



ДОНСКОЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ  
УПРАВЛЕНИЕ ДИСТАНЦИОННОГО ОБУЧЕНИЯ И ПОВЫШЕНИЯ  
КВАЛИФИКАЦИИ

Кафедра «Технология конструкционных материалов»

## **СБОРНИК ЗАДАЧ**

по дисциплине

# **«Оборудование прокатного производства»**

Автор

Баклаг Г.Н.

Ростов-на-Дону, 2016



## Аннотация

Методические указания предназначены для студентов дневного отделения специальности 22.03.02 “Металлургия” при изучении дисциплины “Оборудование прокатного производства”. Могут быть использованы студентами других специальностей.

## Автор

к.т.н., доцент  
Баклаг Г.Н.



## Оглавление

<b>ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №1 ИЗУЧЕНИЕ КОНСТРУКЦИИ РАБОЧЕЙ КЛЕТИ ПРОКАТНОГО СТАНА И УСЛОВИЙ ЗАХВАТА ПОЛОСЫ ПРИ ПРОКАТКЕ.....</b>	<b>4</b>
<b>ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2 УРАВНЕНИЕ ПОСТОЯНСТВА ОБЪЕМА И КОЭФФИЦИЕНТЫ ДЕФОРМАЦИИ ПРИ ПРОКАТКЕ .....</b>	<b>9</b>
<b>ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №3 «ИЗУЧЕНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ И КИНЕМАТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПРИ ПРОКАТКЕ» .....</b>	<b>12</b>
<b>ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4 ИССЛЕДОВАНИЕ СИЛОВЫХ УСЛОВИЙ ПРИ ПРОКАТКЕ В ВАЛКАХ С ГЛАДКОЙ БОЧКО ..</b>	<b>16</b>

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №1

### ИЗУЧЕНИЕ КОНСТРУКЦИИ РАБОЧЕЙ КЛЕТИ ПРОКАТНОГО СТАНА И УСЛОВИЙ ЗАХВАТА ПОЛОСЫ ПРИ ПРОКАТКЕ

#### Введение

Процесс пластической деформации металла между двумя или несколькими вращающимися валками (рис.1) называется прокаткой. Если валки гладкие и имеют одинаковый диаметр, а вращаются навстречу друг другу, то процесс прокатки называется простым.

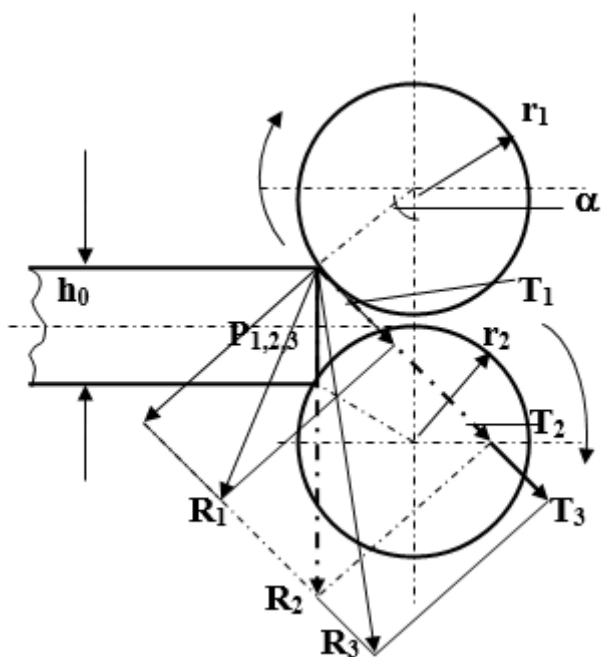


Рис.1 Схема простого процесса прокатки:  $h_0$  – исходная высота полосы;  $\alpha$  – геометрический угол захвата;  $r_1, r_2$  – радиусы валков;  $P_{1,2,3}$  – силы реакции валка  $T_1 T_2 T_3$  – силы трения  $R_1 R_2 R_3$  – результирующие силы

Условия захвата полосы при прокатке определяются соотношением геометрического угла захвата  $\alpha$  и угла трения  $\beta$ . Угол трения определяется условиями трения на контакте. Различают четыре случая соотношений между углами  $\alpha$  и  $\beta$ :

## Оборудование прокатного производства

1. При  $\alpha > \beta$  захват отсутствует и для прокатки необходима дополнительная сила заталкивания полосы между валками.

2. При  $\alpha < \beta$  – происходит свободный захват полосы валками

3. При  $\alpha = \beta$  - происходит нестабильный захват полосы

4. На установившейся стадии прокатки  $\beta = \alpha/2$

**1. Цель работы:** Изучение конструкции рабочей клетки и условий захвата полосы при прокатке.

### **2. Оборудование, материалы и инструмент**

2.1 Модель рабочей клетки для прокатки полосы, имеющая гладкие валки с рифлеными, шлифованными, полированными участками поверхности, с возможностью привода одного или двух валков.

2.2 Один образец из свинца (модель прокатываемой заготовки) круглого, прямоугольного или другого сечения.

2.3 Штангенциркуль, линейка, набор щупов для измерения зазора  $h_1$  между валками.

### **3. Порядок выполнения работы**

3.1 Измерить исходные размеры образца (длину и высоту полосы).

3.2 Закрепить установку для прокатки на верстаке, измерить диаметр валков.

3.3 Для заданного размера поперечного сечения заготовки увеличивать зазор между валками  $h_1$  (начиная от 0,5 мм) с шагом 0,5 мм. При этом, задавая заготовку в валки без дополнительного усилия заталкивания, а также при приводе валков одностороннем или двустороннем, регистрировать момент устойчивого захвата заготовки.

3.4 Пункт 3.3 выполнять для участков валков : а) полированного; б) шлифованного; в) рифленого. (Порядок проведения эксперимента указан цифрами в левом верхнем углу в ячейках таблицы ).

3.5 После захвата и прокатки заготовки в рифленой части валков последовательно уменьшать  $\Delta h = h_0 - h_1$  – абсолютное обжатие от 0,4 до 0,1 мм с целью прокатки в шлифованной части валков.

3.6 Повторить пункт 3.5, уменьшив  $\Delta h$  после деформации полосы в шлифованной части валков от 0,3 до 0,1 мм, с целью прокатки в полированной части валков и выяснения условия захвата в них.

3.7 Для определения коэффициента трения в шлифованной части валков  $\Delta h$  уменьшать от 1,5 мм с шагом 0,1 мм и регистрировать момент захвата.

## Оборудование прокатного производства

3.8 Результаты исследований занести в таблицу и оформить в виде графиков зависимости углов захвата  $\alpha$  от  $\Delta h$  для одностороннего и двустороннего привода.

3.9 Определить экспериментальные коэффициенты трения для данного материала образца и валков, а также условий контактного трения.

3.10 Провести расчеты геометрического угла захвата  $\alpha$ , используя зависимость:

$$\alpha = \sqrt{\frac{\Delta h}{r}},$$

где  $\alpha$  - угол захвата валков, рад;

$r$  - радиус валков, мм ;

$\Delta h$  - абсолютное обжатие, мм.

Используя соотношение  $\beta = \arctg f$ , где  $f$  - коэффициент трения, определить теоретические коэффициенты трения.

Рассчитать для случая холодной прокатки в шлифованной части валков теоретический коэффициент трения по формуле :

$$f = K_m \left[ 0.07 - \frac{0.1 \cdot V_v^2}{2(1 + V_v) + 3V_v^2} \right];$$

где  $V_v$  - окружная скорость валков, м/с;

$K_m$  - поправочный коэффициент, зависящий от условий смазки валков;

$K_m = 1$ - вода, керосин;  $K_m = 1,35$  машинное масло;  $K_m = 1,55$ - без смазки.

3.11. Сравнить полученные результаты теоретического расчета коэффициента трения с экспериментальными данными.

### 4. Выводы по работе:

- о влиянии типа привода на захват полосы;
- о влиянии контактных условий на захват полосы;
- о влиянии абсолютного обжатия на условия захвата;
- о сходимости теоретических и экспериментальных расчетов коэффициента трения (в последнем случае найти объяснение).

### Контрольные вопросы

1. Какие силы действуют на металл в начальный момент прокатки?

2. Какой угол называется углом захвата? Углом трения?

3. Что такое простой процесс прокатки?

4. Какое соотношение контактных сил обеспечивает захват металла валками и почему?

5. Как выражается условие захвата через коэффициент и

## Оборудование прокатного производства

угол трения?

6. Каково соотношение между углами трения и захвата в начальный момент прокатки? В случае установившегося процесса прокатки?

7. Перечислите влияние технологической смазки на процесс прокатки.

8. В чем сущность практического определения угла захвата и коэффициента трения?

9. Какие возможны пути повышения величины угла захвата?

10. Можно ли захватить металл валками, минуя условие  $\alpha < \beta$  ?





## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2

### УРАВНЕНИЕ ПОСТОЯНСТВА ОБЪЕМА И КОЭФФИЦИЕНТЫ ДЕФОРМАЦИИ ПРИ ПРОКАТКЕ

#### Общие сведения

Так как плотность металла при обработке давлением изменяется весьма незначительно, то принято считать, что объем металла до деформации равен объему металла после деформации, т.е.

$$V_0 = V_1$$

$V_0 = h_0 \cdot b_0 \cdot l_0$  - объем до деформации;

$V_1 = h_1 \cdot b_1 \cdot l_1$  - объем после деформации,

где  $h_0, b_0, l_0$  - соответственно, толщина, ширина и длина до прокатки;

$h_1, b_1, l_1$  - соответственно, толщина, ширина и длина после прокатки;

отсюда

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

$$h_0 \cdot b_0 \cdot l_0 / h_1 \cdot b_1 \cdot l_1 = 1$$

Отношение  $h_1 / h_0 = \eta$  - называется коэффициентом обжатия,

$b_1 / b_0 = \beta$  - коэффициентом уширения,

$l_1 / l_0 = \lambda$  - коэффициентом вытяжки.

$$\eta \cdot \beta \cdot \lambda = 1 \quad \text{или} \quad \ln \eta + \ln \beta + \ln \lambda = 0,$$

отсюда

$$\lambda = 1 / (\eta \cdot \beta),$$

$$\text{или} \quad \lambda = (b_0 \cdot l_0) / (b_1 \cdot l_1) = (F_0 / F_1),$$

где  $F_0$  - площадь поперечного сечения до деформации;  $F_1$  - площадь поперечного сечения после деформации.

Разность  $h_0 - h_1 = \Delta h_1$  называется абсолютным обжатием, а разность  $b_1 - b_0 = \Delta b_1$  - абсолютным уширением,  $l_1 - l_0 = \Delta l$  - абсолютным удлинением.

Суммарная вытяжка

$$\Lambda_i = \eta_0 / \eta_i = \lambda_1 \cdot \lambda_2 \cdot \lambda_3 \cdot \dots \cdot \lambda_i$$

Средний коэффициент вытяжки

$$\bar{\lambda} = \sqrt[i]{\Lambda_i}$$

**Цель работы:** подтвердить условие постоянства объема при прокатке и ознакомиться с коэффициентами деформации

**Оборудование:** модель стана дуо, свинцовые образцы, штангенциркуль.

## Оборудование прокатного производства

**Методика проведения работы:**
**1. Проверка закона постоянства объема**

Перед прокаткой тщательно измеряют толщину, ширину и длину образца в трех точках по каждому параметру. Затем образец строго перпендикулярно задают в валки, прокатывают за один проход в продольном направлении с произвольным обжатием и измеряют толщину, ширину и длину также в трех точках. Результаты опытов заносят в табл. 2. Подсчитывают относительную погрешность закона постоянства объема по формуле

$$\Delta = ( I_0 - I_1 ) / I_0$$

Таблица 2

Замер	$h_0$ , мм	$b_0$ , мм	$l_0$ , мм	$h_1$ , мм	$b_1$ , мм	$l_1$ , мм	$I_1 / I_0$
1							
2							
3							
Среднее							

**Вычисление коэффициентов деформации.**

Из свинца изготавливают образец размером  $h_0 \times b_0 \times l_0$  и прокатывают в пять проходов с обжатием за проход  $\Delta h = 1$  мм. После каждого прохода измеряют толщину  $h_i$ , ширину  $b_i$ , длину  $l_i$  и заносят в табл. 3.

Затем определяют: а) площадь поперечного сечения  $F_0$ , мм<sup>2</sup>; б) абсолютное обжатие  $\Delta h_i$ , мм; вытяжку  $\lambda_i$ ; в) суммарную вытяжку  $\Lambda_i$ ; г) коэффициент обжатия  $\eta_i$ ; д) коэффициент уширения  $\beta_i$  и строят графики зависимости  $\lambda_i$ ,  $\Lambda_i$  от проходов.

Таблица 3

№ прохода, i	$h_i$ , мм	$b_i$ , мм	$l_i$ , мм	$\Delta h_i$ , мм	$\eta_i$	$\beta_i$	$\lambda_i$	$\Lambda_i$	Коэффициент вытяжки		
									по длине $\lambda_i = l_i / l_0$	по площади $\lambda_i = F_0 / F_i$	по толщине $\lambda_i = h_0 / h_1$
1											
2											
3											
4											
5											

**Выводы:** - о постоянстве объема;  
 - о соответствии суммарной вытяжки произведению вытяжек по проходам.

## Оборудование прокатного производства

### **Контрольные вопросы.**

1. Как выражается условие постоянства объема?
2. Что такое коэффициенты деформации?
3. Как определяется вытяжка?
4. Чему равна суммарная вытяжка?
5. Что такое абсолютные и относительные изменения размеров при прокатке?

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №3 «ИЗУЧЕНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ И КИНЕМАТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПРИ ПРОКАТКЕ»

### Общие сведения

При продольной прокатке заготовка подвергается пластической деформации не по всему объему одновременно, а только в зоне контакта с вращающимися навстречу друг другу валками. При этом в каждый последующий момент в зазор между валками поступает новый объем прокатываемого металла. Таким образом, прокатка является непрерывным процессом и заканчивается тогда, когда деформация заготовки завершится по всей её длине. Исследованиями установлено, что в большинстве случаев скорость полосы на выходе из валков  $V_1$  больше окружной скорости валков  $V_B$ , а скорость полосы на входе в валки  $V_0$  меньше горизонтальной составляющей окружной скорости валков  $V_B \cdot \cos \alpha$ , соответствующей углу захвата  $\alpha$  (рис. 1). Поскольку выполняется неравенство

$$V_1 > V_B > V_0,$$

то в очаге деформации должно существовать хотя бы одно сечение, в котором скорость течения полосы будет равна горизонтальной составляющей скорости валка. Это сечение  $NN_1$  называют нейтральным сечением, а центральный угол  $\gamma$ , определяющий положение этого сечения — нейтральным углом.

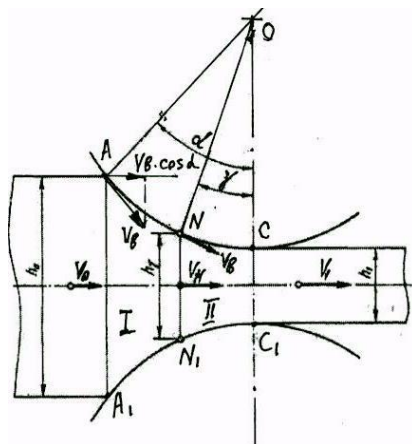


Рис. 2 Схема прокатки

На участке I от нейтрального угла  $\gamma$  до угла захвата  $\alpha$  скорость течения полосы меньше горизонтальной составляющей скорости валка, т. е.  $V_0 < V_B \cdot \cos \alpha$ ; здесь металл отстает в своем перемеще-

## Оборудование прокатного производства

нии от перемещения поверхности валка.

На участке II от нейтрального угла  $\gamma$  до выхода из валков скорость течения полосы больше окружной скорости валка, т. е.  $V_1 > V_B$ . На этом участке металл в своем движении опережает поверхность валка.

Превышение скорости выхода металла из валков  $V_1$  по сравнению с окружной скоростью валков  $V_B$  называют **опережением** и определяют соотношением :

$$S_{оп} = (V_1 - V_B) / V_B = (l_1 - l_B) / l_B$$

**Отставанием** называют отношение разности горизонтальной проекции окружной скорости валка  $V_B \cdot \cos \alpha$  и скорости входа металла  $V_0$  к величине  $V_B \cdot \cos \alpha$  :

$$S_{от} = (V_B \cos \alpha - V_0) / V_B \cdot \cos \alpha$$

Тогда величину отставания можно рассчитать по выражению:

$$S_{от} = (l_B \cdot \cos \alpha - l_1 h / h_0) / l_B \cdot \cos \alpha$$

где  $l_B$  и  $l_1$  - расстояния, которые проходят точка на поверхности валка и передний конец полосы за время  $t$ .

Соотношение между опережением и отставанием зависит от многих факторов, в основном, от коэффициента трения и поперечной деформации.

Связь между опережением и отставанием учитывают, когда полоса прокатывается одновременно более чем в одной паре валков, для определения скорости валков соседних клетей и деформации полосы.

### Определение опережения и отставания при прокатке.

Наиболее простым способом экспериментального определения опережения и отставания при прокатке является метод обратных меток (метод кернов), позволяющий по результатам одного опыта рассчитать обе интересующие величины.

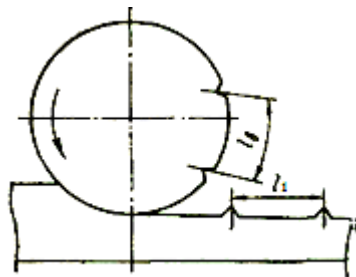


Рис. 3 Метод обратных меток

Сущность метода обратных меток заключается в следующем: на поверхность валка до прокатки (рис. 3) наносят в виде тонких

## Оборудование прокатного производства

поперечных рисок два керна (метки) на некотором расстоянии  $l_в$  друг от друга. Затем их заполняют густой масляной краской и полосу прокатывают. После прокатки на прокатанной полосе остаются отпечатки кернов (метки), расположенные друг от друга на расстоянии  $l_1$ .

Измерив величины  $l_в$  и  $l_1$ , рассчитывают опережение и отставание.

Однако, в связи с тем, что нанесение меток ударным инструментом (керном) на поверхность рабочего валка практически является задачей невыполнимой, то для поведения экспериментальной прокатки в лабораторных условиях применим следующий вариант реализации описанного выше метода: на заготовку для холодной прокатки накладывают (с одной стороны) стальную тонкую жесткую пластину, (например, стальную слесарную линейку), которая будет имитировать при прокатке поверхность одного из валков. Линейка имеет конечный размер (длину), которая будет определять размер  $l_в$  на поверхности валка (расстояние между метками).

После прокатки длина стальной полосы (линейки) останется без изменений, а длина её отпечатка на прокатанной полосе станет равной величине  $l_1$ .

Замерив длину её отпечатка, рассчитывают опережение и отставание по указанным выше выражениям.

**Цель работы:** Изучение метода экспериментального определения величины опережения при прокатке и оценка точности этого метода.

**Оборудование:** модель стана дуо, свинцовые образцы, штангенциркуль.

**Методика выполнения работы:** подготовить свинцовые образцы и измерить их размеры, настроить модель стана для прокатки образцов.

Прокатать образцы, причем задачу их в валке выполнить так, чтобы во время прокатки в очаге деформации обязательно находился сектор валка с керновыми отпечатками.

После прокатки измерить размеры образцов, а также расстояние между следами керновых отпечатков.

Определить величину опережения и отставания для каждого образца. Результаты измерений занести в таблицу 4.

С помощью гибкой линейки измерить расстояние между керновыми отпечатками на валках  $l_в$ . Значение  $L_1$  - *расстояние между отпечатками кернов на полосе*, измеряется после каждого прохода, и находится опережение и отставание при прокатке.

Результаты измерений и расчетов

## Оборудование прокатного производства

Таблица 4

№ опыта	$h_0$	$h_1$	$b_0$	$b_1$	$l_0$	$l_1$	$l_B$	$L_1$	$S_{оп}$	$S_{от}$
1										
2										
3										

**Выводы по работе:** О возможности применения метода керновых отпечатков при определении опережения и отставания при прокатке и точности данного метода.

**Контрольные вопросы.**

1. Что такое опережение?
2. Что такое отставание?
3. Как определить опережение и отставание теоретически?
4. Как определить опережение и отставание экспериментально?
5. Когда опережение и отставание равны?
6. Что такое нейтральное сечение?

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4 ИССЛЕДОВАНИЕ СИЛОВЫХ УСЛОВИЙ ПРИ ПРОКАТКЕ В ВАЛКАХ С ГЛАДКОЙ БОЧКО

### Общие сведения

Силы, возникающие при прокатке, воспринимаются прокатными валками и через подшипники, нажимное устройство, передаются на станины рабочей клетки.

Рассчитывая режим обжатий при прокатке или конструируя новый стан, нужно знать: какие силы будут действовать со стороны металла на валки и другие детали стана, чтобы полностью использовать энергосиловые параметры без риска аварий и поломок.

Сила при прокатке может быть определена по формуле:

$$P = p_{cp} \cdot F,$$

где  $p_{cp}$  - среднее давление прокатки;  $F$  - площадь контакта металла с валками,

Для определения среднего давления прокатки существует большое количество формул. Статистический анализ вычислений, выполненный по многим формулам, показал, что на давление прокатки основное влияние оказывают два фактора:

1) коэффициент трения, причем в качестве условия трения принимается либо закон Зибеля (горячая прокатка), либо закон Амонтона-Кулона (холодная прокатка);

2) геометрический фактор формы зоны деформации

$$Z = l_d / h_{cp}$$

где  $l_d$  - длина зоны деформации  $l_d = R \alpha$  (рад)

$h_{cp}$  - средняя толщина прокатываемой полосы равная  $h_{cp} = (h_0 + h_1) / 2$ ,

$R$  - радиус валков,  $\alpha$  - геометрический угол захвата в радианах.

Для горячей прокатки:

$$l_d = \sqrt{R \times \Delta h},$$

где  $R$  - радиус валков;  $\Delta h$  - абсолютное обжатие;

Для определения давления при холодной прокатке наибольшее распространение получили формулы: 1) А.И. Целикова:

$$p_{cp} = 1,15 \times \sigma_s \times \frac{2h_1}{\Delta h \times (\delta - 1)} \times \frac{h_0}{h_1} \left\{ \left[ \frac{h_0}{h_1} \right]^\delta - 1 \right\},$$

$$\sigma_s = (\sigma_{s0} + \sigma_{s1}) / 2,$$

где  $\sigma_{s0}$ ,  $\sigma_{s1}$  - предел текучести металла до и после прокат-



## Оборудование прокатного производства

ки ( для свинца  $\sigma_{s0} = \sigma_{s1} = 3-4 \text{ кг/мм}^2$ .

$$\delta = \frac{2 \times f \times l_d}{\Delta h}$$

$\Delta h$  - параметр, учитывающий трение

где  $f$  - коэффициент трения (взять из лабораторной работы №1 для соответствующих участков валков);  $l_d$  - длина зоны деформации.

2) формула Стоуна

$$p_{cp} = 1,15 \times \sigma_s \times \frac{e^x - 1}{x},$$

где  $e$  - основание натурального логарифма;

$$x = \frac{2 \times f \times l_d}{h_0 + h_1}$$

Площадь контакта металла с валками

$$F = \frac{b_0 + b_1}{2} \times l_d$$

Момент прокатки

$$M_{пр} = P \cdot D,$$

где  $D$  – плечо силы  $P$ ,  $D = \sqrt{R \times \Delta h}$

**Цель работы:** получение навыков экспериментального определения усилия и момента прокатки.

**Оборудование:** Модель стана дуо, свинцовые образцы, штангенциркуль, динамометр.

**Методика выполнения работы:**

Подготовить свинцовые образцы и их размеры занести в таблицу 1.

Измерить диаметр валков  $D_b = 2R$ , плечо приложения силы вручную -  $l_p$ .

Прокатать образец последовательно в рифленной и шлифованной части валков фиксируя размеры сдеформированного образца и усилие по динамометру  $P_{дин}$ .

Результаты занести в таблицу 5. Провести расчеты экспериментальных силы и момента прокатки, затем те же параметры теоретически по формулам Целикова А.И. и Стоуна.

$$M_{экс} = P_{дин} \cdot l_p.$$

$$P_{экс} = M_{экс} / R$$

## Оборудование прокатного производства

Таблица 5

h <sub>0</sub>	h <sub>1</sub>	Δh	b <sub>0</sub>	b <sub>1</sub>	Расчетное P <sub>p</sub> , кг		P <sub>экс</sub> , кг	Расчетный момент, M <sub>p</sub> , кг · мм		M <sub>экс</sub> , кг · мм
					По Целикову А.И.	По Стоуну		По Целикову А.И.	По Стоуну	
Для рифленной поверхности ( $f = 0, \quad$ )										
Для шлифованной поверхности ( $f = 0,11$ )										

В **выводах** сравнить полученные экспериментальные и теоретические результаты и дать им оценку.

**Контрольные вопросы**

1. Охарактеризуйте наипростейший способ прокатки.
2. Каким образом определяется момент прокатки?
3. От каких факторов зависит среднее удельное давление металла на валки?
4. Как рассчитывается усилие прокатки?
5. Какие потери мощности наблюдаются при прокатке?
6. Назовите способы определения среднего удельного давления.