

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»
НОВОТРОИЦКИЙ ФИЛИАЛ

Кафедра металлургических технологий и оборудования

Н.Г. Куницина

РАСЧЕТ ДЕФОРМАЦИОННЫХ И ЭНЕРГОСИЛОВЫХ ПАРАМЕТРОВ ПРИ ГОРЯЧЕЙ РЕВЕРСИВНОЙ ПРОКАТКЕ

Методические указания
для выполнения домашнего задания/ контрольной работы
по дисциплине «Обработка металлов давлением»
для студентов направления подготовки
22.03.02 «Металлургия»,
всех форм обучения

Новотроицк, 2017

УДК 669.771
ББК 34.62
К 91

Рецензенты:

*Начальник прокатного цеха ООО «Уральский медный прокат»
А.В. Колестинский*

*Доцент кафедры металлургических технологий
и оборудования Новотроицкого филиала ФГАОУ ВО НИТУ «МИСиС»,
к.т.н., Е.А. Шевченко*

Куницина Н.Г. Расчет деформационных и энергосиловых параметров при горячей реверсивной прокатке: Методические указания для выполнения домашнего задания/контрольной работы по дисциплине «Обработка металлов давлением» для студентов направления подготовки 22.03.02 «Металлургия», всех форм обучения. – Новотроицк: НФ НИТУ «МИСиС», 2017. – 51с.

Методические указания для выполнения домашнего задания/контрольной работы по дисциплине «Обработка металлов давлением» предназначены для практического закрепления теоретических знаний студентами на начальном этапе обучения по направлению подготовки 22.03.02 «Металлургия».

Рассмотрена методика расчета основных технологических параметров горячей реверсивной прокатки металла.

Указания составлены в соответствии с требованиями ФГОС ВО подготовки бакалавров направления подготовки 22.03.02 «Металлургия».

Рекомендовано Методическим советом НФ НИТУ «МИСиС»

© Новотроицкий филиал
ФГАОУ ВО «Национальный
исследовательский технологический
университет «МИСиС», 2017.

Содержание

Введение.....	4
1 Теоретические основы процесса продольной прокатки.....	5
1.1 Очаг деформации при прокатке и его характеристика.....	5
1.2 Параметры деформации при прокатке.....	7
1.3 Внешнее трение при прокатке.....	12
1.4 Условие захвата металла валками при прокатке.....	14
1.5 Продольное течение металла в очаге деформации.....	17
1.6 Энергосиловые параметры прокатки.....	20
1.7 Изменение температуры металла при реверсивной прокатке.....	25
2 Пример расчета деформационных и энергосиловых параметров при горячей реверсивной прокатке.....	29
Список использованных источников.....	47
Приложение А. Варианты заданий.....	48
Приложение Б. Расчетные коэффициенты к формуле Л.В. Андреюка – Г.Г. Тюленева.....	50

Введение

Обработка металлов давлением (ОМД) – один из наиболее прогрессивных способов получения изделий из металлов. Это объясняется высокой производительностью ее основных процессов, улучшением свойств и структуры, качества поверхности и точности размеров изделий после пластической деформации. Не менее важным является ресурсосберегающий характер способов обработки давлением, т.е. значительное сокращение потерь металла в процессе производства по сравнению с другими видами обработки металлов.

Прокатка является самым производительным процессом производства готовых изделий из металла, хорошо поддающимся механизации и автоматизации.

Качество проката во многом зависит от правильности выбора технологических параметров процесса прокатки. Современное состояние теории прокатки металла позволяет определить основные технологические параметры расчетным путем – существует большое число инженерных зависимостей для их определения, выведенных при различных упрощениях, а также эмпирических формул, полученных для определенных условий протекания процесса.

Особое значение имеет определение энергосиловых параметров для повышения точности прокатки и автоматизации прокатных станов.

Расчет параметров процесса прокатки всегда делается применительно к конкретному прокатному стану с учетом его профильного сортамента. К деформационным параметрам относятся: коэффициенты деформации (коэффициенты обжатия, уширения, вытяжки), относительные деформации (относительные обжатие, уширение, удлинение), истинные деформации (истинные высотная, поперечная и продольная деформации); к энергосиловым параметрам: усилие, момент, мощность и работа прокатки.

В пособии содержатся методические указания по расчету основных технологических параметров процесса продольной прокатки на гладкой бочке. Все необходимые для расчета данные содержатся в приложении А. Вариант задания указывает преподаватель.

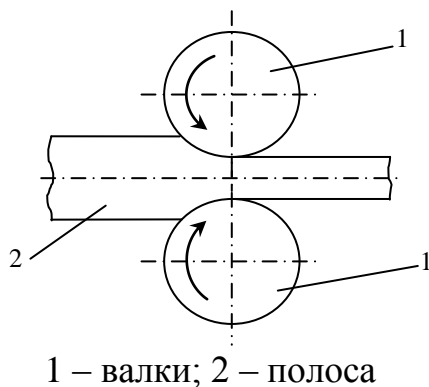
При выполнении контрольной работы/домашнего задания формируются компетенции, предусмотренные учебным планом подготовки бакалавров направления подготовки 22.03.02 «Металлургия» по дисциплине «Обработка металлов давлением».

1 Теоретические основы процесса продольной прокатки

1.1 Очаг деформации при прокатке и его характеристика

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

Простейшая и основная схема прокатки приведена на рисунке 1. Обрабатываемое тело, в общем случае называемое полосой, пропускается между двумя валками, вращающимися в противоположные стороны.



1 – валки; 2 – полоса
Рисунок 1 – Схема процесса продольной прокатки

Широкое применение прокатки объясняется рядом преимуществ ее по сравнению с другими видами обработки давлением (прессованием, волочением), а также высокой производительностью этого процесса и меньшей стоимостью получаемых изделий. Прокатка является эффективным инструментом для формирования структуры, обеспечивающей повышение эксплуатационных свойств изделий. Поэтому существует много схем термомеханической обработки, включающих прокатку.

Прокатка, как и любой другой процесс обработки давлением, основан на способности материалов пластически деформироваться без разрушения.

При прокатке изделий типа листов применяются валки, рабочая часть (бочка) которых имеет форму цилиндра без каких-либо вырезов и выступов (рисунок 2, а). Прокатку в таких валках часто называют прокаткой «на гладкой бочке». При производстве более сложных (сортовых) профилей применяются калиброванные валки, и деформация полосы осуществляется в калибрах (рисунок 2, б).

При продольной прокатке одновременно пластической деформации подвергается не весь объем обрабатываемого металла, а только его небольшая часть находящаяся вблизи валков. Эту часть металла называют очагом деформации. Различают геометрический очаг деформации и фактический очаг деформации.

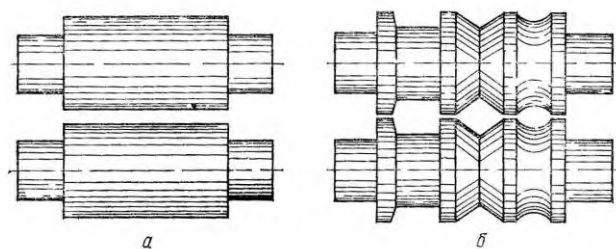


Рисунок 2 – Валки с гладкой бочкой (а) и калиброванные валки (б)

Геометрический очаг деформации характеризуется продольным и поперечным сечениями (рисунок 3). Это объем металла $ABB'A'$, ограниченный дугами окружностей валков AB и $A'B'$, плоскостями входа металла в валки AA' , выхода металла из валков BB' и боковыми гранями полосы.

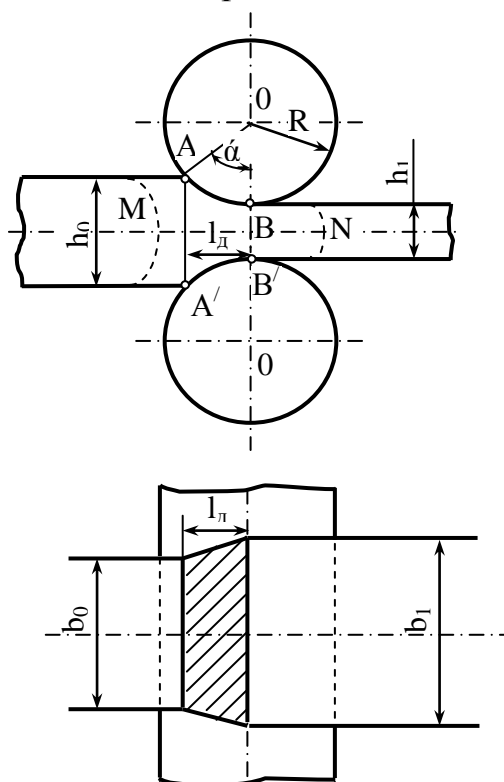


Рисунок 3 – Очаг деформации при прокатке

Однако экспериментальными исследованиями установлено, 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 Н) больше геометрического и включает в себя внеконтактные зоны.

Форма поперечного сечения очага деформации зависит от формы поперечного сечения прокатываемого профиля и может быть круглой, овальной, квадратной, а также иметь форму уголка, балки, рельса и других простых и сложных сечений. Когда деформацию осуществляют на гладких, цилиндрических валках (прокатка листов, ленты, полосы), форма поперечного сечения очага дефор-

мации имеет простейший вид прямоугольных сечений.

К основным понятиям, характеризующим очаг деформации, относятся:

- дуга АВ (также $A'B'$), по которой металл соприкасается с валком, называется *дугой захвата*;
- центральный угол АОВ (α) называется *углом захвата*;
- горизонтальная проекция дуги захвата называется *длиной очага деформации* и обозначается l_d ;
- высота сечения h_0 и h_1 ;
- начальная и конечная ширина полосы b_0 и b_1 .

Длина очага деформации определяется по формуле

$$l_d = \sqrt{R \cdot \Delta h}, \quad (1)$$

где l_d – длина очага деформации, мм;

Δh – абсолютное обжатие, мм;

R – радиус валков клетки, мм, равный

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

где D – диаметр валков, мм.

Угол захвата может быть определен по формуле

$$\alpha = \arccos\left(1 - \frac{\Delta h}{D}\right), \quad (3)$$

где α – угол захвата, град.

1.2 Параметры деформации при прокатке

В процессе прокатки изменяются линейные размеры полосы – толщина, ширина и длина.

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

Абсолютное обжатие – разность между исходной и конечной толщинами полосы

$$\Delta h = h_0 - h_1, \quad (4)$$

где h_0 – толщина полосы перед проходом между валками, мм;

h_1 – толщина полосы после прохода между валками, мм.

Относительное обжатие – отношение абсолютного обжатия к первоначальной толщине полосы

$$\varepsilon_h = \frac{\Delta h}{h_0}, \quad (5)$$

где ε_h – относительное обжатие.

При больших степенях деформации используются истинные деформации.

Истинное относительное обжатие (истинная высотная деформация) определяется как натуральный логарифм отношения исходной толщины полосы к конечной

$$\delta_h = \ln \frac{h_0}{h_1}, \quad (6)$$

где δ_h – истинное относительное обжатие.

Относительное и истинное относительное обжатия определяются в долях единицы или в процентах; в последнем случае результаты расчета по формулам (5) и (6) умножаются на 100 %.

Коэффициент обжатия – отношение начальной толщины полосы к конечной

$$\frac{1}{\eta} = \frac{h_0}{h_1}, \quad (7)$$

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

$$\Delta b = b_1 - b_0, \quad (8)$$

где Δb – абсолютное уширение, мм,

b_1 – ширина полосы после прохода, мм;

b_0 – ширина полосы перед проходом, мм.

Относительное уширение – отношение абсолютного уширения к начальной ширине полосы

$$\varepsilon_b = \frac{\Delta b}{b_0}, \quad (9)$$

где ε_b – относительное уширение.

Истинное относительное уширение (истинная поперечная деформация) – натуральный логарифм отношения конечной ширины полосы к начальной

$$\delta_b = \ln \frac{b_1}{b_0}, \quad (10)$$

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

$$\beta = \frac{b_1}{b_0}, \quad (11)$$

где β – коэффициент уширения.

Показатель уширения – отношение абсолютного уширения к абсолютному обжатию

$$a = \frac{\Delta b}{\Delta h}, \quad (12)$$

где a – показатель уширения.

Абсолютное удлинение – разность между конечной и исходной длинами полосы

$$\Delta l = l_1 - l_0, \quad (13)$$

где Δl – абсолютное удлинение, мм;

l_1 – длина полосы после прохода, мм;
 l_0 – длина полосы перед проходом, мм.

Относительное удлинение – отношение абсолютного удлинения к начальной длине полосы

$$\varepsilon_1 = \frac{\Delta l}{l_0}, \quad (14)$$

где ε_1 – относительное удлинение.

Истинное относительное удлинение (истинная продольная деформация) – натуральный логарифм отношения конечной длины полосы к исходной

$$\delta_1 = \ln \frac{l_1}{l_0}, \quad (15)$$

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 вытяжки*.

Коэффициент вытяжки – отношение длины полосы после прохода к начальной длине полосы

$$\lambda = \frac{l_1}{l_0}, \quad (16)$$

где λ – коэффициент вытяжки.

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

$$\lambda_{\text{общ}} = \frac{l_k}{l_0}, \quad (17)$$

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

l_k – конечная длина полосы после всех проходов между валками, мм.

Общий коэффициент вытяжки можно определить и из другого выражения

$$\lambda_{\text{общ}} = \lambda_1 \cdot \lambda_2 \cdot \lambda_3 \cdot \dots \cdot \lambda_n, \quad (18)$$

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

$$\lambda_{\text{общ}} = \lambda_{\text{ср}} \cdot \lambda_{\text{ср}} \cdot \lambda_{\text{ср}} \cdot \dots \cdot \lambda_{\text{ср}} = \lambda_{\text{ср}}^n, \quad (19)$$

Из формулы (19) получаем величину среднего коэффициента вытяжки

$$\lambda_{\text{ср}} = \sqrt[n]{\lambda_{\text{общ}}}, \quad (20)$$

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

Объем тела при пластической деформации 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

$$V_0 = V_1, \quad (21)$$

где V_0, V_1 – соответственно объем полосы до и после прохода в клетки,

$$h_0 \cdot b_0 \cdot l_0 = h_1 \cdot b_1 \cdot l_1,$$

откуда следует

$$\left(\frac{h_1}{h_0}\right) \cdot \left(\frac{b_1}{b_0}\right) \cdot \left(\frac{l_1}{l_0}\right) = \eta \cdot \beta \cdot \lambda = 1. \quad (22)$$

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

Исходя из условия постоянства объема металла, можно получить

$$\lambda = \frac{l_1}{l_0} = \frac{h_0 \cdot b_0}{h_1 \cdot b_1} = \frac{F_0}{F_1}, \quad (23)$$

где F_0, F_1 – площадь поперечного сечения полосы до и после прохода в клетки соответственно, мм².

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

1.3 Внешнее трение при 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 характеризуют *коэффициентом трения*, оценивающим силовое воздействие двух контактирующих тел при их перемещении относительно друг друга.

Коэффициент трения зависит от многих технологических факторов процесса прокатки, таких как материал валков, температура и скорость прокатки, химический состав деформируемого металла, наличие смазки и др., которые ли-

бо 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

$$f = k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 \cdot (0,05 - 0,0005 \cdot T_{\text{пр}}), \quad (24)$$

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;

$T_{\text{пр}}$ – температура металла при прокатке, °С.

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, представленному на рисунке 4.

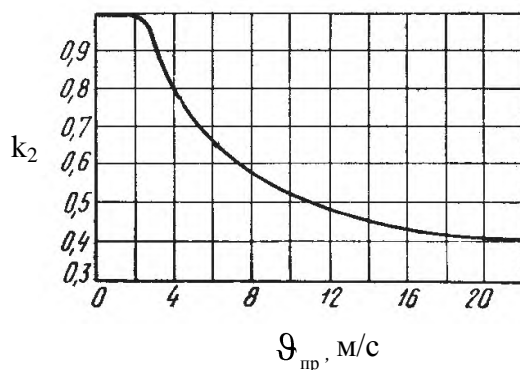


Рисунок 4 – Значения коэффициента k_2 для расчета коэффициента трения по уравнению Б.П. Бахтинова – М.М. Штернова

Для более точного расчета коэффициента k_2 можно использовать следующую формулу

$$k_2 = 1,67 \cdot v_1^{-0,25} - 0,4, \quad (25)$$

где v_1 – скорость прокатки, м/с.

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

Коэффициент, характеризующий марку стали рассчитывается по формуле

$$k_3 = 0,97926 + [C] \cdot 0,0031 \cdot [Ni] + 0,00175 \cdot [W] + 0,02457 \cdot [Mn] + 0,02144 \times \\ \times [Cr] + 0,001 \cdot [Mo], \quad (26)$$

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

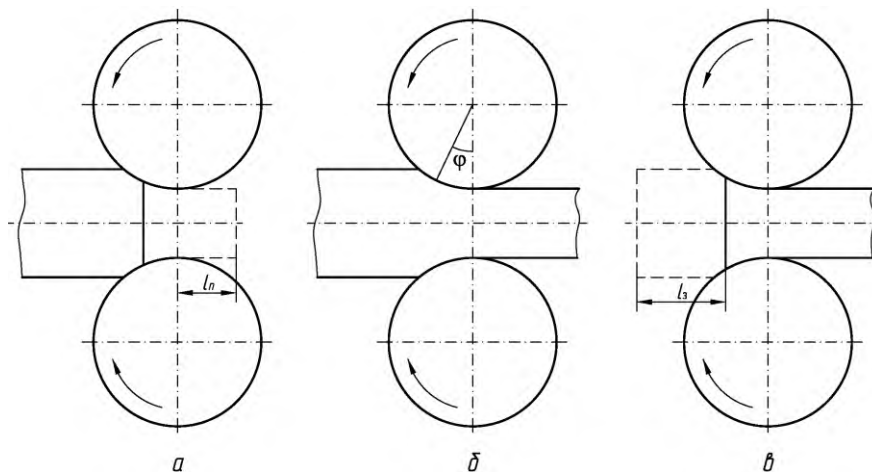
Для упрощения расчета коэффициента k_3 можно использовать данные таблицы 1.

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	X18H10Г	1,44
Ферритные	X17Ю5	1,55
Аустенитные с включениями карбидов	X15H60	1,62

1.4 Условие захвата металла валками при прокатке

При прокатке различают три периода: неустановившийся, установившийся и выброс (рисунок 5).



а – захват; б – установившийся процесс; в – выброс

Рисунок 5 – Периоды прокатки

В период захвата происходит заполнение зазора между валками металлом (рисунок 5, а). По мере продвижения переднего конца полосы через валковую щель изменяются коэффициенты деформации, площадь контактной поверхности, давление на валки и другие параметры. Процесс прокатки неустойчив. Только после того, как передний конец полосы выйдет из валков на некоторое расстояние l_n (рисунок 5, б) – процесс прокатки стабилизируется.

Также неустановившейся характер имеет процесс выброса полосы из валков (рисунок 5, в). Как только длина заднего конца полосы сократится до некоторого размера l_3 , начинают изменяться основные параметры прокатки.

Поэтому основной период прокатки установившейся (рисунок 5, б). В этот период все параметры прокатки во времени не изменяются.

При установившемся процессе прокатки через любое поперечное сечение очага деформации в единицу времени проходит одинаковое количество металла. Это условие в теории прокатки называется условием постоянства секундных объемов и математически записывается следующим образом

$$\frac{F_{\varphi} \cdot l_{\varphi}}{\tau} = F_{\varphi} \cdot \vartheta_{\varphi} = \text{const}, \quad (27)$$

где F_{φ} – площадь поперечного сечения полосы в произвольном сечении (под углом φ , мм²;

l_{φ} – продольное перемещение полосы через это сечение за время τ , мм;

ϑ_{φ} – скорость движения полосы в данном сечении, м/с.

При соприкосновении полосы с вращающимися валками между ними возникает взаимодействие (рисунок б). Валки действуют на полосу силой N , стремясь оттолкнуть металл, и силой T , стремящейся втолкнуть металл в зазор между валками. В свою очередь полоса давит на валки силой P , и тормозит их вращение силой T_0 .

Для определения захватывающей способности валков сопоставляется действие сил N и T в направлении прокатки, т.е. рассматриваются горизонтальные проекции сил

$$T_x = T \cdot \cos \alpha; N_x = N \cdot \sin \alpha. \quad (28)$$

$$\text{При } \frac{T_x}{N_x} < 1 \text{ - захват отсутствует;} \quad (29)$$

$$\text{при } \frac{T_x}{N_x} = 1 \text{ - валки буксуют;} \quad (30)$$

при $\frac{T_x}{N_x} > 1$ - металл захватывается валками. (31)

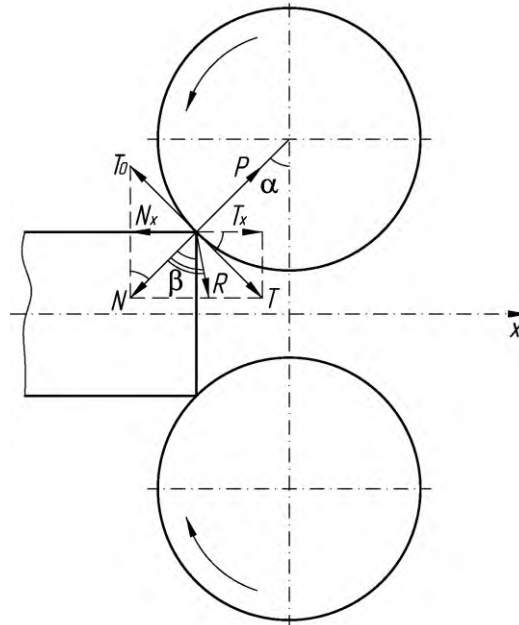


Рисунок 6 – Схема захвата металла валками для неустановившегося периода прокатки

При подстановке (28) в (31) получается

$$\frac{T \cdot \cos \alpha}{N \cdot \sin \alpha} > 1 \text{ или } \frac{T}{N} > \operatorname{tg} \alpha \quad (32)$$

Т.к. по закону Ш. Кулона – Г. Амонтона $T = f \cdot N$, то после сокращения получается

$$f > \operatorname{tg} \alpha.$$

С учетом того, что при малых углах $\operatorname{tg} \alpha \approx \alpha$, то выражение (32) преобразуется в следующий вид $f > \alpha$. Это выражение и считается условием захвата металла валками. Условие захвата можно выразить и через угол трения β (угол, образованный равнодействующей R и вертикалью)

$$\beta > \alpha. \quad (33)$$

Таким образом, чтобы произошел захват полосы валками, угол захвата должен быть меньше угла трения.

Угол захвата определяется из выражения

$$\alpha = \arccos\left(1 - \frac{\Delta h}{D}\right). \quad (34)$$

1.5 Продольное течение металла в очаге деформации

Из условия постоянства секундных объемов (27) следует:

$$F_0 \cdot \vartheta_0 = F_1 \cdot \vartheta_1, \quad (35)$$

где ϑ_0, ϑ_1 – соответственно скорости движения полосы на входе и на выходе из валков (скорость прокатки), 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 (35)

$$\begin{aligned} \vartheta_1 &= \frac{F_0 \cdot \vartheta_0}{F_1}, \\ \vartheta_1 &= \lambda \cdot \vartheta_0. \end{aligned} \quad (36)$$

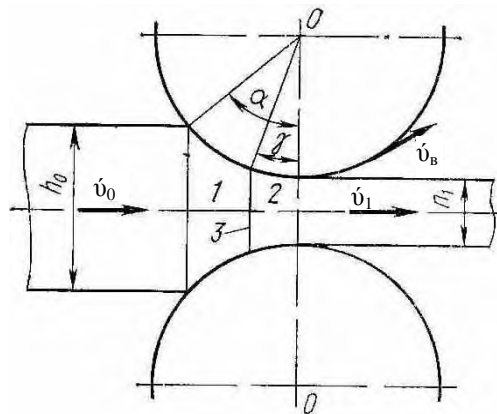
Таким образом, скорость выхода полосы из валков больше скорости входа полосы в валки на величину коэффициента вытяжки.

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 некоторое количество металла выжимается вперед по ходу прокатки; скорость этих частиц, полученная в результате деформации, складывается с окружной скоростью валков. Другая часть смещенного объема металла отжимается назад, против хода прокатки; скорость этих частиц вычитается из окружной скорости валков.

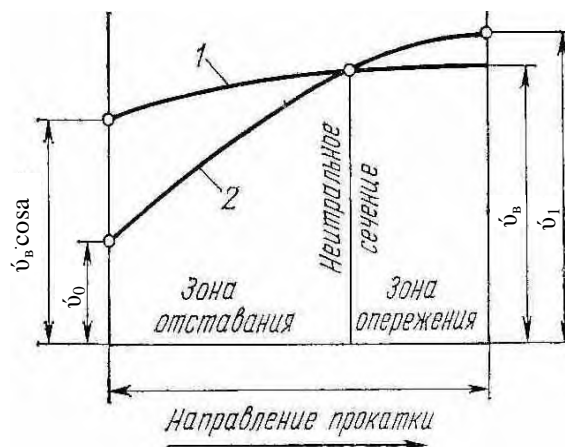
Т.е. в очаге деформации есть две зоны: зона попятного движения металла или зона отставания (где скорость полосы меньше окружной скорости валков) и зона попутного движения металла или зона опережения (где соотношение скоростей обратное) (рисунок 7).

Сечение, где скорости движения полосы и валков одинаковы, называется нейтральным сечением, а угол, соответствующий этому сечению – нейтральным углом.

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 8 представлена диаграмма, отражающая соотношение скоростей валков и металла на всем протяжении очага деформации.



1 – зона отставания; 2 – зона опережения; 3 – нейтральное сечение
Рисунок 7 – Зоны отставания и опережения в очаге деформации



1 – горизонтальная составляющая окружной скорости валков;
2 – скорость металла

Рисунок 8 – Соотношение скоростей валков и металла в очаге деформации

Опережение

$$S_{h1} = \frac{\vartheta_1 - \vartheta_B}{\vartheta_B}, \quad (37)$$

где S_{h1} – опережение;

ϑ_B – окружная скорость вращения валков, м/с.

Опережение можно выразить в процентах

$$S_{h1} = \frac{\vartheta_1 - \vartheta_B}{\vartheta_B} \cdot 100 \%.$$

Отставание

$$S_{h0} = \frac{\vartheta_B \cdot \cos \alpha - \vartheta_0}{\vartheta_B \cdot \cos \alpha} = 1 - \frac{\vartheta_0}{\vartheta_B \cdot \cos \alpha}. \quad (38)$$

С учетом формул (36) и (37) формула (38) преобразуется к виду

$$S_{h0} = 1 - \frac{\vartheta_1}{\lambda} \cdot \frac{1 + S_{h1}}{\vartheta_1 \cdot \cos \alpha} = 1 - \frac{1 + S_{h1}}{\lambda \cdot \cos \alpha}. \quad (39)$$

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 (38).

Опережение является чувствительным кинематическим показателем процесса прокатки. Изменение любого геометрического или физического фактора прокатки отражается на величине опережения. На величине 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

$$S_{h1} = \frac{\gamma^2}{2} \cdot \left(\frac{D}{h_1} - 1 \right), \quad (40)$$

где γ – нейтральный угол (рисунок 7), град.

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

$$\gamma = \frac{\alpha}{2} \cdot \left(1 - \frac{\alpha}{2 \cdot \beta} \right), \quad (41)$$

где β – угол трения, град.

1.6 Энергосиловые параметры 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 прокатки.

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

$$P = P_{\text{ср}} \cdot F_{\text{к}}, \quad (42)$$

где P – усилие прокатки, МН;

$P_{\text{ср}}$ – среднее давление металла на валки в очаге деформации, МПа;

$F_{\text{к}}$ – горизонтальная проекция поверхности контакта металла с валками (контактная площадь), м².

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 $l_{\text{д}}$ (рисунок 3, заштрихованная область).

Следовательно, площадь контактной поверхности определяется по формуле

$$F_{\text{к}} = \frac{b_0 + b_1}{2} \cdot l_{\text{д}} = b_{\text{ср}} \cdot l_{\text{д}}, \quad (43)$$

где $b_{\text{ср}}$ – 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 влияет целый ряд факторов: механические свойства металла, толщина полосы, диаметр валков, температура металла, скорость прокатки и другие факторы.

Среднее контактное давление рассчитывается по формуле

$$P_{cp} = \beta \cdot n_{\sigma} \cdot \sigma_s, \quad (44)$$

где β – коэффициент Лоде, учитывающий влияние главного нормального напряжения, действующего в направлении оси бочки валков;

n_{σ} – коэффициент напряженного состояния;

σ_s – сопротивление металла деформации, МПа.

Коэффициент Лоде возможно определить по формуле

$$\beta = 1 + \frac{f}{3} \cdot \frac{b_{cp}}{h_{cp}}, \quad (45)$$

где $h_{cp} = \frac{h_0 + h_1}{2}$ – средняя толщина полосы, мм.

Полученное по формуле (45) значение должно находиться в интервале от 1,0 до 1,15. Если значение получается больше указанного, коэффициент Лоде принимается равным 1,15.

Коэффициент напряженного состояния определяется по формуле

$$n_{\sigma} = n'_{\sigma} \cdot n''_{\sigma} \cdot n'''_{\sigma} \cdot n_b, \quad (46)$$

где n'_{σ} – коэффициент, учитывающий влияние внешнего трения на напряженное состояние в очаге деформации;

n''_{σ} – коэффициент, учитывающий влияние внешних зон на напряженное состояние в очаге деформации;

n'''_{σ} – коэффициент, учитывающий влияние натяжения на напряженное состояние в очаге деформации;

n_b – коэффициент, учитывающий влияние ширины полосы на напряженное состояние в очаге деформации.

При расчете коэффициента n'_{σ} учитывается геометрия очага деформации, а именно отношение длины очага деформации к средней толщине полосы в проходе $\frac{l_d}{h_{cp}}$:

$$\text{при } \frac{l_d}{h_{cp}} > 4 \div 5 \quad n'_{\sigma} = 1 + \frac{1}{4} \cdot \frac{l_d}{h_{cp}}, \quad (47)$$

где h_{cp} – средняя толщина полосы в проходе, мм,

$$h_{cp} = \frac{h_0 + h_1}{2}; \quad (48)$$

$$\text{при } 2 < \frac{l_d}{h_{cp}} < 4 \quad n'_\sigma = \frac{2 \cdot h_n}{\Delta h \cdot \sqrt{\delta - 1}} \cdot \left[\left(\frac{h_n}{h_1} \right)^\delta - 1 \right], \quad (49)$$

где h_n – высота нейтрального сечения, мм;
 δ – коэффициент, равный

$$\delta = 2 \cdot f \cdot \frac{l_d}{\Delta h}; \quad (50)$$

$$\frac{h_n}{h_1} = \left(\frac{1 + \sqrt{1 + \delta^2 - 1} \cdot \left(\frac{h_0}{h_1} \right)^\delta}{\delta + 1} \right)^{\frac{1}{\delta}}; \quad (51)$$

$$\text{при } \frac{l_d}{h_{cp}} < 2 \quad n'_\sigma = 1 + \frac{1}{6} \cdot \frac{l_d}{h_{cp}}. \quad (52)$$

Коэффициент n''_σ при $\frac{l_d}{h_{cp}} < 1$ определяется по формуле

$$n''_\sigma = \left(\frac{l_d}{h_{cp}} \right)^{-0,4}. \quad (53)$$

Если $\frac{l_d}{h_{cp}} > 1$, то $n''_\sigma = 1$.

Коэффициент n'''_σ если нет натяжения, равен единице.

В случае, если натяжение присутствует, то коэффициент n'''_σ рассчитывается по формуле

$$n'''_\sigma = 1 - \frac{\sigma_0 + \sigma_1}{2 \cdot P'_{cp}}, \quad (54)$$

где σ_0, σ_1 – соответственно величины заднего и переднего натяжений, МПа;
 P'_{cp} – среднее контактное давление без учета натяжения, МПа.

Коэффициент n_b зависит от отношения средней ширины полосы к длине очага деформации, т.е. $\frac{b_{cp}}{l_d}$, где b_{cp} – средняя ширина полосы, мм,

$$b_{cp} = \frac{b_0 + b_1}{2}. \quad (55)$$

При $\frac{b_{cp}}{l_d} > 5$ $n_b = 1$.

При отношении средней ширины полосы к длине очага деформации меньше пяти, коэффициент n_b рассчитывается по формуле

$$n_b = \frac{1 + \frac{3 \cdot b_{cp} - l'_d}{6 \cdot b_{cp}} \cdot f \cdot \frac{l'_d}{h_{cp}}}{1 + \frac{f}{2} \cdot \frac{l'_d}{h_{cp}}}, \quad (56)$$

где l'_d – приведенная длина очага деформации, мм,

$$l'_d = l_d \cdot \left(1 - \frac{\text{tg } \frac{\alpha}{2}}{f} \right). \quad (57)$$

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. Андреюка – Г.Г. Тюленева

$$\sigma_s = K \cdot \sigma_0 \cdot \xi^a \cdot (10 \cdot \varepsilon_h)^b \cdot \left(\frac{T_{np}}{1000} \right)^c, \quad (58)$$

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

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

Скорость деформации

$$\xi = \frac{v_1 \cdot \varepsilon_h}{l_d}. \quad (59)$$

Коэффициенты K , a , b , c , а также базовое сопротивление металла деформации для различных марок стали приведены в приложении Б.

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

$$M_{\text{пр}} = 2 \cdot P \cdot \psi \cdot l_d, \quad (60)$$

где $M_{\text{пр}}$ – момент прокатки, МН·м;

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

$$\psi = 0,5 - 0,1 \cdot \varepsilon_h. \quad (61)$$

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

Мощность прокатки рассчитывается по формуле

$$N_{\text{пр}} = \frac{M_{\text{пр}} \cdot \vartheta_b}{R}, \quad (62)$$

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

$$A_{\text{пр}} = \frac{M_{\text{пр}} \cdot l_1}{(1 + S_{h1}) \cdot R_b}, \quad (63)$$

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

1.7 Изменение температуры металла при реверсивной прокатке

Тепловой режим является одним из определяющих факторов технологии прокатки. Он непосредственно связан с режимами обжатий, скоростей, натяжений; от него зависят энергосиловые параметры прокатных станов, усилия, действующие на валки и другие детали рабочих клетей, механические свойства, точность размеров профиля, форма, структура и качество поверхности готового проката, профилировка и стойкость прокатных валков, стабильность всего технологического процесса.

Тепловой режим рассчитывается с учетом теплового баланса, зависящего от процессов конвективного, контактного, лучистого теплообмена полосы и прокатных валков с охлаждающей жидкостью, окружающей средой и деталями прокатного стана. Эти процессы протекают при горячей и холодной прокатке с существенными различиями, требующими принципиально разного подхода к методам расчета основных параметров теплового режима: температуры полосы по проходам, температуры и теплового профиля рабочих и опорных валков, расхода жидкости, необходимой для их охлаждения.

При горячей прокатке определяющим параметром теплового режима является температура полосы, предварительно нагретой до 1100–1280 °С и остывающей в процессе деформации до 800–1100 °С. Потеря тепла полосой происходит путем контактного теплообмена с валками, излучения в окружающую среду и конвекции охлаждающей воды и окружающего воздуха. Одновременно с охлаждением полосы во время прокатки происходит и некоторое повышение ее температуры за счет возникновения тепла в результате работы, затрачиваемой на деформацию и трение между металлом и валками. Температура валков при горячей прокатке на порядок ниже температуры полосы (60–120 °С) и определяется ею как независимый исходный параметр. Колебания температуры валков, вызванные изменением расхода и температуры воды, подаваемой на валки, мало влияют на температуру прокатываемого металла.

Через некоторое время после начала работы стана средняя температура валков, проводковой арматуры и других деталей стана, соприкасающихся с горячей полосой, устанавливается примерно постоянной и изменяется лишь при смене сортамента, ритма или режима прокатки.

При холодной прокатке определяющим параметром теплового режима является тепловыделение за счет пластической деформации и трения в зоне контакта полосы и валков. При этом в стан обычно поступает полоса, имеющая температуру, близкую к температуре окружающей среды (20–40 °С); по мере обжатия температура полосы увеличивается и на выходе из стана достигает 150–300 °С. Температура валков при холодной прокатке одного порядка с температу-

рой полосы и зависит от распределения выделившегося тепла между полосой и валками и интенсивности теплообмена их с охлаждающей жидкостью и окружающей средой.

Следовательно, в отличие от горячей прокатки, температура полосы при расчете теплового режима холодной прокатки не может являться независимым исходным параметром и подлежит определению одновременно с температурой валков.

Учитывая существенные различия тепловых процессов, протекающих на станах горячей и холодной прокатки, тепловой расчет этих станов проводится по-разному.

В данных методических указаниях рассмотрена только методика теплового расчета станов горячей прокатки. Расчет заключается в следующем.

Сначала задается температура нагрева металла под прокатку, являющаяся исходным параметром теплового режима стана.

Затем определяются последовательно, от прохода к проходу, изменения температуры металла, вызванные контактом с валками, гидросбивом окалины, выделением тепла за счет пластической деформации, охлаждением на рольгангах и т.д. При выполнении этих расчетов температуру валков считают заранее известной, принимая ее приближенное среднее значение. Изменения температуры металла, вызванные каждым из факторов, вычисляются независимо друг от друга. Для расчетов указанных изменений температуры используются либо эмпирические формулы, оправдавшие себя на практике, либо формулы, основанные на теории теплопередачи, уточненные по практическим данным.

При выводе уравнений для расчета снижения температуры полосы за счет потерь тепла излучением принимают следующие допущения:

- температурный градиент по толщине, ширине и длине охлаждаемого металла отсутствует;
- теплоизлучение верхней и нижней поверхностей полосы одинаково;
- теплоемкость, плотность и коэффициент излучения являются постоянными величинами, не зависящими от температуры и состояния излучающей поверхности.

Температура металла, после потерь теплоты вследствие излучения

$$T_{\text{изл}} = \frac{1000}{\sqrt[3]{\frac{3 \cdot \varepsilon_{\text{пр}} \cdot F \cdot \sigma \cdot 10^9}{c \cdot \rho \cdot V} \cdot \tau + \left(\frac{1000}{T_0 + 273}\right)^3}} - 273, \quad (64)$$

где $T_{\text{изл}}$ – температура полосы после потерь тепла излучением, °С;

τ – время охлаждения, с;

F – поверхность излучения, м^2 ;
 $\varepsilon_{\text{пр}}$ – коэффициент излучения;
 σ – коэффициент И. Стефана – Л. Больцмана, $\text{Дж}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{С})$;
 T_0 – начальная температура металла, $^\circ\text{С}$;
 c – коэффициент теплоемкости, $\text{Дж}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{С})$;
 ρ – плотность металла, $\text{кг}/\text{м}^3$;
 V – объем металла, м^3 .

Для упрощения расчета можно пользоваться формулой Г.П. Иванцова

$$T_{\text{изл}} = \frac{1000}{\sqrt[3]{\frac{0,0534}{h} \cdot \tau + \left(\frac{1000}{T_0 + 273}\right)^3}} - 273, \quad (65)$$

где h – толщина охлаждаемой полосы, мм.

Изменение температуры за счет конвективных потерь тепла определяют из выражения

$$\Delta T_{\text{конв}} = \left(T_0 - T_{\text{ср}} \right) e^{-\frac{\alpha_k \cdot F}{c \cdot \rho \cdot V} \tau} + T_{\text{ср}}, \quad (66)$$

где $\Delta T_{\text{конв}}$ – потери тепла при конвективном теплообмене, $^\circ\text{С}$.

Также для упрощения расчета изменения температуры полосы за счет конвективного теплообмена можно воспользоваться следующей формулой

$$\Delta T_{\text{конв}} = \left(T_0 - T_{\text{ср}} \right) e^{-\frac{0,445}{h} \tau} + T_{\text{ср}}. \quad (67)$$

Потери тепла конвекцией различны на разных участках технологического потока, и увеличиваются по мере увеличения скорости прокатки, уменьшения температуры и толщины полосы, т.е. увеличиваются от нагревательных печей до участка смотки.

Поэтому потери теплоты конвекцией в основном рассчитывают при расчете изменения температуры металла в чистовых клетях, в последних межклетевых промежутках, на отводящем рольганге и пренебрегают этими потерями при расчете изменения температуры полосы в черновых клетях и на промежуточном рольганге. Неучет конвективных потерь в этом случае искажает конечный результат расчета температуры не более, чем на 0,2–0,3 %.

Расчет потерь тепла полосой за счет контакта с рабочими валками основан на предположении отсутствия теплообмена с окружающей средой. Изменение температуры металла за счет потерь при контакте с валками определяется по формуле Х. Венцеля

$$\Delta T_{\text{кв}} = \frac{4,87}{h_0 + h_1} \cdot (T_0 - T_{\text{в}}) \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot h_0 \cdot l_{\text{д}}}{1000 \cdot (h_0 + h_1) \cdot v_{\text{сп}}}}, \quad (68)$$

где $\Delta T_{\text{кв}}$ – падение температуры металла в проходе за счет потерь при контакте с валками, °С;

$T_{\text{в}}$ – температура валков, °С;

$v_{\text{сп}}$ – средняя скорость прокатки в данном проходе, м/с.

Средняя скорость прокатки в проходе

$$v_{\text{сп}} = \frac{v_0 + v_1}{2}. \quad (69)$$

Скорость входа заготовки в клеть v_0 можно определить, используя выражение (35), зная скорость прокатки в данном проходе и коэффициент вытяжки в этом же проходе.

При прокатке 80–90 % работы деформации идет на повышение температуры металла, поэтому деформационный разогрев можно рассчитать по формуле

$$\Delta T_{\text{деф}} = 0,85 \cdot \frac{P_{\text{сп}}}{c \cdot \rho} \cdot \ln \frac{h_0}{h_1}. \quad (70)$$

$A_{\text{деф}}$ – работа, затрачиваемая на пластическую деформацию, Дж.

2 Пример расчета деформационных и энергосиловых параметров при горячей реверсивной прокатке

Исходные данные для расчета: Заготовка из стали 15Г толщиной 140 мм, шириной 140 мм и длиной 4000 мм, нагретая в печи до температуры 1200 °С, транспортируется по рольгангу со скоростью 1,7 м/с для прокатки к реверсивной клетки. Расстояние от печи до клетки 15 м. В клетки осуществляется 4 прохода со степенями обжатия в каждом проходе соответственно 20, 18, 15, 20 %. Относительное уширение по проходам составило 6, 6, 5, 5 % соответственно. Диаметр стальных валков клетки 700 мм, скорость прокатки в проходах составила 2,3; 2,4; 2,5; 3,0 м/с соответственно. Необходимо рассчитать для каждого прохода:

- 1) коэффициент трения;
- 2) угол захвата и проанализировать условия захвата;
- 3) в случае, если при заданных исходных данных захват невозможен, следует рассчитать степень деформации, обеспечивающую стабильный захват;
- 4) размеры полосы после прохода;
- 5) коэффициенты деформации, а также показатель уширения;
- 6) нейтральный угол;
- 7) опережение;
- 8) отставание;
- 9) усилие прокатки;
- 10) момент прокатки;
- 11) мощность прокатки;
- 12) работу прокатки.

1. Расчет ведем для центральной по длине заготовки точки. По условию задания заготовка нагревается в печи до температуры 1200 °С. После выдачи из печи она транспортируется по рольгангу к рабочей клетки, в результате чего происходит снижение температуры металла из-за потерь теплоты излучением в окружающую среду. Для определения температуры металла после потерь тепла излучением можно воспользоваться формулой (65).

Для рассматриваемого случая время охлаждения заготовки при транспортировке ее от печи до клетки будет определяться временем ее транспортировки

$$\tau_{\text{охл1}} = \frac{L}{g_{\text{тр}}} + \frac{l_0}{g_0},$$

где $\tau_{\text{охл1}}$ – время охлаждения металла при транспортировке его от печи до клетки, с;

L – расстояние от печи до клетки, м;

$\mathcal{G}_{\text{тр}}$ – скорость транспортировки заготовки от печи до клетки, м/с;

Скорость входа заготовки в клетку \mathcal{G}_{0_1} в первом проходе для облегчения расчета принимаем равной скорости транспортирования металла по рольгангу.

Следовательно, время охлаждения заготовки при ее транспортировке от печи до клетки составит

$$\tau_{\text{охл}} = \frac{15}{1,7} + \frac{4/2}{1,7} = 10 \text{ с.}$$

Теперь можно определить температуру металла перед первым проходом после потерь теплоты излучением

$$T_{\text{изл}} = \frac{1000}{\sqrt[3]{\frac{0,0534 \cdot 10}{140} + \left(\frac{1000}{1200 + 273}\right)^3}} - 273 = 1194^\circ\text{C}.$$

Таким образом, в клетку заготовка входит с температурой 1194°C .

Определяем коэффициент трения при прокатке в первом проходе по формуле (24). Коэффициент k_1 для стальных валков равен 1, коэффициент k_2 определим по формуле (25), зная, что скорость прокатки для первого прохода по условию составляет 2,3 м/с

$$k_2 = 1,67 \cdot 2,3^{-0,25} - 0,4 = 0,956.$$

Коэффициент, характеризующий состав прокатываемой стали, рассчитываем, исходя из химического состава стали 15Г:

Содержание элементов, %						
C	Si	Mn	Ni	S	P	Cr
0,12-0,19	0,17-0,37	0,70-1,00	до 0,3	до 0,035	до 0,035	до 0,3

$$k_3 = 0,97926 + \left[\text{C} \right] \cdot 0,0031 + \left[\text{Ni} \right] + 0,00175 \cdot \left[\text{W} \right] + 0,02457 \cdot \left[\text{Mn} \right] + 0,02144 \times \\ \times \left[\text{Cr} \right] + 0,001 \cdot \left[\text{Mo} \right] = 0,97926 + 0,19 \cdot (0,0031 \cdot 0,3 + 0) + 0,02457 \cdot 1 + 0,02144 \cdot 0,3 + 0 = \\ = 1,01.$$

Тогда, коэффициент трения для первого прохода составит

$$f_1 = 1 \cdot 0,956 \cdot 1,01 \cdot 0,05 - 0,0005 \cdot 1194 = 0,44.$$

2. Для определения угла захвата по формуле (34) необходимо рассчитать абсолютное обжатие в первом проходе, используя формулу (5)

$$\Delta h_1 = \varepsilon_{\text{н1}} \cdot h_0 = 0,2 \cdot 140 = 28 \text{ мм};$$

$$\alpha_1 = \arccos\left(1 - \frac{\Delta h_1}{D}\right) = \arccos\left(1 - \frac{28}{700}\right) = 16,3^\circ.$$

Для того, чтобы произошел захват металла валками, необходимо, чтобы выполнялось условие (33). Для условий задачи получается неравенство

$$0,44 > \operatorname{tg}(16,3^\circ), \text{ т.е. } 0,44 > 0,292.$$

Следовательно, можно сделать вывод, что захват заготовки валками в первом проходе произойдет, поэтому п. 3 пропускаем. Если условие захвата не выполняется, необходимо самостоятельно изменить относительное обжатие в проходе в меньшую сторону, и повторно рассчитать с его учетом абсолютное обжатие, угол захвата, и проверить условие захвата при новом обжатии.

4. Абсолютное уширение рассчитаем, используя выражение (9)

$$\Delta b_1 = \frac{\varepsilon_{b1} \cdot b_0}{100\%} = \frac{6 \cdot 140}{100} = 9 \text{ мм.}$$

5. Толщину заготовки после первого прохода определим по формуле (4)

$$h_1 = h_0 - \Delta h_1 = 140 - 28 = 112 \text{ мм.}$$

Ширину заготовки после первого прохода рассчитаем, используя формулу (8)

$$b_1 = b_0 + \Delta b_1 = 140 + 9 = 149 \text{ мм.}$$

Длину заготовки после прохода определим через условие постоянства объема металла (21)

$$h_0 \cdot b_0 \cdot l_0 = h_1 \cdot b_1 \cdot l_1, \text{ откуда } l_1 = \frac{h_0 \cdot b_0 \cdot l_0}{h_1 \cdot b_1} = \frac{140 \cdot 140 \cdot 4000}{112 \cdot 149} = 4698 \text{ мм.}$$

6. Определяем коэффициенты деформации, используя формулы (7), (11) и (16)

$$\frac{1}{\eta_1} = \frac{h_0}{h_1} = \frac{140}{112} = 1,250 ;$$

$$\beta_1 = \frac{b_1}{b_0} = \frac{149}{140} = 1,064 ;$$

$$\lambda_1 = \frac{l_1}{l_0} = \frac{4698}{4000} = 1,175 .$$

Показатель уширения рассчитываем по формуле (12)

$$a_1 = \frac{\Delta b_1}{\Delta h_1} = \frac{9}{28} = 0,321 .$$

7. Определяем нейтральный угол для первого прохода по формуле (41). Для этого находим угол трения в первом проходе

$$\beta_1 = \operatorname{arctg} f_1 = \operatorname{arctg} 0,44 = 23,7^\circ ;$$

$$\gamma_1 = \frac{\alpha_1}{2} \cdot \left(1 - \frac{\alpha_1}{2 \cdot \beta_1}\right) = \frac{16,3}{2} \left(1 - \frac{16,3}{2 \cdot 23,7}\right) = 5,3^\circ \text{ или } 0,09 \text{ рад.}$$

8. Опережение рассчитываем по формуле (40).

$$S_{h_1} = \frac{\gamma_1^2}{2} \cdot \left(\frac{D}{h_1} - 1\right) = \frac{0,09^2}{2} \cdot \left(\frac{700}{112} - 1\right) = 0,021 \text{ или } 2,1\%.$$

9. Отставание определяем по формуле (39)

$$S_{h_0} = 1 - \frac{1 + S_{h_1}}{\lambda_1 \cdot \cos \alpha_1} = 1 - \frac{1 + 0,021}{1,175 \cdot 0,96} = 0,095 \text{ или } 9,5 \%$$

10. Определяем усилие прокатки.

Длина очага деформации для первого прохода согласно выражению (1)

$$l_{д1} = \sqrt{R \cdot \Delta h_1} = \sqrt{350 \cdot 28} = 99 \text{ мм.}$$

Находим площадь контакта металла с валками в первом проходе с учетом формулы (43)

$$F_{к1} = \frac{b_0 + b_1}{2} \cdot l_{д1} = \frac{140 + 149}{2} \cdot 99 = 14305,5 \text{ мм}^2.$$

Средняя толщина полосы в первом проходе

$$h_{ср1} = \frac{h_0 + h_1}{2} = \frac{140 + 112}{2} = 126 \text{ мм.}$$

Коэффициент Лоде определяем по формуле (45)

$$\beta_1 = 1 + \frac{f_1}{3} \cdot \frac{b_{ср1}}{h_{ср1}} = 1 + \frac{0,44}{3} \cdot \frac{144,5}{126} = 1,168.$$

Т.к. коэффициент Лоде получился больше 1,15, то принимаем его равным 1,15.

Скорость деформации металла в первом проходе рассчитываем по выражению (59)

$$\xi_1 = \frac{\vartheta_1 \cdot \varepsilon_{h1}}{l_{д1}} = \frac{2,3 \cdot 0,2}{99 \cdot 10^{-3}} = 4,65 \text{ с}^{-1}.$$

Для стали 15Г коэффициенты для определения сопротивления металла деформации: $K=0,842$; $a=0,126$; $b=0,188$; $c=-2,74$; $\sigma_0 = 103 \text{ МПа}$.

Сопротивление металла деформации в первом проходе с учетом формулы (58) составит

$$\sigma_{с1} = K \cdot \sigma_0 \cdot \xi_1^a \cdot (10 \cdot \varepsilon_{h1})^b \cdot \left(\frac{T_{изл1}}{1000}\right)^c = 0,842 \cdot 103 \cdot 4,65^{0,126} \cdot (10 \cdot 0,2)^{0,188} \times$$

$$\times \left(\frac{1194}{1000}\right)^{-2,74} = 73,76 \text{ МПа.}$$

Определяем коэффициент напряженного состояния.

Отношение $\frac{l_{д1}}{h_{ср1}} = \frac{99}{126} = 0,786 < 2$, поэтому для определения n'_{σ} воспользу-

емся формулой (52)

$$n'_{\sigma1} = 1 + \frac{1}{6} \cdot \frac{l_{д1}}{h_{ср1}} = 1 + \frac{1}{6} \cdot 0,786 = 1,131.$$

Коэффициент n''_{σ} при $\frac{l_{д}}{h_{ср}} < 1$ определяется по формуле (53)

$$n''_{\sigma1} = \left(\frac{l_{д1}}{h_{ср1}} \right)^{-0,4} = 0,786^{-0,4} = 1,101.$$

Коэффициент $n'''_{\sigma1}$ равен единице, т.к. натяжение по условию задачи отсутствует.

Отношение $\frac{b_{ср1}}{l_{д1}} = \frac{144,5}{99} = 1,460 < 5$, поэтому коэффициент n_b рассчитываем

по формуле (56).

Находим приведенную длину очага деформации в первом проходе из выражения (57)

$$l'_{д1} = l_{д1} \cdot \left(1 - \frac{\text{tg} \left[\frac{\alpha_1}{2} \right]}{f_1} \right) = 99 \cdot \left(1 - \frac{\text{tg} \left(\frac{6,3^\circ}{2} \right)}{0,44} \right) = 66,8 \text{ мм.}$$

Тогда

$$n_{b1} = \frac{1 + \frac{3 \cdot b_{ср1} - l'_{д1}}{6 \cdot b_{ср1}} \cdot f_1 \cdot \frac{l'_{д1}}{h_{ср1}}}{1 + \frac{f_1}{2} \cdot \frac{l'_{д1}}{h_{ср1}}} = \frac{1 + \frac{3 \cdot 144,5 - 66,8}{6 \cdot 144,5} \cdot 0,44 \cdot \frac{66,8}{126}}{1 + \frac{0,44}{2} \cdot \frac{66,8}{126}} = 0,984.$$

Коэффициент напряженного состояния по формуле (46)

$$n_{\sigma1} = n'_{\sigma1} \cdot n''_{\sigma1} \cdot n'''_{\sigma1} \cdot n_{b1} = 1,131 \cdot 1,101 \cdot 1 \cdot 0,984 = 1,225.$$

Среднее давление металла на валки в первом проходе по выражению (44)

$$P_{ср1} = \beta_1 \cdot n_{\sigma1} \cdot \sigma_{с1} = 1,15 \cdot 1,225 \cdot 73,76 = 103,9 \text{ МПа.}$$

Усилие прокатки в первом проходе определяем по формуле (42)

$$P_1 = P_{ср1} \cdot F_{к1} = 103,9 \cdot 14305,5 \cdot 10^{-6} = 1,49 \text{ МН.}$$

10. Коэффициент плеча приложения равнодействующей силы согласно формуле (61) составит

$$\psi_1 = 0,5 - 0,1 \cdot \varepsilon_{h1} = 0,5 - 0,1 \cdot 0,2 = 0,48.$$

Момент прокатки находим по формуле (60)

$$M_{пр1} = 2 \cdot P_1 \cdot \psi_1 \cdot l_{д1} = 2 \cdot 1,49 \cdot 0,48 \cdot 99 \cdot 10^{-3} = 0,14 \text{ МН·м.}$$

11. Скорость вращения валков в первом проходе можно определить, используя выражение (37)

$$v_{в1} = \frac{v_1}{1 + S_{h1_1}} = \frac{2,3}{1 + 0,021} = 2,25 \text{ м/с.}$$

Мощность прокатки рассчитывается по формуле (62)

$$N_{пр1} = \frac{M_{пр1} \cdot v_{в1}}{R} = \frac{0,14 \cdot 2,25}{0,35} = 0,9 \text{ МВт.}$$

12. Работа прокатки рассчитывается по формуле (63)

$$A_{пр1} = \frac{M_{пр1} \cdot l_1}{(1 + S_{h1_1}) \cdot R} = \frac{0,14 \cdot 4,698}{(1 + 0,021) \cdot 0,35} = 1,84 \text{ МДж.}$$

Таким образом, определены все необходимые параметры для первого прохода.

13. Проводим расчеты для второго прохода.

Для определения температуры металла во втором проходе необходимо определить все тепловые потери в первом проходе.

Определяем потери тепла за счет контакта с валками в первом проходе. При этом принимаем температуру валков 80°C .

Средняя скорость прокатки в первом проходе

$$v_{ср1} = \frac{v_{0_1} + v_1}{2} = \frac{1,7 + 2,3}{2} = 2 \text{ м/с.}$$

Таким образом, падение температуры при контакте с валками в первом проходе согласно формуле (68)

$$\Delta T_{кв1} = \frac{4,87}{h_0 + h_1} \cdot (T_{изл1} - T_{в}) \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot h_0 \cdot l_{д1}}{1000 \cdot (h_0 + h_1) \cdot v_{ср1}}} = \frac{4,87}{140 + 112} \cdot (194 - 80) \times \\ \times \sqrt{\frac{2 \cdot 140 \cdot 99}{1000 \cdot (140 + 112) \cdot 2}} = 5^\circ\text{C.}$$

Для определения деформационного разогрева принимаем коэффициент теплоемкости для стали $683,2 \text{ Дж/(кг} \cdot ^\circ\text{C)}$, плотность металла 7850 кг/м^3 .

Тогда деформационный разогрев в соответствии с выражением (70) в первом проходе будет равен

$$\Delta T_{деф1} = 0,85 \cdot \frac{P_{ср1}}{c \cdot \rho} \cdot \ln \frac{h_0}{h_1} = 0,85 \cdot \frac{103,9 \cdot 10^6}{683,2 \cdot 7850} \cdot \ln \frac{140}{112} = 4^\circ\text{C.}$$

Зная потери температуры при контакте с валками и деформационный разогрев, можно найти температуру металла при выходе его из клетки после первого прохода

$$T_{м1} = T_{изл1} - \Delta T_{кв1} + \Delta T_{деф1} = 1194 - 5 + 4 = 1193^\circ\text{C.}$$

После выхода из клетки после первого прохода раскат начинает охлаждаться за счет излучения, поэтому так же, как и для первого прохода определяем

температуру металла перед входом в клеть во втором проходе с учетом формулы (65)

$$T_{\text{изл2}} = \frac{1000}{\sqrt[3]{\frac{0,0534 \cdot \tau_{\text{охл2}}}{h_1} + \left(\frac{1000}{T_{\text{м1}} + 273}\right)^3}} - 273,$$

где $\tau_{\text{охл2}}$ – время охлаждения раската перед вторым проходом, с.

Время охлаждения раската будет равно

$$\tau_{\text{охл2}} = \tau_{\text{вых1}} + \tau_{\text{п}} + \tau_{\text{вх2}},$$

где $\tau_{\text{вых1}}$ – время выхода полосы из клетки в первом проходе, с;

$\tau_{\text{п}}$ – время паузы, с;

$\tau_{\text{вх2}}$ – время входа полосы в клеть во втором проходе, с,

$$\tau_{\text{охл2}} = \frac{l_1/2}{g_1} + \tau_{\text{п}} + \frac{l_2/2}{g_2}.$$

Время паузы принимаем 3 с.

Для определения длины заготовки после второго прохода, необходимо определить абсолютное обжатие и абсолютное уширение во втором проходе, а также размеры заготовки после второго прохода по аналогии с расчетом для первого прохода

$$\Delta h_2 = \frac{\varepsilon_{h2} \cdot h_1}{100\%} = \frac{18 \cdot 112}{100\%} = 20 \text{ мм};$$

$$\Delta b_2 = \frac{\varepsilon_{b2} \cdot b_1}{100\%} = \frac{6 \cdot 149}{100} = 9 \text{ мм}.$$

Толщина заготовки после второго прохода

$$h_2 = h_1 - \Delta h_2 = 112 - 20 = 92 \text{ мм}.$$

Ширина заготовки после второго прохода

$$b_2 = b_1 + \Delta b_2 = 149 + 9 = 158 \text{ мм}.$$

Длина заготовки после второго прохода

$$l_2 = \frac{h_0 \cdot b_0 \cdot l_0}{h_2 \cdot b_2} = \frac{140 \cdot 140 \cdot 4000}{92 \cdot 158} = 5394 \text{ мм}.$$

Время охлаждения раската перед вторым проходом

$$\tau_{\text{охл2}} = \frac{4,698/2}{2,3} + 3 + \frac{5,394/2}{2,4} = 5,1 \text{ с}.$$

Тогда температура металла перед вторым проходом

$$T_{\text{изл}2} = \frac{1000}{\sqrt[3]{\frac{0,0534 \cdot 5,1}{112} + \left(\frac{1000}{1193 + 273}\right)^3}} - 273 = 1191^\circ\text{C}.$$

Для второго прохода

$$k_2 = 1,67 \cdot 2,4^{-0,25} - 0,4 = 0,942.$$

Коэффициент трения во втором проходе составит

$$f_2 = 1 \cdot 0,942 \cdot 1,01 \cdot 0,05 - 0,0005 \cdot 1191 \approx 0,43.$$

Угол захвата во втором проходе

$$\alpha_2 = \arccos\left(1 - \frac{\Delta h_2}{D}\right) = \arccos\left(1 - \frac{20}{700}\right) = 13,8^\circ.$$

Для условий задачи получается неравенство

$$0,43 > \text{tg}(13,8^\circ), \text{ т.е. } 0,43 > 0,246.$$

Следовательно, можно сделать вывод, что захват заготовки валками во втором проходе произойдет. Если во втором проходе условие захвата не выполняется, то необходимо задать новую величину относительного обжатия в проходе, и выполнить повторно расчет, начиная с определения абсолютного обжатия для второго прохода, т.е. повторно рассчитать время охлаждения раската перед вторым проходом, температуру металла при входе в клеть во втором проходе, коэффициент трения и угол захвата, и снова проверить условие захвата.

Определяем коэффициенты деформации во втором проходе

$$\frac{1}{\eta_2} = \frac{h_1}{h_2} = \frac{112}{92} = 1,217;$$

$$\beta_2 = \frac{b_2}{b_1} = \frac{158}{149} = 1,060;$$

$$\lambda_2 = \frac{l_2}{l_1} = \frac{5394}{4698} = 1,148.$$

Показатель уширения

$$a_2 = \frac{\Delta b_2}{\Delta h_2} = \frac{9}{20} = 0,450.$$

Угол трения

$$\beta_2 = \arctg f_2 = \arctg 0,43 = 23,3^\circ.$$

Нейтральный угол во втором проходе

$$\gamma_2 = \frac{\alpha_2}{2} \cdot \left(1 - \frac{\alpha_2}{2 \cdot \beta_2}\right) = \frac{13,8}{2} \left(1 - \frac{13,8}{2 \cdot 23,3}\right) = 4,9^\circ \text{ или } 0,086 \text{ рад.}$$

Опережение

$$S_{h_{12}} = \frac{\gamma_2^2}{2} \cdot \left(\frac{D}{h_2} - 1 \right) = \frac{0,086^2}{2} \cdot \left(\frac{700}{92} - 1 \right) = 0,024 \text{ или } 2,4\%.$$

Отставание

$$S_{h_{02}} = 1 - \frac{1 + S_{h_{12}}}{\lambda_2 \cdot \cos \alpha_2} = 1 - \frac{1 + 0,024}{1,148 \cdot 0,97} = 0,08 \text{ или } 8\%.$$

Длина очага деформации для второго прохода

$$l_{д2} = \sqrt{R \cdot \Delta h_2} = \sqrt{350 \cdot 20} = 84 \text{ мм.}$$

Площадь контакта металла с валками

$$F_{к2} = \frac{b_1 + b_2}{2} \cdot l_{д2} = \frac{149 + 158}{2} \cdot 84 = 12894 \text{ мм}^2.$$

Средняя толщина полосы во втором проходе

$$h_{ср2} = \frac{h_1 + h_2}{2} = \frac{112 + 92}{2} = 102 \text{ мм.}$$

Коэффициент Лоде

$$\beta_2 = 1 + \frac{f_2}{3} \cdot \frac{b_{ср2}}{h_{ср2}} = 1 + \frac{0,43}{3} \cdot \frac{153,5}{102} = 1,324.$$

Т.к. коэффициент Лоде получился больше 1,15, то принимаем его равным 1,15.

Скорость деформации металла во втором проходе

$$\xi_2 = \frac{\vartheta_2 \cdot \varepsilon_{h2}}{l_{д2}} = \frac{2,4 \cdot 0,18}{84 \cdot 10^{-3}} = 5,14 \text{ с}^{-1}.$$

Сопротивление металла деформации

$$\sigma_{s2} = K \cdot \sigma_0 \cdot \xi_2^a \cdot (10 \cdot \varepsilon_{h2})^b \cdot \left(\frac{T_{изл2}}{1000} \right)^c = 0,842 \cdot 103 \cdot 5,14^{0,126} \cdot (10 \cdot 0,18)^{0,188} \times \\ \times \left(\frac{1191}{1000} \right)^{-2,74} = 73,74 \text{ МПа.}$$

Отношение $\frac{l_{д2}}{h_{ср2}} = \frac{84}{102} = 0,824 < 2$, воспользуемся формулой (52)

$$n'_{\sigma2} = 1 + \frac{1}{6} \cdot \frac{l_{д2}}{h_{ср2}} = 1 + \frac{1}{6} \cdot 0,824 = 1,137.$$

Коэффициент n''_{σ} определяем также по формуле (53)

$$n''_{\sigma2} = \left(\frac{l_{д2}}{h_{ср2}} \right)^{-0,4} = 0,824^{-0,4} = 1,081.$$

Коэффициент $n'''_{\sigma2}$ равен единице.

Отношение $\frac{b_{cp2}}{l_{д2}} = \frac{153,5}{84} = 1,827 < 5$. Аналогично расчету для первого прохода

да определяем приведенную длину очага деформации во втором проходе

$$l'_{д2} = l_{д2} \cdot \left(1 - \frac{\text{tg} \left[\frac{k_2}{2} \right]}{f_2}\right) = 84 \cdot \left(1 - \frac{\text{tg} \left(\frac{3,8^\circ}{2} \right)}{0,43}\right) = 60,4 \text{ мм.}$$

Тогда

$$n_{b2} = \frac{1 + \frac{3 \cdot b_{cp2} - l'_{д2}}{6 \cdot b_{cp2}} \cdot f_2 \cdot \frac{l'_{д2}}{h_{cp2}}}{1 + \frac{f_2}{2} \cdot \frac{l'_{д2}}{h_{cp2}}} = \frac{1 + \frac{3 \cdot 153,5 - 60,4}{6 \cdot 153,5} \cdot 0,43 \cdot \frac{60,4}{102}}{1 + \frac{0,43}{2} \cdot \frac{60,4}{102}} = 0,985.$$

Коэффициент напряженного состояния

$$n_{\sigma2} = n'_{\sigma2} \cdot n''_{\sigma2} \cdot n'''_{\sigma2} \cdot n_{b2} = 1,137 \cdot 1,081 \cdot 1 \cdot 0,985 = 1,211.$$

Среднее давление металла на валки во втором проходе

$$P_{cp2} = \beta_2 \cdot n_{\sigma2} \cdot \sigma_{s2} = 1,15 \cdot 1,211 \cdot 73,74 = 102,7 \text{ МПа.}$$

Усилие прокатки во втором проходе определяем

$$P_2 = P_{cp2} \cdot F_{к2} = 102,7 \cdot 12894 \cdot 10^{-6} = 1,32 \text{ МН.}$$

Коэффициент плеча приложения равнодействующей силы

$$\psi_2 = 0,5 - 0,1 \cdot \varepsilon_{h2} = 0,5 - 0,1 \cdot 0,18 = 0,482.$$

Момент прокатки во втором проходе

$$M_{np2} = 2 \cdot P_2 \cdot \psi_2 \cdot l_{д2} = 2 \cdot 1,32 \cdot 0,482 \cdot 84 \cdot 10^{-3} = 0,11 \text{ МН·м.}$$

Скорость вращения валков во втором проходе

$$\vartheta_{в2} = \frac{\vartheta_2}{1 + S_{h1_2}} = \frac{2,4}{1 + 0,024} = 2,34 \text{ м/с.}$$

Мощность прокатки

$$N_{np2} = \frac{M_{np2} \cdot \vartheta_{в2}}{R} = \frac{0,11 \cdot 2,34}{0,35} = 0,74 \text{ МВт.}$$

Работа прокатки

$$A_{np2} = \frac{M_{np2} \cdot l_2}{(1 + S_{h1_2}) \cdot R} = \frac{0,11 \cdot 5,394}{(1 + 0,024) \cdot 0,35} = 1,66 \text{ МДж.}$$

14. Проводим расчеты для третьего прохода аналогично расчетам для второго прохода.

Определим скорость входа металла в валки во втором проходе, используя выражение (36)

$$\vartheta_{0_2} = \frac{\vartheta_2}{\lambda_2} = \frac{2,4}{1,148} = 2,09 \text{ м/с.}$$

Средняя скорость прокатки во втором проходе

$$v_{cp2} = \frac{v_{02} + v_2}{2} = \frac{2,09 + 2,4}{2} = 2,25 \text{ м/с.}$$

Таким образом, падение температуры при контакте с валками во втором проходе

$$\Delta T_{кв2} = \frac{4,87}{h_1 + h_2} \cdot (T_{изл2} - T_v) \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot h_1 \cdot l_{д2}}{1000 \cdot (h_1 + h_2) \cdot v_{cp2}}} = \frac{4,87}{112 + 92} \cdot (191 - 80) \times$$

$$\times \sqrt{\frac{2 \cdot 112 \cdot 84}{1000 \cdot (112 + 92) \cdot 2}} = 6 \text{ }^\circ\text{C.}$$

Деформационный разогрев во втором проходе

$$\Delta T_{деф2} = 0,85 \cdot \frac{P_{cp2}}{c \cdot \rho} \cdot \ln \frac{h_1}{h_2} = 0,85 \cdot \frac{102,7 \cdot 10^6}{683,2 \cdot 7850} \cdot \ln \frac{112}{92} = 3 \text{ }^\circ\text{C.}$$

Температура металла при выходе его из клетки после второго прохода

$$T_{м2} = T_{изл2} - \Delta T_{кв2} + \Delta T_{деф2} = 1191 - 6 + 3 = 1188 \text{ }^\circ\text{C.}$$

Абсолютное обжатие в третьем проходе

$$\Delta h_3 = \frac{\varepsilon_{h3} \cdot h_2}{100\%} = \frac{15 \cdot 92}{100\%} = 14 \text{ мм.}$$

Абсолютное уширение в третьем проходе

$$\Delta b_3 = \frac{\varepsilon_{b3} \cdot b_2}{100\%} = \frac{5 \cdot 158}{100} = 8 \text{ мм.}$$

Толщина заготовки после третьего прохода

$$h_3 = h_2 - \Delta h_3 = 92 - 14 = 78 \text{ мм.}$$

Ширина заготовки после третьего прохода

$$b_3 = b_2 + \Delta b_3 = 158 + 8 = 166 \text{ мм.}$$

Длина заготовки после третьего прохода

$$l_3 = \frac{h_0 \cdot b_0 \cdot l_0}{h_3 \cdot b_3} = \frac{140 \cdot 140 \cdot 4000}{78 \cdot 166} = 6055 \text{ мм.}$$

Время охлаждения раската перед третьим проходом

$$\tau_{охл3} = \frac{l_2/2}{v_2} + \tau_n + \frac{l_3/2}{v_3} = \frac{5,394/2}{2,4} + 3 + \frac{6,055/2}{2,5} = 5,4 \text{ с.}$$

Температура металла перед третьим проходом после потерь теплоты излучением

$$T_{изл3} = \frac{1000}{\sqrt[3]{\frac{0,0534 \cdot 5,4}{92} + \left(\frac{1000}{1188 + 273}\right)^3}} - 273 = 1183 \text{ }^\circ\text{C.}$$

Для третьего прохода

$$k_2 = 1,67 \cdot 2,5^{-0,25} - 0,4 = 0,928 .$$

Коэффициент трения в третьем проходе

$$f_3 = 1 \cdot 0,928 \cdot 1,01 \cdot 0,05 - 0,0005 \cdot 1183 \approx 0,43.$$

Угол захвата в третьем проходе

$$\alpha_3 = \arccos\left(1 - \frac{\Delta h_3}{D}\right) = \arccos\left(1 - \frac{14}{700}\right) = 11,5^\circ.$$

Проверяем условие захвата в третьем проходе

$$0,43 > \operatorname{tg}(11,5^\circ), \text{ т.е. } 0,43 > 0,2.$$

Таким образом, захват заготовки валками в третьем проходе также произойдет.

Определяем коэффициенты деформации в третьем проходе

$$\frac{1}{\eta_3} = \frac{h_2}{h_3} = \frac{92}{78} = 1,179;$$

$$\beta_3 = \frac{b_3}{b_2} = \frac{166}{158} = 1,051;$$

$$\lambda_3 = \frac{l_3}{l_2} = \frac{6055}{5394} = 1,123.$$

Показатель уширения

$$a_3 = \frac{\Delta b_3}{\Delta h_3} = \frac{8}{14} = 0,571.$$

Угол трения в третьем проходе

$$\beta_3 = \operatorname{arctg} f_3 = \operatorname{arctg} 0,43 = 23,3^\circ.$$

Нейтральный угол

$$\gamma_3 = \frac{\alpha_3}{2} \cdot \left(1 - \frac{\alpha_3}{2 \cdot \beta_3}\right) = \frac{11,5}{2} \left(1 - \frac{11,5}{2 \cdot 23,3}\right) = 4,3^\circ \text{ или } 0,076 \text{ рад.}$$

Опережение в третьем проходе

$$S_{h1_3} = \frac{\gamma_3^2}{2} \cdot \left(\frac{D}{h_3} - 1\right) = \frac{0,076^2}{2} \cdot \left(\frac{700}{78} - 1\right) = 0,023 \text{ или } 2,3 \%.$$

Отставание в третьем проходе

$$S_{h0_3} = 1 - \frac{1 + S_{h1_3}}{\lambda_3 \cdot \cos \alpha_3} = 1 - \frac{1 + 0,023}{1,123 \cdot 0,98} = 0,07 \text{ или } 7 \%.$$

Длина очага деформации

$$l_{д3} = \sqrt{R \cdot \Delta h_3} = \sqrt{350 \cdot 14} = 70 \text{ мм.}$$

Площадь контакта металла с валками

$$F_{к3} = \frac{b_2 + b_3}{2} \cdot l_{д3} = \frac{158 + 166}{2} \cdot 70 = 11340 \text{ мм}^2.$$

Средняя толщина полосы в третьем проходе

$$h_{\text{ср3}} = \frac{h_2 + h_3}{2} = \frac{92 + 78}{2} = 85 \text{ мм.}$$

Коэффициент Лоде

$$\beta_3 = 1 + \frac{f_3}{3} \cdot \frac{b_{\text{ср3}}}{h_{\text{ср3}}} = 1 + \frac{0,43}{3} \cdot \frac{162}{85} = 1,273.$$

Т.к. коэффициент Лоде получился больше 1,15, то принимаем его равным 1,15.

Скорость деформации металла

$$\xi_3 = \frac{\vartheta_3 \cdot \varepsilon_{h3}}{l_{\text{д3}}} = \frac{2,5 \cdot 0,15}{70 \cdot 10^{-3}} = 5,36 \text{ с}^{-1}.$$

Сопротивление металла деформации в третьем проходе

$$\sigma_{s3} = K \cdot \sigma_0 \cdot \xi_3^a \cdot (10 \cdot \varepsilon_{h3})^b \cdot \left(\frac{T_{\text{изл3}}}{1000} \right)^c = 0,842 \cdot 103 \cdot 5,36^{0,126} \cdot (10 \cdot 0,15)^{0,188} \times \\ \times \left(\frac{1183}{1000} \right)^{-2,74} = 72,97 \text{ МПа.}$$

Отношение $\frac{l_{\text{д3}}}{h_{\text{ср3}}} = \frac{70}{85} = 0,824 < 2$, тогда $n'_{\sigma3} = 1 + \frac{1}{6} \cdot \frac{l_{\text{д3}}}{h_{\text{ср3}}} = 1 + \frac{1}{6} \cdot 0,824 = 1,137$.

Коэффициент n''_{σ} в третьем проходе

$$n''_{\sigma3} = \left(\frac{l_{\text{д3}}}{h_{\text{ср3}}} \right)^{-0,4} = 0,824^{-0,4} = 1,081.$$

Коэффициент n'''_{σ} равен единице.

Отношение $\frac{b_{\text{ср3}}}{l_{\text{д3}}} = \frac{162}{70} = 2,314 < 5$.

Определяем приведенную длину очага деформации в третьем проходе

$$l'_{\text{д3}} = l_{\text{д3}} \cdot \left(1 - \frac{\text{tg} \left[\frac{k_3}{2} \right]}{f_3} \right) = 70 \cdot \left(1 - \frac{\text{tg} \left[\frac{1,5^\circ}{2} \right]}{0,43} \right) = 53,7 \text{ мм.}$$

Тогда

$$n_{b3} = \frac{1 + \frac{3 \cdot b_{\text{ср3}} - l'_{\text{д3}} \cdot f_3}{6 \cdot b_{\text{ср3}}} \cdot \frac{l'_{\text{д3}}}{h_{\text{ср3}}}}{1 + \frac{f_3}{2} \cdot \frac{l'_{\text{д3}}}{h_{\text{ср3}}}} = \frac{1 + \frac{3 \cdot 162 - 53,7 \cdot 0,43}{6 \cdot 162} \cdot \frac{53,7}{85}}{1 + \frac{0,43}{2} \cdot \frac{53,7}{85}} = 0,987.$$

Коэффициент напряженного состояния

$$n_{\sigma3} = n'_{\sigma3} \cdot n''_{\sigma3} \cdot n'''_{\sigma3} \cdot n_{b3} = 1,137 \cdot 1,081 \cdot 1 \cdot 0,987 = 1,213.$$

Среднее давление металла на валки

$$P_{\text{ср3}} = \beta_3 \cdot n_{\text{с3}} \cdot \sigma_{\text{с3}} = 1,15 \cdot 1,213 \cdot 72,97 = 101,8 \text{ МПа.}$$

Усилие прокатки

$$P_3 = P_{\text{ср3}} \cdot F_{\text{к3}} = 101,8 \cdot 11340 \cdot 10^{-6} = 1,15 \text{ МН.}$$

Коэффициент плеча приложения равнодействующей силы

$$\psi_3 = 0,5 - 0,1 \cdot \varepsilon_{\text{н3}} = 0,5 - 0,1 \cdot 0,15 = 0,485.$$

Момент прокатки

$$M_{\text{пр3}} = 2 \cdot P_3 \cdot \psi_3 \cdot l_{\text{д3}} = 2 \cdot 1,15 \cdot 0,485 \cdot 70 \cdot 10^{-3} = 0,08 \text{ МНм.}$$

Скорость вращения валков в третьем проходе

$$\vartheta_{\text{в3}} = \frac{\vartheta_3}{1 + S_{\text{н13}}} = \frac{2,5}{1 + 0,023} = 2,44 \text{ м/с.}$$

Мощность прокатки

$$N_{\text{пр3}} = \frac{M_{\text{пр3}} \cdot \vartheta_{\text{в3}}}{R} = \frac{0,08 \cdot 2,44}{0,35} = 0,56 \text{ МВт.}$$

Работа прокатки в третьем проходе составит

$$A_{\text{пр3}} = \frac{M_{\text{пр3}} \cdot l_3}{(1 + S_{\text{н13}}) \cdot R} = \frac{0,08 \cdot 6,055}{(1 + 0,023) \cdot 0,35} = 1,35 \text{ МДж.}$$

15. Проводим расчеты для четвертого прохода.

Скорость входа металла в валки в третьем проходе

$$\vartheta_{0_3} = \frac{\vartheta_3}{\lambda_3} = \frac{2,5}{1,123} = 2,23 \text{ м/с.}$$

Средняя скорость прокатки в третьем проходе

$$\vartheta_{\text{ср3}} = \frac{\vartheta_{0_3} + \vartheta_3}{2} = \frac{2,23 + 2,5}{2} = 2,37 \text{ м/с.}$$

Падение температуры при контакте с валками в третьем проходе

$$\Delta T_{\text{кв3}} = \frac{4,87}{h_2 + h_3} \cdot (T_{\text{изл3}} - T_{\text{в}}) \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot h_2 \cdot l_{\text{д3}}}{1000 \cdot (h_2 + h_3) \cdot \vartheta_{\text{ср3}}}} = \frac{4,87}{92 + 78} \cdot (183 - 80) \times \\ \times \sqrt{\frac{2 \cdot 92 \cdot 70}{1000 \cdot (92 + 78) \cdot 2}} = 6^\circ \text{C.}$$

Деформационный разогрев в третьем проходе

$$\Delta T_{\text{деф2}} = 0,85 \cdot \frac{P_{\text{ср2}}}{c \cdot \rho} \cdot \ln \frac{h_1}{h_2} = 0,85 \cdot \frac{101,8 \cdot 10^6}{683,2 \cdot 7850} \cdot \ln \frac{92}{78} = 3^\circ \text{C.}$$

Температура металла при выходе его из клетки после третьего прохода

$$T_{\text{м3}} = T_{\text{изл3}} - \Delta T_{\text{кв3}} + \Delta T_{\text{деф3}} = 1183 - 6 + 3 = 1180^\circ \text{C.}$$

Абсолютное обжатие в четвертом проходе

$$\Delta h_4 = \frac{\varepsilon_{\text{н4}} \cdot h_3}{100\%} = \frac{20 \cdot 78}{100\%} = 16 \text{ мм.}$$

Абсолютное уширение в четвертом проходе

$$\Delta b_4 = \frac{\varepsilon_{b4} \cdot b_3}{100\%} = \frac{5 \cdot 166}{100} = 8 \text{ мм.}$$

Толщина заготовки после четвертого прохода

$$h_4 = h_3 - \Delta h_4 = 78 - 16 = 62 \text{ мм.}$$

Ширина заготовки после четвертого прохода

$$b_4 = b_3 + \Delta b_4 = 166 + 8 = 174 \text{ мм.}$$

Длина заготовки после четвертого прохода

$$l_4 = \frac{h_0 \cdot b_0 \cdot l_0}{h_4 \cdot b_4} = \frac{140 \cdot 140 \cdot 4000}{62 \cdot 174} = 7268 \text{ мм.}$$

Время охлаждения раската перед четвертым проходом

$$\tau_{\text{охл3}} = \frac{l_2/2}{g_2} + \tau_{\text{п}} + \frac{l_3/2}{g_3} = \frac{6,055/2}{2,5} + 3 + \frac{7,268/2}{3} = 5,4 \text{ с.}$$

Температура металла перед последним проходом после потерь теплоты излучением

$$T_{\text{изл4}} = \frac{1000}{\sqrt[3]{\frac{0,0534 \cdot 5,4}{78} + \left(\frac{1000}{1180 + 273}\right)^3}} - 273 = 1174^\circ\text{C.}$$

Для четвертого прохода

$$k_2 = 1,67 \cdot 3,0^{-0,25} - 0,4 = 0,869 .$$

Коэффициент трения

$$f_3 = 1 \cdot 0,869 \cdot 1,01 \cdot 0,05 - 0,0005 \cdot 1174 \approx 0,41 .$$

Угол захвата

$$\alpha_4 = \arccos\left(1 - \frac{\Delta h_4}{D}\right) = \arccos\left(1 - \frac{16}{700}\right) = 12,3^\circ .$$

Проверяем условие захвата в четвертом проходе

$$0,41 > \text{tg}(12,3^\circ), \text{ т.е. } 0,41 > 0,22 .$$

Захват заготовки валками в четвертом проходе стабилен.

Определяем коэффициенты деформации в последнем проходе

$$\frac{1}{\eta_4} = \frac{h_3}{h_4} = \frac{78}{62} = 1,258 ;$$

$$\beta_4 = \frac{b_4}{b_3} = \frac{174}{166} = 1,048 ;$$

$$\lambda_4 = \frac{l_4}{l_3} = \frac{7268}{6055} = 1,200 .$$

Показатель уширения

$$a_4 = \frac{\Delta b_4}{\Delta h_4} = \frac{8}{16} = 0,5.$$

Угол трения

$$\beta_4 = \arctg f_4 = \arctg 0,41 = 22,3^\circ.$$

Нейтральный угол

$$\gamma_4 = \frac{\alpha_4}{2} \cdot \left(1 - \frac{\alpha_4}{2 \cdot \beta_4}\right) = \frac{12,3}{2} \left(1 - \frac{12,3}{2 \cdot 22,3}\right) = 4,5^\circ \text{ или } 0,079 \text{ рад.}$$

Опережение

$$S_{h1_4} = \frac{\gamma_4^2}{2} \cdot \left(\frac{D}{h_4} - 1\right) = \frac{0,079^2}{2} \cdot \left(\frac{700}{62} - 1\right) = 0,032 \text{ или } 3,2 \text{ \%}.$$

Отставание

$$S_{h0_4} = 1 - \frac{1 + S_{h1_4}}{\lambda_4 \cdot \cos \alpha_4} = 1 - \frac{1 + 0,032}{1,200 \cdot 0,977} = 0,1 \text{ или } 10 \text{ \%}.$$

Длина очага деформации

$$l_{д4} = \sqrt{R \cdot \Delta h_4} = \sqrt{350 \cdot 16} = 74,8 \text{ мм.}$$

Площадь контакта металла с валками

$$F_{к4} = \frac{b_3 + b_4}{2} \cdot l_{д4} = \frac{166 + 174}{2} \cdot 74,8 = 12716 \text{ мм}^2.$$

Средняя толщина полосы

$$h_{ср4} = \frac{h_3 + h_4}{2} = \frac{78 + 62}{2} = 70 \text{ мм.}$$

Коэффициент Лоде

$$\beta_4 = 1 + \frac{f_4}{3} \cdot \frac{b_{ср4}}{h_{ср4}} = 1 + \frac{0,41}{3} \cdot \frac{170}{70} = 1,332.$$

Коэффициент Лоде принимаем равным 1,15.

Скорость деформации металла

$$\xi_4 = \frac{\vartheta_4 \cdot \varepsilon_{h4}}{l_{д4}} = \frac{3,0 \cdot 0,20}{74,8 \cdot 10^{-3}} = 8,02 \text{ с}^{-1}.$$

Сопротивление металла деформации в последнем проходе

$$\sigma_{s4} = K \cdot \sigma_0 \cdot \xi_4^a \cdot (10 \cdot \varepsilon_{h4})^b \cdot \left(\frac{T_{изл4}}{1000}\right)^c = 0,842 \cdot 103 \cdot 8,02^{0,126} \cdot (10 \cdot 0,20)^{0,188} \times \\ \times \left(\frac{1174}{1000}\right)^{-2,74} = 82,75 \text{ МПа.}$$

$$\text{Отношение } \frac{l_{д4}}{h_{ср4}} = \frac{74,8}{70} = 1,069 < 2, \text{ тогда}$$

$$n'_{\sigma 4} = 1 + \frac{1}{6} \cdot \frac{l_{д4}}{h_{ср4}} = 1 + \frac{1}{6} \cdot 1,069 = 1,178.$$

Коэффициент n''_{σ} в четвертом проходе

$$n''_{\sigma 4} = \left(\frac{l_{д4}}{h_{ср4}} \right)^{-0,4} = 1,069^{-0,4} = 0,974.$$

Коэффициент $n'''_{\sigma 4}$ равен единице.

$$\text{Отношение } \frac{b_{ср4}}{l_{д4}} = \frac{170}{74,8} = 2,272 < 5.$$

Приведенная длина очага деформации

$$l'_{д4} = l_{д4} \cdot \left(1 - \frac{\text{tg } \left[\frac{k_4}{2} \right]}{f_4} \right) = 74,8 \cdot \left(1 - \frac{\text{tg } (2,3^\circ / 2)}{0,41} \right) = 54,7 \text{ мм.}$$

Тогда

$$n_{b4} = \frac{1 + \frac{3 \cdot b_{ср4} - l'_{д4}}{6 \cdot b_{ср4}} \cdot f_4 \cdot \frac{l'_{д4}}{h_{ср4}}}{1 + \frac{f_4}{2} \cdot \frac{l'_{д4}}{h_{ср4}}} = \frac{1 + \frac{3 \cdot 170 - 54,7}{6 \cdot 170} \cdot 0,41 \cdot \frac{54,7}{70}}{1 + \frac{0,41}{2} \cdot \frac{54,7}{70}} = 0,985.$$

Коэффициент напряженного состояния

$$n_{\sigma 4} = n'_{\sigma 4} \cdot n''_{\sigma 4} \cdot n'''_{\sigma 4} \cdot n_{b4} = 1,178 \cdot 0,974 \cdot 1 \cdot 0,985 = 1,130.$$

Среднее давление металла на валки

$$P_{ср4} = \beta_4 \cdot n_{\sigma 4} \cdot \sigma_{S4} = 1,15 \cdot 1,130 \cdot 82,75 = 107,5 \text{ МПа.}$$

Усилие прокатки

$$P_4 = P_{ср4} \cdot F_{к4} = 107,5 \cdot 12716 \cdot 10^{-6} = 1,37 \text{ МН.}$$

Коэффициент плеча приложения равнодействующей силы

$$\psi_4 = 0,5 - 0,1 \cdot \varepsilon_{н4} = 0,5 - 0,1 \cdot 0,20 = 0,48.$$

Момент прокатки

$$M_{пр4} = 2 \cdot P_4 \cdot \psi_4 \cdot l_{д4} = 2 \cdot 1,37 \cdot 0,48 \cdot 74,8 \cdot 10^{-3} = 0,1 \text{ МНм.}$$

Скорость вращения валков

$$\vartheta_{в4} = \frac{\vartheta_4}{1 + S_{н1,4}} = \frac{3,0}{1 + 0,032} = 2,91 \text{ м/с.}$$

Мощность прокатки

$$N_{пр4} = \frac{M_{пр4} \cdot \vartheta_{в4}}{R} = \frac{0,1 \cdot 2,91}{0,35} = 0,83 \text{ МВт.}$$

Работа прокатки

$$A_{\text{пр}4} = \frac{M_{\text{пр}4} \cdot l_4}{(1 + S_{h1_4}) \cdot R} = \frac{0,1 \cdot 7,268}{(1 + 0,032) \cdot 0,35} = 2,01 \text{ МДж.}$$

Таким образом, просчитаны все деформационные и энергосиловые параметры для всех проходов заготовки в клетки при реверсивной прокатке.

Список использованных источников

- 1 Обработка металлов давлением / Ю.Ф. Шевакин, В.Н. Чернышев, Р.Л. Шаталов, Н.А. Мочалов. – М.: Интермет Инжиниринг, 2005.
- 2 Зотов В.Ф. Производство проката. – М.: Интермет Инжиниринг, 2000.
- 3 Бахтинов В.Б. Технология прокатного производства. – М.: Metallurgy, 1983.
- 4 Грудев А.П. Теория прокатки. – М.: Metallurgy, 1988.
- 5 Теория прокатки / Справочник. А.И. Целиков, А.Д. Томленов, В.И. Зюзин и др. – М.: Metallurgy, 1982.

Приложение А

Варианты заданий

Вариант	Марка стали	h ₀ , мм	b ₀ , мм	l ₀ , мм	ε _{н1} , ε _{н2} , ε _{н3} , ε _{н4} , %	ε _{б1} , ε _{б2} , ε _{б3} , ε _{б4} , %	D, мм	Матер. ВАЛКОВ	υ ₁ , υ ₂ , υ ₃ , υ ₄ , м/с	υ _{трансп.} , м/с	L _{печь-кл.} , м	T _{нагр.} , °C
1	3сп	200	200	3000	20, 20, 18, 15	8, 8, 6, 5	800	сталь	2,5; 2,7; 2,9; 3,0	1,7	20	1210
2	5сп	180	350	4200	18, 15, 17, 13	8, 7, 6, 5	720	сталь	3,0; 3,1; 3,3; 3,5	1,75	18	1200
3	10	150	300	3300	20, 18, 20, 15	8, 8, 8, 6	700	сталь	2,7; 2,8; 3,0; 3,2	1,5	15	1200
4	35ГС	210	210	2900	25, 23, 20, 20	9, 7, 8, 6	900	сталь	2,8; 3,0; 3,1; 3,3	1,55	25	1190
5	30ХГСА	190	400	3600	20, 20, 18, 15	6, 8, 6, 5	750	сталь	2,9; 3,1; 3,3; 3,5	1,6	19	1170
6	15ХСНД	200	230	4000	30, 25, 25, 15	9, 8, 8, 8	850	сталь	3,2; 3,3; 3,5; 3,6	1,65	30	1180
7	45	180	180	2500	20, 18, 15, 10	6, 6, 6, 6	700	чугун	3,2; 3,3; 3,5; 3,7	1,4	17	1210
8	40X	220	300	3700	20, 25, 20, 18	6, 7, 8, 5	900	сталь	2,8; 3,0; 3,1; 3,3	1,6	25	1250
9	У7А	170	220	2600	20, 16, 15, 10	8, 8, 6, 6	850	сталь	3,0; 3,3; 3,5; 3,6	1,7	22	1220
10	У10А	150	300	3000	15, 20, 15, 10	7, 7, 6, 5	740	чугун	3,2; 3,5; 3,6; 3,8	1,5	20	1220
11	60С2	200	210	3200	25, 25, 20, 20	6, 7, 8, 5	880	сталь	2,9; 3,2; 3,5; 3,7	1,7	27	1200
12	ШХ15	180	250	3400	20, 20, 10, 10	8, 6, 5, 5	800	чугун	3,0; 3,2; 3,5; 3,6	1,55	24	1190
13	20Х13	190	190	2800	15, 15, 13, 12	7, 6, 5, 6	770	чугун	3,4; 3,6; 3,7; 4,0	1,45	19	1190
14	15Х25Т	175	270	3000	25, 18, 15, 10	8, 8, 5, 5	750	чугун	3,1; 3,3; 3,5; 3,8	1,7	15	1180
15	45	150	250	3500	15, 15, 15, 10	7, 7, 7, 6	880	сталь	2,8; 2,9; 3,1; 3,4	1,7	16	1230
16	10	230	230	3100	26, 20, 23, 19	9, 7, 7, 5	900	сталь	2,5; 2,7; 2,9; 3,2	1,8	20	1240
17	5сп	200	240	4100	25, 24, 20, 15	6, 8, 5, 7	900	сталь	3,0; 3,1; 3,3; 3,6	1,55	24	1220
18	35ГС	220	250	3500	30, 20, 20, 15	8, 8, 6, 7	880	сталь	2,5; 2,7; 2,9; 3,2	1,65	26	1230
19	У10А	200	220	4000	27, 25, 20, 20	8, 9, 6, 7	750	чугун	3,1; 3,3; 3,6; 4,0	1,7	28	1200
20	ШХ15	190	300	3800	20, 20, 18, 17	7, 8, 8, 7	830	сталь	2,8; 3,0; 3,2; 3,4	1,8	22	1180

Вариант	Марка стали	h ₀ , мм	b ₀ , мм	l ₀ , мм	ε _{h1} , ε _{h2} , ε _{h3} , ε _{h4} , %	ε _{b1} , ε _{b2} , ε _{b3} , ε _{b4} , %	D, мм	Матер. валков	υ ₁ , υ ₂ , υ ₃ , υ ₄ , м/с	υ _{трансп.} , м/с	L _{печ.-кв.} , м	T _{нагр.} , °C
21	15X13	200	340	3400	20,с 18, 17, 15	8, 8, 7, 7	900	сталь	2,6; 2,8; 2,9; 3,1	1,8	26	1190
22	15XCHД	140	270	3000	20, 20, 10, 10	8, 7, 6, 5	700	чугун	3,1; 3,3; 3,5; 3,7	1,5	20	1180
23	15Г	195	195	2800	15, 15, 20, 20	7, 9, 6, 7	750	чугун	3,0; 3,2; 3,3; 3,5	1,7	18	1180
24	3сп	230	370	4000	25, 25, 15, 10	8, 8, 9, 5	880	сталь	3,0; 3,3; 3,4; 3,6	1,75	28	1270
25	45	240	360	3800	10, 15, 20, 26	6, 6, 7, 5	850	сталь	2,8; 3,0; 3,3; 3,5	1,65	26	1260
26	40X	150	200	4600	10, 10, 10, 15	10, 6, 8, 7	730	чугун	3,5; 3,7; 3,8; 4,0	1,6	20	1210
27	У7А	220	400	3900	15, 19, 23, 20	8, 9, 6, 7	870	сталь	3,0; 3,2; 3,3; 3,5	1,65	25	1220
28	60С2	210	210	4000	20, 20, 18, 14	7, 7, 8, 8	880	сталь	2,8; 2,9; 3,1; 3,3	1,7	26	1230
29	ШХ15	180	390	4300	15, 15, 10, 16	8, 9, 6, 5	750	чугун	3,3; 3,5; 3,7; 3,9	1,5	19	1180
30	30ХГСА	230	300	3700	25, 20, 15, 15	7, 6, 5, 5	920	сталь	3,0; 3,2; 3,3; 3,6	1,7	22	1200
31	5сп	190	350	45000	15, 15, 10, 10	8, 8, 9, 7	850	сталь	2,9; 3,1; 3,3; 3,6	1,65	18	1240
32	15X25Г	180	230	3500	10, 10, 15, 14	8, 7, 9, 6	800	чугун	3,4; 3,6; 3,7; 3,9	1,55	16	1190
33	10	190	190	2500	15, 10, 16, 18	6, 5, 5, 6	840	сталь	3,0; 3,2; 3,5; 3,7	1,8	15	1200
34	5сп	220	300	2900	24, 20, 19, 10	7, 5, 7, 6	950	сталь	2,8; 2,9; 3,1; 3,3	1,8	22	1230
35	20X13	180	190	3000	10, 10, 15, 15	7, 7, 8, 7	800	чугун	3,3; 3,5; 3,7; 3,9	1,75	20	1170
36	ШХ15	150	150	2000	14, 10, 12, 11	9, 10, 9, 7	770	чугун	3,0; 3,2; 3,5; 3,7	1,7	17	1180
37	35ГС	200	230	3400	20, 20, 19, 20	5, 6, 5, 8	900	сталь	2,5; 2,7; 2,8; 3,0	1,5	15	1220
38	3сп	230	230	4100	25, 20, 17, 10	5, 5, 8, 6	930	сталь	2,4; 2,5; 2,7; 2,9	1,8	29	1240
39	45	220	360	3900	10, 15, 20, 25	7, 8, 8, 6	880	сталь	2,7; 2,9; 3,1; 3,4	1,85	30	1260
40	20X13	180	300	4000	20, 20, 18, 18	8, 6, 6, 5	800	чугун	3,2; 3,4; 3,5; 3,8	1,7	24	1180

Приложение Б
Расчетные коэффициенты к формуле Л.В. Андреюка – Г.Г. Тюленева

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

КУНИЦИНА НАТАЛЬЯ ГЕННАДЬЕВНА

**РАСЧЕТ ДЕФОРМАЦИОННЫХ И
ЭНЕРГОСИЛОВЫХ ПАРАМЕТРОВ
ПРИ ГОРЯЧЕЙ РЕВЕРСИВНОЙ ПРОКАТКЕ**

Методические указания
для выполнения домашнего задания/ контрольной работы
по дисциплине «Обработка металлов давлением»
для студентов направления подготовки 22.03.02 «Металлургия»,
всех форм обучения

Подписано в печать 23.11.2017 г.		
Формат 60x90 $\frac{1}{16}$ Рег.№ 105	Печать цифровая Тираж 30 экз.	Уч.-изд.л. 3,19

ФГАОУ ВПО

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.