

Міністерство освіти і науки України

Запорізький національний університет

(повне найменування вищого навчального закладу)

Інженерний навчально-науковий інститут ім Ю.М. Потебні

(назва факультету)

Кафедра обробки металів тиском

(повна назва кафедри)

## Пояснювальна записка

до магістерської роботи

рівень вищої освіти \_\_\_\_\_

(другий (магістерський) рівень)

на тему Дослідження коефіцієнта положення рівнодіючої сили при прокатуванні штаб з метою зменшення використання електроенергії

Виконав: студент 2 курсу, групи 8.1360-омт-  
Д

Шутенко Артем Сергійович

(ПІБ)

(підпис)

спеціальності

136 Металургія

(шифр і назва)

спеціалізація

(шифр і назва)

освітньо-професійна програма

обробка металів тиском

(шифр і назва)

Керівник Бондаренко Ю.В.

(прізвище та ініціали)

(підпис)

Запоріжжя - 2021 року

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
ІНЖЕНЕРНИЙ НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ  
ім Ю.М. ПОТЕБНІ**

Кафедра Обробки металів тиском  
Рівень вищої освіти другий магістерський рівень  
(перший (бакалаврський) рівень, другий (магістерський) рівень)  
Спеціальність 136Металургія  
(шифр і назва)  
Спеціалізація \_\_\_\_\_  
(шифр і назва)  
Освітньо професійна програма обробка металів тиском

**ЗАТВЕРДЖУЮ**  
Завідувач кафедри ОМТ  
Ю.О. Бєлоконь

“ 01 ” \_\_\_\_\_ 07 \_\_\_\_\_ 2021 року

## З А В Д А Н Н Я

НА ДИПЛОМНИЙ ПРОЕКТ (РОБОТУ) СТУДЕНТУ

Шутенко Артем Сергійович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема проекту (роботи) Дослідження коефіцієнта рівнодіючої сили при прокатуванні штаб з метою зменшення використання електроенергії  
керівник проекту (роботи) Бондаренко Ю.В. к.т.н.,  
доцент

( прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом вищого навчального закладу від “30” 06 2020 року № 385-с

2. Строк подання студентом проекту (роботи) 24.11.2021

3. Вихідні дані до проекту (роботи) Визначення коефіцієнта положення рівнодіючої сили при прокатуванні на неперервному стані холодної прокатки 1680

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) Реферат. Вступ. Загальна частина. Технологічна частина, Механічна частина, Охорона праці та техногенна безпека, Висновки. Перелік посилань.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)  
**Креслення, презентаційний матеріал 10 слайдах (10 сторінках)**

### 6. Консультанти розділів проекту (роботи)

| Розділ                                     | Прізвище, ініціали та посада консультанта | Підпис, дата     |
|--|---|------------------|
|  |   | завдання прийняв |
| <i>Теоретична частина</i>                  | <i>Бондаренко Ю.В., доцент</i>            |                  |
| <i>Спеціальна частина</i>                  | <i>Бондаренко Ю.В., доцент</i>            |                  |
| <i>Охорона праці та техногенна безпека</i> | <i>Бондаренко Ю.В., доцент</i>            |                  |
|  |   |                  |
|  |   |                  |

7. Дата видачі завдання 01.07.2021

### КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

| № з/п | Назва етапів дипломного проекту (роботи)   | Строк виконання етапів проекту (роботи) | Примітка |
|-------|--|---|----------|
| 1     | <i>Вступ</i>                               | <i>29.09.-<br/>12.10.2021</i>           |          |
| 2     | <i>Реферат</i>                             | <i>12.10.21-<br/>16.10.2021</i>         |          |
| 3     | <i>Теоретична частина</i>                  | <i>17.10-<br/>20.10.2021</i>            |          |
| 4     | <i>Спеціальна частина</i>                  | <i>30.10-<br/>12.11.2021</i>            |          |
| 5     | <i>Охорона праці та техногенна безпека</i> | <i>12.11.2021-<br/>15.11.2021</i>       |          |
| 6     | <i>Висновки</i>                            | <i>15.11.2021-<br/>17.11.2021</i>       |          |

Студент \_\_\_\_\_ Шутенко А.С.  
 ( підпис ) ( прізвище та ініціали )

Керівник проекту (роботи) \_\_\_\_\_ Бондаренко Ю. В.  
 ( підпис ) ( прізвище та ініціали )

## РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до випускної роботи: \_\_\_\_с., \_\_\_\_ частин  
\_\_\_\_ таблиць, \_\_\_\_ джерел.

Метою цієї роботи є дослідження коефіцієнта положення рівнодіючої сили при прокатуванні штаб.

Метод дослідження - аналітичний розрахунок

У роботі запропоновано виявити вплив положення рівнодіючої сили

**ШТАБА, КРУТНИЙ МОМЕНТ, КЛІТЬ, ДЕФОРМАЦІЯ, МЕТАЛ**

## THE ABSTRACT

Explanatory note to final work: \_\_\_c., \_\_\_ parts \_\_\_ tables, \_\_\_ sources.

The purpose of this work is to study the coefficient of position of the equivalent force when rolling the headquarters.

Research method - analytical calculation

The paper proposes to identify the influence of the position of the equivalent force

HEADQUARTERS, TORQUE, CAGE, DEFORMATION, METAL

## ЗМІСТ

|  |    |
|--|----|
| ВСТУП.....   | 7  |
| 1 АНАЛІЗ НАУКОВОЇ ІНФОРМАЦІЇ ТА СТАН ПРОБЛЕМИ.....     | 9  |
| 1.1 Аналіз технології прокатування штаб.....           | 9  |
| 1.2 Сталі і сплави холодної прокатки штаб.....         | 13 |
| 1.3 Технічні вимоги до штаб та листів.....             | 15 |
| 1.4 Якість поверхні плоского прокату.....              | 20 |
| 1.5 Крутні моменти, робота та потужність прокатки..... | 21 |
| 1.6 Метод розрахунку потужності двигуна.....           | 27 |
| 2 ДОСЛІДНИЦЬКО-РОЗРАХУНКОВА ЧАСТИНА.....               | 31 |
| 3 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ТЕХНОГЕННА БЕЗПЕКА .....            | 76 |
| ВИСНОВКИ.....  | 85 |
| СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ.....                                 | 86 |

## ВСТУП

Цехи прокатного комплексу утворюють блок прокатних цехів. Як правило, ці блоки призначені для спеціалізованого виробництва прокату. Якщо за обтисково-заготівельними станами розташовані тільки сортопрокатні та дотові стани – блок називається сортовим.

Якщо за обтискним станом слябінгом послідовно розташовано цех гарячої прокатки штабової сталі, блок називають листовим.

Більш сучасні блоки прокатних цехів замість обтисково-заготівельних станів мають в своєму складі машини неперервного лиття (МНЛЗ), завдяки цьому із технологічного циклу вилучається поштучне розливання сталі на зливки, нагрів та прокатки останніх.

Це дає можливість зменшити матеріало – та енергоємність виробництва плоского прокату. Останнім часом з'явилися комплексні технологічні лінії для отримання штаб із рідкого розплаву сталі з поточно-послідовною компоновкою МНЛЗ + прокатний стан, де виконується технологія НР+ПП (неперервна розливка + пряма прокатка).

Не тільки металургійні підприємства і прокатні комплекси спеціалізовані для виробництва сортових профілів, листів і штаб або труб, але і самі комплекси поділяються на цехи з вузькоспеціалізованими прокатними станами. Листи, штаби і стрічки прокатують на листо- та штабо прокатних станах різних типів: одно-, дво- і багатоклітьових, реверсивних, напівбезперервних, безперервних і повністю безперервних.

Умовно листи та штаби поділяють за їх товщиною «h» на сім груп:

- 1) Плити,  $h = 50 - 200$  мм;
- 2) Товсті листи,  $h = 5 - 50$  мм;
- 3) Тонколистову гарячекатану сталь,  $h = 0,8 - 3,9$  мм;
- 4) Тонколистову холоднокатану сталь,  $h = 0,5 - 2,0$  мм;
- 5) Сталеву стрічку,  $h = 0,1 - 0,45$  мм;
- 6) Жерсть,  $h = 0,08 - 0,36$  мм;

7) Фольгу із кольорових металів та їх сплавів,  $h = 0,001 - 0,07$  мм.

Штаби – це плоский прокат змотаний моталками в потоці стана в рулони масою в основному в межах 5 - 50 т. Ширина плоского прокату визначається його товщиною, призначенням і довжиною бочок валків робочих клітей прокатного стана. Так довжина бочок валків сучасних станів знаходиться в межах:

- товстолистових 3000 - 5500 мм;
- широкоштабових безперервних 1700 - 2300 мм;
- для прокатки жерсті 1200 - 1400;
- для прокатки стрічок і фольги 400 - 1200 мм.

Плоский прокат груп 1,2 і 3 отримують, деформуючи заготовлю в гарячому стані за температури в межах 850 - 1250,0 С, а групи 4 - 7 - холодною прокаткою.

Холоднокатані штаби прокатують із гарячекатаних, попередньо очищуючи поверхню останніх від окалини. Стрічки, жерсть і фольгу в основному прокатують із холоднокатаних штаб після знеміцнення останніх рекристалізаційним відпалом.



# 1 АНАЛІЗ НАУКОВОЇ ІНФОРМАЦІЇ ТА СТАН ПРОБЛЕМИ

## 1.1. Аналіз технологій прокатування штаб

Ще 25-30 років тому ніші виробництва тонкого гарячекатаного і холоднокатаного прокату були жорстко визначені і в сортамент станів холодної прокатки входили штаби товщиною 2,0-2,5 мм і менше. Однак, після освоєння випуску тонкого гарячекатаного сталевих прокату на ЛПА в структурі споживання плоского сталевих холоднокатаного прокату відбулися істотні зміни, що призвело до змін сортаменту штабових станів холодної прокатки в сторону менших товщин, і до зменшення випуску окремих розмірів профілів холоднокатаного прокату.

Гарячекатані штаби прокатують із низьколегованих сталей, які, як правило, мають відносно невеликий вміст вуглецю (до 0,25%) і легуючі елементи з вмістом кожного до 1%, а в сумі не більше 5%. Прикладом є сталі марки 25ХСА, 30ХГСА, 30ХГС, причому хімічний склад сталей 30ХГСА і 17 18 30ХГС майже не відрізняється (0,25 - 0,35 %С, в середньому по 0,90 % Cr, Mn і Si), а буквою «А» в кінці запису сталі позначають високоякісну сталь, яка має обмеження по вмісту шкідливих домішок сірки і фосфору, а саме не більше 0,03%.

Високоякісні низько вуглецеві сталі в основному виплавляються в електропечах. Додатки легуючих компонентів дають можливість підвищити міцність виробів із таких сталей, які в основному використовуються у будівництві мостів, судів, вагонів, трубопроводів, котлів, платформ морського буріння. Підвищена міцність низьколегованих сталей призводить до зменшення маси конструкцій та економії металу. Тонколистову гарячекатану продукцію виготовляють також із легуваних конструкційних сталей, таких як:

- хромистих (15Х, 20Х, 30Х, 35Х, 40Х та ін.);

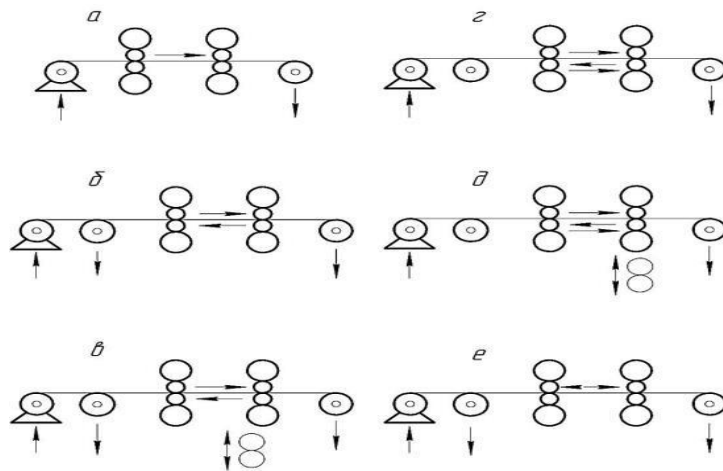
- хромомарганєвих (18ХГ, 40ХГ та ін.);
- хромокремнієвих (35ХС, 40 ХС);
- хромованадієвих (15ХФ, 20ХФ, 40ХФА);
- хромомолібденових (15ХМ, 30 ХМ, 35ХМ);
- хромонікелевих (20ХН, 40ХН, 45ХН, 50ХН, 12Н3А, 20ХН3А та ін.);
- хромокремніємарганцевих (20ХГСА, 25ХГСА, 30ХГСА, 35ХГСА).

Хімічний склад цих сталей регламентується стандартом 454. Тонколистову гарячекатану сталь із високолегованих, наприклад, нержавіючих, прокатують як товарну продукцію (гарячекатані листи), так і в рулонах в якості підкату для цехів холодної прокатки. Розрізняють за призначенням два типи нержавіючих сталей: 1 - корозійностійкі нержавіючі сталі, які працюють в умовах дії на них агресивних середовищ; 2 – жаростійкі нержавіючі сталі, що мають достатню міцність, не руйнуються і не піддаються корозії в агресивних газових середовищах при температурах вищих за 550 0 С.

В гарячому стані прокатують також штаби із нержавіючих сталей проміжних класів аустенітно-мартенситних (09Х15Н8Ю, 09Х17Н7Ю та ін.) та аустенітно-феритних (12Х21Н5Т, 08Х18Т1 та ін.). Хімічний склад нержавіючих сталей наведено в стандарті 5632. В цехах гарячої прокатки виготовляють також штаби в рулонах електротехнічної сталі, які є підкатом для послідууючої холодної прокатки.

Пластична деформація металу при холодній штабовій прокатці здійснюється в безперервному або реверсивному режимах роботи стану. У зв'язку з цим розрізняють технології безперервної і реверсивної прокатки. При безперервній прокатці, кількість клітей безперервного стану дорівнює числу частинних обтиснень штаби, тому напрямок руху останньої в процесі прокатки залишається незмінним і вона обтискається тільки один раз в кожній кліті. Технологія безперервної прокатки забезпечує максимальну продуктивність стану і високу якість продукції, що робить її застосування кращим, перш за все при великих обсягах і вузькому сортаменті продукції,

що випускається. Технологія реверсивної холодної прокатки призначена для випуску різноманітної продукції в невеликих обсягах, тобто коли необхідна велика гнучкість виробництва. Ще двадцять років тому для реалізації даної технології використовували тільки одноклітьові реверсивні стани. При прокатці на одноклітьових реверсивних станах пластична деформація (обтиск) штаби здійснюється багаторазово в одній кліті з обов'язковою зміною напрямку руху останньої і початкової настройки робочої кліті після кожного пропуску, що збільшує втрати робочого часу і обмежує можливості ведення процесу на великій швидкості. З цієї причини реверсивна прокатка на одноклітьових станах відрізняється низькою продуктивністю і значними технологічними відходами металу у вигляді некондиційних решт штаби кожного рулону, що видаляються. Реалізація технології реверсивної прокатки на двохклітьових станах (рис. 1) дозволяє мінімізувати істотно зазначені недоліки.



*Рисунок 1 – Схеми прокатки на двохклітьовому реверсивному стані*

Двохклітьові реверсивні стани - це новий тип станів холодної прокатки, які були створені приблизно двадцять років тому.

Технологія прокатки на двохклітьових реверсивних станах забезпечує ведення процесу за кількома схемами (рис. 3): за один (рис. 3, а), два (рис. 3, б, в), три (рис. 3, г, д) або більше пропусків (рис. 3, е). При цьому в останній кліті останнього пропуску можуть бути використані робочі валки іншого

діаметра або з іншою шорсткістю (рис. 3, в, д). У першому випадку (рис. 3, а) прокатка здійснюється як на звичайному двохкільтовому безперервному стані. У всіх інших випадках (рис. 3, б-е) прокатка реалізується в реверсивних режимах. Для забезпечення стійкості процесу прокатки і формування необхідної шорсткості поверхні готової продукції в кожній кліті двохкільтових реверсивних станів застосовують, як правило, робочі валки з різною шорсткістю. Технологія реверсивної прокатки на двохкільтових станах реалізується на швидкості до 22,5 м/с і в порівнянні з технологією прокатки на однокільтових станах дозволяє скоротити кількість пропусків і отже пауз в два рази. У цьому сенсі вона може розглядатися як якийсь розумний компроміс між безперервною і однокільтовою реверсивною прокаткою.

З викладеного випливає, що основними і найбільш перспективними технологіями для масового виробництва тонкого сталевих холоднокатаного прокату є технології безперервної і реверсивної прокатки, що реалізуються на багатокільтових безперервних і на двохкільтових реверсивних станах.

Статистика свідчить, що протягом останніх 70 років в різних країнах будували і експлуатували безперервні стани для виробництва сталевих холоднокатаного прокату з кількістю робочих клітей від 3 до 6.

В даний час трьох-кільтові БСХП не будуються і вже не експлуатуються. Практично припинено також будівництво нових чотирьохкільтових станів, оскільки холодна прокатка штаб товщиною менше 0,5 мм, тобто штаб малої товщини не тільки з високоміцних, але і з рядових сталей на цих станах неможлива або неефективна.

Двохкільтові реверсивні стани зайняли міцно нішу агрегатів для виробництва жерсті і тонких штаб високої якості, а також холоднокатаних штаб широкого сортаменту в обсягах, отримання яких на однокільтових реверсивних станах неможливо, а на безперервних станах не завжди доцільно. Цим пояснюється той факт, що за двадцять років таких станів в світі було побудовано близько двадцяти. Діючі двохкільтові реверсивні стани

оснащені чотирьох або шестивалковими клітями системи CVC-4 або CVC-6 з діаметром робочих валків від 200- 300 до 420-450 мм і довжиною бочки валків 1200- 1750 мм. Вони розраховані на максимальну швидкість прокатки 22,5 м/с і призначені для виробництва тонкої жерсті і тонких штаб високої якості товщиною від 0,09-0,15 до 0,35-0,50 мм, а також для випуску більш товстих (2, 0-3,5 мм) штаб широкого сортаменту. Річна продуктивність цих станів в залежності від сортаменту продукції, що випускається, знаходиться в межах від 0,2-0,4 до 0,5-1,0 млн. т.

Зазначенні можливості та переваги двохклітьових реверсивних станів холодної прокатки в поєднанні з великою гнучкістю в роботі робить доцільним їх спорудження, як на підприємствах середньої потужності, так і на великих металургійних комбінатах.

Параметри сучасних одноклітьових реверсивних станів холодної прокатки, за винятком швидкості, яка завжди значно менше, практично не відрізняються від параметрів двохклітьових реверсивних станів холодної прокатки. Однак продуктивність цих станів при однаковому сортаменті в 2,5-3,5 рази нижче продуктивності аналогічних по довжині бочки валків двохклітьових реверсивних станів, що і визначає доцільність і області їх застосування.

## **1.2. Сталі і сплави холодної прокатки штаб**

Головною особливістю розвитку металопрокатного виробництва є безперервно-послідовне зростання частки холоднокатаних листів в загальному об'ємі тонколистової металопродукції. При цьому постійно покращується якість листів, включаючи і розробки по оптимізації хімічного складу сталей.

На сучасних листових станах порулонної і нескінченної холодної прокатки виробляють штаби в основному товщинами 0,40 - 2,00 мм і ширинами 1000 - 2350 мм. Причому для штаб меншої товщини зменшують і

їх ширину. Наприклад, штаби товщинами 0,40 - 0,70 мм прокатують з шириною 1000 - 1300 мм.

Особливу групу складають холоднокатані штаби і листи із електротехнічних сталей, які призначені для виготовлення електричних машин, трансформаторів, електротехнічних приладів. Ці сталі повинні мати мінімально низькі втрати (втрати на гістерезис) і високу магнітну індукцію.

На реверсивних станах прокатають холоднокатану текстуровану трансформаторну сталь марок E310, E320, E330, E330A, E330AA, E340, E370 і E380 для поставок її в листах і в рулонах товщинами 0,5; 0,35 і 0,20 мм при ширині  $\leq 1000$  мм. В рулонах поставляються штаби марок E340, E350, E360 і E360A товщиною 0,2 - 0,05 мм різної ширини. Як видно, марки холоднокатаної текстурованої трансформаторної сталі позначаються буквами і цифрами. Перша буква E значить, що сталь є електротехнічною, перша цифра відповідає вмісту в сталі кремнію у дів сотках, друга цифра – гарантовані магнітні властивості, третя цифра, а саме нуль означає що сталь є холоднокатаною і текстурованою. Букви A після цифр зазначають особливо низькі питомі втрати на гістерезис.

На електромагнітні властивості трансформаторної сталі суттєво впливають вміст вуглецю, сірки, кисню, водню та азоту. Ці домішки, особливо вуглець зменшують магнітну індукцію та збільшують втрати. Зменшення сірки досягають десульфатцією сталі під час її виплавки. Зменшення кількості газів, а саме O<sub>2</sub>, H<sub>2</sub> і N<sub>2</sub>, досягають вакуумною обробкою розплаву сталі в ковшах та під час розплавки. Вміст вуглецю нижче 0,001% досягають обезвуглецюванням штаб в процесі їх термообробки в безперервних вакуумних печах.

Окрему групу холоднокатаної продукції складають стрічки і штаби сталеві основи під покриття оловом, цинком, алюмінієм, свинцем, хромом і полімерними матеріалами. Стрічки із маловуглецевих сталей 08кп або 08нс, яка покрита оловом називається жерстю, яка призначена для виготовлення

пакувальної тари для довготермінованого зберігання харчових продуктів, наприклад консервних банок. Стальна основа покрита цинком (оцинковка) є покрівельним матеріалом. Стальна основа оцинковки також прокатується із маловуглецевих сталей 08кп, 08нс, 10кп, 1кп, 1нс.

Розширюється виробництво тонколистової сталі з неметалевими покриттями. Якщо сталева основа покрита пластиковими матеріалами, наприклад клеєм і плівкою ПВХ30 або рідкими затвердіваючими гідропастизолями, матеріалах називають металопластом. Для декоративного покриття використовують фарби і лаки. Останнім часом виробляються штаби з подвійним покриттям: металевим і полімерним.

Холодною прокаткою виготовляють також листи, штаби і фольгу із кольорових металів та їх сплавів. Найбільшу частку складають листи і штаби із алюмінію марок А00, А0, А1, А2, АД, АД1, та його сплавів із марганцем АМц, марганцем і магнієм АМг та із марганцем, магнієм і міддю Д1, Д16. Останні дві марки називають дюралюмінієм. Особливим видом холоднокатаної продукції є фольга, яку виготовляють із алюмінію марок А00, А0, А1, А2, АД1, АД, де буква Д позначає присутність в алюмінії домішок міді відповідно до 0,1 і до 0,05%. Товщина фольги із алюмінію 0,015 - 0,20 мм. На заводах кольорової металургії прокатуються також листи, штаби та стрічки із міді марок М1, М2 і М9 та її сплавів із цинком (латуні марок Л0 631, Л69, Л68, Л80, Л90), та сплавів із цинком і оловом (бронза марки БрОЦ 4-3) або алюмінієм (бронза марки Бр А5). В невеликих кількостях прокатують також листову продукцію із титана і нікелю та їх сплавів.

### **1.3. Технічні вимоги до штаб та листів**

Технічні вимоги щодо якості кожного конкретного виду листової продукції приводяться у відповідних стандартах або технічних умовах. Національні стандарти розробляються на базі міжнародних стандартів ISO,

що дає можливість вільного доступу для вітчизняного прокату на міжнародні ринки металопродукції. Технічні умови розробляються на дослідно-промислові партії металу і носять двосторонній характер між виробником і споживачем прокату. В технічних умовах (ТУ) обумовлюються тільки спеціальні, специфічні або конкретизовані обмеження і нормативи. По узагальненим нормам в ТУ, як правило, посилаються на відповідні стандарти. Стандарти щодо геометричних параметрів, точності по геометрії відносяться до сортаментних. Основними геометричними параметрами листів і штаб є їх товщина, ширина і довжина, причому довжина при поставці штаб в рулонах, як правило не нормується. Крім розмірів, в сортаментних параметрах наводяться категорії точності та допустимі відхилення розмірів (допуски) відповідно того чи іншого класу точності та розмірному ряду по товщині, ширині і довжині листів. Основними вітчизняними розмірними стандартами для гарячекатаних листів є стандарт 19903, для холоднокатаних - 19904. В якості прикладу в таблиці 1.1 наведено витяг зі стандарту 19903, де наведені допуски по товщині гарячекатаних штаб і листів до товщини 82,0 мм включно. Із таблиці 1.1 видно, що для гарячекатаних листів із сталі передбачені дві категорії точності: підвищена і нормальна. Зі збільшенням ширини і товщини листів поле допусків розширюється, тобто допускаємі відхилення за товщиною збільшуються. Для тонколистової сталі товщиною менше 3,9 мм допуски на плюс і мінус симетричні відносно номінальної товщини, а для листів більших товщини допуск на мінус значно більший відхилень товщини на плюс. Допуски по товщині це вимушена донина процесу прокатки, за якою витримати номінальну товщину, як по довжині, так і по ширині штаб або листів неможливо із-за нестабільності в часі (тобто в процесі роботи стана) практично всіх основних параметрів прокатки. Більш жорсткі обмеження по відхиленням товщини від номінальної тобто зменшені допуски гарантуються стандартами для холоднокатаних листів і штаб, що видно із витягу зі стандарту 3680 (таблиця 1.2).



| Товщина, мм   | Ширина листів або штаб, мм |       |                 |       |                  |       |                  |       |                                |       |
|---------------|----------------------------|-------|-----------------|-------|------------------|-------|------------------|-------|--------------------------------|-------|
|               | від 500 до 750             |       | від 750 до 1000 |       | від 1000 до 1500 |       | від 1500 до 2000 |       | від 2000 до 2300 <sup>17</sup> |       |
|               | А*                         | Б**   | А               | Б     | А                | Б     | А                | Б     | А                              | Б     |
| 0,50          | ±0,05                      | ±0,07 | -               | -     | -                | -     | -                | -     | -                              | -     |
| >0,50 до 0,60 | ±0,06                      | ±0,08 | -               | -     | -                | -     | -                | -     | -                              | -     |
| >0,60 до 0,75 | ±0,07                      | ±0,09 | ±0,07           | ±0,09 | -                | -     | -                | -     | -                              | -     |
| >0,75 до 0,90 | ±0,08                      | ±0,10 | ±0,08           | ±0,10 | -                | -     | -                | -     | -                              | -     |
| >0,90 до 1,10 | ±0,09                      | ±0,11 | ±0,09           | ±0,12 | -                | -     | -                | -     | -                              | -     |
| >1,10 до 1,20 | ±0,10                      | ±0,12 | ±0,11           | ±0,13 | ±0,12            | ±0,15 | -                | -     | -                              | -     |
| >1,20 до 1,30 | ±0,11                      | ±0,13 | ±0,12           | ±0,14 | ±0,12            | ±0,15 | -                | -     | -                              | -     |
| >1,30 до 1,40 | ±0,11                      | ±0,14 | ±0,12           | ±0,15 | ±0,12            | ±0,18 | -                | -     | -                              | -     |
| >1,40 до 1,60 | ±0,12                      | ±0,15 | ±0,13           | ±0,15 | ±0,13            | ±0,18 | -                | -     | -                              | -     |
| >1,60 до 1,80 | ±0,13                      | ±0,15 | ±0,14           | ±0,17 | ±0,14            | ±0,18 | -                | -     | -                              | -     |
| >1,80 до 2,0  | ±0,14                      | ±0,16 | ±0,15           | ±0,17 | ±0,16            | ±0,18 | ±0,17            | ±0,20 | -                              | -     |
| >2,0 до 2,20  | ±0,15                      | ±0,17 | ±0,16           | ±0,18 | ±0,17            | ±0,19 | ±0,18            | ±0,20 | -                              | -     |
| >2,20 до 2,50 | ±0,16                      | ±0,18 | ±0,17           | ±0,19 | ±0,18            | ±0,20 | ±0,19            | ±0,21 | -                              | -     |
| >2,50 до 3,00 | ±0,17                      | ±0,19 | ±0,18           | ±0,20 | ±0,19            | ±0,21 | ±0,20            | ±0,22 | ±0,23                          | ±0,25 |
| >3,00 до 3,50 | ±0,18                      | ±0,20 | ±0,19           | ±0,21 | ±0,20            | ±0,22 | ±0,22            | ±0,24 | ±0,26                          | ±0,29 |
| >3,50 до 3,90 | ±0,20                      | ±0,22 | ±0,21           | ±0,23 | ±0,22            | ±0,24 | ±0,24            | ±0,26 | ±0,28                          | ±0,31 |
| >3,90 до 5,5  | +0,10                      | +0,20 | +0,15           | +0,30 | +0,10            | +0,30 | +0,20            | +0,40 | +0,25                          | +0,45 |
|               | -0,40                      | -0,40 | -0,40           | -0,40 | -0,50            | -0,50 | -0,50            | -0,50 | -0,50                          | -0,50 |
| >5,5 до 7,5   | +0                         | +0,10 | +0,10           | +0,20 | +0,10            | +0,25 | +0,20            | +0,40 | +0,25                          | +0,45 |
|               | -0,50                      | -0,50 | -0,60           | -0,60 | -0,60            | -0,60 | -0,60            | -0,60 | -0,60                          | -0,50 |
| >7,5 до 10,0  | +0                         | +0,10 | +0,10           | +0,20 | +0,20            | +0,30 | +0,20            | +0,30 | +0,25                          | +0,45 |
|               | -0,80                      | -0,80 | -0,80           | -0,80 | -0,80            | -0,80 | -0,80            | -0,80 | -0,80                          | -0,80 |
| >10,0 до 12,0 | +0                         | +0,20 | +0,10           | +0,20 | +0,20            | +0,30 | +0,30            | +0,40 | +0,35                          | +0,50 |
|               | -0,80                      | -0,80 | -0,80           | -0,80 | -0,80            | -0,80 | -0,80            | -0,80 | -0,80                          | -0,80 |

Таблиця 1.1 Можливості відхилення по товщині гарячекатаної листової та штабової сталі (Допуску по товщині, чи згідно стандарту 19904)

А\*- підвищенна точність прокатки;

Б\*\*-нормальна точність прокатки.

Таблиця 1.2 Допуски по товщині холоднокатаних сталевих листів, призначених для глибокої витяжки (стандарт 3680).

| Товщина листа, мм | Допуск по товщині листа |                     |
|-------------------|-------------------------|---------------------|
|                   | Дуже високої точності   | Підвищеної точності |
| 0,2 – 0,4         | ±0,03                   | -                   |
| 0,5               | ±0,04                   | ±0,05               |
| 0,55 – 0,60       | ±0,05                   | ±0,06               |
| 0,70 - 0,75       | ±0,06                   | ±0,07               |
| 0,80 -0,90        | ±0,06                   | ±0,08               |
| 1,0 – 1,1         | ±0,07                   | ±0,09               |
| 1,2               | ±0,09                   | ±0,11               |
| 1,4               | ±0,10                   | ±0,12               |
| 1,5               | ±0,11                   | ±0,12               |
| 1,6 – 1,8         | ±0,12                   | ±0,14               |
| 2,0               | ±0,13                   | ±0,15               |
| 2,2               | ±0,14                   | ±0,16               |
| 2,5               | ±0,15                   | ±0,17               |
| 2,8 – 3,0         | ±0,16                   | ±0,18               |
| 3,2 – 3,5         | ±0,18                   | ±0,20               |
| 3,8 – 4,0         | ±0,20                   | ±0,22               |

Для автолистів категорій витяжки ОСВ, СВ, ВОГВ, ОГВ і ГВ при збільшеннях різнотовщинності в процесі холодної штамповки виникають тріщини, викривлення, фестони та інші дефекти. Цим і пояснюється звуження поля допусків для холоднокатаних листів (таблиця 1.2) порівняно з гарячекатаними (таблиця 1.1). Допустимі відхилення листів за розмірами по ширині та довжині від їх номінальних значень гарантуються тільки на плюс причому величина допуску збільшується зі збільшенням ширини (В) і довжини (L) листів. Наприклад, для холоднокатаних листів призначених для глибокої витяжки мінімально допустимі відхилення по ширині при  $V < 800$  мм;  $V = 1400-1600$ ;  $V > 1800$  мм відповідні дорівнюють +6 мм; +10 мм; +15 мм. Мінімальні допуски по довжині для листів всіх ширин та довжин складають для  $L < 1500$  мм - +15 мм, для  $L > 1500$  мм - +20 мм.

В процесі прокатки штаб і листів, особливо тонких та широких, утворюються дефекти норми, а саме хвилястість або коробчастість. Тому важливим показником якості плоского прокату є їх площинність (планшетність). Показник планшетності визначають за амплітудою відхилення листа від базової плоскої поверхні еталонної планшетності (таблиця 1.3)

Таблиця 1.3 Стандартні вимоги щодо площинності холоднокатаної листової сталі

| Категорія площанності | Максимальні відхилення (амплітуда) від площини (мм) при ширині листів або штаб |                |                 |          |
|-----------------------|--|----------------|-----------------|----------|
|                       | $\leq 100$   | $> 100 - 1500$ | $> 1500 - 1800$ | $> 1800$ |
| Особлива висока (ПО)  | 4  | 5              | 6               | 8        |
| Висока (ПВ)           | 8  | 8              | 10              | 10       |
| Поліпшана (ПП)        | 10   | 12             | 15              | 15       |
| Нормальна (ПН)        | 12   | 15             | 18              | 20       |

Форма листів та штаб характеризується також серпоподібністю, тобто ребровою (краночно-боковою) кривизною. Максимально допустимою ребровою кривизною в 3 мм на 1 м довжини для листів або 10 мм на 3 м довжини штаби.

Листи, штаби і стрічки з кольорових металів та їх сплавів виробляються трьох ступеней твердістю:

- М'які (після повного відпалу);
- Напівтверді (напів нагартвані, напів відпал);
- Тверді (нагартвані без відпалу).

Для деяких видів листів із сплавів кольорових металів передбаченна додаткова ступінь – особливо тверді.

#### 1.4. Якість поверхні плоского прокату

Якість поверхні листів, штаб і стрічок є лицем рівня технічної культури металургійного виробництва та показником конкурентоспроможності плоского прокату на ринку металів. Виходячи з цього, щодо якості листів і штаб пред'являються спеціальні вимоги про недопустимість на поверхні таких дефектів як тріщини, вм'ятини, пузирів, подряпин, вкатоної окалини та ін. Дефекти поверхні не тільки погіршують зовнішній товарний вигляд листів і штаб, але ще й знищують механічні і технологічні властивості металу. Наприклад, навіть невеликі тріщини, вм'ятини, подряпини і т.п. є концентраторами напружень в процесі глибокої або складної витяжки металу під час його холодної штамповки, що може привести до поривів на відштампованих панелях.

Дефекти поверхонь поділяють за походженням на металургійні і прокатні. При цьому деякі дефекти можуть утворюватись по причинах порушень технології, як в процесах виплавки і розливки сталі, так і при нагріві металу в прокатних цехах, що призводить до розбіжностей при визначенні винуватців дефектування металопродукції. Для зникнення цих суперечок важливе значення мають стандарти 20847 і 21014, які класифікують різні дефекти поверхні листів і штаб. Характер і причини утворення різних дефектів на поверхні плоского прокату у відповідності до вимог вищевказаних стандартів будуть розглянуті в розділі 2. На деяких видах листової продукції, наприклад на товстих листах, допускається зачистка дефектів, причому перехід від первинної поверхні до місця зачистки має бути плавним. Глибина зачистки не повинна виводити листи за межі мінусового допуску по товщині.

По якості поверхні сталеві листи і штаби поділяють на чотири групи:

1. Особливо високої якості;
2. Високої якості;
3. Поліпшеної якості;

#### 4. Звичайної якості.

На поверхні листів і штаб першої групи якості поверхні допускаються окремі короткі рисочки довжиною не більше 20 мм, окремі невеликі ділянки різної тональності без різкої зміни кольорів виражених кордонів поміж ними. Зовсім не допускаються на поверхні першої групи якості плями і цятки корозії (іржі), різнокольоровості від окиснення та плями пригарів залишків технологічного мастила (наліт іржі). Ці ж дефекти не допускаються і на холоднопрокатних листах і штабах другої групи за якістю поверхні, особливо на лицьовій (верхній) поверхні. Для листів і штаб другої, третьої і четвертої груп поступово вимоги щодо якості поверхні регламентуються не так жорстко. Холоднокатані листи і штаби в основному виготовляють з групами якості поверхні 1 і 2, в окремих випадках 3 групи. Гарячекатані листи і штаби виготовляються з групами якості 3 і 4 і можлива їх поставка у непротравленому стані. На непротравленій поверхні листів і штаб допускається наявність тонкого невіддільного шару окалини, який не заважає виявленню поверхневих дефектів.

### 1.5. Крутні моменти, робота та потужність прокатки

Визначення крутних моментів по питомим силам тертя

Визначимо величину крутних моментів, що необхідно прикласти до валків, щоб забезпечити їх обертання в процесі прокатки.

Розглядаючи елементарні сили, розподілені по дузі контакту, можна зробити висновок, що крутний момент створюється дією дотичних сил тертя  $t$ . Сили  $p$  не створюють крутного моменту, тому що лінії їх дії проходять крізь центр валку.

Для елементарної площадки

момент буде:

$$dM_{np} = t \cdot bR^2 d\phi.$$

Повний крутний момент для одного валку з урахуванням різного напрямку сил тертя в зонах відставання та випередження складає:

$$M_{np} = R \int_{-b}^b t \cdot y \, dy + R \int_{-b}^b t \cdot y \, dy$$

Якщо припустити, що сили тертя  $t$  та ширина смуги  $b$  на протязі осередку деформації залишаються постійними, то після інтегрування отримуємо:

$$M_{np} = t \cdot b R^2 (a - 2\gamma).$$

Використовуючи закон тертя Амонтона ( $t = f_y \cdot p_{cp}$ ),

Отримуємо формулу крутного моменту, вперше запропоновану В.Ф.Баюковим:

$$M_{np} = p_{cp} \cdot b R^2 f_y (a - 2\gamma).$$

Ця формула має обмежене застосування, тому що її виведення пов'язане з припущенням про рівномірний розподіл тиску та сил тертя по дузі контакту. Крім того, потребує достатньо точного визначення нейтрального кута  $\gamma$ .

#### Визначення крутного моменту по зусиллю прокатки

Як було відмічено раніше, при сталому процесі вільної прокатки рівнодіюча  $P$  усіх сил, що приложені до валку в осередку деформації, направлена вертикально (рис.2). Крутний момент, що створюється силою  $P$ , дорівнює:  $M_{np} = P \cdot a$

де  $a$  – плече рівнодіючої відносно центру валка. Плече  $a$  прийнято визначати як деяку частину довжини осередку деформації, тобто:

$$a = \psi \cdot l_d,$$

де  $\psi$  – коефіцієнт плеча моменту або коефіцієнт плеча зусилля прокатки.

Таким чином, для одного валку маємо:

$$M_{np} = P \cdot \psi \cdot l_d = P \cdot \psi R h$$

Оскільки  $P = p_{cp} l_d b$ , можна також записати:

$$M_{np} = p_{cp} \psi \cdot b \cdot l^2 = p_{cp} \psi \cdot b R \Delta h.$$

Якщо вважати, що зусилля прокатки  $P$  (або контактний тиск  $p_{cp}$ ) відоме, то основне завдання розрахунку крутного моменту зводиться до правильного визначення точки прикладення сили  $P$ , тобто до знаходження коефіцієнту плеча моменту  $\psi$ .

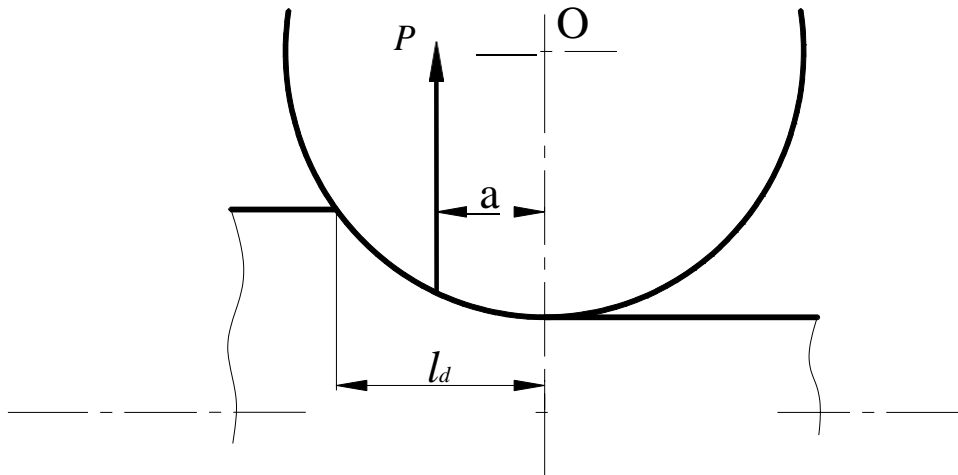


Рисунок 1.1 – До визначення формулу крутного моменту по зусиллю прокатки

Лінія дії сили  $P$  практично проходить крізь центр ваги епюри контактних тисків. Отже, коефіцієнт плеча моменту залежить від характеру розподілу тисків по дузі контакту. При рівномірному розподілі тисків точка прикладення сили  $P$  знаходиться посередині дуги контакту та  $\psi = 0,5$ . Будь-яка асиметрія в розподілі тисків призводить до відхилення величини  $\psi$  від значення  $0,5$ . При прокатці товстих смуг  $\psi > 0,5$ , тому що в цьому випадку максимум тиску зміщено до площини входження. Навпроти, при прокатці тонких смуг  $\psi < 0,5$ , оскільки максимум тиску зміщено до площини виходу. Якщо встановлено закон розподілу тиску по дузі захоплення, то величина коефіцієнту плеча моменту може бути визначена суто аналітично. Н.М. Кирилін вирішив цю задачу, використовуючи рівняння О.І. Целікова з припущення  $\text{const } T = * \sigma$ . Результати розрахунків представлені у вигляді діаграми на рис.3. У більшості випадків коефіцієнт плеча моменту визначають за експериментальними даними. На рис.4 приведені результати

досліджень П.Л. Клименко, який при знаходженні залежності використовував експериментальні епюри розподілу тисків по дузі контакту, отримані при прокатці свинцевих та сталевих ( $t = 1000 \div 1100^\circ\text{C}$ ) зразків.

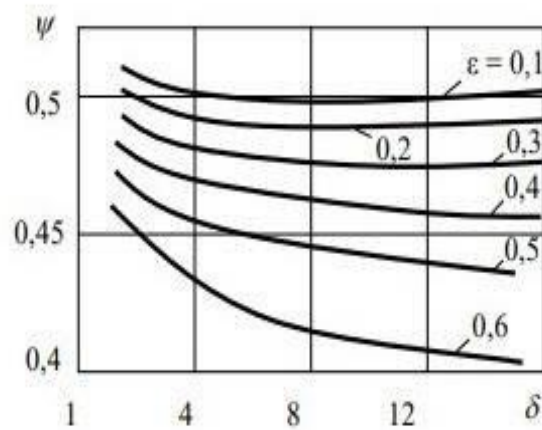


Рисунок 1.2 – Теоретичне значення коефіцієнту плеча моменту за рівнянням розподілу тиску О.І. Целікова

Як впливає з цього графіку, максимальне значення  $\psi = 0,58$  відповідає параметру форми  $ld/h_{cp} \approx 0,4$ . В діапазоні  $ld/h_{cp} = 1 \div 1,5$  значення  $\psi$  приблизно дорівнює 0,5. При  $ld/h_{cp} > 1,5$  маємо  $\psi < 0,5$ , причому зі збільшенням відношення  $a_{\square}/b_g$  коефіцієнт  $\psi$  трохи знижується. Останнє пояснюється зміщенням нейтрального перетину та максимуму тиску до площини виходу. За дослідними даними Г. Валквіста при гарячій прокатці ( $t = 800 \div 1100^\circ\text{C}$ ) зразків з низьковуглецевої сталі коефіцієнт плеча моменту знаходиться в межах 0,34-0,47. Більш високі значення  $\psi$  отримані при прокатці відносно товстих зразків з невеликими обтисненнями. Для інших сталей межі змінення  $\psi$  трохи ширші; наприклад, для швидкоріжучої сталі  $\psi = 0,28 \div 0,56$ . При холодній прокатці коефіцієнт плеча моменту, в більшості випадків, знаходиться в межах 0,2-0,35. Такі результати були отримані в дослідженнях М.М. Саф'яна та інших вчених. Відносно низькі значення  $\psi$  при холодній прокатці пояснюються впливом сплюснення валків. Внаслідок сплюснення передня межа осередку деформації зміщується за лінію центрів валків та



відповідно точка прикладення рівнодіючої  $P$  наближується до лінії центрів, тобто плече  $a$  зменшується. Чим тонше та твердіше смуга, що прокатується, тим більше сплюснення валків та нижчі значення  $\psi$ .

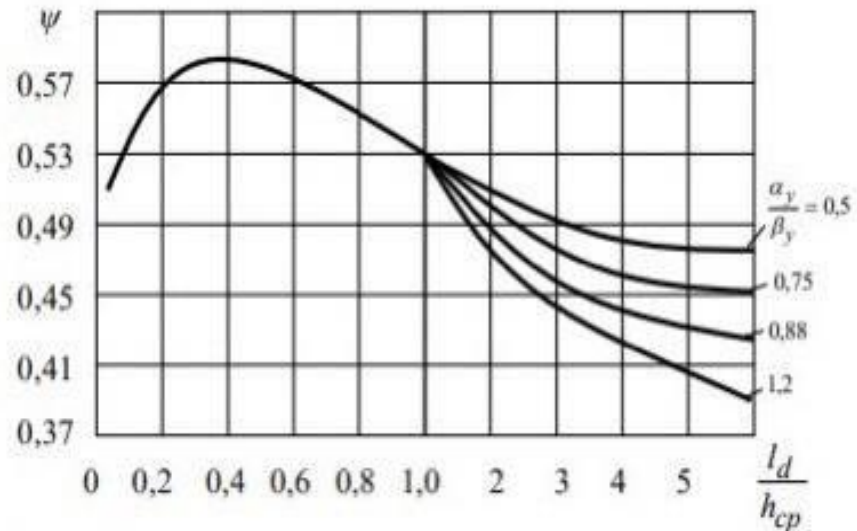


Рисунок 1.3 – Коефіцієнт плеча моменту по експериментальним даним П.Л. Клименко

Має місце й та обставина, що по мірі наближення до площини виходу збільшується наклеп металу, а це визиває відповідне зростання тиску. При прокатці в калібрах визначення крутного моменту через коефіцієнт плеча сили  $P$  стає важким, тому що величина  $\psi$  істотно залежить від дії сил тертя на бокових стінках калібру. Крім цього, необхідно враховувати складний вид контактної поверхні, тому при прокатці в калібрах більш надійні результати отримуються при визначенні крутного моменту за витратою енергії.

Теоретичне визначення роботи та потужності прокатки

Якщо відоме значення величини крутних моментів, то визначення роботи та потужності прокатки не має труднощів. Робота прокатки визначається за формулою:

$$A_{пр} = 2M_{пр} \cdot \varphi = \frac{2M_{пр}l}{(1+S)R}$$

де  $\varphi$  – кут повороту валків за період прокатки смуги довжиною  $l_1$ .

Величиною випередження  $S$  можна знехтувати, тоді:

$$A_{\text{пр}} = \frac{2M_{\text{пр}}l_1}{R}$$

Підставляючи в формулу вище, отримаємо формулу:

$$A_{\text{пр}} = 2P_{\text{ср}}\omega \cdot b\Delta h \cdot l_1$$

Для визначення роботи прокатки може бути використана також відома з теорії обробки тиском формула Фінка:

$$A_{\text{пр}} = P_{\text{ср}} \cdot V \ln \frac{h_0}{h_1}$$

де  $V$  – об'єм прокатуємої смуги. Між формулами немає принципіальної різниці.

Якщо прийняти  $\ln \frac{h_0}{h_1} \approx \frac{\Delta h}{2h_1}$  та  $\psi = 0,5$ , то ці формули будуть однаковими.

При прокатці профілів складного (не прямокутного) перерізу робота деформації визначається за формулою:

$$A_{\text{пр}} = P_{\text{ср}} \cdot V \ln \frac{l_0}{l_1} = P_{\text{ср}} \cdot V \ln \lambda$$

Потужність, що витрачається на бочці валків, складає:

$$W_{\text{пр}} = \frac{A_{\text{пр}}}{\tau} = \frac{2M_{\text{пр}}l_1}{R(1+S)\tau} = \frac{2M_{\text{пр}}}{R} v_B,$$

де  $\tau$  – час прокатки смуги довжиною  $l_1$ .

Якщо визначати  $M_{пр}$  за формулою Баюкова, то потужність прокатки дорівнює:

$$W_{пр} = 2P_{ср}Rb \cdot f\gamma(\alpha - 2\gamma)vb$$

Формулу Баюкова можна перетворити, якщо підставити в неї значення кута  $\gamma$ . Таке перетворення зробив І.М.Павлов та отримав наступну формулу:

$$W_{пр} = P_{ср}Rb \cdot \alpha^2vb$$

Якщо використовувати формулу крутного моменту, то потужність прокатки буде:

$$W_{пр} = 2P_{ср}\psi \cdot b\Delta hvb$$

При визначенні роботи прокатки за формулою отримуємо:

$$W_{пр} = \frac{P_{ср}F_1l_1}{\tau} \ln\lambda = P_{ср}F_1l_1\ln\lambda v_1$$

де  $F_1$  – площа перетину смуги, що виходить з валків;  $v_1$  – швидкість смуги на виході металу з валків.

## 1.6. Метод розрахунку потужності двигуна

Загальна ідея алгоритму розрахунку потужності та моменту двигунів головного приводу робочої кліти при простому процесі прокатки полягає в наступному.

1. Спочатку з рівняння рівноваги моментів, що діють на кожен прокатний валок, знаходять момент, необхідний для його приводу, щоб подолати опір деформації смуги, сил контактної тертя у вогнищі деформації та сил тертя у підшипниках цього валка.

Загалом це рівняння має вигляд:

$$\sum M = M_1 - \frac{M_{np}}{2} - M_{T \cdot n} = 0$$

де  $M_1$  - момент з боку головного приводу, який необхідно додати до кожного валку для забезпечення процесу прокатки;  $M_{np}$  – момент прокатки (момент опору обертанню двох валків, створюваного силами прокатки, що діють із боку смуги у осередку деформації);  $M_{T \cdot n}$  – момент тертя у підшипниках валка.

З рівняння слідує, що необхідна величина моменту  $M_1$  дорівнює:

$$M_1 = \frac{M_{np}}{2} + M_{T \cdot n}$$

Потім визначають необхідний сумарний момент двигуна (чи двигунів, якщо кожен валок має індивідуальний приводний двигун).

Оскільки умови деформації та тертя для кожного валка однакові, сумарний робочий момент, який необхідно додати до приводних кінців валків, дорівнює:

$$M_p = 2M_1 = M_{np} + 2M_{T \cdot n}$$

Тоді необхідний момент двигуна (двигунів) головного приводу дорівнюватиме:

$$M_{дв} = \frac{M_p}{\eta_{пр}}$$

Де  $\eta_{пр}$  - Коефіцієнт корисної дії (к.п.д.) в лінії головного приводу (що враховує втрати енергії на тертя в муфтах, шпинделях, вузлах їх врівноваження, в кліні й редуктора).

3. Завершальний етап розрахунку – визначення необхідної потужності двигуна (двигунів) головного приводу  $N_{дв}$ .

Для цього використовують відому формулу механіки:

$$M_{дв} = \frac{N}{\omega}$$

Звідки  $N_{дв} = M_{дв} \cdot \omega_{дв}$

Де  $\omega_{дв} = \frac{\pi \cdot n_{дв}}{30}$  – кутова швидкість обертання валу ротора двигуна, 1/с;

$n_{дв}$  = число обертів за хвилину цього валу.

Коефіцієнт плеча крутного моменту прокатки металу є однією з важливих характеристик осередку деформації та за практичних умов змінюється у широких межах: від  $\psi \approx 0,10$  за холодною прокаткою штаб до  $\psi \approx 0,70...0,75$  під час прокатки розкатів на обтискних станах. Його значення визначають величину крутного моменту та необхідну потужність головного приводу. Головна частина досліджень. У загальному випадку значення коефіцієнта плеча крутного моменту розраховують за формулою:

$$\psi = \frac{a}{l_d}$$

де  $a$  – плече крутного моменту;  $l_d$  – довжина дуги контакту в осередку деформації.

Значення плеча крутного моменту визначають експериментальним шляхом або теоретично. Є відомими декілька методів експериментального

визначення його значень.

Перший метод передбачає визначення крутного моменту на шийці валка  $M_{ш}$  експериментальним шляхом з використанням тензометричних датчиків, що наліплюють на поверхні шпинделя приводу валків, і спеціальної апаратури. Проте цей метод потребує тарування тензометричної апаратури та його використовують тільки за лабораторних умов. Під час одночасного вимірювання сили та моменту прокатки величину коефіцієнта плеча моменту розраховують як

$$\psi = \frac{M_{ш}}{P \cdot l_d}$$

де  $P$  – сила прокатки, що визначена експериментальним шляхом.

Таким чином, для кліти кварто коефіцієнт

$\psi_{ш}$  обумовлює вплив на момент прокатки не лише параметрів власне осередку деформації ( $M_d$ ), але й опору тертя у підшипниках валків ( $M_{тш}$ ) і на міжвалковому контакті ( $M_{тк}$ ), тобто

$$M_{ш} = M_d + M_{тш} + M_{тк}.$$

## 2 ДОСЛІДНИЦЬКО-РОЗРАХУНКОВА ЧАСТИНА

Вихідні данні до кваліфікаційної роботи представлені у таблицях 2.1. та 2.2.

Таблиця 2.1. – Режим прокатки

|         | H,мм | h,мм | $\Delta h$ ,мм | $\varepsilon$ ,% |
|---------|------|------|----------------|------------------|
| Кліть№1 |      |      |                |                  |
|         | 2,5  | 1,82 | 0,68           | 0,27             |
| Кліть№2 |      |      |                |                  |
|         | 1,82 | 1,27 | 0,55           | 0,2              |
| Кліть№3 |      |      |                |                  |
|         | 1,27 | 0,88 | 0,42           | 0,19             |
| Кліть№4 |      |      |                |                  |
|         | 0,88 | 0,61 | 0,27           | 0,17             |

Таблиця 2.2. - Шорсткість робочих валків

|                     |     |     |     |
|---------------------|-----|-----|-----|
| № кліті             | 1   | 2-3 | 4   |
| R <sub>a</sub> ,мкм | 5,0 | 1,5 | 1,5 |

Смазочно-охолоджуюча рідина – емульсія мінерального масла з концентрацією 4%

Можливе сумарне відносне обтиснення ( $h=0,8$ мм),  $\varepsilon_{\Sigma}=0,74$ , а початкова товщина штаби буде рівна:

$$H=h/(1-\varepsilon_{\Sigma})=0,8/(1-0,74)\approx 2,5\text{мм}$$

Кліть 1

Визначимо параметри прокатки в кліті 1. Швидкість валків в четвертій кліті рівна  $V_4 - 10$  м/с, то з умі постійності секундних об'ємів знаходимо швидкості в інших клітях:

$$V = \frac{h \cdot V}{h}, \quad (2.1)$$

$$V_1 = \frac{h_4 \cdot V_4}{h_1} = \frac{0,8 \cdot 10}{2,39} = 3,3 \text{ м/с}$$

$$V_2 = \frac{h_4 \cdot V_4}{h_2} = \frac{0,8 \cdot 10}{1,91} = 4,1 \text{ М/с}$$

$$V_3 = \frac{h_4 \cdot V_4}{h_3} = \frac{0,8 \cdot 10}{1,58} = 5 \text{ М/с}$$

Сумарне абсолютне обтиснення штаби в стані дорівнює:

$$\Delta h_{\Sigma} = H - h_{\kappa}, \quad (2.2)$$

$$\Delta h_{\Sigma} = 2,5 - 0,8 = 1,7 \text{ мм}$$

Обтиснення по клітях:

$$\Delta h = H - h_n, \quad (2.3)$$

$$\Delta h_1 = H - h_1 = 2,5 - 1,82 = 0,68 \text{ мм}$$

$$\Delta h_2 = h_1 - h_2 = 1,82 - 1,27 = 0,55 \text{ мм}$$

$$\Delta h_3 = h_2 - h_3 = 1,27 - 0,88 = 0,42 \text{ мм}$$

$$\Delta h_4 = h_3 - h_4 = 0,88 - 0,61 = 0,27 \text{ мм}$$

Відносне обтиснення:

$$\varepsilon_1 = \frac{\Delta h_1}{H} = \frac{0,68}{2,5} = 0,272$$

$$\varepsilon_2 = \frac{\Delta h_2}{h_1} = \frac{0,55}{1,82} = 0,2$$

$$\varepsilon_3 = \frac{\Delta h_3}{h_2} = \frac{0,39}{1,27} = 0,19$$

$$\varepsilon_4 = \frac{\Delta h_4}{h_3} = \frac{0,27}{0,88} = 0,17$$

Сумарне відносне обтиснення:

$$\varepsilon_{\Sigma} = \frac{\Delta h_{\Sigma n}}{H}, \quad (2.4)$$

$$\varepsilon_{\Sigma} = \frac{\Delta h_{\Sigma 1}}{H} = \frac{0,68}{2,5} = 0,18$$



$$\varepsilon_{\Sigma} = \frac{\Delta h_{\Sigma 2}}{H} = \frac{0,68 + 0,55}{2,5} = 0,37$$

$$\varepsilon_{\Sigma} = \frac{\Delta h_{\Sigma 3}}{H} = \frac{0,68 + 0,55 + 0,42}{2,5} = 0,66$$

$$\varepsilon_{\Sigma} = \frac{\Delta h_{\Sigma 4}}{H} = \frac{0,68 + 0,55 + 0,42 + 0,27}{2,5} = 0,76$$

Визначимо коефіцієнти тертя і інші параметри по формулах при початковій температурі деформації  $t = 25\text{C}$ .

Коефіцієнт тертя дорівнює

$$f = f_0 \cdot k_d \cdot k_n \cdot k_{cm} \cdot k_t, \quad (2.5)$$

де  $f_0$  – базовий коефіцієнт тертя;  $k_d$ ,  $k_n$ ,  $k_{cm}$ ,  $k_t$  – поправочні коефіцієнти, що враховують відповідно величину обтиснення, шорсткість поверхні штаби, тип технологічного мастила і початкову (перед кліттю) температуру штаби.

Базовий коефіцієнт тертя дорівнює:

При  $V < 7,5$  м/с

$$f_0 = 0,076 - 0,0019V + 0,031(Ra - 0,6) \cdot [(1,07 - 0,14V)^3 + 0,054V - 0,26];$$

При  $V > 7,5$  м/с

$$f_0 = k_v \cdot [0,062 + 0,005(Ra - 0,6)]$$

Коефіцієнти  $k_d$  і  $k_n$  рівні:

$$k_d = 0,5 + 1,77\varepsilon + 0,165Ra(1 - 3,33 \cdot \varepsilon), \quad (2.6)$$

$$k_n = 1,09 - 0,05Ra_n, \quad (2.7)$$

де  $R_{an}$  – шорсткість поверхні штаби.

Шорсткість поверхні гарячекатаного металу можна приймати 3-5 мкм, а після клітей стану холодної прокатки  $R_{an} \approx 0,5Ra$  тобто половині висоти шорсткості валків.

Коефіцієнт  $k_v$  рівний: при  $V < 8,0$  м/с –  $k_v = 1$ , а при  $V > 8,0$  м/с маємо

$$k_v = 0,56 + 0,7(1 - 0,025V)^2 \quad (2.8)$$

Коефіцієнт  $k_t$  визначаємо по формулі

$$k_t = a + c(1,11 - 0,0044 \cdot t_H)^n \quad (2.9)$$

де  $t_H$  - температура металу перед осередком деформації, °С; а, с, n - коефіцієнти, рівні:

Для мінеральної емульсії:

$$a = 0,31 + 1,7 \cdot \varepsilon; \quad (2.10)$$

$$c = 1,2 - 2,8 \cdot \varepsilon; \quad (2.11)$$

$$n = 3,84 - 5,7 \cdot \varepsilon; \quad (2.12)$$

Коефіцієнт  $k_{cm}$  дорівнює: емульсія мінерального масла -  $k_{cm} = 1,0$ ; бавовняне натуральне масло -  $k_{cm} = 0,94$ ; соняшникова гідрогенізована олія (ПКС) -  $k_{cm} = 0,85$ ; пальмова олія -  $k_{cm} = 0,83$ ; бавовняне полімеризована олія -  $k_{cm} = 0,56$ .

Тобто, чим більша в'язкість мастила і кількості в ній ПАР (поверхнево - активних речовин), тим ефективніше технологічне мастило. Для приведених початкових даних по формулах ( $k_{cm} = 1,0$ ;  $k_v = 1$ ;  $R_{ap} = 2,5$  мкм) одержимо:

$$f_0 = 0,0656 + 0,1364 \cdot [(1,07 - 0,14 \cdot 5,51)^3 + 0,297 - 0,26] = 0,074$$

$$k_d = 0,5 + 1,77 \cdot 0,21 + 0,165 \cdot 5 \cdot (1 - 3,33 \cdot 0,21) = 1,117$$

$$k_n = 1,09 - 0,05 \cdot 2,5 = 0,965$$

Для розрахунку коефіцієнта  $k_t$  в кліті 1 початкову температуру штаби можна приймати в межах 20-30 °С. У подальших клітках початкову температуру штаби перед кліттю слід приймати рівній кінцевій температурі тк в попередній кліті урахуванням охолодження на міжвалковій ділянці. Для нашого прикладу в кліті 1 приймаємо  $t_H = 25^\circ\text{C}$  і коефіцієнт  $k_t$  рівний:

$$f_0 = 0,0656 + 0,1364 \cdot [(1,07 - 0,14 \cdot 5,51)^3 + 0,297 - 0,26] = 0,074$$

$$k_d = 0,5 + 1,77 \cdot 0,21 + 0,165 \cdot 5 \cdot (1 - 3,33 \cdot 0,21) = 1,117$$

$$k_n = 1,09 - 0,05 \cdot 2,5 = 0,965$$

Для розрахунку коефіцієнта  $k_t$  в кліті 1 початкову температуру штаби можна приймати в межах 20-30 °С. У подальших клітках початкову температуру штаби перед кліттю слід приймати рівній кінцевій температурі  $t_k$  в попередній кліті урахуванням охолодження на міжвалковій ділянці. Для нашого прикладу в кліті 1 приймаємо  $t_n = 25^\circ\text{C}$  і коефіцієнт  $k_t$  рівний:

$$a = 0,31 + 1,7 \cdot 0,21 = 0,673;$$

$$c = 1,2 - 2,8 \cdot 0,21 = 0,6;$$

$$n = 3,84 - 5,7 \cdot 0,21 = 2,624;$$

$$k_t = 0,673 + 0,6(1,11 - 0,0044 \cdot 25)^{2,624} = 1,275$$

Загальна величина коефіцієнта тертя складає:

$$f = 0,074 \cdot 1,117 \cdot 0,965 \cdot 1 \cdot 1,275 = 0,102$$

Показник тертя рівний :

$$f_{\Pi} = 1,6f - 0,018 = 1,6 \cdot 0,102 - 0,018 = 0,145$$

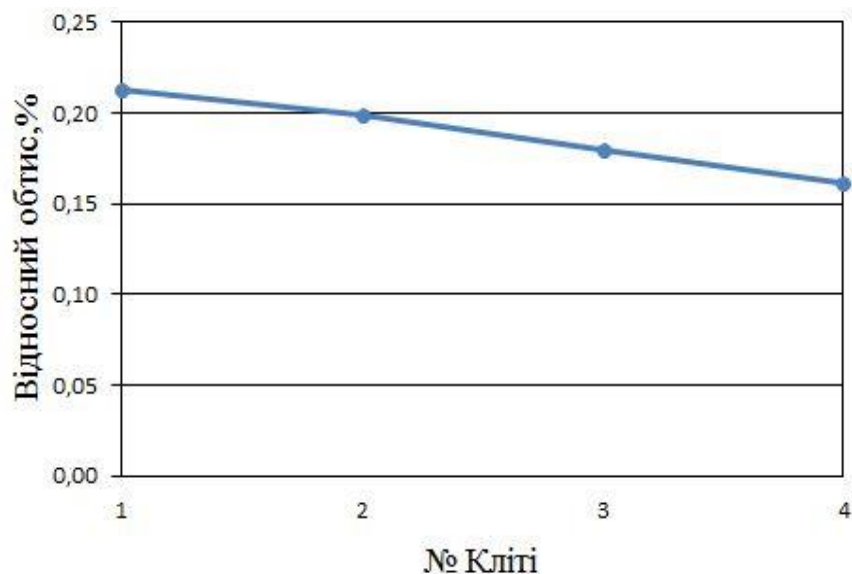


Рисунок 2.1 – Графік залежності відносного обтиску від 4-х клітей

Розрахуємо напруження течії металу.

Сталь марки 0,8кп містить наступні хімічні елементи (%): 0,1 С; 0,1 Si; 0,4 Mn; 0,24 Ni; 0,1 Cr. Вуглецевий еквівалент для вуглецевої сталі в загальному випадку рівний:

$$C_3 = C + \frac{Si}{24} + \frac{Mn}{6} + \frac{Ni}{40} + \frac{Cr}{5} \quad (2.13)$$

Базове (початкове після відпалу) напруження течії та його приріст за рахунок зміцнення при  $\varepsilon = 40\%$  відповідно рівні:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{T0} &= 210 + 263C_3; \\ \Delta\sigma_T &= 209 + 460C_3. \end{aligned} \right\} \quad (2.14)$$

Коефіцієнт, що враховує обтиснення, рівний:

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_\Sigma = 0 - 0,4; \quad k_\varepsilon &= 1 - \left(1 - \frac{\varepsilon_\Sigma}{0,4}\right)^{1,5+C} \\ \varepsilon_\Sigma \geq 0,4 - 0,7; \quad k_\varepsilon &= 1 + 0,87(\varepsilon_\Sigma - 0,4)^{0,5} \end{aligned} \right\} \quad (2.15)$$

Напруження течії металу після кліті визначають по формулі:

$$\sigma_{T1} = \sigma_{T0} + \Delta\sigma_T \cdot k_\varepsilon \quad (2.16)$$

Напруження течії розраховуємо при максимальному вмісті хімічних елементів в сталі:

$$C_3 = 0,1 + 0,1/24 + 0,4/6 + 0,24/40 + 0,1/5 = 0,19;$$

$$\sigma_{T0} = 210 + 263 \cdot 0,19 = 259,9 \text{ Н/мм}^2;$$

$$\Delta\sigma_T = 209 + 460 \cdot 0,19 = 296,4 \text{ Н/мм}^2;$$

$$k_\varepsilon = 1 - (1 - 0,22/0,4)^{1,5+0,19} = 0,75;$$

$$\sigma_{T1} = 259,9 + 296,4 \cdot 0,75 = 448,2 \text{ Н/мм}^2$$

В результаті впливу швидкості і температури деформації напруження течії металу при холодному прокатуванні змінюється в порівнянні з одержаним. Відповідно до досліджень врахувати цей вплив пропонується спеціальними коефіцієнтами:

$$\sigma'_{T1} = n_u \cdot n_t \cdot \sigma_{T0} + \Delta\sigma_T \cdot k_\varepsilon \quad (2.17)$$

Напруження течії металу на міжвалковому проміжку (перед подальшою кліттю), за відсутності деформації визначимо по формулі ( $n_U = 1,0$ ):

$$\sigma_{T1} = n_t \cdot \sigma_{T0} + \Delta\sigma_T \cdot k_\varepsilon \quad (2.18)$$

Середній опір металу в осередку деформації дорівнює:

$$\sigma_\phi = 1,15[\sigma_{T(i-1)} + 0,67(\sigma'_{T1} - \sigma_{T(i-1)})] \quad (2.19)$$

Де  $\sigma_{T(i-1)}$  напруження течії металу перед кліттю (проходом);  $\sigma'_{T1}$  - напруження течії металу після кліті;  $n_u$  і  $n_t$  - відповідно коефіцієнти, що враховують швидкість деформації і температуру, визначаються з формул:

$$\left. \begin{aligned} n_u &= 1 + 0,38\left(0,5 + \frac{\ln u}{13,8}\right)^2 \\ n_t &= 0,8 + 0,23\left(1 - \frac{t_n}{300}\right)^2 \end{aligned} \right\} \quad (2.20)$$

Швидкість деформації визначаємо по виразу:

$$u = v \cdot \varepsilon / l_c$$

де –  $l_c$  довжина дуги контакту з урахуванням пружних деформацій валків і штаби;  $v$  - швидкість в мм/с.

Оскільки довжина дуги  $l_c$  поки невідома заздалегідь приймаємо  $l_c/l_d$ : кліті 1,2- (1,3 - 1,4); кліть 3 - (1,4 - 1,5); кліть 4 - (1,6 - 1,7).

Для кліті 1 маємо ( $D=500$ мм,  $v=3,3$ /с)

$$l_c = 1,4\sqrt{R \cdot \Delta h} = 17,9 \text{ мм}$$

Тоді ми отримуємо:

$$u = 1000 \cdot 3,3 \cdot 0,22 / 17,9 = 33 \text{ мм/с}$$

$$n_u = 1 + 0,38(0,5 + \ln 33 / 13,8)^2 = 1,85;$$

$$n_t = 0,8 + 0,23(1 - 25/300)^2 = 0,993$$

Тоді одержуємо:

$$\sigma'_{T1} = 1,85 \cdot 0,993 \cdot 259,9 + 296,4 \cdot 0,75 = 699,7 \text{ Н/мм}^2$$

$$\sigma_\phi = 1,15[259,9 + 0,67(699,7 - 259,9)] = 637,1 \text{ Н/мм}^2$$

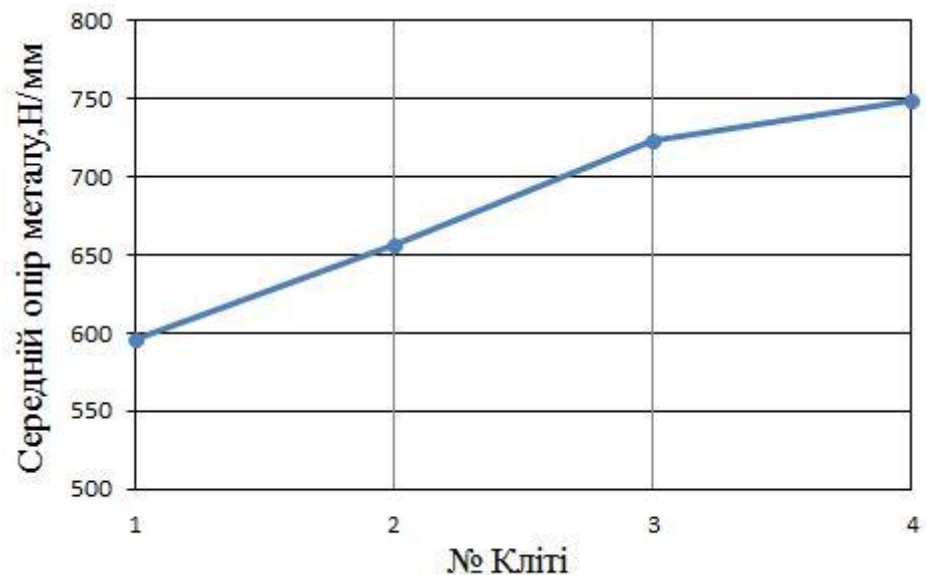


Рисунок 2.2 – Середній опір деформації в осередку деформації від 4-х клітей

Довжина дуги контакту з урахуванням пружних деформацій валків і штаби

$$\left. \begin{aligned}
 l'_c &= \frac{c + \sqrt{c^2 + 4R\Delta h \left(1 - c \frac{fn}{2h_{cp}}\right)}}{2 \left(1 - c \frac{fn}{2h_{cp}}\right)}; \\
 c &= n_{cp} \cdot \sigma_{\phi} \frac{R}{47500};
 \end{aligned} \right\} \\
 x_2 &= n_1 \cdot \sigma_{\phi 1} \frac{R}{95000}; \\
 l_c &= l'_c + x_2
 \end{aligned} \quad (2.22)$$

де  $R$  - радіус жорсткого валка;  $n_{cp}$  і  $n_1$  - коефіцієнти, що враховують вплив середніх напружень натягання і напруження натягання переднього кінця штаби:

$$n_{cp} = 1 - \frac{\sigma_n + \sigma_3}{2\sigma_{\phi}}; \quad n_1 = 1 - \frac{\sigma_{\Pi}}{\sigma_{\phi 1}} \quad (2.23)$$

Напруження натягання змінюються в широких межах. Для неперервного стана перед кліттю 1 напруження  $\sigma_3 = 20 - 30$  Н/мм<sup>2</sup>. Після чистової кліті  $\sigma_{\Pi} = 40$  Н/мм<sup>2</sup>. На міжклітьових проміжних ділянках:

$$\sigma_{\Pi} = \sigma_3 = (0,1 - 0,2)\sigma_{T1}; \quad \sigma_{\phi 1} = 1,15\sigma'_{T1}$$

Оскільки розрахунок виконуємо для кліті 1, то приймаємо  $\sigma_3 = 27$  Н/мм<sup>2</sup>, а  $\sigma_{\Pi} = 0,15 \cdot 448,2 = 67,2$  Н/мм<sup>2</sup>

Підставляючи все знаходимо:

$$n_{cp} = 1 - \frac{67,2 + 27}{2 \cdot 448,2} = 0,895; \quad n_1 = 1 - \frac{67,2}{1,15 \cdot 699,7} = 0,917$$

$$c = 0,895 \cdot 448,2 \cdot 250 / 47500 = 2 \text{ мм};$$

$$x_2 = 0,917 \cdot 1,15 \cdot 448,2 \cdot 250 / 95000 = 0,94 \text{ мм};$$

$$l'_c = \frac{2 + \sqrt{2^2 + 4 \cdot 250 \cdot 0,68 \left(1 - 2 \frac{0,145}{2 \cdot 2,68}\right)}}{2 \left(1 - 2 \frac{0,145}{2 \cdot 2,68}\right)} = 31,2 \text{ мм}$$

Повна довжина дуги контакту :

$$l_c = 31,2 + 0,94 = 32,14 \text{ мм}$$

4. Знаходимо енергосилові параметри прокатки. Середнє нормальне контактне напруження рівно ( $f_n > 0,12$ ;  $C_H = 0,48$ ):

$$p'_{cp} = \sigma_{cp} \left(1 + C_H \cdot f_n \cdot \frac{l_c}{h_{cp}}\right)$$

І з урахуванням натягнення

$$p_{cp} = p'_{cp} \left(1 - \frac{\sigma_{II} + \sigma_{III}}{2p'_{cp}}\right).$$

Всі параметри відомі, тому одержимо:

$$p'_{cp} = 637 \cdot \left(1 + 0,48 \cdot 0,145 \cdot \frac{17,79}{2,68}\right) = 746 \text{ Н/мм}^2$$

$$p_{cp} = 746 \left(1 - \frac{84 + 27}{2 \cdot 746}\right) = 693,78 \text{ Н/мм}^2$$

Сила прокатки:

$$P = p_{cp} \cdot l_c \cdot B = 693,78 \cdot 0,031 \cdot 1,2 = 26,8 \text{ МН}$$

Момент прокатки з урахуванням впливу натягання рівний:

$$M = 2\psi \cdot P \cdot l_c + H \cdot B \cdot R \cdot \sigma_3 \cdot \left(1 - \frac{h}{H} \cdot \frac{b}{B} \cdot \frac{\sigma_{II}}{\sigma_3}\right)$$

З роботи витікає, що



$$\psi = 0,48 \left( \frac{l_d}{l_c} \right)^2 = 0,48 \cdot \left( \frac{12,65}{31,2} \right)^2 = 0,077$$

Момент кручення на двох валках:

$$M = 2 \cdot 0,077 \cdot 26,9 \cdot 32,14 + 3,07 \cdot 1500 \cdot 0,25 \cdot 27 \cdot 10^{-6} \cdot \left( 1 - \frac{2,36}{3} \cdot \frac{84}{27} \right) =$$

$$= 0,1504 \text{ МН} \cdot \text{м}.$$

Потужність на бочці валків:

$$N = 960 \cdot M \cdot V_1 / R = 960 \cdot 0,1504 \cdot 3,3 / 0,25 = 1900 \text{ кВт}$$

Що менше потужності встановленого двигуна ( $N_{\text{дв}} = 3300 \text{ кВт}$ )

5. Визначимо температуру  $t_k$  штаби на виході з кліті по формулі:

$$t_k = \varphi t_n + \Delta t,$$

де  $\varphi$  – коефіцієнт, що враховує втрати температури штаби на міжклітьової ділянці;  $\Delta t$  – приріст температури в осередку деформації:

$$\Delta t = 0,05 m \cdot (p_{cp} + \sigma_\phi) \ln \frac{H}{h},$$

Де  $m$  – коефіцієнт, рівний для низьковуглецевої сталі:

$$m = 2,2 - 0,65 \left( \frac{t_n}{480} - 0,042 \right)^{1,4}$$

Для наших умов одержимо (для кліті 1 приймаємо  $\varphi = 1$ ):

$$m = 2,2 - 0,65 \left( \frac{25}{480} - 0,042 \right)^{1,4} = 2,199;$$

$$\Delta t = 0,05 \cdot 2,199 \cdot (817 + 597) \ln \frac{3}{2,36} = 37,3^\circ\text{C}$$

$$t_k = 1 \cdot 25 + 37,3 = 62,3^\circ\text{C}$$

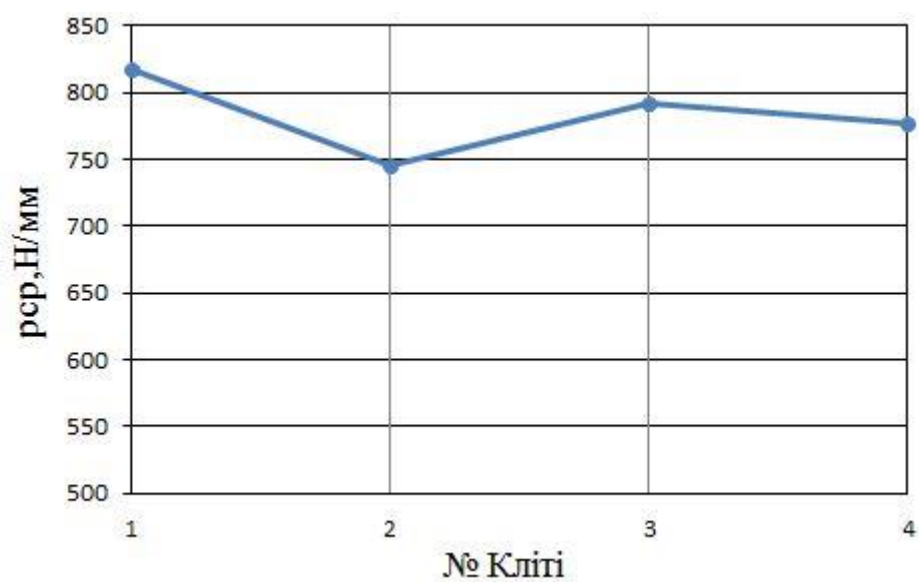


Рисунок 2.3- Середнє нормальне контакте напруження з урахуванням натягнення відносно 4-х клітей.

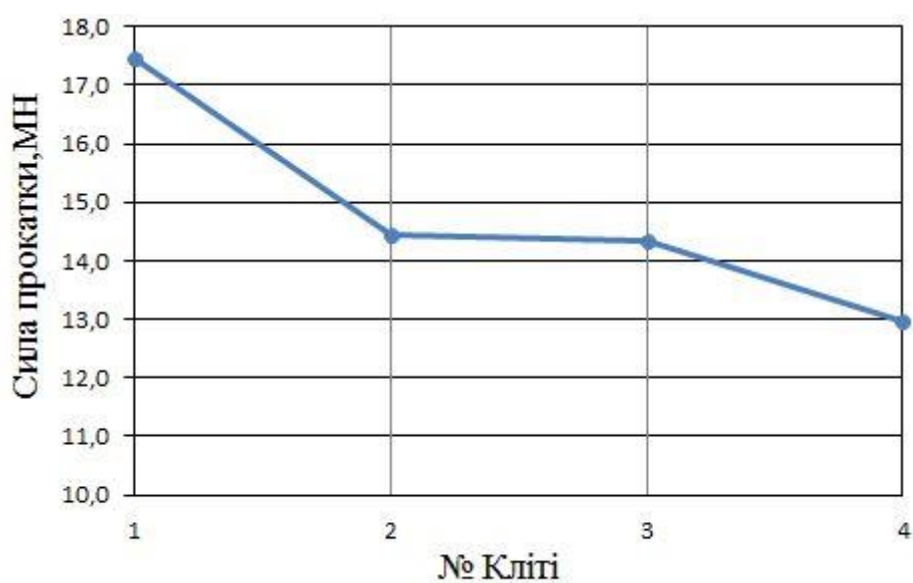


Рисунок 2.4 – Змінення сили прокатки відносно 4-х клітей.

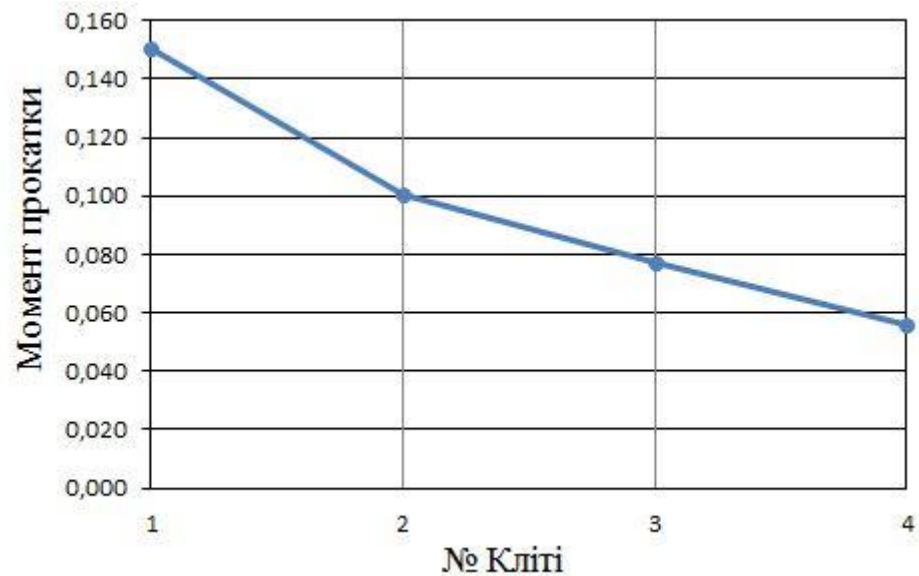


Рисунок 2.5 – Зміна моменту прокатки відносно 4-х клітей

### Прохід №1

Визначимо базовий коефіцієнт тертя, поправочні коефіцієнти, що враховують відповідно величину обтиснення, шорсткість поверхні штаби, тип технологічного мастила і температуру штаби. Для наведених вихідних даних за формулами (2.3) – (2.8) ( $k_{cm} = 1$ ;  $R_a = 5$  мкм;  $R_{an} = 2,5$  мкм;) отримаємо:

$$f_0 = 1,164 \cdot (0,062 + 0,005(5 - 0,6)) = 0,098;$$

$$k_v = 0,56 + 0,7(1 - 0,025 \cdot 2,82)^2 = 1,164$$

$$k_d = 0,5 + 1,77 \cdot 0,26 + 0,165 \cdot 5 (1 - 3,33 \cdot 0,26) = 1,07;$$

$$k_{\pi} = 1,09 - 0,05 \cdot 2,5 = 0,965.$$

Для розрахунку коефіцієнта  $k_t$  в проході 1 початкову температуру штаби можна приймати в межах 20...300С. У наступних проходах початкову температуру штаби перед кліттю слід приймати рівною кінцевій температурі  $t_k$  попереднього проходу з урахуванням втрат температури  $\Delta t_{II} = 10...20^{\circ}C$

Для нашого розрахунку в кліті 1 приймаємо  $t_n = 25^{\circ}C$  и коефіцієнт  $k_t$  из

формулы (2.7) дорівнює:

$$a = 0,31 + 1,7 \cdot 0,26 \approx 0,752;$$

$$c = 1,2 - 2,8 \cdot 0,26 \approx 0,472;$$

$$n = 3,84 - 5,7 \cdot 0,26 \approx 2,358;$$

$$k_t = 0,752 + 0,472 \cdot (1,11 - 0,0044 \cdot 25)^{2,358} = 1,22$$

Загальна величина коефіцієнта тертя з формули (2.3) складає:

$$f = 0,098 \cdot 1,07 \cdot 0,965 \cdot 1,22 = 0,124$$

Показник тертя дорівнює:

$$f_{\Pi} = 1,6f - 0,018$$

$$f_{\Pi} = 1,6 \cdot 0,124 - 0,018 = 0,18$$

Розрахуємо напруження течії металу використовуючі формули (2.9-2.16). Напруження течії розраховуємо при максимальному вмісті хімічних елементів в сталі.

Сталь марки Ст.08кп містить наступні хімічні елементи (%): (0,09 – 0,15) С;  $\leq 0,03$  Si; (0,35...0,5) Mn. Вуглецевий еквівалент для вуглецевої сталі в загальному випадку дорівнює:

$$C_{\Sigma} = 0,08 + \frac{0,01}{24} + \frac{0,38}{6} + \frac{0,06}{40} + \frac{0,02}{5} = 0,149;$$

Базове (вихідне після гарячої прокатки) напруження течії і прирощення відповідно дорівнюють:

$$\sigma_{T0} = 210 + 263 \cdot 0,149 = 249,2 \text{ Н/мм}^2;$$

$$\Delta\sigma_T = 209 + 460 \cdot 0,149 = 277,5 \text{ Н/мм}^2;$$

Напруження течії металу після кліті визначають по формулі

$$k_\varepsilon = 1 - \left(1 - \frac{0,26}{0,4}\right)^{1,58} = 0,82$$

$$\sigma_{T1} = 249,2 + 277,5 \cdot 0,82 = 476,75 \text{ Н/мм}^2$$

У результаті впливу швидкості і температури деформації напруження течії металу при прокатці змінюється порівняно з отриманим по формулі (2.12). Відповідно з дослідженнями Ю. Б. Сігалова і А. П. Грудєва врахувати цей вплив пропонується спеціальними коефіцієнтами [12].

Оскільки досліджували зміни напруження течії, тобто без врахування ступеня деформації, вираз для визначення  $\sigma_T$  в кінці осередку деформації слід записати таким чином:

Для першого проходу довжина  $l_C$  буде:

$$l_c = 1,4 \cdot \sqrt{300 \cdot 0,68} = 18,02 \text{ мм},$$

А швидкість деформації:

$$u = 2820 \cdot 0,24 / 18,02 = 37,55 \text{ с}^{-1}.$$

З формул (2.16) отримаємо:

$$n_u = 1 + 0,38 \cdot \left(0,5 + \frac{\ln 37,55}{13,8}\right)^2 = 1,219;$$

$$n_t = 0,8 + 0,23 \cdot \left(1 - \frac{25}{300}\right)^2 = 0,993.$$

Тоді з формул (2.13) і (2.14) отримаємо:

$$\sigma_{T1} = 1,219 \cdot 0,993 \cdot 249,2 + 277,5 \cdot 0,82 = 529,19 \text{ Н/мм}^2;$$

$$\sigma_{T(i-1)} = \sigma_{T0} = 249,2 \text{ Н/мм}^2.$$

З виразу (2.15) отримаємо:

$$\sigma_{\phi} = 1,15 \cdot [249,2 + 0,67 \cdot (529,19 - 249,2)] = 502,205 \text{ Н/мм}^2$$

Визначимо довжину дуги контакту з урахуванням пружних деформацій валків і штаби:

$$\sigma_3 = 0,15 \cdot \sigma_{T0} = 0,15 \cdot 249,2 = 37,38 \text{ Н/мм}^2;$$

$$\sigma_{II} = 0,15 \cdot \sigma_{T1} = 0,15 \cdot 529,19 = 79,37 \text{ Н/мм}^2.$$

З виразу (2.21) знайдемо:

$$n_{cp} = 1 - \frac{79,37 + 37,38}{2 \cdot 505,205} = 0,885;$$

$$n_1 = 1 - \frac{79,37}{529,19} = 0,851.$$

З формули (2.19) знаходимо параметри  $C$  і  $x_2$ :

$$C = 0,885 \cdot 505,205 \cdot \frac{250}{47500} = 2,31 \text{ мм};$$

$$x_2 = 0,851 \cdot 505,205 \cdot \frac{250}{95000} = 1,117 \text{ мм}.$$

Частина дуги контакту з виразу (2.18) дорівнює:

$$l'_c = \frac{2,31 + \sqrt{2,31^2 + 5,33 \cdot 500 \cdot 0,65 \cdot \left(1 - 2,31 \cdot \frac{0,18}{2 \cdot 2,175}\right)}}{2 \cdot \left(1 - 2,31 \cdot \frac{0,18}{2 \cdot 2,175}\right)} = 17,56 \text{ мм.}$$

Повна довжина дуги контакту дорівнює:

$$l_c = 17,56 + 1,117 = 18,677 \text{ мм.}$$

Знаходимо енергосилові параметри прокатки. Середнє нормальне контактне напруження дорівнює за формулами (2.22-2.23), при  $f_{\Pi} = 0,144$  ( $f_{\Pi} > 0,12$ ) коефіцієнт  $C_H = 0,48$ .

Всі параметри відомі, отримаємо:

$$p'_{cp} = 505,205 \cdot \left(1 + 0,48 \cdot 0,18 \cdot \frac{18,677}{2,175}\right) = 878,55 \text{ Н/мм}^2;$$

$$p_{cp} = 878,55 \cdot \left(1 - \frac{79,37 + 37,38}{2 \cdot 878,55}\right) = 820,56 \text{ Н/мм}^2.$$

Сила прокатки за формулою (2.24) дорівнює:

$$P = 820,56 \cdot 0,18677 \cdot 1,015 = 15,555 \text{ МН.}$$

Момент прокатки з урахуванням натягу визначимо за формулами (2.25-2.38).

Виконаємо розрахунок коефіцієнта положення рівнодіючих сил за формулами В. О. Ніколаєва (2.26, 2.28),

$$\psi = 0,5(18,677/2,175)^{-0,092} = 0,42$$

$$\psi = \frac{1,82(1+0,86 \cdot 0,18 \cdot 18,677/2,175)}{2 \cdot 2,5 \cdot (1+0,48 \cdot 0,18 \cdot 18,677/2,175)} = 0,493$$

Виконаємо розрахунок коефіцієнта положення рівнодіючих сил за формулами А. А. Корольова (2.27):

$$m = 0,124 \frac{18,677}{2,175} = 1,06;$$

$$\psi = \frac{1}{2-0,26} \left[ 1 - 0,26 \left( \frac{2,718^{1,06}}{2,718^{1,06}-1} - \frac{1}{1,06} \right) \right] = 0,484;$$

Коефіцієнт положення рівнодіючих сил з урахуванням пружного стиснення валків за формулами:

В. О. Ніколаєва:

$$\psi_C = 0,42 \cdot \left( \frac{\sqrt{\frac{600 \cdot 0,68}{2}}}{18,677} \right)^2 = 0,23; \quad (2.34)$$

А. А. Корольова:

$$\psi_C = 0,484 \cdot \left( \frac{\sqrt{300 \cdot 0,68}}{18,677} \right)^2 = 0,267; \quad (2.35)$$

П. І. Полухіна:

$$\psi_C = 0,48 \cdot \left( \frac{\sqrt{300 \cdot 0,68}}{18,677} \right)^2 = 0,265; \quad (2.36)$$



О. І. Целікова:

$$\begin{aligned}\psi_c &= \psi - x_2/l_c; \\ \psi_c &= 0,42 - 1,117/18,677 = 0,37;\end{aligned}\tag{2.37}$$

В. О. Ніколаєва:

$$\psi_c = 0,484 \cdot \left(\frac{\sqrt{300 \cdot 0,65}}{18,677}\right)^2 = 0,267;\tag{2.38}$$

Крутний момент з формули (2.25) на двох валках, з різними значеннями коефіцієнта положення рівнодіючих сил з урахуванням пружного стиснення валків за формулами:

В. О. Ніколаєва

$$\begin{aligned}M &= 2 \cdot 0,23 \cdot 15,555 \cdot 0,18677 + 2,5 \cdot 1015 \cdot 300 \cdot 37,38 \cdot 10^{-6} \\ &\cdot \left(1 - \frac{1,82}{2,5} \cdot \frac{79,37}{37,38}\right) / 1000 = 0,122 \text{ МН} \cdot \text{м}\end{aligned}$$

А.А. Корольова:

$$\begin{aligned}M &= 2 \cdot 0,267 \cdot 15,555 \cdot 0,18677 + 2,5 \cdot 1015 \cdot 300 \cdot 37,38 \cdot 10^{-6} \\ &\cdot \left(1 - \frac{1,82}{2,5} \cdot \frac{79,37}{37,38}\right) / 1000 = 0,1651 \text{ МН} \cdot \text{м}\end{aligned}$$

П. І. Полухіна:

$$\begin{aligned}M &= 2 \cdot 0,265 \cdot 15,555 \cdot 0,18677 + 2,5 \cdot 1015 \cdot 300 \cdot 37,38 \cdot 10^{-6} \\ &\cdot \left(1 - \frac{1,82}{2,5} \cdot \frac{79,37}{37,38}\right) / 1000 = 0,1627 \text{ МН} \cdot \text{м}\end{aligned}$$

О. І. Целікова:

$$M = 2 \cdot 0,37 \cdot 15,555 \cdot 0,18677 + 2,5 \cdot 1015 \cdot 300 \cdot 37,38 \cdot 10^{-6} \\ \cdot \left(1 - \frac{1,82}{2,5} \cdot \frac{79,37}{37,38}\right) / 1000 = 0,1875 \text{ МН} \cdot \text{м}$$

В. О. Ніколаєва:

$$M = 2 \cdot 0,267 \cdot 15,555 \cdot 0,18677 + 2,5 \cdot 1015 \cdot 300 \cdot 37,38 \cdot 10^{-6} \\ \cdot \left(1 - \frac{1,82}{2,5} \cdot \frac{79,37}{37,38}\right) / 1000 = 0,1664 \text{ МН} \cdot \text{м}$$

Потужність на бочці валків (для двох валків):

$$N = 960 \cdot 0,122 \cdot \frac{2,82}{0,3} = 1102,73 \text{ кВт.}$$

$$N = 960 \cdot 0,1651 \cdot \frac{2,82}{0,3} = 1489,86 \text{ кВт.}$$

$$N = 960 \cdot 0,1627 \cdot \frac{2,82}{0,3} = 1468,20 \text{ кВт.}$$

$$N = 960 \cdot 0,1875 \cdot \frac{2,82}{0,3} = 1692 \text{ кВт.}$$

$$N = 960 \cdot 0,1664 \cdot \frac{2,82}{0,3} = 1501,59 \text{ кВт.}$$

Визначимо температуру штаби  $t_k$  на виході з кліти за формулами (2.30-2.32):

Коефіцієнт, для низьковуглецевої сталі дорівнює:

$$m = 2,2 - 0,65 \cdot \left(\frac{25}{480} - 0,042\right)^{1,4} = 2,2;$$

Приріст температури в осередку деформації за формулою А. П.

Чекмарьова:

$$\Delta t = 0,05 \cdot 2,5 \cdot (820,56 + 502,205) \cdot \ln(2,5/1,85) = 49,60 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Температуру штаби:

$$t_k = 1 \cdot 25 + 49,60 = 74,6 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

### Прохід №2

Визначимо базовий коефіцієнт тертя, поправочні коефіцієнти, що враховують відповідно величину обтиснення, шорсткість поверхні штаби, тип технологічного мастила і температуру штаби. Для наведених вихідних даних за формулами (2.3) – (2.8) ( $k_{cm} = 1,0$ ;  $R_a = 5 \text{ мкм}$ ;  $R_{an} = 2,5 \text{ мкм}$ ;) отримаємо:

$$f_0 = 1,1364 \cdot (0,062 + 0,005(5 - 0,6)) = 0,095;$$

$$k_v = 0,56 + 0,7(1 - 0,025 \cdot 3,6)^2 = 1,1364$$

$$k_d = 0,5 + 1,77 \cdot 0,292 + 0,165 \cdot 5 (1 - 3,33 \cdot 0,292) = 1,04;$$

$$k_n = 1,09 - 0,05 \cdot 2,5 = 0,965.$$

Для розрахунку коефіцієнта  $k_t$  в проході 1 початкову температуру штаби можна приймати в межах 20...300С. У наступних проходах початкову температуру штаби перед кліттю слід приймати рівною кінцевій температурі  $t_k$  попереднього проходу з урахуванням втрат температури  $\Delta t_{II} = 10...20^0 \text{ } ^\circ\text{C}$

Для нашого розрахунку в кліті 1 приймаємо  $t_n = 25^0\text{C}$  и коефіцієнт  $k_t$  из формулы (2.7) дорівнює:

$$a = 0,31 + 1,7 \cdot 0,292 = 0,8064;$$

$$c = 1,2 - 2,8 \cdot 0,292 = 0,382;$$

$$n = 3,84 - 5,7 \cdot 0,292 = 2,358;$$

$$k_t = 0,8064 + 0,38 \cdot (1,11 - 0,0044 \cdot 68,288)^{2,176} = 1,05$$

Загальна величина коефіцієнта тертя з формули (2.3) складає:

$$f = 0,095 \cdot 1,04 \cdot 0,965 \cdot 1,05 = 0,1$$

Показник тертя дорівнює:

$$f_{\Pi} = 1,6f - 0,018$$

$$f_{\Pi} = 1,6 \cdot 0,1 - 0,018 = 0,143$$

Напруження течії металу після кліті визначають по формулі

$$k_{\varepsilon} = 1 + 0,87(0,476 - 0,4)^{0,5} = 1,24$$

Для другого проходу довжина  $l_c$  буде:

$$l_c = 1,4 \cdot \sqrt{300 \cdot 0,55} = 18,226 \text{ мм,}$$

А швидкість деформації:

$$u = 3500 \cdot 0,484 / 18,226 = 71,26 \text{ с}^{-1}.$$

З формул (2.16) отримаємо:

$$n_u = 1 + 0,38 \cdot \left(0,5 + \frac{\ln 71,26}{13,8}\right)^2 = 1,24;$$

$$n_t = 0,8 + 0,23 \cdot \left(1 - \frac{74,7}{300}\right)^2 = 0,932.$$

Тоді з формул (2.13) і (2.14) отримаємо:

$$\begin{aligned}\sigma_{T1} &= 0,932 \cdot 249,2 + 277,5 \cdot 1,25 = 579 \text{ Н/мм}^2; \\ \sigma_{T(i-1)} &= n_t \cdot \sigma_{T0} + \Delta\sigma_T \cdot k_{\varepsilon(i-1)} = 431,933 \text{ Н/мм}^2.\end{aligned}$$

З виразу (2.15) отримаємо:

$$\sigma_\phi = 1,15 \cdot [431,933 + 0,67 \cdot (602,97 - 431,933)] = 628,44 \text{ Н/мм}^2$$

Визначимо довжину дуги контакту з урахуванням пружних деформацій валків і штаби:

$$\begin{aligned}\sigma_3 &= 0,15 \cdot \sigma_{T0} = 0,15 \cdot 431,933 = 64,78 \text{ Н/мм}^2; \\ \sigma_{II} &= 0,15 \cdot \sigma_{T1} = 0,15 \cdot 602,97 = 90,44 \text{ Н/мм}^2.\end{aligned}$$

З виразу (2.21) знайдемо:

$$\begin{aligned}n_{cp} &= 1 - \frac{67,78 + 90,44}{2 \cdot 628,44} = 0,88; \\ n_1 &= 1 - \frac{90,44}{602,97} = 0,851.\end{aligned}$$

З формули (2.19) знаходимо параметри  $C$  і  $x_2$ :

$$\begin{aligned}C &= 0,88 \cdot 628,44 \cdot \frac{300}{47500} = 3,49 \text{ мм}; \\ x_2 &= 0,851 \cdot 628,44 \cdot \frac{300}{95000} = 1,68 \text{ мм}.\end{aligned}$$

Частина дуги контакту з виразу (2.18) дорівнює:

$$l'_c = \frac{3,49 + \sqrt{3,49^2 + 4 \cdot 300 \cdot 0,55 \cdot \left(1 - 2,78 \cdot \frac{0,143}{2 \cdot 1,54}\right)}}{2 \cdot \left(1 - 3,49 \cdot \frac{0,143}{2 \cdot 1,54}\right)} = 16,11 \text{ мм.}$$

Повна довжина дуги контакту дорівнює:

$$l_c = 16,11 + 1,68 = 17,79 \text{ мм.}$$

Знаходимо енергосилові параметри прокатки. Середнє нормальне контактне напруження дорівнює за формулами (2.22-2.23), при  $f_{\Pi} = 0,144$  ( $f_{\Pi} > 0,12$ ) коефіцієнт  $C_H = 0,48$ .

Всі параметри відомі, отримаємо:

$$p'_{\text{ср}} = 663,96 \cdot \left(1 + 0,48 \cdot 0,143 \cdot \frac{17,79}{1,54}\right) = 1123,53 \text{ Н/мм}^2;$$

$$p_{\text{ср}} = 1123,53 \cdot \left(1 - \frac{67,48 + 90,44}{2 \cdot 1123,53}\right) = 1044,88 \text{ Н/мм}^2.$$

Сила прокатки за формулою (2.24) дорівнює:

$$P = 1044,88 \cdot 0,1779 \cdot 1,015 = 18,86 \text{ МН.}$$

Момент прокатки з урахуванням натягу визначимо за формулами (2.25-2.38).

Виконаємо розрахунок коефіцієнта положення рівнодіючих сил за формулами В. О. Ніколаєва (2.26, 2.28),

$$\psi = 0,5(17,79/1,54)^{-0,092} = 0,41$$

$$\psi = \frac{1,27(1+0,86 \cdot 0,143 \cdot 17,79/1,54)}{2 \cdot 1,43 \cdot (1+0,48 \cdot 0,143 \cdot 17,79/1,54)} = 0,489$$

Виконаємо розрахунок коефіцієнта положення рівнодіючих сил за формулами А.А. Корольова (2.27):

$$m = 0,091 \frac{17,79}{1,54} = 1,11;$$

$$\psi = \frac{1}{2-0,292} \left[ 1 - 0,292 \left( \frac{2,718^{1,11}}{2,718^{1,11}-1} - \frac{1}{1,11} \right) \right] = 0,482;$$

Коефіцієнт положення рівнодіючих сил з урахуванням пружного стиснення валків за формулами:

В. О. Ніколаєва:

$$\psi_C = 0,41 \cdot \left( \frac{\sqrt{\frac{600}{2} \cdot 0,55}}{17,79} \right)^2 = 0,20;$$

А. А. Корольова:

$$\psi_C = 0,482 \cdot \left( \frac{\sqrt{300 \cdot 0,55}}{17,79} \right)^2 = 0,25;$$

П. І. Полухіна:

$$\psi_C = 0,48 \cdot \left( \frac{\sqrt{300 \cdot 0,55}}{17,79} \right)^2 = 0,248;$$

О. І. Целікова:

$$\psi_c = \psi - x_2/l_c;$$

$$\psi_c = 0,41 - 1,68/17,79 = 0,32;$$

В. О. Ніколаєва:

$$\psi_c = 0,489 \cdot \left( \frac{\sqrt{300 \cdot 0,55}}{17,79} \right)^2 = 0,253;$$

Крутний момент з формули (2.25) на двох валках, з різними значеннями коефіцієнта положення рівнодіючих сил з урахуванням пружного стиснення валків за формулами:

В. О. Ніколаєва

$$M = 2 \cdot 0,20 \cdot 17,79 \cdot 18,86 + 1,82 \cdot 1015 \cdot 300 \cdot 64,78 \cdot 10^{-6}$$

$$\cdot \left( 1 - \frac{1,27}{1,82} \cdot \frac{90,44}{64,78} \right) / 1000 = 0,1343 \text{ МН} \cdot \text{м}$$

А. А. Корольова:

$$M = 2 \cdot 0,25 \cdot 17,79 \cdot 18,86 + 1,82 \cdot 1015 \cdot 300 \cdot 64,78 \cdot 10^{-6}$$

$$\cdot \left( 1 - \frac{1,27}{1,82} \cdot \frac{90,44}{64,78} \right) / 1000 = 0,1752 \text{ МН} \cdot \text{м}$$

П. І. Полухіна:

$$M = 2 \cdot 0,248 \cdot 17,79 \cdot 18,86 + 1,82 \cdot 1015 \cdot 300 \cdot 64,78 \cdot 10^{-6}$$

$$\cdot \left( 1 - \frac{1,27}{1,82} \cdot \frac{90,44}{64,78} \right) / 1000 = 0,1449 = 0,1636 \text{ МН} \cdot \text{м}$$



О. І. Целікова:

$$M = 2 \cdot 0,32 \cdot 17,79 \cdot 18,86 + 1,82 \cdot 1015 \cdot 300 \cdot 64,78 \cdot 10^{-6} \\ \cdot \left(1 - \frac{1,27}{1,82} \cdot \frac{90,44}{64,78}\right) / 1000 = 0,1449 = 0,2186 \text{ МН} \cdot \text{м}$$

В. О. Ніколаєва:

$$M = 2 \cdot 0,253 \cdot 17,79 \cdot 18,86 + 1,82 \cdot 1015 \cdot 300 \cdot 64,78 \cdot 10^{-6} \\ \cdot \left(1 - \frac{1,27}{1,82} \cdot \frac{90,44}{64,78}\right) / 1000 = 0,1621 \text{ МН} \cdot \text{м}$$

Потужність на бочці валків (для двох валків):

$$N = 960 \cdot 0,1343 \cdot \frac{3,6}{0,3} = 1547,13 \text{ кВт.}$$

$$N = 960 \cdot 0,1752 \cdot \frac{3,6}{0,3} = 1903,1 \text{ кВт.}$$

$$N = 960 \cdot 0,1636 \cdot \frac{3,6}{0,3} = 1884,67 \text{ кВт.}$$

$$N = 960 \cdot 0,2186 \cdot \frac{3,6}{0,3} = 2518,27 \text{ кВт.}$$

$$N = 960 \cdot 0,1621 \cdot \frac{3,6}{0,3} = 1867,39 \text{ кВт.}$$

Визначимо температуру штаби  $t_k$  на виході з кліті за формулами (2.30-2.32):

Коефіцієнт, для низьковуглецевої сталі дорівнює:

$$m = 2,2 - 0,65 \cdot \left(\frac{76,4}{480} - 0,042\right)^{1,4} = 2,1;$$

Приріст температури в осередку деформації за формулою А. П. Чекмарьова:

$$\Delta t = 0,05 \cdot 2,1 \cdot (628,64 + 1044,88) \cdot \ln(1,82/1,27) = 66,77 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Температуру штаби:

$$t_k = 0,7 \cdot 76,4 + 66,77 = 120,093^\circ\text{C}.$$

### Прохід №3

Визначимо базовий коефіцієнт тертя, поправочні коефіцієнти, що враховують відповідно величину обтиснення, шорсткість поверхні штаби, тип технологічного мастила і температуру штаби. Для наведених вихідних даних за формулами (2.3) – (2.8) ( $k_{cm} = 1,0$ ;  $R_a = 5 \text{ мкм}$ ;  $R_{an} = 2,5 \text{ мкм}$ ;) отримаємо:

$$f_0 = 1,1061 \cdot (0,062 + 0,005(5 - 0,6)) = 0,090;$$

$$k_v = 0,56 + 0,7(1 - 0,025 \cdot 5,35)^2 = 1,03$$

$$k_d = 0,5 + 1,77 \cdot 0,31 + 0,165 \cdot 5 (1 - 3,33 \cdot 0,231) = 1;$$

$$k_n = 1,09 - 0,05 \cdot 2,5 = 0,965.$$

Для розрахунку коефіцієнта  $k_t$  в проході 1 початкову температуру штаби можна приймати в межах 20...300С. У наступних проходах початкову температуру штаби перед кліттю слід приймати рівною кінцевій температурі  $t_k$  попереднього проходу з урахуванням втрат температури  $\Delta t_{II} = 10...20^\circ\text{C}$

Для нашого розрахунку в кліті 1 приймаємо  $t_n = 25^\circ\text{C}$  и коефіцієнт  $k_t$  из формулы (2.7) дорівнює:

$$a = 0,31 + 1,7 \cdot 0,31 = 0,837;$$

$$c = 1,2 - 2,8 \cdot 0,31 = 0,34;$$

$$n = 3,84 - 5,7 \cdot 0,31 = 2,370;$$

$$k_t = 0,837 + 0,34 \cdot (1,11 - 0,0044 \cdot 68,288)^{2,086} = 0,94$$

Загальна величина коефіцієнта тертя з формули (2.3) складає:

$$f = 0,092 \cdot 1,01 \cdot 0,965 \cdot 0,94 = 0,087$$

Показник тертя дорівнює:

$$f_{\Pi} = 1,6f - 0,018$$

$$f_{\Pi} = 1,6 \cdot 0,087 - 0,018 = 0,114$$

Напруження течії металу після кліті визначають по формулі

$$k_{\varepsilon} = 1 + 0,87(0,498 - 0,4)^{0,5} = 1,44$$

Для другого проходу довжина  $l_c$  буде:

$$l_c = 1,4 \cdot \sqrt{300 \cdot 0,42} = 16,775 \text{ мм,}$$

А швидкість деформації:

$$u = 3800 \cdot 0,681 / 16,775 = 58,32 \text{ с}^{-1}.$$

З формул (2.16) отримаємо:

$$n_u = 1 + 0,38 \cdot \left(0,5 + \frac{\ln 58,32}{13,8}\right)^2 = 1,3;$$

$$n_t = 0,8 + 0,23 \cdot \left(1 - \frac{76,4}{300}\right)^2 = 0,972.$$

Тоді з формул (2.13) і (2.14) отримаємо:

$$\sigma_{T1} = 0,972 \cdot 1,3 \cdot 249,2 + 277,5 \cdot 1,44 = 602,97 \text{ Н/мм}^2;$$

$$\sigma_{T(i-1)} = n_t \cdot \sigma_{T0} + \Delta\sigma_T \cdot k_{\varepsilon(i-1)} = 411,933 \text{ Н/мм}^2.$$

З виразу (2.15) отримаємо:

$$\sigma_\phi = 1,15 \cdot [411,933 + 0,67 \cdot (602,97 - 411,933)] = 680,9 \text{ Н/мм}^2$$

Визначимо довжину дуги контакту з урахуванням пружних деформацій валків і штаби:

$$\sigma_3 = 0,15 \cdot \sigma_{T0} = 0,15 \cdot 411,933 = 61,78 \text{ Н/мм}^2;$$

$$\sigma_{II} = 0,15 \cdot \sigma_{T1} = 0,15 \cdot 602,97 = 90,44 \text{ Н/мм}^2.$$

З виразу (2.21) знайдемо:

$$n_{cp} = 1 - \frac{61,78 + 90,44}{2 \cdot 680,9} = 0,864;$$

$$n_1 = 1 - \frac{90,44}{602,97} = 0,8512.$$

З формули (2.19) знаходимо параметри  $C$  і  $x_2$ :

$$C = 0,864 \cdot 680,9 \cdot \frac{300}{47500} = 3,71 \text{ мм};$$

$$x_2 = 0,8512 \cdot 680,9 \cdot \frac{300}{95000} = 1,83 \text{ мм.}$$

Частина дуги контакту з виразу (2.18) дорівнює:

$$l'_c = \frac{3,71 + \sqrt{3,71^2 + 4 \cdot 300 \cdot 0,42 \cdot \left(1 - 2,72 \cdot \frac{0,123}{2 \cdot 1,075}\right)}}{2 \cdot \left(1 - 3,71 \cdot \frac{0,123}{2 \cdot 1,075}\right)} = 15,52 \text{ мм.}$$

Повна довжина дуги контакту дорівнює:

$$l_c = 15,52 + 1,83 = 17,35 \text{ мм.}$$

Знаходимо енергосилові параметри прокатки. Середнє нормальне контактне напруження дорівнює за формулами (2.22-2.23), при  $f_{\Pi} = 0,144$  ( $f_{\Pi} > 0,12$ ) коефіцієнт  $C_H = 0,48$ .

Всі параметри відомі, отримаємо:

$$p'_{\text{ср}} = 680,9 \cdot \left(1 + 0,48 \cdot 0,123 \cdot \frac{17,35}{1,54}\right) = 1333,80 \text{ Н/мм}^2;$$

$$p_{\text{ср}} = 1333,80 \cdot \left(1 - \frac{61,78 + 90,44}{2 \cdot 1133,80}\right) = 1265,77 \text{ Н/мм}^2.$$

Сила прокатки за формулою (2.24) дорівнює:

$$P = 1265,77 \cdot 0,1735 \cdot 1,015 = 20,76 \text{ МН.}$$

Момент прокатки з урахуванням натягу визначимо за формулами (2.25-2.38).

Виконаємо розрахунок коефіцієнта положення рівнодіючих сил за

формулами В. О. Ніколаєва (2.26, 2.28),

$$\psi = 0,5(17,35/1,34)^{-0,092} = 0,396$$

$$\psi = \frac{1,27(1+0,86 \cdot 0,123 \cdot 17,35/1,34)}{2 \cdot 1,07 \cdot (1+0,48 \cdot 0,123 \cdot 17,35/1,34)} = 0,468$$

Виконаємо розрахунок коефіцієнта положення рівнодіючих сил за формулами А.А. Корольова (2.27):

$$m = 0,072 \frac{17,35}{1,34} = 0,99;$$

$$\psi = \frac{1}{2-0,292} \left[ 1 - 0,292 \left( \frac{2,718^{0,99}}{2,718^{0,99}-1} - \frac{1}{0,99} \right) \right] = 0,480;$$

Коефіцієнт положення рівнодіючих сил з урахуванням пружного стиснення валків за формулами:

В. О. Ніколаєва:

$$\psi_c = 0,396 \cdot \left( \frac{\sqrt{\frac{600}{2} \cdot 0,41}}{17,35} \right)^2 = 0,163;$$

А. А. Корольова:

$$\psi_c = 0,480 \cdot \left( \frac{\sqrt{300 \cdot 0,41}}{17,35} \right)^2 = 0,21;$$

П. І. Полухіна:

$$\psi_c = 0,468 \cdot \left( \frac{\sqrt{300 \cdot 0,41}}{17,35} \right)^2 = 0,2;$$

О. І. Целікова:

$$\begin{aligned} \psi_c &= \psi - x_2/l_c; \\ \psi_c &= 0,396 - 1,83/17,35 = 0,296; \end{aligned}$$

В. О. Ніколаєва:

$$\psi_c = 0,468 \cdot \left( \frac{\sqrt{300 \cdot 0,41}}{17,35} \right)^2 = 0,223;$$

Крутний момент з формули (2.25) на двох валках, з різними значеннями коефіцієнта положення рівнодіючих сил з урахуванням пружного стиснення валків за формулами:

В. О. Ніколаєва

$$\begin{aligned} M &= 2 \cdot 0163 \cdot 17,79 \cdot 18,86 + 1,82 \cdot 1015 \cdot 300 \cdot 64,78 \cdot 10^{-6} \\ &\cdot \left( 1 - \frac{1,27}{1,82} \cdot \frac{90,44}{64,78} \right) / 1000 = 0,1133 \text{ МН} \cdot \text{м} \end{aligned}$$

А. А. Корольова:

$$\begin{aligned} M &= 2 \cdot 0,163 \cdot 17,35 \cdot 20,76 + 1,27 \cdot 1015 \cdot 300 \cdot 61,78 \cdot 10^{-6} \\ &\cdot \left( 1 - \frac{1,27}{0,88} \cdot \frac{90,44}{61,78} \right) / 1000 = 0,1451 \text{ МН} \cdot \text{м} \end{aligned}$$

П. І. Полухіна:

$$M = 2 \cdot 0,21 \cdot 17,79 \cdot 18,86 + 1,82 \cdot 1015 \cdot 300 \cdot 64,78 \cdot 10^{-6} \\ \cdot \left(1 - \frac{1,27}{1,82} \cdot \frac{90,44}{64,78}\right) / 1000 = 0,1449 = 0,1246 \text{ МН} \cdot \text{м}$$

О. І. Целікова:

$$M = 2 \cdot 0,296 \cdot 17,79 \cdot 18,86 + 1,82 \cdot 1015 \cdot 300 \cdot 64,78 \cdot 10^{-6} \\ \cdot \left(1 - \frac{1,27}{1,82} \cdot \frac{90,44}{64,78}\right) / 1000 = 0,1449 = 0,2546 \text{ МН} \cdot \text{м}$$

В. О. Ніколаєва:

$$M = 2 \cdot 0,253 \cdot 17,79 \cdot 18,86 + 1,82 \cdot 1015 \cdot 300 \cdot 64,78 \cdot 10^{-6} \\ \cdot \left(1 - \frac{1,27}{1,82} \cdot \frac{90,44}{64,78}\right) / 1000 = 0,1409 \text{ МН} \cdot \text{м}$$

Потужність на бочці валків (для двох валків):

$$N = 960 \cdot 0,1133 \cdot \frac{3,3}{0,3} = 1946,2 \text{ кВт.}$$

$$N = 960 \cdot 0,1451 \cdot \frac{3,3}{0,3} = 2503,4 \text{ кВт.}$$

$$N = 960 \cdot 0,1246 \cdot \frac{3,3}{0,3} = 2414 \text{ кВт.}$$

$$N = 960 \cdot 0,2546 \cdot \frac{3,3}{0,3} = 3627 \text{ кВт.}$$

$$N = 960 \cdot 0,1409 \cdot \frac{3,3}{0,3} = 2485,23 \text{ кВт.}$$

Визначимо температуру штаби  $t_k$  на виході з кліті за формулами (2.30-2.32):

Коефіцієнт, для низьковуглецевої сталі дорівнює:



$$m = 2,2 - 0,65 \cdot \left( \frac{64,78}{480} - 0,042 \right)^{1,4} = 2,05;$$

Приріст температури в осередку деформації за формулою А. П. Чекмарьова:

$$\Delta t = 0,05 \cdot 2,05 \cdot (680,9 + 1065,77) \cdot \ln(1,27/0,88) = 86,57 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Температуру штаби:

$$t_k = 0,5 \cdot 120,093 + 86,57 = 146,61 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

#### Прохід №4

Визначимо базовий коефіцієнт тертя, поправочні коефіцієнти, що враховують відповідно величину обтиснення, шорсткість поверхні штаби, тип технологічного мастила і температуру штаби. Для наведених вихідних даних ( $k_{cm} = 1,0$ ;  $R_a = 5 \text{ мкм}$ ;  $R_{an} = 2,5 \text{ мкм}$ ;) отримаємо:

$$f_0 = 1,0754 \cdot (0,062 + 0,005(5 - 0,6)) = 0,087;$$

$$k_v = 0,56 + 0,7(1 - 0,025 \cdot 7,2)^2 = 1,03$$

$$k_d = 0,5 + 1,77 \cdot 0,31 + 0,165 \cdot 5 (1 - 3,33 \cdot 0,231) = 1;$$

$$k_{\pi} = 1,09 - 0,05 \cdot 2,5 = 0,965.$$

Для розрахунку коефіцієнта  $k_t$  в проході 1 початкову температуру штаби можна приймати в межах 20...300С. У наступних проходах початкову температуру штаби перед кліттю слід приймати рівною кінцевій температурі  $t_k$  попереднього проходу з урахуванням втрат температури  $\Delta t_{\pi} = 10...20^{\circ}\text{C}$

Для нашого розрахунку в кліті 1 приймаємо  $t_n = 25^{\circ}\text{C}$  и коефіцієнт  $k_t$  из формулы (2.7) дорівнює:

$$a = 0,31 + 1,7 \cdot 0,33 = 0,871;$$

$$c = 1,2 - 2,8 \cdot 0,33 = 0,3;$$

$$n = 3,84 - 5,7 \cdot 0,33 = 2,1;$$

$$k_t = 0,871 + 0,3 \cdot (1,11 - 0,0044 \cdot 68,288)^{2,033} = 0,91$$

Загальна величина коефіцієнта тертя з формули (2.3) складає:

$$f = 0,089 \cdot 0,94 \cdot 0,965 \cdot 1,05 = 0,076$$

Показник тертя дорівнює:

$$f_{\Pi} = 1,6f - 0,018$$

$$f_{\Pi} = 1,6 \cdot 0,076 - 0,018 = 0,098$$

Напруження течії металу після кліті визначають по формулі

$$k_{\varepsilon} = 1 + 0,87(0,498 - 0,4)^{0,5} = 1,44$$

Для другого проходу довжина  $l_c$  буде:

$$l_c = 1,4 \cdot \sqrt{300 \cdot 0,27} = 13,6 \text{ мм},$$

А швидкість деформації:

$$u = 3900 \cdot 0,881/13,6 = 78,32 \text{ с}^{-1}.$$

З формул (2.16) отримаємо:

$$n_u = 1 + 0,38 \cdot \left(0,5 + \frac{\ln 78,32}{13,8}\right)^2 = 1,33;$$

$$n_t = 0,8 + 0,23 \cdot \left(1 - \frac{146,61}{300}\right)^2 = 0,862.$$

Тоді з формул (2.13) і (2.14) отримаємо:

$$\sigma_{T1} = 0,862 \cdot 249,2 + 277,5 \cdot 1,33 = 612,95 \text{ Н/мм}^2;$$

$$\sigma_{T(i-1)} = n_t \cdot \sigma_{T0} + \Delta\sigma_T \cdot k_{\varepsilon(i-1)} = 431,923 \text{ Н/мм}^2.$$

З виразу (2.15) отримаємо:

$$\sigma_\phi = 1,15 \cdot [431,933 + 0,67 \cdot (612,95 - 431,923)] = 730,2 \text{ Н/мм}^2$$

Визначимо довжину дуги контакту з урахуванням пружних деформацій валків і штаби:

$$\sigma_3 = 0,15 \cdot \sigma_{T0} = 0,15 \cdot 431,923 = 64,78 \text{ Н/мм}^2;$$

$$\sigma_{II} = 0,15 \cdot \sigma_{T1} = 0,15 \cdot 612,95 = 91,94 \text{ Н/мм}^2.$$

З виразу (2.21) знайдемо:

$$n_{cp} = 1 - \frac{64,78 + 91,94}{2 \cdot 730,2} = 0,907;$$

$$n_1 = 1 - \frac{91,94}{612,95} = 0,851.$$

З формули (2.19) знаходимо параметри  $C$  і  $x_2$ :

$$C = 0,907 \cdot 730,2 \cdot \frac{300}{47500} = 3,97 \text{ мм};$$

$$x_2 = 0,851 \cdot 730,2 \cdot \frac{300}{95000} = 1,86 \text{ мм}.$$

Частина дуги контакту з виразу (2.18) дорівнює:

$$l'_c = \frac{3,97 + \sqrt{3,97^2 + 4 \cdot 300 \cdot 0,27 \cdot \left(1 - 2,69 \cdot \frac{0,098}{2 \cdot 0,745}\right)}}{2 \cdot \left(1 - 3,97 \cdot \frac{0,098}{2 \cdot 0,745}\right)} = 13,76 \text{ мм}.$$

Повна довжина дуги контакту дорівнює:

$$l_c = 13,76 + 1,86 = 15,56 \text{ мм}.$$

Знаходимо енергосилові параметри прокатки. Середнє нормальне контактне напруження дорівнює за формулами (2.22-2.23), при  $f_{\Pi} = 0,144$  ( $f_{\Pi} > 0,12$ ) коефіцієнт  $C_H = 0,48$ .

Всі параметри відомі, отримаємо:

$$p'_{cp} = 730,2 \cdot \left(1 + 0,48 \cdot 0,114 \cdot \frac{15,56}{0,745}\right) = 1435,64 \text{ Н/мм}^2;$$

$$p_{cp} = 1235,64 \cdot \left(1 - \frac{64,78 + 91,94}{2 \cdot 1235,64}\right) = 1362,47 \text{ Н/мм}^2.$$

Сила прокатки за формулою (2.24) дорівнює:

$$P = 1362,47 \cdot 0,1556 \cdot 1,015 = 21,51 \text{ МН}.$$

Момент прокатки з урахуванням натягу визначимо за формулами (2.25-2.38).

Виконаємо розрахунок коефіцієнта положення рівнодіючих сил за формулами В. О. Ніколаєва (2.26, 2.28),

$$\psi = 0,5(15,56/0,745)^{-0,092} = 0,388$$

$$\psi = \frac{1,77(1+0,86 \cdot 0,098 \cdot 15,56/0,745)}{2 \cdot 0,88 \cdot (1+0,48 \cdot 0,098 \cdot 15,56/0,745)} = 0,437$$

Виконаємо розрахунок коефіцієнта положення рівнодіючих сил за формулами А.А. Корольова (2.27):

$$m = 0,052 \frac{15,56}{0,745} = 0,69;$$

$$\psi = \frac{1}{2-0,292} \left[ 1 - 0,292 \left( \frac{2,718^{0,69}}{2,718^{0,69}-1} - \frac{1}{0,69} \right) \right] = 0,476;$$

Коефіцієнт положення рівнодіючих сил з урахуванням пружного стиснення валків за формулами:

В. О. Ніколаєва:

$$\psi_c = 0,388 \cdot \left( \frac{\sqrt{\frac{600}{2} \cdot 0,27}}{15,56} \right)^2 = 0,131;$$

А. А. Корольова:

$$\psi_c = 0,476 \cdot \left( \frac{\sqrt{300 \cdot 0,27}}{15,56} \right)^2 = 0,163;$$

П. І. Полухіна:

$$\psi_c = 0,46 \cdot \left( \frac{\sqrt{300 \cdot 0,27}}{15,56} \right)^2 = 0,162;$$

О. І. Целікова:

$$\begin{aligned} \psi_c &= \psi - x_2/l_c; \\ \psi_c &= 0,388 - 2,12/15,56 = 0,268; \end{aligned}$$

В. О. Ніколаєва:

$$\psi_c = 0,437 \cdot \left( \frac{\sqrt{300 \cdot 0,27}}{15,56} \right)^2 = 0,1544;$$

Крутний момент з формули (2.25) на двох валках, з різними значеннями коефіцієнта положення рівнодіючих сил з урахуванням пружного стиснення валків за формулами:

В. О. Ніколаєва

$$\begin{aligned} M &= 2 \cdot 0,131 \cdot 15,56 \cdot 21,51 + 0,88 \cdot 1015 \cdot 300 \cdot 64,78 \cdot 10^{-6} \\ &\cdot \left( 1 - \frac{0,88}{0,61} \cdot \frac{91,94}{64,78} \right) / 1000 = 0,0785 \text{ МН} \cdot \text{м} \end{aligned}$$

А. А. Корольова:

$$\begin{aligned} M &= 2 \cdot 0,163 \cdot 15,56 \cdot 21,51 + 0,88 \cdot 1015 \cdot 300 \cdot 64,78 \cdot 10^{-6} \\ &\cdot \left( 1 - \frac{0,88}{0,61} \cdot \frac{91,94}{64,78} \right) / 1000 = 0,0812 \text{ МН} \cdot \text{м} \end{aligned}$$

П. І. Полухіна:

$$M = 2 \cdot 0,162 \cdot 15,56 \cdot 21,51 + 0,88 \cdot 1015 \cdot 300 \cdot 64,78 \cdot 10^{-6} \\ \cdot \left(1 - \frac{0,88}{0,61} \cdot \frac{91,94}{64,78}\right) / 1000 = 0,1449 = 0,09436 \text{ МН} \cdot \text{м}$$

О. І. Целікова:

$$M = 2 \cdot 0,268 \cdot 15,56 \cdot 21,51 + 0,88 \cdot 1015 \cdot 300 \cdot 64,78 \cdot 10^{-6} \\ \cdot \left(1 - \frac{0,88}{0,61} \cdot \frac{91,44}{64,78}\right) / 1000 = 0,1449 = 0,1738 \text{ МН} \cdot \text{м}$$

В. О. Ніколаєва:

$$M = 2 \cdot 0,1544 \cdot 15,56 \cdot 21,51 + 0,88 \cdot 1015 \cdot 300 \cdot 64,78 \cdot 10^{-6} \\ \cdot \left(1 - \frac{0,88}{0,61} \cdot \frac{91,44}{64,78}\right) / 1000 = 0,1021 \text{ МН} \cdot \text{м}$$

Потужність на бочці валків (для двох валків):

$$N = 960 \cdot 0,0785 \cdot \frac{3,3}{0,3} = 1834,33 \text{ кВт.}$$

$$N = 960 \cdot 0,0812 \cdot \frac{3,3}{0,3} = 2356,12 \text{ кВт.}$$

$$N = 960 \cdot 0,09436 \cdot \frac{3,3}{0,3} = 2278,45 \text{ кВт.}$$

$$N = 960 \cdot 0,1738 \cdot \frac{3,3}{0,3} = 3827,21 \text{ кВт.}$$

$$N = 960 \cdot 0,1021 \cdot \frac{3,3}{0,3} = 2381,18 \text{ кВт.}$$

Визначимо температуру штаби  $t_k$  на виході з кліті за формулами (2.30-2.32):

Коефіцієнт, для низьковуглецевої сталі дорівнює:

$$m = 2,2 - 0,65 \cdot \left( \frac{146,61}{480} - 0,042 \right)^{1,4} = 1,97;$$

Приріст температури в осередку деформації за формулою А. П.

Чекмарьова:

$$\Delta t = 0,05 \cdot 1,97 \cdot (730,2 + 1065,77) \cdot \ln(0,88/0,61) = 176,9 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Температуру штаби:

$$t_k = 0,5 \cdot 146,61 + 176,9 = 250,2^\circ\text{C}.$$

| № проходу | H,<br>мм | h,<br>мм | $\Delta h$ ,<br>мм | $\varepsilon$ ,<br>% | $\sigma_{\phi}$ ,<br>Н/мм <sup>2</sup> | $l_c$ ,<br>мм | $P_{cp}$ ,<br>Н/мм <sup>2</sup> | P,<br>МН | V,<br>м/с | $t_k$ ,<br>°C | f     | $f_{II}$ |
|-----------|----------|----------|--------------------|----------------------|--|---------------|---------------------------------|----------|-----------|---------------|-------|----------|
| 1         | 2,5      | 1,82     | 0,68               | 26                   | 502,205                                | 18,677        | 820,56                          | 15,555   | 2,82      | 74,6          | 0,124 | 0,18     |
| 2         | 1,82     | 1,27     | 0,55               | 29,2                 | 628,44                                 | 17,79         | 1044,88                         | 18,86    | 3,6       | 120,093       | 0,1   | 0,143    |
| 3         | 1,27     | 0,88     | 0,42               | 31,3                 | 680,9                                  | 17,35         | 1265,77                         | 20,76    | 5,38      | 146,61        | 0,087 | 0,114    |
| 4         | 0,88     | 0,61     | 0,27               | 27,8                 | 730,2                                  | 15,56         | 1362,47                         | 21,51    | 7,46      | 250,2         | 0,076 | 0,098    |



Таблиця 2.4 – Коефіцієнт положення рівнодіючих сил за різними формулами

| № проходу | $\psi$ – по формулі В. О. Ніколаєва | $\psi$ – по формулі А. А. Корольова | $\psi$ – по формулі В. О. Ніколаєва |
|-----------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|
| 1         | 0,42                                | 0,484                               | 0,492                               |
| 2         | 0,41                                | 0,482                               | 0,489                               |
| 3         | 0,396                               | 0,480                               | 0,468                               |
| 4         | 0,388                               | 0,476                               | 0,437                               |

Таблиця 2.5 - Коефіцієнт положення рівнодіючих сил з урахуванням пружного стиснення валків за різними формулами

| № проходу | $\psi_c$ – по формулі В. О. Ніколаєва (2.34) | $\psi_c$ – по формулі А. А. Корольова (2.35) | $\psi_c$ – по формулі П. І. Полухіна (2.36) | $\psi_c$ – по формулі О. І. Целікова (2.37) | $\psi_c$ – по формулі В. О. Ніколаєва (2.38) |
|-----------|--|--|---|---|--|
| 1         | 0,23   | 0,267  | 0,265                                       | 0,37  | 0,267  |
| 2         | 0,20   | 0,25   | 0,248                                       | 0,32  | 0,253  |
| 3         | 0,163  | 0,21   | 0,2   | 0,296                                       | 0,223  |
| 4         | 0,131  | 0,163  | 0,162                                       | 0,268                                       | 0,1544                                       |

Таблиця 2.6 – Крутний момент з урахуванням за різними формулами

| № проходу | М, МН · м<br>$\psi_C$ – по<br>формулі В. О.<br>Ніколаєва<br>(2.34) | М, МН · м<br>$\psi_C$ – по<br>формулі А.<br>А. Корольова<br>(2.35) | М, МН · м<br>$\psi_C$ – по<br>формулі П.<br>І. Полухіна<br>(2.36) | М, МН · м<br>$\psi_C$ – по<br>формулі О.<br>І. Целікова<br>(2.37) | М, МН · м<br>$\psi_C$ – по<br>формулі В.<br>О.<br>Ніколаєва<br>(2.38) |
|-----------|--|--|---|---|---|
| 1         | 0,122  | 0,1651   | 0,1527  | 0,1755  | 0,1564  |
| 2         | 0,1343   | 0,1752   | 0,1741  | 0,2206  | 0,173   |
| 3         | 0,1133   | 0,1561   | 0,1562  | 0,2195  | 0,1538  |
| 4         | 0,0785   | 0,1012   | 0,101   | 0,1648  | 0,1052  |

Таблиця 2.7 – Потужність з урахуванням  $\psi_C$  за різними формулами

| № проходу | N, кВт<br>$\psi_C$ – по<br>формулі В.<br>О. Ніколаєва<br>(2.34) | N, кВт<br>$\psi_C$ – по<br>формулі А. А.<br>Корольова<br>(2.35) | N, кВт<br>$\psi_C$ – по<br>формулі П.<br>І. Полухіна<br>(2.36) | N, кВт<br>$\psi_C$ – по<br>формулі О.<br>І. Целікова<br>(2.37) | N, кВт<br>$\psi_C$ – по<br>формулі<br>В. О.<br>Ніколаєва<br>(2.38) |
|-----------|---|---|--|--|--|
| 1         | 1102,73   | 1489,86   | 1468,20  | 1692   | 1501,59  |
| 2         | 1547,13   | 1903,1  | 1884,67  | 2518,27  | 1867,39  |
| 3         | 1946,2  | 2503  | 2414,4   | 3627   | 2485,23  |
| 4         | 1834,33   | 2356,12   | 2278,45  | 3827,21  | 2381,18  |

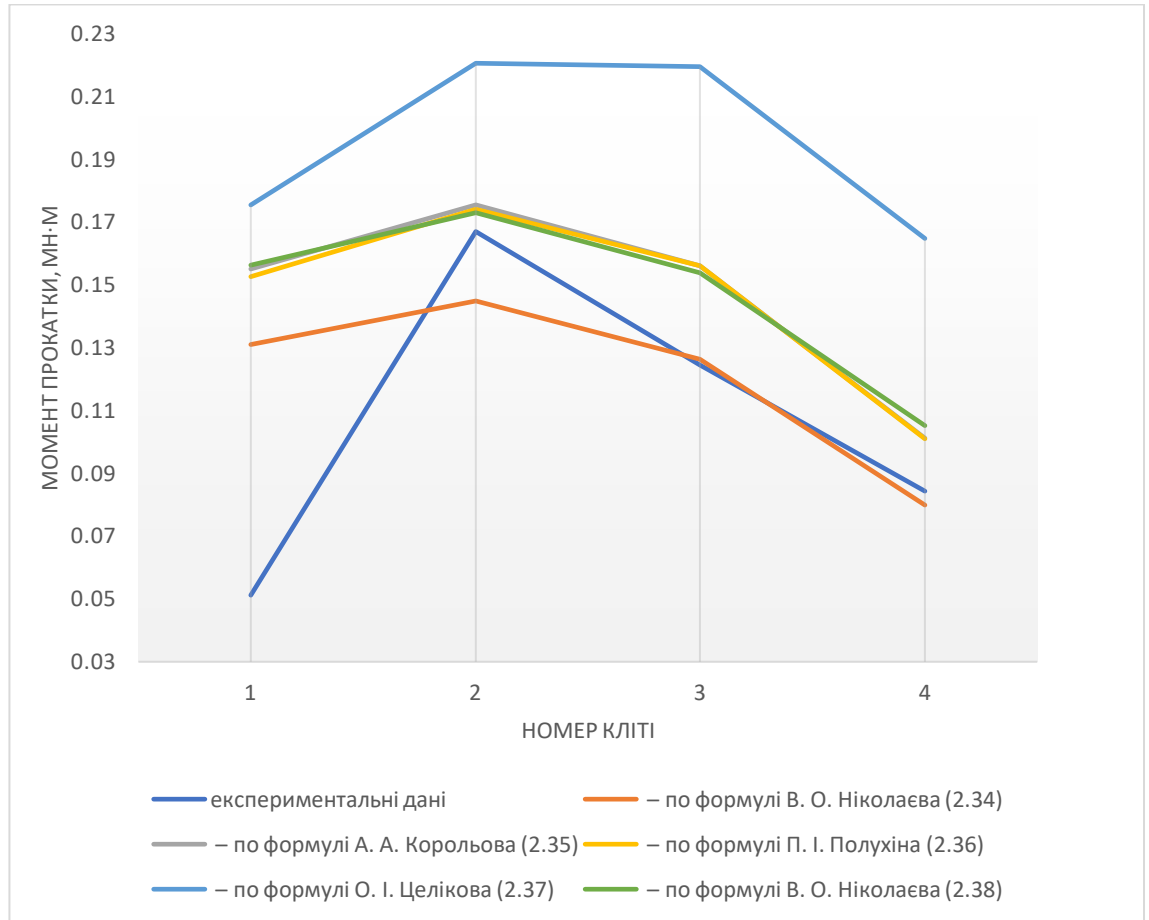


Рисунок 2.6 – Зміна моменту прокатки за розрахунками різних авторів

### 3 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ТЕХНОГЕННА БЕЗПЕКА

Ця інструкція поширюється на вальцювальника дресирувального стану (далі по тексті - вальцювальник) працює у відділенні обробки холоднокатаного металу цеху холодної прокатки №1 (далі по тексті - ЦХП-1) і розроблена на основі нормативно-правових актів і документів, зазначених в Додатку А.

Інструкція визначає права і обов'язки вальцювальника ЦХП-1, порядок і умови безпечного виконання робіт, вказівки по особистої та загальної безпеки.

Вальцювальник здійснює дресування рулонів холоднокатаного металу на станах 1700-1, 1700-2, «Кварто». Основні роботи, що виконуються вальцовщиком дресирувальних станів: підготовка рулонів металу до дресування (вирізка загнутих внутрішніх і зовнішніх витків), технологічний процес дресування х / к металу, обрізка потовщених передніх і задніх кінців смуги металу, упаковка металу при промаслюванням, настройка і перебудова кліті, перевалка робітників і опорних валків.

До самостійної роботи допускаються особи:

Які досягли 18-ти річного віку, мають медичний висновок про придатність виконання робіт за даною професією, які пройшли спеціальне навчання з питань охорони праці і отримали посвідчення на право виконання робіт.

Минулі первинний інструктаж з питань охорони праці на робочому місці. Первинний інструктаж з питань охорони праці на робочому місці проводить безпосередній керівник робіт (змінний майстер, старший майстер).

Для придбання виробничих навичок і навчання безпечним прийомам роботи вальцювальника перед початком самостійної роботи розпорядженням по цеху закріплюють за досвідченим (кваліфікованим) працівником на період стажування протягом 15 змін.

Навчання та стажування знову оформленого вальцювальника ведеться під керівництвом безпосереднього керівника, згідно «Програми стажування за професією». Працівники, які не мають спеціальності повинні пройти навчання на робочому місці відповідно до «Навчального плану і програми професійно - технічного навчання робітників на виробництві» за професією.

У процесі стажування (дублювання) працівник повинен:

- закріпити знання щодо правил безпечної експлуатації технологічного обладнання, технологічних і посадових інструкцій та інструкцій з охорони праці;

- оволодіти навичками орієнтування у виробничих ситуаціях у нормальних і аварійних умовах;

- засвоїти в конкретних умовах технологічні процеси, обладнання та методи безаварійного керування ними з метою забезпечення вимог безпеки праці;

- вивчити розташування технічних засобів безпеки устаткування, яке обслуговує, засобів сигналізації та зв'язку і питання безпечної взаємодії з іншими учасниками технологічного ланцюга.

До самостійної роботи вальцювальник може бути допущений розпорядженням начальника цеху після перевірки і наявності задовільних результатів перевірки знань з питань охорони праці в цеховій комісії з оформленням протоколу перевірки знань і наявності посвідчення за професією на право виконання робіт.

В дальнейшем повторные инструктажи по вопросам охраны труда проводятся вальцовщику, непосредственным руководителем (сменным мастером, старшим мастером) один раз в три месяца с записью в специальный журнал по установленной форме и один раз в год с прохождением специального обучения по вопросам охраны труда и обязательной проверкой знаний по вопросам охраны труда в цеховой комиссии с оформлением протокола.

Вальцовщик, выполняющий работы по нескольким профессиям (оператор поста управления, резчик металла, стропальщик и т.д.) обучается и проходит проверку знаний по каждой из этих профессий.

Режим праці і відпочинку вальцювальника ЦХП-1.

Вальцювальник стана зобов'язаний з'явитися на робоче місце за 15 хвилин до початку роботи, для проведення організаційного змінно-зустрічного зборів і отримання завдання.

Вальцювальник стана працює по змінному чотирьох бригадному графіку:

- 1 зміна - з 00:00 годин до 08:00 годин;
- 2 зміна - з 08:00 годин до 16:00 годин;
- 3 зміна - з 16:00 годин до 24:00 годин.

Прийом їжі здійснюється під час роботи, для чого безпосередній керівник повинен виділити необхідний час.

Забороняється залишати робоче місце протягом робочої зміни без дозволу безпосереднього керівника (бригадира або майстра).

Перебувати на території комбінату більш ніж за 1 годину 30 хвилин до початку і 1 година 30 хвилин після закінчення робочої зміни без поважної причини заборонено.

Крім вимог цієї інструкції, вальцювальник зобов'язаний знати і виконувати вимоги:

Інструкції з охорони праці «Загальні вимоги безпеки для всіх працівників ПАТ« Запоріжсталь »№0.01.

Інструкції з охорони праці для вальцювальника дресирувального стану відділення обробки холоднокатаного металу №06.02.

Інструкції з охорони праці щодо застосування биркової системи №006

Інструкції з охорони праці для стропальників № 0.12. (При наявності посвідчення та допуску до самостійної роботи за професією «стропальник»).

Інструкції з охорони праці для осіб з I кваліфікаційної групою з електробезпеки № 0.30.

Інструкції з охорони праці з надання долікарської допомоги № 0.51.

Інструкції з охорони праці при експлуатації персональних електронно-обчислювальних машин № 0.24.

Інструкції з охорони праці при виконанні робіт на передавальних візках з електричним приводом у відділенні обробки холоднокатаного металу № 06.56.

Інструкції з охорони праці при виконанні робіт з перевалки робочих, опорних валків і натяжних роликів на дресирувальних станах 1700-1,2 і на стані «Кварто» відділення обробки холоднокатаного металу №06.61.

Інструкції з охорони праці при експлуатації і ремонті об'єктів газового господарства №0.20.

Кардинальних правил охорони праці та промислової безпеки ПАТ «Запоріжсталь» (див. Додаток Б).

Технологічної карти на вантажно-розвантажувальні роботи та складування вантажів вантажопідйомними кранами і машинами в відділенні обробки холоднокатаного металу ЦХП-1 №06 / 3.

Реєстру ідентифікації небезпек та оцінки ризиків відділення обробки холоднокатаного металу ЦХП-1.

Порядку дій персоналу при виникненні відхилень від технологічних параметрів роботи обладнання і позаштатних ситуацій різного характеру (ПДП).

Правил внутрішнього трудового розпорядку працівників ПАТ «Запоріжсталь».

Вальцювальник зобов'язаний:

Виконувати роботу, тільки доручену безпосереднім керівником (старшим майстром або змінним майстром), а також входить в коло обов'язків вальцювальника стану і не передавати її іншим особам без дозволу начальника ділянки або змінного майстра.

Перед початком виконання будь-якої дорученої роботи проводити Аналіз Безпеки Виконання Робіт (АБВР).

Пересуватися за встановленими маршрутами руху.

Бути уважним до подаються сигналам автомашин, автокар і інших сигналів.

Бути уважним до подаються світловим і звуковим сигналам, а також тримати в полі зору переміщення електро-мостових кранів.

Чи не перебувати в зоні транспортування вантажів вантажопідійомними механізмами і не ховатися від нього під стіною, не переходити колії перед

близько рухається безрейковим і рейковим транспортом: автомашиною, трансферкара, автокарі і іншими.

Переходити залізничні колії і дороги необхідно тільки у встановлених місцях, попередньо переконавшись у відсутності з обох сторін, поїзда, що наближається або автотранспорту, подивившись направо і наліво.

Забороняється переходити через конвеєри, накопичувачі рулонів, вагони, візки, перебувати на смузі або під смугою під час її руху. Користуватися для цього слід лише встановленими містками і переходами.

Чи не наступати на щілину струмоприймача трансферкарного шляху.

Виконувати вимоги, зазначені в попереджувальних знаках.

Для перевезення вантажу користуватися толькo спеціальними вантажозахоплювальними заходами, знати місця їх зберігання у відділенні.

Знати і виконувати вимоги нормативно-правових актів про охорону праці, правила поведження з машинами, механізмами, устаткуванням та іншими засобами виробництва, користуватися засобами колективного та індивідуального захисту.

Робочий інструмент зберігати в определенном місці. На робочому місці дотримувати чистоту і порядок. Всі непотрібні предмети з робочого місця негайно прибрати.

Чи не захарашувати і не засмічувати робоче місце, проїзди і проходи відходами виробництва та іншими предметами.



Не допускати розливу масла на робочих майданчиках, проходах, так як це може спричинити за собою травмування робітника.

Не допускати зняття металевих плит і перекриттів тунелів, приміщень без встановлення огорож.

Утримувати і здавати змінника робоче місце, інструмент, приміщення, обладнання та пожежний інвентар чистими, справними і в призначеному кількості.

Працювати в справній і чистому спецодязі, спецвзуття та обов'язково користуватися засобами індивідуального захисту (окуляри, каска, беруші і т.п.). Під час роботи стежити за станом спецодягу, вона повинна бути справною, чистою і застібнутому на всі гудзики, черевики - добре зашнурованими.

Перед пуском механізмів стану, навіть після короткочасної зупинки, особисто переконатися, що пуск не загрожує нікому з технологічного персоналу, обслуговувача обладнання табору.

Дбати про особисту безпеку і здоров'я, а також про безпеку і здоров'я оточуючих людей в процесі виконання будь-яких робіт чи під час перебування на території підприємства.

Чи не виконувати роботи, не зазначені в наряді-допуску або не входять в обов'язки працівника, крім особих випадків, пов'язаних із врятуванням людей або ліквідацією аварій.

Чи не виконувати завдань і розпоряджень, які загрожують особистій безпеці та здоров'ю і суперечать вимогам нормативно-правових актів з охорони праці.

Добре знати пристрій і обладнання стану, правила його експлуатації та ремонту.

Знати основні види і причини несправностей і неполадок при експлуатації обладнання.

Стежити за наявністю достатнього освітлення робочих місць, не виробляти роботу в місцях з недо-статочним освітленням.

Стежити за наявністю і справністю інструменту та пристосувань.

Знати і виконувати вимоги нормативно-правових актів з охорони праці, правила поведіння з машинами, механізмами, устаткуванням та іншими засобами виробництва, користуватися засобами колективного та індивідуального захисту;

Щоб уникнути ризику пожежі освіти пожеж курити тільки в спеціально відведених і обладнаних для цього місцях.

Проходити в установленому порядку попередні та періодичні медичні огляди.

Дотримуватися вимоги інструкцій з охорони праці та правила внутрішнього трудового розпорядку підприємства.

У разі виявлення порушень вимог нормативно-правових актів та інструкцій з охорони праці іншим робочим попередити його і обов'язково повідомити безпосереднього керівника (старшого майстра, змінному майстру).

У разі виникнення нещасного випадку потерпілий або працівник, який його виявив, або інша особа - свідок нещасного випадку **ПОВИННІ НЕГАЙНО ПОВІДОМИТИ** про нещасний випадок безпосереднього керівника робіт або іншій уповноваженій особі підприємства і **ПРИЙНЯТИ ЗАХОДИ** щодо надання необхідної допомоги потерпілому. Володіти прийомами надання першої долікарської допомоги, транспортування потерпілого, знати місце розташування і зміст аптечки, уміти користуватися знаходяться в ній засобами.

Дотримуватися санітарно-гігієнічні правила:

- Пити воду слід з встановлених питних фонтанчиків або автоматів газованої води;

- Перед вживанням їжі необхідно вимити руки з милом;

- Їжу приймати тільки в спеціально відведених місцях;

- Щоб уникнути простудних захворювань під час роботи і після закінчення її, в місцях з високою температурою не можна пити холодну воду і виходити на протяги;

- Після закінчення зміни необхідно прийняти душ.

Вальцювальник несе безпосередню відповідальність за порушення зазначених вимог.

Виконувати роботи по обов'язці, зачіплюванні або підвішування вантажів на гак крана, маючи посвідчення і допуск до самостійної роботи за професією «стропальник» відповідно до технологічної карти на вантажно-розвантажувальні роботи та складування вантажів вантажопідійомними кранами та інструкцією з охорони праці для стропальників № 0.12.

Для обов'язки, зачіплювання та підвішування вантажів на гак вантажопідіймальних кранів і машин допускаються робітники основних професій, які досягли 18 років, пройшли медичного огляду і визнаних придатними для виконання таких робіт, навчених за спеціальною програмою, атестованих кваліфікаційною комісією і мають посвідчення на право проведення таких робіт, які пройшли стажування, мають допуск до самостійної роботи, що пройшли повторні інструктажі з перевіркою знань

Вальцовщику забороняється:

З'являтися на території відділення, цеху, комбінату в будь-який час в стані алкогольного, токсичного або наркотичного сп'яніння. Приносити, поширювати або вживати на території комбінату алкогольні напої, наркотичні препарати.

Перебувати в цеху без захисної каски, захисних окулярів, протигаласливих вкладишах.

Виконувати роботи без засобів індивідуального захисту і повинна бути за нормами спецодягу і спецвзуття.

Перебувати в місцях, які не потребують особистої участі в технологічному процесі.

Відволікати від роботи інших працівників.

Виконувати роботу, яка не відноситься до службових обов'язків.

Передавати доручену роботу іншій особі без дозволу бригадира або майстра.

Відлучатися від свого робочого місця без дозволу бригадира або майстра.

Забороняється у всіх випадках перехідити через транспортери рулонів, конвеєри і рольганги, під двіжущою смугою агрегатів поздовжньої і поперечної різання, по смузі дресирувальних станів. Користуватися для цього тільки спеціально встановленими містками і переходами.

Перебувати або виконувати будь-які роботи на штабелях рулонів металії.

Стояти або проходити під піднімаємим або вантажем, що перевозиться.

Працювати на несправному обладнанні або несправним інструментом.

Після зняття кришок, люків, настилів, прорізу не оставлять без установки огорожі.

Заходити за огорожі, знімати запобіжні кожуха на обертових деталях.

Користуватися мобільним телефоном, радіо, плеєрами і т.п. на залізничних коліях і в небезпечних зонах, де це може відвернути працівника від сприйняття сигналів, небезпечної ситуації, від управління машинами, механізмами, устаткуванням і т.п. і привести до травмування.

Під час руху по цеху, маршової сходах пити напої (кава, чай, воду і т.п.) зі скляних або пластикових склянок.

## ВИСНОВКИ

За результатами магістерської роботи при холодній прокатці штаб зразків з низьковуглецевої сталі коефіцієнт плеча моменту знаходиться в межах 0,27-0,37. Більш високі значення  $\psi$  отримані при прокатці відносно товстих зразків з невеликими обтисненнями. Для інших сталей межі змінення  $\psi$  трохи ширші;  $\psi = 0,15 \div 0,46$ . В ході роботи виявлено, що при прокатуванні зменшується коефіцієнт положення рівнодіючої сили за формулами Ніколаєва, Корольова та інших. При холодній прокатці оптимальне значення коефіцієнт плеча моменту, в більшості випадків, знаходиться в межах 0,2-0,35. Такі результати були отримані в дослідженнях М.М. Саф'яна та інших вчених.

У спецчастині представлений розрахунок коефіцієнт плеча моменту й енергосилових параметрів при холодній прокатці. Розрахунок коефіцієнта тертя був зроблений по трьох методиках (Корольова, Клименка, Ніколаєва). Після розрахунку енергосилових параметрів і порівняння з дослідними даними була запропонована найбільш достовірною методика, що має найменші розбіжності з дослідними даними.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Боровік П.В. Теоретичні дослідження процесів обробки металів тиском на основі методу скінчених елементів: навч. посіб., Алчевськ : ДонДТУ, 2012. 170 с.
2. Ніколаєв В.А. розрахунок коефіцієнта рівнодіючої сили, 2002. 156 с.
3. Шестаков Н.А. Розрахунки процесів обробки металів тиском в Mathcad, посібник МГІУ. 2008. 333 с.
4. Ніколаєв В.А. розрахунок крутного моменту. 2016 металургія, наукова стаття 83 с.
5. Положення про службу охорони праці на підприємстві ПАТ Запоріжсталь.
6. Теорія прокатки. Целіков А.І. та інш.: під ред. В.І. Зюзіна. Москва: металургія, 1985. 376 с.
7. Ніколаєв В.А. Технологія прокатки листів та штаб. Запоріжжя: ЗДІА, 1990. 168 с.
8. Ніколаєв В.А. Теорія прокатки: Підручник. Запоріжжя: ЗДІА, 2007. 228 с.
9. Клименко В.М. Технологія прокатного виробництва. Київ: «Вища школа», 1989. 311 с.
10. Ніколаєв Н.А. Визначення плеча моменту при прокатуванні в гладких валках. 1963. С. 82-86.
11. Полухін П.І. контактна взаємодія інструменту при прокатці 1970. 200 с.