

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего  
образования  
«ЮЖНО-УРАЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
(национальный исследовательский университет)»  
Политехнический институт  
Факультет Материаловедения и металлургических технологий  
Кафедра процессов и машин обработки металлов давлением

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ

Заведующий кафедрой

\_\_\_\_\_ Л.В. Радионова

«\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ г.

Тема работы: «Разработка технологии получения круглых профилей из  
специальных сталей с использованием схемы прокатки круг-круг»

ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА К ВЫПУСКНОЙ КВАЛИФИКАЦИОННОЙ  
РАБОТЕ

ЮУрГУ-22.03.02-2019-118-101 ПЗ

Руководитель работы:

\_\_\_\_\_ / Г.И. Коваль /

Автор работы

\_\_\_\_\_ / А.А. Шакиров /

студент группы П-438

Челябинск  
2019

## АННОТАЦИЯ

Шакиров А.А. Разработка технологии малотоннажного производства круглых профилей из специальных сталей с использованием схемы прокатки круг-круг. – Челябинск: ЮУрГУ, МиМТ; 2019, 27 стр. 7 ил., библиогр. список - 7 наим., 3,5 листов чертежей ф. А1.

В данной выпускной квалификационной работе произведена проверка и расчет варианта продольной прокатки заготовок металлорежущего инструмента с использованием схемы прокатки круг-круг. Выпускная квалификационная работа состоит из пояснительной записки и графической части.

В пояснительной записке приведен анализ существующих схем прокатки круглых профилей, выбор и обоснование схемы прокатки в соответствии с заданием. Выполнен расчет формоизменения металла, энергосиловых параметров прокатки, температурных режимов прокатки и проверочные расчеты на прочность прокатных валков.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
1 Обзор известных схем прокатки простых профилей .....	6
1.1 Сортамент профилей простой формы.....	6
1.2 Обзор известных систем прокатки круглых профилей.....	7
2. Выбор и обоснование схемы прокатки для получения круглых профилей .....	9
3. Расчет технологического процесса. ....	12
3.1 Параметры калибров и их построение.....	12
3.2 Расчет формоизменения металла.....	15
3.3 Расчет энергосиловых параметров.....	18
3.4 Расчет температурных режимов прокатки .....	20
4. Маршруты прокатки круглых профилей. ....	22
5. Проверочные расчеты на прочность прокатных валков. ....	22
ВЫВОДЫ .....	26
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК .....	27

## ВВЕДЕНИЕ

В металлургии России и, в частности, в прокатном производстве металлургических компаний и отдельных предприятий реализуются конкретные производственные и инновационно-инвестиционные программы по повышению технического уровня производства, увеличению выпуска металлопродукции различных видов, расширению ее сортамента, повышению качественных характеристик в соответствии с требованиями развивающегося рынка, снижению издержек производства. С целью повышения конкурентной способности, перед каждым предприятием поставлены задачи по повышению качества и увеличения производительности, создания непрерывных, безотходных или малоотходных производственных процессов, полной механизации и автоматизации технологических операций.

В ремонтно-инструментальных цехах машиностроительных заводов заготовки для обрабатываемого инструмента (державок резцов, сверл, метчиков и т.п.) обычно изготавливают из стали круглого сечения, поступающей с металлургических заводов. Из-за небольших партий проката требуемых профилирумеров часто используется круглая сортовая сталь увеличенного сечения, что повышает отход металла в стружку и увеличивает себестоимость инструмента.

Разработанная технология продольной прокатки заготовок режущего инструмента в клетях дуо, может быть реализована в ремонтно-инструментальном цехе любого машиностроительного завода. Применение прокатки позволяет увеличить объем производства заготовок и высвободить кузнечно-прессовые машины, приблизить поперечные сечения заготовок к сечениям готовых изделий и снизить расход металла, трудовые и материальные ресурсы на их производство, себестоимость режущего инструмента.

Целью данной работы является, проверка и расчет процесса прокатки круглых профилей по схеме круг-круг 8-27мм в клети Дуо 180.

## 1. Обзор известных схем прокатки простых профилей

### 1.1 Сортамент профилей простой формы

В зависимости от формы поперечного сечения раската различают простые сортовые, фасонные и периодические профили [3]. Простые сортовые профили имеют форму простой геометрической фигуры: квадрата, круга, шестигранника, прямоугольника (рисунок 1). Форма и размеры простых сортовых профилей регламентируются государственными стандартами на сортамент.

Согласно ГОСТ 2590-88 и 2591-88 круглую и квадратную сталь поставляют обычной, повышенной и высокой точности. Соответственно этому допуски на круг и квадрат размерами 5-9 мм изменяются от  $+0,3/-0,5$  мм при обычной точности до  $+0,1/-0,2$  мм при высокой точности.

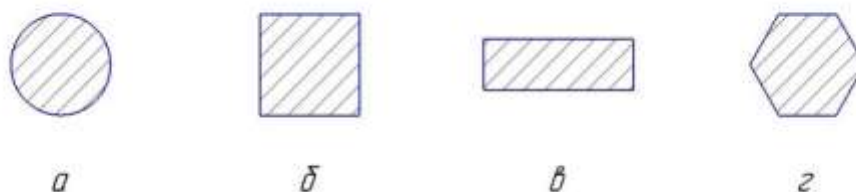


Рисунок 1. Профили простой формы: а - круг; б - квадрат; в – прямоугольный; г - шестигранный.

Простые сортовые профили прокатывают из углеродистых, низколегированных, легированных, инструментальных, быстрорежущих, подшипниковых, рессорно-пружинных и высоколегированных сталей. В сортаменте сортового проката простые профили составляют наиболее многочисленную группу, доля которой от общего числа профилей равна 48% [3]. Эти профили находят широкое применение в различных отраслях народного хозяйства.

## 1.2 Обзор известных систем прокатки круглых профилей

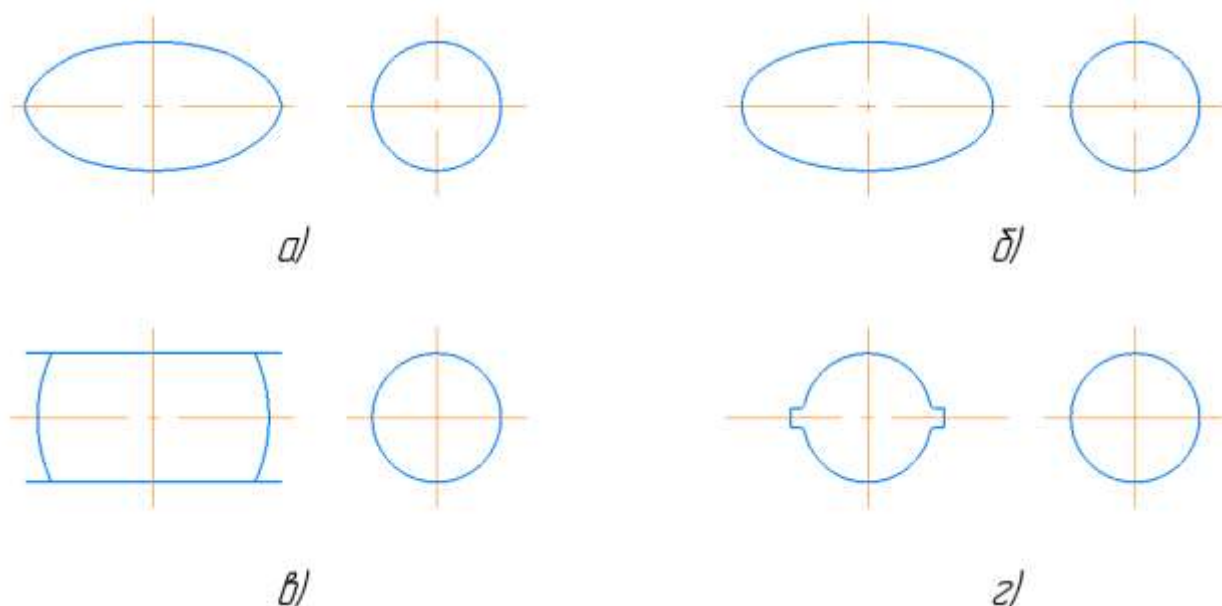


Рисунок 2. Схемы прокатки круглых профилей в два прохода: а – овал-круг; б – плоский овал-круг; в – гладкая бочка-круг; г – круг-круг.

Для прокатки простых сортовых профилей применяют калибры простой формы: ящичные, овальные, шестиугольные, квадратные. Указанные калибры используют в определенных сочетаниях, обеспечивающих необходимые условия деформации металла на стане. Совокупность чередующихся калибров одного или двух видов называют системой калибров [2]. Часто в системах калибров чередуются неравноосные калибры (овал) и равноосные калибры (круг, квадрат). Такие системы калибров обеспечивают деформацию металла от одного равноосного сечения к другому. Название системы калибров включает виды чередующихся калибров. Каждая система калибров имеет свои преимущества и недостатки, что предопределяет область ее применения.

Система калибров овал-круг (см. рисунок 2, а) является частным случаем системы овал-ребровой овал и сохраняет почти все её преимущества, создающие благоприятные условия для прокатки качественных сталей. Кроме того, эта система обеспечивает возможность получения круглых профилей из

промежуточных калибров, что позволяет сократить парк валков и уменьшить количество перевалок при переходе с одного профиля на другой. При прокатке овал-круг получаются низкие коэффициенты вытяжки, что ограничивает применение этой системы. Недостатком системы овал-круг является также неравномерность обжатия по ширине раската в овальных и круглый калибрах.

Особенности системы овал-круг (плавное формоизменение профилей, низкие коэффициенты вытяжки и др.) обусловили ее в качестве вытяжной системы при прокатке малопластичных качественных сталей на мелкосортных, среднесортных и проволочных станах. Кроме того, эту систему калибров применяют в чистовых группах клетей при прокатке круглой стали различных марок [2].

Система калибров плоский овал-круг (см. рисунок. 2, б) является разновидностью системы калибров овал-круг. Применение плоского овального калибра вместо однорадиусного позволяет устранить или ослабить недостатки системы овал круг, а именно: улучшить устойчивость и облегчить удержание овального раската при прокатке в круглом калибре; получить более равномерное обжатие по ширине раската в круглом калибре; повысить коэффициент вытяжки при прокатке в круглом калибре за счет увеличения объема металла, смещаемого по высоте.

Недостатком системы калибров плоский овал-круг является неравномерная по ширине деформация круглого раската в плоском овальном калибре и большая склонность к переполнению круглого калибра. При недостаточном заполнении этого калибра на боковой поверхности круглого раската получается вертикальный участок (так называемая «лыска»), что снижает качество круглой стали.

Систему плоский овал-круг применяют на заготовительных и крупносортных станах для получения круглой стали большого диаметра (например, трубной заготовки) [2]. Иногда эту систему используют в качестве вытяжной на среднесортных и мелкосортных станах.

Система круг-гладкая бочка (см. рисунок 2, в) является развитием системы калибров плоский овал-круг и обладает рядом ее преимуществ. Кроме того,

применение гладкой бочки вместо овального калибра позволяет улучшить удаление окалины с раската, снизить расход валков и увеличить их прочность.

Применение системы круг-гладкая бочка ограничивает следующие, присущие ей недостатки: неравномерное обжатие круглого раската в гладких валках, неравномерное распределение коэффициента вытяжки между проходами на гладкой бочке и в круглом калибре, плохой захват валками круглого раската, повышенная склонность к переполнению круглого калибра.

Эту систему иногда применяют при получении круглых профилей большого диаметра на заготовительных и крупносортовых станах, а так же в черновых клетях сортовых станов при прокатке полосовой стали [2].

Система круг-круг (см. рисунок 2, г) является частным случаем системы овал-круг и сохраняет почти все её преимущества, создающие благоприятные условия для прокатки качественных сталей. Данная система обеспечивает возможность получения круглых профилей путем обжатия с малой степенью деформации (3...10 %). Достоинства: отсутствие острых углов обеспечивает равномерное остывание раската, хорошее удаление окалины и предотвращает образование трещин при прокатке.

К недостаткам можно отнести: относительно низкую вытяжку, круглые калибры склонны к образованию дефекта в виде уса при незначительном переполнении.

## 2. Выбор и обоснование схемы прокатки для получения круглых профилей

При выборе схемы прокатки будем руководствоваться критериями свойственными малотоннажному производству в соответствии с заданием на разработку. Малотоннажному производству характерны такие свойства как: многоассортиментность, частое изменение номенклатуры, универсальность и гибкость производственных процессов.



Все вышеперечисленные схемы прокатки имеют свои технологические особенности, достоинства и недостатки. К общим недостаткам схем прокатки овал-круг, плоский овал-круг, гладкая бочка-круг следует отнести следующие факторы: не универсальность производства, большой парк оборудования необходимого для производства конечного профиля, большую производственную площадь, сложность переоборудования для производства профилей необходимого сортамента, что не характерно для малотоннажного производства.

Всеми необходимыми свойствами для эффективного малотоннажного производства обладает схема прокатки круг-круг изложенная в научной работе Смирнова В.К. [1]. Суть её заключается в том, что для производства мелкосерийных партий круглых профилей для режущего инструмента может быть использована технология прокатки по схеме круг-круг. Исходными заготовками для прокатки является сталь диаметром 10-40 мм и сталь квадратного сечения 10×10 – 32×32 мм длиной от 600 до 800 мм; конструкционных легированных, инструментальных углеродистых, легированных, и быстрорежущих марок.

Технология предназначена для прокатки в прутках стали обычной точности. Сортамент прокатываемых сталей следующий: стали круглого и квадратного сечений – инструментальные, жаропрочные, конструкционные.

Мини-комплекс (см. рисунок 3) для прокатки круглых профилей широкого размерного сортамента представляет собой одноклетевой стан дуо 180, рабочая клеть которого имеет литые станины 1 закрытого типа, стянутые болтами. Валковый узел состоит из двух калиброванных валков 2 из стали 5ХНМ. Рабочие валки имеют длину бочки  $L_6 = 400$  мм и постоянное (нерегулируемое) межцентровое расстояние (диаметр валков)  $D_0 = 210$  мм. Шейки валков диаметром 100 мм вращаются в подшипниках с бронзовыми вкладышами.

Заготовки нагревают в двухкамерных печах 9 производительностью по 250 кг/ч. Нагретая до температуры прокатки (1120 -1200°C) заготовка круглого или квадратного сечения прокатывается последовательно в калибрах по схеме

круг-круг. В каждом калибре осуществляется два прохода с кантовкой раската после каждого прохода на  $90^\circ$ .

Допустимая величина сопротивления металла деформаций по мощности электродвигателя привода стана и прочности шестеренной передачи составляет 120 МПа при температуре  $1000^\circ\text{C}$ , относительном 10% обжатии и скорости деформации  $10^{-1}\text{с}$ .

Рассмотренная схема универсальна, т.к. позволяет получить широкий сортамент готовых профилей приближенных к профилеразмерам инструмента, за счет чего сокращается отход металла в стружку при обработке и уменьшает себестоимость инструмента.

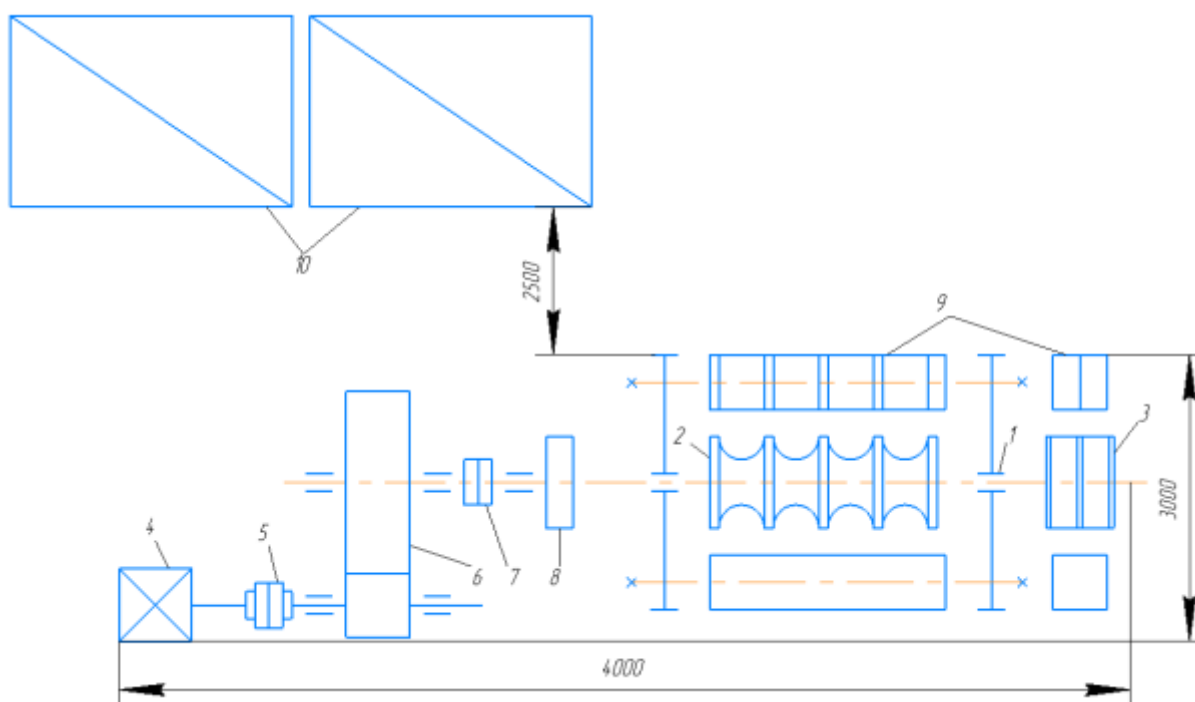


Рисунок 3. Мини комплекс: 1 - литые станины закрытого типа; 2 – валки; 3 – бандаж; 4 – электродвигатель; 5 – зубчатая муфта; 6 - редуктор; 7 – муфта; 8 – шестерни; 9 - столы; 10 – печи.

### 3. Расчет технологического процесса.

#### 3.1 Параметры калибров и их построение

Сортовые профили простой конфигурации поперечного сечения прокатывают в калиброванных валках. Последовательность калибров, обеспечивающая получение заданного готового профиля из заготовки определенной формы и размеров, называется калибровкой прокатных валков.

Конструирование калибров (определение их формы и размеров), расчет режима деформации составляют предмет калибровки валков. Важнейшими задачами калибровки валков являются:

1) получение точного профиля с хорошим качеством поверхности, заданной структурой и надлежащими механическими свойствами при отсутствии дефектов прокатного происхождения;

2) обеспечение высокой производительности прокатного стана за счет применения схем интенсивных режимов деформации, сокращения количества проходов и вспомогательных операций, повышения скорости прокатки, механизации и автоматизации процесса прокатки;

3) обеспечение минимальной себестоимости проката за счет применения схем и режимов деформации, требующих минимального расхода металла, валков и энергии [2].

Изначально для работы была выбрана система калибров предложенная в научной работе Смирнова В.К., но при расчете формоизменения металла по алгоритму<sup>1</sup>, взятого из пособия «Калибровка прокатных валков», не удалось получить приемлемые результаты.

При уменьшении диаметра калибра увеличивается приведенный диаметр валков  $A$ , что приводило к постоянному увеличению коэффициента уширения. Так, например, для первого прохода при  $A = 4,753$  коэффициент уширения

---

<sup>1</sup> Смирнов, В.К. Калибровка прокатных валков / В.К. Смирнов, Ю.В. Инатович, В.А. Шилов. М.: Теплотехник, 2010. – С. 86.

составлял  $\beta = 1,012$ , а для последнего, при  $A = 25$   $\beta = 1,447$ . На рисунке 4 представлен график зависимости уширения от параметра  $A$ .

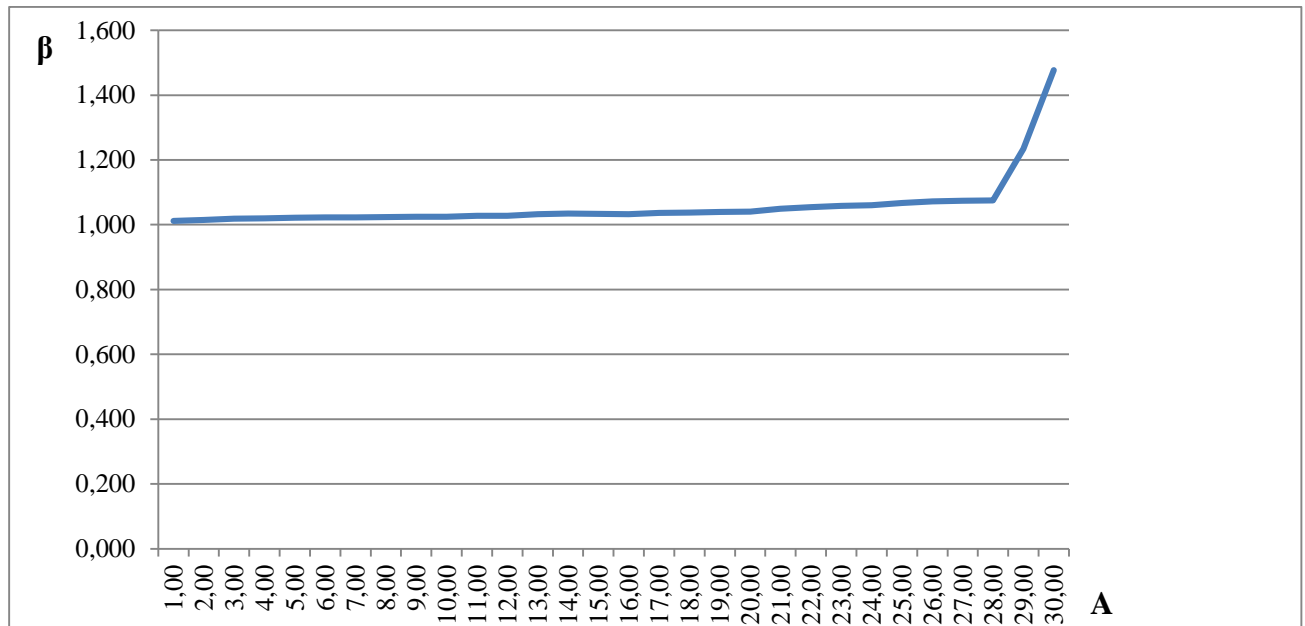


Рисунок 4. График зависимости уширения от приведенного диаметра валков

Поэтому для дальнейших расчетов была выбрана методика, предложенная в статье [1].

На рисунке 5 показана форма ручьев применяемых круглых калибров, а соответствующие им размеры приведены в таблице 1.

Рассчитаем размеры калибров в следующей последовательности:

1) Посчитаем ширину калибра

$$B_K = \frac{d}{\cos(\gamma)}, \quad (3.1)$$

где  $\gamma$  – угол развала калибра.

$$B_K = \frac{36,5}{\cos(32^\circ)} = 43,8 \text{ мм.}$$

2) Определим величину зазора

$$S = (0,006:0,008)D_0 = 1,7 \text{ мм,} \quad (3.2)$$

где  $D$  – диаметр бочки валка.

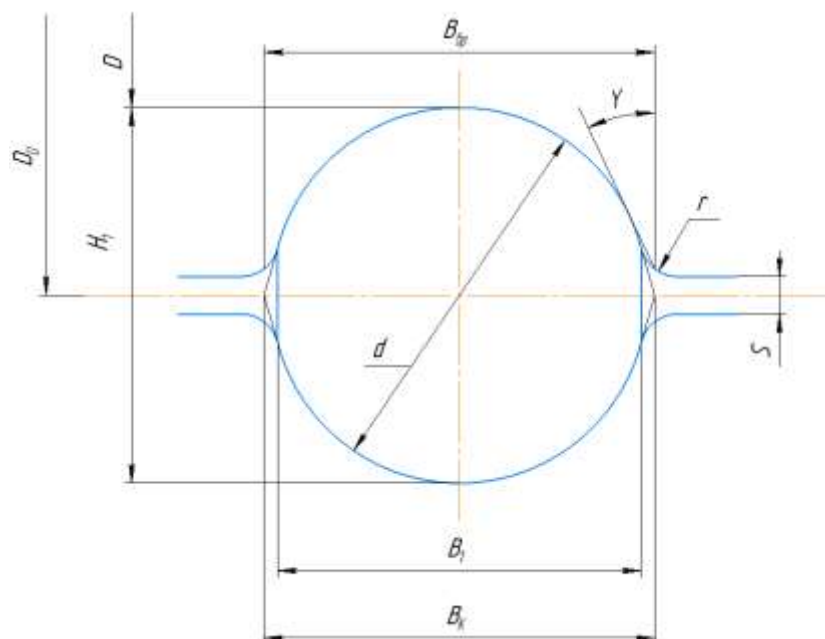


Рисунок 5. Форма ручьев применяемых круглых калибров

Таблица 1– Размеры круглых калибров

Калибр	Диаметр d, мм	Радиус R, мм	Ширина калибра Bк, мм	Зазор S, мм	Скругление r, мм
1	36,5	18,25	43,8	1,7	3,3
2	33,7	16,85	40,4	1,7	3,0
3	31	15,5	37,2	1,7	2,8
4	28,8	14,4	34,5	1,7	2,6
5	27	13,5	32,4	1,7	2,4
6	25	12,5	30,0	1,7	2,3
7	23,2	11,6	27,8	1,7	2,1
8	21,5	10,75	25,8	1,7	1,9
9	19,8	9,9	23,7	1,7	1,8
10	18,2	9,1	21,8	1,7	1,6
11	16,8	8,4	20,1	1,7	1,5
12	15,5	7,75	18,6	1,7	1,4
13	14,2	7,1	17,0	1,7	1,3
14	13	6,5	15,6	1,7	1,2
15	12	6	14,3	1,7	1,1
16	11	5,5	13,1	1,7	1,0
17	10	5	12,0	1,7	0,9
18	9,2	4,6	11,0	1,7	0,828
19	8,5	4,25	10,2	1,7	0,765
20	8	4	9,6	1,7	0,72

3) Определим радиус закруглений по буртам

$$r = (0,08:0,10)d = 3,285 \text{ мм}, \quad (3.3)$$

где  $d$  – диаметр калибра.

### 3.2 Расчет формоизменения металла

Форму и размеры очага деформации при прокатке по различным системам калибров однозначно характеризуют следующие независимые параметры: приведенный диаметр валков, отношение сторон калибра, выпуск ящичного калибра, отношение сторон раската до прохода, коэффициент обжатия, степень заполнения предыдущего по ходу прокатки калибра. Условия трения на контактной поверхности характеризуются показателем трения  $\psi$ .

Формула для определения коэффициента уширения позволяет решать различные задачи по расчету формоизменения металла. Расчет будем вести по алгоритму, представленному в источнике [4], определяя по ходу прокатки ширину раската при заданных размерах калибра и исходной заготовки. Так же известна схема прокатки, начальный диаметр валков, марка прокатываемой стали, температура раската, состояние поверхности валков.

Расчет выполняется в следующей последовательности:

1) по заданным размерам калибра и сечения исходного раската определяют безразмерные параметры, характеризующие форму очага деформации при прокатке по заданной схеме

$$A = \frac{D_0 - H_1}{H_1} - \text{приведенный диаметр валков}, \quad (3.4)$$

$$\frac{1}{\eta} = \frac{H_0}{H_1} - \text{коэффициент обжатия}, \quad (3.5)$$

$$a_0 = \frac{H_0}{B_0} - \text{отношение сторон раската до прохода}, \quad (3.6)$$

$$\delta_0 = \frac{H_0}{H_0'} - \text{степень заполнения предыдущего по ходу прокатки калибра}. \quad (3.7)$$

2) определяют значения показателя  $\psi$

Значение  $\psi$  определим по таблице (см. рисунок 6)

Схема прокатки	Номер линии	$C_0$	$C_1$
Квадрат – плоский овал, квадрат – шестиугольник, круг – овал, ребровой овал – овал, овал – квадрат, овал – круг, плоский овал – круг, шестиугольник – квадрат, овал – ребровой овал, овал – овал, шестиугольник – шестигранник, круг - круг	1	0,856	-1,486
Прямоугольник – ящичный калибр, прямоугольник – гладкие валки, круг – гладкие валки.	2	0,802	-2,112
Квадрат – ромб, ромб – квадрат, ромб - ромб	3	0,768	-2,486

При температуре раската  $t \geq 900^\circ\text{C}$ , при  $t < 900^\circ\text{C}$   $\psi = 1$ .

Рисунок 6. Значение показателя трения  $\psi$  для различных схем прокатки при деформации углеродистых, низко- и среднелегированных сталей в валках с гладкой поверхностью

При температуре  $1120 - 1200^\circ\text{C}$   $\psi = 0.7$ ;

3) находят коэффициент вытяжки  $\lambda$

$$\lambda = 1 + \left(\frac{1}{\eta - 1}\right)^{1.375} * \left(\frac{1}{a_0}\right) * \left(0.59 + \frac{2.18}{\sqrt{A}}\right) * \left(0.616 + \frac{0.312}{\delta_0}\right) * \left(0.772 + \frac{0.128}{\psi^2}\right), \quad (3.8)$$

4) рассчитывают площадь поперечного сечения раската в калибре

$$\omega_1 = \frac{\omega_0}{\lambda}, \text{ мм}^2, \quad (3.9)$$

5) определяют степень заполнения калибра

$$\delta_1 = 1.164 - 0.905 \sqrt{1 - \frac{\omega_1}{0.945 H_1^2}}, \quad (3.10)$$

б) определяют ширину полосы в калибре

$$B_K = \delta_1 * B_1, \text{ мм}^2. \quad (3.11)$$

Результаты расчетов занесены в таблицу 2.

Таблица 2 – Результаты расчета формоизменения металла при прокатке по схеме круг-круг

Калибр	Проход	A	1/η	a0	δ0	λ	ω <sub>1</sub> , мм <sup>2</sup>	δ <sub>1</sub>	B <sub>1</sub> , мм
1	1	4,753	1,096	1	1	1,062	1183	0,942	41,206
	2	4,753	1,129	1,129	0,942	1,083	1092	0,835	36,521
2	3	5,231	1,084	1,001	0,835	1,052	1039	0,989	39,960
	4	5,231	1,186	1,186	0,989	1,126	923	0,825	33,332
3	5	5,774	1,075	0,989	0,825	1,044	884	0,986	36,627
	6	5,774	1,182	1,182	0,986	1,119	790	0,838	31,136
4	7	6,292	1,081	1,004	0,838	1,047	755	0,991	34,204
	8	6,292	1,188	1,188	0,991	1,120	674	0,825	28,491
5	9	6,778	1,055	0,989	0,825	1,027	656	0,966	31,281
	10	6,778	1,159	1,159	0,966	1,096	599	0,836	27,064
6	11	7,400	1,083	1,002	0,836	1,046	572	1,005	30,125
	12	7,400	1,205	1,205	1,005	1,127	508	0,825	24,723
7	13	8,052	1,066	0,989	0,825	1,033	492	0,998	27,756
	14	8,052	1,196	1,196	0,998	1,118	440	0,830	23,094
8	15	8,767	1,074	0,995	0,830	1,038	424	1,006	25,932
	16	8,767	1,206	1,206	1,006	1,122	377	0,830	21,394
9	17	9,606	1,081	0,995	0,830	1,041	362	1,031	24,460
	18	9,606	1,235	1,235	1,031	1,139	318	0,824	19,552
10	19	10,538	1,074	0,987	0,824	1,036	307	1,038	22,648
	20	10,538	1,244	1,244	1,038	1,142	269	0,824	17,974
11	21	11,500	1,070	0,988	0,824	1,033	260	1,024	20,617
	22	11,500	1,227	1,227	1,024	1,128	231	0,832	16,758
12	23	12,548	1,081	0,997	0,832	1,039	222	1,033	19,185
	24	12,548	1,238	1,238	1,033	1,132	196	0,832	15,451
13	25	13,789	1,088	0,997	0,832	1,042	188	1,069	18,188
	26	13,789	1,281	1,281	1,069	1,155	163	0,820	13,966
14	27	15,154	1,074	0,983	0,820	1,033	158	1,066	16,617
	28	15,154	1,278	1,278	1,066	1,150	137	0,824	12,847
15	29	16,647	1,080	0,988	0,824	1,036	133	1,075	15,328
	30	16,647	1,288	1,288	1,075	1,153	115	0,824	12,055



Продолжение таблицы 2

16	31	18,266	1,078	0,988	0,824	1,034	111	1,074	14,027
	32	18,266	1,287	1,287	1,074	1,149	97	0,827	11,010
17	33	20,000	1,081	0,992	0,827	1,035	93	1,071	12,834
	34	20,000	1,283	1,283	1,071	1,144	82	0,831	9,964
18	35	21,826	1,083	0,996	0,831	1,035	79	1,061	11,706
	36	21,826	1,272	1,272	1,061	1,135	70	0,837	9,232
19	37	23,706	1,086	1,004	0,837	1,036	67	1,047	10,673
	38	23,706	1,256	1,256	1,047	1,124	60	0,844	8,603
20	39	25,250	1,075	1,012	0,844	1,029	58	0,983	9,428
	40	25,250	1,179	1,179	0,983	1,080	54	0,850	8,151

### 3.3 Расчет энергосиловых параметров

К энергосиловым параметрам прокатки относятся усилие прокатки  $P$ , момент прокатки  $M$ .

Исходные данные: сталь марки Р6М5;  $U_{п} = 0,5$  м/с;  $N_{дв} = 19$  кВт;  $N_{дв} = 1500$  об/мин.

Все расчеты проводятся согласно существующей методике [2], данные последующих расчетов занесены в таблицу 3.

Таблица 3 – Результаты расчета энергосиловых параметров

	$m$	$n_{\sigma}$	$p$ , МПа	$\xi$	$F$ , мм <sup>2</sup>	$P$ , кН	$n_{вал}$	$M_{вал}$	$\varepsilon$	$u$
1	0,456	2,095	129,937	0,372	334	43,43	0,029	371	0,064	0,033
2	0,449	2,098	130,148	0,494	372	48,33	0,023	327	0,056	0,033
3	0,449	2,100	130,252	0,499	316	41,14	0,018	293	0,050	0,033
4	0,485	2,079	128,920	0,493	292	37,67	0,019	328	0,054	0,035
5	0,421	2,116	131,230	0,489	218	28,61	0,010	198	0,037	0,030
6	0,531	2,057	127,552	0,501	245	31,24	0,017	354	0,055	0,038
7	0,498	2,075	128,670	0,505	198	25,43	0,011	266	0,044	0,035
8	0,550	2,049	127,067	0,506	188	23,94	0,013	321	0,049	0,039
9	0,598	2,028	125,768	0,518	179	22,46	0,013	370	0,054	0,042
10	0,603	2,027	125,696	0,526	154	19,37	0,011	342	0,050	0,043
11	0,612	2,023	125,459	0,519	131	16,46	0,009	322	0,047	0,043

## Продолжение таблицы 3

12	0,686	1,994	123,666	0,518	126	15,52	0,011	404	0,054	0,048
13	0,746	1,974	122,453	0,536	119	14,59	0,011	468	0,059	0,052
14	0,723	1,983	123,012	0,543	97	11,97	0,008	385	0,050	0,050
15	0,783	1,965	121,878	0,544	89	10,81	0,009	436	0,053	0,054
16	0,814	1,957	121,362	0,544	77	9,39	0,008	441	0,052	0,057
17	0,865	1,944	120,591	0,540	69	8,29	0,008	475	0,054	0,060
18	0,914	1,934	119,937	0,533	61	7,28	0,007	506	0,055	0,063
19	0,969	1,923	119,299	0,522	54	6,43	0,007	547	0,057	0,067
20	0,940	1,927	119,517	0,485	43	5,12	0,006	460	0,050	0,065

1) Усилие прокатки рассчитывается по формуле

$$P = pF, \text{кН}, \quad (3.12)$$

где  $p$  – среднее давление, МПа;  $F$  – контактная площадь, мм<sup>2</sup>.

$$p = 1.15\sigma_s n_\sigma, \text{МПа}, \quad (3.13)$$

где  $\sigma_s$  – сопротивление металла деформации;  $n_\sigma$  – коэффициент напряженного состояния.

$$\sigma_s = \sigma_{од} K_t K_\epsilon K_u, \text{МПа}, \quad (3.14)$$

где  $\sigma_{од}$  – базисное сопротивление деформации;  $K_t$ ,  $K_\epsilon$ ,  $K_u$  – термомеханические коэффициенты, учитывающие влияние температуры металла  $t$ , степени деформации  $\epsilon$ , скорости деформации  $u$ .

$$n_\sigma = \left(m + \frac{18}{m+3} - 3.7\right)(1.15 - 0.075a_0)(0.88 + 0.16\psi), \quad (3.15)$$

где  $m$  – фактор формы очага деформации.

$$m = \frac{2\sqrt{\frac{A}{2}\left(\frac{1}{\eta} - 1\right)}}{\frac{1}{\eta} + 1}, \quad (3.16)$$

$$F = H_1^2 \xi \sqrt{A\left(\frac{1}{\eta} - 1\right)}, \text{мм}^2, \quad (3.17)$$

где  $\xi$  – расчетный коэффициент.

$$\zeta = \frac{a_k \delta_1}{\sqrt{2}} (1.62 - \delta_0) (1 - 0.1a_k). \quad (3.18)$$

2) Крутящий момент деформации при прокатке в калибрах рассчитывается по формуле

$$M_{\text{вал}} = 0,287 \sigma_s H_1^3 A^2 n_{\text{вал}}, \text{ кНм},$$

где  $n_{\text{вал}}$  – коэффициент крутящего момента деформации.

$$n_{\text{вал}} = \lambda(\lambda - 1) \left( 0.115 + \frac{2.3}{A + 2} \right) \left( 1.36 - \frac{0.27}{\psi} \right). \quad (3.19)$$

3) Средняя степень деформации  $\epsilon$  и скорость деформации  $u$  определяются по формулам

$$\epsilon = \frac{2}{3} * \frac{H_0 - H_1}{H_0}, \quad (3.20)$$

$$u = 0.105 n \sqrt{\epsilon * \frac{D_0}{2H_0}}, \frac{1}{c}, \quad (3.21)$$

где  $n$  – частота вращения вала

$$n = \frac{U_{\text{л}} * 1000 * 60}{D_0 * \pi}, \frac{\text{об}}{\text{мин}}. \quad (3.22)$$

### 3.4 Расчет температурных режимов прокатки

Определение температуры раската и температурных режимов прокатки является важной задачей при проектировании технологии процессов прокатки, так как от неё зависят пластические и механические свойства раската, режим обжатий, усилия и моменты прокатки, точность прокатываемых изделий.

В эту задачу входит как правильный выбор температуры нагрева металла перед прокаткой, так и определение температуры металла в любом проходе. Расчет температурного режима прокатки ведем по методу А. И. Целикова [5]. Результаты расчетов приведены в таблице 4.

Таблица 4 – Результаты расчета температурного режима прокатки

Калибр	Проход	$\Delta t_d$ , °C	$\Pi$ , мм <sup>2</sup>	$\Delta t$ , °C	$t$ , °C
1	1	0,590	114,61	12,686	1137,3
	2	0,788	114,61	6,214	1131,1
2	3	0,497	105,818	6,180	1124,9
	4	1,168	105,818	6,223	1118,7
3	5	0,424	97,34	6,537	1112,2
	6	1,106	97,34	6,542	1105,6
4	7	0,449	90,432	6,837	1098,8
	8	1,121	90,432	6,888	1091,9
5	9	0,266	84,78	7,279	1084,6
	10	0,906	84,78	7,198	1077,4
6	11	0,440	78,5	7,235	1070,2
	12	1,184	78,5	7,293	1062,9
7	13	0,320	72,848	7,616	1055,3
	14	1,104	72,848	7,581	1047,7
8	15	0,366	67,51	7,786	1039,9
	16	1,139	67,51	7,805	1032,1
9	17	0,399	62,172	7,964	1024,1
	18	1,287	62,172	8,021	1016,1
10	19	0,352	57,148	8,281	1007,8
	20	1,310	57,148	8,311	999,52
11	21	0,317	52,752	8,599	990,92
	22	1,185	52,752	8,612	982,31
12	23	0,375	48,67	8,746	973,56
	24	1,220	48,67	8,828	964,74
13	25	0,409	44,588	8,903	955,83
	26	1,425	44,588	9,041	946,79
14	27	0,323	40,82	9,268	937,52
	28	1,382	40,82	9,335	928,19
15	29	0,344	37,366	9,484	918,71
	30	1,404	37,366	9,589	909,12
16	31	0,331	34,226	9,729	899,39
	32	1,371	34,226	9,828	889,56
17	33	0,337	31,4	9,921	879,64
	34	1,328	31,4	10,027	869,61
18	35	0,339	28,888	10,082	859,53
	36	1,252	28,888	10,181	849,35
19	37	0,348	26,69	10,187	839,16
	38	1,151	26,69	10,276	828,89

Продолжение таблицы 4

	39	0,283	25,12	10,361	818,53
20	40	0,760	25,12	10,318	808,21

1) Находим периметр раската в первом проходе

$$\Pi_1 = \pi * D_1 \quad (3.23)$$

2) Определим разогрев металла за счет энергии пластической деформации

$$\Delta t_d = 0.183 \sigma_1 \ln(\lambda). \quad (3.24)$$

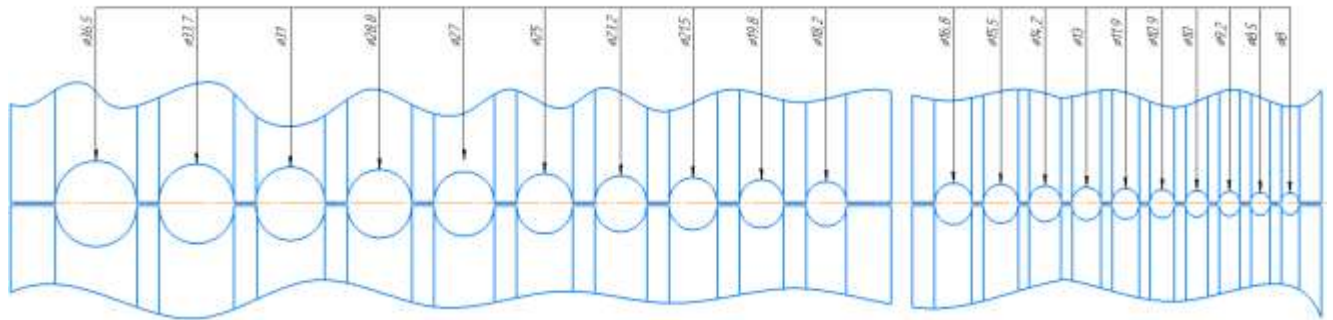
3) Посчитаем изменение температуры заготовки за время прокати

$$\Delta t = t_0 - \frac{1000}{\sqrt[3]{\frac{0.0255 * \Pi * \tau}{\omega} + \left(\frac{1000}{t_0 + \Delta t_d + 273}\right)^3}} + 273 \quad (3.25)$$

$$t = t_0 - \Delta t. \quad (3.26)$$

#### 4. Маршруты прокатки круглых профилей

Маршруты прокатки круглых профилей выглядят следующим образом (рисунок 5).



*Кантовка раската*

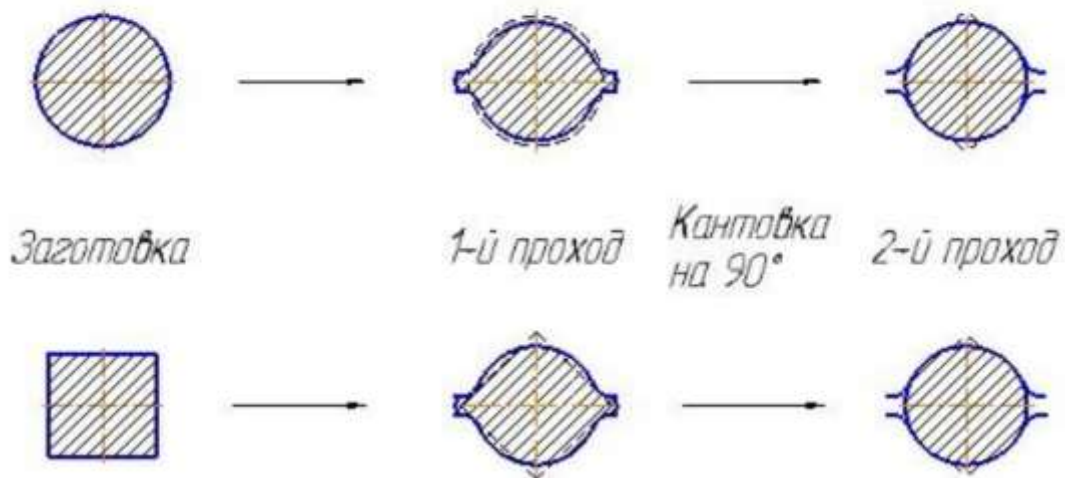


Рисунок 5. Маршрутная схема прокатки круглых профилей

## 5. Проверочные расчеты на прочность прокатных валков

Для реализации технологии прокатки круглых сортовых профилей используем прокатную клеть дуо 180, установленную в лабораторном корпусе ЮУрГУ. Для выполнения условий прочности в данной клетке проведен проверочный расчет.

Расчет ведем по методике [7].

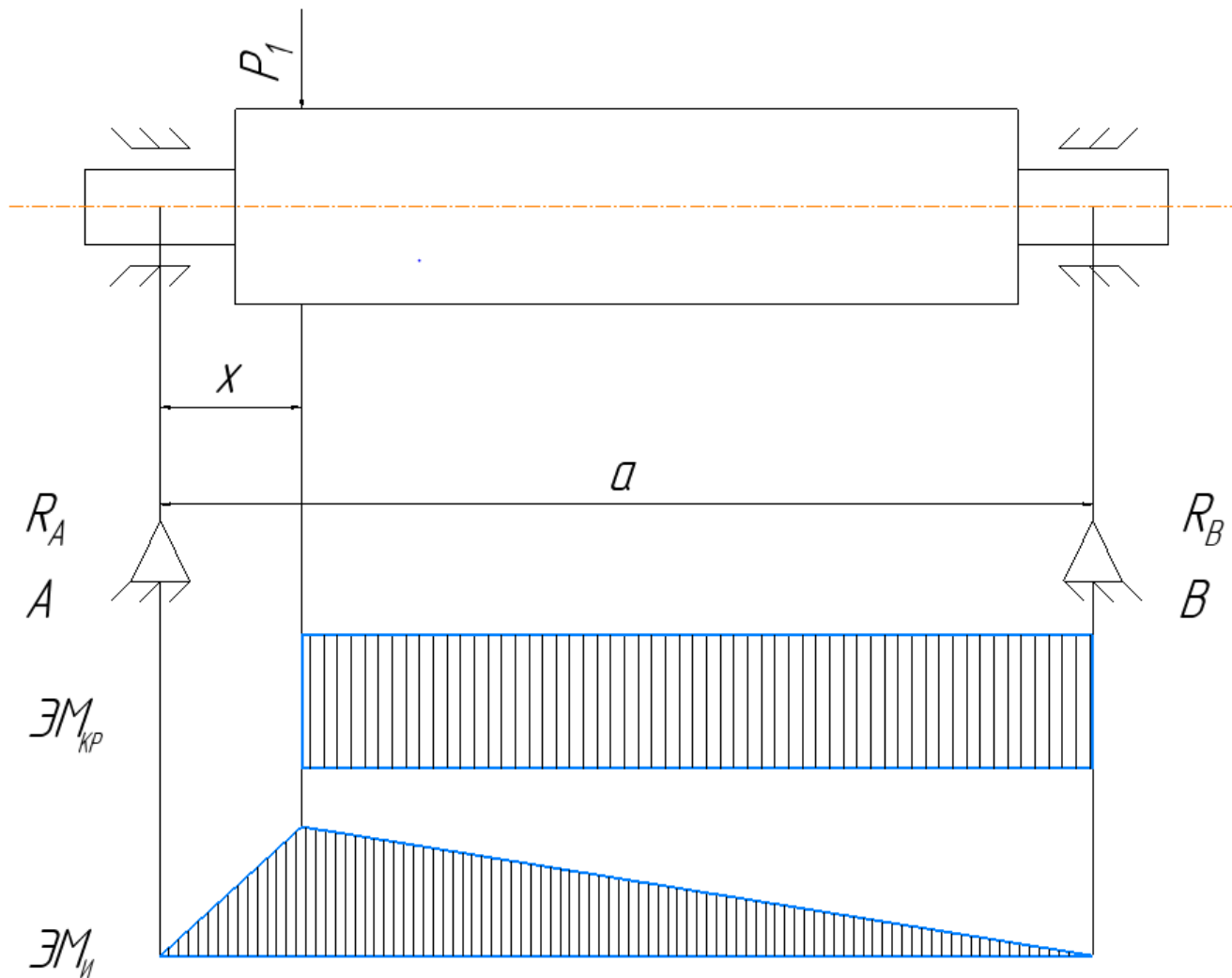


Рисунок 6. Схема нагружения валка

Рассчитаем реакции от усилия прокатки на шейки валка:

$$\sum M_A = P_1 * x - R_B * a = 0,$$

где  $P_1$  — усилие действующее на валок со стороны металла, кН;

$x$  — расстояние от опоры А, до приложения силы  $P_1$ ,  $x = 110,5$  мм;  $R_B$  — сила реакции в опоре В, мН;  $a$  — расстояние между осями опор,  $a = 545$  мм.

$$R_B = \frac{P_1 * x}{a} \quad (5.1)$$

$$R_B = 8,805 \text{ кНм};$$

$$\sum M_B = R_A * a - P_1(a - x) = 0,$$

Где  $R_A$  — сила реакции в опоре А.

$$R_A = \frac{P_1 * (a - x)}{a} \quad (5.2)$$

$$R_A = 34,624 \text{ кНм.}$$

Находим изгибающие моменты:

$$M_{\text{изг}} = R_A * x = 3,83 \quad (5.3)$$

Находим осевой момент сопротивления:

$$W_x = 0,1 - D_B^3 = 0,005 \text{ м}^3, \quad (5.4)$$

где  $D_B$  – диаметр валка  $D_B = 210 \text{ мм}$

Определим напряжение изгиба валка:

$$\sigma_u = \frac{M_{\text{изг}}}{W_x} \quad (5.5)$$

$$\sigma_u = 800,857 \text{ кН/м}^2.$$

Так как максимальное значение  $\sigma_u$  действует в первом калибре, то оно является опасным сечением и дальнейший расчет будем вести по нему.

Найдем напряжение кручения:

$$\tau_{\text{кр}} = \frac{M_{\text{кр}}}{W_{\text{кр}}}, \quad (5.6)$$

где  $M_{\text{кр}}$  – момент кручения,  $W_{\text{кр}}$  – полярный момент сопротивления

$$W_{\text{кр}} = 0,2 * d_B^3 = 2 * 10^{-4} \text{ м}^3 \quad (5.7)$$

где  $d_B$  – диаметр шейки валка  $d_B = 110 \text{ мм}$

$$M_{\text{кр}} = \frac{R_A * l}{2} = 3,772, \quad (5.8)$$

где  $l$  – длина шейки валка  $l = 215 \text{ мм}$

$$\tau_{\text{кр}} = 18,86 \text{ кН/м}^2$$

$$\sigma_{\text{и.ш}} = \frac{M_{\text{и.ш}}}{W_{\text{и.ш}}} = \frac{P * l}{0,1 * d_B^3} \quad (5.9)$$

$$\sigma_{\text{и.ш}} = 70153,644 \text{ кН/м}^2$$

Определим коэффициент запаса прочности:

$$n = \frac{\sigma}{\sigma_{\text{рез}}}, \quad (5.10)$$



где  $\sigma_{рез}$  – результирующее напряжение,  $\sigma$  – предел прочности

$$\sigma_{рез} = \sqrt{(\sigma_{и}^2 + 3 \cdot \tau_{кр}^2)} = 70153,651 \text{ кН/м}^2 \quad (5.11)$$

Результирующее напряжение не должно превышать допустимое. Для материала валков  $\sigma = 500\text{--}600 \text{ МН/м}^2$ .

$$n = 7,127$$

По условию прочности из источника [7] рекомендуемый запас прочности для прокатных валков принимают  $n = 5$ , вал проходит на статическую прочность.

## ВЫВОДЫ

В данной выпускной квалификационной работе выполнен расчет и проверка работоспособности способа прокатки по схеме круг - круг на мелкосортном стане дуо 180 установленном в лабораторном корпусе НИУ ЮУрГУ. Построена маршрутная схема прокатки круглых сортовых профилей, определены энергосиловые параметры и температурный режим прокатки, выполнен проверочный расчет рабочих валков и расчет деформационного режима прокатки.

Таким образом, расчеты показали, что технологический процесс прокатки круглого профиля по схеме круг – круг в клети дуо 180, может быть реализован в цехе любого машиностроительного завода. Применение прокатки по данной схеме позволяет приблизить поперечные сечения заготовок к сечениям готовых изделий и снизить расход металла и, как следствие, трудовые и материальные ресурсы на их производство, себестоимость инструмента.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Смирнов, В.К. Продольная прокатка заготовок металлорежущего инструмента / В.К. Смирнов, Ю.В. Инатович, И.В. Коган // М.:Металлургия. Кузнечно-штамповочное производство. – 1987. - №11. – С. 33-35.
2. Смирнов, В.К. Калибровка прокатных валков / В.К. Смирнов, Ю.В. Инатович, В.А. Шилов. М.: Теплотехник, 2010. – 490 с.
3. Лемпицкий, В.В. Сортные профили проката: Справочник / В.В. Лемпицкий, И.П. Шулаев, И.С. Тришевский и др. М.: Metallurgy, 1981. 624 с.
4. Смирнов, В.К. Деформации и усилия в калибрах простой формы / В.К. Смирнов, В.А. Шилов, К.И. Литвинов. М.: Metallurgy, 1982. – 144 с.
5. Теория прокатки: Справочник / А.И. Целиков, А.Д. Томленов, В.И. Зюзин и др. – М.: Metallurgy, 1982. – 335с.
6. Дубинский, Ф.С. Расчет на эвм температурных режимов горячей прокатки / Ф.С. Дубинский, М.А. Соседкова. Челябинск:Изд. ЮУрГУ, 1997. – 23с.
7. Королев А. А. Конструкция и расчет машин и механизмов прокатных станов, М.: Metallurgy, 1985. 374 с.