (приложение А).

Увеличение деформации при сохранении профиля волокна вызывает прирост контактной поверхности и контактных сил трения, которые в свою очередь влияют на величину напряжения волочения.

Коэффициент вытяжки при волочении рассчитывается аналогично коэффициенту вытяжки при прессовании

$$\lambda_{\text{вол}} = \frac{F_0}{F_1}. \quad (63)$$

Обжатие и вытяжка при волочении связаны между собой следующими соотношениями, основанными на законе постоянства объема металла

$$\varepsilon_{\text{вол}} = \frac{(\lambda_{\text{вол}} - 1)}{\lambda_{\text{вол}}}; \quad (64)$$

$$\lambda_{\text{вол}} = \frac{1}{(1 - \varepsilon_{\text{вол}})}. \quad (65)$$

По сравнению с показателем обжатия коэффициент вытяжки точнее характеризует степень деформации металла при волочении, причем с повышением степени деформации разница между показателями деформации увеличивается.

Волочение можно вести либо через одну волоку, либо при помощи специальных устройств одновременно через несколько волок. В первом случае волочение называют однократным, а во втором – многократным. В последнем случае зависимость между начальным и конечным сечениями протягиваемой заготовки, числом протяжек и средней вытяжкой за переход выражается формулой

$$n = \frac{(\ln F_0 - \ln F_n)}{\ln \lambda_{\text{cp}}}, \quad (66)$$

$$\lambda_{\text{cp}} = \sqrt[n]{\lambda_{\text{общ}}} = \sqrt[n]{\lambda_1 \cdot \lambda_2 \cdot \dots \cdot \lambda_n}, \quad (67)$$

где $\lambda_{\text{cp}}, \lambda_{\text{общ}}$ – средний и общий коэффициенты вытяжки при волочении;

$\lambda_1 - \lambda_n$ – коэффициенты вытяжки в каждом переходе;

F_n – площадь поперечного сечения прутка после n переходов, мм².

Одним из важных технологических показателей процесса волочения является так называемый коэффициент запаса

$$\gamma_3 = \frac{\sigma_{s1}}{\sigma_{вол}}. \quad (68)$$

С учетом того, что расчетные формулы для определения напряжения волочения многие факторы, от которых оно зависит, учитывают приближенно, а некоторые не учитывают вообще (наличие поверхностных и внутренних дефектов, ослабляющих вытягиваемый конец изделия, несовпадение осей протягиваемого изделия и канала волокна, вибрация, динамические нагрузки и т.п.), рекомендуемая величина коэффициента запаса при волочении прутков, толстостенных труб и профилей $\gamma_3 = 1,3 - 1,4$; при волочении тонкостенных труб и профилей, а также проволоки малых диаметров $\gamma_3 = 1,6 - 1,8$.

Задача 44. Определить диаметр изделия при волочении заготовки диаметром 15 мм, если степень деформации составила 30 %.

Решение. Рассчитываем коэффициент вытяжки при волочении по формуле (65)

$$\lambda_{вол} = \frac{1}{(1 - \varepsilon_{вол})} = \frac{1}{(1 - 0,3)} = 1,43.$$

Зная коэффициент вытяжки и начальный диаметр заготовки, можно найти диаметр полученного изделия, используя формулу (63)

$$\lambda_{вол} = \frac{F_0}{F_1} = \frac{D_0^2}{D_1^2};$$

$$D_1 = \sqrt{\frac{D_0^2}{\lambda_{вол}}} = \sqrt{\frac{15^2}{1,43}} = 12,5 \text{ мм}.$$

Задачи для самостоятельного решения

Задача 45. После волочения получили катанку диаметром 7 мм. Определить степень деформации при волочении, если коэффициент вытяжки составил 1,36.

Задача 46. Рассчитать число переходов при волочении заготовки диаметром 45 мм на диаметр 20 мм, если средний коэффициент вытяжки составил 1,38.

Задача 47. Исходную заготовку с начальным диаметром 58 мм подвергают многократному волочению на диаметры 53, 48, 42 мм соответственно. Определить коэффициенты вытяжки и степень деформации в каждом переходе, а также общий и средний коэффициенты вытяжки.

Задача 47. Определить усилие и коэффициент запаса при волочении заготовки из стали 10 с диаметра 7 мм на диаметр 5 мм, если напряжение волочения составило 230 МПа.

Задача 48. Рассчитать напряжение при волочении заготовки из стали 08кп диаметром 5,5 мм на диаметр 3 мм, если коэффициент трения составил 0,08; полуугол конуса волокна 5° .

Задача 49. Процесс холодного волочения осуществляется на волочильном стане со скоростью 1,5 м/с с противонапряжением 2 МПа через отверстие волокна, полуугол конуса которой 9° . Длина калибрующего пояска 1 мм. Волочению подвергается круглый профиль из стали У10А, заготовка до волочения имеет диаметр 16 мм, после волочения 12 мм. Процесс волочения осуществляется со смазкой, влияние которой учитывается коэффициентом трения 0,056. Определить деформационные и силовые параметры волочения.

4 Ковка. Основные характеристики процесса

4.1 Определение деформационных и энергосиловых параметров при осадке и протяжке

Ковка представляет собой широко распространенный способ обработки металлов давлением с целью получения изделий, называемых поковками.

В качестве исходных заготовок дляковки применяют слитки и прокат.

При получении изделий ковкой исходный продукт обрабатывают многократным и прерывным воздействием универсального инструмента – молота или прессы до приобретения им заданной формы и размеров.

Технологические процессыковки представляют собой различное сочетание и последовательность основных и вспомогательных операций, таких как осадка, протяжка, прошивка, гибка, кручение, рубка, кузнечная сварка, а также операции отделки и термической обработки (если это требуется).

Основными операциямиковки являются осадка и протяжка.

Осадка – это операция, при которой за счет обжатия по высоте увеличивается площадь поперечного сечения заготовки, перпендикулярного к деформирующей силе (рисунок 11).

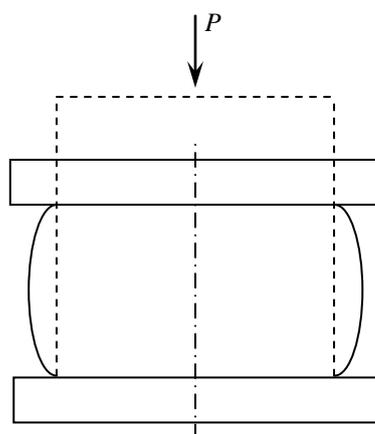


Рисунок 11 – Схема осадки

Осадка является основной операцией для получения формы поковки, но может применяться также как промежуточная для устранения литой структуры или анизотропии свойств металла.

Во избежание продольного изгиба заготовки необходимо, чтобы при осадке выполнялось следующее условие

$$h_0 \leq 2,5 \cdot D_0 (b_0),$$

где h_0, b_0, D_0 – соответственно начальная толщина, ширина или диаметр заготовки, мм.

Деформация металла при осадке характеризуется коэффициентом ковки

$$K = \frac{h_0}{h_1} = \frac{F_1}{F_0}, \quad (69)$$

где K – коэффициент ковки при осадке;

h_1 – толщина поковки после осадки, мм;

F_0, F_1 – площадь поперечного сечения заготовки и поковки, мм².

Разновидностью осадки является высадка части заготовки (рисунок 12). Высадка может быть осуществлена при нагревании только определенной части заготовки (на конце или в середине) или ограничением деформации части заготовки кольцевым инструментом.

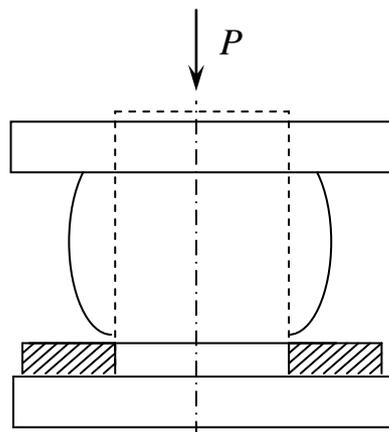


Рисунок 12 – Схема высадки

Очень важным условием при осадке является условие плоской (двумерной) деформации, т.е. деформации без уширения: при $\frac{l_0}{b_0} \geq 8$ (где l_0 и b_0 – соответственно начальная длина и ширина заготовки, мм) деформация является двумерной, и металл течет только в направлении длины.

Усилие при осадке определяется по той же формуле, что и при прокатке

$$P = P_{cp} \cdot F_k.$$

Однако контактная площадь определяется иначе

$$F_k = b_1 \cdot l_1, \quad (70)$$

где b_1, l_1 – ширина и длина полученной поковки, мм.

Среднее давление металла на инструмент можно определять, как и при прокатке по формуле (46)

$$P_{\text{ср.осад}} = 1,15 \cdot n_\sigma \cdot \sigma_s.$$

Однако в отличие от процесса прокатки коэффициент напряженного состояния при ковке определяется весьма сложно и в зависимости от отношения $\frac{b_1}{h_1}$.

определяется по-разному.

Таким образом

1) при отношении $\frac{b_1}{h_1} > 2 + \left| \frac{\ln(2 \cdot f)}{f} \right|$ и $0 < f < 0,5$:

$$n_\sigma = \frac{h_1}{f \cdot b_1} \cdot \left\{ \frac{1}{2 \cdot f} - 1 - \frac{f}{3} + \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{b_1}{h_1} - \left| \frac{\ln(2 \cdot f)}{f} \right| \right) \cdot \left[1 + \frac{f}{2} \cdot \left(\frac{b_1}{h_1} - \left| \frac{\ln(2 \cdot f)}{f} \right| \right) \right] \right\}, \quad (71)$$

где h_1 – толщина поковки, мм;

f – коэффициент трения в процессековки;

2) при $2 < \frac{b_1}{h_1} < 2 + \left| \frac{\ln(2 \cdot f)}{f} \right|$ и $0 < f < 0,5$:

$$n_\sigma = \frac{h_1}{f \cdot b_1} \cdot \left[\left(1 + 2 \cdot f + \frac{4}{3} \cdot f^2 \right) \cdot e^{2 \cdot f \cdot \left(\frac{b_1}{2 \cdot h_1} - 1 \right)} - 1 \right]; \quad (72)$$

3) при $\frac{b_1}{h_1} \leq 2$ и $0 < f < 0,5$:

$$n_\sigma = 1 + \frac{f}{3} \cdot \frac{b_1}{h_1}; \quad (73)$$

4) при $\frac{b_1}{h_1} \geq 2$ и $f \geq 0,5$:

$$n_{\sigma} = 1 + \frac{1}{4} \cdot \frac{b_1}{h_1} - \frac{1}{3} \cdot \frac{h_1}{b_1}. \quad (74)$$

Сопrotивление металла деформации при ковке необходимо определять по формуле Л.В. Андреюка – Г.Г. Тюленева (47) с использованием таблицы приложения А.

Скорость деформации при операцияхковки определяется из выражения

$$\xi = \frac{\varepsilon_h \cdot \vartheta_{\text{осад}}}{\Delta h}, \quad (75)$$

где ε_h – высотная деформация при осадке (формула (2));

Δh – абсолютное обжатие, мм (формула (1));

$\vartheta_{\text{осад}}$ – скорость осадки, м/с.

Протяжка – операция, в процессе которой длина заготовки увеличивается за счет уменьшения ее поперечных размеров при последовательных по длине нажатиях бойками.

При протяжке в отличие от осадки заготовку обрабатывают участками при последовательной подачи ее под бойки молота или прессы (рисунок 13).

Если сечение нужно уменьшать за счет толщины и ширины заготовки, то после каждой подачи производится осаживание толщины и затем после кантовки на 90^0 – осадки ширины.

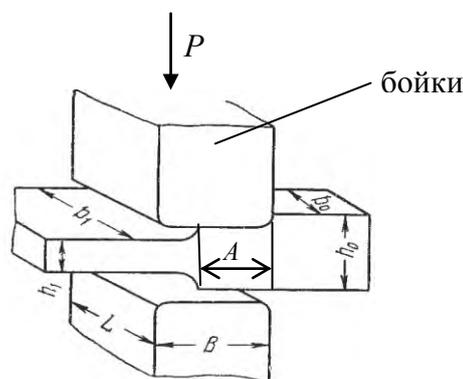


Рисунок 13 – Схема протяжки

Металл, осаживаемый участками по высоте, течет в направлении длины и ширины. К деформируемому за каждый обжим участку с обеих сторон прижимают участки, не подвергающиеся непосредственно действию инструмента. Эти участки сдерживают течение металла в направлении ширины и принудительно выравнивают деформации в длину по всей ширине.

Так как целью протяжки является увеличение длины за счет уменьшения сечения, необходимо обжим осуществлять так, чтобы течение металла в ширину было минимальным. Согласно закону наименьшего сопротивления, этого можно достичь, производя обжим малыми подачами при малом отношении подачи к ширине заготовки. Однако при малых подачах увеличивается число обжимов и снижается производительность.

Для интенсификации процесса протяжки и получения достаточно гладкой поверхности подачу следует принимать в следующих пределах

$$A = (0,4 \div 0,8) \cdot B, \quad (76)$$

где A – величина подачи заготовки, мм;

B – ширина бойков, мм.

Для определения размеров заготовки после обжатия вводится понятие уковки. Уковка – это коэффициент вытяжки за обжатие

$$\gamma = \frac{F_0}{F_1}, \quad (77)$$

где γ – коэффициент уковки при протяжке;

F_0, F_1 – площадь поперечного сечения заготовки до протяжки и поковки после протяжки, мм².

Кроме того, при осадке и протяжке показателем деформации является высотная деформации:

$$\varepsilon_h = \frac{h_0 - h_1}{h_0}.$$

Удельное усилие (т.е. приходящееся на единицу площади или по- другому среднее давление) при протяжке определяется по формуле:

$$P_{\text{ср.прот}} = 1,15 \cdot \sigma_s \cdot \left(1 + \frac{f \cdot A}{3 \cdot h_0} \right). \quad (78)$$

Задача 50. Определить контактную площадь при осадке заготовки толщиной 50 мм, шириной 150 мм и длиной 1800 мм, если степень деформации составила 27 %.

Решение. Для нахождения толщины поковки после осадки воспользуемся формулой (2)

$$h_1 = h_0 \cdot (1 - \varepsilon_h) = 50 \cdot (1 - 0,27) = 36,5 \text{ мм.}$$

Проверяем условие двумерной деформации

$$\frac{l_0}{b_0} = \frac{1800}{150} = 12 > 8.$$

Т.е. уширение при данных условиях отсутствует.

Тогда конечная длина поковки с учетом постоянства объема металла при обработке давлением

$$l_1 = \frac{h_0 \cdot l_0}{h_1} = \frac{50 \cdot 1800}{36,5} = 2466 \text{ мм.}$$

Контактная площадь по формуле (70)

$$F_k = b_1 \cdot l_1 = 150 \cdot 2466 = 369900 \text{ мм}^2.$$

Задачи для самостоятельного решения

Задача 51. При осадке заготовки размерами $100 \times 150 \times 2000$ мм коэффициент ковки составил 2. Рассчитать степень деформации, если конечная длина поковки 4500 мм.

Задача 52. Определить сопротивление металла деформации при осадке заготовки из стали марки 10 толщиной 100 мм со скоростью 0,05 м/с, если температура деформации 1100°C ; относительное обжатие 30%.

Задача 53. Рассчитать среднее давление и коэффициент напряженного состояния при осадке заготовки толщиной 80 мм, шириной 130 мм и длиной 1050 мм, если относительное обжатие составило 25%; сопротивление металла деформации 65 МПа; коэффициент трения 0,3.

Задача 54. При протяжке заготовки размерами $100 \times 100 \times 300$ мм высотная деформация составила 30%. Рассчитать коэффициент уковки, если ширина заготовки изменилась на 10 мм.

Задача 55. Определить среднее давление при протяжке заготовки из стали 15Г толщиной 250 мм, если относительное обжатие составило 28%; коэффициент трения 0,42, температура деформации 1180°C , скорость деформирования 0,1 м/с, ширина бойков 500 мм.

Список использованных источников

- 1 Основы теории обработки металлов давлением / И.И. Иванов, А.В. Соколов, В.С. Соколов, А.Е. Шелест. – М.: Инфра-М. 2007.
- 2 Обработка металлов давлением / Ю.Ф. Шевакин, В.Н. Чернышев, Р.Л. Шаталов, Н.А. Мочалов. – М.: Интермет Инжиниринг. 2005.
- 3 Кузнецов Е.В., Галкин С.П. Технологические процессы обработки металлов давлением. – М.: МИСиС. 2002.
- 4 Бахтинов В.Б. Технология прокатного производства. – М.: Металлургия. 1983.
- 5 Зотов В.Ф. Производство проката. – М.: Интермет Инжиниринг. 2000.
- 6 Громов Н.П. Теория обработки металлов давлением. – М.: Металлургия. 1978.
- 7 Грудев А.П. Теория прокатки. – М.: Металлургия. 1988.
- 8 Теория прокатки / Справочник. А.И. Целиков, А.Д. Томленов, В.И. Зюзин и др. – М.: Металлургия. 1982.

Приложение А
Табличные данные для определения сопротивления
металла деформации

Таблица А1 – Коэффициенты Л.В. Андreyока – Г.Г. Тюленева для определения сопротивления металла деформации при прокатке, осадке и протяжке

Марка стали	K	σ_0 , МПа	a	b	-c
Ст3сп	0,960	90,7	0,124	0,167	2,54
Ст5сп	0,917	89,5	0,144	0,208	3,35
10	0,934	87,6	0,125	0,266	2,46
15Г	0,842	103	0,126	0,188	2,74
35ГС	0,975	89,6	0,136	0,187	2,79
30ХГСА	0,996	92,4	0,134	0,250	3,34
15ХСНД	0,880	93,2	0,122	0,226	2,90
20ХГ2С	1,011	95,8	0,125	0,213	3,65
45	1,000	87,4	0,143	0,173	3,05
40Х	0,979	87,5	0,130	0,170	3,62
40ХН	0,935	88,5	0,134	0,234	3,47
38ХМЮА	1,016	100	0,114	0,273	3,72
У7А	0,948	78,3	0,159	0,197	2,87
У10А	0,995	80,5	0,163	0,194	3,57
60С2	0,921	105	0,153	0,197	3,46
ШХ15	1,010	79,6	0,137	0,220	4,07
15Х13	0,950	145	0,102	0,125	3,50
20Х13	0,900	136	0,132	0,210	3,26
Х17Н2	0,866	126	0,130	0,063	4,72
15Х25Т	1,028	58,5	0,124	0,052	3,70

Таблица А2 - Значения постоянных коэффициентов для определения сопротивления металла деформации при волочении

Сталь	σ_{s0} , МПа	b	c
08кп	230	3,46	0,60
10	300	2,95	0,64
45	350	8,66	0,48
65Г	400	17,6	0,35
25ХГСА	380	5,70	0,57
30ХГСА	475	8,60	0,45

Приложение Б
Химический состав марок стали

Сталь 10

C	Mn	Si	Cr	S	P	Cu	Ni	As
			не более					
0,07-0,14	0,35-0,65	0,17-0,37	0,15	0,04	0,035	0,25	0,25	0,08

Сталь 20

C	Mn	Si	Cr	S	P	Cu	Ni	As
			не более					
0,17-0,24	0,35-0,65	0,17-0,37	0,25	0,04	0,035	0,25	0,25	0,08

Сталь 25

C	Mn	Si	Cr	S	P	Cu	Ni	As
			не более					
0,22-0,30	0,50-0,80	0,17-0,37	0,25	0,04	0,035	0,25	0,25	0,08

Сталь 15Г

C	Mn	Si	Cr	S	P	Cu	Ni
			не более				
0,12-0,19	0,70-1,0	0,17-0,37	0,30	0,035	0,035	0,30	0,30

Сталь 35ГС

C	Mn	Si	Cr	S	P	Cu	Ni
			не более				
0,30-0,37	0,80-1,20	0,60-0,90	0,30	0,045	0,04	0,30	0,30

Сталь 15ХСНД

C	Mn	Si	Cr	Cu	S	P	N	As
					не более			
0,12-0,18	0,40-0,70	0,40-0,70	0,60-0,90	0,20-0,40	0,04	0,035	0,008	0,08

Сталь 40Х

C	Mn	Si	Cr	S	P	Ni	Cu
				не более			
0,36-0,44	0,50-0,80	0,17-0,37	0,80-1,10	0,035	0,035	0,30	0,30

Продолжение приложения Б

Сталь 20ХГСА

С	Mn	Si	Cr	S	P	Ni	Cu
				не более			
0,17-0,23	0,80-1,10	0,90-1,20	0,80-1,10	0,025	0,025	0,30	0,30

КУНИЦИНА НАТАЛЬЯ ГЕННАДЬЕВНА

**РАСЧЕТЫ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ
ОБРАБОТКИ МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ**

Методические указания

для проведения практических занятий

для студентов направления подготовки 22.03.02 Metallurgy,
очной и заочной форм обучения

Подписано в печать 16.09.2020 г.		
Формат 60x90 $\frac{1}{16}$ Рег. № 151	Печать цифровая Тираж 10 экз.	Уч.-изд.л. 3,5

Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»

Новотроицкий филиал

462359, Оренбургская обл., г. Новотроицк, ул. Фрунзе, 8.

E-mail: nfmisis@yandex.ru

Контактный тел. 8 (3537) 679729.