Министерство науки
и высшего образования
Российской Федерации

Уральский федеральный университет
имени первого Президента России Б.Н.Ельцина

**Е. Ю. Раскатов, А. А. Паршина**

# РАСЧЕТ ЭЛЕМЕНТОВ ПРОКАТНОГО ОБОРУДОВАНИЯ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ПРЕДПРИЯТИЙ

## Электронный текстовый ресурс

Ресурс предназначен для использования в составе модуля М.1.12 «Технология и оборудование металлургического производства» для бакалавров направления подготовки 15.03.02 «Технологические машины и оборудование». В ресурсе представлены методические указания для выполнения практических и лабораторных работ по дисциплине «Металлургические машины и оборудование».

Научный редактор: проф., д.т.н. Е. Ю. Раскатов

Подготовлено кафедрой «Металлургические машины и оборудование»
ИНМиТ УрФУ

**Екатеринбург**

**2020**

Методические указания составлены авторами, представленными в таблице 1:

Таблица 1. Авторы учебного электронного текстового ресурса

| № п/п | ФИО | Ученая степень, ученое звание | Должность | Кафедра | Подпись |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | Раскатов Евгений Юрьевич | доктортехн. наук | Заведующий кафедрой; Профессор | Металлурги-ческие и роторные машины | |
| 2 | Паршина Анастасия Анатольевна | кандидат техн. наук | Старший преподова-тель | Металлурги-ческие и роторные машины | |

# СОДЕРЖАНИЕ

ОРГАНИЗАЦИЯ ПРАКТИЧЕСКИХ, ЛАБОРАТОРНЫХ ЗАНЯТИЙ И САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ СТУДЕНТОВ ПО ДИСЦИПЛИНЕ ..... 4

**1. Методические указания к выполнению практических работ** ..... 4

***1.1 Методические указания к выполнению практической работы №1*** ..... 6

***1.2 Методические указания к выполнению практической работы №2*** ..... 14

***1.3 Методические указания к выполнению практической работы №3*** ..... 26

***1.4 Методические указания к выполнению практической работы №4*** ..... 31

***1.5 Методические указания к выполнению практической работы №5*** ..... 36

***1.6 Методические указания к выполнению практической работы №6*** ..... 41

**2. Методические указания к выполнению лабораторных работ** ..... 53

**2.1. Методические указания к выполнению лабораторной работы №1** ..... 54

***2.2. Методические указания к выполнению лабораторной работы №2*** ..... 65

***2.3. Методические указания к выполнению лабораторной работы №3*** ..... 74

РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА ..... 87

**3.1. Основная литература** ..... 87

**3.2. Дополнителнаная литература** ..... 87

## ОРГАНИЗАЦИЯ ПРАКТИЧЕСКИХ, ЛАБОРАТОРНЫХ ЗАНЯТИЙ И САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ СТУДЕНТОВ ПО ДИСЦИПЛИНЕ

### 1. Методические указания к выполнению практических работ

В пункте 4.2. рабочей программы дисциплины «Металлургические машины и оборудование» направления подготовки 15.03.02 «Технологические машины и оборудование» для бакалавров модуля М.1.12 «Технология и оборудование металлургического производства»[1]предусмотрены практические занятия, представленные в таблице 2.

Таблица 2. Организация практических занятий, самостоятельных работ по дисциплине «Металлургические машины и оборудование»

| Код раздела, темы | Номер занятия | Тема занятия | Время на проведение занятия (час.) |
|---|---|---|---|
| Р4 | 1 | Прокатные валки. | 1 |
| Р4 | 2 | Рабочие линии прокатных станов. Рабочие клети прокатных станов. Прокатные валки. | 1 |
| Р4 | 3 | Подшипники прокатных валков. Подушки прокатных валков. | 2 |
| Р4 | 4 | Вспомогательные устройства рабочих клетей. | 2 |
| Р4 | 5 | Соединительные элементы рабочей линии стана. | 2 |
| Р4 | 6 | Станины рабочих клетей. Шестерённые клети и становые редукторы. | 2 |

| | |
|---|---|
| Всего: | 10 |

Согласно рабочей программы дисциплины[1] в результате освоения дисциплины студент должен:

1. Знать:

- методические, нормативные и руководящие материалы, касающиеся выполняемой работы;

- проблемы создания машин различных типов, приводов, систем, принципы работы, технические характеристики, конструктивные особенности разрабатываемых и используемых технических средств;

- методы расчёта технологических линий и комплексов металлургических производств по получению чёрных и цветных металлов и обработке металлов давлением

- структуру существующих технологических линий и комплексов по производству чёрных и цветных металлов, а также цехов по их обработке.

2. Уметь:

- применять знания и понимание для выбора типов машин и их количества для технологических линий и комплексов металлургических производств;

- представлять в рамках изученного материала данные в виде расчетных процедур, графиков и технологической документации;

- выносить суждения, формулировать выводы и предложения по улучшению параметров технологического процесса;

- комментировать в устной и письменной форме, представленные технологические документы преподавателю и своим коллегам.

3. Владеть

- навыками и опытом деятельности при расчете технологических задач и в использовании автоматизированных методов формирования технологических документов.

Данное методическое пособие способствует освоению теоретического материала, закреплению практических навыков и компетенций в рамках, требуемых рабочей программы дисциплины.

### *1.1 Методические указания к выполнению практической работы №1*

**Прокатные валки**

1.Общие сведения

Известно, что жесткость и прочность рабочей клети прокатного стана в значительной мере влияет на эффективность работы стана в целом, себестоимость и качество готовой продукции [2].Таким образом, грамотный расчет оборудования рабочей клети является необходимым при проектировании прокатного оборудования. Чаще всего форма и размеры детали предварительно рассчитывается по эмпирическим соотношениям, которые получают из обобщенного опыта проектирования, а затем проверяют дополнительными расчетами на прочность и жесткость. После таких расчетов иногда требуется корректировка принятых размеров.

Это пособие посвящено на описание методики и рассмотрению примеров проверочного расчета детали рабочих клетей различных типов на основе заданных типоразмеров и действующих нагрузок.

Чаще всего проверочный расчет деталей прокатных клетей производится в такой последовательности:

- определяется для детали схема нагружения с указанием заданных внешних сил;

- рассчитывается величина механических напряжений, возникающих в опасных зонах;

- определяется по справочной литературе временное сопротивление материала, из которого деталь изготавливается;

- проверяется выполнение условия прочности, которое имеют одну из двух формулировок:

1. Расчетные напряжения не должны быть больше допускаемых:

$$\sigma \leq [\sigma] = \frac{\sigma_в}{[n]}; \tau \leq [\tau] = \frac{\tau_в}{[n]} \qquad (1.1)$$

2. Расчетный коэффициент запаса прочности $n$должен превышать допустимое значение такового $[n]$

$$n = \frac{\sigma_в}{\sigma} \geq [n]; n = \frac{\tau_в}{\tau} \geq [n] \qquad (1.2)$$

где $\sigma$ и $\tau$ - расчетные нормальные и касательные напряжения; $[\sigma]$и $[\tau]$- допускаемые нормальные и касательные напряжения; $\sigma_в$и $\tau_в$- предел прочности материала по нормальным и касательным напряжениям; $[n]$- допустимый коэффициент запаса прочности.

Допустимое значение коэффициента запаса прочности для всех деталей клетипринимают равным 5, а для станины, являющейся наиболее ответственным элементом прокатного стана - 10.

При расчете на статическую прочность прокатный валок условно представляют как балку, имеющую две опоры и загруженную силами и крутящими моментами, учитывая тот факт, что схема нагружения зависит от типа клети иусловий процесса прокатки.

На практике ширина листа сопоставима с длиной бочки валка,поэтомусчитают, что нагрузка на бочку валка от усилия прокатки P равномерно распределена по ширине листа B (q = P/B) и приложена симметрично относительно вертикальной оси валка (рисунок 1.1).

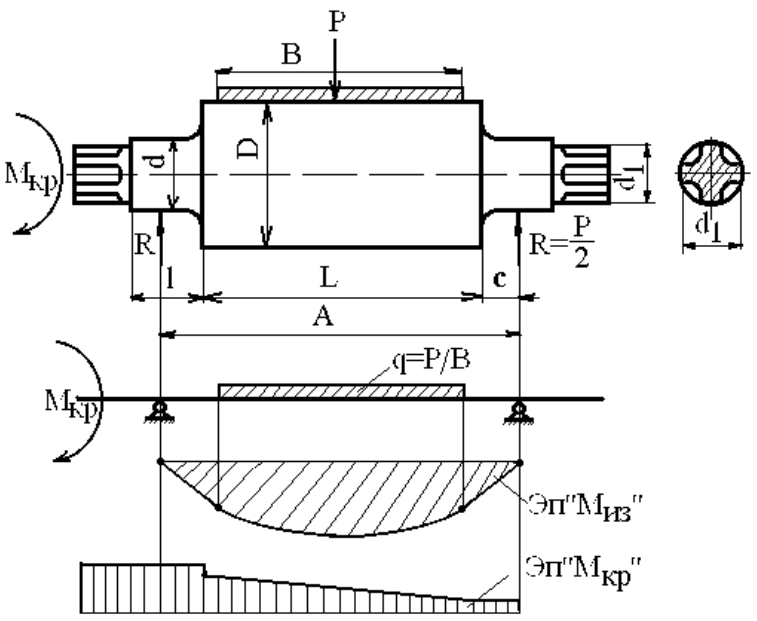



Рисунок 1.1 Схема нагружения валкарабочей клети дуо листопрокатного стана. Расчет на изгиб, шейки - на изгиб и кручение [2].

В этой связи реакции на шейки валков равны R = P/2. К приводной шейке валка прикладывается крутящий момент $M_{кр}$. Однако,поскольку диаметр бочки D обычно существенно больше диаметра шейки d, напряжениями кручения в бочке обычно пренебрегают и проводят расчет бочки валка только на изгиб, а шейки - на изгиб и кручение.

Максимальные изгибные напряжения в бочке валка рассчитывают по формуле

$$\sigma_{изг} = \frac{M_{из}}{W_{из}} = \frac{M_{из}}{0{,}1D^3}, \qquad (1.3)$$

где $M_{из}$ - максимальный изгибающий момент, кН·м; $W_{из}$=0,1D$^3$ - момент сопротивления бочки валка изгибу, м$^3$.

$$M_{из} = \frac{P}{4}\left(A - \frac{B}{2}\right). \qquad (1.4)$$

Максимальные изгибные напряжения в шейке валка возникаютв галтели (месте соединения шейки и бочки валка) и равны

$$\sigma_{изг.ш} = \frac{Pl}{0.4d^3}\ . \qquad (1.5)$$

Наибольшие касательные напряжения кручения имеют местов приводной шейке валка (см. рис. 2.1) и составляют:

$$\tau_{кр.ш} = \frac{M_{кр}}{W_{кр.ш}} = \frac{M_{кр}}{0{,}2d^3}, \qquad (1.6)$$

где $W_{\text{кр.ш}} = 0{,}2d^3$ - момент сопротивления шейки кручению.

Суммарное напряжение в шейке определяют учитывая материал валка:

- для валков из стали по 4-й теории прочности

$$\sigma_{\text{ш}} = \sqrt{\sigma_{\text{из.ш}}^2 + 3\tau_{\text{кр.ш}}^2}, \qquad (1.7)$$

- для валков из чугуна по теории Мора

$$\sigma_{\text{ш}} = 0{,}375\sigma_{\text{изг.ш}} + 0{,}625\sqrt{\sigma_{\text{из.ш}}^2 + 4\tau_{\text{кр.ш}}^2} \qquad (1.8)$$

Напряжения в приводном хвостовике валка определяют в зависимости от его формы. Если он имеет форму трефа (см. рисунок 2.1), то напряжения кручения рассчитывают по формуле

$$\tau_{\text{тр}} = \frac{M_{\text{кр}}}{0{,}0706d_1^3}. \qquad (1.9)$$

Если хвостовик валка выполнен цилиндрическим со шпоночным пазом под съемную шпиндельную головку, то его рассчитывают также на кручение по формуле

$$\tau_{\text{кр}} = \frac{M_{\text{кр}}}{0.2d_2^3 - \frac{bh(2d_2-h)^2}{16d_2}}. \qquad (1.10)$$

Для хвостовика в виде лопасти универсального шарнира определяют напряжения в двух сечениях. В сечении I-I рассчитывают напряжения изгиба и кручения:

$$\sigma_{\text{изг}} = \frac{P_1 x}{W_{\text{из}}} \text{ и } \tau_{\text{кр}} = \frac{P_1 I}{W_{\text{кр}}}, \qquad (1.11)$$

$$\text{где } P_1 = \frac{M_{\text{кр}}}{2f}, W_{\text{из}} = \frac{b-c}{2}\frac{S^2}{6}, \qquad (1.12)$$

η - коэффициент, учитывающий отношение сторон лопасти и принимающий значение 0.25-0.30 .

Таблица №1.1 Предел прочности материала валков

| Кованые валки | | Литые валки | |
|---|---|---|---|
| Марка стали | $\sigma_{\text{в}}$, МПа | Марка материала | $\sigma_{\text{в}}$, МПа |
| 1. Углеродистые стали 50-60 | 600-650 | 1. Углеродистые стали 50-70 | 500-600 |

| | | | |
|---|---|---|---|
| 2. Легированные стали 55Х, 55ХН, 60ХН | 620-680 | 2. Легированные стали 50Х, 55Х, 55ХН, 60ХН,<br>У15ХНМ | 580-650<br>680-700 |
| 3. Легированные стали 9Х, 9Х2, 9ХФ, 9ХМ, 9Х2М | 800-1000 | 3. Чугун<br>СШ-СШХН, ЛШ-ЛШХН<br>СП-СПХН, ЛП-ЛПХН | 400-500<br>400-500 |

Суммарные напряжения находят по формулам (1.7) или (1.8) в зависимости от материала валка.

В сечении II-II хвостовик в форме лопасти испытывает только напряжения кручения, которые рассчитывают по формуле:

$$\tau_{\text{кр}} = \frac{M_{\text{кр}}}{W_{\text{кр}}} = \frac{M_{\text{кр}}}{\eta b S^2}. \qquad (1.13)$$

После для каждого элемента валка проверяют выполнение условия прочности. Для предела прочности валков по нормальным напряжениям $\sigma_{\text{в}}$численные значения в зависимости от материала приведены в табл. 1.1 [3].

Значения предела прочности металла на сдвиг чаще всего принимают как часть от $\sigma_{\text{в}}$: $\tau_{\text{в}}$=(0,6 ÷ 0,7)$\sigma_{\text{в}}$.

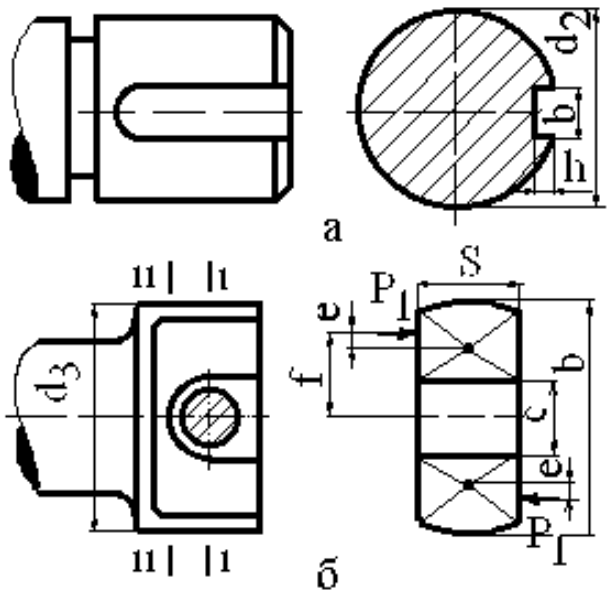


Рисунок 1.2 Форма хвостовиков прокатных валков: а – цилиндрический под съемную головку шпинделя; б - лопасть для универсального шарнира[2]

## 2. Цель работы

Научиться осуществлять расчет на статическую прочность элементов и деталей прокатного стана, изучить основные алгоритмы, приемы расчета. Ознакомиться с сопутствующими справочными данными, их правильным использованием и применением.

## 3. Вопросы для подготовки к практической работе

1. Понятие прочности детали клети и прочностного расчета этой детали
2. Последовательность проверочного расчета каждой детали клети
3. Конструкция валка листовых и полосовых станов дуо
4. Условие прочности, выраженное через нормальные и касательные напряжения
5. Условие прочности, выраженное через коэффициент запаса прочности
6. Понятие статической прочности
7. Основные элементы прокатного валка листового стана

## 4. Задания для выполнения практической работы

Произвести расчет на прочность валка черновой рабочей клети дуо широкополосного стана. Размеры валка (см. рисунок 1.1), м: D, L, A, d, l, $d_1$.Ширина прокатываемого листа B,м. Усилие прокатки P,кН.К трефу валка приложен крутящий момент $M_{кр}$, кНм. Материал валка - литая сталь. Маркистали для вариантов 1-6: У15ХНМ, для вариантов 7-9: 55Х, для вариантов 10-11: 60ХН. Варианты заданий представлены в таблице 1.2.

Таблица 2.1. Варианты заданий

| N | Материал | D, м | L, м | A, м | d, м | l, м | $d_1$, м | P, кН | B, м | $\sigma_в$, МПА | $M_{кр}$, кН*м |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|

| | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | У15ХНМ | 0,85 | 1,4 | 2.15 | 0.6 | 0.75 | 0.42 | 8000 | 1.0 | 700 | 450 |
| 2 | У15ХНМ | 0,8 | 1,5 | 2 | 0,5 | 0,7 | 0,4 | 8000 | 1,1 | 700 | 400 |
| 3 | У15ХНМ | 0,9 | 1,6 | 2,2 | 0,7 | 0,8 | 0,45 | 8000 | 1,1 | 700 | 500 |
| 4 | У15ХНМ | 0,7 | 1,7 | 2,2 | 0,5 | 0,6 | 0,3 | 7000 | 1.2 | 680 | 180 |
| 5 | У15ХНМ | 0,75 | 1,5 | 2,1 | 0,55 | 0,65 | 0,35 | 7000 | 1.1 | 680 | 250 |
| 6 | У15ХНМ | 0,6 | 1,4 | 2,0 | 0,4 | 0,5 | 0,3 | 6000 | 1.0 | 680 | 150 |
| 7 | 55Х | 0,65 | 1,4 | 2,0 | 0,45 | 0,55 | 0,35 | 6000 | 1.0 | 650 | 250 |
| 8 | 55Х | 0,5 | 1,3 | 1,9 | 0,3 | 0,4 | 0,25 | 3200 | 0.9 | 650 | 100 |
| 9 | 55Х | 0,55 | 1,3 | 1,9 | 0,35 | 0,45 | 0,3 | 4500 | 0.9 | 650 | 150 |
| 10 | 60ХН | 0,8 | 2,0 | 2,5 | 0,6 | 0,7 | 0,5 | 9000 | 1.8 | 580 | 500 |
| 11 | 60ХН | 0,9 | 1,7 | 2.1 | 0,7 | 0,7 | 0,4 | 8000 | 1.2 | 580 | 300 |

## 5. Порядок выполнения работы

Рассмотрим решение практической работы на примере 1 варианта задания, согласно которомуисходные данные:

- размеры валка (см. рис.1.1):D=0,85 м, L=1,4 м, A=2,15м, d=0,6 м, l=0,75м, $d_1$=0,42м.

- усилие прокатки P=8000кН. К трефу валка приложен крутящий момент $M_{кр}$=450 кНм. Ширина прокатываемого листа B=1,0м. Материал валка –сталь У15ХНМ.

Решение

По формуле (1.2) рассчитаем максимальный изгибающий момент в бочке валка:

$$M_{из} = \frac{P}{4}(A - \frac{B}{2})$$

$$M_{из} = \frac{8000}{4}\left(2{,}15 - \frac{1{,}0}{2}\right) = 3{,}3 \text{Мн·м}$$

Соответствующее ему напряжение изгиба в бочке валка определим по формуле (1.1):

$$\sigma_{изг} = \frac{M_{из}}{W_{из}} = \frac{M_{из}}{0{,}1D^3}$$

$$\sigma_{изг} = \frac{3{,}3}{0{,}1 \cdot 0{,}85^3} = 53{,}73 МПА$$

Максимальное изгибающее напряжение в шейке валка при расчете по формуле (1.3) составит:

$$\sigma_{изг.ш} = \frac{Pl}{0.4d^3}$$

$$\sigma_{изг.ш} = \frac{8000 \cdot 0{,}75}{0.4 \cdot 0{,}6^3} = 69{,}44 Мпа$$

Напряжение кручения в приводной шейке валка получим по (1.4)

$$\tau_{кр.ш} = \frac{M_{кр}}{W_{кр.ш}} = \frac{M_{кр}}{0{,}2d^3}$$

$$\tau_{кр.ш} = \frac{450}{0{,}2 \cdot 0{,}6^3} = 10{,}42 МПА$$

Поскольку валок изготовлен из стали, суммарное напряжение в шейке валка найдем по формуле (1.7)

$$\sigma_{ш} = \sqrt{\sigma_{из.ш}^2 + 3\tau_{кр.ш}^2}$$

$$\sigma_{ш} = \sqrt{69{,}44^2 + 3 \cdot 10{,}42^2} = 71{,}75 МПа$$

Так как хвостовик валка выполнен в форме трефа, то напряжение кручения в нем рассчитывается по формуле (1.9)

$$\tau_{тр} = \frac{M_{кр}}{0{,}0706d_1^3}$$

$$\tau_{тр} = \frac{M_{кр}}{0{,}0706 \cdot 0{,}42^3} = 86{,}03 МПа$$

Учитывая полученные напряжения определим коэффициенты запаса прочности в каждом элементе валка по формулам (1.2), принимая по таблице 1.1 предел прочности для материала валка на изгиб $\sigma_в = 700$МПа и на кручение $\tau_в = 0{,}7 \cdot \sigma_в = 0{,}7 \cdot 700 = 490$МПа. В результате получим следующие коэффициенты запаса прочности:

$$\text{в бочке валка n} = \frac{700}{57{,}73} = 13{,}03,$$

$$\text{в шейке валка n} = \frac{700}{71.75} = 9{,}76$$

$$\text{в трефе валка n} = \frac{490}{86{,}03} = 5{,}70$$

Все полученные значения коэффициентов запаса прочности выше допустимого [n]=5, т.е. прочность всех элементов валка достаточная. Вывод - наиболее слабым элементом валка является приводной треф.

6. Содержание отчета

В отчёте приводится цель работы, исходные данные, схема прокатного валка с эпюрами изгибающих моментов, соответствующих варианту, подробное изложение хода решения. В конце отчета приводится вывод, основанный на результатах решения.

7. Критерии оценивания

Оценка «5» - студент показывает верное понимание сущности рассматриваемых явлений и закономерностей, дает точное определение и толкование основных понятий. Работа выполнена в полном объеме, в представленном отчете сделаны необходимые выводы, записи выполнены аккуратно. Студент может установить связь между ранее изученным материалом иизучаемым.

Оценка «4» - ответ студента удовлетворяет основным требованиям к ответу на оценку «5», но дан без использования связей с ранее изученным материалом и материалом, усвоенным при изучении других предметов.

Оценка «3» - работа выполнена не полностью, но объем выполненной части таков, что позволяет получить правильные результаты и выводы. Студент применяет полученные знания при решении простых задач с использованием готовых формул, но затрудняется при решении задач, требующих преобразования некоторых формул.

Оценка «2» - работа выполнена не полностью, и объем выполненной части работы не позволяет сделать правильных выводов.

## *1.2 Методические указания к выполнению практической работы №2*

## Рабочие линии прокатных станов. Рабочие клети прокатных станов. Прокатные валки.

1.Общие сведения

Прокатные валки, вращаясь при прокатке, испытывают длительное воздействие знакопеременных нагрузок. Если циклические напряжения, возникающие в валке от таких нагрузок, превышают определенный уровень, то в материале валков через определенное число циклов начинают появляться микротрещины, которые со временем развиваются и вызывают быстро протекающее разрушение, которое носит название усталостного [4].

В большинстве случаев величина циклических напряжений, вызывающих усталостное разрушение значительно ниже предела прочности материала валка, таким образом, кроме расчета валков на статическую прочность, требуется производить расчет их на циклическую прочность или выносливость, особенно в тех случаях, когда коэффициент запаса статической прочности ниже допустимого [n]=5.

Согласно [2], расчеты валков на выносливость обычно проводят после расчетов на статическую прочность. При этом исходными данными служат найденные максимальные статические напряжения изгиба $\sigma_{max}$ и кручения $\tau_{max}$ (см. разд. 1). Коэффициент запаса усталостной прочности $n_y$ (или запас выносливости) определяют при одновременном действии нормальных и касательных напряжений.

Для валков из стали этот коэффициент рассчитывают по формуле

$$n_y = \frac{n_\sigma \cdot n_\tau}{\sqrt{n_\sigma^2 + n_\tau^2}} \quad (2.1)$$

где $n_\sigma$-запас выносливости по нормальным напряжениям; $n_\tau$- запас выносливости по касательным напряжениям.

Коэффициенты $n_\sigma$ и $n_\tau$ с достаточной точностью можно определить по упрощенным формулам [3]:

$$n_\sigma = \frac{\sigma_в \cdot \varepsilon_\sigma}{k_\sigma \cdot \sigma_{max}}, \quad (2.2)$$

$$n_\tau = \frac{\tau_в \cdot \varepsilon_\tau}{k_\tau \cdot \tau_{max}}, \quad (2.3)$$

где $\varepsilon_\sigma$ и $\varepsilon_\tau$ - масштабные факторы, учитывающие влияние размеров валка при изгибе и кручении соответственно; $k_\sigma$и $k_\tau$ - коэффициенты

концентрации напряжений при изгибе и кручении в месте перехода шейки валка в бочку (галтели).

Значения коэффициентов для валков из стали:

- для бочки валка $\varepsilon_\sigma = \varepsilon_\tau \approx 0{,}4$; $k_\sigma = k_\tau \approx 1{,}6$;
- для шейки валка $\varepsilon_\sigma = \varepsilon_\tau \approx 0{,}6$; $k_\sigma = k_\tau \approx 1{,}4$;
- для трефа валка $\varepsilon_\tau \approx 0{,}8$; $k_\tau \approx 1{,}2$.

При расчете запаса выносливости для валков из чугуна в формулу (2.1) вводят коэффициент $k_\tau$=0.85÷1.0:

$$n_y = k_\tau \frac{n_\sigma \cdot n_\tau}{\sqrt{n_\sigma^2 + n_\tau^2}}, \qquad (2.4)$$

а коэффициенты концентрации принимают;$k_\sigma = k_\tau = 1$. Масштабные факторы принимают такими же, как для валков из стали.

Полученный коэффициент запаса прочности $n_y$ сравнивают с допустимым [$n_y$], равным 2÷3, т.е.$n_y \geq 2 \div 3$.

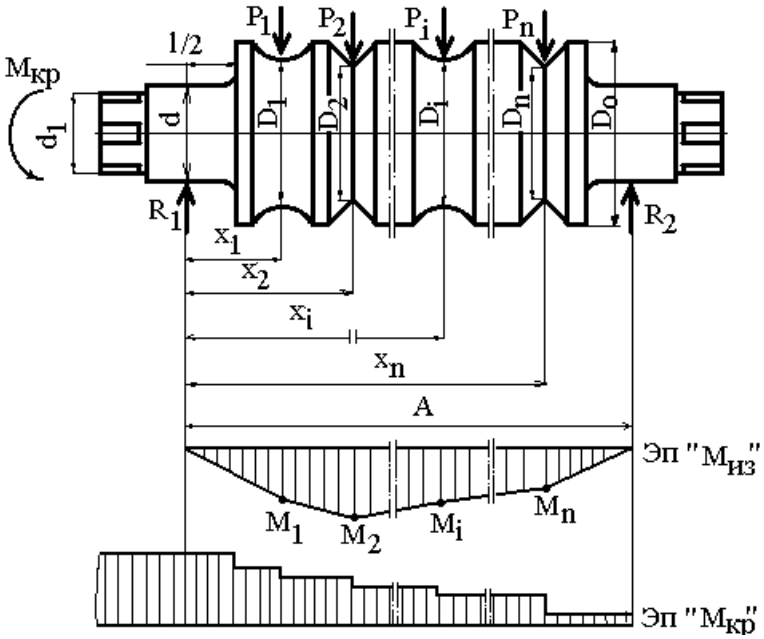



Рисунок 2.1. Схема нагружения среднего валка сортовойклети трио[2]

Валки сортовых станов дуо могут быть загружены как одной силой (прокатка в одну нитку), так и несколькими силами (многониточная прокатка, прокатка с перекрытиями и т.п.). Рассмотрим общий случай, когда валок нагружается силами $P_i$ (i=1,2, 3,…,n), приложенными на расстоянии

$x_i$от опоры в ручьях с диаметром валка $D_i$ (рис. 2.1). К приводному хвостовику валка приложен необходимый для прокатки крутящий момент $M_{кр}$. Поскольку ширина ручья как правило бывает значительно меньше длины бочки, то сортовой валок рассчитывают на изгиб в каждом ручье бочки от действия сосредоточенной силы $P_i$ и на изгиб и кручение по шейке.

Так как нагрузка на валок обычно бывает несимметричной относительно опор, вначале нужно определить реакции на шейки валка из условия равновесия сил и моментов (см. рисунок 2.1):

$$R_2 = \frac{\sum_1^n P_i x_i}{A}; R_1 = \sum_1^n P_i - R_2. \qquad (2.5)$$

Затем определяют изгибающий момент в сечении каждого ручья по формулам

$$\left.\begin{aligned} M_{из1} &= R_1 x_1 \\ M_{из2} &= R_1 x_2 - P_1(x_2 - x_1) \\ M_{из3} &= R_1 x_3 - P_2(x_3 - x_2) - P_1(x_3 - x_1)\ldots\ldots \\ M_{изi} &= R_1 x_i - P_{i-1}(x_i - x_{i-1}) - P_{i-n+1}(x_i - x_{i-n+1})\ldots\ldots \\ M_{изп} &= R_1 x_n - P_{n-1}(x_n - x_{n-1}) - P_{n-2}(x_n - x_{n-2}) - \cdots \\ &\quad -P_1(x_n - -x_1) \qquad (2.6) \end{aligned}\right\}$$

Напряжения изгиба в каждом сечении рассчитывают по формуле

$$\sigma_{из.i} = \frac{M_{из.i}}{0{,}1 \cdot D_i^3} \quad (2.7)$$

После расчета этих напряжений определяют опасное сечение, где $\sigma_{из.i}$имеет максимальное значение $\sigma_{из.max} = \max(\sigma_{из.i})$.

Напряжения изгиба и кручения в приводной шейке валка рассчитывают по формулам

$$\sigma_{из.ш} = \frac{R_1 I}{0{,}2 d^3}, \tau_{кр} = \frac{M_{кр}}{0{,}2 d^3} \quad (2.8)$$

Результирующее напряжение в шейке определяют в зависимости отматериала валка по формулам

$$\tau_{тр} = \frac{M_{кр}}{0{,}0706 d_1^3} \quad (2.9)$$

$$\tau_{кр} = \frac{M_{кр}}{0{,}2 d_2^3 - \frac{bh(2d_2 - h)^2}{16 d_2}} \quad (2.10)$$

Напряжения в приводном хвостовике валка рассчитывают в зависимости от его формы по формулам:

$$\sigma_{из} = \frac{P_1 x}{W_{из}} \text{ и } \tau_{кр} = \frac{P_1 l}{W_{кр}} \quad (2.11)$$

где $P_1 = \frac{M_{кр}}{2f}$, $W_{из} = \frac{b-c}{2} \cdot \frac{S^2}{6}$, $W_{кр} = \eta \frac{b-c}{2} S^2 \frac{P_1 l}{W_{кр}}$ (2.12)

$\eta$ - коэффициент, учитывающий отношение сторон лопасти и принимающий значение 0.25-0.30 [4].

На рисунке 2.2 приведен пример вариантов форм хвостовиков прокатных валков.

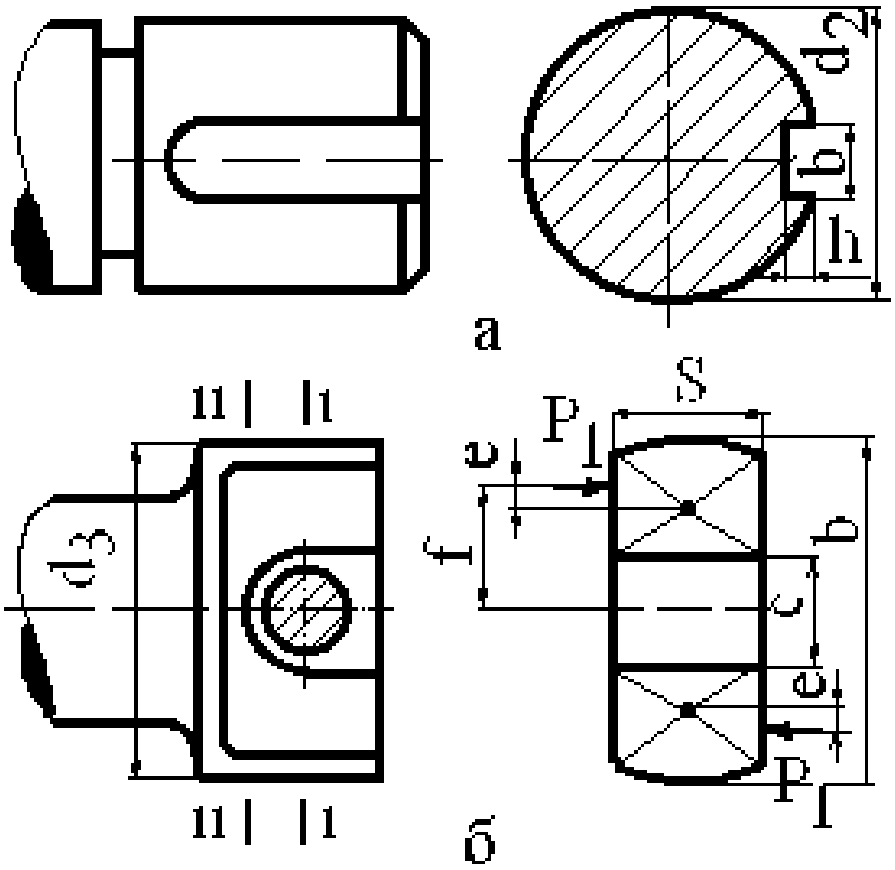



Рисунок 2.2. Форма хвостовиков прокатных валков: а – цилиндрический под съемную головку шпинделя; б - лопасть для универсального шарнира[2]

Определение коэффициентов запаса прочности и проверку условий статической прочности производят по формулам (1.1) или (1.2)

## 2. Цель работы

Научиться производить расчеты усталостную прочность элементов деталей прокатного стана, изучить его основы и основные алгоритмы. Ознакомится в ходе расчета с сопутствующими справочными данными, их правильному использованию и применению.

## 3. Вопросы для подготовки к практической работе

1. Понятие прочности детали клети и прочностного расчета детали клети

2. Порядок проверочного расчета каждой детали клети

3. Конструкция средних валков сортовой клети трио

4.Условие прочности, выраженное через нормальные и касательные напряжения

5.Условие прочности, выраженное через коэффициент запаса прочности

6. Понятие усталостной прочности

7. Понятие статической прочности

8. Понятие и методика расчета коэффициента запаса усталостной прочности $n_y$ (или запас выносливости)

9. Понятия и основные формулы моментов сопротивления сечения

## 4. Задания для выполнения практической работы

Рассчитать на прочность валок рабочей клети черновой группы проволочного стана при прокатке в 4 нитки (n=4). Размеры валка составляют (см. рис. 2.1), м: $D_0$, $D_1 = D_2 = D_3 = D_4$, $x_1$, $x_2$, $x_3$, $x_4$, d, l, A. Хвостовик валка выполнен цилиндрическим со шпонкой под съемную лопасть шпинделя (см. рис. 2. 2 а) с размерами, м: $d_2$, b, h. В каждом из четырех калибров приложено одинаковое усилие $P_1=P_2=P_3=P_4$, кН. К приводному хвостовику валка приложен крутящий момент $M_{кр}$, кНм. Материал валка для вариантов 1-6:

чугун СПХН-65, для вариантов 7-11: ЛШХН. Валок проверить на усталостную прочность. Поскольку валок изготовлен из чугуна, то следует принять $k_\sigma = k_\tau = 1$ и $\varepsilon_\sigma = \varepsilon_\tau \approx 0{,}6$.

Варианты заданий для выполнения приведены в таблице 2.1.

Таблица 2.1. Варианты заданий для выполнения

| N | n | Материал | $\sigma_в$, МПА | $D_0$, м | $D_1$, $D_2$ $D_3$ $D_4$ м | $x_1$, м | $x_2$, м | $x_3$, м | $x_4$, м | d, м | l, м | A, м | $d_2$, м | b, м | h, м | $P_1$, $P_2$, $P_3$, $P_4$, кН | $M_{кр}$, кН·м |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 4 | СПХН-65 | 500 | 0.45 | 0.4 | 0.21 | 0.46 | 0.71 | 0.96 | 0.23 | 0.25 | 1.3 | 0.2 | 0.06 | 0.02 | 1100 | 80 |
| 2 | 4 | СПХН-65 | 500 | 0,5 | 0,45 | 0,25 | 0,5 | 0.75 | 0,95 | 0,25 | 0,28 | 1.35 | 0,22 | 0.06 | 0.025 | 1100 | 90 |
| 3 | 4 | СПХН-65 | 500 | 0,55 | 0,5 | 0,28 | 0,56 | 0,8 | 0,95 | 0,3 | 0,3 | 1.4 | 0,27 | 0.06 | 0.025 | 1100 | 70 |
| 4 | 4 | СПХН-65 | 500 | 0,6 | 0,55 | 0,3 | 0,6 | 0,9 | 1,05 | 0,32 | 0,35 | 1.45 | 0,29 | 0.06 | 0.025 | 1200 | 85 |
| 5 | 4 | СПХН-65 | 500 | 0,4 | 0,35 | 0,2 | 0,4 | 0,6 | 0,8 | 0,2 | 0,22 | 1.25 | 0,17 | 0.05 | 0.02 | 1100 | 80 |
| 6 | 4 | СПХН-65 | 500 | 0,35 | 0,3 | 0,2 | 0,4 | 0,62 | 0,8 | 0,25 | 0,2 | 1,2 | 0,22 | 0.05 | 0.02 | 500 | 45 |
| 7 | 4 | ЛШХН | 400 | 0,5 | 0,45 | 0,25 | 0,5 | 0,7 | 0,95 | 0,22 | 0,22 | 1.3 | 0,19 | 0.05 | 0.025 | 1000 | 70 |
| 8 | 4 | ЛШХН | 400 | 0,6 | 0,55 | 0,22 | 0,44 | 0,65 | 0,9 | 0,2 | 0,28 | 1.45 | 0,17 | 0.05 | 0.025 | 700 | 75 |
| 9 | 4 | ЛШХН | 400 | 0,4 | 0,35 | 0,22 | 0,44 | 0,7 | 0,95 | 0,25 | 0,25 | 1.25 | 0,22 | 0.05 | 0.02 | 900 | 70 |
| 10 | 4 | ЛШХН | 400 | 0,5 | 0,45 | 0,24 | 0,48 | 0,75 | 1,0 | 0,27 | 0,28 | 1.35 | 0,24 | 0.05 | 0.02 | 900 | 60 |
| 11 | 4 | ЛШХН | 400 | 0,35 | 0,3 | 0,2 | 0,4 | 0,65 | 0,85 | 0,2 | 0,22 | 1.2 | 0,17 | 0.05 | 0.02 | 400 | 30 |

## 5. Порядок выполнения работы

Рассмотрим решение практической работы на примере 1 варианта задания, согласно которомуисходные данные:прокатка в 4 ниткиn=4, размеры валка составляют (см. рис. 2.1): $D_0$=0,5 м, $D_1$ = $D_2$ = $D_3$ = $D_4$=0,4м, $x_1$=0,21 м, $x_2$=0,46 м, $x_3$=0,71 м, $x_4$=0,96 м, d=0,23 м, l=0,25м, A=1,3 м.

Хвостовик валка выполнен цилиндрическим со шпонкой под съемную лопасть шпинделя (см. рис. 2. 2 а) с размерами: $d_2$,=0,2 м, b=0,06 м, h=0,02 м. В каждом из четырех калибров приложено одинаковое усилие $P_1$ = $P_2$ = $P_3$ = $P_4$=1100кН. К приводному хвостовику валка приложен крутящий момент $M_{кр}$=80 кНм. Материал валка- чугун СПХН-65.$k_\sigma = k_\tau = 1$;$\varepsilon_\sigma = \varepsilon_\tau \approx 0{,}6$.

Решение

По формулам (2.5) рассчитаем реакции от усилия прокатки на шейки валка

$$R_2 = \frac{\sum_1^n P_i x_i}{A};\ R_1 = \sum_1^n P_i - R_2.$$

$$R_2 = \frac{1100\cdot 0{,}21+1100\cdot 0{,}46+1100\cdot 0{,}71+1100\cdot 0{,}96}{1{,}3} = 1980\text{кН};$$

$$R_1 = 1100 + 1100 + 1100 + 1100 - 1980 = 2420\ \text{кН}.$$

Изгибающие моменты в сечении каждого ручья по формулам (2.6) составят

$$\left.\begin{aligned}
M_{из1} &= R_1 x_1\\
M_{из2} &= R_1 x_2 - P_1(x_2 - x_1)\\
M_{из3} &= R_1 x_3 - P_2(x_3 - x_2) - P_1(x_3 - x_1)\\
&\ldots\ldots\\
M_{изi} &= R_1 x_i - P_{i-1}(x_i - x_{i-1}) - P_{i-n+1}(x_i - x_{i-n+1})\\
&\ldots\ldots\\
M_{изп} &= R_1 x_n - P_{n-1}(x_n - x_{n-1}) - P_{n-2}(x_n - x_{n-2}) - \ldots - P_1(x_n - x_1)
\end{aligned}\right\}$$

$$\text{М}_{из1} = 2420\cdot 0{,}21 = 508{,}2\ \text{кНм},$$

$$\text{М}_{из2} = 2420\cdot 0{,}46 - 1100(0{,}46 - 0{,}21) = 838{,}2\text{кНм},$$

$$\text{М}_{изг3} = 2420\cdot 0{,}71 - 1100(0{,}71 - 0{,}46) - 1100(0{,}71 - 0{,}21) = 893{,}2\text{кНм},$$

$$М_{изг4} = 2420 \cdot 0{,}96 - 1100(0{,}96 - 0{,}71) - 1100(0{,}96 - 0{,}46) - 1100(0{,}96 - 0{,}21) = 673{,}2кНм.$$

Напряжения изгиба в каждом сечении рассчитаем по формуле (2.7)

$$\sigma_{из.i} = \frac{M_{из.i}}{0{,}1 \cdot D_i^3}$$

$$\sigma_{из.1} = \frac{508{,}2 \cdot 10^{-3}}{0{,}1 \cdot 0{,}4^3} = 79{,}4Мпа,$$

$$\sigma_{из.2} = \frac{838{,}2 \cdot 10^{-3}}{0{,}1 \cdot 0{,}4^3} = 130{,}96Мпа,$$

$$\sigma_{из.3} = \frac{893{,}1 \cdot 10^{-3}}{0{,}1 \cdot 0{,}4^3} = 139{,}56Мпа,$$

$$\sigma_{из.4} = \frac{673{,}2 \cdot 10^{-3}}{0{,}1 \cdot 0{,}4^3} = 105{,}18\ Мпа.$$

Напряжения изгиба и кручения в приводной шейке валка определим по формулам (2.8)

$$\sigma_{из.ш} = \frac{R_1 l}{0{,}2d^3}, \tau_{кр} = \frac{M_{кр}}{0{,}2d^3}$$

$$\sigma_{из.ш} = \frac{2420 \cdot 0{,}25 \cdot 10^{-3}}{0{,}2 \cdot 0{,}23^3} = 248{,}6\ МПа$$

$$\tau_{кр} = \frac{80 \cdot 10^{-3}}{0{,}2 \cdot 0{,}23^3} = 32{,}9\ МПа$$

Так как валок выполнен из чугуна, суммарное напряжение в шейке валка найдем по формуле 2.12

$$\sigma_ш = 0{,}375\sigma_{из.ш} + 0{,}625\sqrt{\sigma_{из.ш}^2 + 4\tau_{кр.ш}^2} \qquad (2.12)$$

$$\sigma_ш = 0{,}375 \cdot 248{,}6 + 0{,}625\sqrt{248{,}6^2 + 4 \cdot 32{,}9^2 = 253{,}95}Мпа.$$

Поскольку хвостовик валка цилиндрический со шпонкой под съемную головку шпинделя, то напряжение кручения в нем рассчитаем по формуле (2.10)

$$\tau_{кр} = \frac{M_{кр}}{0{,}2d_2^3 - \frac{bh(2d_2 - h)^2}{16d_2}}$$

$$\tau_{кр} = \frac{80 \cdot 10^{-3}}{0{,}2 \cdot 0{,}2^3 - \frac{0{,}06 \cdot 0{,}02 \cdot (2 \cdot 0{,}2 - 0{,}02)^2}{16 \cdot 0{,}2}} = 51{,}6$$

Учитывая полученные напряжения, определим коэффициенты запаса прочности в каждом элементе валка по формуле (1.2), принимая по табл. 1.1. предел прочности для материала валка на изгиб $\sigma_в$=500 МПа и на кручение $\tau_в = 0{,}7 \cdot \sigma_в = 0{,}7 \cdot 500$=350 МПа.

В результате получим следующие значения коэффициентов запаса прочности:

в бочке валка:

$$n_1 = \frac{500}{79{,}6} = 6{,}3,\ n_2 = \frac{500}{130{,}96} = 3{,}8, n_3 = \frac{500}{139{,}56} = 3{,}5, n_4 = \frac{500}{105{,}18} = 4{,}75.$$

$$\mathrm{n{=}min(n1,n2,n3,n4){=}3{,}5;}$$

в шейке валка:

$$n = \frac{500}{253.95} = 1.97;$$

в хвостовике валка:

$$n = \frac{350}{51{,}6} = 6{,}8.$$

Все элементы валка, кроме хвостовика, имеют коэффициенты запаса прочности ниже допустимого [n] =5. При этом наиболее слабым элементом валка является приводная шейка.

## 6. Содержание отчета

В отчёте приводится цель работы, исходные данные, подробное изложение хода решения. В заключении отчета приводится вывод, основанный на результатах решения.

## 7. Критерии оценивания

Оценка «5» - студент показывает верное понимание сущности рассматриваемых явлений и закономерностей, дает точное определение и истолкование основных понятий. Работа выполнена в полном объеме, в представленном отчете сделаны необходимые выводы, записи выполнены аккуратно. Студент может установить связь между ранее изученным и изучаемым материалом.

Оценка «4»- ответ студента удовлетворяет основным требованиям к ответу на оценку «5», но дан без использования связей с ранее изученным материалом и материалом, усвоенным при изучении других предметов.

Оценка «3» - работа выполнена не полностью, но объем выполненной части таков, что позволяет получить правильные результаты и выводы. Студент применяет полученные знания при решении простых задач с

использованием готовых формул, но затрудняется при решении задач, требующих преобразования некоторых формул.

Оценка «2»- работа выполнена не полностью, и объем выполненной части работы не позволяет сделать правильных выводов.

### *1.3 Методические указания к выполнению практической работы №3*

**Подшипники прокатных валков. Подушки прокатных валков**

1.Общие сведения

Подушки обычно изготавливают из литой стали марок 25Л, 35Л с пределом прочности $\sigma_в$ =500÷550 МПа [3].

Согласно 2, прочность подушки проверяют на основе максимального усилия, действующего на нажимной винт (максимальной реакции на шейку валка от усилия прокатки $R_{max}$) и момента трения в подшипниках валков, который стремится повернуть подушку (рисунке 3.1) в направлении вращения валка. Со стороны станины этому повороту подушки препятствует сила Q, определяемая по формуле

$$Q = \frac{R_{max} \cdot f \cdot d}{2 \cdot a_п} \qquad (3.1)$$

где d - диаметр шейки валка; ап - высота подушки; f - коэффициент трения в шейках валков, выбираемый в зависимости от типа подшипника по табл. 3.1.

В опасном сечении А подушки возникают напряжениями изгиба $\sigma_{из}$ под действием силы Q и напряжения сжатием $\sigma_{сж}$ под действием силы $R_{max}$(см. рисунок 3.1). Суммарные напряжения равны:

$$\sigma_{\sum} = \sigma_{из} + \sigma_{сж} \qquad (3.2)$$

Напряжение изгиба в опасном сечении подушки определяют по формуле

$$\sigma_{из} = \frac{M_{из}}{W_{из}} = \frac{6 \cdot Q \cdot y}{b_п h_1^2} \qquad (3.3)$$

где y - расстояние от нижнего края подушки (точки приложения силы Q) до центра тяжести опасного сечения; $b_п$ - ширина подушки; $h_1$ - высота опасного сечения.

Напряжения сжатия рассчитывают по формуле

$$\sigma_{сж} = \frac{R_{max}}{S_{ст}} \qquad (3.4)$$

где $S_{ст}$ - площадь поверхности соприкосновения подушки с предохранительным стаканом или подпятником нажимного винта.

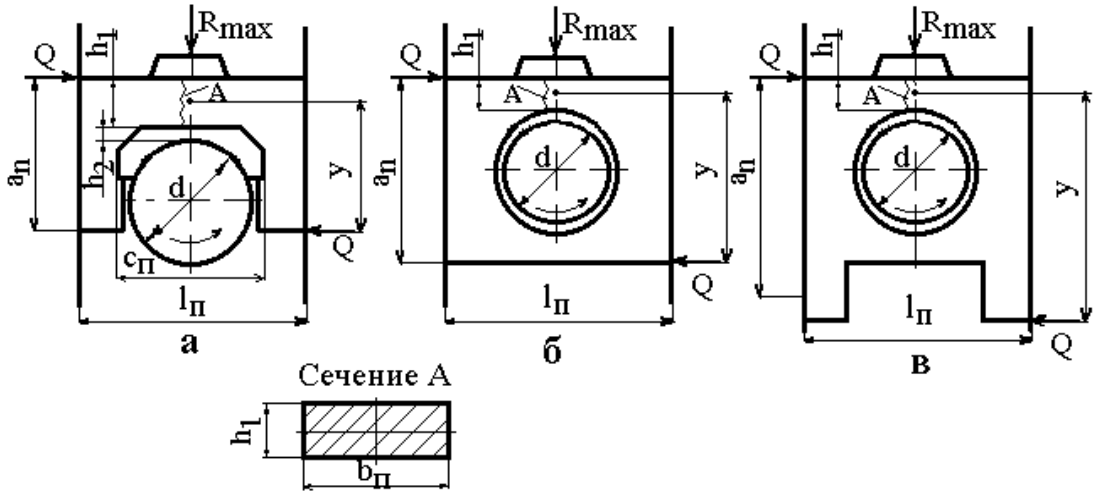



Рис. 3.1. Схемы нагружения подушек с подшипниками открытого типа (а), закрытого типа с подшипниками качения (б) и ПЖТ (с)[2]

Проверяют выполнение условия прочности подушки в виде (1.1) или (1.2), принимая допустимое значение коэффициента запаса прочности [n]=5.

Таблица значений коэффициентов трения в подшипниках [5] приведена в таблице 1.1.

Таблица 3.1. Значения коэффициентов трения в подшипниках

| Подшипник | Коэффициент трения |
|---|---|
| Скольжения текстолитовый | 0.004 - 0.008 |
| Скольжения бронзовый | 0.01 - 0.08 |
| Качения | 0.001 - 0.005 |
| ПЖТ | 0.002 - 0.005 |

## 2. Цель работы

Научиться производить расчеты на прочность подушек прокатных валков, изучить основы и основные алгоритмы данных расчетов. Ознакомится в ходе расчета с сопутствующими справочными данными, их правильному использованию и применению.

## 3. Вопросы для подготовки к практической работе

1. Понятие прочности. Классификация

2. Конструкция валков и подшипниковых узлов прокатных станов

3.Условие прочности, выраженное через коэффициент запаса прочности

4. Понятия подшипника. Классификация подшипников

5. Для чего нужны подушки в подшипниковых узлах прокатного стана

6. Основные преимущества и недостатки подшипников качения прокатных станов

7. Основные преимущества и недостатки ПЖТ прокатных станов

8. Влияние трения при работе в подшипниках прокатных станов

## 4. Задания для выполнения практической работы

Рассчитать на прочность подушку опорного валка клети кварто с размерами (см. рис. 3.1,в), м: $a_п$,$b_п$, y,$h_1$. Подушка изготовлена из стали марки 25Л с $\sigma_в$ =550 МПа. Площадь поверхности опоры подпятника нажимного винта$S_{ст}$, м$^2$. Диаметр шейки валка d, м. Опорные валки установлены в ПЖТ. Максимальная реакция усилия прокатки $R_{max}$ , МН.

Коэффициент трения в подшипниках по таблице3.1 f=0.0035.

Варианты для выполнения практической работы представлены в таблице 3.2.

Таблица 3.2. Варианты для выполнения практической работы

| N | $a_п$, м | $b_п$, м | y, м | $h_1$, м | $\sigma_в$, МПА | $S_{st}$, м$^2$ | d, м | $R_{max}$МН | f |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 2.645 | 0.8 | 1.955 | 0.69 | 550 | 0.337 | 0.62 | 15.5 | 0.0035 |
| 2 | 2,7 | 0,815 | 1,995 | 0,7 | 550 | 0,34 | 0,63 | 16 | 0.0035 |
| 3 | 2,75 | 0,84 | 2,05 | 0,725 | 550 | 0,35 | 0,65 | 16 | 0.0035 |
| 4 | 2,9 | 0,88 | 2,15 | 0,76 | 550 | 0,37 | 0,68 | 20 | 0.0035 |
| 5 | 3,05 | 0,92 | 2,25 | 0,8 | 550 | 0,39 | 0,71 | 23 | 0.0035 |
| 6 | 3,175 | 0,96 | 2,35 | 0,8 | 550 | 0,40 | 0,74 | 20 | 0.0035 |
| 7 | 2,5 | 0,75 | 1,86 | 0,65 | 550 | 0,32 | 0,6 | 13 | 0.0035 |
| 8 | 2,38 | 0,72 | 1,76 | 0,62 | 550 | 0,30 | 0,55 | 17.5 | 0.0035 |
| 9 | 2,12 | 0,64 | 1,56 | 0,55 | 550 | 0,27 | 0,5 | 10 | 0.0035 |
| 10 | 2 | 0,6 | 1,45 | 0,52 | 550 | 0,25 | 0,46 | 18.5 | 0.0035 |

## 5. Порядок выполнения работы

Рассмотрим решение практической работы на примере 1 варианта задания, согласно которомуисходные данные $a_п$=2,645 м,$b_п$=0,8 м, y=1,955 м,$h_1$=0,69 м. Подушка изготовлена из стали марки 25Л с $\sigma_в$ =550 МПа. Площадь поверхности опоры подпятника нажимного винта $S_{ст}$=0,337 м$^2$. Диаметр шейки валка d=0,62 м. Опорные валки установлены в ПЖТ. Максимальная реакция усилия прокатки $R_{max}$=15,5МН. Коэффициент трения в подшипниках по таблице3.1 f=0.0035.

### Решение

Силу защемления подушки при ее повороте рассчитаем по формуле (3.1), приняв коэффициент трения в подшипниках по табл. 3.1 f=0.0035:

$$Q = \frac{R_{max} \cdot f \cdot d}{2 \cdot a_п}$$

$$Q = \frac{15{,}5 \cdot 0{,}0035 \cdot 0{,}62}{2 \cdot 2{,}645} = 0{,}006 МН.$$

Напряжение изгиба в опасном сечении по формуле (3.3) составят:

$$\sigma_{из} = \frac{М_{из}}{W_{из}} = \frac{6 \cdot Q \cdot y}{b_п h_1^2},$$

$$\sigma_{из} = \frac{6 \cdot 0{,}0064 \cdot 1{,}955}{0{,}8 \cdot 0{,}69^2} = 0{,}2 МПа$$

Напряжение сжатия в опасном сечении по формуле (3.4)

$$\sigma_{сж} = \frac{R_{max}}{S_{ст}},$$

$$\sigma_{сж} = \frac{15{,}5}{0{,}337} = 46{,}0 Мпа.$$

Суммарные напряжения в опасном сечении по формуле (3.2) будут равны

$$\sigma_{\sum} = \sigma_{из} + \sigma_{сж},$$

$$\sigma_{\sum} = 0{,}2 + 46{,}0 = 46{,}2 Мпа.$$

Коэффициент запаса прочности подушки по формуле (1.2)

$$n = \frac{550}{46{,}2} = 11{,}9$$

Расчетное значение коэффициента запаса прочности значительно превышает допустимое [n] = 5. Таким образом, условие прочности выполняется.

## 6. Содержание отчета

В отчёте приводится цель работы, исходные данные, подробное изложение хода решения. В заключении отчета приводится вывод, основанный на результатах решения.

## 7. Критерии оценивания

Оценка «5» - студент показывает верное понимание сущности рассматриваемых явлений и закономерностей, дает точное определение и истолкование основных понятий. Работа выполнена в полном объеме, в представленном отчете сделаны необходимые выводы, записи выполнены аккуратно. Студент может установить связи изучаемого и ранее изученного материала.

Оценка «4»- ответ студента удовлетворяет основным требованиям к ответу на оценку «5», но дан без использования связей с ранее изученным материалом и материалом, усвоенным при изучении других предметов.

Оценка «3» - работа выполнена не полностью, но объем выполненной части таков, что позволяет получить правильные результаты и выводы. Студент применяет полученные знания при решении простых задач с использованием готовых формул, но затрудняется при решении задач, требующих преобразования некоторых формул.

Оценка «2»- работа выполнена не полностью, и объем выполненной части работы не позволяет сделать правильных выводов.

### *1.4 Методические указания к выполнению практической работы №4*

**Вспомогательные устройства рабочих клетей**

1.Общие сведения

Схема нагружения винтового нажимного устройства показана на рисунке 4.1. Нажимной винт вращается в гайке, установленной в поперечине станины рабочей клети.

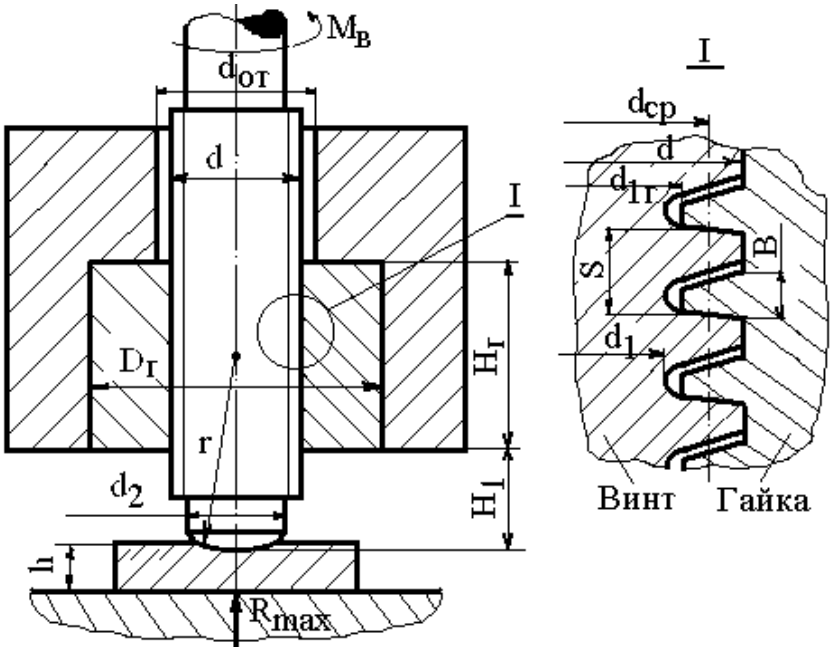



Рисунок 4.1. Расчетная схема винтового нажимного устройства[2]

Нажимные винты обычно изготавливают из кованой углеродистой или низколегированной стали с пределом прочности, указанным в таблице 4.1 [7].

Таблица 4.1. Предел прочности материала нажимных винтов

| Марка стали | Предел прочности, МПа |
|---|---|
| 50 | 600 - 650 |
| 40Х - 40ХН | 750 - 1000 |
| 50Х - 50ХН | 850 - 1100 |

Согласно [2], нажимной винт воспринимает реакцию от усилия прокатки на шейку валка $R_{max}$, и при настройке межвалкового зазора в процессе прокатки, - крутящий момент $M_в$, который приложен к приводному хвостовику винта (см. рисунок 4.1). Таким образом, в общем случае, нажимной винт подвергается сжатию и кручению.

Крутящий момент, необходимый для привода во вращение винта рассчитывают по формуле:

$$M_в = R_{max}\left[f_п \frac{d_2}{3} + \frac{d_{ср}}{2} tg(\alpha + \varphi)\right]. \qquad (4.1)$$

где d - наружный диаметр резьбы винта; $d_2$- диаметр пяты винта; $d_{ср}$- средний диаметр резьбы винта; $f_п$- коэффициент трения в пяте винта, принимающий значение 0.15÷0.30 в зависимости от типа смазки; α - угол подъема резьбы; φ - угол трения в резьбе.

Параметр $d_{ср}$ выбирают в зависимости от типа резьбы (обычно - упорная) и наружного диаметра винта по ГОСТ [3]. Для ориентировочного расчета этого параметра можно использовать приближенную формулу:

$$d_{ср} = d - 0{,}75 \cdot S, \qquad (4.2)$$

где S - шаг резьбы. Угол подъема резьбы рассчитывают по формуле

$$\alpha = arctg(\frac{s}{\pi \cdot d}). \qquad (4.3)$$

Угол трения в резьбе можно определить по формуле

$$\varphi = arctg(f_в). \qquad (4.4)$$

где $f_в$ - коэффициент трения в резьбе, равный 0.05÷0.15 в зависимости от типа смазки.

Напряжение кручения в винте рассчитывают по формуле

$$\tau_{\text{в}} = \frac{\text{M}_{\text{в}}}{0{,}2 \cdot d_1^3}, \qquad (4.5)$$

где $d_1$ - внутренний диаметр резьбы винта. В случае, если в процессе прокатки настройку зазора между валками не производят, $\tau_{\text{в}}$принимают равным нулю.

Напряжение сжатия рассчитывают по формуле

$$\sigma_{\text{сж}} = \frac{4 \cdot R_{max}}{\pi \cdot d_1^2}. (4.6)$$

Суммарные напряжения в винте от совместного действия сжатия и кручения определяют по 4-й теории прочности

$$\sigma_{\Sigma} = \sqrt{\sigma_{\text{сж}}^2 + 3\tau_{\text{в}}^2}. \qquad (4.7)$$

Далее рассчитывают коэффициент запаса прочности винта $n = \frac{\sigma_{\text{в}}}{\sigma_{\Sigma}}$ и проверяют выполнение условия прочности (1.2).

## 2. Цель работы

Научиться производить расчеты на прочность деталей винтового нажимного устройства, изучить основы и основные алгоритмы данных расчетов. Ознакомится в ходе расчета с сопутствующими справочными данными, их правильному использованию и применению.

## 3. Вопросы для подготовки к практической работе

1. Понятие прочности. Классификация

2. Конструкция и принцип работы нажимного устройства прокатного стана

3. Классификация и назначение нажимных устройств прокатных станов

4.Условие прочности, выраженное через коэффициент запаса прочности

5. Теории прочности. Четвертая теория прочности

## 4. Задания для выполнения практической работы

Рассчитать на прочность нажимной винт рабочей клети кварто стана холодной прокатки, изготовленный из стали марки 40ХН с пределом прочности 1000 МПа. Размеры винта с упорной резьбой по ГОСТ 10177-82 (см. рисунок 4. 1), м: d, $d_1$, $d_2$, S,$d_{ср}$. Максимальное усилие на винт$R_{max}$,МН.

Примем коэффициент трения в пяте винта $f_п$=0.2 (густая смазка), а коэффициент трения в резьбе $f_в$=0.1 (жидкая смазка).

Варианты для выполнения практической работы представлены в таблице 4.2.

Таблица 4.2. Варианты для выполнения практической работы

| N | d, м | $d_1$, м | $d_2$, м | S, м | $\sigma_в$, МПА | $d_{ср}$, м | $R_{max}$МН | $f_п$ | $f_в$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 0.56 | 0.5392 | 0.535 | 0.012 | 1000 | 0.549 | 17.5 | 0.2 | 0.1 |
| 2 | 0,57 | 0,55 | 0,55 | 0,012 | 1000 | 0,56 | 18 | 0.2 | 0.1 |
| 3 | 0,58 | 0,56 | 0,56 | 0,0125 | 1000 | 0,575 | 25 | 0.2 | 0.1 |
| 4 | 0,62 | 0,59 | 0,58 | 0,013 | 1000 | 0,6 | 20 | 0.2 | 0.1 |
| 5 | 0,64 | 0,62 | 0,615 | 0,014 | 1000 | 0,63 | 30 | 0.2 | 0.1 |
| 6 | 0,67 | 0,65 | 0,64 | 0,0145 | 1000 | 0,66 | 35 | 0.2 | 0.1 |
| 7 | 0,55 | 0,51 | 0,51 | 0,0115 | 1000 | 0,52 | 20 | 0.2 | 0.1 |
| 8 | 0,5 | 0,48 | 0,48 | 0,011 | 1000 | 0,5 | 25 | 0.2 | 0.1 |
| 9 | 0,45 | 0,43 | 0,428 | 0,0095 | 1000 | 0,44 | 18 | 0.2 | 0.1 |
| 10 | 0,42 | 0,40 | 0,40 | 0,009 | 1000 | 0,40 | 16 | 0.2 | 0.1 |

## 5. Порядок выполнения работы

Рассмотрим решение практической работы на примере 1 варианта задания, согласно которомуисходные данные:

- нажимной винт рабочей клети кварто стана холодной прокатки, изготовленный из стали марки 40ХН с пределом прочности 1000 МПа. Размеры винта с упорной резьбой по ГОСТ 10177-82 (см. рисунок 4.1): d=0,56, $d_1$=0,5392 м, $d_2$=0,535 м, S=0,012 м,$d_{ср}$=0,549 м.

- максимальное усилие на винт$R_{max}$=17,5 МН.

- коэффициент трения в пяте винта $f_п$=0.2 (густая смазка), а коэффициент трения в резьбе $f_в$=0.1 (жидкая смазка).

Решение

По формулам (4.3) и (4.4) определяем угол подъема резьбы

$$\alpha = arctg(\frac{s}{\pi \cdot d}),$$

$$\alpha = arctg\left(\frac{0{,}012}{\pi \cdot 0{,}56}\right) = 0{,}007 рад$$

и угол трения в резьбе $\varphi = arctg(f_в)$,

$$\varphi = arctg(0{,}1) = 0.0997\, рад.$$

Рассчитываем крутящий момент, необходимый для вращения винта, по формуле (4.1)

$$M_в = R_{max}\left[f_п \frac{d_2}{3} + \frac{d_{ср}}{2} tg(\alpha + \varphi)\right],$$

$$M_в = 17{,}5\left[0{,}2\frac{0{,}535}{3} + \frac{0{,}549}{2} tg(0{,}007 + 0{,}0997)\right] = 1.14\ МНм.$$

Напряжения кручения в теле винта рассчитаем по формуле (4.5)

$$\tau_в = \frac{М_в}{0{,}2 \cdot d_1^3},$$

$$\tau_в = \frac{114}{0{,}2 \cdot 0{,}532^3} = 36{,}4 Мпа.$$

Напряжения сжатия по формуле (4.6)

$$\sigma_{сж} = \frac{4 \cdot R_{max}}{\pi \cdot d_1^2}.$$

$$\sigma_{сж} = \frac{4 \cdot 175}{\pi \cdot 0{,}5392^2} = 76{,}6 МПа.$$

Суммарные напряжения в винте рассчитываем по формуле (4.7)

$$\sigma_\Sigma = \sqrt{\sigma_{сж}^2 + 3\tau_в^2}.$$

$$\sigma_\Sigma = \sqrt{76{,}6^2 + 3 \cdot 36{,}4^2} = 99{,}2 МПа.$$

Коэффициент запаса прочности составит

$$n = \frac{1000}{99{,}2} = 10{,}01$$

Условие прочности выполняется, так как расчетное значение коэффициента запаса прочности превышает допустимое.

## 6. Содержание отчета

В отчёте приводится цель работы, исходные данные, подробное изложение хода решения. В заключении отчета приводится вывод, основанный на результатах решения.

7. Критерии оценивания

Оценка «5» - студент показывает верное понимание сущности рассматриваемых явлений и закономерностей, дает точное определение и истолкование основных понятий. Работа выполнена в полном объеме, в представленном отчете сделаны необходимые выводы, записи выполнены аккуратно. Студент может установить связь между изучаемым и ранее изученным материалом.

Оценка «4»- ответ студента удовлетворяет основным требованиям к ответу на оценку «5», но дан без использования связей с ранее изученным материалом и материалом, усвоенным при изучении других предметов.

Оценка «3» - работа выполнена не полностью, но объем выполненной части таков, что позволяет получить правильные результаты и выводы. Студент применяет полученные знания при решении простых задач с использованием готовых формул, но затрудняется при решении задач, требующих преобразования некоторых формул.

Оценка «2»- работа выполнена не полностью, и объем выполненной части работы не позволяет сделать правильных выводов.

## *1.5 Методические указания к выполнению практической работы №5*

**Соединительные элементы рабочей линии стана.**

1.Общие сведения

Предохранительные устройства устанавливают между нажимным винтом и подушкой. В основном применяют предохранительные устройства двух конструкций: предохранительные стаканы (рисунок 5.1,а), которые используют наиболее часто, и предохранительные коробки (рисунок 5.1,б) [2].

Предохранительные устройства изготавливают из чугуна, бронзы, реже из стали.

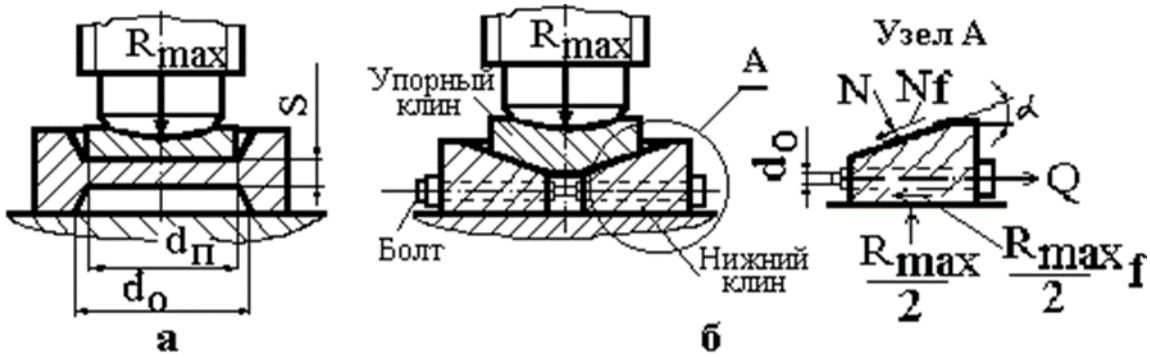



Рисунок 5.1. Конструкции предохранительных устройств и схемы их нагружения [2]

Опасным сечением стакана (см. рисунок 5.1,а) является поверхность перехода внутренней мембраны (предохранительный элемент) стакана в стенку. В этом сечении под действием силы $R_{max}$ возникают напряжения изгиба $\sigma_{из}$ и срезат$\tau_{ср}$, которые рассчитывают по формулам [2]:

$$\sigma_{из} = 0{,}43 \cdot \frac{R_{max}}{S^2} In \frac{d_0}{d_п}, \qquad (5.1)$$

$$\tau_{ср} = \frac{R_{max}}{\pi \cdot d_0 \cdot S}, \qquad (5.2)$$

где S - толщина мембраны; $d_0$- внутренний диаметр нижней выточки стакана; $d_п$-диаметр пяты винта.

Условие прочности вида (1.1) проверяют отдельно для нормальных и касательных напряжений:

$\sigma_{из} \leq [\sigma]$ и $\tau_{ср} \leq [\tau]$

При выборе допускаемых напряжений, допустимый коэффициент запаса прочности $[n]$ принимают равным 2.0-2.5 для того, чтобы стакан выполнял свои предохранительные функции.

Предохранительным элементом в этой конструкции является служат стяжные болты с проточкой (см. рисунок 5.1,б). Под действием нормальной силы N в болтах возникает растягивающая сила Q, которую можно рассчитать по формуле

$$Q = 0{,}5 \cdot R_{max}(tg\alpha - 2 \cdot f) \cdot k_з, \qquad (5.3)$$

где $\alpha$ - угол наклона нижнего клина; f - коэффициент трения, принимаемый равным 0.10-0.15; $k_з$- коэффициент, учитывающий предварительную затяжку болтов, принимаемый равным 1.25. Силы трения N·f и $\frac{R_{max}}{2} \cdot f$ препятствуют растяжению болтов.

В опасном сечении болтов возникают напряжения растяжения, рассчитываемые по формуле

$$\sigma_б = \frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot d^2 k_б}, \qquad (5.4)$$

$d_0$- диаметр утоненной части болта; $k_б$- количество болтов.

Условие прочности (1.1) проверяют для нормальных напряжений, а допускаемые напряжения выбирают при допустимом коэффициенте запаса прочности $[n]$ =2.5÷3.0.

## 2. Цель работы

Научиться производить расчеты на прочность предохранительных устройств клетей прокатных станов, изучить основы и основные алгоритмы данных расчетов. Ознакомится в ходе расчета с сопутствующими справочными данными, их правильному использованию и применению.

## 3. Вопросы для подготовки к практической работе

1. Понятие прочности. Классификация

2. Конструкция и принцип работы предохранительных устройств прокатного стана

3. Классификация и назначение предохранительных устройств прокатных станов

4. Опасные сечения конструкции предохранительных устройств и схемы их нагружения

## 4. Задания для выполнения практической работы

Рассчитать на прочность предохранительный стакан рабочей клети крупносортного стана. Стакан изготовлен из чугуна с временным сопротивлением $\sigma_в$=450 МПа. Размеры стакана (см. рисунок5.1,а), м: диаметр подпятника нажимного винта $d_п$, внутренний диаметр дна стакана $d_0$, толщина мембраны стакана S, м. Реакция от усилия прокатки на шейку валка $R_{max}$, МН.

Варианты для выполнения практической работы представлены в таблице 5.1.

Таблица 5.1. Варианты для выполнения практической работы

| N | $d_п$, м | $d_0$, м | S, м | $\sigma_в$, МПА | $R_{max}$,МН |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 0.170 | 0.252 | 0.085 | 450 | 7 |
| 2 | 0,175 | 0,257 | 0,087 | 450 | 7,2 |
| 3 | 0,18 | 0,265 | 0,089 | 450 | 7,4 |
| 4 | 0,19 | 0,27 | 0,095 | 450 | 7,7 |
| 5 | 0,2 | 0,29 | 0,097 | 450 | 8 |
| 6 | 0,2 | 0,3 | 0,1 | 450 | 8,4 |
| 7 | 0,16 | 0,24 | 0,08 | 450 | 6,65 |
| 8 | 0,15 | 0,23 | 0,075 | 450 | 6,3 |
| 9 | 0,14 | 0,2 | 0,065 | 450 | 5,6 |
| 10 | 0,13 | 0,185 | 0,064 | 450 | 5,25 |

## 5. Порядок выполнения работы

Рассмотрим решение практической работы на примере 1 варианта задания, согласно которомуисходные данные:

-стакан изготовлен из чугуна с временным сопротивлением $\sigma_в$=450 МПа.

-размеры стакана (см. рисунок5.1,а): диаметр подпятника нажимного винта $d_п$=0,170 м, внутренний диаметр дна стакана $d_0$=0,252 м, толщина мембраны стакана S=0,085м.

-реакция от усилия прокатки на шейку валка $R_{max}$=7 МН.

Решение

Определяем напряжения изгиба в опасном сечении по формуле (5.1)

$$\sigma_{из} = 0{,}43 \cdot \frac{R_{max}}{S^2} In \frac{d_0}{d_п},$$

$$\sigma_{из} = 0{,}43 \cdot \frac{7{,}0}{0{,}085^2} In \left(\frac{0{,}252}{0{,}170}\right) = 164{,}0 МПа$$

Напряжения среза в этом сечении рассчитываем по формуле (5.2)

$$\tau_{ср} = \frac{R_{max}}{\pi \cdot d_0 \cdot S},$$

$$\tau_{ср} = \frac{7{,}0}{\pi \cdot 0{,}170 \cdot 0{,}085} = 154{,}2 МПа.$$

Допускаемые напряжения на изгиб и срез определяем по формуле (1.1), приняв $\tau_в = 0{,}7 \cdot \sigma_в$=0.7·450=315 МПа, а допустимый коэффициент запаса прочности [n]=2:

$$[\sigma] = \frac{450}{2} = 225 МПа \text{ и } [\tau] = \frac{315}{2} = 157{,}5 МПа$$

Полученные результаты свидетельствует, что условие прочности (1.1) для стакана выполняются. Следует отметить, что стакан будет выполнять свои предохранительные функции при условии, что коэффициенты запаса прочности остальных элементов клети будут больше 2.

## 6. Содержание отчета

В отчёте приводится цель работы, исходные данные, подробное изложение хода решения. В заключении отчета приводится вывод, основанный на результатах решения.

## 7. Критерии оценивания

Оценка «5» - студент показывает верное понимание сущности рассматриваемых явлений и закономерностей, дает точное определение и

истолкование основных понятий. Работа выполнена в полном объеме, в представленном отчете сделаны необходимые выводы, записи выполнены аккуратно. Студент может установить связь между изучаемым и ранее изученным материалом.

Оценка «4»- ответ студента удовлетворяет основным требованиям к ответу на оценку «5», но дан без использования связей с ранее изученным материалом и материалом, усвоенным при изучении других предметов.

Оценка «3» - работа выполнена не полностью, но объем выполненной части таков, что позволяет получить правильные результаты и выводы. Студент применяет полученные знания при решении простых задач с использованием готовых формул, но затрудняется при решении задач, требующих преобразования некоторых формул.

Оценка «2»- работа выполнена не полностью, и объем выполненной части работы не позволяет сделать правильных выводов.

### *1.6 Методические указания к выполнению практической работы №6*

### Станины рабочих клетей. Шестерённые клети и становые редукторы.

1.Общие сведения

Станину закрытого типа рассматривают как жесткую статически неопределимую раму, состоящую из двух одинаковых стоек и двух поперечин, которые могут быть прямоугольной формы, со скругленными углами или полукруглыми (рисунок 6.1)[3].

В общем случае в станине можно выделить три опасных сечения: поперечное сечение нижней поперечины (см. рисунок 6.1, сечение I-I,), поперечное сечение стойки (сечение II-II), поперечное сечение верхней поперечины (сечение III - III,) и поперечное сечение в месте сопряжения стойки с верхней поперечиной (сечение IY-IY на рис. 6.1,б и в) [2]. Типичная форма указанных сечений представлена на рисунке 6.2.

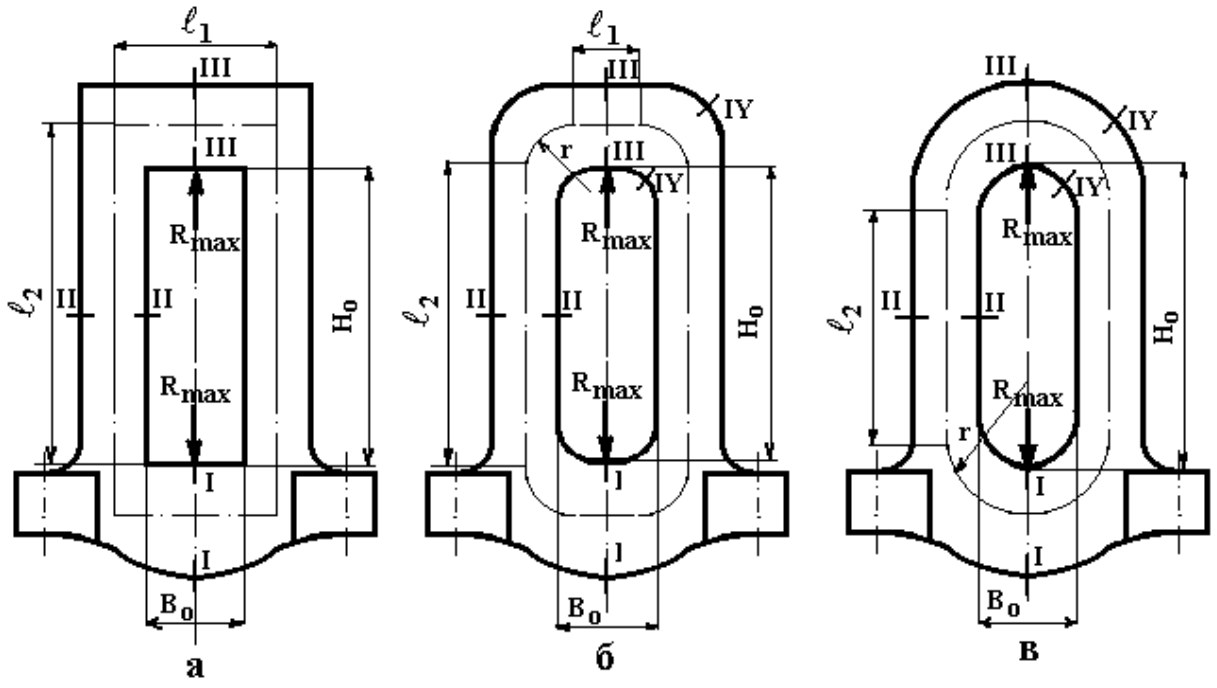



Рисунок 6.1. Расчетная схема станины закрытого типа[2]

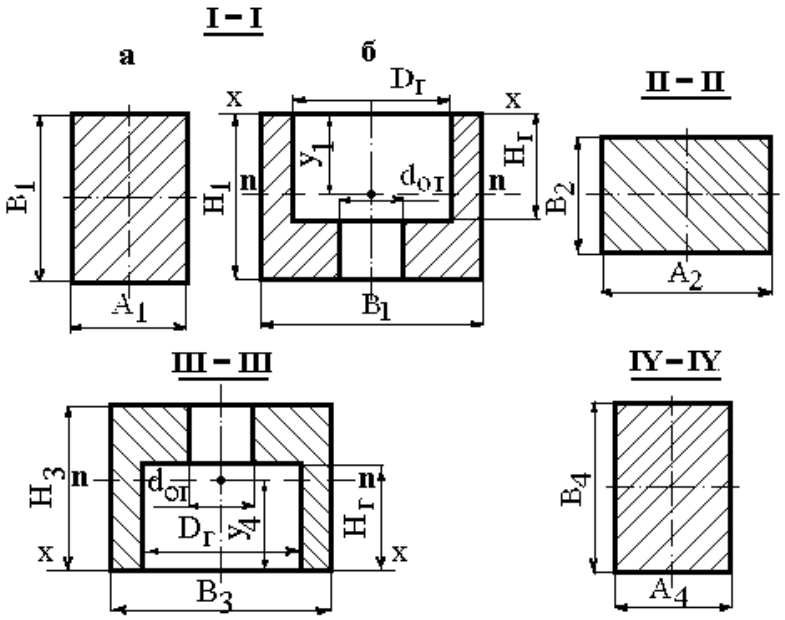



Рисунок 6.2. Форма характерных стоек станины и поперечин станин [2]

Для каждого опасного сечения, в зависимости от его формы (см. рис. 7.2), выполняют расчет площади поперечного сечения, координаты центра тяжести, момента инерции и момента сопротивления изгибу [8].

Опасное сечение I-I может быть сплошным прямоугольным (см. рис. 7.2,а) или с вырезами под нажимную гайку (см. рис. 7.2,б).

Для сплошного поперечного сечения нижней поперечины указанные параметры рассчитывают по формулам:

площадь сечения

$$F_1=A_1B_1, \qquad (6.1)$$

момент инерции

$$J_1 = \frac{A_1B_1^3}{12}, \qquad (6.2)$$

координата центра тяжести

$$Y_1 = \frac{B_1}{2}, \qquad (6.3)$$

момент сопротивления изгибу

$$W_1 = \frac{A_1B_1^2}{6}, \qquad (6.4)$$

Для сечения с вырезами под нажимную гайку и винт (см. рисунок 6.2,б) расчет ведут по формулам

площадь сечения

$$F_1=H_1B_1-H_гD_г-(H_1-H_г)d_{от}, \qquad (6.5)$$

статический момент относительно оси x-x, проходящей через верхнее основание сечения

$$S_1 = 0{,}5[B_1H_1^2 - H_гD_г^2 - d_{от}(H_1^2 - H_Г^2)], \qquad (6.6)$$

координата центра тяжести

$$Y_1 = \frac{S_1}{F_1}, \qquad (6.7)$$

момент инерции сечения относительно нейтральной оси, проходящей через центр тяжести

$$J_1 = \frac{B_1H_1^3}{12} + \left(\frac{H_1}{2} - Y_1\right)H_1B_1 - \frac{d_{от}(H_1-H_г)}{12} - \left(\frac{H_1+H_г}{2}\right)(H_1 - H_г)d_{от} - \frac{D_гH_г^3}{12} -$$
$$-(\frac{H_г}{2} - Y_1)^2D_ГH_г, \qquad (6.8)$$

момент сопротивления изгибу

$$W_1 = \frac{J_1}{Y_1}, \qquad (6.9)$$

Опасное сечение II-I

$$F_2 = A_2 B_2, \qquad (6.10)$$

$$J_2 = \frac{B_2 A_2^3}{12}, (6.11)$$

$$W_2 = \frac{B_2 A_2^2}{6}, (6.12)$$

Опасное сечение III-III

$$F_3 = H_3 B_3 - H_г D_г - (H_3 - H_г) d_{от}, \qquad (6.13)$$

$$S_3 = 0{,}5[B_3 H_3^2 - H_г D_г^2 - d_{от}(H_3^2 - H_г^2)], \qquad (6.14)$$

$$Y_3 = \frac{S_3}{F_3}, (6.15)$$

$$J_3 = \frac{B_3 H_3^3}{12} + \left(\frac{H_3}{2} - Y_3\right) H_3 B_3 - \frac{d_{от}(H_3 - H_г)}{12} - \left(\frac{H_3 + H_г}{2}\right)(H_3 - H_г) d_{от} - \frac{D_г H_г^3}{12} - \\ -\left(\frac{H_г}{2} - Y_3\right)^2 D_Г H_г, (6.16)$$

$$W_3 = \frac{J_3}{Y_3}, (6.17)$$

Опасное сечение IY-IY

$$F_4 = A_4 B_4, \qquad (6.18)$$

$$J_4 = \frac{A_4 B_4^3}{12}, \qquad (6.19)$$

$$Y_4 = \frac{B_4}{2}, \qquad (6.20)$$

$$W_4 = \frac{A_4 B_4^2}{6}. (6.21)$$

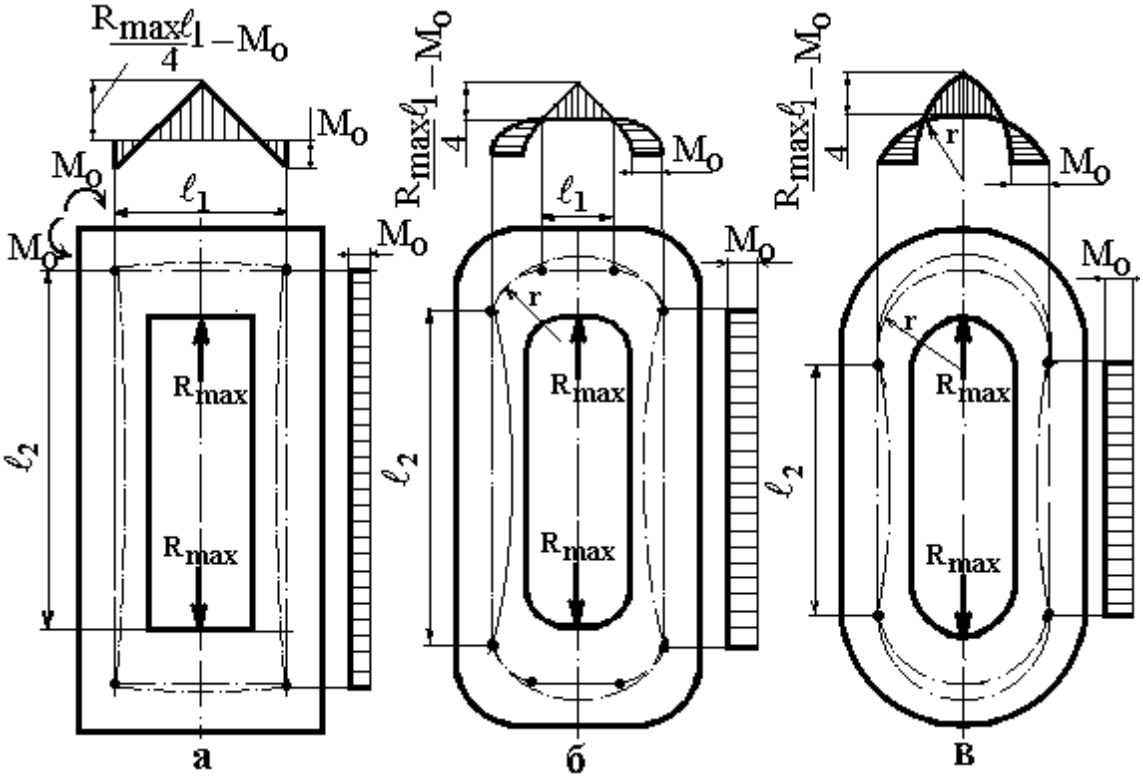



Рисунок 6.3. Эпюры изгибающих моментов в станинах закрытого типа [2]

Под действием силы $R_{max}$ в углах жесткой рамы возникают статически неопределимые изгибающие моменты $M_0$, действующие в направлении, показанном на рис. 6.3. Эти моменты изгибают стойки станины внутрь окна, а поперечины - по направлению действия силы $R_{max}$.

Статически неопределимый момент $M_0$ рассчитывают в зависимости от формы поперечины станины по формулам:

- для прямоугольной поперечины

$$M_0 = \frac{R_{max} l_1}{8} \cdot \frac{1}{1+\frac{l_2}{l_1}\frac{J_1}{J_2}}, \qquad (6.21)$$

- для поперечины с закругленными углами

$$M_0 = \frac{R_{max}\left[\frac{l_1^2}{8J_3}+\frac{r^2}{J_4}\left(\frac{\pi}{2}-1\right)+\frac{l_1 r}{2J_3}\right]}{\frac{l_1}{J_3}+\frac{l_2}{J_2}+\frac{\pi r}{J_4}}, \qquad (6.22)$$

- для станины с полукруглой поперечиной

$$M_0 = \frac{R_{max} r\left(\frac{\pi}{2}-1\right)}{\pi+\frac{l_2}{J_2}+\frac{J_4}{r}}, \qquad (6.23)$$

где $l_1$- длина поперечины по нейтральной линии; $l_2$- длина стоек по нейтральной линии; r - радиус закругления углов станины по нейтральной линии. Параметры $l_1$ и $l_2$ определяют по формулам:

для прямоугольной станины

$$l_1=B_0+A_2,\ l_2=H_0+Y_3+Y, \qquad (6.24)$$

для станины с закругленными углами

$$l_1=B_0+A_2-2r,\ l_2=H_0+Y_3+Y-2r \quad (6.25)$$

для станины с полукруглой поперечиной

$$l_1=0,\ l_2=H_0+Y_3+Y-2r, (6.26)$$

Под действием статически неопределимого момента $M_0$и силы $R_{max}$ в поперечинах возникают напряжения изгиба, а в стойках - напряжения изгиба и растяжения.

Эти напряжения в опасных сечениях станины любойформы рассчитывают по формулам:

в нижней поперечине

$$\sigma_1 = \frac{\frac{R_{max}l_1}{4}-M_0}{W_1}, \quad (6.27)$$

в стойках

$$\sigma_2 = \frac{R_{max}}{2F_2} + \frac{M_0}{W_2}, (6.28)$$

в верхней поперечине

$$\sigma_3 = \frac{\frac{R_{max}l_1}{4}-M_0}{W_3}, \quad (6.29)$$

Для каждого опасного сечения проверяют выполнение условия прочности. Допустимый коэффициент запаса прочности для станины принят равным 10.

## 2. Цель работы

Научиться производить расчеты на прочность станин закрытого типа клетей прокатных станов, изучить основы и основные алгоритмы данных

расчетов. Ознакомится в ходе расчета с сопутствующими справочными данными, их правильному использованию и применению.

## 3. Вопросы для подготовки к практической работе

1. Понятие прочности. Классификация
2. Станины прокатных станов. Их классификация и назначение
3. Достоинства и недостатки станин открытого типа
4. Достоинства и недостатки станин закрытого типа
4. Опасные сечения станин закрытого типа и схемы их нагружения

## 4. Задания для выполнения практической работы

5.

Рассчитать на прочность станину закрытого типа рабочей клетистана холодной прокатки. Форма и размеры опасных сечений станины показаны на рисунки 6.1-6.3. Станина изготовлена из литой стали марки 35Л. Усилие прокатки на поперечины станины действует сила $R_{max}$, МН.

Варианты для выполнения практической работы 6 приведены в таблице 6.1.

Таблица 6.1. Варианты для выполнения практической работы 6

| N | $R_{max}$МН | $A_1$, м | $B_1$, м | $A_2$, м | $B_2$, м | $H_3$, м | $B_3$, м | $H_г$, м | $D_г$, м | $d_{от}$, м | $A_4$, м | $B_4$, м | $B_0$, м | $H_0$, м | r, м |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 17 | 0.8 | 1.2 | 0.85 | 0.8 | 1.3 | 1.8 | 0.9 | 0.9 | 0.6 | 0.8 | 1 | 1.8 | 6.5 | 0.4 |
| 2 | 15 | 0,82 | 1,22 | 0,875 | 0,82 | 1,35 | 1,85 | 0,9 | 0,9 | 0,6 | 0,8 | 1,05 | 1,85 | 6,65 | 0,4 |
| 3 | 20 | 0,84 | 1,25 | 0,9 | 0,85 | 1,35 | 1,9 | 0,95 | 0,95 | 0,6 | 0,85 | 1,05 | 1,9 | 6,8 | 0,42 |
| 4 | 30 | 0,88 | 1,30 | 0,95 | 0,85 | 1,45 | 2 | 1 | 1 | 0,65 | 0,88 | 1,1 | 1,95 | 7,15 | 0,45 |
| 5 | 30 | 0,92 | 1,35 | 1 | 0,9 | 1,5 | 2,05 | 1,05 | 1,05 | 0,7 | 0,9 | 1,15 | 2, | 7,5 | 0,48 |
| 6 | 35 | 0,96 | 1,45 | 1,02 | 0,95 | 1,55 | 2,2 | 1,1 | 1,1 | 0,7 | 0,95 | 1,20 | 2,15 | 7,8 | 0,48 |
| 7 | 20 | 0,76 | 1,15 | 0,8 | 0,75 | 1,25 | 1,7 | 0,85 | 0,85 | 0,5 | 0,75 | 0,95 | 1,7 | 6,2 | 0,38 |
| 8 | 13 | 0,72 | 1,05 | 0,75 | 0,72 | 1,15 | 1,6 | 0,8 | 0,8 | 0,5 | 0,7 | 0,90 | 1,65 | 5,85 | 0,35 |
| 9 | 14.5 | 0,64 | 1 | 0,65 | 0,65 | 1,05 | 1,45 | 0,7 | 0,7 | 0,5 | 0,65 | 0,80 | 1,45 | 5,20 | 0,32 |
| 10 | 10 | 0,60 | 0,90 | 0,65 | 0,60 | 1 | 1,35 | 0,7 | 0,7 | 0,45 | 0,60 | 0,75 | 1,35 | 4,85 | 0,30 |

## 5. Порядок выполнения работы

Рассмотрим решение практической работы на примере 1 варианта задания, согласно которомуисходные данные:

-станина изготовлена из литой стали марки 35Л.

-усилие прокатки на поперечины станины действует сила $R_{max}$=17,МН.

-форма и размеры опасных сечений станины показаны на рисунки 6.1-6.3:$A_1$=0,8м, $B_1$=1,2м, $A_2$=0,85 м,$B_2$=0,8м, $H_3$=,1,9 м, $B_3$=1,8м, $H_г$=0,9м, $d_{от}$=0,6м, $A_4$=0,8 м, $B_4$=1м, $B_0$=1,8 м, $H_0$=6,5 м, r=0,4м.

Решение

Определим для каждого опасного сечения его площадь, координату цента тяжести, момент инерции и момент сопротивления изгибу по формулам (6.1)-(6.21).

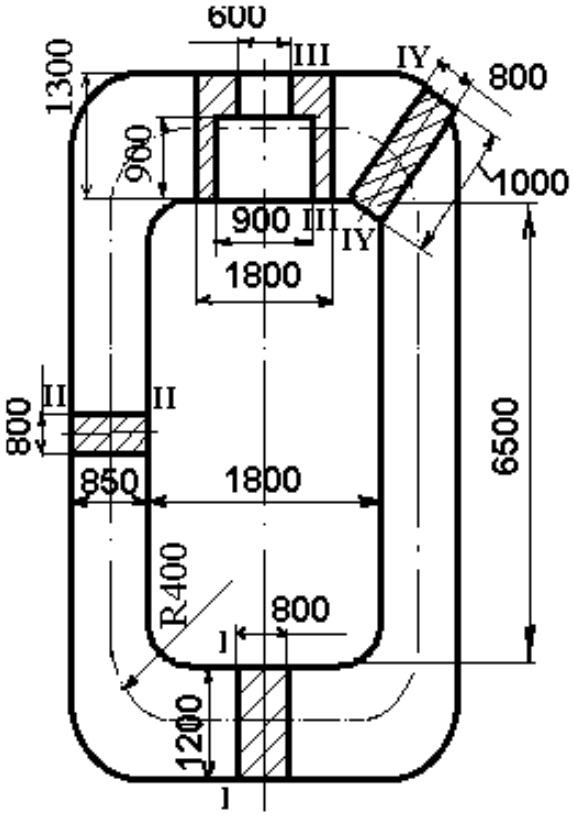



Рисунок 6.4 Форма и размеры опасных сечений станины [2]

Сечение I-I при $A_1$=0,8м, $B_1$=1,2м(см. рисунок 6.2 и 6.4):

$$F_1=A_1B_1,$$

$$F_1=0{,}8\cdot 1{,}2=0{,}96\ м^2.$$

$$J_1=\frac{A_1B_1^3}{12},$$

$$J_1=\frac{0{,}8\cdot 1{,}2^3}{12}=0{,}115м^4.$$

$$Y_1 = \frac{B_1}{2},$$
$$Y_1 = \frac{1,2}{2} = 0,6 \text{ м.}$$
$$W_1 = \frac{A_1 B_1^2}{6},$$
$$W_1 = \frac{0,8 \cdot 1,2^3}{6} = 0,192 \text{ м}^3.$$

Сечение II-II при $A_2$=0,85 м,$B_2$=0,8м(см. рисунок 6.2 и 6.4):

$$F_2=A_2B_2,$$
$$F_2=0,8 \cdot 0,8=0,68 \text{ м}^2.$$
$$J_2 = \frac{B_2 A_2^3}{12},$$
$$J_2 = \frac{0,8 \cdot 0,85^3}{12} = 0,041 \text{м}^4.$$
$$Y_2 = \frac{A_2}{2},$$
$$Y_2 = \frac{0,85}{2} = 0,425 \text{ м},$$
$$W_2 = \frac{B_2 A_2^2}{6},$$
$$W_2 = \frac{0,8 \cdot 0,85^2}{6} = 0,096 \text{ м}^3$$

Сечение III-III при $H_3$=1,3 м, $B_3$=1,8м, $H_г$=0,9м, $d_{от}$=0,6м (см. рисунок 6.2 и 6.4):

$$F_3=H_3B_3-H_гD_г-(H_3-H_г)d_{от},$$
$$F_3=1,3 \cdot ,1,8-1,8 \cdot 0,9-(1,3-0,9)0,6=1,29 \text{ м}^2$$
$$S_3 = 0,5[B_3 H_3^2 - H_г D_г^2 - d_{от}(H_3^2 - H_г^2)],$$
$$S3=0,5[1,8 \cdot 1,32-0,9 \cdot 0,92-0,6(1,33-0,93)]=0,893 \text{ м}^2.$$
$$Y_3 = \frac{S_3}{F_3},$$
$$Y_3 = \frac{0,893}{1,29} = 0,692\text{м.}$$

$$J_3 = \frac{B_3 H_3^3}{12} + \left(\frac{H_3}{2} - Y_3\right)^{22} H_3 B_3 - \frac{d_{от}((H_3 - H_г)^3)}{12} - \left(\frac{H_3 \mp H_г}{2} - y_3\right)^2 (H_3 - H_г) d_{от} -$$
$$- \frac{D_г H_г^3}{12} - -(\frac{H_г}{2} - Y_3)^2 D_Г H_г,$$
$$J_3 = \frac{1,8 \cdot 1,3^3}{12} + \left(\frac{1,3}{2} - 0,692\right) 1,3 \cdot 1,8 - \frac{0,6(1,3-0,9)^3}{12} - \left(\frac{1,3+0,9}{2} - 0,692\right)^2 (1,3 -$$
$$-0,9) \cdot 0,6 - \frac{0,9 \cdot 0,9^3}{12} - \left(\frac{0,9}{2} - 0,692\right)^2 0,9 \cdot 0,9 = 0,19 \text{ м}^2.$$
$$W_3 = \frac{J_3}{Y_3},$$
$$W_3 = \frac{0,19}{0,692} = 0,275 \text{ м}^3.$$

Сечение IY-IY при $A_4$=0,8 м, $B_4$=1м (см. рисунок 6.2 и 6.4):

$$F_4=A_4B_4,$$
$$F_4=0,8 \cdot 1,0=0,8 \text{ м}^2.$$
$$J_4 = \frac{A_4 B_4^3}{12},$$

$$J_4 = \frac{0{,}8 \cdot 1{,}0^3}{12} = 0{,}067 \text{м}^4.$$

$$Y_4 = \frac{B_4}{2},$$

$$Y_4 = \frac{1{,}0}{2} = 0{,}5 \text{м}.$$

$$W_4 = \frac{A_4 B_4^2}{6},$$

$$W_4 = \frac{0{,}8 \cdot 1{,}0^2}{6} = 0{,}133 \text{ м}^3.$$

Определяем длины нейтральных линий по формуле (6.26) (см. рисунок 6.2 и 6.4):

-поперечин

$$l_1 = B_0 + A_2 - 2r,\ l_1 = 1{,}8 + 0{,}85 - 2 \cdot 0{,}4 = 1{,}85 \text{ м}.$$

-стойки

$$l_2 = H_0 + Y_3 + Y - 2r,\ l_2 = 6{,}5 + 0{,}692 + 0{,}6 - 2 \cdot 0{,}4 = 6{,}992 \text{ м}.$$

Статически неопределимый момент рассчитываем по формуле (6.23)

$$M_0 = \frac{R_{max}\left[\frac{l_1^2}{8J_3} + \frac{r^2}{J_4}\left(\frac{\pi}{2} - 1\right) + \frac{l_1 r}{2J_3}\right]}{\frac{l_1}{J_3} + \frac{l_2}{J_2} + \frac{\pi r}{J_4}},$$

$$M_0 = \frac{17\left[\frac{1{,}85^2}{8 \cdot 0{,}19} + \frac{0{,}4^2}{0{,}067}\left(\frac{\pi}{2} - 1\right) + \frac{1{,}85 \cdot 0{,}4}{2 \cdot 0{,}19}\right]}{\frac{1{,}85}{0{,}19} + \frac{6{,}992}{0{,}041} + \frac{\pi \cdot 0{,}4}{0{,}067}} = 0{,}464 \text{МНм}.$$

Рассчитываем напряжения в элементах станины по формулам (6.29-6.30):

в нижней поперечин

$$\sigma_1 = \frac{\frac{R_{max} l_1}{4} - M_0}{W_1},$$

$$\sigma_1 = \frac{\frac{17 \cdot 1{,}85}{4} - 0{,}464}{0{,}192} = 38{,}5 \text{МПа}.$$

в стойках

$$\sigma_2 = \frac{R_{max}}{2F_2} + \frac{M_0}{W_2},$$

$$\sigma_2 = \frac{17}{2 \cdot 0{,}68} + \frac{0{,}464}{0{,}096} = 17{,}3 \text{МПа}.$$

в верхней поперечине

$$\sigma_3 = \frac{\frac{R_{max} l_1}{4} - M_0}{W_3},$$

$$\sigma_3 = \frac{\frac{17 \cdot 1{,}85}{4} - 0{,}464}{0{,}246} = 30{,}1 \text{МПа}.$$

Определяем коэффициенты запаса прочности по формуле (1.2), приняв предел прочности материала станины $\sigma_в = 600$ МПа:

для нижней поперечины

$$n_1 = \frac{600}{38,5} = 15,6,$$

для стойки

$$n_2 = \frac{600}{17,3} = 34,7$$

для верхней поперечины

$$n_3 = \frac{600}{30,1} = 19,9$$

Условие прочности выполняется для всех элементов станины, так как расчетные коэффициенты запаса прочности больше допустимого $[n]$ =10. Наиболее слабым местом станины является нижняя поперечина.

## 6. Содержание отчета

В отчёте приводится цель работы, исходные данные, эпюры изгибающих моментов в станине подробное изложение хода решения. В заключении отчета приводится вывод, основанный на результатах решения.

## 7. Критерии оценивания

Оценка «5» - студент показывает верное понимание сущности рассматриваемых явлений и закономерностей, дает точное определение и истолкование основных понятий. Работа выполнена в полном объеме, в представленном отчете сделаны необходимые выводы, записи выполнены аккуратно. Студент может установить связь между изучаемым и ранее изученным материалом.

Оценка «4»- ответ студента удовлетворяет основным требованиям к ответу на оценку «5», но дан без использования связей с ранее изученным материалом и материалом, усвоенным при изучении других предметов.

Оценка «3» - работа выполнена не полностью, но объем выполненной части таков, что позволяет получить правильные результаты и выводы. Студент применяет полученные знания при решении простых задач с использованием готовых формул, но затрудняется при решении задач, требующих преобразования некоторых формул.

Оценка «2»- работа выполнена не полностью, и объем выполненной части работы не позволяет сделать правильных выводов.

## 2. Методические указания к выполнению лабораторных работ

В пункте 4.1. рабочей программы дисциплины«Металлургические машины и оборудование» направления подготовки 15.03.02 «Технологические машины и оборудование» для бакалавров модуля М.1.12 «Технология и оборудование металлургического производства» [1] предусмотрены лабораторные занятия, приведённые в таблице 3.

Таблица 3. Организация лабораторных работ по дисциплине «Металлургические машины и оборудование»

| Код раздела, темы | Номер занятия | Тема занятия | Время на проведение занятия (час.) |
|---|---|---|---|
| Р4 | 1 | Изучение состава оборудования и определение признаков прокатного стана | 4 |
| Р4 | 2 | Исследование закономерностей деформации и кинематических условийпроцесса прокатки | 4 |
| Р4 | 3 | Исследование влияния сопротивления деформации, ширины прокатываемой заготовки, величины обжатия и смазки на величину давления металла на валки и мощность прокатки | 4 |
| | | **Всего:** | 12 |

Выполнение лабораторных работ данного методического пособия развивает и позволяет приобрести необходимые навыки, умения и владения, предполагаемые рабочей программой дисциплины

## 2.1. Методические указания к выполнению лабораторной работы №1

## Изучение состава оборудования и определение признаков прокатного стана

1.Общие сведения

Согласно [6], прокатный стан - это комплекс машин и агрегатов, предназначенных для осуществления пластической деформации металла в валках для получения изделий широкого ассортимента.

Прокатную продукцию в зависимости от формы сечения изделия разделяют условно на четыре группы.

1. Сортовой прокат:

а) простые - квадрат, круг, полоса, шестигранник, уголок, швеллер, двутавр;

б) фасонные - Z-образный, рессорный, ромбический, овальный, клиновой, трёхгранный, для тракторных шпор, для шахтных креплений и т. п. [8].

2. Специальные профили:

а) гнутые из листового проката - угловые, швеллер, Г-образный,

корытообразный, оконно-рамный, С-образный и др.;

б) периодические - с изменяющимся продольным профилем.

3. Листовой прокат:

а) толстолистовой с толщиной более 4 мм, горячекатаный;

б) тонколистовой прокат с толщиной до 4 мм, горяче- и холоднокатаный.

4. Трубы: бесшовные и сварные.

В зависимости от выпускаемой продукции прокатные станы по

конструкции делятся на пять групп:

1. Одноклетьевые, у которых главную линию рабочей клети образует собственно рабочая клеть и привод, состоящий из электродвигателей, муфт, редуктора, шестерённой клети и шпинделей (рисунок1.1)[3].

К станам этой группы относятся блюминги, слябинги, толстолистовые и универсальные станы, а также реверсивные станы.

2. Линейные станы, нереверсивные, рабочие линии которых расположены в одну или несколько линий, следующих последовательно одназа другой. К ним относятся сортовые и листовые станы.

3. Последовательные станы отличает прокатка полосы в каждой клети по одному разу, поэтому число клетей точно соответствует максимальномучислу пропусков. Конструктивно линия оформляется в виде параллельныхрядов в зигзагообразном или в шахматном порядке [9].

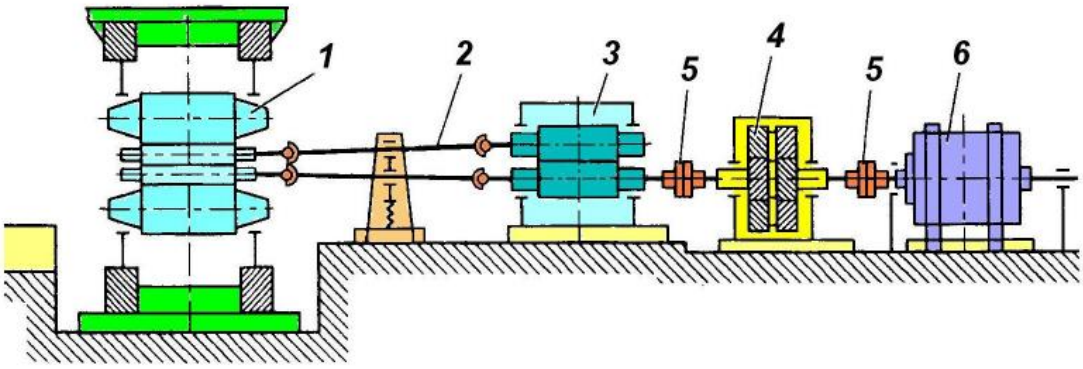



Рисунок 2.1. Схема главной линии 4-валковой клети с редукторным приводом и шестеренной клетью: 1 - прокатная клеть; 2 - шпиндели; 3- шестеренная клеть; 4 - редуктор; 5- муфта; 6- электродвигатель [6]

4. Непрерывные станы, в которых полоса прокатывается одновременно в нескольких клетях. Клети располагаются одна за другой последовательно, обеспечивая высокую производительность стана.

5. Полунепрерывные станы состоят из непрерывных и линейных (или последовательных) клетей.

В непрерывной группе полоса прокатывается непрерывно в ряде клетей, а далее переходит в линейную (последовательную) группу.

Наконец, по назначению, или по виду продукции, прокатные станы разделяют на обжимные (блюминги, слябинги); заготовочные; рельсобалочные; сортовые (крупносортные, среднесортные, мелкосортные); проволочные; толстолистовые; широкополосные; штрипсовые; листовые; жестепрокатные; лентопрокатные; трубопрокатные; специальные (колесопрокатные, бандажепрокатные, профилепрокатные) [3].

Основным параметром сортовых станов принимается диаметр валков последней клети.

Для листовых станов основным параметром является длина бочки рабочего валка.

Главную рабочую линию прокатных станов составляют прокатная клеть, передаточные устройства и двигатель. Для современных прокатных станов характерны три способа передачи крутящего момента к рабочим валкам. Момент подаётся на каждый валок от индивидуального двигателя, момент от одного двигателя через шестерённую клеть подаётся к каждому валку и, наконец, от двигателя через редуктор и шестерённую клеть крутящий момент подаётся к валкам (рисунок 1.1).

Рассмотрим лабораторный двухвалковый прокатный стан 150 (рисунок 1.2), предназначен для прокатки образцов из свинцовых, медных и алюминиевых сплавов с размерами сечения 0,5 ÷15 и10 ÷100 мм с усилием прокатки менее 200 кН.

Характеристики стана:

- диаметр валков 150 мм;
- длина бочки валка 300 мм;
- линейная скорость прокатки 0,1 ÷ 0,5 м/с;
- суммарное передаточное число привода 225.

Привод двухдвигательный от двигателей постоянного тока ДП-22, N=3кВт, частота вращения выходного вала двигателя n = 1100 об/мин.

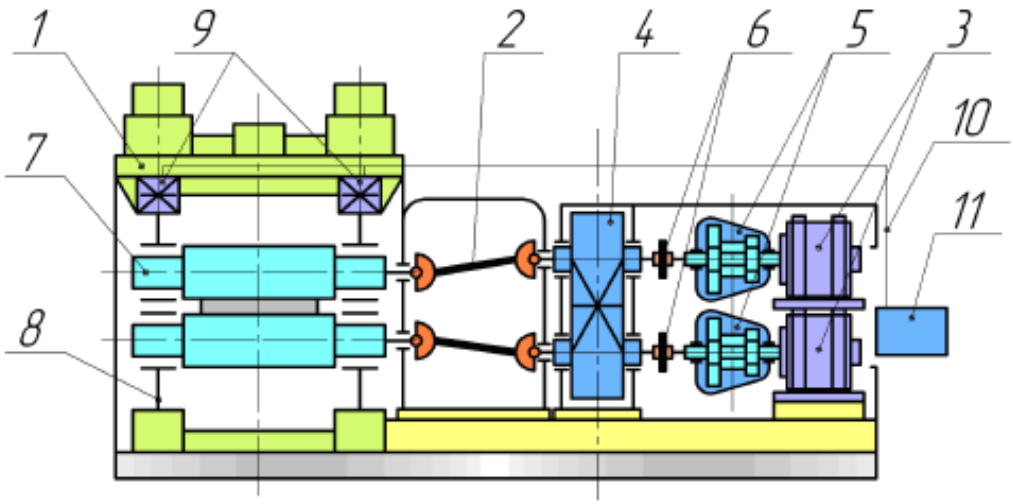



Рисунок 2.2. Принципиальная схема на примере лабораторного прокатного стана:1 - двухвалковая рабочая клеть; 2 - универсальные шпиндели; 3 - электродвигатели; 4 -

редукторы (i = 5); 5 - редукторы (i = 45);6 - предохранительные муфты; 7 - рабочие валки двухвалковой клети; 8 - станина; 9 - месдозы; 10 - провода соединительные; 11 – вторичный преобразователь [6]

2. Цель работы

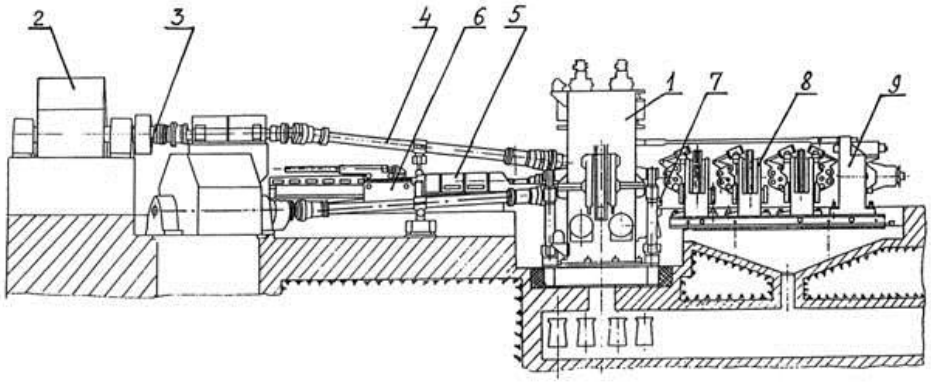
Изучение состава оборудования, характеристик и назначения прокатной клети с приводом и определение признаков лабораторного прокатного стана.

3. Используемое оборудование

При выполнении лабораторной работы применяется лабораторныйпрокатный стан с системой измерения и визуализации энергосиловыхпараметров (датчики, персональный компьютер).

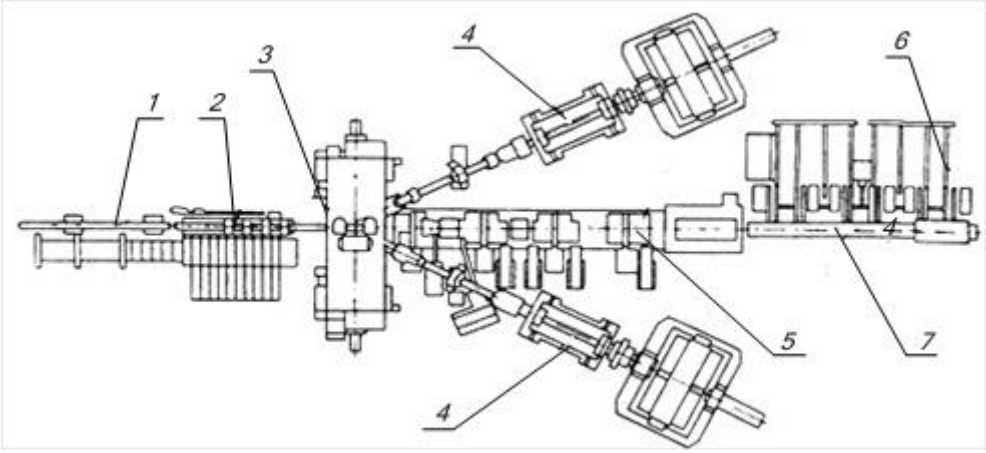
4. Задания для выполнения работы

**Вариант 1**. Схема трехвалкового прошивного стана



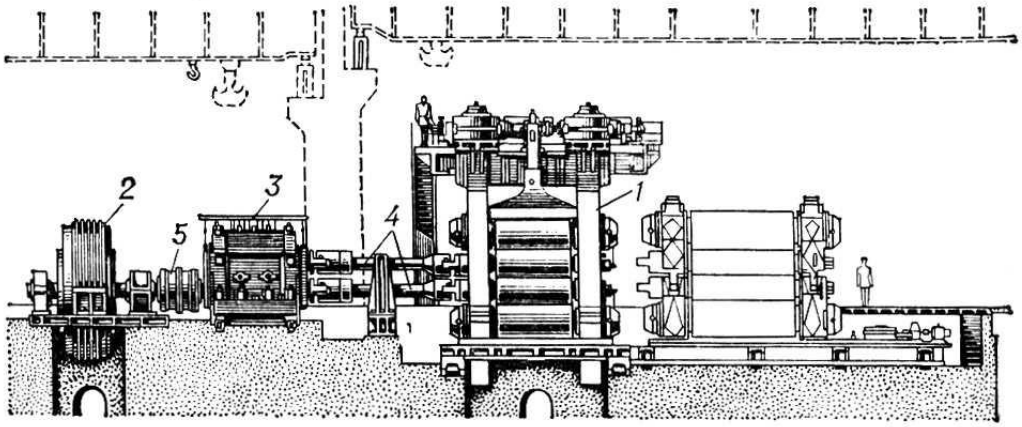

1 – клеть прошивного стана; 2 – приводной электродвигатель;3 – муфта; 4 – универсальный шпиндель; 5 – приемный желоб; 6 – вталкиватель заготовки;7 – холостые валки для обкатки конца гильзы; 8 – центрователи стержня; 9 – упорно-регулировочный механизм. [4]

**Вариант 2.** Схема расположения оборудования прошивного стана с индивидуальным приводом валков



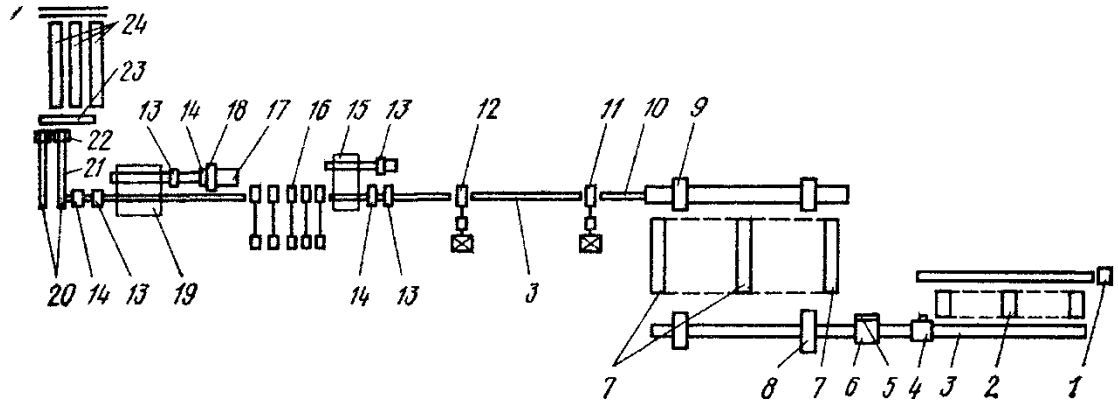

1- выталкиватель; 2 - передний стол; 3 - рабочая клеть; 4 - главный привод; 5 - выходная сторона; 6 - качающаяся решетка; 7 – рольганг [4]

**Вариант 3.** Схема расположения оборудования главной линии четырехвалкового стана для прокатки листов



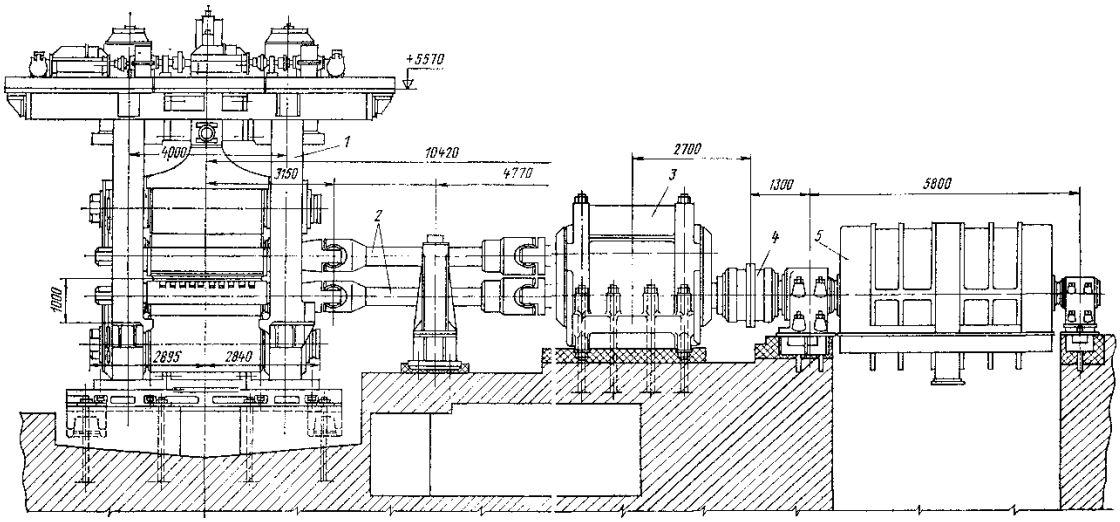

1 — рабочая клеть; 2 — электродвигатель; 3 — шестеренная клеть; 4— шпиндель; 5 — муфта.[4]

**Вариант 4.**Схема расположения оборудования полунепрерывного листового стана 2800 для горячей прокатки



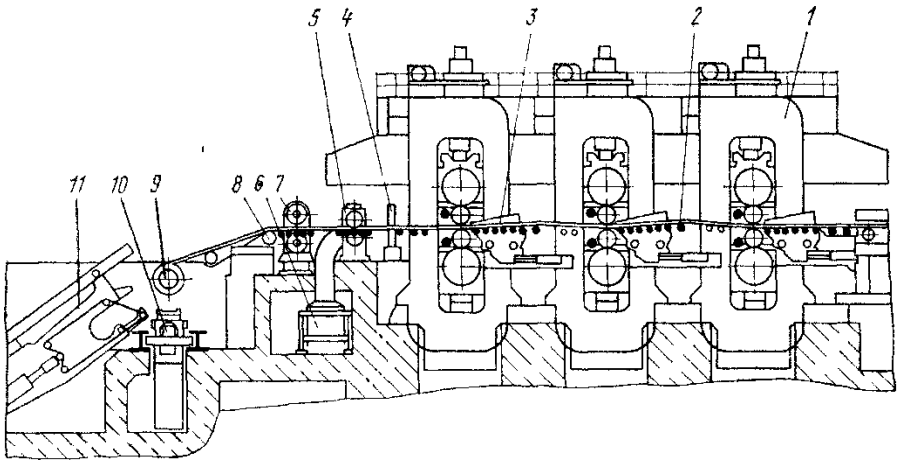

1 - раскладчик слябов; 2 - фрезерный станок, 3 - рольганги; 4 - моечно-сушильный агрегат, 5 - укладчик планшетов; 6 - кантователь; 7 - печи для нагрева слябов; 8 - мостовой вилочный кран; 9 - полупортальный вилочный кран; 10 - рабочая клеть с вертикальными валками; 11 - рабочая клеть 900/1400Х2800; 12 - рабочая клеть 750/1400Х2800; 13 - гильотинные ножницы с нижним резом; 14 - дисковые ножницы с кромкокрошителем; 15 - поперечный транспортер плит; 16 - непрерывная группа рабочих клетей 650/1400Х2800, 17 - листоукладчик, 18 - валковая правильная машина; 19 - поперечный транспортер толстых листов; 20 - намоточное устройство; 21 - весы; 22 - тележка-кантователь рулонов; 23 - конвейер рулонов; 24 - печи для отжига рулонов [4]

**Вариант 5**.Схема расположения оборудования главной линии первой черновой клети 900/1400×2800.



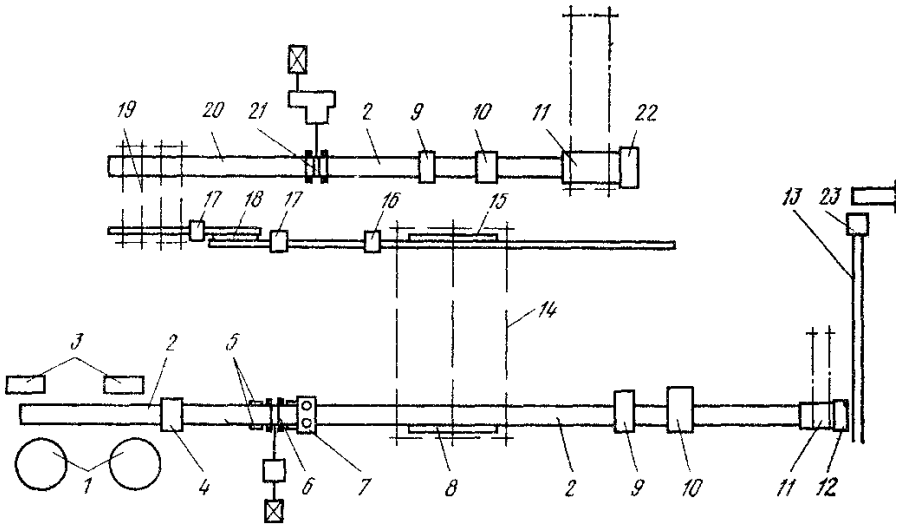

1-рабочая клеть, 2-универсальные шпиндели, 3-шестеренная клеть, 4-моторная муфта, 5-электродвигатель.[5]

**Вариант 6.** Схема расположения оборудования чистовой группы клетей полунепрерывною стана горячей прокатки алюминия фирмы «Siemag» (ФРГ).




1— рабочие клети, 2 — регулятор петли, 3 — пресс проводки, 4 — устройство для из мерения толщины полосы, 5 — кромкообрезные ножницы, 6—устройство для уборки скрапа, 7—ножницы поперечной резки, 8—направляющий ролик, 9—моталка, 10—тележка для уборки рулонов, 11 — ременный захлестыватель [4]

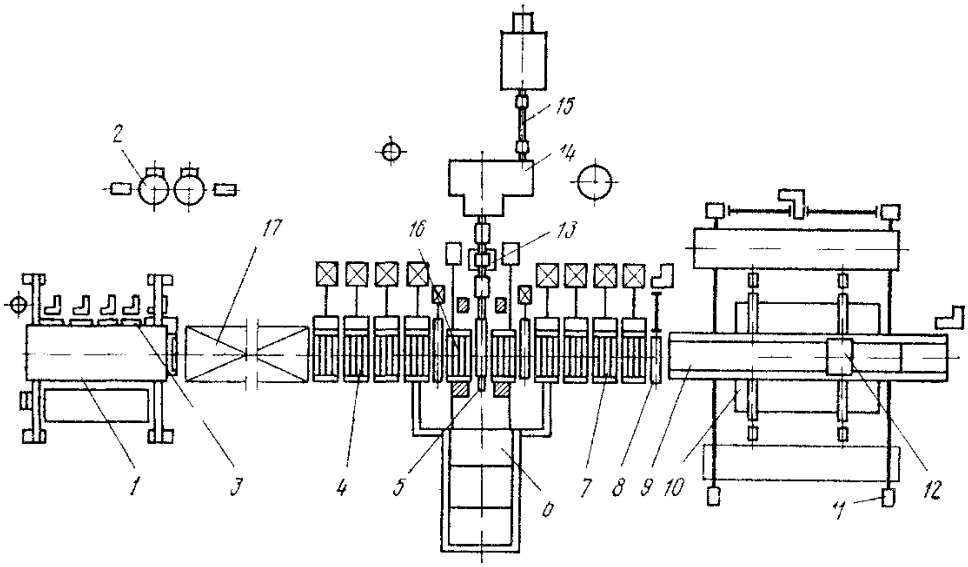
**Вариант 7**. Схема расположения оборудования двухвалковых станов 850×1500 и 600×1000.




1—кольцевые печи, 2—рольганги, 3 — загрузочные устройства, 4—машина для за чистки слитков, 5—манипуляторчые линейки, 6—рабочая клеть 850Х1500, 7—клеть с

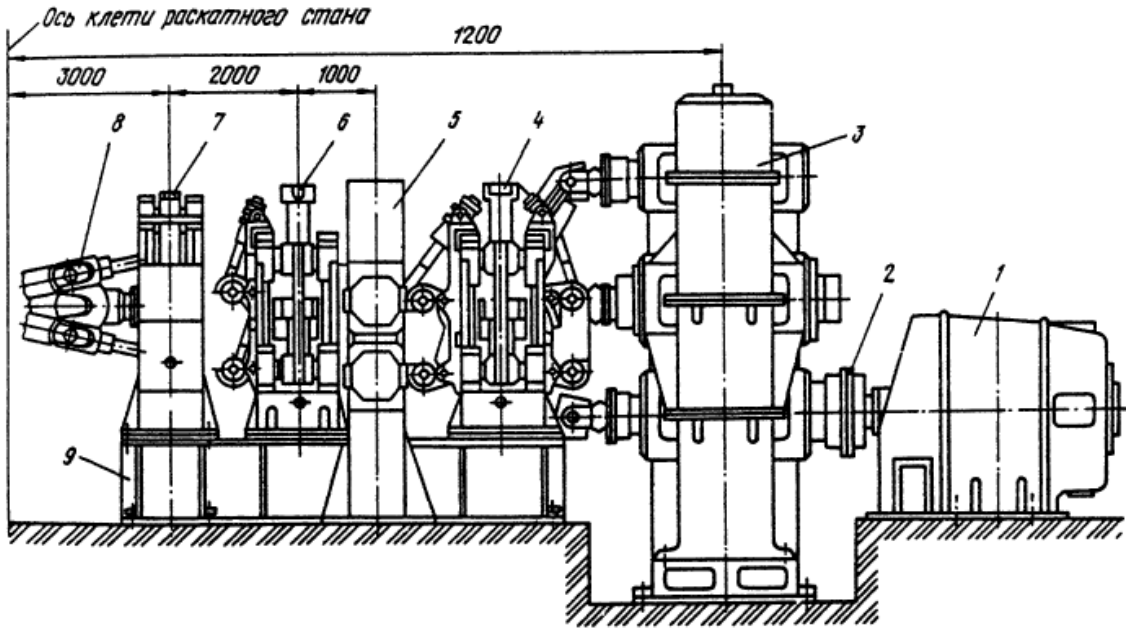
вертикальными валками, 8 — сталкиватель полос, 9 — дисковые ножницы с кромкокрошителем, 10 — ножницы с нижним резом, 11 — пакетирующее устройство, 13 — свертывающая машина для горячих полос 13 — механизированный склад рулонов, 14— транспортер пакетов, 15—раскладчик полос 1Ь—листоправильная машина; 17— фрезоагрегат, 18—кантователь полос; 19—транспортер полос, 20—рольганги, 21— рабочая клеть 600Х1000, 22 — свертывающая машина для холодных рулонов, 23— душирующая камера для горячих рулонов.[4]

**Вариант 8.** Схема расположения оборудования прогладочного стана 2000.



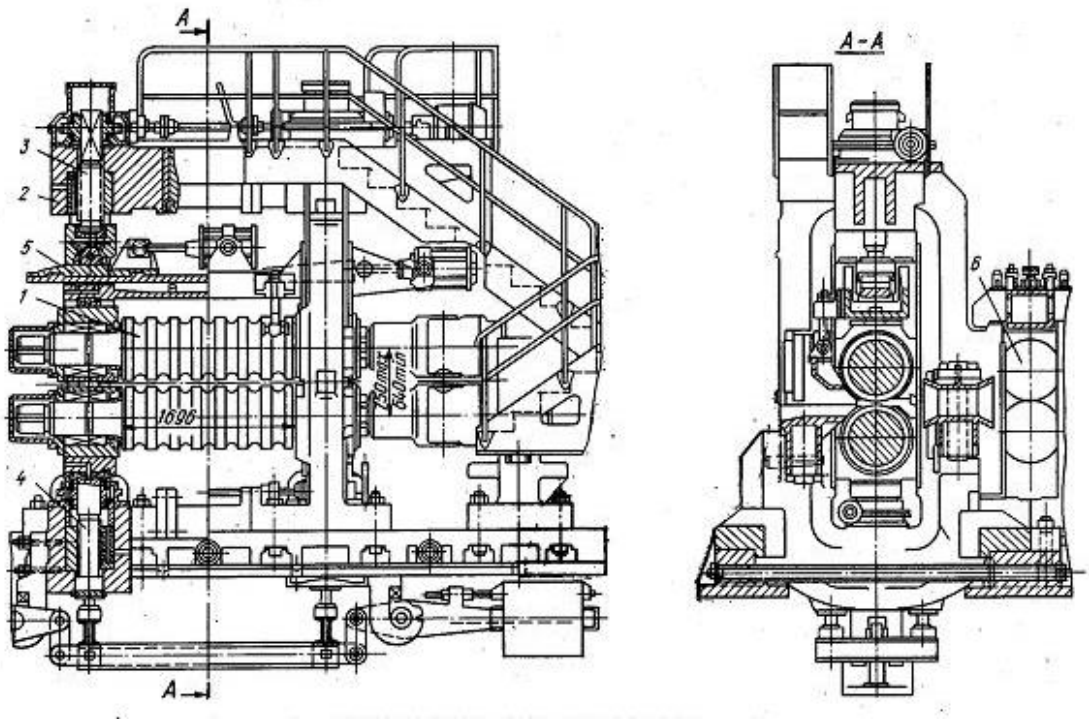

1 — листоукладчик, 2 — установка вакуум- насосов с баллонами, 3 — приемный рольганг, 4 раскатной рольганг перед клетью, 5 — рабочая четырехвалковая клеть, 6 — механизм смены валков, 7 - раскатной рольганг за клетью, 8 — подающие ролики, 9 — листоукладчик, 10 — подъемно- опускающийся стол, 11 — тележка, 12 — передвижной упор, 13—шпиндельное устройство, 14—комбинированный редуктор, 15—моторный вал, 16 — станинные ролики, 17 — электропечь [8]

**Вариант 9.** Схема расположения оборудования выходной сторонытрехвалкового раскатного стана.



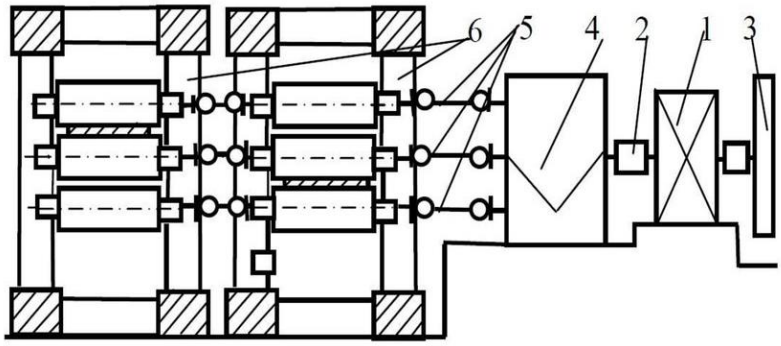

1 –двигатель главного привода; 2 –муфта; 3 –шестеренная клеть; 4,6 –центрователи; 5,7 – устройство выдачи трубы и оправки из стана; 8 –шпиндели главного привода; 9 –рама. [8]

**Вариант 10**. Схема расположения оборудования автомат-стана.




1-рабочие валки, 2-станина, 3-нажимной механизм, 4-установочный механизм нижнего валка, 5-клиновой механизм, 6-валки обратной подачи.[8]

**Вариант 11**. Схема расположения оборудования стана с линейным приводом.




1-эектродвигатель, 2-моторная муфта, 3-маховик, 4- шестеренная клеть, 5-шпиндели,6-валки рабочих клетей.[8]

## 5. Порядок выполнения работы

Под руководством преподавателя студенты изучают составоборудования лабораторного стана, определяют признаки и назначениекаждого элемента, изучают измерительную базу: типы и назначение датчиковдля измерения усилия прокатки и мощности привода. Составляется схемапривода в соответствии с реальным приводом.

Разрабатывается структурная схема прокатного стана в составе рабочейклети и привода по ступеням вхождения (1-3).

## 6. Содержание отчёта

В отчёте приводится цель работы, основная характеристика лабораторного стана, структурная схема стана, описывается функциональное назначение каждого элемента, описывается принцип работы стана.

## 7. Контрольные вопросы

1. Какова классификация станов по назначению (видам выпускаемойпродукции)?

2. Какова классификация станов по количеству и расположению клетей?

3. Какие типы элементов приводов применяются в главных линияхстанов?

4. Что составляет конструктивную основу прокатной клети?

5. Каково назначение нажимных механизмов?

6. Для чего необходимо уравновешивающее устройство верхнихкомплектов валков?

7. Каково назначение шпиндельных соединений?

8. В чём принципиальное отличие станов непрерывного,последовательного, линейного типов?

8. Критерии оценивания

Оценка «5» - студент показывает верное понимание сущности рассматриваемых явлений и закономерностей, дает точное определение и истолкование основных понятий. Работа выполнена в полном объеме, в представленном отчете сделаны необходимые выводы, записи выполнены аккуратно. Студент может установить связь между изучаемым и ранее изученным материалом.

Оценка «4»- ответ студента удовлетворяет основным требованиям к ответу на оценку «5», но дан без использования связей с ранее изученным материалом и материалом, усвоенным при изучении других предметов.

Оценка «3» - работа выполнена не полностью, но объем выполненной части таков, что позволяет получить правильные результаты и выводы. Студент применяет полученные знания при решении простых задач с использованием готовых формул, но затрудняется при решении задач, требующих преобразования некоторых формул.

Оценка «2»- работа выполнена не полностью, и объем выполненной части работы не позволяет сделать правильных выводов.

### *2.2. Методические указания к выполнению лабораторной работы №2*

**Исследование закономерностей деформации и кинематических условийпроцесса прокатки**

1. Общие сведения

Согласно [6], для характеристики деформаций используют ряд величин, среди них абсолютные деформации Δh, Δb, Δl и относительные деформации ε, β, λ.

$$\Delta h = H - h; \qquad (2.1)$$

$$\Delta b = B - b; \frac{b_1}{b_0}; \qquad (2.2)$$

$$\Delta l = L - l. \qquad (2.3)$$

$$\varepsilon = \frac{\Delta h}{H} \cdot 100\%, \qquad (2.4)$$

$$\beta = \frac{\Delta b}{B} \cdot 100\%, \quad (2.5)$$

$$\lambda = \frac{\Delta l}{L} \cdot 100\%. \quad (2.6)$$

При малых деформациях произведениями коэффициентов можно пренебречь и тогда:

$$\varepsilon_b + \varepsilon_h + \varepsilon_l = 0 \quad (2.7)$$

В практике наиболее часто будут встречаться: коэффициент вытяжки:

$$\lambda = \frac{l_1}{l_0} \quad (2.8)$$

степень относительного обжатия

$$\varepsilon = 1 - \frac{1}{\lambda}, \quad (2.9)$$

$$\varepsilon = \frac{h_0 - h_1}{h_0} \cdot 100\%, \quad (2.10)$$

$$\lambda = \frac{1}{1-\varepsilon}. \quad (2.11)$$

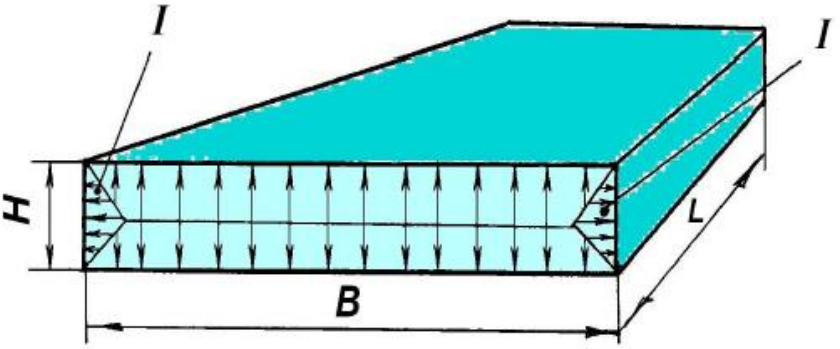



Рисунок 2.1. Схема течения металла при осадке (прокатке) прямоугольного образца[6]

При осаживании (прокатке) образца в виде параллелепипеда (рисунок 2.1) сопротивление течению частицы образца в виде горизонтальной плоскости будет наименьшим в направлении, кратчайшем к периметру сечения. Сечение разделяют на участки биссектрисами угла и линией, соединяющей пересечения биссектрис. Из рисунка видно, что площади участков I, обеспечивающих течение металла в направлении, параллельном длинной стороне прямоугольника, малы. Поэтому деформация в этом направлении (β) будет меньше, чем в направлении, перпендикулярном длинной стороне (ε). Эта разница (ε>β) будет тем больше, чем больше отношение длины L к ширине B. В реальных условиях в процессах ОМД деформации неравномерны, что связано с взаимным влиянием отдельных частей полосы друг на друга.

Пластическое формоизменение в процессах ОМД, как правило, выполняется в условиях неравномерности напряженного состояния, что является основной причиной неравномерности деформации. Равномерная деформация будет в том случае, если во всех точках деформируемого тела в каждый данный момент времени деформации будут одинаковы по величине и направлению. В реальных процессах равномерная деформация маловероятна, так как всегда имеется достаточно причин для проявления неравномерной деформации.

Основным фактором при всякой неравномерной деформации является взаимное влияние отдельных частей полосы друг на друга, обусловленное наличием непосредственной связи между ними и действием внешних неподатливых (жестких) концов полосы. При отсутствии двух последних факторов эти отдельные части получили бы ¸естественные вытяжки в соответствии с обжатием в данной зоне. В действительности же из-за выравнивания естественных вытяжек полоса получает некоторую общую длину.

Для осуществления процесса прокатки необходимо захватить полосу вращающимися валками, то есть создать условия для заполнения очага деформации металлом. Основными кинематическими параметрами при этом являются угол захвата α, нейтральный угол γ, длина геометрического очага деформации lg, дуга захвата AC, плоскость входа металла в очаг деформации AB, плоскость выхода CD (рисунок 2.2).

Под очагом деформации понимается объем металла, заключенный между валками и плоскостями входа AB и выхода CD. При этом длина очага деформации lg (без учета сплющивания валков) и угол захвата α определяются из геометрических соотношений [3]:

$$l_g = \sqrt{R \cdot \Delta h} \quad (2.12)$$

$$\alpha = \sqrt{\frac{\Delta h}{R}} \quad (2.13)$$

Известно, что скорость металла на выходе из очага деформации $v_1$ превышает окружную скорость валков $v_в$. Это явление называется ¸опережением S, которое определяется соотношением

$$S = \frac{v_1 - v}{v} \cdot 100\% \quad (2.14)$$

и в зависимости от условий прокатки может достигать 3-6 % и выше. На входе металла в очаг деформации имеет место ¸отставание Sвх, при котором скорость металла меньше скорости валков:

$$S_{вх} = \frac{v_в \cdot cos\alpha - v_2}{v_в \cdot cos\alpha} \quad (2.15)$$

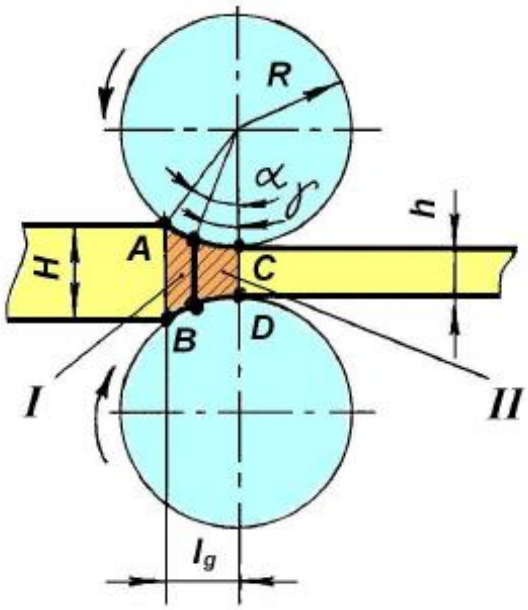



Рисунок 2.2. Кинематические параметры процесса прокатки [6]

где $v_в \cdot cos\alpha$- горизонтальная составляющая окружной скорости валков на линии входа металла в очаг деформации.

Формула для определения опережения через геометрические параметры очага деформации имеет вид:

$$S = \frac{R}{h_1} \cdot \gamma^2, \quad (2.16)$$

где R – радиус валка;

$h_1$ – высота заготовки после прокатки;

$\alpha$ – критический угол (в радианах).

При этом нейтральный угол γ, который делит очаг на зону опережения II и зону отставания I, определяется через угол захвата α(рад) и угол трения при захвате β(рад):

$$S = \frac{\alpha}{h} \cdot (1 - \frac{\alpha}{2\mu}) \quad (2.17)$$

где $\alpha$– угол захвата;

$\mu$ – угол трения.

Одним из методов определения опережения является метод нанесения меток на валки и их отпечатки на полосе. Для этого на поверхности валка набиваются два керна, которые при прокатке дают на полосе отпечатки. Расстояние между кернами $l_в$ обычно равно половине длины окружности валков. Расстояние между отпечатками на полосе $l_h$ характеризует путь, пройденный металлом за половину оборота валка в одно и то же время. При этом экспериментальная величина опережения $S_{экс}$. может быть получена из выражения

$$S_{экс} = \frac{l_h - l_в}{l_h}. \qquad (2.18)$$

2. Цель работы

Изучение основных закономерностей деформации при прокатке, изучение математической модели при процессе прокатки, определение коэффициентов деформации, исследование влияния внешнего трения, параметров очага деформации на захват металла валками и опережение.

3. Используемое оборудование

При проведении лабораторной работы применяется следующее оборудование и инструмент: образцы, не подверженные деформации (заготовка) размерами H x B x L заданного материала, образцы после первого прохода $H_1$ x $B_1$ x $L_1$со степенью деформации $\varepsilon_1$, образцы после второго обжатия $H_2$ x $B_2$ x $L_2$ со степенью деформации $\varepsilon_2$,…, образцы после i-го прохода со степенью деформации $\varepsilon$i, линейка металлическая, штангенциркуль электронный, калькулятор.

4. Варианты заданий для выполнения работы

Рассчитать основные параметры очага деформации на каждом проходе при горячей прокатки полосы. Варианты заданий представлены в калибровочных таблица (смотри таблица 2.1), номер каждого варианта соответствует одному проходу.

Таблица 2.1. Варианты заданий для выполнения лабораторной работы

| № | $h_0$,мм | $h_1$,мм | b,мм | $\varepsilon$,% | $\mu$ | R, мм |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Калибровочная таблица №1 | | | | | | |
| 1 | 2,3 | 1,715 | 1050 | 25,4 | 0,03 | 240 |
| 2 | 1,715 | 1,26 | 1050 | 26,5 | 0,03 | 240 |
| 3 | 1,26 | 0,87 | 1050 | 31 | 0,03 | 240 |
| 4 | 0,87 | 0,535 | 1050 | 38,5 | 0,03 | 240 |
| 5 | 0,535 | 0,35 | 1050 | 34,6 | 0,03 | 240 |
| Калибровочная таблица №2 | | | | | | |
| 1 | 2,3 | 1,510 | 960 | 34,35 | 0,035 | 200 |
| 2 | 1510 | 0,950 | 960 | 37,09 | 0,035 | 200 |
| 3 | 0,950 | 0,605 | 960 | 36,32 | 0,035 | 200 |
| 4 | 0,605 | 0,390 | 960 | 35,54 | 0,035 | 200 |
| 5 | 0,390 | 0,265 | 960 | 32,00 | 0,035 | 200 |
| Калибровочная таблица №3 | | | | | | |
| 1 | 240 | 228 | 1560 | 5 | 0,7 | 900 |
| 2 | 228 | 212 | 1560 | 15 | 0,7 | 900 |
| 3 | 213 | 190 | 1548 | 23 | 0,7 | 900 |
| 4 | 196 | 165 | 1550 | 25 | 0,7 | 900 |
| 5 | 165 | 140 | 1536 | 25 | 0,7 | 900 |
| 6 | 140 | 120 | 1540 | 20 | 0,7 | 900 |
| 7 | 120 | 100 | 1524 | 20 | 0,7 | 900 |

## 5. Порядок выполнения работы

1. В рамках разработки математической модели процесса прокатки, рассчитываются теоретические размеры образцов (H×B×L) заданного материала после каждого обжатия с заданной степенью деформации $\varepsilon$i и сравниваются с натурными.

2. Рассчитываются основные параметры геометрии очага деформации для каждого прохода (Bср, lg,$\Delta$b/B, ,$l_g/B_{\text{ср}}$).

3. Полученные данные сводятся в таблицу результатов. Пример сводной таблицы для обработки результатов исследования приведенна рисунке 2.3.

## 6. Содержание отчета

В отчете приводится цель работы, результаты лабораторных исследований в виде таблиц, графиков и анализа результатов по проделанному исследованию.

## 7. Контрольные вопросы

1. Чему равна сумма истинных деформаций тела?

2. Чему равно произведение коэффициентов деформации?

3. Почему плоские торцы заготовки после прокатки становятся выпуклыми?

4. Как формулируется закон наименьшего сопротивления?

5. Какие параметры очага деформации влияют на уширение, почему?

6. Почему при тонколистовой прокатке обычно пренебрегают уширением?

7. Каковы причины неравномерности деформации?

8. При каких условиях при листовой прокатке проявляются дефекты: волнистость, коробоватость, серповидность, порывы кромок, порывы средней части полосы по ширине?

9. При каких условиях происходит захват металла валками?

10. Какие силы действуют на полосу и валки при захвате? Какие силы способствуют захвату?

11. Каким образом можно увеличить максимальное обжатие за проход?

12. Почему имеется возможность увеличить максимальное обжатие в установившейся стадии прокатки по сравнению с процессом захвата?

13. Как величина обжатия за проход влияет на производительность стана?

14. Что такое опережение, почему оно возникает, как определяется его величина?

15. Как обжатие влияет на положение нейтрального сечения?

16. При каких условиях нейтральный угол равен нулю, чему при этом равно опережение, что при этом происходит на контактной поверхности?

## 8. Критерии оценивания

Оценка «5» - студент показывает верное понимание сущности рассматриваемых явлений и закономерностей, дает точное определение и истолкование основных понятий. Работа выполнена в полном объеме, в представленном отчете сделаны необходимые выводы, записи выполнены аккуратно. Студент может установить связь между изучаемым и ранее изученным материалом.

Оценка «4»- ответ студента удовлетворяет основным требованиям к ответу на оценку «5», но дан без использования связей с ранее изученным материалом и материалом, усвоенным при изучении других предметов.

Оценка «3» - работа выполнена не полностью, но объем выполненной части таков, что позволяет получить правильные результаты и выводы. Студент применяет полученные знания при решении простых задач с использованием готовых формул, но затрудняется при решении задач, требующих преобразования некоторых формул.

Оценка «2»- работа выполнена не полностью, и объем выполненной части работы не позволяет сделать правильных выводов.

| № | Размер образца, мм | | | | | | Величина абсолютного | | | Величина относительного | | | $B_{ср}$, мм | $l_{g,мм}$ | Δb/B | $l_g/B_{ср}$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | До прохода | | | После прохода | | | обжатия Δh,мм | уширения Δb,мм | удлинения Δl,мм | обжатия $\varepsilon$, % | уширения $\beta$,% | Удлинения (вытяжки) $\lambda$, % | | | | |
| | H | B | L | h | b | l | | | | | | | | | | |
| 1 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 2 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 3 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| … | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | | |

Рисунок 2.3. Пример сводной таблицы для обработки результатов исследования

### *2.3. Методические указания к выполнению лабораторной работы №3*

**Исследование влияния сопротивления деформации, ширины прокатываемойзаготовки, величины обжатия и смазки на величину давления металла на валки и мощность прокатки**

1. Общие сведения

Основными величинами, характеризующими энергосиловые воздействия на прокатке, является усилие, момент и удельный расход энергии на прокатке [3].

Факторы, от которых зависит давление металла на валки, можно разделить на две группы. К первой относят условия, влияющие на механические свойства обрабатываемого материала и характеризующиеся сопротивлением линейной деформации или чистому сдвигу К: природные свойства материала, часто описываемые пределом текучести $\sigma_T$; температура T; скорость деформации U и наклёп ε. Вторая группа условий определяет характер напряжённого состояния в очаге деформации: контактные силы трения, зависящие от коэффициента трения f; геометрические характеристики $h_0$ , $h_1$,R,B; внешние зоны, натяжение или подпор $\sigma_0$,$\sigma_1$ и др [4].

В общем виде давление металла на валки (интегральная величина) определяется по формуле

$$P = P_{\text{ср}} \cdot B \cdot l, \quad (3.1)$$

где Рср - среднее удельное давление в очаге деформации, МПа;

В - ширина заготовки;

l - длина геометрического очага деформации.

Среднее удельное давление в очаге деформации Рср определяется по формуле

$$P_{\text{ср}} = \gamma \cdot n_\sigma \cdot \sigma_s, \qquad (3.2)$$

где $\gamma$-коэффициент, учитывающий напряжённое состояние металла при прокатке ($\gamma$=1-при свободом уширении и $\gamma$=1,15 при двухмерной деформации, пренебрегая уширением);

$n_\sigma$-коэффициент, учитывающий влияние остаточных напряжений;

$\sigma_s$-фактическое сопротивление деформации, МПа.

Коэффициент, учитывающий влияние остаточных напряжений $n_\sigma$ определяется следующей формулой

$$n_\sigma = n_{\text{в}} \cdot n'_\sigma \cdot n''_\sigma \cdot n'''_\sigma, \qquad (3.3)$$

где $n_{\text{в}}$-коэффициент, учитывающий ширину полосы;

$n'_\sigma$-коэффициент, учитывающий влияние трения;

$n''_\sigma$-коэффициент, учитывающий влияние внешней зоны;

$n'''_\sigma$- коэффициент, учитывающий влияние натяжения полосы.

Коэффициент, учитывающий ширину полосы $n_{\text{в}}$, рассчитывается по формуле

$$n_{\text{в}} = \frac{1+\frac{2\cdot b_{\text{ср}}-l_{\text{д}}}{6\cdot b_{\text{ср}}}-\mu\frac{l_{\text{д}}}{h_{\text{ср}}}}{1+\mu\frac{l_{\text{д}}}{h_{\text{ср}}}}, \qquad (3.4)$$

где $b_{\text{ср}}$-средняя ширина прокатываемого листа, м;

$l_{\text{д}}$-длина очага деформации, м;

$h_{\text{ср}}$-средняя толщина прокатываемого листа, м;

$\mu$-коэффициент трения.

Коэффициент, учитывающий влияние трения $n'_\sigma$ зависит от соотношения средней ширины прокатываемого листа $b_{\text{ср}}$ к средней длине прокатываемого листа $h_{\text{ср}}$. Если отношение$b_{\text{ср}}/h_{\text{ср}}$ <1,5-2, то $n'_\sigma$ рассчитывается по формуле

$$n'_\sigma = 1 + \frac{1}{6} \cdot \frac{l_{\text{д}}}{h_{\text{ср}}}; \qquad (3.5)$$

В случае если отношение 2≤ $b_{\text{ср}}/h_{\text{ср}}$ ≤4, то $n'_\sigma$ рассчитывается по следующей формуле

$$n'_\sigma = \frac{2h_{\text{ср}}}{\Delta h(\delta-1)}\left[\left(\frac{h_{\text{ср}}}{h_1}\right)^\delta - 1\right], \qquad (3.6)$$

где $\delta$-коэффициент, учитывающий длину деформации, коэффициент трения и обжатие, определяющийся по формуле

$$\delta = \frac{2\mu l_{\text{д}}}{\Delta h}; \qquad (3.7)$$

$h_1$-начальная толщина прокатываемого листа, м.

И наконец, в случае если отношение $b_{\text{ср}}/h_{\text{ср}}$ >4, то $n'_\sigma$ рассчитывается по следующей формуле

$$n'_\sigma = 1 + \frac{1}{4} \cdot \frac{l_{\text{д}}}{h_{\text{ср}}}. \qquad (3.8)$$

Коэффициент, учитывающий влияние внешней зоны $n''_\sigma$, в свою очередь, будет определяться в зависимости от отношения длины очага деформации $l_{\text{д}}$ к величине средней толщины полосы $h_{\text{ср}}$. При отношении 0,05 $\leq l_{\text{д}}/h_{\text{ср}}$ <1, то $n''_\sigma$ рассчитывается по формуле

$$n''_\sigma = \left(\frac{l_{\text{д}}}{h_{\text{ср}}}\right)^{-0,4}; \qquad (3.9)$$

В случае, когда отношение $l_{\text{д}}/h_{\text{ср}}$ ≥1, то $n''_\sigma$ ≈1, влияние внешней зоны отсутствует.

Сопротивление деформации $\sigma_s$ определяется методом термомеханических коэффициентов и рассчитывается по формуле

$$\sigma_s = \sigma_0 \cdot k_t \cdot k_\varepsilon \cdot k_u, \qquad (3.10)$$

$\sigma_0$-базовое сопротивление деформации, МПа;

$k_t$-температурный коэффициент, определяемый как

$$k_t = \frac{\sigma_{t_i}}{\sigma_0}; \qquad (3.11)$$

$k_\varepsilon$-степенной коэффициент, определяемый как

$$k_\varepsilon = \frac{\sigma_{\varepsilon_i}}{\sigma_0}; \qquad (3.12)$$

$k_u$-скоростной коэффициент, определяемый как

$$k_u = \frac{\sigma_{u_i}}{\sigma_0}; \qquad (3.13)$$

Для практических расчётов момента прокатки целесообразно использование формулы

$$M_{\text{п}} = 2P \cdot \psi \cdot l_{\text{д}}, \qquad (3.14)$$

где ψ - коэффициент плеча равнодействующей контактных напряжений в очаге деформации.

$$\psi = \frac{1}{2-\varepsilon}\left(1 - \varepsilon \cdot \frac{1+m}{2+m}\right), \qquad (3.15)$$

где m-коэффициент, учитывающий длину очага деформации и среднюю толщину полосы

$$m = \frac{0.58 \cdot l_д}{h_{ср}}. \qquad (3.16)$$

В зависимости от эпюры распределения контактных напряжений, например, ψ изменяется в пределах от 0,15 до 0,67 [5].

Расход энергии определяют по результатам экспериментальных исследований, которые характеризуют не только общий расход энергии на производство данного изделия, но и изменение расхода энергии по проходам [3].

Данные экспериментальных исследований представляют в виде кривых, выражающих расход энергии на 1 т прокатной продукции в зависимости от суммарной вытяжки или от уменьшения толщины полосы (при прокатке листов и лент).

При наличии измерительного устройства (ваттметра), встроенного в силовую цепь привода, расход энергии (собственно - мощность) определяется

по показаниям прибора как разность величины мощности в ваттах на холостом

ходу и во время прохода при прокатке.

Определение значения момента привода валков производится по следующей формуле

$$М_{дв} = М_{пр} + М_{тр} \pm М_{дин}, \qquad (3.17)$$

где $М_{пр}$-момент прокатки, кН·м;

$М_{тр}$-момент трения, кН·м;

$М_{дин}$-динамический момент, кН·м.

Сумма момента прокатки и момента трения называется статическим моментом

$$М_{ст} = М_{пр} + М_{тр} \qquad (3.18)$$

Момент трения $М_{тр}$ определяется следующим образом

$$М_{тр} = М_{тр1} + М_{тр2}, \qquad (3.19)$$

где $М_{тр1}$-момент трения валков, кН·м;

$М_{тр2}$-момент потерь в передаче, кН·м.

Момент трения валков $М_{тр1}$рассчитывается следующим образом

$$М_{тр1} = P \cdot d_п \cdot \mu_п, \quad (3.20)$$

где $P$-усилие прокатки, Н;

$d_п$-диаметр шейки валка (подшипника), м;

$\mu_п$-коэффициент трения в подшипниках.

Момент потерь в передаче считают следующим образом

$$М_{тр2} = (\frac{1}{\eta} - 1)\frac{M_{пр} + М_{тр1}}{u}, \quad (3.21)$$

где $\eta$-КПД передачи,

u-передаточное отношение.

Момент динамический определяют, как

$$М_{дин} = \frac{a \cdot GD^2 + a \cdot G_{сл} \cdot D_в^2}{375}, \quad (3.22)$$

где $GD^2$-маховый момент, вращающихся частей стана и якоря электродвигателя, приведенные к валу электродвигателя, т· м$^2$;

а-угловое ускорение разгона валков, об/мин/с;

$G_{сл}$-вес слитка, тонн;

Dв-диаметр валка, т.

По полученным значениям определения момента привода валков строится нагрузочнаядиаграмма для прокатного стана работы стана, состоящая из циклограммы двигателя прокатного стана и диаграммы момента.

На рисунке 3.2 представлена диаграмма работы для реверсивного прокатного стана. Точка А соответствует захвату металла в валки, а точка В-выбросу.

Для построения циклограммы необходимо рассчитать время, соответствующее каждому этапу технологической операции двигателя.

Время, соответствующее моменту захвата слитка определяется по формуле

$$t_1 = \frac{n_1}{\varepsilon_р}, \qquad (3.22)$$

где $n_1$ –скорость вращения валков при захвате слитка, об/мин;

$\varepsilon_р$-угловое ускорение валков, об/мин.

Скорость вращения валков при захвате слитка определяется как

$$n_1 = \frac{2}{3} n_в, \qquad (3.23)$$

где $n_в$-частота вращения вала двигателя, об/мин.

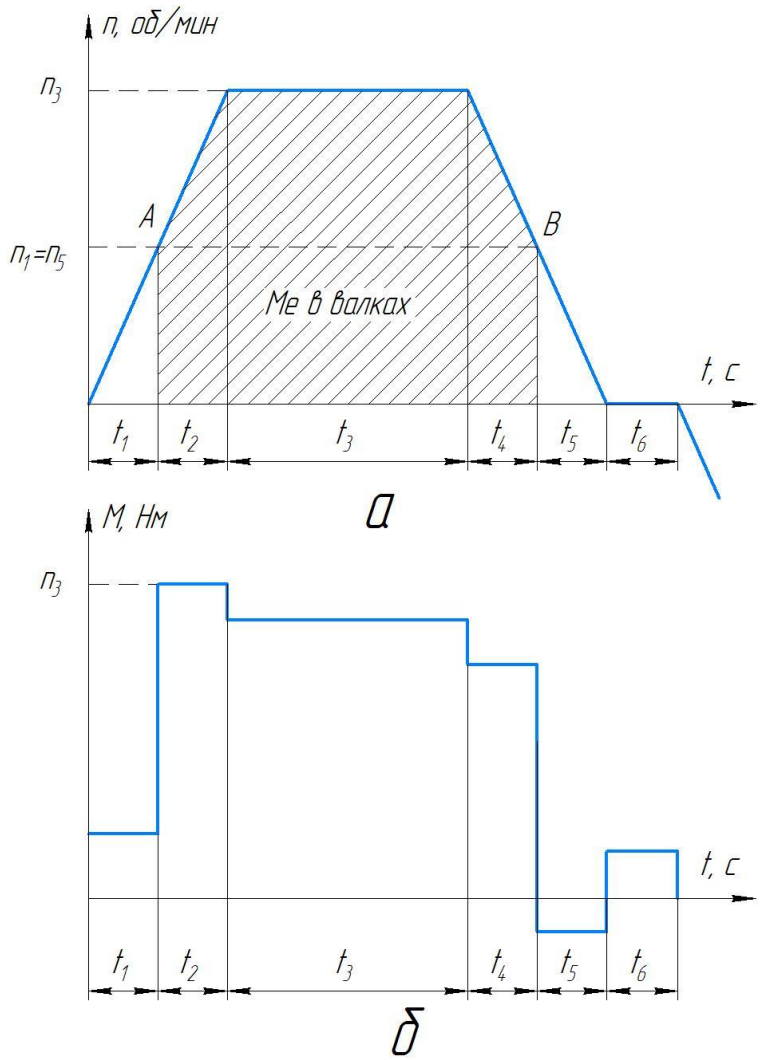



Рисунок 3.2. Нагрузочная диаграмма работы для реверсивного прокатного стана а-циклограмма работы стана, б- диаграмма момента двигателя [3]

Время разгона стана до установившейся скорости металла в валках $t_2$ рассчитывается следующим образом

$$t_2 = \frac{n_в - n_1}{\varepsilon_р}. \qquad (3.24)$$

После разгона вала двигателем до необходимой скорости для совершения пластической деформации металла в валках, наступает режим работы стана, с установившейся скоростью который длиться время t3

$$t_3 = \frac{l_3}{v_{\text{пр}}}, \qquad (3.25)$$

где $l_3$-длина слитка за время $t_3$, м;

$v_{\text{пр}}$-скорость прокати, м/с.

Длина слитка, соответствующего времени установившегося режима можно посчитать по следующему выражению

$$l_3 = l_0 \cdot \lambda - l_4 - l_2, \qquad (3.26)$$

где $l_0$-начальная длина слитка, м;

$l_4$-длина слитка за время торможения стана до выброса слитка, м;

$l_2$-длина слитка за время разгона до установившегося режима, м;

$\lambda$-вытяжка, определяемая отношением начальной площади слитка к конечной.

Для реверсивного двигателя длина слитка за время торможения стана до выброса слитка $l_4$ и длина слитка за время разгона до установившегося режима $l_2$ равны и могут быть рассчитаны как

$$l_2 = l_4 = v_2 \cdot t_2, \qquad (3.27)$$

где $v_2$-скорость прокатки на участке разгона до установившегося движения, м/с.

$$v_2 = \omega \frac{d_{\text{в}}}{2} = \frac{\pi(n_1+n_3)}{60} \cdot \frac{d_{\text{в}}}{2}, \qquad (3.28)$$

где $n_1$-скорость вращения вала на участке соответствующему захвату слитка, об/мин;

$n_3$-скорость вращения вала, соответствующая установившемуся режиму, об/мин;

$d_{\text{в}}$-диаметр вала, м.

После прокатки совершения основной операции, двигатель начинает тормозить. Процесс торможения начинается заранее, до выброса слитка. И соответственно этот процесс занимает время $t_4$ и оно числено равно времени разгона стана до установившегося режима:

$$t_4 = t_2. \qquad (3.29)$$

И наконец, после выброса металла из валков происходит торможение валков без металла за время $t_5$. Необходимо отметить, что время торможения валков без металла $t_5$ соответствует времени, когда происходит захват слитка $t_1$.

$$t_5 = t_1. \qquad (3.30)$$

Далее наступает пауза в режиме работы стана, длящаяся время t6 или время работы нажимного устройства. Расчет величины времени t6 зависит от соотношения справочных величин квадрата скорости и ускорения нажимного устройства $v_{\text{ну}}^2/a_{\text{ну}}$ в сравнении с величиной обжатия Δh. Если $\Delta h < \frac{v_{\text{ну}}^2}{a_{\text{ну}}}$, то время $t_6$ равно

$$t_6 = \sqrt{\frac{2\Delta h}{a_{\text{ну}}}}; \qquad (3.31)$$

Если $\Delta h > \frac{v_{\text{ну}}^2}{a_{\text{ну}}}$, то время $t_6$ равно

$$t_6 = \frac{\Delta h}{v_{\text{ну}}} + \frac{v_{\text{ну}}}{a_{\text{ну}}}. \qquad (3.32)$$

Теперь, зная значения времени на каждом этапе технологической операции можно по полученным данным строить циклограмму работы двигателя. Пример циклограммы работы двигателя реверсивного стана представлен на рисунке 3.2 под литерой а.

Обозначим z как суммарное время работы цикла:

$$z = \sum_{i=1}^{6} t_i. \qquad (3.33)$$

Зная время работы на каждом этапе технологической операции можно рассчитать момент двигателя на каждом участке, и затем построить диаграмму работы двигателя.

Момент двигателя на участке времени соответствующему захвату слитка М1 будем равен

$$M_1 = M_{\text{хх}} + \text{М}_{\text{дин}}, \qquad (3.34)$$

где $M_{\text{хх}}$-момент холостого хода двигателя, кН·м.

$$M_{\text{хх}} \approx 2\% M_{\text{н}}, \qquad (3.35)$$

где $M_{\text{н}}$-номинальный момент двигателя, кН·м.

Момент двигателя на участке разгона да установившегося движения $M_2$:

$$M_2 = M_{\text{ст}} + \text{М}_{\text{дин}}. \qquad (3.36)$$

Момент двигателя соответствующий времени работы в установившемся режиме $M_3$:

$$M_3 = M_{\text{ст}}. \qquad (3.37)$$

Момент двигателя,соответствующий времени торможения стана до выброса слитка

$$M_4 = M_{\text{ст}} - \text{М}_{\text{дин}}. \qquad (3.38)$$

Момент двигателя, соответствующий времени торможения валков без металла М5

$$M_5 = M_{\text{хх}} - \text{М}_{\text{дин}}. \qquad (3.39)$$

И наконец, момент двигателя во время паузы М6 равен моменту холостого хода

$$M_6 = M_{\text{хх}}\,. \qquad (3.40)$$

Просчитав моменты двигателя на каждом этапе технологической операции строиться диаграмма момента двигателя, пример которой приведен на рисунке 3.2 под литерой б. А также проведя данные расчеты при каждом проходе, в заключении необходимо провести проверку двигателя по нагреву:

$$M_{\text{экв}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{6} M_i^2 \cdot t_i}{\sum_{i=}^{6} t_i}} < 2 \cdot M_{\text{н}}, \% \qquad (3.41)$$

2. Цель работы

Экспериментально-теоретическое определение усилия и мощности прокатки из математической модели процесса, исследование влияния геометрических, технологических факторов и условий деформации на энергосиловые параметры. Изучение построения циклограммы работы двигателя и диаграммы моментов, а также осуществления проверки двигателя по нагреву.

3. Используемое оборудование

При проведении лабораторной работы применяется следующее оборудование и инструмент: образцы, не подверженные деформации (заготовка) размерами H x B x L заданного материала, образцы после первого

прохода H1 x B1 x L1 со степенью деформации $\varepsilon_1$, образцы после второго обжатия H2 x B2 x L2 со степенью деформации $\varepsilon_2$,…, образцы после i-го прохода со степенью деформации $\varepsilon$i, линейка металлическая, штангенциркуль электронный, калькулятор. Справочные данные с основными характеристиками необходимыми для построения циклограммы двигателя и его характеристик.

4. Варианты заданий для выполнения работы

На основе расчетов параметров очага деформации на каждом проходе при горячей прокатки полосы, приведенной в лабораторной работе №2, рассчитать момент и усилие прокатки, произвести расчеты моментов двигателей при разных режимах работы, и на основе проведённых расчётов нарисовать нагрузочную диаграмму работы прокатного стана, включающая в себя циклограмму и диаграмму моментов двигателей. Варианты заданий представлены в калибровочных таблица (смотри таблица 3.1), номер каждого варианта соответствует одному проходу.

Таблица 3.1. Варианты заданий для выполнения лабораторной работы

| № | $h_0$,мм | $h_1$,мм | b,мм | $\varepsilon$,% | $\mu$ | R, мм |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Калибровочная таблица №1 | | | | | | |
| 1 | 2,3 | 1,715 | 1050 | 25,4 | 0,03 | 240 |
| 2 | 1,715 | 1,26 | 1050 | 26,5 | 0,03 | 240 |
| 3 | 1,26 | 0,87 | 1050 | 31 | 0,03 | 240 |
| 4 | 0,87 | 0,535 | 1050 | 38,5 | 0,03 | 240 |
| 5 | 0,535 | 0,35 | 1050 | 34,6 | 0,03 | 240 |
| Калибровочная таблица №2 | | | | | | |
| 1 | 2,3 | 1,510 | 960 | 34,35 | 0,035 | 200 |
| 2 | 1510 | 0,950 | 960 | 37,09 | 0,035 | 200 |
| 3 | 0,950 | 0,605 | 960 | 36,32 | 0,035 | 200 |
| 4 | 0,605 | 0,390 | 960 | 35,54 | 0,035 | 200 |
| 5 | 0,390 | 0,265 | 960 | 32,00 | 0,035 | 200 |

| Калибровочная таблица №3 | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 240 | 228 | 1560 | 5 | 0,7 | 900 |
| 2 | 228 | 212 | 1560 | 15 | 0,7 | 900 |
| 3 | 213 | 190 | 1548 | 23 | 0,7 | 900 |
| 4 | 196 | 165 | 1550 | 25 | 0,7 | 900 |
| 5 | 165 | 140 | 1536 | 25 | 0,7 | 900 |
| 6 | 140 | 120 | 1540 | 20 | 0,7 | 900 |
| 7 | 120 | 100 | 1524 | 20 | 0,7 | 900 |

Скорость вращения валков n=50 об/мин. Температура при проходе 420°С. Диаметр шейки валка равен 2/3 диаметра валка.

Принять материалом прокатываемого образца алюминиевый сплав Д16, для которого $\sigma_0$ =9,05кг/мм2=88,69МПа, ku=0,925, kt=0.87, $k_e$=0.925.

Передаточное отношение передачи u=1, КПД $\eta$=0,99.

Маховый момент, вращающихся частей стана и якоря электродвигателя, приведенные к валу электродвигателя, $GD^2$=0,016т· м$^2$.

Вес слитка равен 2,1 т.

Номинальный момент на валу электродвигателя $M_н$ равен 1000кНм.

## 5. Порядок выполнения работы

1. В рамках разработки математической модели процесса прокатки, рассчитываются теоретические размеры образцов (H×B×L) заданного материала после каждого обжатия с заданной степенью деформации $\varepsilon$i и сравниваются с натурными.

2. Рассчитываются основные параметры геометрии очага деформации для каждого прохода ($B_{ср}$, $l_g$, $\Delta b/B$, ,$l_g/B_{ср}$).

3. Полученные данные сводятся в таблицу результатов. Пример сводной таблицы для обработки результатов исследования приведен на рисунке 2.3.

4.После расчета основных параметров очага деформации для своего варианта, соответствующее одному проходу калибровочной таблицы, необходимо переходить к расчетам усилия и момента прокатки.

5. На основе расчетов усилия и момента прокатки выполняется расчет моментов двигателя, соответствующих каждому этапу его работы.

6. Имея все данные о математической модели геометрического очага деформации, моменте и усилии прокатки, данных момента двигателя на разных режимах работы технологической операции необходимо построить нагрузочную диаграмму работы двигателя, включающую в себя, циклограмму работы двигателя и диаграмму моментов двигателя. Пример нагрузочной диаграммы работы двигателя приведен на рисунке 3.2.

7. Заключительным этапом является проверка двигателя по нагреву.

## 6. Содержание отчета

В отчете приводится цель работы, результаты лабораторных исследований в виде таблиц, графиков и анализа результатов по проделанному исследованию.

## 7. Контрольные вопросы

1. Какие параметры влияют на усилие прокатки, момент прокатки?

2. Как влияет на среднее давление сопротивление деформации, какова физическая природа этого явления?

3. Как влияет на среднее давление степень деформации, какова физическая природа этого явления?

4. С чем связано изменение усилия и мощности при прокатке со смазкой?

5. От каких факторов зависит предел текучести материала?

6. Чем определяется напряжённое состояние в очаге деформации?

## 8. Критерии оценивания

Оценка «5» - студент показывает верное понимание сущности рассматриваемых явлений и закономерностей, дает точное определение и истолкование основных понятий. Работа выполнена в полном объеме, в

представленном отчете сделаны необходимые выводы, записи выполнены аккуратно. Студент может установить связь между изучаемым и ранее изученным материалом.

Оценка «4»- ответ студента удовлетворяет основным требованиям к ответу на оценку «5», но дан без использования связей с ранее изученным материалом и материалом, усвоенным при изучении других предметов.

Оценка «3» - работа выполнена не полностью, но объем выполненной части таков, что позволяет получить правильные результаты и выводы. Студент применяет полученные знания при решении простых задач с использованием готовых формул, но затрудняется при решении задач, требующих преобразования некоторых формул.

Оценка «2»- работа выполнена не полностью, и объем выполненной части работы не позволяет сделать правильных выводов.

## РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

### 3.1.Основная литература

1Рабочая программа дисциплины «Металлургические машины и оборудование» / В.С. Паршин, Е.Ю. Раскатов. Екатеринбург : УрФУ, 2017. – 25с.

2. Расчеты рабочих клетей прокатных станов (методика и примеры):Методическое пособие по курсу «Оборудование цехов ОМД» для студентов всех форм обучения специальности 110600 - Обработка металлов давлением / В.А. Шилов, Ю.В. Инатович. Екатеринбург : УГТУ, 2000. – 69 с.

3. Машины и агрегаты металлургических заводов.В 3 т.Т.1.Машины и агрегаты доменных цехов:Учебник для вузов/А.И.Целиков, П.И. Полухин, В.М. Гребеник и др. - М.: Металлургия, 1987. – 440с.

4. Машины и агрегаты металлургических заводов :Учеб. для вузов. Т. 2. Машины и агрегаты сталеплавильных цехов / А.И. Целиков, П.И. Полухин, В.М. Гребеник и др. — 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Металлургия, 1988. – 426 с.

5. Машины и агрегаты металлургических заводов.В 3 т.Т.3.Машины и агрегаты для производства и отделки проката:Учебник для вузов/ А.И. Целиков,П.И.Полухин,В.М.Гребеник и др. – М.: Металлургия, 1988. – 680с.

6. Металлургические технологии и комплексы: учеб. пособие /А.П. Жильцов, А.Л. Челядина. – Липецк: ЛГТУ, 2013. – 132 с.

### 3.2.Дополнительная литература

7. Станы для редуцирования труб : учеб. пособие / В.С. Паршин,Л.А.Чумакова. – Екатеринбург : УрФУ, 2013. – 46с.

8. Королев, А.А. Механическое оборудование прокатных и трубных цехов : Учебник для вузов. –М. : Металлургия, 1987. –480с.

9. Машины и агрегаты для обработки цветных металлов и сплавов/В.С.Паршин, В.П.Костров, Б.С. Сомов. и др. –М. : Металлургия, 1988. –397с.

Электронный текстовый ресурс

Раскатов Евгений Юрьевич

Паршина Анастасия Анатольевна

**РАСЧЕТ ЭЛЕМЕНТОВПРОКАТНОГО ОБОРУДОВАНИЯ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ПРЕДПРИЯТИЙ**

Методические указания по выполнению практических работ

Подготовка к публикации *Е.Ю. Раскатов*

Компьютерный набор *А.А. Паршина*

Рекомендовано Методическим советом УрФУ

Разрешено к публикации ___2020

Электронный формат – pdf

Объем 2,59 уч.-изд. л.

620002, Екатеринбург, ул. Мира, 19

Информационный портал УрФУ

www.study.urfu.ru