Міністерство освіти і науки України

Запорізький національний університет
(повне найменування вищого навчального закладу)

Інженерний навчально-науковий інститут ім Ю.М. Потебні
(назва факультету)

Кафедра металургійних технологій, екології та техногенної безпеки
(повна назва кафедри)

Кваліфікаційна робота магістра

рівень вищої освіти___другий магістерський рівень_____
(другий (магістерський) рівень)

на тему **Удосконалення методів визначення енергосилових параметрів гарячої прокатки штаб**

Виконав: студент ___2__курсу, групи *8.1363-омт-дн*

__Тихоновський А.Ю._____
(ПІБ) (підпис)

спеціальності
____*136 Металургія*_____
(шифр і назва)

спеціалізація
_____
(шифр і назва)

освітньо-професійна програма
*Обробка металів тиском*_____
(шифр і назва)

Керівник Явтушенко А.В._____
(прізвище та ініціали) (підпис)

Рецензент Воденнікова О.С._____
(прізвище та ініціали) (підпис)

Запоріжжя – 2025 року

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

Кафедра _____*металургійних технологій, екології та техногенної безпеки*_____

Рівень вищої освіти _____*другий магістерський рівень*_____
(другий (магістерський) рівень)

Спеціальність ___*136 металургія*_____
(шифр і назва)

Освітньо-професійна програма ___*обробки металів тиском*_____
(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри _____***МТЕТБ***_____
_____***Ю.О. Бєлоконь***__

"__" _____2025 року

З А В Д А Н Н Я
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ (ПРОЕКТ) СТУДЕНТУ

_____*Тихоновський Антон Юрійович*_____
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема проекту (роботи)__Удосконалення методів визначення енергосилових параметрів гарячої прокатки штаб_____
_____

керівник роботи (проєкту)_____*Явтушенко Анна Володимирівна*_____к.*т.н, доцент*_____
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом вищого навчального закладу від "_28_"_02___ 2024року № 359-с

2. Строк подання студентом роботи (проєкта)____*01.02.2025*_____

3. Вихідні дані до роботи (проєкта)__*Вдосконалення прокатного виробництва*_____
_____
_____

_____4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) *Реферат. Вступ. Загальна частина. Дослідницька частина, Охорона праці та техногенна безпека, Висновки. Перелік джерел посилання.*
_____
_____
_____

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)
Креслення, презентаційний матеріал 11 слайдах (на 11 сторінках)

6. Консультанти розділів проекту (роботи)

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата завдання прийняв
Розділ 1 назва розділу	*Явтушенко А.В., доцент*	
Розділ 2 назва розділу	*Явтушенко А.В., доцент*	
Розділ 3 назва розділу	*Явтушенко А.В., доцент*	
Нормоконтроль	*Бєлоконь Ю.О., професор*	

7. Дата видачі завдання *01.03.2024*

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломного проекту (роботи)	Строк виконання етапів проекту (роботи)	Примітка
1	*Вступ*		
2	*Реферат*		
3	*Розділ 1*		
4	*Розділ 2*		
5	*Розділ 3*		
6	*Розділ 4*		
7	*Висновки*		

Студент _____ **А. Ю. Тихоновський**
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник проекту (роботи) _____ ***А.В. Явтушенко***
(підпис) (прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка: __98__с.,___ рисунки.,__12_ таблиці.,__9_ література 17

ШТАБА, ГАРЯЧА ПРОКАТКА, ВИПЕРЕДЖЕННЯ, СЕРЕДНЄ КОНТАКТНЕ НАПРУЖЕННЯ, СИЛА ПРОКАТКИ, КОЕФІЦІЄНТ ТЕРТЯ, ВАЛОК, ОБТИСК, ТЕХНОЛОГІЧНА ЛІНІЯ.

Об’єкт дослідження – сила прокатки.

Мета роботи – Дослідження методів визначення енергосилових параметрів гарячої прокатки штаб.

Проблемою прокатного виробництва є підвищення точності штаби, зниження витрати метала та зниження затрати електроенергії. В значній мірі цього можна досягнути переходом на використання технологій безперервного розливу сталі, що дозволяють знизити енерго і матеріаломісткість металургійного виробництва, тобто — собівартість кінцевої продукції. Приведені результаті розрахунку сили прокатки за різних параметрів штаб.

ЗМІСТ

Вступ 6
1. Аналіз наукової інформації прокатки штаб 9
1.1. Гаряча прокатка широких сталевих штаб 9
1.2. Прокатний цех ШСГП 1680 металургійного комбінату «Запоріжсталь» 14
1.3. Основна технологічна лінія і коротка специфікація прокатного стану ... 19
2. Дослідження енергосилових параметріва прокатки 23
2.1. Розрахунок параметрів гарячої прокатки сидіння 23
2.2. Визначення крутного моменту металопрокату в кліті кварто 28
3. Дослідження та розрахунок показників при горячий прокатці 34
3.1. Алгоритми обчислювальної частини 34
3.2 Модель розрахунку зусилля прокатки за рахунок крутного моменту при гарячій прокатці 36
4. Охорона праці та техногенна безпека 85
4.1. Аналіз шкідливих і небезпечних факторів у виробничому середовищі .. 85
4.2. Розробка заходів щодо захисту від впливу небезпечних і шкідливих факторів виробничого середовища 87
4.3. Заходи електробезпеки 88
4.4. Протипожежні та техногенні заходи безпеки 89
4.5. Захисне заземлення та конструкція захисного відключення 90
Висновки 96
Перелік джерел посилання 97

ВСТУП

Прокатне виробництво є ключовим у виробництві готової продукції чорної металургії. На металургійних підприємствах України працюють 11 чорнових і слябових станів, 5 заготівельних станів, 1 трубний стан, 2 рейкових і конструкційних станів, 8 великосекційних, 7 середньосекційних, 11 дрібнодільних, 1 дрібнодільний дріт, 5 дротяних, 5 кульопрокатних, 1 осьова прокатка, 1 колісна прокатка, 1 кільцева прокатка, 7 гарячих листових станів, 2 безперервних великоформатних стани гарячої прокатки, 1 універсальний, 2 безперервні стани холодної прокатки, 3 одноклітових стану холодної прокатки, один 20-валковий стан холодної прокатки, 2 безперервні стани для прокатки олова. Прокатні стани, що знаходяться в експлуатації, задовольняють основні потреби вітчизняного ринку в марці і розмірному ряду продукції, що випускається. Ряд станів вже модернізовано та реконструйовано.

Прокатка - це метод обробки металів тиском, який полягає в обтиску їх між обертовими валками прокатних станів. Рулони можуть бути у вигляді циліндрів, гладкі або з нарізаними на них канавками (жиклерами), які при з'єднанні з двома рулонами будуть утворювати калібри.

При прокатці метал при стисненні піддається значній пластичній деформації, що руйнує його первинну литу структуру і утворює більш щільну, дрібнозернисту структуру, а також покращує якість металу.

Прокатка здійснюється на металургійних і машинобудівних заводах, і отримують прокат - готові вироби або заготовки для подальшої обробки методом кування, штампування, пресування (екструзії), волочіння або різання. Близько 80% всієї сталі виплавляється і велика частина кольорових металів і сплавів переробляється в прокат, який використовується в будівництві, машинобудуванні та металообробці.

Залежно від виду, прокат може бути сортовим, листовим, трубним, періодичним і спеціальним.

Під час прокатки між обертовими валками прокатних станів пропускають нагріті або холодні заготовки. Розрізняють три основних види прокатки: поздовжнє (для профільного і фасонного перетину), поперечне і поперечно-гвинтове (для обертових деталей).

Листова сталь - один з найбільш економічних видів прокату, з якого виготовляють труби і гнуті ділянки; Він широко використовується в машинобудуванні, суднобудуванні, автомобілебудуванні та виробництві побутової техніки. Тому в США, Японії та Німеччині частка листової сталі в загальному обсязі виробництва становить 60-70%.

В останні роки відбулися значні зміни в технології та обладнанні листового прокатного виробництва, спрямовані в основному на зниження металоємності і поліпшення якості продукції. У сфері виробництва слябів практично повністю відмовляються від їх виробництва на слябінгах і блюмінгах і застосовують машини безперервного лиття заготовок (МБЛЗ).

Товстолистові стани з довжиною отвору 3600 - 5500 мм широко використовуються для виробництва товстолистового прокату і труб великого діаметру.

Для прокатки тонколистової сталі в гарячому стані використовуються безперервні стани з новими конструкціями клітей, які забезпечують безпрограмний процес виробництва смуг. Вони оснащені приладами і системами контролю і регулювання точності поперечного і поздовжнього перерізу. Багато сучасних широкосмугових станів гарячої прокатки освоїли прокатку смуг товщиною h = 1,0—1,5 мм, які коштують дешевше аналогічних смуг, отриманих на станах холодної прокатки. Використовуються ливарно-прокатні комплекси (ЛПК) і агрегати для прямого розливання тонких смуг (до h = 0,4 мм). Найбільш розвиненим було виробництво холоднокатаних смуг. За останнє десятиліття з'явилися принципово нові рішення, що забезпечують прокатку високоточних і плоских смуг на рулонних і нескінченних прокатних станах. У сучасному

цеху весь процес від початку до кінця контролюється з комп'ютерів (МОМ), які включають в себе локальні системи управління окремими операціями.

З огляду на те, що традиційні широкосмугові стани гарячої прокатки все ще працюють, розглянемо останні тенденції вдосконалення технологічних процесів на цих станах.

1. АНАЛІЗ НАУКОВОЇ ІНФОРМАЦІЇ ПРОКАТКИ ШТАБ

1.1. Гаряча прокатка широких сталевих штаб

На широкостандартних станах зі слябів масою від 5 до 40 т прокатують матеріал товщиною від 1,0 до 16 мм. До сучасних станів відносяться неперервні стани, хоча напівнеперервні стани з однією або двома оборотними комірками в групі драфту також можуть використовуватися при певних умовах. Сляби для прокатки отримують зі слябінгу або з ливарних машин. Незважаючи на різницю в конструкції прокатних станів, для них загальними є такі основні технологічні операції:

– прокатка на стані з інтенсивною деформацією металу;

– охолодження прокату в спеціальних пристроях для поліпшення механічних властивостей і зменшення окалини;

– змотування прокату в рулони;

– охолодження рулонів;

– прпавильні і розкрійні опрерації (поперечні і поздовжні);

– упаковка листів і відвантаження споживачеві.

Останнім часом у виробництво впроваджені технології комбінованого лиття - прокатка, прокатка штаб з тонких слябів, прокатка штаб безпосередньо з рідкого металу.

Частина продукції великих станів використовується в цехах холодної прокатки для виробництва стелажів товщиною 0,4 – 2 мм, в цехах з виробництва гнутих профілів і тонкостінних зварних профілів (рис. 1.1). Інша частина гарячекатаного кадрового металу (товарної продукції) направляється безпосередньо на машинобудівні заводи, будівництво та інші галузі народного господарства.

Листовий метал є важливим конструкційним матеріалом, використання якого постійно зростає у всьому світі. Ця тенденція збережеться ще багато років, так як інші матеріали не зможуть конкурувати з ними в доступному

для огляду майбутньому ні за вартістю, ні за якістю, ні за обсягами виробництва.

В даний час відбувається інтенсивне технічне переозброєння підприємств, що випускають плоский прокат, з переходом на енергозберігаючі технології, що призводить до зниження собівартості продукції і підвищення її якості.

Історію розвитку великих станів гарячої прокатки прийнято ділити на п'ять етапів, а самі стани, відповідно, на п'ять поколінь. Основні характеристики держав різних поколінь наведені в таблиці 1 [25] (ливарно-прокатний вузол).

На стані 1680 була впроваджена технологія прокатки за схемою «злиток-сляб-вал», замінені двигуни головних приводів чорнових і чистових клітей, вдосконалена система прискореного охолодження штаби на вихідному рольгангу, встановлена бухта і т.д. На ШСГП 1700 1994-1996 років спільно з французькою фірмою «Клісім» була проведена реконструкція фінішної групи клітей. Введення в експлуатацію гідравлічних напірних пристроїв, системи керованого згинання рулонів і зрізу були поєднані з впровадженням автоматичної системи управління процесом прокатки (АСУ ТП). Реалізація цих заходів дозволила значно підвищити точність геометричних розмірів штаби [25].

Якість продукції, що випускається на вітчизняних великосерійних станах гарячої прокатки, визначається рівнем і станом обладнання та систем автоматизації, які в більшості своїй відповідають сучасному рівню.

Застосування гідравлічних притискних пристроїв, ефективний захист від згинання валків, їх осьового зміщення дозволяють досягти значного зменшення поперечної товщини штаби. Таким чином, реалізація цих заходів на ШСГП 2000 НЛМК (Новолипецький металургійний комбінат) забезпечила зменшення поперечної товщини штаби до 0,02-0,05 мм. МО (6-7 мм/м) (CVS – Axial Shift System for Work Rolls with Bottle Barrel Profiling).

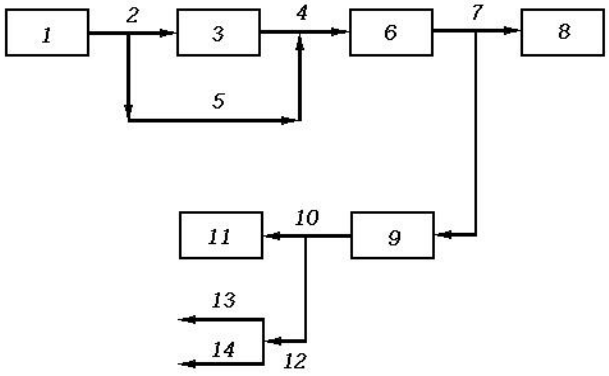


Рисунок 1.1 - Схема потоку вантажу з листового металу циклу прокатки: 1 - слябінг або СБЛЗ; 2 - плити; 3 - зберігання і чищення печей; 4 - зачищені плити; 5 - транзитна доставка плит; 6 – безперервний стандартний стан (ШСГП); 7 - валки гарячекатаних валів; 8 - холоднокатаний цех; 9 – обробка (травлення); 10 - валки гарячекатаних валів; 11 - цех гнуто-профільного профілю; 12 - товарна продукція; 13 - листки; 14 - булочки.

Таблиця 1.1. Розвиток станів гарячої прокатки

Параметри	Створення станів гарячої прокатки				
	I	II	III	IV	V
1	2	3	4	5	6
Період введення в експлоатацію	1926-1960	1960-1970	1970-1980	1980	1990
Потужність, млн т/рік	1,5-2,5	3-4	5-6	5-6	< 2,0
Питома вага рулонів, кг/мм	4-10	16-25	27-35,7	18-25	18-25
Маса рулону, т	10-15	20-40	39,5-45	20-30	20-30
Максимальна швидкість, м/с	10-12	16-22	27-34,3	20	20
Товщина штаби, мм	≥ 2,5	≥ 1,5	≥ 0,8	≥ 1,2	≥ 0,8
Ширина штаби, мм	1100-500	1600-2200	до 2300	600-2000	до 1800
Допустиме відхилення,мм	0,15	0,15	0,15	0,07	≤ 0,05
Допуск по ширині, мм	0-20	20	0-20	0-12	0-10
Кількість чистих осередків	6	6	7-9	7	5-7

1	2	3	4	5	6
Плити	Катані	Катані	Прокатні та безперервно відліті	Безперервне лиття	Безперервно відлита тонка плита

Одним з найбільш ефективних технічних рішень, що стабілізують температурні та енергетичні параметри прокату, є оснащення великих станів проміжними перемотувальних пристроями (койлбокс). Такі пристрої встановлені на 46 станах гарячої прокатки. Підвищена температурна стабільність прокатки і усунення необхідності прискореної прокатки зменшує відхилення в товщині штаби приблизно з ±25 мкм (прокатка котушки) до ±10 мкм (прокатка койлбокса).

В останні роки спостерігається збільшення обсягів виробництва гарячекатаних штаб за рахунок впровадження компактних ливарних і прокатних агрегатів з використанням тонких слябів (50-75 мкм). Використання новітніх досягнень науки і техніки дозволило досягти високих якісних показників прокату, що випускається на таких агрегатах. Наприклад, відхилення товщини становить ±10 – ±5мкм. Дана технологія, з використанням сучасних методів виплавки, вторинної обробки і лиття сталі, гарантує більш високі і стабільні експлуатаційні властивості прокату в порівнянні з рулонними злитками, відлитими у виливках.

Обидва великі заводи в Україні досі використовують у вигляді заготовок сляби, отримані шляхом прокатки зі зливків. Великосерійний прокат вітчизняного виробництва дещо поступається зарубіжному по точності геометричних розмірів і стабільності механічних властивостей, хоча і відповідає вимогам стандартів, в тому числі деяких міжнародних. Дані про якість прокату наведені в таблиці 1.2.

Радикального поліпшення якості гарячекатаних штаб можна досягти наступними шляхами.

Рівень і стабільність механічних властивостей:

- перехід на використання безперервнолитих заготовок з використанням сучасних методів виплавки, вторинної обробки та лиття сталі;

- оснащення прокатного стану засобами стабілізації і контролю температурного режиму прокатки і охолодження (решета, сучасні перемотувальні пристрої, охолодження штаби перед скручуванням і т.д.);

- впровадження автоматичних систем управління температурою прокатки і охолодженням штаби;

- оснащення пристроями для регульованого охолодження рулонів.

Таблиця 1.2. Якісні показники гарячекатаного штабного прокату

Найменування показників якості	Вітчизняна продукція	Продукція сучасного зарубіжжя
Поздовжня товщина, мм	± 0,16-0,25	0,01-0,05
Поперечна товщина, мм	До 0,06-0,15	0,01-0,05
Відхилення від площинності, мм/м	До 10-25	6-10
Відхилення від ширини, мм	До +15-30	+5-10
Точність забезпечення температур кінця прокатки і намотування, °С	± 15-30 ± 20-50	± 8-10 ± 5-10
Розподіл значень міцності, Н/мм	± 30-75	± 20

Точність геометричних розмірів і якість поверхні:

- оснащення горизонтальних валків чорнової групи клітей і фінішних клітей гідравлічними затискними пристроями;

- оснащення сучасними системами автоматичного управління процесом прокатки і регулювання технологічних параметрів з одночасним використанням сучасних засобів для вимірювання поперечної товщини і площинності штаби;

- використання ефективних систем охолодження і контролю температури під час прокатки рулонів і сучасних зносостійких матеріалів робочих валків;

- Використання сучасного технологічного обладнання (згинальні та розтягувальні пристрої, правильні стенди тощо)

1.2. Прокатний цех ШСГП 1680 металургійного комбінату «Запоріжсталь»

В Україні встановлено і працюють два безперервних стани (стан 1680 в Запоріжжі та стан 1700 в Маріуполі), де вдосконалено технологія виробництва прокату, забезпечено випуск сталевого прокату з високою якістю поперечного перерізу і механічних властивостей металу.

Стан безперервного виробництва 1680 р з центром гарячої прокатки був побудований (рис. 1.2) в 30-х роках XX ст. На цьому стані з низьковуглецевих марок сталі прокочують щтаби товщиною 2,0 - 8 мм, шириною 1000 - 1500 мм. Також можлива прокатка штаб з нержавіючих і легованих марок сталі товщиною h > 3,5 мм і шириною B < 1300 мм. З них розкочують штаби товщиною H < 2,5 мм (В 1000 мм), а зі слябів масою G < 15 т і довжиною $L_{сл}$ = 9 - 9,5 м розкочують штаби товщиною h > 2,5 мм.

Стан обладнаний п'ятьма методичними чотирьохзонними печами з вогнетривкими сажовими трубами, з торцевим подаючим столом та виходом слябів. Печі працюють на суміші доменного, коксового і природного газів, з теплотворною здатністю 1070 - 1350 ккал/м^3. Однак у зв'язку з переходом на транзитну (пряму) прокатку слябів для прокатки повторно прокатаних або легованих (нержавіючих) слябів періодично використовуються лише 1-2 печі. Довжина печей – 31,5 м, ширина – 5,22 м. Охолоджувальні плити доставляються зі складу на стіл 1 роликовим конвеєром 2 в печі. Посадка слябів в печах 3, 4 здійснюється штовхачами 5. Нагріті сляби вивантажуються з печей на нижній пічний роликовий транспортер 6. На поверхні сляба завжди є товстий (4 - 6 мм) шар пічної окалини, яка подрібнюється в двовалкової дробарці для окалини 8 при зменшенні товщини плити на 20 - 25 мм.

У чорновій групі є чотири стенди: стенд 1 з робочими валками діаметром 940 мм і резервними валками 1320 мм; стенд 2 - з робочими валками діаметром 850 мм і резервними валками - 1240 мм; Стенди 3, 4 - з валками діаметром 585 - 590 і 1240 мм відповідно. Всі резервні валки і робочі

валки клітей 1 і 2 виготовляються зі сталі 9НС. У Клітях 3 і 4 використовуються робочі валки з чавуну з відбіленою поверхнею.

Потужність двигуна горизонтальних валкових клітей становить (кВт): кліті 1 - 6300; 2 - 4 - 4000 кВт кожна, а окружна частота обертання робочих валків клітей 1 - 4 = 1,9 - 2,53 м/с. У групі чорнової обробки застосовується безперервне вальцювання слябів довжиною 9 - 9,5 м за наступним режимом: очищувач для видалення накипу - кліть 1, струбцини 2 - 3 і кліті 3 - 4. Штаба повністю виходить із кліті 1 і тільки потім переміщується на рольганги 2 - 3. У рольгангах 3 - 4 знаходиться штаба, що переміщується після виходу з кліті 2. На вході в кліть 1 температура прокатки перевищує 1170 - 1180°С, а в процесі прокатки температура переднього кінця рулону знижується і за кліттю 4 становить 1080 - 1120°С (подвійна рулонна прокатка). Різниця температур уздовж проміжного змійовика становить 10-15°С.

Максимальні значення обтиску в кожній кліті встановлюються з урахуванням допустимих кутів прокатки валків, міцності валків і допустимого крутного моменту. Відповідно до цих умов в станах чорнової групи допустимі відносні скорочення для вуглецевих і низьколегованих марок сталі дорівнюють (%): кліть 1 - ε = 35 – 37, кліті 2-4 – ε = 37 – 40.

Більш низькі значення ε встановлюються для штаби з шириною захвату В >1250 мм.

Штаба, що виходить з обойми 4 проміжного роликового конвеєра довжиною ~ 65 м, проходить через летючі ножиці, які зрізають дефектний передній кінець чистової штаби 13 для розриву вторинної штаби і захоплюється робочими валками кліті 5 фінішної групи 14. Фінішна група отримує штабу товщиною 20-28 мм (штаба довжиною 9 - 9,5 м) і довжиною 4 - 4,7 м). Під час роботи проміжного перемотувального пристрою (ПУФ) 11 в рулон намотується штаба довжиною 9-9,5 м, а потім передній кінець рулону встановлюється в першу комірку фінішної групи. У цьому випадку перед кінцевою машиною для видалення накипу; температура прокатки становить

1000-1010 °С, а задня температура 920-950 °С. Після видалення накипу температуру прокатки знижують на 15-20 °С.

У фінішній групі є шість чотиривалкових клітей одного типу (кліті 5 – 10) з початковими діаметрами робочих валків 620 мм (кліть №10) (двошарові чавунні валки з відбіленим шаром ЛПХНд – (70 – 73) (литий хромонікелевий прокат твердістю 70 – 73 КСД – по Шору). Вони працюють у опорних обоймах для стабілізації передньої кромки штаби.. Робочі валки клітей приводяться в рух тиристорними електродвигунами потужністю 7000 кВт. Максимальна практична швидкість прокатки в кліті 10 становить v_{10} = 9,2м/с, а в попередніх клітях окружні швидкості відповідно до закону збереження об'єму металу визначаються виразами

$$v_9 = v_{10} \cdot h_{10} / h_9;\ v_8 = v_{10} \cdot h_{10} / h_8\ ;\ v_7 = v_{10} \cdot h_{10} / h_7$$ і т. д.

Таким чином, торцеві ділянки штаб прокочуються в стані без розтягування, в той час як в стаціонарному процесі (робочі валки знаходяться у всіх клітях стану) прокат вальцюється з невеликим натягом (σ_N = 10-30 Н/мм^2), що менше напруги потоку металу при відповідних температурах. Якщо напруга розтягування досягає напруги потоку, валки деформуються по ширині.

У процесі перенесення штаби в кліть температура металу знижується за рахунок відведення тепла навколишнім середовищем, водою і валками (рис. 1.2). Інтенсивність зниження температури в клітях фінішної групи тим більше, чим менше товщина штаби. Мінімальна температура штаб, товщиною h = 2 мм на кліть 10 становить ~830 - 850°С. При надходженні рулону в кліть 5 температура його переднього кінця максимальна, а температура заднього кінця, який надходить в кліть 5 пізніше (через 50-60 сек), нижче на 60 - 90 С °(прокат довжиною 4-4,5 м). Отже, відсутність торцевого натягу при вальцюванні і наявність температурного клина по довжині викликає зміну товщини штаби по довжині. Товщина заднього кінця більше переднього, що обумовлено більш низькою температурою металу (рис. 1.2). Для зменшення товщини заднього кінця в клітях 5-9

необхідно виконувати додаткове пресування торцевого перетину в межах 0,05-0,5 мм (більше пресування в кліті 5).

На ділянках 2 зміна товщини (високочастотна різниця товщини) відбувається за рахунок биття робочих і резервних валків з діаметральним ексцентриситетом, а на ділянках 3 (марки стругання) - в результаті охолодження сляба на стругальних трубах технологічних печей, якщо плити нагріваються в них. Приблизна різниця в товщині секцій штаби (щодо номінальної товщини) становить (δ_h, мм): 1 - 0,05 - 0,08; 2 - 0,03; 3 - 0,04 - 0,05; 4 - 0,1 - 0,2. У разі транзитного (прямого) прокатування слябів з слябу секції товщиною 3 не залишаються, а при наявності бухтової кліті товщина переднього і заднього торців штаби зменшується.

При прокатці штаби використовуються режими інтенсивної деформації. Відносні і абсолютні обтиски максимальні в чорновій групі клітей.

Середнє нормальне напруження p_{CP} зростає з 86,7 Н/мм^2 (кліть 1) до 409Н/мм^2 у кліті 8, що пов'язано зі зменшенням товщини і температури штаб (сталь 08кп). Максимальне зусилля прокатки виникає в кліті 5 і становить P = 16-17 МН, але не перевищує допустимого значення [P] = 18,5 МН в горловині опорного валка.

Товщину штаби після кліті 10 контролюють рентгенівським мікрометром, а плоскість - візуально. На рольгангу за стендом 10 валки, які направляються на холодну прокатку, інтенсивно охолоджуються водою в системі водяного охолодження, що забезпечує отримання металевої конструкції з рівномірною структурою зерен і високою пластичністю.

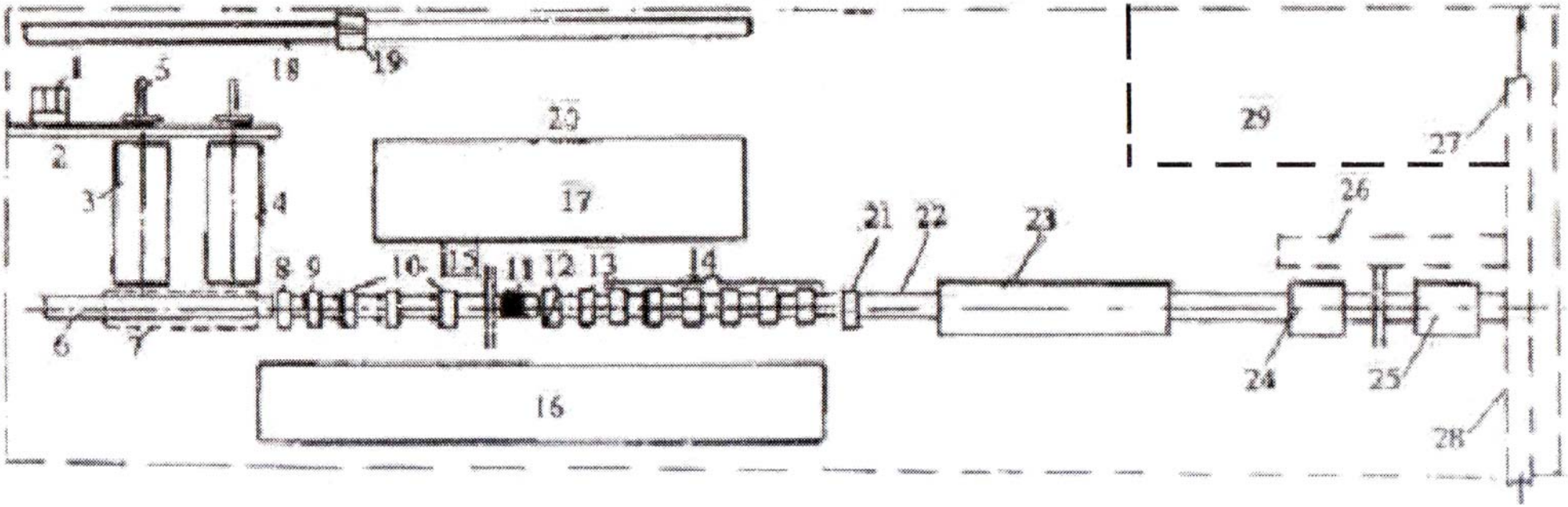


Рисунок.1.2 - Схема розташування обладнання ШСГП 1680: 1 – завантажувальний стіл для плит; 2 - завантажувальний рольганг; 3.4 - нагрівальні печі; 5 - штовхачі пластин; 6 - транзитний рольганг з пластин; 7 - теплозахисні екрани; 8 - двовалковий очищувач для видалення накипу; 9 - перший кварто-шорсткий квадрат; 10 - грубі підставки з вертикальними валками; 11 - пінополіуретан; 12 - літаючі ножиці; 13 - очищувач для фінішного видалення накипу; 14 - шість кварто-стійок (No5-10) фінішної групи; 15 – індукційний блок для нагріву робочих роликів перед установкою в обойму; 16 - машинне відділення; 17 - валковий шліфувальний цех; 18 - рейкова колія з обшивки; 19 - візок; 20 – секція машин для очищення поверхонь слябів з високоякісних марок сталі; 21 – вимірювач розміру штабаа; 22 - висувний роликовий транспортер; 23 – вузол удушення; 24.25 – намотувачі; 26 – транспортер для збирання тюків; 28 – роликовий конвеєр на центральному збагачувальному фабрикі; 29 - зона обробки котушки.

Частина рулонів по підземному конвеєру направляється в цех холодної прокатки, а інша частина направляється на правку і обробку на плитах в цех гарячої прокатки.

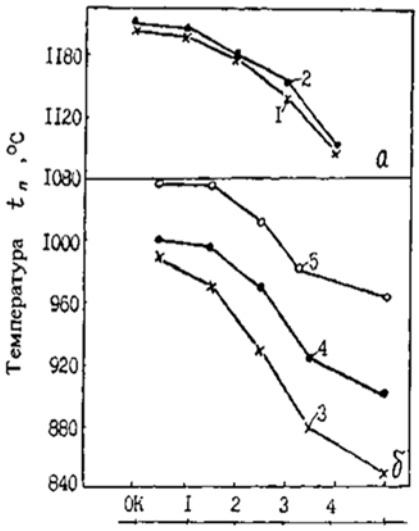


Рисунок 1.3 - Розподіл температури штаби між клітями чорнової та чистової (б) груп ШСГП 1680. Розміри штаб після кліті 4:1-20 х 1200 мм (плита Н=І50 мм); 2-23х1250 мм (плита Н = 160 мм). Розмір штаб після кліті 10: 3 - 2х1170 мм (Н = 20 мм); 4 - 3х1250 мм (Н = 23 мм); 5 - 4х1400мм (Н = 25 мм). Криві 1,3,4,5 - дані М. М. Сафяна; 2–автор [7] (нагрівальні плити в печах)

1.3. Основна технологічна лінія і коротка специфікація прокатного стану

Технологічна лінія (ТП) металопрокату ділиться на три ділянки за складом обладнання та виконуваними функціями:

1. Підготовчий, де сировина готується до обробки тим чи іншим способом прокатки; Наприклад, в цехах гарячої прокатки - це нагрівальні печі, в цехах холодної прокатки - безперервні травильні лінії для видалення окалини з поверхні металу шляхом продування кислотними розчинами.

2. Процес ОТТ, як правило, є одностендовим прокатним станом або станом з великою кількістю клітей.

3. Потокові – чистові, наприклад, на станах гарячої прокатки – це вивідні рольганги, пристрої водяного охолодження, охолоджуючі пристрої, ножиці, намотувачі і т. д., де чистові операції здійснюються зі станції управління станом.

Кожна з цих ділянок важлива, але найбільш складною з точки зору обладнання і технології є друга центральна ділянка, а саме прокатний стан. Кожна з робочих клітей прокатного стану розташована на своїй головній лінії (рис. 1.4), яка складається з прокатного стану 5, електродвигуна 9 і

передавальних механізмів: шпинделів 3 і 4, коробки передач 6, муфт 7 і редуктора 8. [26]

Стан призначений для вальцювання металу між рулонами. На фундаментах були встановлені і закріплені робоча кліть 1, коробка передач 6, редуктор 8 і електродвигун 9.

Електродвигуни виконують роль рушії, виробляючи крутний момент для обертання валків як під час холостого ходу, так і під час деформації металу валками. Трансмісійні механізми не тільки передають значні крутні моменти і обороти, але і кількісно змінюють їх в процесі передачі від двигуна до роликів. Таким чином, коробка передач збільшує крутний момент і знижує обороти; Шестерня ділить крутний момент на частини в залежності від кількості ведучих роликів, найчастіше на два.

Шпинделі призначені для передачі значних крутних моментів на високих швидкостях при малих (до 100) кутах перекосу, що дозволяє змінювати нахил між валками шляхом підняття або опускання верхнього валка (валків).

Муфти не тільки з'єднують валки, але і виступають в ролі запобіжника, тому при аварійних перевантаженнях в основній магістралі в першу чергу руйнуються муфти, міцність яких розрахована на передачу номінального крутного моменту. Це запобігає поломці прокатних валків, шпинделів, шестерень. Муфти є найдешевшими комплектуючими основної лінії, їх швидко і зручно демонтувати, монтувати і замінювати.

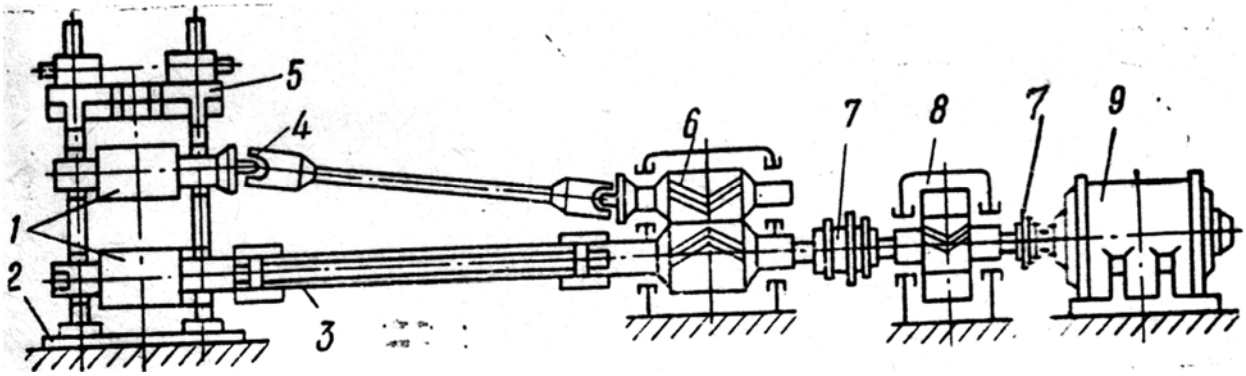


Рисунок 1.4 - Схема головної лінії прокатного стану: 1 - валкові кліті; 2 - тарілка; 3.4 - шпинделі; 5 - кліть; 6 - обойма коробки передач; 7 – муфта; 8 – коробка передач; 9 - електродвигун.

До технічних характеристик прокатного стану відносяться технічні дані робочого кліті, електродвигуна валків і передавальних механізмів, а саме:

- діаметр валку, мм;
- довжина валку, мм;
- діаметр горловини валку, мм;
- довжина горловини валку, мм;
- матеріал валку (сталь, чавун);
- тип роликових підшипників (роликові, ковзаючі);
- тип ліжка на коліщатках (закрита, відкрита);
- крок різьблення натискних гвинтів, мм;
- максимальний ухил між валками, мм;
- конструкція балансувального пристрою верхнього валка (грузик, пружина);
- потужність головного електродвигуна Н, кВт;
- обороти двигуна, об / хв;
- кількість ступенів КПП;
- передавальне число коробки передач;
- конструкція зубчастого сепаратора (індивідуальна, комбінована);
- конструкція шпинделя (універсальна, булависька).

Використовуючи дані технічних характеристик, можна визначити: номінальний крутний момент електродвигуна $M_{ном}$:

$$M_{ном} = \frac{N}{W}, \text{ кН·м} \quad (1.1)$$

де N - потужність електродвигуна, кВт;

W - кутова швидкість, рад $^{-1}$.

$$W = \frac{\pi \cdot n}{30} \quad (1.2)$$

де n - частота обертання електродвигуна.

Швидкість кидка $n_в$:

$$n_в = n/\text{i} \quad (1.3)$$

Крутний момент горловини прокатки:$M_в$

$$M_в = M_{ном} \cdot I \cdot \zeta \quad (1.4)$$

де I = передавальне число коробки передач

Ефективність основної лінії ζ:

$$\zeta = \zeta_{шп} \cdot \zeta_{ш.к} \cdot \zeta_р \cdot \zeta_5 \quad (1.5)$$

$\zeta_{шп} = \zeta_м = 0{,}99$ - За ефективністю шпинделів і муфт

$\zeta_{ш.к}$=0,92-0,95 - ККД обойми коробки передач

$\zeta_р = 0{,}95$ (для кожного ступеня) – ККД коробки передач

Якщо стенд має більше двох валків, то наводяться розміри валів і шийок опорного і проміжного валків. Для чорнових станів і клітей часто необхідно вказувати максимальну висоту і швидкість підйому верхнього валка.

В цілому технічні характеристики робочого стану дають дані про вузли; роликові, затискні, балансувальні і т.д.[27]

2. ДОСЛІДЖЕННЯ ЕНЕРГОСИЛОВИХ ПАРАМЕТРІВА ПРОКАТКИ

2.1. Розрахунок параметрів гарячої прокатки сидіння

До енергосилових параметрів прокатки відносяться сила, крутний момент і сила прокатки, що визначаються за формулами [1]

$$P = p_{cp} \cdot B_{cp} \cdot l_d, MH; \quad (2.1)$$

$$M = P \cdot \psi \cdot l_d, MH \cdot м; \quad (2.2)$$

$$\mathbf{N}= 2{,}960 \cdot \text{M R/V, кВт}, \quad (2.3)$$

де P, M, $N_{пд}$ - сила, крутний момент і потужність при пластичній деформації; середня нормальна напруга контакту (Н/мм^2); $V_{ср}$ - середня ширина штаби (м); l_d - довжина контактної дуги (м); коефіцієнт положення рівноважних сил в центрі деформації; v - окружна швидкість крену (м/с); R - радіус валків (м).

У формулі (2.2) крутний момент визначається для одного крену.

Для розрахунку цих енергосилових параметрів, перш за все, необхідно визначити напругу потоку металу, коефіцієнт тертя f і коефіцієнт тертя f_p, середнє нормальне контактне напруження, а також коефіцієнт положення рівноважних сил в центрі деформації.

Розрахунок напруги потоку металу

Опір деформації металу дорівнює

$$\sigma_\phi = \sigma_T \cdot \lambda, \quad (2.4)$$

де $\sigma_т$ - напруга потоку металу;

λ - коефіцієнт теплопровідності (для прокатки плоских широких смуг; для довгої прокатки металу з розвиненим розширенням).

Напруга потоку визначається за моделлю [1] з урахуванням впливу вмісту хімічних елементів в металі. Загалом напруга потоку деформації становить

$$\sigma_T = \sigma_{Tб} \cdot k_t \cdot k_\varepsilon \cdot k_u, \quad (2.5)$$

Де $\sigma_{тб}$ - напруга базового потоку, що визначається при фіксованих (базисних) значеннях температури (t), відносного зниження (ε) і швидкості деформації (s):

$$\varepsilon = \Delta h / H; \qquad u = v \cdot \varepsilon / L_Д , \tag{2.6}$$

k_t, $k_{\varepsilon,}$ k_u - коефіцієнти, що враховують вплив температури, відносного стиснення і швидкості деформації.

Математична модель для розрахунку напруги потоку основи для різних марок сталі виглядає наступним чином:

Для $N_1 \le 5$ (вуглецевих, конструкційних, інструментальних, низьколегованих сталей)

$$\sigma_{Тб} = 80 + 25 \cdot \left\{ 1 - \left[\frac{5 - N_1}{4{,}5} \right]^{1{,}8} \right\}; \tag{2.7}$$

для $N_2 > 5$ (леговані, високолеговані сталі)

$$\sigma_{Тб} = 110 + 38 \cdot \left(\frac{N_2 - 2}{32} \right)^{0{,}25 \times N_2} \tag{2.8}$$

Таблиця 2.1 Групи сталей для розрахунку напруги текучості металу

Група сталі	Метал
I	Вуглець та інструментальні сталі 08кп; 08ю; 20; Ст.3; 45; Ст.6; У8 та інш.
II	Леговані та низьколеговані сталі 40; СХ15; 15ХСНД; 14ГН; 12ХН3А
III	20ХНМ; 60ХНГС2М; 35ХНГ2М; 30HGSA; 18Х2Н4МВА; ГВГ; 60С2
IV	10ХН; 12Х17
V	20Х5NG2; 15Х5М; 12ХНМФА; 20ХГНМ
VI	18, 20ХНР; 45
VII	Високолеговані сталі
VIII	4Х13; Х16N5М4; Х17Н2; Х18Н9Т; Х18N12М2Т; П18

де N_1 і N_2 - сума хімічних елементів в даній сталі, % (крім заліза, сірки і фосфору).

Формула поправочного коефіцієнта kt як функції температури виглядає наступним чином

$$k_t = 1{,}66 - 1{,}1 \cdot \left(\frac{t}{400} - 2 \right)^{0{,}7}, \qquad (2.9)$$

де Т - температура металу, °С.

Коефіцієнти розраховуються за формулами, наведеними в таблиці. 2.2, 2.3

Таблиця 2.2. Формули для розрахунку коефіцієнта k_ε

Група сталі	ε	**Вираз**
I, II	0,025… 0,1	$k_\varepsilon = 0{,}8 + 0{,}2 \cdot \left[1 - 178 \cdot (0{,}1 - \varepsilon)^2\right]$
I, II	>0,1	$k_\varepsilon = 1 + 0{,}43 \cdot \left[1 - 6{,}3 \cdot (0{,}5 - \varepsilon)^2\right]$
IV	0,025… 0,1	$k_\varepsilon = 0{,}7 + 0{,}3 \cdot \left[1 - 50 \cdot (0{,}1 - \varepsilon)^2\right]$
IV	>0,1	$k_\varepsilon = 1 + 0{,}68 \cdot \left[1 - 6{,}6 \cdot (0{,}5 - \varepsilon)^2\right]$
III, VI, VII	0,025… 0,1	$k_\varepsilon = 0{,}7 + 0{,}3 \cdot \left[1 - 50 \cdot (0{,}1 - \varepsilon)^2\right]$
III, VI, VII	>0,1	$k_\varepsilon = 1 + 0{,}38 \cdot \left[1 - 6{,}3 \cdot (0{,}5 - \varepsilon)^2\right]$
V	0,025… 0,1	$k_\varepsilon = 0{,}7 + 0{,}3 \cdot \left[1 - 50 \cdot (0{,}1 - \varepsilon)^2\right]$
V	>0,1	$k_\varepsilon = 1{,}0 + 0{,}5 \cdot \left[1 - 9 \cdot (0{,}5 - \varepsilon)^2\right]$

Таблиця 2.3. Формули для розрахунку поправочного коефіцієнта $k_{\ и}$

Межі змін *I*, $^{П-1}$	**Формула для *ki***	**Група сталі**
0,4… 10 0,001… 0,4	$k_u = 0{,}38 + 0{,}065 \cdot (7 + \ell nu)$ $k_u = 0{,}22 + 0{,}072 \cdot (7 + \ell nu)$	I, II
0,001… 10	$k_u = 0{,}38 + 0{,}065 \cdot (7 + \ell nu)$	III – VII
≥ 10	$k_u = 1{,}03 + 0{,}1 \cdot ((\ell nu) - 2{,}3)^{1{,}5}$ $k_u = 1{,}03 + 0{,}11 \cdot ((\ell nu) - 2{,}3)^{1{,}05}$ $k_u = 1{,}03 + 0{,}13 \cdot ((\ell nu) - 2{,}3)^{2{,}2}$	I, II III – V, VII VIII

Розрахунок коефіцієнта тертя

Коефіцієнт тертя обчислюється:

$$f = f_0 \cdot k_B \cdot k_T \cdot k_M \cdot k_V \cdot k_e \cdot k_{CM} \cdot k_{OK}; \quad (2.10)$$

$$f_П = f \cdot (0{,}92 + 1{,}27 \cdot \varepsilon), \quad (2.11)$$

де $f_0 -$ - коефіцієнт тертя; $k_B, k_{T,} k_{M,} k_{V,} k_e, k_{CM,} k_{OK}$ - поправочні коефіцієнти з урахуванням, відповідно: матеріалу валку, поверхневої твердості, матеріалу штаби, окружної швидкості валка і відносного обтиску штаби, типу технологічного мастила, типу накипу на поверхні штаби;
$f_П -$ Індекс тертя.

Факторів f_0, k_T і k_V Рівний:

$$f_0 = 0{,}27 - 0{,}1[(t/400) - 2]^2;$$

$$k_T = 1 + 0{,}43(1 - HSD/65)^2;$$

$$k_V = 0{,}76 + 0{,}82_{(1{,}02\text{-}0{,}102\ В)^2} \text{ - } Р_{ів} < 10\,м/с; \quad (2.12)$$

$$k_V = 0{,}76 \quad \text{- при } V < 10\,м/с; \quad (2.13)$$

Коефіцієнт k_e дорівнює ($\varepsilon \geq 0{,}1$) $\quad k_e = 0{,}85 + 0{,}5 \cdot \varepsilon$,

де t - температура металу,
$C_{0;}$ HSD - твердість валків по Шору;
v - окружна швидкість прокатки, м/с;
ε - відносний обтиск.

Значення поправочного коефіцієнта k_B Беруть в залежності від стану поверхні рулонів:

Характеристики рулонів	Значення
Нові сталеві або чавунні вибілені рулони	0,75
Чавунні та сталеві валки після двох годин роботи	1
Зношені сталеві та чавунні рулони	1,15-1,2
Рулони сталеві з накаткою	1,2-1,4

Про вальцювання з емульсією ($К_{см}$ = 1,0) і мінеральним коефіцієнтом змащення $k_{CM} = 0{,}9$, а з рослинним - $k_{CM} = 0{,}8$. При вальцюванні за допомогою вагової печі $k_{OK} = 0{,}7$, але на повітрі $k_{OK} = 1{,}0$.

Розрахунок середньої нормальної напруги дотику

Загальним для всіх випадків гарячої прокатки виразом для розрахунку середньої нормальної напруги є [1].

$$p_{cp} = \sigma_{\phi}\left[1 + 0{,}48 f_{\Pi} \cdot n_{\Phi}(1-a) l_d / h_{cp}\right] \cdot \left[1 + (1 - l_d / h_{cp})^2\right] \quad (2.14)$$

де $\sigma_{\Phi} -$ - стійкість металу до деформації ($\sigma_{\Phi} = \sigma_T \cdot \lambda$); $\sigma_T -$ напруга потоку металу; $\lambda -$ Коефіцієнт гучності ($\lambda = 1 - 1{,}15$); $f_{\Pi} -$ індекс тертя;

Для умов прокатки на об'ємних, заготівельних, великосортових станах, чорнових клітеях сортових станів на $l_d / h_{CP} < 1$ та ФП ≈ 0.4 У нас є

$$p_{cp} = \sigma_{\phi}\left[1 + 0{,}2 \cdot n_{\Phi}(1-a) l_d / h_{cp}\right] \cdot \left[1 + (1 - l_d / h_{cp})^2\right] \quad (2.15)$$

Для слябів, товстолистових станів, чорнових клітей великих заводів в Україні $n_{\Phi} = 1$, $a \approx 0$, $l_d / h_{CP} < 1$ отримуємо

$$p_{cp} = \sigma_{\phi}\left[1 + 0{,}2 \cdot l_d / h_{cp}\right] \cdot \left[1 + (1 - l_d / h_{cp})^2\right]. \quad (2.16)$$

Для сортових станів примати $l_d / h_{CP} < 1$

$$p_{cp} = \sigma_{\phi}\left[1 + 0{,}48 f_{\Pi} \cdot n_{\Phi}(1-a) l_d / h_{cp}\right]. \quad (2.17)$$

Для станів гарячої прокатки плоского (смугового) прокату ($a \approx 0$)

$$p_{cp} = \sigma_{\phi}\left[1 + 0{,}48 f_{\Pi} \cdot l_d / h_{cp}\right]. \quad (1.16)$$

Для смугових станів холодної прокатки

$$p_{cp} = \sigma_{\phi}\left[1 + C_H f_{\Pi} \cdot l_C / h_{cp}\right], \quad (2.18)$$

де $l_C -$ - довжина контактної дуги з урахуванням пружної деформації валків і штаб [1].

2.2. Визначення крутного моменту металопрокату в кліті кварто

Достовірне визначення параметрів потужності (EEE) прокатного стану (сили, крутного моменту і потужності) можливо за умови точного розрахунку всіх параметрів, включених в основні формули [10]. При цьому необхідно, щоб кожен параметр повністю відповідав умовам деформації металу і сам по собі мав високу точність. Не можна сказати, що якась теоретична формула дає задовільний збіг з експериментальними даними, якщо при розрахунку середнього нормального контактного напруження (SNC) неточність позитивних даних одного параметра (наприклад, коефіцієнта тертя) компенсується похибкою мінуса розрахункових даних, іншого параметра (напруження потоку металу).

У роботах [12-17] запропонований комплексний метод розрахунку ЦНС і сили прокатки, при якому кожен вихідний параметр (коефіцієнт тертя, напрямок потоку металу, довжина конічної контактної дуги, середнє нормальне контактне напруження) визначається і перевіряється на точність за даними великих промислових і лабораторних досліджень. Однак, на нашу думку, для отримання точних розрахункових даних по крутному моменту необхідні додаткові дослідження для уточнення розрахунку коефіцієнта крутного моменту плеча і впливу тертя у процесі прокатки (ковзання) при контакті робочого і опорного валків для умов прокатки сталі.

У загальному випадку статичний крутний момент прокатки $M_{НР}$ по шийках робочих валків визначається виразом

$$M_{НР} = M_{П} + M_{ТС} + M_{ОР} \qquad (2.19)$$

де $M_{П}$ - крутний момент прокатки; $M_{ТС}$ - момент тертя прокатки - ковзання по міжвальному контакту; $M_{ОН}$ - момент тертя в підшипниках опорних роликів.

Крутний момент самого прокатного виробу теоретично зазвичай розраховується з сили прокатки за формулою (для двох валків)

$$M_{П} = 2\psi \cdot l_d \cdot P, \qquad (2.20)$$

де ψ - коефіцієнт положення рівноважних сил в зоні деформації (коефіцієнт крутного моменту); P - сила прокатки; l_d - довжина контактної дуги (для холодної прокатки l_C).

Однак в ряді випадків [18] коефіцієнт положення рівноважних сил визначається крутним моментом на шийках роликів і пропонується розраховувати за виразом

$$\psi = 0{,}498 - 0{,}0283 \left(\frac{l_d}{h_{CP}} \right). \qquad (2.21)$$

ψ - коефіцієнт експресії, визначається при наявності тертя прокатки-ковзання в міжвалковому контакті і може бути використаний при розрахунку параметрів сили в умовах, близьких до параметрів прокатки на стані широкополосної гарячої прокатки (ШСГП) 1680. Крім того, в роботі [17] не повідомляється, яким чином було враховано вплив ψ на коефіцієнт пружного сплющування валків.

За результатами експериментальних досліджень [18], проведених на станах холодної прокатки, було відзначено, що втрати потужності через тертя прокатки-ковзання в міжвалковому контакті складають $\eta_{TC} = 8 \ldots 60\%$ і обумовлені силою і швидкістю прокатки, а також шорсткістю робочих валків. У даній роботі коефіцієнт $\eta_{TЗ}$ був визначений шляхом порівняння теоретично визначених значень і на підставі результатів експериментальних досліджень тертя прокатки і ковзання по міжвалковому контакту.

У лабораторних умовах встановлено, що момент тертя прокатки при обертанні одного робочого валка іншим не перевищує 1% від крутного моменту на шпинделях, що цілком можливо при роботі з сформованим циліндричним профілем.

Для розрахунку ψ коефіцієнта в центрі деформації відомо кілька рішень, отриманих теоретично і експериментально [11, 16-18, 19].

Виходячи з закономірностей розподілу нормальних контактних напружень і величини зон лага і випередження, А. А. Корольов [10] отримав

формули для розрахунку коефіцієнта ψ для жорстких валків з урахуванням впливу відносного обтиску і параметра $f \cdot l_d/h_{CP}$ (h_{CP} - середня товщина штаб в осередку тензодатчика). Аналіз формул показав, що їх можна використовувати в умовах прокатки при відсутності пружних деформацій валків і штабелів. тобто на $l_d/h_{CP} \leq 3$.

У роботах [16,19] проведено аналіз теоретичних діаграм розподілу нормальних контактних напружень уздовж контактної дуги для різних (квазіоднорідних) умов деформацій та визначено: площі графіків, положення центру ваги областей графіка, плече моменту та коефіцієнт плеча моменту ψ. Отримані дані відображаються залежністю **(** $f/\alpha = 1{,}3$, $l_d / h_{cp} \leq 3$), яка з тією ж точністю дещо простіше, ніж формули з роботи [10]

$$\psi = 0{,}51\left(\frac{l_d}{h_{CP}}\right)^{-0{,}09} \quad . \tag{2.22}$$

Формула (2.22), на відміну від формули (2.21), дозволить визначити коефіцієнт для розрахунку фактичного крутного моменту в зоні деформації, але для практичних умов прокатки при $l_d/h_{CP} \leq 3$ вона може бути використана при відсутності пружних деформацій валків і штаб і при наявності даних про величину тертя прокатки - моменту ковзання.

При гарячій або холодній прокатці (при $P_{CP} \geq 200$ Н/мм^2) спостерігається помітна пружна деформація валків і межа центру деформації проходить через центральну лінію валків, що не враховується в формулі (2.22).

В таких умовах дійсні значення коефіцієнта ψ_c будуть значно менше, так як центр ваги діаграми нормальних напружень зміщується ближче до осі валків. Для аналогічних умов деформації при прокатці в валках діаметром 205 мм сталевих і алюмінієвих штаб, авторами [21] експериментально отримано наступний вираз (без урахування витрат на тертя в міжвалковому контакті)

$$\psi_C = 0{,}48(l_d/l_c)^2 \quad . \tag{2.23}$$

У роботі також представлені результати досліджень зміни коефіцієнта ψ_C в залежності від величини обтиску сталевої штаби і виду технологічного мастила при прокатці в робочих валках діаметром 135 мм (кліті кварто). Встановлено, що при зменшенні параметра від l_d / l_C=0,95 до l_d / l_C=0,65 ψ_c (коефіцієнт моменту С-плеча) зменшується, відповідно, з $\psi_{C=0,43}$ до $\psi_{C=0,16}$ (мастило - полімеризоване бавовняне масло). З дослідів на такі параметри деформації, відповідно, були отримані наступні: $\psi_{C = 0,44}$ і $\psi_{C = 0,177}$. Схожість експериментальних даних двох незалежних дослідів дозволяє використовувати формулу (5) для розрахунку крутного моменту і потужності тільки на стані холодної прокатки, розміри якого близькі до експериментального стану.

Подальший аналіз даних у [21] показує, що для прокатки алюмінієвої штаби (м'який метал, гаряча прокатка при $l_d/h_{CP} \geq 3$) доречний інший вид виразу, а саме

$$\psi_C \approx 0,53(l_d/l_C)^{1,8}. \qquad (2.24)$$

Торкаючись досліджень [21], відзначимо, що всі дані про коефіцієнт ψ_c плеча моменту були отримані при наявності незначного тертя прокатки (ковзання) в міжвалковому контакті кліті кварто.

Слід також зазначити, що для умов промислових станів замість тертя прокатки в міжвалковому контакті фактично виникає тертя ковзання за рахунок різниці діаметрів по довжині валкових барабанів через наявність профілювання і зношування їх бочок.

З урахуванням вищевикладеного, сумарний статичний момент прокатки від пластичної деформації ($M_П$) може бути визначений за виразом (крім моментів тертя на ділянках головної лінії стану і холостого ходу)

$$M_П = M_{НР} - M_{ТС} - M_{оп}, \qquad (2.25)$$

де $M_{нр}$ - крутний момент на робочих валках, що визначається експериментально з врахуванням втрат на тертя на ділянках прокатної лінії.

У загальному випадку момент ковзання на міжвалковому контакті визначається за формулою (для двох валків)

$$M_{TC} = 2 f_C \cdot P \cdot R, \quad (2.26)$$

де f_C - коефіцієнт тертя ковзання в міжроликовому контакті.

Втрати на тертя на шийках резервних валків визначають за формулою

$$M_{ОП} = 2\mu \cdot r \cdot P \cdot (R/R_{ОП}), \quad (2.27)$$

де μ– коефіцієнт тертя в підшипниках опорних валків (μ=0,003); $R_{ОП}$ - радіус опорного валка; r - радіус горловини запасного валка; R - радіус робочого валка.

Величина коефіцієнта тертя ковзання була визначена за даними роботи [23], в якій досліджено вплив швидкості ковзання між валками з номінальним діаметром 100 мм, окружної швидкості v = 0,30 м/с та їх різниці Δ = 0,05; 0,2 та 0,65 мм.

Коефіцієнт тертя визначався зі співвідношення $f_C = M_{TC}/R$. Момент тертя M_{TC} визначали в умовах вільного ковзання на міжвалковому контакті до моменту повної вибірки зазорів на валках, коли один з валків приводиться в рух і функціонує як опорний валок кліті кварто, тобто без приводу. У тесті на сухий валок коефіцієнт тертя дорівнював $f_C = 0{,}017$ *при* Δ = 0,05 мм (відносна швидкість ковзання $v_{SC} \approx 0{,}0005$) і $f_C = 0{,}024$ *при* Δ = 0,2 мм ($v_{SC} \approx 0{,}002$) (P=14,0 кН):

$$v_{CK} = \frac{v_B - v_M}{v_B} = \frac{D_B - D_M}{D_B}, \quad (2.28)$$

де v_B, D_B - частота обертання і діаметр ведучого валка; v_M D_M – частота обертання і діаметр веденого валка.

При наявності технологічного мастила коефіцієнт тертя знижується приблизно вдвічі ($k_{CM} \approx 0{,}5$). Тобто при 4-кратному збільшенні швидкості ковзання коефіцієнт тертя в міжвалковому контакті збільшується в 1,4 рази.

При цих умовах контакту валка і припускаючи, що при кожній зміні швидкості ковзання в 4 рази коефіцієнт тертя в міжвалковому контакті з одним ведучим роликом змінюється в 1,4 рази, отримаємо приблизну залежність наступного типу (при $v_{SC} = 0{,}00012$)

$$f_C \approx k_{CM} [0{,}012 + 0{,}009(v_{SC} \cdot 103 - 0{,}12)^{0,5}] \quad (2.29)$$

У реальному стандартному (листопрокатному) стані завжди існує різниця діаметрів неприводних опорних і ведених робочих валків по довжині їх барабанів, що створює умови для виникнення відносного прослизання на міжвалковому контакті, порівнянного з названими вище [24]. Очевидно, що чим більше опуклість або розвиток кренів, тим більше відносна швидкість ковзання і коефіцієнт тертя. Таким чином, при різниці діаметрів $\Delta D=0{,}3$ мм по довжині веденого робочого валка (діаметр 600 мм) і опорного валка відносна швидкість ковзання дорівнює $v_{SC} \approx 0{,}0005$, а коефіцієнт тертя ковзання за формулою дорівнюватиме $f_C \approx 0{,}017$.

Оцінка наведеного алгоритму розрахунку крутного моменту для самої пластичної деформації буде проводитися за даними роботи [17] для стану безперервної гарячої прокатки 1680.

У роботі [17] сумарну потужність головного приводу визначали по струму і напрузі з урахуванням втрат на додаткові сили тертя і потім крутного моменту на робочих валках. Прийнято ККД лінії кліті $\eta = 0{,}865$, радіус горловини резервного валка $r = 0{,}325$ м.

3. ДОСЛІДЖЕННЯ ТА РОЗРАХУНОК ПОКАЗНИКІВ ПРИ ГОРЯЧИЙ ПРОКАТЦІ

3.1. Алгоритми обчислювальної частини

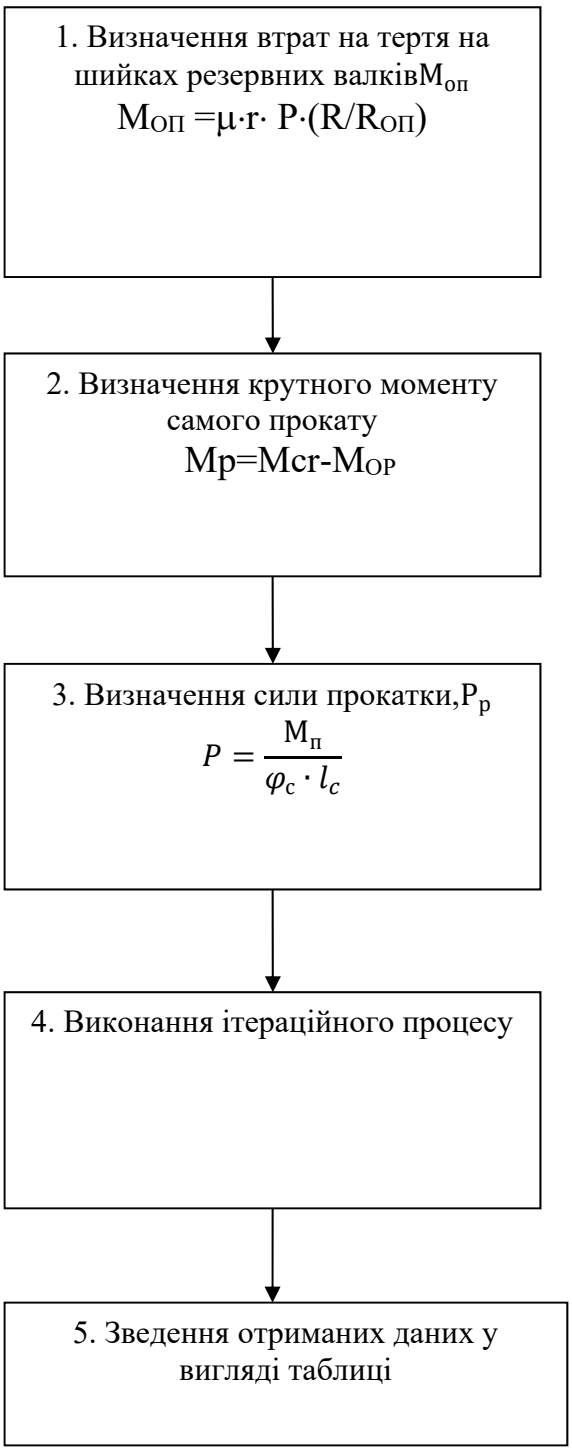


Рисунок 3.1. Алгоритм визначення моменту прокатки в горловинах робочих валків

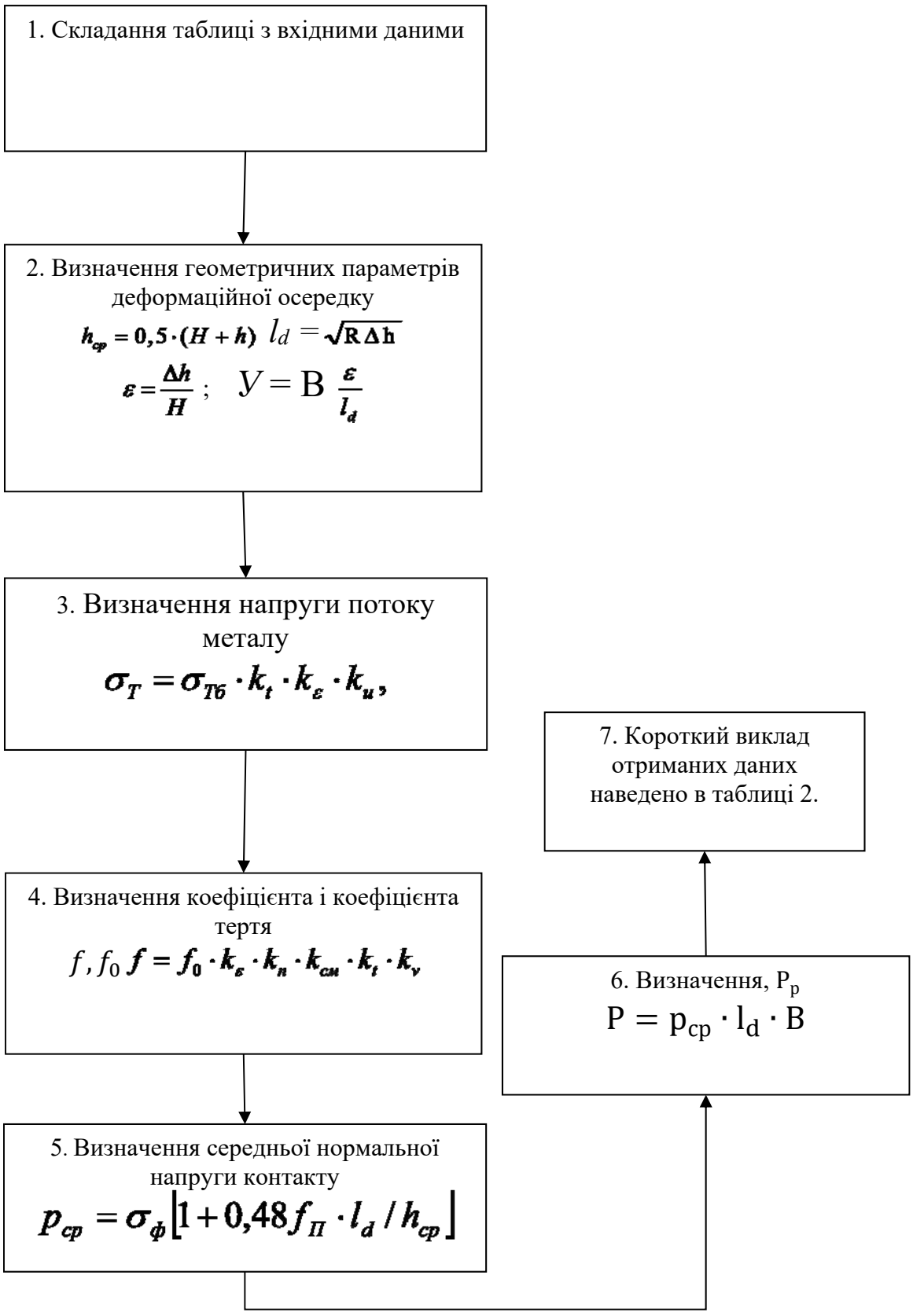


Рисунок 3.2. Алгоритм розрахунку параметрів штабу гарячої прокатки

3.2 Модель розрахунку зусилля прокатки за рахунок крутного моменту при гарячій прокатці.

Таблиця 3.1. Режим випробувань тиском в групі обробки безперервного стану 1680 [24]

Кліть	Товщина, мм	Відносний обтиск, мм	Швидкість прокатки, м/с	Потужність, кВт	Зусилля прокатки, МН	Середня нормальна напруга контакту, $Н/мм^2$
5	11,74	11,26	1,52	3960	18,75	210
6	7,6	4,14	2,35	4130	14,15	255
7	4,96	2,64	3,6	4070	14,86	328
8	3,74	1,22	4,77	4410	11,6	360
9	2,84	0,93	6,35	3780	10,26	358
10	2,5	0,31	7,15	1940	6,12	337

Розглянемо алгоритм розрахунку зусилля прокатки для найпростішого випадку гарячої прокатки 2,5×1510 мм, для кліті №5 на широкополосному стані 1680, гарячої прокатки[21].

Кліть 5

З метою отримання точних розрахункових даних по крутному моменту необхідні додаткові дослідження для уточнення розрахунку коефіцієнта крутного моменту важеля і моменту тертя прокатки (ковзання) в контакті робочого і опорного валків для умов прокатки сталі.

У загальному випадку статичний крутний момент прокатки $M_{НР}$ по шийках робочих валків визначається виразом

$$M_{ПР} = M_{П} + M_{ТС} + M_{ВС}$$

$$Mп=Mкр - M_{ТС} - M_{OS}$$

де $M_{П}$ - крутний момент самої прокатки; $M_{ТС}$ - момент тертя прокатки - ковзання по міжвальному контакту; M_{OS} - момент тертя в підшипниках опорних роликів,

Втрати на тертя на шийках резервних валків визначають за формулою

$$M_{ОП} = \mu \cdot r \cdot P \cdot (R/R_{ОП}) ,$$

$$M_{ОП} = 0{,}004 \cdot 0{,}325 \cdot 18{,}75 \cdot (\frac{300}{600}) = 0{,}012 \text{ МН*м,}\cdot$$

де μ– коефіцієнт тертя в підшипниках опорних валків (μ=0,004); $R_{ОР}$ - радіус опорного валку; r - радіус горловини запасного валку; R - радіус робочого валку.

Розрахуємо крутний момент самого прокату відповідно до розрахункового крутного моменту на шийці валку.

$$M_{П}=0{,}37-0{,}012=0{,}359 \text{ МН}\cdot$$

Визначимо силу прокатки:

$$P = \frac{M_П}{\psi \cdot l_d} = \frac{0{,}359}{0{,}45 \cdot 0{,}059} = 13{,}52 \text{ МН}$$

Розрахуємо силу прокатки.

1. $M_{ОР} = 0{,}004 \cdot 0{,}325 \cdot 16 \cdot (\frac{300}{600}) = 0{,}0104$ МН·м

$M_П = 0{,}37 - 0{,}0104 = 0{,}359$ МН·м

$$P = \frac{M_П}{\psi \cdot l_d} = \frac{0{,}359}{0{,}45 \cdot 0{,}035} = 13{,}52 \text{ МН}$$

Кліть 6

$M_{ОР} = 0{,}004 \cdot 0{,}325 \cdot 14{,}15 \cdot (\frac{300}{600}) = 0{,}009$ МН·м,·

$M_П = 0{,}218 - 0{,}009 = 0{,}209$ МН·м

$$P = \frac{M_П}{\psi \cdot l_d} = \frac{0{,}209}{0{,}45 \cdot 0{,}035} = 13{,}26 \text{ МН}$$

Розрахуємо силу прокатки:

$M_{ОП} = 0{,}004 \cdot 0{,}325 \cdot 13{,}26 \cdot \frac{300}{600} = 0{,}0086$ МН·м

2.Мп=0,218-0,0086=0,209 МН·м

3.$P = \frac{M_П}{\psi \cdot l_d} = \frac{0{,}209}{0{,}45 \cdot 0{,}035} = 13{,}26$ МН

Кліть 7

$M_{ОП} = 0{,}004 \cdot 0{,}325 \cdot 14{,}86 \cdot (\frac{300}{600}) = 0{,}0096$ МН·м

$M_П = 0{,}124 - 0{,}0096 = 0{,}11$ МН ·м

$$P = \frac{M_П}{\psi \cdot l_d} = \frac{0{,}11}{0{,}44 \cdot 0{,}028} = 9{,}15 \text{ МН}$$

Розрахуємо силу прокатки.

$M_{ОП} = 0{,}004 \cdot 0{,}325 \cdot 9{,}15 \cdot (\frac{300}{600}) = 0{,}007$ МН·м

$M_П = 0{,}124 - 0{,}007 = 0{,}12$ МН·м

$$P = \frac{M_П}{\psi \cdot l_d} = \frac{0{,}12}{0{,}44 \cdot 0{,}028} = 9{,}36 \text{ МН}$$

$M_{ОП} = 0{,}004 \cdot 0{,}325 \cdot 13 \cdot (\frac{300}{600}) = 0{,}0084$ МН·м

$M_П = 0{,}124 - 0{,}0084 = 0{,}115$ МН·м

$$P = \frac{M_П}{\psi \cdot l_d} = \frac{0{,}115}{0{,}44 \cdot 0{,}028} = 9{,}33 \text{ МН}$$

Кліть 8

$$М_{ОП} = 0{,}004 \cdot 0{,}325 \cdot 11{,}6 \cdot \left(\frac{300}{600}\right) = 0{,}0075 \text{ МН} \cdot \text{м},$$

$$М_П = 0{,}088 - 0{,}0075 = 0{,}08 \text{ МН м} \cdot$$

$$P = \frac{М_П}{\psi \cdot l_d} = \frac{0{,}08}{0{,}44 \cdot 0{,}019} = 9{,}56 \text{ МН}$$

Розрахуємо силу прокатки.

$$М_{ОП} = 0{,}004 \cdot 0{,}325 \cdot 9{,}56 \cdot \left(\frac{300}{600}\right) = 0{,}006 \text{ МН} \cdot \text{м}$$

$$М_П = 0{,}088 - 0{,}006 = 0{,}082 \text{ МН} \cdot \text{м}$$

$$P = \frac{M_П}{\psi \cdot l_d} = \frac{0{,}082}{0{,}44 \cdot 0{,}019} = 9{,}8 \text{ МН}$$

$$М_{ОП} = 0{,}004 \cdot 0{,}325 \cdot 10{,}5 \cdot \left(\frac{300}{600}\right) = 0{,}0068 \text{МН} \cdot \text{м}$$

$$М_П = 0{,}088 - 0{,}0068 = 0{,}081 \text{ МН} \cdot \text{м}$$

$$P = \frac{M_П}{\psi \cdot l_d} = \frac{0{,}081}{0{,}44 \cdot 0{,}019} = 9{,}68 \text{МН}$$

Кліть 9

$$М_{ОП} = 0{,}004 \cdot 0{,}325 \cdot 10{,}26 \cdot \left(\frac{300}{600}\right) = 0{,}0066 \text{ МН} \cdot \text{м},\cdot$$

$$М_П = 0{,}061 - 0{,}0066 = 0{,}055 \text{ МН м} \cdot$$

$$P = \frac{М_П}{\psi \cdot l_d} = \frac{0{,}055}{0{,}43 \cdot 0{,}017} = 7{,}52 \text{МН}$$

Розрахуємо силу прокатки.

$$М_{ОП} = 0{,}004 \cdot 0{,}325 \cdot 7{,}52 \cdot \left(\frac{300}{600}\right) = 0{,}0048 \text{ МН} \cdot \text{м}$$

$$М_П = 0{,}061 - 0{,}0048 = 0{,}056 \text{ МН} \cdot \text{м}$$

$$P = \frac{M_П}{\psi \cdot l_d} = \frac{0{,}056}{0{,}43 \cdot 0{,}017} = 7{,}66 \text{МН}$$

Кліть 10

$$М_{ОП} = 0{,}004 \cdot 0{,}325 \cdot 6{,}12 \cdot \left(\frac{300}{600}\right) = 0{,}0039 \text{ МН} \cdot \text{м},$$

$$Мп = 0{,}033 - 0{,}0039 = 0{,}029 \text{ МН} \cdot \text{м}$$

$$P = \frac{M_П}{\psi \cdot l_d} = \frac{0,029}{0,45 \cdot 0,010} = 6,44 \text{ МН}$$

Розрахуємо силу прокатки.

$M_{ОП} = 0,004 \cdot 0,325 \cdot 6,44 \cdot (\frac{300}{600}) = 0,0041$ МН·м

$M_П = 0,033 - 0,0041 = 0,028$ МН·м

$$P = \frac{M_П}{\psi \cdot l_d} = \frac{0,028}{0,45 \cdot 0,010} = 6,22 \text{МН}$$

Розрахунок штаби: 2,5×1510

Кліть 5

Розглянемо алгоритм розрахунку сили прокатки з використанням параметрів енергетичної сили прокатки.

1. Визначення геометричних параметрів основної кліті за допомогою формул [1]

Середня товщина елементів в центрі деформації

$$h_{ср} = 0,5 \cdot (H + h) = 0,5 \cdot (23 + 11,74) = 17.37 мм$$

Довжина дуги і кут зіткнення стійок і валків

$l_d = \sqrt{R \Delta h} = (305 \cdot 11.26)^{0,.5} = 58,12$мм ;

$$\alpha = \frac{l_d}{R} = \frac{58,12}{305} = 0,19 рад.$$

Відносні швидкості обтиску і деформації

$$\varepsilon = \frac{\Delta h}{H} = \frac{11,74}{23} = 0,51(51\%);$$

$$У = В\frac{\varepsilon}{l_d} = 1520 \cdot \frac{0,51}{58.12} = 13 с^{-1}.$$

2. Визначення напруги течії металу:

$$N_1 = 0,08 + 0,01 + 0,38 + 0,02 + 0,06 = 0,55\%;$$

$$\sigma_{Тб} = 80 + 25\left\{1 - \left[(5 - 0,55)/4,5\right]^{1,8}\right\} = 80,89 Н / мм^2;$$

$$k_t = 1,66 - 1,1(2,5 - 2)^{0,7} = 1,0;$$

$$k_\varepsilon = 1 + 0,43\left[1 - 6,3(0,5 - 0,51)^2\right] = 1,42;$$

$$k_u = 1,03 + 0,1(2,56 - 2,3)^{1,5} = 1,04;$$

$$\sigma_T = 80,89 \cdot 1,0 \cdot 1,422 \cdot 1,04 = 119,6 H / мм^2.$$

3. Визначення коефіцієнту тертя при гарячій прокатці [1] за формулою (2.10):

$$f = f_0 \cdot k_T \cdot k_v \cdot k_B \cdot k_M \cdot k_e \cdot k_{CM} \cdot k_{ok},$$

де f_0 - базовий коефіцієнт тертя, який залежить від температури металу

$$f_0 = 0,27 - 0,1 \cdot \left(\frac{t}{400} - 2\right)^2 = 0,27 - 0,1 \cdot \left(\frac{1010}{400} - 2\right)^2 = 0,242.$$

При твердості валків 70 HSD ми маємо:

$$k_T = 1 + 0,43\left(1 - \frac{HSD}{65}\right)^2 = 1,0$$

Чинник k_V при v = 2,35 м/с

$$k_V = 0,76 + 0,82(1 - 0,1 \cdot 2.35)^2 = 1,23$$

Для відносного обтиску маємо:

$$k_\varepsilon = 0,85 + 0,5 \cdot 0,3 = 1,0.$$

Для зношених валків ми маємо $k_B \approx 1,2$, для штаби зі сталі 08кп - $k_M = 1,0$; При вальцюванні штаб з малою питомою вагою $k_{OK} = 1,0$; Коли штаби охолонуть у воді $k_{CM} = 1,0$. Тоді коефіцієнт тертя з формули (2.10) і коефіцієнт тертя з формули (2.11) дорівнюють:

$$f = 0,242 \cdot 1,0 \cdot 0,927 \cdot 1,23 \cdot 1,0 \cdot 1,0 \cdot 1,0 \cdot 1,0 = 0,42;$$

$$f_П = 0,275(0,92 + 1,27 \cdot 0,3) = 0,66$$

4. Середня нормальна напруга контакту.

для $l_d / h_{ср} = 58,12 / 17,37 = 3,34$

$$p_{ср} = \sigma_ф \left\lfloor 1 + 0,48 f_П \cdot l_d / h_{ср} \right\rfloor$$

$$p_{ср} = 119,6\left[1 + 0,48 \cdot 0,354 \cdot 3,34\right] = 239.4 Н / мм^2.$$

$$P = p_{ср} \cdot l_d \cdot B$$

$$P=239,4 \cdot 0,059 \cdot 1,51= 20,74 \text{ МН}$$

Кліть 6

Розглянемо алгоритм розрахунку сили прокатки з використанням параметрів енергетичної сили прокатки.

1. Визначення геометричних параметрів основної кліті за допомогою формул [1].

Середня товщина елементів в центрі деформації

$$h_{ср} = 0,5 \cdot (H + h) = 0,5 \cdot (11,74 + 7,6) = 9,67 мм$$

Довжина дуги і кут зіткнення стійок і валків

$$l_d = \sqrt{R \Delta h} = (300 \cdot 4,14)^{0,5} = 35,2 \text{мм}$$

$$\alpha = \frac{l_d}{R} = \frac{35,2}{305} = 0,11 рад.$$

Відносні швидкості обтиску і деформації

$$\varepsilon = \frac{\Delta h}{H} = \frac{4,14}{11,74} = 0,35(35\%);$$

$$У = В\frac{\varepsilon}{l_d} = 2350 \cdot \frac{0,35}{35,2} = 23.3 с^{-1}.$$

2. Визначення напруги течії:

$$N_1 = 0,08 + 0,01 + 0,38 + 0,02 + 0,06 = 0,55\%;$$

$$\sigma_{Тб} = 80 + 25\left\{1 - \left[\left(5 - 0,55\right) / 4,5\right]^{1,8}\right\} = 80,89 Н / мм^2;$$

$$k_t = 1,66 - 1,1(2,45 - 2)^{0,7} = 1,0;$$

$$k_\varepsilon = 1 + 0,43\left[1 - 6,3(0,5 - 0,35)^2\right] = 1,39;$$

$$k_u = 1,03 + 0,1(3,14 - 2,3)^{1,5} = 1,1;$$

$$\sigma_T = 80,89 \cdot 1,0 \cdot 1,422 \cdot 1,24 = 123,6 Н / мм^2.$$

3. Визначення коефіцієнту тертя при гарячій прокатці [1] за формулою (2.10):

$$f=f_0 \cdot k_T \cdot k_v \cdot k_B \cdot k_M \cdot k_e \cdot k_{CM} \cdot k_{ok},$$

де f_0 - базовий коефіцієнт тертя, який залежить від температури металу

$$f_0 = 0,27 - 0,1 \cdot \left(\frac{t}{400} - 2\right)^2 = 0,27 - 0,1 \cdot \left(\frac{980}{400} - 2\right)^2 = 0,25.$$

При твердості валків 70 HSD ми маємо:

$$k_T = 1 + 0,43\left(1 - \frac{HSD}{65}\right)^2 = 1,0$$

Коефіцієнт k_V при v = 2,35 м/с:

$$k_V = 0,76 + 0,82(1 - 0,1 \cdot 2.35)^2 = 1,23$$

Для відносного обтиску маємо:

$$k_\varepsilon = 0,85 + 0,5 \cdot 0,35 = 1,02.$$

Для зношених валків ми маємо $k_B \approx 1,2$, для штаби з сталі 08кп - $k_M = 1,0$; При вальцюванні штаб з малою питомою вагою $k_{OK} = 1,0$; Коли штаби охолонуть у воді $k_{CM} = 1,0$. Тоді коефіцієнт тертя з формули (2.10) і коефіцієнт тертя з формули (2.11) дорівнюють:

$$f = 0,25 \cdot 1,0 \cdot 1,02 \cdot 1,23 \cdot 1,0 \cdot 1,0 \cdot 1,0 \cdot 1,0 = 0,38;$$

$$f_П = 0,21(0,92 + 1,27 \cdot 0,35) = 0,52$$

4. Середня нормальна напруга контакту.

для $l_d / h_{ср} = 35,2 / 9,67 = 3,64$

$$p_{ср} = \sigma_ф \left[1 + 0,48 f_П \cdot l_d / h_{ср}\right]$$

$$p_{ср} = 123,6\left[1 + 0,48 \cdot 0,28 \cdot 3,64\right] = 243,06 Н / мм^2.$$

$$P = p_{ср} \cdot l_d \cdot B$$

P=243,06·0,036·1,51=13,24 МН

Кліть 7

Середня товщина елементів в центрі деформації

$$h_{ср} = 0,5 \cdot (H + h) = 0,5 \cdot (7,6 + 4,96) = 6,28 мм$$

Довжина дуги і кут зіткнення стійок і валків

$$l_d = \sqrt{R \Delta h} = (300 \cdot 2,64)^{0,5} = 28,38 мм$$

$$\alpha = \frac{l_d}{R} = \frac{28,38}{300} = 0,095 рад.$$

Відносні швидкості обтиску і деформації

$$\varepsilon = \frac{\Delta h}{H} = \frac{2,64}{7,6} = 0,35(35\%);$$

$$У = В \frac{\varepsilon}{l_d} = 3600 \cdot \frac{0,35}{28.38} = 44,07 c^{-1}.$$

2. Визначення напруги течії металу:

$$N_1 = 0,08 + 0,01 + 0,38 + 0,02 + 0,06 = 0,55\%;$$

$$\sigma_{Тб} = 80 + 25\left\{1 - \left[\left(5 - 0,55\right) / 4,5\right]^{1,8}\right\} = 80,89 Н / мм^2;$$

$$k_t = 1,66 - 1,1(2,37 - 2)^{0,7} = 1,11;$$

$$k_\varepsilon = 1 + 0,43\left[1 - 6,3(0,5 - 0,35)^2\right] = 1,37;$$

$$k_u = 1,03 + 0,1(3,78 - 2,3)^{1,5} = 1,21;$$

$$\sigma_T = 80,89 \cdot 1,11 \cdot 1,37 \cdot 1,21 = 148,02 Н / мм^2.$$

3. Визначення коефіцієнту тертя при гарячій прокатці [1] за формулою (2.10)

$$f = f_0 \cdot k_T \cdot k_v \cdot k_B \cdot k_M \cdot k_e \cdot k_{CM} \cdot k_{ok},$$

де f_0 - базовий коефіцієнт тертя, який залежить від температури металу.

$$f_0 = 0,27 - 0,1 \cdot \left(\frac{t}{400} - 2\right)^2 = 0,27 - 0,1 \cdot \left(\frac{950}{400} - 2\right)^2 = 0,26.$$

При твердості валків 70 HSD ми маємо:

$$k_T = 1 + 0{,}43\left(1 - \frac{HSD}{65}\right)^2 = 1{,}0$$

Коефіцієнт k_V при v = 2,35 м/с.

$$k_V = 0{,}76 + 0{,}82(1 - 0{,}1 \cdot 3{,}6)^2 = 1{,}1$$

Для відносного обтиску маємо:

$$k_\varepsilon = 0{,}85 + 0{,}5 \cdot 0{,}35 = 1{,}02.$$

Для зношених валків ми маємо $k_B \approx 1{,}2$, для штаби з сталі 08кп - $k_M = 1{,}0$; При вальцюванні штаб з малою питомою вагою $k_{OK} = 1{,}0$; Коли штаби охолонуть у воді $k_{CM} = 1{,}0$. Тоді коефіцієнт тертя з формули (2.10) і коефіцієнт тертя з формули (2.11) дорівнюють:

$$f = 0{,}26 \cdot 1{,}0 \cdot 1{,}02 \cdot 1{,}1 \cdot 1{,}2 \cdot 1{,}0 \cdot 1{,}0 \cdot 1{,}0 = 0{,}38;$$

$$f_П = 0{,}38(0{,}92 + 1{,}27 \cdot 0{,}35) = 0{,}52$$

4. Середня нормальна напруга контакту

для $l_d / h_{cp} = 28{,}34 / 6{,}28 = 4{,}52$

$$p_{cp} = \sigma_ф \left[1 + 0{,}48 f_П \cdot l_d / h_{cp}\right]$$

$$p_{cp} = 154{,}83\left[1 + 0{,}48 \cdot 0{,}52 \cdot 4{,}52\right] = 314{,}6 Н / мм^2.$$

$$P = p_{cp} \cdot l_d \cdot B$$

$$P = 314{,}6 \cdot 0{,}028 \cdot 1{,}5 = 13{,}48 \text{ МН}$$

Кліть 8

Середня товщина елементів в центрі деформації

$$h_{cp} = 0{,}5 \cdot (H + h) = 0{,}5 \cdot (4{,}96 + 3{,}74) = 4{,}35 мм$$

Довжина дуги і кут зіткнення стійок і валків

$$l_d = \sqrt{R \Delta h} = (300 \cdot 1{,}22)^{0{,}5} = 19{,}29 \text{мм}$$

$$\alpha = \frac{l_d}{R} = \frac{19,29}{300} = 0,064\,рад.$$

Відносні швидкості обтиску і деформації

$$\varepsilon = \frac{\Delta h}{H} = \frac{1,22}{4,96} = 0,25(25\%);$$

$$У = \text{В}\frac{\varepsilon}{l_d} = 4770 \cdot \frac{0,25}{19,29} = 60,82c^{-1}.$$

2. Визначення напруги течії металу:

$$N_1 = 0,08 + 0,01 + 0,38 + 0,02 + 0,06 = 0,55\%;$$

$$\sigma_{Тб} = 80 + 25\left\{1 - \left[\left(5 - 0,55\right)/4,5\right]^{1,8}\right\} = 80,89H/мм^2;$$

$$k_t = 1,66 - 1,1(2,32 - 2)^{0,7} = 1,16;$$

$$k_\varepsilon = 1 + 0,43\left[1 - 6,3(0,5 - 0,25)^2\right] = 1,26;$$

$$k_u = 1,03 + 0,1(4,1 - 2,3)^{1,5} = 1,27;$$

$$\sigma_T = 80,89 \cdot 1,16 \cdot 1,26 \cdot 1,27 = 149,64H/мм^2.$$

3. Визначення коефіцієнту тертя при гарячій прокатці [1] за формулою (2.10)

$$\text{f} = \text{f}_0 \cdot k_T \cdot k_v \cdot k_B \cdot k_M \cdot k_e \cdot k_{CM} \cdot k_{ok},$$

де f_0 - базовий коефіцієнт тертя, який залежить від температури металу

$$\text{f}_0 = 0,27 - 0,1 \cdot \left(\frac{t}{400} - 2\right)^2 = 0,27 - 0,1 \cdot \left(\frac{930}{400} - 2\right)^2 = 0,26.$$

При твердості валків 70 HSD ми маємо:

$$k_T = 1 + 0,43\left(1 - \frac{HSD}{65}\right)^2 = 1,0$$

Коефіцієнт k_V при v = 2,35 м/с:

$$k_V = 0,76 + 0,82(1 - 0,1 \cdot 4,77)^2 = 0,98$$

Для відносного обтиску маємо:

$$k_\varepsilon = 0,85 + 0,5 \cdot 0,25 = 0,97 .$$

Для зношених валків ми маємо $k_B \approx 1,2$, для штаби з сталі 08кп - $k_M = 1,0$; При вальцюванні штаб з малою питомою вагою $k_{OK} = 1,0$; Коли штаби охолонуть у воді $k_{CM} = 1,0$.

Тоді коефіцієнт тертя з формули (2.10) і коефіцієнт тертя з формули (2.11) дорівнюють:

$$f = 0,26 \cdot 1,0 \cdot 0,98 \cdot 0,97 \cdot 1,2 \cdot 1,0 \cdot 1,0 \cdot 1,0 = 0,35;$$

$$f_П = 0,35(0,92 + 1,27 \cdot 0,25) = 0,43$$

4. Середня нормальна напруга контакту.

для $l_d / h_{cp} = 19,29 / 4,35 = 4,43$

$$p_{cp} = \sigma_ф \left[1 + 0,48 f_П \cdot l_d / h_{cp}\right]$$

$$p_{cp} = 149,64\left[1 + 0,48 \cdot 0,43 \cdot 4,43\right] = 285,31 Н / мм^2.$$

$$P = p_{cp} \cdot l_d \cdot B$$

P = 285,31·0,019·1,5=8,31 МН

Кліть 9

Середня товщина елементів в центрі деформації

$$h_{cp} = 0,5 \cdot (H + h) = 0,5 \cdot (3,74 + 2,84) = 3,29 мм$$

Довжина дуги і кут зіткнення стійок і валків

$l_d = \sqrt{R \Delta h} = (300 \cdot 0,93)^{0,,5} = 16,84$мм

Відносні швидкості обтиску і деформації

$$\varepsilon = \frac{\Delta h}{H} = \frac{0,93}{3,74} = 0,25(25\%);$$

$$У = В \frac{\varepsilon}{l_d} = 6350 \cdot \frac{0,25}{16,84} = 93,75 с^{-1} .$$

2. Визначення напруги течії металу.

$$N_1 = 0,08 + 0,01 + 0,38 + 0,02 + 0,06 = 0,55\%;$$

$$\sigma_{Tб} = 80 + 25\left\{1 - \left[\left(5 - 0,55\right)/4,5\right]^{1,8}\right\} = 80,89 H/мм^2;$$

$$k_t = 1,66 - 1,1(2,25 - 2)^{0,7} = 1,24;$$

$$k_\varepsilon = 1 + 0,43\left[1 - 6,3(0,5 - 0,25)^2\right] = 1,26;$$

$$k_u = 1,03 + 0,1(4,57 - 2,3)^{1,5} = 1,37;$$

$$\sigma_T = 80,89 \cdot 1,24 \cdot 1,26 \cdot 1,37 = 172,83 H/мм^2.$$

3. Визначення коефіцієнту тертя при гарячій прокатці [1] за формулою (2.10)

$$\text{f} = \text{f}_0 \cdot k_T \cdot k_v \cdot k_B \cdot k_M \cdot k_e \cdot k_{CM} \cdot k_{ok},$$

де f_0- базовий коефіцієнт тертя, який залежить від температури металу

$$\text{f}_0 = 0,27 - 0,1 \cdot \left(\frac{t}{400} - 2\right)^2 = 0,27 - 0,1 \cdot \left(\frac{900}{400} - 2\right)^2 = 0,26.$$

При твердості валків 70 HSD ми маємо:

$$k_T = 1 + 0,43\left(1 - \frac{HSD}{65}\right)^2 = 1,0$$

Коефіцієнт k_V при v = 2,35 м/с

$$k_V = 0,76 + 0,82(1 - 0,1 \cdot 6,35)^2 = 0,87$$

Для відносного обтиску маємо:

$$k_\varepsilon = 0,85 + 0,5 \cdot 0,25 = 0,97.$$

Для зношених валків ми маємо $k_B \approx 1,2$, для штаби з сталі 08кп - $k_M = 1,0$; При вальцюванні штаб з малою питомою вагою $k_{OK} = 1,0$; Коли штаби охолонуть у воді $k_{CM} = 1,0$.

Тоді коефіцієнт тертя з формули (2.10) і коефіцієнт тертя з формули (2.11) дорівнюють:

$$f = 0,26 \cdot 1,0 \cdot 0,87 \cdot 0,97 \cdot 1,2 \cdot 1,0 \cdot 1,0 \cdot 1,0 = 0,33;$$

$$f_{\Pi} = 0,33(0,92 + 1,27 \cdot 0,25) = 0,41$$

4. Середня нормальна напруга контакту.

для $l_d / h_{ср} = 16,84 / 3,29 = 5,12$

$$p_{ср} = \sigma_ф \left[1 + 0,48 f_П \cdot l_d / h_{ср}\right]$$

$$p_{ср} = 172,83\left[1 + 0,48 \cdot 0,41 \cdot 5,12\right] = 347,72 Н / мм^2.$$

$$P = p_{ср} \cdot l_d \cdot B$$

$$P = 347,72 \cdot 0,017 \cdot 1,5 = 8,84 \text{ МН}$$

Таблиця 3.2. Режим випробування тиском в групі обробки безперервного стану 1680 [24]

Кліть	Товщина, мм	Відносний обтиск, мм	Швидкість прокатки, м/с	Потужність, кВт	Зусилля прокатки, МН	Середня нормальна напруга контакту, МН
5	12,88	12,12	1,54	3550	13,67	160
6	8,38	4,5	2,37	3520	12,12	228
7	5,64	2,74	3,52	3640	13,75	322
8	4,19	1,45	4,74	3380	10,15	320
9	3,22	0,97	6,16	2910	10,8	397
10	3	0,22	6,62	1270	4,86	340

Розглянемо алгоритм розрахунку зусилля прокатки для найпростішого випадку гарячої прокатки 3×1400 мм для кліті №5 на широкополосному стані гарячої прокатки 1680.

Кліть 5

З метою отримання точних розрахункових даних по крутному моменту необхідні додаткові дослідження для уточнення розрахунку коефіцієнта крутного моменту важеля і моменту тертя прокатки (ковзання) в контакті робочого і опорного валків для умов прокатки сталі,

У загальному випадку статичний крутний момент прокатки $M_{НР}$ по шийках робочих валків визначається виразом

$$M_{ПР} = M_{П} + M_{ТС} + M_{ВС}$$

$$Mп=Mкр - M_{ТС} - M_{OS}$$

де $M_{П}$ - крутний момент самої прокатки; $M_{ТС}$ - момент тертя прокатки - ковзання по міжвальному контакту; M_{OS} - момент тертя в підшипниках опорних роликів,

Втрати на тертя на шийках резервних валків визначають за формулою

$$M_{ОП} =\mu \cdot r \cdot P \cdot (R/R_{ОП}),$$

$$M_{ОП} = 0{,}004 \cdot 0{,}325 \cdot 13{,}67 \cdot (\frac{300}{600}) = 0{,}009 \text{ МН·м},$$

де μ– коефіцієнт тертя в підшипниках опорних валків (μ=0,004); $R_{ОП}$ - радіус опорного валку; r - радіус горловини запасного валку; R - радіус робочого валку.

Розрахуємо крутний момент самого прокату відповідно до розрахункового крутного моменту на шийці валку.

$$M_{П}=0{,}33-0{,}009=0{,}317 \text{ МН·м}$$

Визначимо силу прокатки:

$$P = \frac{M_{П}}{\psi \cdot l_d} = \frac{0{,}317}{0{,}45 \cdot 0{,}061} = 11{,}56 \text{ МН}$$

Розрахуємо силу прокатки.

$$M_{ОП} = 0{,}004 \cdot 0{,}325 \cdot 13 \cdot (\frac{300}{600}) = 0{,}008 МН \cdot м$$

$$M_{П} = 0{,}33 - 0{,}008 = 0{,}32 МН \cdot м$$

$$P = \frac{M_{П}}{\psi \cdot l_d} = \frac{0{,}32}{0{,}45 \cdot 0{,}061} = 11{,}58 МН$$

Кліть 6

$$M_{ОП} = 0{,}004 \cdot 0{,}325 \cdot 12{,}12 \cdot (\frac{300}{600}) = 0{,}008 МН \cdot м,$$

$$M_{П} = 0{,}192 - 0{,}008 = 0{,}184 МН \cdot м$$

$$P = \frac{M_{П}}{\psi \cdot l_d} = \frac{0{,}184}{0{,}45 \cdot 0{,}037} = 11{,}06 МН$$

Розрахуємо силу прокатки.

$$M_{ОП} = 0{,}004 \cdot 0{,}325 \cdot 11{,}5 \cdot (\frac{300}{600}) = 0{,}007 МН\ м \cdot$$

$$Mп = 0{,}192 - 0{,}007 = 0{,}18 МН\ м \cdot$$

$$P = \frac{M_{П}}{\psi \cdot l_d} = \frac{0{,}186}{0{,}45 \cdot 0{,}035} = 11{,}08 МН$$

Кліть 7

$$M_{ОП} = 0{,}004 \cdot 0{,}325 \cdot 13{,}75 \cdot (\frac{300}{600}) = 0{,}009 МН \cdot м$$

$$M_{П} = 0{,}12 - 0{,}009 = 0{,}11 МН \cdot м$$

$$P = \frac{M_{П}}{\psi \cdot l_d} = \frac{0{,}11}{0{,}44 \cdot 0{,}029} = 8{,}7 МН$$

Розрахуємо силу прокатки.

$$M_{ОП} = 0{,}004 \cdot 0{,}325 \cdot 9 \cdot (\frac{300}{600}) = 0{,}006 МН \cdot м$$

$$M_{П} = 0{,}12 - 0{,}006 = 0{,}114 МН\ м \cdot$$

$$P = \frac{M_{П}}{\psi \cdot l_d} = \frac{0{,}114}{0{,}44 \cdot 0{,}029} = 8{,}95 МН$$

Кліть 8

$$M_{ОП} = 0{,}004 \cdot 0{,}325 \cdot 10{,}15\left(\frac{300}{600}\right) = 0{,}007 \text{ МН}\cdot\text{м}^2,$$

$$M_{П} = 0{,}088 - 0{,}0075 = 0{,}08 \text{ МН}\cdot\text{м}$$

$$P = \frac{M_{П}}{\psi \cdot l_d} = \frac{0{,}08}{0{,}44 \cdot 0{,}019} = 9{,}56 \text{ МН}$$

Розрахуємо силу прокатки.

$$M_{ОП} = 0{,}004 \cdot 0{,}325 \cdot 9{,}56\left(\frac{300}{600}\right) = 0{,}006 \text{МН}\cdot\text{м}$$

$$M_{П} = 0{,}081 - 0{,}006 = 0{,}075 \text{МН}\cdot\text{м}$$

$$P = \frac{M_{П}}{\psi \cdot l_d} = \frac{0{,}075}{0{,}44 \cdot 0{,}021} = 8{,}1 \text{ МН}$$

$$M_{ОП} = 0{,}004 \cdot 0{,}325 \cdot 8{,}1\left(\frac{300}{600}\right) = 0{,}005 \text{ МН}\cdot\text{м}$$

$$МП = 0{,}081 - 0{,}005 = 0{,}076 \text{ МН}\cdot\text{м}$$

$$P = \frac{M_{П}}{\psi \cdot l_d} = \frac{0{,}076}{0{,}44 \cdot 0{,}021} = 8{,}24 \text{МН}$$

Кліть 9

$$M_{ОП} = 0{,}004 \cdot 0{,}325 \cdot 10{,}8\left(\frac{300}{600}\right) = 0{,}007 \text{ МН}\cdot\text{м},$$

$$M_{П} = 0{,}055 - 0{,}007 = 0{,}048 \text{ МН}\cdot\text{м}$$

$$P = \frac{M_{П}}{\psi \cdot l_d} = \frac{0{,}048}{0{,}44 \cdot 0{,}017} = 6{,}47 \text{МН}$$

Розрахуємо силу прокатки.

$$M_{ОП} = 0{,}004 \cdot 0{,}325 \cdot 9 \cdot \left(\frac{300}{600}\right) = 0{,}006 \text{ МН}\cdot\text{м}$$

$$M_{П} = 0{,}055 - 0{,}006 = 0{,}049 \text{ МН}\cdot\text{м}$$

$$P = \frac{M_{П}}{\psi \cdot l_d} = \frac{0{,}049}{0{,}44 \cdot 0{,}017} = 6{,}63 \text{МН}$$

Кліть 10

$$M_{ОС} = 0{,}004 \cdot 0{,}325 \cdot 4{,}86\left(\frac{300}{600}\right) = 0{,}003 \text{ МН}\cdot\text{м},$$

$$M_{П} = 0{,}026 - 0{,}003 = 0{,}023 \text{ МН м}\cdot$$

$$P = \frac{M_{П}}{\psi \cdot l_d} = \frac{0{,}023}{0{,}46 \cdot 0{,}008} = 6{,}07 \text{ МН}$$

Розрахуємо силу прокатки.

$$M_{ОП} = 0{,}004 \cdot 0{,}325 \cdot 5 \cdot (\frac{300}{600}) = 0{,}003 \text{ МН·м}$$

$$M_{П} = 0{,}026 - 0{,}003 = 0{,}023 \text{ МН·м}$$

$$P = \frac{M_{П}}{\psi \cdot l_d} = \frac{0{,}023}{0{,}46 \cdot 0{,}008} = 6{,}05 \text{МН}$$

Розрахунок штаби 3×1400

Кліть 5

Розглянемо алгоритм розрахунку сили прокатки з використанням параметрів енергетичної сили прокатки.

1. Визначення геометричних параметрів основної кліті за допомогою формул [1].

Середня товщина елементів в центрі деформації

$$h_{ср} = 0{,}5 \cdot (H + h) = 0{,}5 \cdot (25 + 12{,}88) = 18{,}94 мм$$

Довжина дуги і кут зіткнення стійок і валків

$$l_d = \sqrt{\text{R}\,\Delta\,\text{h}} = (305 \cdot 12{,}12)^{0{,}.5} = 61 \text{мм} \cdot ;$$

$$\alpha = \frac{l_d}{R} = \frac{61}{305} = 0{,}2 рад.$$

Відносні швидкості обтиску і деформації

$$\varepsilon = \frac{\Delta h}{H} = \frac{12{,}12}{23} = 0{,}53(53\%);$$

$$У = \text{В}\frac{\varepsilon}{l_d} = 1520 \cdot \frac{0{,}53}{61} = 13{,}35 c^{-1}.$$

2. Визначення напруги течії металу.

$$N_1 = 0{,}08 + 0{,}01 + 0{,}38 + 0{,}02 + 0{,}06 = 0{,}55\%;$$

$$\sigma_{Тб} = 80 + 25\left\{1 - \left[(5 - 0{,}55)/4{,}5\right]^{1{,}8}\right\} = 80{,}89 Н/мм^2;$$

$$k_t = 1{,}66 - 1{,}1(2{,}5 - 2)^{0{,}7} = 1{,}06;$$

$$k_\varepsilon = 1 + 0{,}43\left[1 - 6{,}3(0{,}5 - 0{,}53)^2\right] = 1{,}43;$$

$$k_u = 1{,}03 + 0{,}1(2{,}56 - 2{,}3)^{1{,}5} = 1{,}04;$$

$$\sigma_T = 80,89 \cdot 1,06 \cdot 1,43 \cdot 1,04 = 126,95 H / мм^2 .$$

3. Визначення коефіцієнту тертя при гарячій прокатці [1] за формулою (2.10)

$$f = f_0 \cdot k_T \cdot k_v \cdot k_B \cdot k_M \cdot k_e \cdot k_{CM} \cdot k_{ok},$$

де f_0 - базовий коефіцієнт тертя, який залежить від температури металу

$$f_0 = 0,27 - 0,1 \cdot \left(\frac{t}{400} - 2 \right)^2 = 0,27 - 0,1 \cdot \left(\frac{970}{400} - 2 \right)^2 = 0,25.$$

При твердості валків 70 HSD ми маємо:

$$k_T = 1 + 0,43 \left(1 - \frac{HSD}{65} \right)^2 = 1,0$$

Чинник k_V при v = 2,35 м/с

$$k_V = 0,76 + 0,82(1 - 0,1 \cdot 1,54)^2 = 1,35$$

Для відносного обтиску маємо:

$$k_\varepsilon = 0,85 + 0,5 \cdot 0,53 = 1,11.$$

Для зношених валків ми маємо $k_B \approx 1,2$, для штаби з сталі 08кп - $k_M = 1,0$; При вальцюванні штаб з малою питомою вагою $k_{OK} = 1,0$; Коли штаби охолонуть у воді $k_{CM} = 1,0$.

Тоді коефіцієнт тертя з формули (2.10) і коефіцієнт тертя з формули (2.11) дорівнюють:

$$f = 0,25 \cdot 1,11 \cdot 1,06 \cdot 1,35 \cdot 1,0 \cdot 1,0 \cdot 1,0 \cdot 1,0 = 0,48;$$

$$f_П = 0,48(0,92 + 1,27 \cdot 0,53) = 0,76$$

4. Середня нормальна напруга контакту.

для $l_d / h_{ср} = 61 / 18,94 = 3,21$

$$p_{ср} = \sigma_ф \left[1 + 0,48 f_П \cdot l_d / h_{ср} \right]$$

$$p_{ср} = 126,95 \left[1 + 0,48 \cdot 0,72 \cdot 3,21 \right] = 275,75 H / мм^2 .$$

$$P = p_{cp} \cdot l_d \cdot B$$

$$P=275,75 \cdot 0,061 \cdot 1,4 = 23,47 МН$$

Кліть 6

Розглянемо алгоритм розрахунку сили прокатки з використанням параметрів енергетичної сили прокатки.

1. Визначення геометричних параметрів основної кліті за допомогою формул [1].

Середня товщина елементів в центрі деформації

$$h_{ср} = 0,5 \cdot (H + h) = 0,5 \cdot (12,88 + 8,38) = 10,63 мм$$

Довжина дуги і кут зіткнення стійок і валків

$$l_d = \sqrt{R \Delta h} = (300 \cdot 4,5)^{0,5} = 37,2 мм$$

$$\alpha = \frac{l_d}{R} = \frac{37,2}{305} = 0,12 рад.$$

Відносні швидкості обтиску і деформації

$$\varepsilon = \frac{\Delta h}{H} = \frac{4,5}{12,88} = 0,35(35\%);$$

$$У = В \frac{\varepsilon}{l_d} = 2350 \cdot \frac{0,35}{37,2} = 23.3 c^{-1}.$$

2. Визначення напруги течії металу

$$N_1 = 0,08 + 0,01 + 0,38 + 0,02 + 0,06 = 0,55\%;$$

$$\sigma_{Тб} = 80 + 25\left\{1 - \left[(5 - 0,55)/4,5\right]^{1,8}\right\} = 80,89 Н/мм^2;$$

$$k_t = 1,66 - 1,1(2,36 - 2)^{0,7} = 1,12;$$

$$k_\varepsilon = 1 + 0,43\left[1 - 6,3(0,5 - 0,35)^2\right] = 1,37;$$

$$k_u = 1,03 + 0,1(3,14 - 2,3)^{1,5} = 1,1;$$

$$\sigma_T = 80,89 \cdot 1,12 \cdot 1,37 \cdot 1,11 = 137,17 Н/мм^2.$$

3. Визначення коефіцієнту тертя при гарячій прокатці [1] за формулою (2.10)

$$f = f_0 \cdot k_T \cdot k_v \cdot k_B \cdot k_M \cdot k_e \cdot k_{CM} \cdot k_{ok},$$

де f_0 - базовий коефіцієнт тертя, який залежить від температури металу

$$f_0 = 0,27 - 0,1\cdot\left(\frac{t}{400}-2\right)^2 = 0,27-0,1\cdot\left(\frac{945}{400}-2\right)^2 = 0,26.$$

При твердості валків 70 HSD ми маємо:

$$k_T = 1+0,43\left(1-\frac{HSD}{65}\right)^2 = 1,0$$

Коефіцієнт k_V при v = 2,35 м/с

$$k_V = 0,76+0,82(1-0,1\cdot 2.37)^2 = 1,24$$

Для відносного обтиску маємо:

$$k_\varepsilon = 0,85+0,5\cdot 0,35 = 1,02.$$

Для зношених валків ми маємо $k_B \approx 1,2$, для штаби з сталі 08кп - $k_M = 1,0$; При вальцюванні штаб з малою питомою вагою $k_{OK} = 1,0$; Коли штаби охолонуть у воді $k_{CM} = 1,0$.

Тоді коефіцієнт тертя з формули (2.10) і коефіцієнт тертя з формули (2.11) дорівнюють:

$$f = 0,26\cdot 1,0\cdot 1,02\cdot 1,24\cdot 1,2\cdot 1,0\cdot 1,0\cdot 1,0 = 0,44;$$

$$f_П = 0,44(0,92+1,27\cdot 0,35) = 0,6$$

4. Середня нормальна напруга контакту

для $l_d / h_{cp} = 37,2/10,63 = 3,21$

$$p_{cp} = \sigma_ф\left[1+0,48 f_П\cdot l_d / h_{cp}\right]$$

$$p_{cp} = 137,17\left[1+0,48\cdot 0,6\cdot 3,49\right] = 274,07 Н/мм^2.$$

$$P = p_{cp}\cdot l_d\cdot B$$

$$P = 274,07\cdot 0,036\cdot 1,4 = 14,213 \text{ МН}$$

Кліть 7

Середня товщина елементів в центрі деформації

$$h_{cp} = 0,5\cdot(H+h) = 0,5\cdot(8,38+5,64) = 7,01 мм$$

Довжина дуги і кут зіткнення стійок і валків

$$l_d = \sqrt{R \Delta h} = (300 \cdot 2{,}74)^{0{,}5} = 28{,}91 \text{мм}$$

$$\alpha = \frac{l_d}{R} = \frac{28{,}91}{300} = 0{,}096 \, рад.$$

Відносні швидкості обтиску і деформації

$$\varepsilon = \frac{\Delta h}{H} = \frac{2{,}74}{8{,}38} = 0{,}48(48\%);$$

$$У = В\frac{\varepsilon}{l_d} = 3520 \cdot \frac{0{,}48}{28.91} = 39{,}81 c^{-1}.$$

2. Визначення напруги течії металу

$$N_1 = 0{,}08 + 0{,}01 + 0{,}38 + 0{,}02 + 0{,}06 = 0{,}55\%;$$

$$\sigma_{Тб} = 80 + 25\left\{1 - \left[(5 - 0{,}55)/4{,}5\right]^{1{,}8}\right\} = 80{,}89 Н/мм^2;$$

$$k_t = 1{,}66 - 1{,}1(2{,}31 - 2)^{0{,}7} = 1{,}17;$$

$$k_\varepsilon = 1 + 0{,}43\left[1 - 6{,}3(0{,}5 - 0{,}33)^2\right] = 1{,}35;$$

$$k_u = 1{,}03 + 0{,}1(3{,}78 - 2{,}3)^{1{,}5} = 1{,}21;$$

$$\sigma_T = 80{,}89 \cdot 1{,}17 \cdot 1{,}35 \cdot 1{,}21 = 152{,}83 Н/мм^2.$$

3. Визначення коефіцієнту тертя при гарячій прокатці [1] за формулою (2.10)

$$f = f_0 \cdot k_T \cdot k_v \cdot k_B \cdot k_M \cdot k_e \cdot k_{CM} \cdot k_{ok},$$

де f_0 - базовий коефіцієнт тертя, який залежить від температури металу

$$f_0 = 0{,}27 - 0{,}1 \cdot \left(\frac{t}{400} - 2\right)^2 = 0{,}27 - 0{,}1 \cdot \left(\frac{925}{400} - 2\right)^2 = 0{,}26.$$

При твердості валків 70 HSD ми маємо:

$$k_T = 1 + 0{,}43\left(1 - \frac{HSD}{65}\right)^2 = 1{,}0$$

Коефіцієнт k_V при v = 2,35 м/с

$$k_V = 0{,}76 + 0{,}82(1 - 0{,}1 \cdot 3{,}52)^2 = 1{,}1$$

Для відносного обтиску маємо:

$$k_{\varepsilon} = 0,85 + 0,5 \cdot 0,33 = 1,01.$$

Для зношених валків ми маємо $k_B \approx 1,2$, для штаби з сталі 08кп - $k_M = 1,0$; При вальцюванні штаб з малою питомою вагою $k_{OK} = 1,0$; Коли штаби охолонуть у воді $k_{CM} = 1,0$.

Тоді коефіцієнт тертя з формули (2.10) і коефіцієнт тертя з формули (2.11) дорівнюють:

$$f = 0,26 \cdot 1,0 \cdot 1,01 \cdot 1,1 \cdot 1,2 \cdot 1,0 \cdot 1,0 \cdot 1,0 = 0,41;$$

$$f_{П} = 0,41(0,92 + 1,27 \cdot 0,33) = 0,55$$

4. Середня нормальна напруга контакту

для $l_d / h_{ср} = 28,91 / 7,01 = 4,12$

$$p_{ср} = \sigma_{ф}\left[1 + 0,48 f_{П} \cdot l_d / h_{ср}\right]$$

$$p_{ср} = 154,83\left[1 + 0,48 \cdot 0,41 \cdot 4,12\right] = 322,57 Н / мм^2.$$

$$\mathrm{P} = \mathrm{p_{ср}} \cdot \mathrm{l_d} \cdot \mathrm{B}$$

$$\mathrm{P} = 322,51 \cdot 0,029 \cdot 1,4 = 13,06 \text{ МН}$$

Кліть 8

Середня товщина елементів в осередку деформації

$$h_{ср} = 0,5 \cdot (H + h) = 0,5 \cdot (5,64 + 4,19) = 4,91 мм$$

Довжина дуги і кут зіткнення стійок і валків

$$l_d = \sqrt{\mathrm{R}\,\Delta\,\mathrm{h}} = (300 \cdot 1,45)^{0,,5} = 21,03 \text{мм}$$

Відносні швидкості обтиску і деформації

$$\varepsilon = \frac{\Delta h}{H} = \frac{1,45}{5,64} = 0,26(26\%);$$

$$У = \mathrm{B}\frac{\varepsilon}{l_d} = 4740 \cdot \frac{0,26}{21,03} = 57,95 с^{-1}.$$

2. Визначення напруги течії металу

$$N_1 = 0,08 + 0,01 + 0,38 + 0,02 + 0,06 = 0,55\%;$$

$$\sigma_{Тб} = 80 + 25\left\{1 - \left[\left(5 - 0,55\right) / 4,5\right]^{1,8}\right\} = 80,89 Н / мм^2;$$

$$k_t = 1,66 - 1,1(2,27 - 2)^{0,7} = 1,21;$$

$$k_\varepsilon = 1 + 0,43\left[1 - 6,3(0,5 - 0,26)^2\right] = 1,27;$$

$$k_u = 1,03 + 0,1(4,1 - 2,3)^{1,5} = 1,27;$$

$$\sigma_T = 80,89 \cdot 1,21 \cdot 1,27 \cdot 1,27 = 158,65 H / мм^2 .$$

3. Визначення коефіцієнту тертя при гарячій прокатці [1] за формулою (2.10)

$$\text{f}=\text{f}_0 \cdot k_T \cdot k_v \cdot k_B \cdot k_M \cdot k_e \cdot k_{CM} \cdot k_{ok},$$

де f_0 - базовий коефіцієнт тертя, який залежить від температури металу.

$$\text{f}_0 = 0,27 - 0,1 \cdot \left(\frac{t}{400} - 2\right)^2 = 0,27 - 0,1 \cdot \left(\frac{910}{400} - 2\right)^2 = 0,26.$$

При твердості валків 70 HSD ми маємо:

$$k_T = 1 + 0,43\left(1 - \frac{HSD}{65}\right)^2 = 1,0$$

Коефіцієнт k_V при v = 2,35 м/с

$$k_V = 0,76 + 0,82(1 - 0,1 \cdot 4,74)^2 = 0,99$$

Для відносного обтиску маємо:

$$k_\varepsilon = 0,85 + 0,5 \cdot 0,26 = 0,98.$$

Для зношених валків ми маємо $k_B \approx 1,2$, для штаби з сталі 08кп - $k_M = 1,0$; При вальцюванні штаб з малою питомою вагою $k_{OK} = 1,0$; Коли штаби охолонуть у воді $k_{CM} = 1,0$.

Тоді коефіцієнт тертя з формули (2.10) і коефіцієнт тертя з формули (2.11) дорівнюють:

$$f = 0,26 \cdot 1,0 \cdot 0,99 \cdot 0,98 \cdot 1,2 \cdot 1,0 \cdot 1,0 \cdot 1,0 = 0,37;$$

$$f_П = 0,37(0,92 + 1,27 \cdot 0,26) = 0,41$$

4. Середня нормальна напруга контакту

для $l_d / h_{cp} = 21,03 / 4,91 = 4,28$

$$p_{cp} = \sigma_{\phi}\left[1 + 0,48 f_{П} \cdot l_d / h_{cp}\right]$$

$$p_{cp} = 158,65\left[1 + 0,48 \cdot 0,41 \cdot 4,28\right] = 308,65 Н / мм^2.$$

$$P = p_{cp} \cdot l_d \cdot B$$

$$P = 308,65 \cdot 0,021 \cdot 1,4 = 9,09 \text{ МН}$$

Кліть 9

Середня товщина елементів в центрі деформації

$$h_{cp} = 0,5 \cdot (H + h) = 0,5 \cdot (4,19 + 3,22) = 3,7 мм$$

Довжина дуги і кут зіткнення стійок і валків

$$l_d = \sqrt{R \Delta h} = (300 \cdot 0,97)^{0,5} = 17,2 \text{мм}$$

Відносні швидкості обтиску і деформації

$$\varepsilon = \frac{\Delta h}{H} = \frac{0,97}{4,19} = 0,23(23\%);$$

$$У = B \frac{\varepsilon}{l_d} = 6160 \cdot \frac{0,23}{17,2} = 82,91 с^{-1}.$$

2. Визначення напруги течії металу

$$N_1 = 0,08 + 0,01 + 0,38 + 0,02 + 0,06 = 0,55\%;$$

$$\sigma_{Тб} = 80 + 25\left\{1 - \left[\left(5 - 0,55\right) / 4,5\right]^{1,8}\right\} = 80,89 Н / мм^2;$$

$$k_t = 1,66 - 1,1(2,23 - 2)^{0,7} = 1,26;$$

$$k_{\varepsilon} = 1 + 0,43\left[1 - 6,3(0,5 - 0,23)^2\right] = 1,23;$$

$$k_u = 1,03 + 0,1(4,54 - 2,3)^{1,5} = 1,37;$$

$$\sigma_T = 80,89 \cdot 1,26 \cdot 1,23 \cdot 1,37 = 171,52 Н / мм^2.$$

3. Визначення коефіцієнту тертя при гарячій прокатці [1] за формулою (2.10)

$$f = f_0 \cdot k_T \cdot k_v \cdot k_B \cdot k_M \cdot k_e \cdot k_{CM} \cdot k_{ok},$$

де f_0 - базовий коефіцієнт тертя, який залежить від температури металу

$$f_0 = 0{,}27 - 0{,}1\cdot\left(\frac{t}{400}-2\right)^2 = 0{,}27-0{,}1\cdot\left(\frac{895}{400}-2\right)^2 = 0{,}26.$$

При твердості валків 70 HSD ми маємо:

$$k_T = 1+0{,}43\left(1-\frac{HSD}{65}\right)^2 = 1{,}0$$

Коефіцієнт k_V при v = 2,35 м/с

$$k_V = 0{,}76+0{,}82(1-0{,}1\cdot 6{,}16)^2 = 0{,}88$$

Для відносного обтиску маємо:

$$k_\varepsilon = 0{,}85+0{,}5\cdot 0{,}23 = 0{,}97.$$

Для зношених валків ми маємо $k_B \approx 1{,}2$, для штаби з сталі 08кп - $k_M = 1{,}0$; При вальцюванні штаб з малою питомою вагою $k_{OK} = 1{,}0$; Коли штаби охолонуть у воді $k_{CM} = 1{,}0$.

Тоді коефіцієнт тертя з формули (2.10) і коефіцієнт тертя з формули (2.11) дорівнюють:

$$f = 0{,}26\cdot 1{,}0\cdot 0{,}88\cdot 0{,}97\cdot 1{,}2\cdot 1{,}0\cdot 1{,}0\cdot 1{,}0 = 0{,}34;$$

$$f_П = 0{,}34(0{,}92+1{,}27\cdot 0{,}23) = 0{,}41$$

4. Середня нормальна напруга контакту

для $l_d / h_{ср} = 17{,}2 / 3{,}7 = 4{,}64$

$$p_{ср} = \sigma_ф\left[1+0{,}48 f_П\cdot l_d / h_{ср}\right]$$

$$p_{ср} = 171{,}51\left[1+0{,}48\cdot 0{,}41\cdot 4{,}64\right] = 329{,}04 Н / мм^2.$$

$$P = p_{ср}\cdot l_d \cdot B$$

$$P = 329{,}04\cdot 0{,}021\cdot 1{,}4 = 7{,}92 \text{ МН}$$

Таблиця 3.3 Режим прокатки в групі обробки безперервного стану 1680 [24]

Кліть	Товщина, мм	Відносний обтиск, мм	Швидкість прокатки, м/с	Потужність, кВт	Зусилля прокатки, МН	Середня нормальна напруга контакту, МН
5	14,2	11,8	1,57	3150	12,47	154
6	9,4	4,8	2,37	3420	11,6	230
7	6,38	3,02	3,5	3380	12,1	247
8	4,75	1,63	4,7	3720	8,67	262
9	3,7	1,05	6,04	2540	8,74	317
10	3,5	0,2	6,37	862	4,27	316

Розглянемо алгоритм розрахунку зусилля прокатки для найпростішого випадку гарячої прокатки 3,5×1400 мм, для кліті №5 на широкополосному стані гарячої прокатки 1680.

Кліть 5

З метою отримання точних розрахункових даних по крутному моменту необхідні додаткові дослідження для уточнення розрахунку коефіцієнта крутного моменту важеля і моменту тертя прокатки (ковзання) в контакті робочого і опорного валків для умов прокатки сталі.

У загальному випадку статичний крутний момент прокатки $M_{НР}$ по шийках робочих валків визначається виразом

$$M_{ПР} = M_{П} + M_{ТС} + M_{ВС}$$

$$Mп=Mкр - M_{ТС} - M_{OS}$$

де $M_{П}$ - крутний момент самої прокатки; $M_{ТС}$ - момент тертя прокатки - ковзання по міжвалковому контакту; M_{OS} - момент тертя в підшипниках опорних валків.

Втрати на тертя на шийках резервних валків визначають за формулою:

$$M_{ОП} =\mu \cdot r \cdot P \cdot (R/ROП) ,$$

$$M_{ОП} = 0{,}004 \cdot 0{,}325 \cdot 12{,}47 \cdot (\frac{300}{600}) = 0{,}008 \text{ МН·м},$$

де μ– коефіцієнт тертя в підшипниках опорних валків (μ=0,004); R_{OP} - радіус опорного валку; r - радіус горловини запасного валку; R-радіус робочого валку.

Розрахуємо крутний момент самого прокату відповідно до розрахункового крутного моменту на шийці рулону.

$$M_{П}=0{,}279-0{,}008=0{,}271 \text{ МН·м}$$

Визначимо силу прокатки:

$$P = \frac{M_{П}}{\psi \cdot l_d} = \frac{0{,}271}{0{,}46 \cdot 0{,}06} = 9.82\text{МН}$$

Розрахуємо силу прокатки.

$$M_{OP} = 0{,}004 \cdot 0{,}325 \cdot 11 \cdot (\frac{300}{600}) = 0{,}007 \text{ МН·м}$$

$M_П$=0,279-0,007=0,272 МН·м

$$P = \frac{M_П}{\psi \cdot l_d} = \frac{0,272}{0,46 \cdot 0,062} = 9,85МН$$

Кліть 6

$M_{ОР}$ =0,004·0,325·11,6·($\frac{300}{600}$)=0,008 МН·м

МП = 0,173-0,008 = 0,165 МН·м

$$P = \frac{M_П}{\psi \cdot l_d} = \frac{0,165}{0,45 \cdot 0,038} = 9,65МН$$

Розрахуємо силу прокатки.

$M_{ОР}$ = 0,004·0,325· 11·($\frac{300}{600}$)=0,007МН·м

$M_П$=0,173-0,007=0,165 МН·м

$$P = \frac{M_П}{\psi \cdot l_d} = \frac{0,165}{0,45 \cdot 0,038} = 9,67МН$$

Кліть 7

$M_{ОР}$ = 0,004·0,325· 12,1·($\frac{300}{600}$)=0,008МН·м

$M_П$=0,108-0,008=0,1 МН·

$$P = \frac{M_П}{\psi \cdot l_d} = \frac{0,1}{0,45 \cdot 0,03} = 7,42 МН$$

Розрахуємо силу прокатки.

$M_{ОР}$ = 0,004·0,325· 11·($\frac{300}{600}$)=0,007МН·м

$M_П$=0,108-0,007=0,101 МН·м

$$P = \frac{M_П}{\psi \cdot l_d} = \frac{0,101}{0,45 \cdot 0,03} = 7,47МН$$

Кліть 8

$M_{ОР}$ =0,004·0,325·8,67($\frac{300}{600}$)=0,006 МН·м

МП = 0,091-0,006 = 0,085 МН·м

$$P = \frac{M_П}{\psi \cdot l_d} = \frac{0,085}{0,44 \cdot 0,022} = 8,82 МН$$

Кліть 9

$$M_{ОР} = 0{,}004 \cdot, \ 0{,}325 \cdot, \ 8{,}74\left(\frac{300}{600}\right) = 0{,}006 \text{ МН·м}$$

$$M_{П} = 0{,}049 - 0{,}006 = 0{,}043 \text{ МН·м}$$

$$P = \frac{M_{П}}{\psi \cdot l_d} = \frac{0{,}043}{0{,}44 \cdot 0{,}018} = 5{,}47 \text{МН}$$

Розрахуємо силу прокатки.

$$M_{ОР} = 0{,}004 \cdot 0{,}325 \cdot \ 7 \cdot \left(\frac{300}{600}\right) = 0{,}005 \text{ МН·м}$$

$$M_{П} = 0{,}049 - 0{,}005 = 0{,}044 \text{ МН·м}$$

$$P = \frac{M_{П}}{\psi \cdot l_d} = \frac{0{,}044}{0{,}44 \cdot 0{,}018} = 5{,}61 \text{МН}$$

Кліть 10

$$M_{ОР} = 0{,}004 \cdot, \ 0{,}325 \cdot, \ 4{,}27\left(\frac{300}{600}\right) = 0{,}003 \text{ МН·м}$$

$$МП = 0{,}018 - 0{,}003 = 0{,}015 \text{ МН·м}$$

$$P = \frac{M_{П}}{\psi \cdot l_d} = \frac{0{,}015}{0{,}47 \cdot 0{,}008} = 4{,}05 \text{ МН}$$

Розрахунок штаби 3×1510

Кліть 5

Розглянемо алгоритм розрахунку сили прокатки з використанням параметрів енергетичної сили прокатки.

1. Визначення геометричних параметрів основної кліті за допомогою формул [1].

Середня товщина елементів в центрі деформації

$$h_{ср} = 0{,}5 \cdot (H + h) = 0{,}5 \cdot (25 + 14{,}2) = 19{,}6 мм$$

Довжина дуги і кут зіткнення стійок і валків

$$l_d = \sqrt{R \Delta h} = (305 \cdot 11{,}8)^{0{,}.5} = 60 \text{мм};$$

$$\alpha = \frac{l_d}{R} = \frac{60}{305} = 0{,}2 рад.$$

Відносні швидкості обтиску і деформації

$$\varepsilon = \frac{\Delta h}{H} = \frac{11{,}8}{23} = 0{,}51(51\%);$$

$$У = \text{В}\frac{\varepsilon}{l_d} = 1570 \cdot \frac{0,51}{60} = 13,43c^{-1}.$$

2. Визначення напруги течії металу

$$N_1 = 0,08 + 0,01 + 0,38 + 0,02 + 0,06 = 0,55\%;$$

$$\sigma_{Тб} = 80 + 25\left\{1 - \left[(5 - 0,55)/4,5\right]^{1,8}\right\} = 80,89 Н/мм^2;$$

$$k_t = 1,66 - 1,1(2,75 - 2)^{0,7} = 0,96;$$

$$k_\varepsilon = 1 + 0,43\left[1 - 6,3(0,5 - 0,51)^2\right] = 1,43;$$

$$k_u = 1,03 + 0,1(2,53 - 2,3)^{1,5} = 1,04;$$

$$\sigma_T = 80,89 \cdot 0,96 \cdot 1,43 \cdot 1,04 = 115,49 Н/мм^2.$$

3. Визначення коефіцієнту тертя при гарячій прокатці [1] за формулою (2.10)

$$\text{f} = \text{f}_0 \cdot k_T \cdot k_v \cdot k_B \cdot k_M \cdot k_e \cdot k_{CM} \cdot k_{ok},$$

де f_0 - базовий коефіцієнт тертя, який залежить від температури металу.

$$\text{f}_0 = 0,27 - 0,1 \cdot \left(\frac{t}{400} - 2\right)^2 = 0,27 - 0,1 \cdot \left(\frac{1010}{400} - 2\right)^2 = 0,24.$$

При твердості валків 70 HSD ми маємо:

$$k_T = 1 + 0,43\left(1 - \frac{HSD}{65}\right)^2 = 1,0$$

Чинник k_V при v = 2,35 м/с

$$k_V = 0,76 + 0,82(1 - 0,1 \cdot 1,57)^2 = 1,34$$

Для відносного обтиску маємо:

$$k_\varepsilon = 0,85 + 0,5 \cdot 0,51 = 1,11.$$

Для зношених валків ми маємо $k_B \approx 1,2$, для штаби з сталі 08кп - $k_M = 1,0$; При вальцюванні штаб з малою питомою вагою $k_{OK} = 1,0$; Коли штаби охолонуть у воді $k_{CM} = 1,0$.

Тоді коефіцієнт тертя з формули (2.10) і коефіцієнт тертя з формули (2.11) дорівнюють:

$$f = 0,24 \cdot 1,11 \cdot 1,2 \cdot 1,34 \cdot 1,0 \cdot 1,0 \cdot 1,0 \cdot 1,0 = 0,43;$$

$$f_{П} = 0,43(0,92 + 1,27 \cdot 0,51) = 0,68$$

4. Середня нормальна напруга контакту

для $l_d / h_{ср} = 60 / 19,6 = 3,06$

$$p_{ср} = \sigma_{ф}\left[1 + 0,48 f_{П} \cdot l_d / h_{ср}\right]$$

$$p_{ср} = 115,49\left[1 + 0,48 \cdot 0,68 \cdot 3,06\right] = 230,74 Н / мм^2.$$

$$\mathrm{P} = \mathrm{p_{ср}} \cdot \mathrm{l_d} \cdot \mathrm{B}$$

P=230,74·0,06·1,4= 19,38 МН

Кліть 6

Розглянемо алгоритм розрахунку сили прокатки з використанням параметрів енергетичної сили прокатки.

1. Визначення геометричних параметрів основної кліті за допомогою формул [1].

Середня товщина елементів в центрі деформації

$$h_{ср} = 0,5 \cdot (H + h) = 0,5 \cdot (14,2 + 9,4) = 11,8 мм$$

Довжина дуги і кут зіткнення стійок і валків

$$l_d = \sqrt{\mathrm{R}\,\Delta\,\mathrm{h}} = (300 \cdot 4,8)^{0,,5} = 38,2 \text{мм}$$

$$\alpha = \frac{l_d}{R} = \frac{38,2}{305} = 0,12 рад.$$

Відносні швидкості обтиску і деформації

$$\varepsilon = \frac{\Delta h}{H} = \frac{4,8}{14,2} = 0,34(34\%);$$

$$У = \mathrm{B}\frac{\varepsilon}{l_d} = 2370 \cdot \frac{0,34}{38,2} = 20,94 с^{-1}.$$

2. Визначення напруги течії металу

$$N_1 = 0,08 + 0,01 + 0,38 + 0,02 + 0,06 = 0,55\%;$$

$$\sigma_{Tб} = 80 + 25\left\{1 - \left[(5 - 0,55)/4,5\right]^{1,8}\right\} = 80,89 H/мм^2;$$

$$k_t = 1,66 - 1,1(2,46 - 2)^{0,7} = 1,02;$$

$$k_\varepsilon = 1 + 0,43\left[1 - 6,3(0,5 - 0,34)^2\right] = 1,36;$$

$$k_u = 1,03 + 0,1(3,14 - 2,3)^{1,5} = 1,1;$$

$$\sigma_T = 80,89 \cdot 1,02 \cdot 1,36 \cdot 1,11 = 123,98 H/мм^2.$$

3. Визначення коефіцієнту тертя при гарячій прокатці [1] за формулою (2.10)

$$f = f_0 \cdot k_T \cdot k_v \cdot k_B \cdot k_M \cdot k_e \cdot k_{CM} \cdot k_{ok},$$

де f_0 - основний коефіцієнт тертя, який залежить від температури металу:

$$f_0 = 0,27 - 0,1 \cdot \left(\frac{t}{400} - 2\right)^2 = 0,27 - 0,1 \cdot \left(\frac{985}{400} - 2\right)^2 = 0,25.$$

При твердості валків 70 HSD ми маємо:

$$k_T = 1 + 0,43\left(1 - \frac{HSD}{65}\right)^2 = 1,0$$

Коефіцієнт k_V при v = 2,35 м/с

$$k_V = 0,76 + 0,82(1 - 0,1 \cdot 2.37)^2 = 1,24$$

Для відносного обтиску маємо:

$$k_\varepsilon = 0,85 + 0,5 \cdot 0,34 = 1,02.$$

Для зношених валків ми маємо $k_B \approx 1,2$, для штаби з сталі 08кп - $k_M = 1,0$; При вальцюванні штаб з малою питомою вагою $k_{OK} = 1,0$; Коли штаби охолонуть у воді $k_{CM} = 1,0$.

Тоді коефіцієнт тертя з формули (2.10) і коефіцієнт тертя з формули (2.11) дорівнюють:

$$f = 0,25 \cdot 1,0 \cdot 1,02 \cdot 1,24 \cdot 1,2 \cdot 1,0 \cdot 1,0 \cdot 1,0 = 0,38;$$

$$f_{П} = 0,38(0,92 + 1,27 \cdot 0,34) = 0,52$$

4. Середня нормальна напруга контакту

для $l_d / h_{ср} = 38,2 / 11,8 = 3,24$

$$p_{ср} = \sigma_{ф}\left[1 + 0,48 f_{П} \cdot l_d / h_{ср}\right]$$

$$p_{ср} = 123,98\left[1 + 0,48 \cdot 0,52 \cdot 3,24\right] = 223,76 Н / мм^2.$$

$$P = p_{ср} \cdot l_d \cdot B$$

P=223,76·0,038·1,4=11,99 МН

Кліть 7

Середня товщина елементів в центрі деформації

$$h_{ср} = 0,5 \cdot (H + h) = 0,5 \cdot (9,4 + 6,38) = 7,89 мм$$

Довжина дуги і кут зіткнення стійок і валків

$l_d = \sqrt{R \Delta h} = (300 \cdot 3,02)^{0,5} = 30,35$мм

$$\alpha = \frac{l_d}{R} = \frac{30,35}{300} = 0,106 рад.$$

Відносні швидкості обтиску і деформації

$$\varepsilon = \frac{\Delta h}{H} = \frac{3,02}{9,4} = 0,32(32\%);$$

$$У = В\frac{\varepsilon}{l_d} = 3850 \cdot \frac{0,32}{30,35} = 37,05 с^{-1}.$$

2. Визначення напруги течії металу

$$N_1 = 0,08 + 0,01 + 0,38 + 0,02 + 0,06 = 0,55\%;$$

$$\sigma_{Тб} = 80 + 25\left\{1 - \left[\left(5 - 0,55\right) / 4,5\right]^{1,8}\right\} = 80,89 Н / мм^2;$$

$$k_t = 1,66 - 1,1(2,41 - 2)^{0,7} = 1,07;$$

$$k_{\varepsilon} = 1 + 0,43\left[1 - 6,3(0,5 - 0,32)^2\right] = 1,21;$$

$$k_u = 1,03 + 0,1(3,78 - 2,3)^{1,5} = 1,21;$$

$$\sigma_T = 80,89 \cdot 1,07 \cdot 1,27 \cdot 1,27 = 140,47 Н / мм^2.$$

3. Визначення коефіцієнту тертя при гарячій прокатці [1] за формулою (2.10)

$$f=f_0 \cdot k_T \cdot k_v \cdot k_B \cdot k_M \cdot k_e \cdot k_{CM} \cdot k_{ok},$$

де f_0 - базовий коефіцієнт тертя, який залежить від температури металу

$$f0 = 0,27 - 0,1 \cdot \left(\frac{t}{400} - 2\right)^2 = 0,27 - 0,1 \cdot \left(\frac{945}{400} - 2\right)^2 = 0,25.$$

При твердості валків 70 HSD ми маємо:

$$k_T = 1 + 0,43\left(1 - \frac{HSD}{65}\right)^2 = 1,0$$

Коефіцієнт k_V при v = 2,35 м/с

$$k_V = 0,76 + 0,82(1 - 0,1 \cdot 3,5)^2 = 1,11$$

Для відносного обтиску маємо:

$$k_\varepsilon = 0,85 + 0,5 \cdot 0,32 = 1,01.$$

Для зношених валків ми маємо $k_B \approx 1,2$, для штаби з сталі 08кп - $k_M = 1,0$; При вальцюванні штаб з малою питомою вагою $k_{OK} = 1,0$; Коли штаби охолонуть у воді $k_{CM} = 1,0$.

Тоді коефіцієнт тертя з формули (2.10) і коефіцієнт тертя з формули (2.11) дорівнюють:

$$f = 0,25 \cdot 1,0 \cdot 1,01 \cdot 1,11 \cdot 1,2 \cdot 1,0 \cdot 1,0 \cdot 1,0 = 0,36;$$

$$f_П = 0,36(0,92 + 1,27 \cdot 0,32) = 0,48$$

4. Середня нормальна напруга контакту

для $l_d / h_{cp} = 30,36 / 7,89 = 3,85$

$$p_{cp} = \sigma_ф \left[1 + 0,48 f_П \cdot l_d / h_{cp}\right]$$

$$p_{cp} = 140,47\left[1 + 0,48 \cdot 0,48 \cdot 3,85\right] = 265,36 Н / мм^2.$$

$$P = p_{cp} \cdot l_d \cdot B$$

$$P = 265,26 \cdot 0,03 \cdot 1,4 = 11,27 \text{ МН}$$

Кліть 8

Середня товщина елементів в центрі деформації

$$h_{ср} = 0,5 \cdot (H + h) = 0,5 \cdot (6,38 + 4,75) = 5,56 мм$$

Довжина дуги і кут зіткнення стійок і валків

$$l_d = \sqrt{\text{R} \Delta \text{h}} = (300 \cdot 1,63)^{0,,5} = 22,3 \text{мм}$$

Відносні швидкості обтиску і деформації

$$\varepsilon = \frac{\Delta h}{H} = \frac{1,63}{6,38} = 0,26(26\%);$$

$$У = \text{В} \frac{\varepsilon}{l_d} = 4700 \cdot \frac{0,26}{30,35} = 53,85 c^{-1}.$$

2. Визначення напруги течії металу

$$N_1 = 0,08 + 0,01 + 0,38 + 0,02 + 0,06 = 0,55\%;$$

$$\sigma_{Тб} = 80 + 25\left\{1 - \left[(5 - 0,55) / 4,5\right]^{1,8}\right\} = 80,89 Н / мм^2;$$

$$k_t = 1,66 - 1,1(2,36 - 2)^{0,7} = 1,12;$$

$$k_\varepsilon = 1 + 0,43\left[1 - 6,3(0,5 - 0,26)^2\right] = 1,27;$$

$$k_u = 1,03 + 0,1(4,1 - 2,3)^{1,5} = 1,27;$$

$$\sigma_T = 80,89 \cdot 1,12 \cdot 1,27 \cdot 1,27 = 145,99 Н / мм^2.$$

3. Визначення коефіцієнту тертя при гарячій прокатці [1] за формулою (2.10)

$$\text{f} = \text{f}_0 \cdot k_T \cdot k_v \cdot k_B \cdot k_M \cdot k_e \cdot k_{CM} \cdot k_{ok},$$

де f_0 - базовий коефіцієнт тертя, який залежить від температури металу.

$$\text{f}_0 = 0,27 - 0,1 \cdot \left(\frac{t}{400} - 2\right)^2 = 0,27 - 0,1 \cdot \left(\frac{945}{400} - 2\right)^2 = 0,25.$$

При твердості валків 70 HSD ми маємо:

$$k_T = 1 + 0,43\left(1 - \frac{HSD}{65}\right)^2 = 1,0$$

Коефіцієнт k_V при v = 2,35 м/с

$$k_V = 0,76 + 0,82(1 - 0,1 \cdot 4,7)^2 = 0,99$$

Для відносного обтиску маємо:

$$k_{\varepsilon} = 0,85 + 0,5 \cdot 0,26 = 0,98.$$

Для зношених валків ми маємо $k_B \approx 1,2$, для штаби з сталі 08кп - $k_M = 1,0$; При вальцюванні штаб з малою питомою вагою $k_{OK} = 1,0$; Коли штаби охолонуть у воді $k_{CM} = 1,0$.

Тоді коефіцієнт тертя з формули (2.10) і коефіцієнт тертя з формули (2.11) дорівнюють:

$$f = 0,25 \cdot 1,0 \cdot 0,99 \cdot 0,98 \cdot 1,2 \cdot 1,0 \cdot 1,0 \cdot 1,0 = 0,33;$$

$$f_{П} = 0,33(0,92 + 1,27 \cdot 0,26) = 0,42$$

4. Середня нормальна напруга контакту

для $l_d / h_{ср} = 22,3 / 5,56 = 4,01$

$$p_{ср} = \sigma_{ф}\left[1 + 0,48 f_{П} \cdot l_d / h_{ср}\right]$$

$$p_{ср} = 145,99\left[1 + 0,48 \cdot 0,42 \cdot 4,01\right] = 262,71 Н / мм^2.$$

$$\mathrm{P} = \mathrm{p_{ср}} \cdot \mathrm{l_d} \cdot \mathrm{B}$$

$$\mathrm{P} = 262,71 \cdot 0,022 \cdot 1,4 = 8,2 \text{ МН}$$

Кліть 9

Середня товщина елементів в центрі деформації

$$h_{ср} = 0,5 \cdot (H + h) = 0,5 \cdot (4,75 + 3,7) = 4,22 мм$$

Довжина дуги і кут зіткнення стійок і валків

$$l_d = \sqrt{\mathrm{R}\,\Delta\,\mathrm{h}} = (300 \cdot 1,05)^{0,,5} = 17,9 \text{мм}$$

Відносні швидкості обтиску і деформації

$$\varepsilon = \frac{\Delta h}{H} = \frac{1,05}{4,75} = 0,22(22\%);$$

$$У = \mathrm{B}\frac{\varepsilon}{l_d} = 6040 \cdot \frac{0,22}{17,9} = 74,61 c^{-1}.$$

2. Визначення напруги течії металу.

$$N_1 = 0,08 + 0,01 + 0,38 + 0,02 + 0,06 = 0,55\%;$$

$$\sigma_{Тб} = 80 + 25\left\{1 - \left[(5 - 0,55)/4,5\right]^{1,8}\right\} = 80,89 Н/мм^2;$$

$$k_t = 1,66 - 1,1(2,31 - 2)^{0,7} = 1,17;$$

$$k_\varepsilon = 1 + 0,43\left[1 - 6,3(0,5 - 0,23)^2\right] = 1,22;$$

$$k_u = 1,03 + 0,1(4,54 - 2,3)^{1,5} = 1,37;$$

$$\sigma_T = 80,89 \cdot 1,17 \cdot 1,22 \cdot 1,37 = 157,9 Н/мм^2.$$

3. Визначення коефіцієнту тертя при гарячій прокатці [1] за формулою (2.10)

$$f = f_0 \cdot k_T \cdot k_v \cdot k_B \cdot k_M \cdot k_e \cdot k_{CM} \cdot k_{ok},$$

де f_0 - базовий коефіцієнт тертя, який залежить від температури металу

$$f_0 = 0,27 - 0,1 \cdot \left(\frac{t}{400} - 2\right)^2 = 0,27 - 0,1 \cdot \left(\frac{925}{400} - 2\right)^2 = 0,26.$$

При твердості валків 70 HSD ми маємо:

$$k_T = 1 + 0,43\left(1 - \frac{HSD}{65}\right)^2 = 1,0$$

Коефіцієнт k_V при v = 2,35 м/с

$$k_V = 0,76 + 0,82(1 - 0,1 \cdot 6,04)^2 = 0,89$$

Для відносного обтиску маємо:

$$k_\varepsilon = 0,85 + 0,5 \cdot 0,23 = 0,96.$$

Для зношених валків ми маємо $k_B \approx 1,2$, для штаби з сталі 08кп - $k_M = 1,0$; При вальцюванні штаб з малою питомою вагою $k_{ОК} = 1,0$; Коли штаби охолонуть у воді $k_{CM} = 1,0$.

Тоді коефіцієнт тертя з формули (2.10) і коефіцієнт тертя з формули (2.11) дорівнюють:

$$f = 0,25 \cdot 1,0 \cdot 0,89 \cdot 0,96 \cdot 1,2 \cdot 1,0 \cdot 1,0 \cdot 1,0 = 0,31;$$

$$f_П = 0,31(0,92 + 1,27 \cdot 0,23) = 0,38$$

4. Середня нормальна напруга контакту

для $l_d / h_{ср} = 17,9 / 4,22 = 4,24$

$$p_{ср} = \sigma_ф \left[1 + 0,48 f_П \cdot l_d / h_{ср}\right]$$

$$p_{ср} = 157,9\left[1 + 0,48 \cdot 0,38 \cdot 4,24\right] = 278,38 Н / мм^2.$$

$$P = p_{ср} \cdot l_d \cdot B$$

$$P = 278,38 \cdot 0,018 \cdot 1,4 = 6,97 \text{ МН}$$

Потім, за аналогією з алгоритмом, розраховуємо енергетичні і силові параметри стану і визначаємо момент прокатки в шийках робочих валків, відповідно до представлених марок сталі.

Отримані дані зведені в таблицю. На основі отриманих результатів побудуємо графіки.

Таблиця 3.4. Розрахункові дані Р при прокатці штаби 2,5×1510 за рахунок енергетичних і силових параметрів і моменту прокатки, $N_1 = 0{,}55$ %, $\sigma_{Тб}$ = 80,89.

Кліть	ε	У, c^{-1}	$\sigma_т$,Вт/мм	f	$Р_{СР}$, Н/мм2	F	Р, МН	$Р_М$, МН
5	0,49	12,70	115,50	0,43	0,66	18,75	20,74	13,52
6	0,35	23,32	126,59	0,38	0,52	14,15	13,24	13,26
7	0,35	44,07	148,02	0,34	0,47	14,86	13,48	9,33
8	0,25	60,82	149,64	0,30	0,37	11,6	8,31	9,68
9	0,25	93,75	172,83	0,27	0,33	10,26	8,84	7,66
10	0,11	80,26	145,97	0,24	0,25	6,12	3,41	6,22

Таблиця 3.5. Розрахункові дані Р при прокатці штаби 3 × 1400 за рахунок енергетичних параметрів і моменту прокатки, $N_1 = 0{,}55$ %, $\sigma_{Тб}$ = 80,89.

Кліть	ε	У, c^{-1}	σ_T,Вт/мм	f	$Р_{СР}$, Н/мм2	F	Р, МН	$Р_М$, МН
5	0,53	13,35	126,95	0,45	267,90	13,67	23,47	11,58
6	0,35	22,35	137,17	0,39	259,47	12,12	14,21	11,08
7	0,33	39,81	154,83	0,35	297,87	13,75	13,06	8,95
8	0,26	57,95	158,65	0,30	282,17	10,15	9,09	8,24
9	0,23	82,91	171,52	0,27	296,74	10,8	7,92	6,63
10	0,07	55,22	131,31	0,24	171,65	4,86	2,12	6,05

Таблиця 3.6. Розрахункові дані Р при прокатці штаби 3,5×1400 за рахунок енергетичних параметрів і моменту прокатки, $N_1 = 0{,}55$ %, $\sigma_{Тб}$ = 80,89.

Кліть	ε	У, c^{-1}	σ_T,Вт/мм	f	$Р_{СР}$, Н/мм2	F	Р, МН	$Р_М$, МН
5	0,53	13,35	126,95	0,45	267,90	12,47	18,99	9,85
6	0,35	22,35	137,17	0,39	259,47	11,6	11,99	9,67
7	0,33	39,81	154,83	0,35	297,87	12,1	11,27	7,47
8	0,26	57,95	158,65	0,30	282,17	8,67	8,20	8,81
9	0,23	82,91	171,52	0,27	296,74	8,74	6,97	5,61
10	0,07	55,22	131,31	0,24	171,65	4,27	1,71	3,92

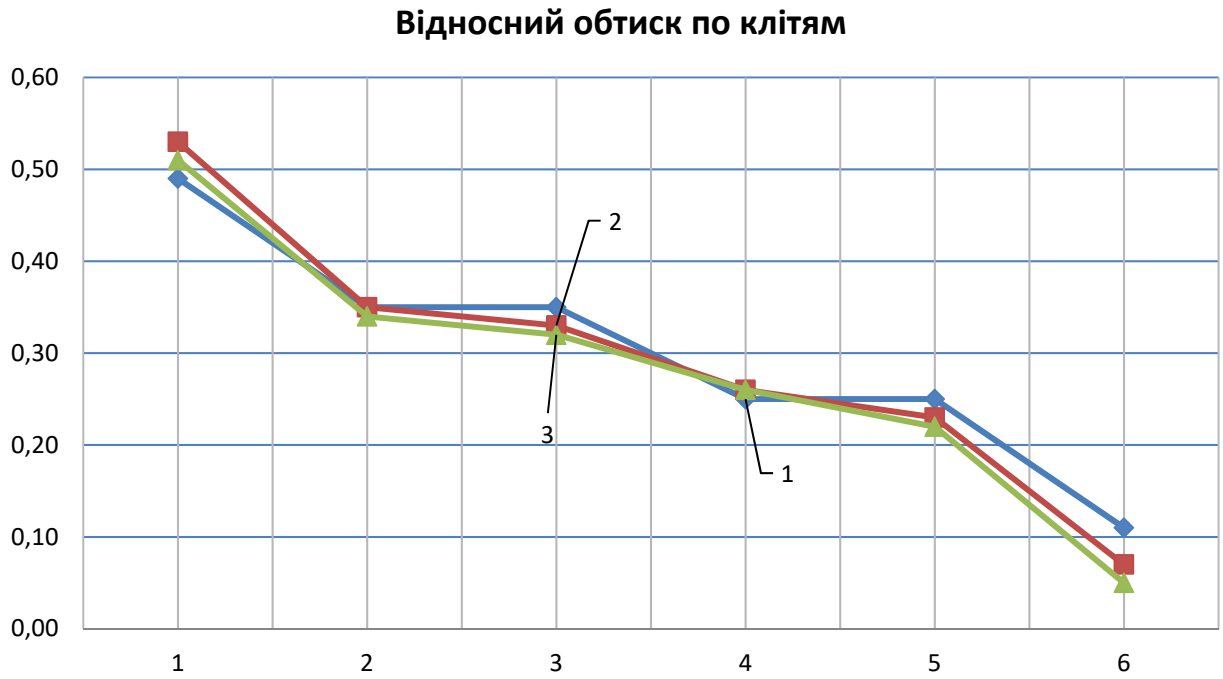


Рисунок 3.1 - Зміна відносного обтиску по осередках стану (1 - штаба 2,5 × 1510, 2 - штаба 3×1400, 3 - штаба 3,5 × 1400).

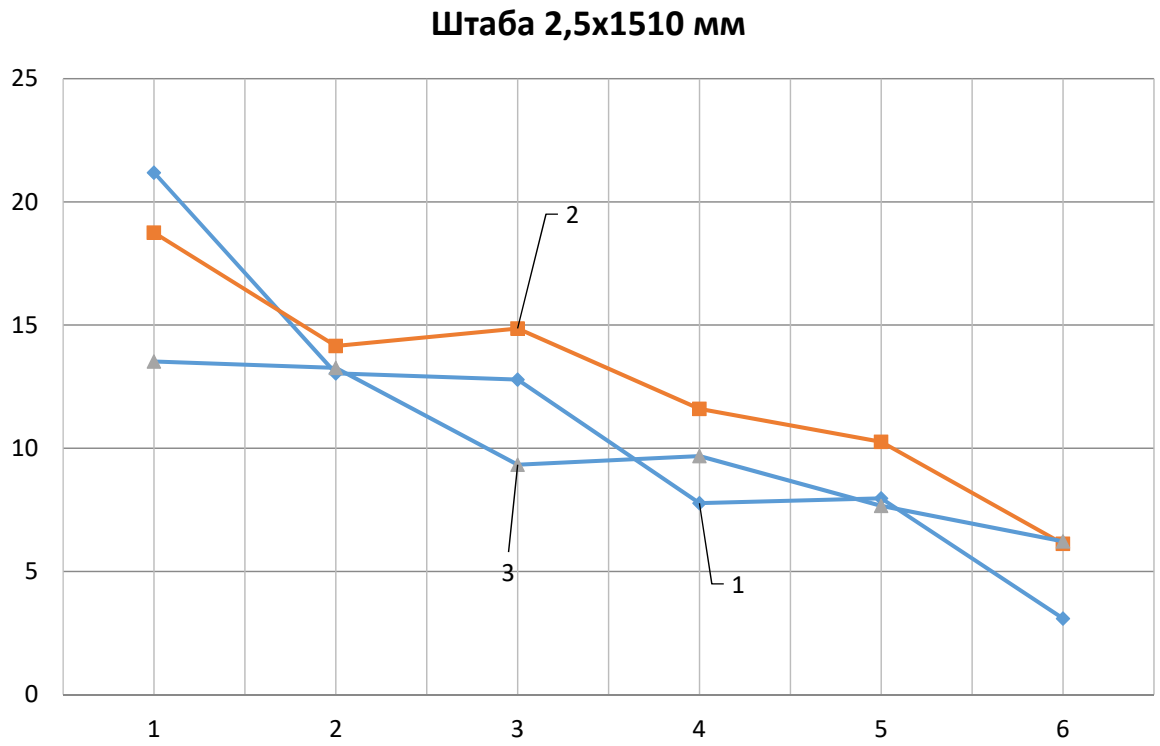


Рисунок 3.2 - Зміна зусилля прокатки через кліті станів при розрахунку швидкості прокатки штаби 2,5 × 1510 (1-Розрахункове зусилля прокатки, 2-Експериментальне зусилля прокатки, 3-Зусилля прокатки розраховується за допомогою крутного моменту.)

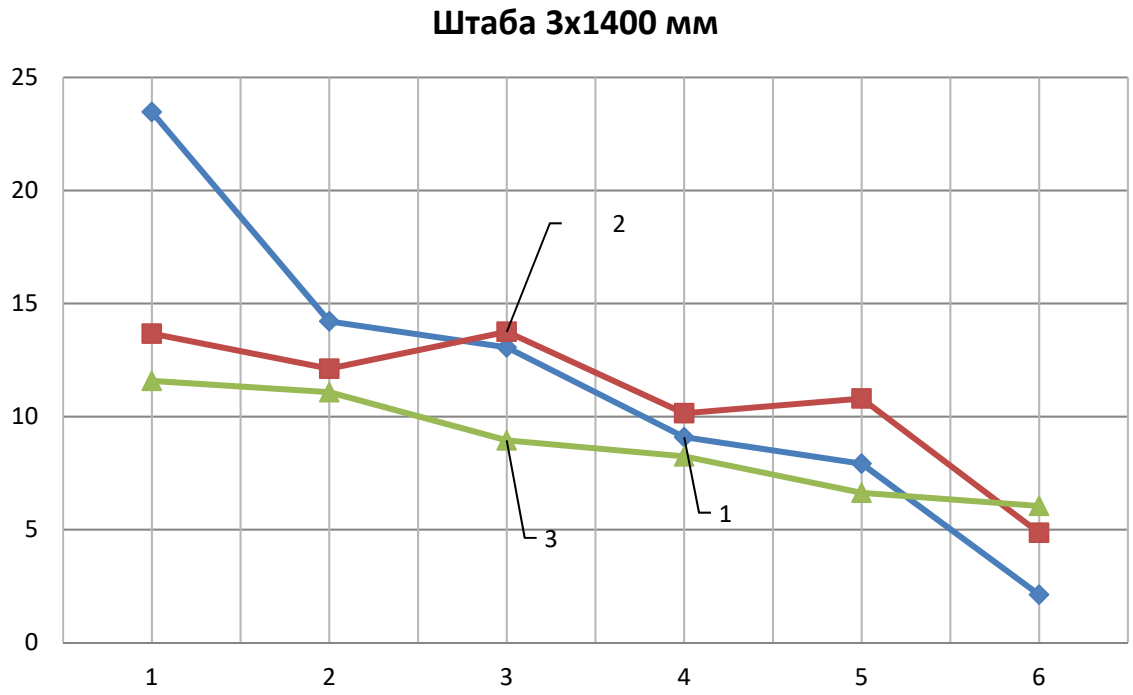


Рисунок. 3.3 - Зміна зусилля прокатки на клітях при розрахунку коефіцієнта тертя під час прокатки штаби 3×1400 (1 - Розрахункова сила прокатки, 2 - Експериментальна сила прокатки, 3 - Сила прокатки розраховується за допомогою крутного моменту).

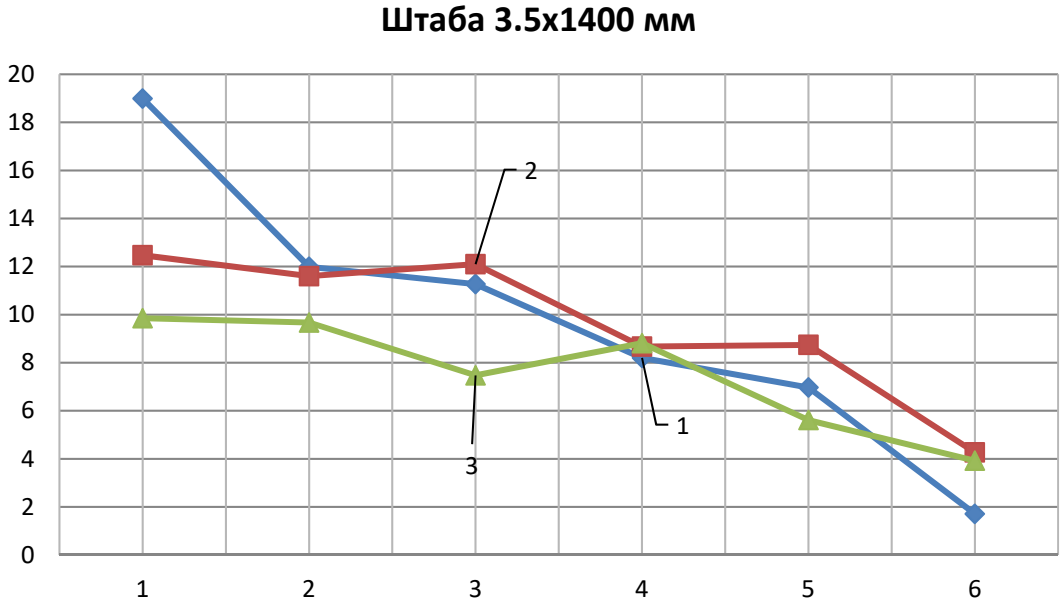


Рисунок 3.4 - Зміна зусилля прокатки на клітях при розрахунку швидкості прокатки штаби 3,5×1400 (1 - Розрахункова сила прокатки, 2 - Експериментальна сила прокатки, 3 - Сила прокатки розраховується за допомогою крутного моменту).

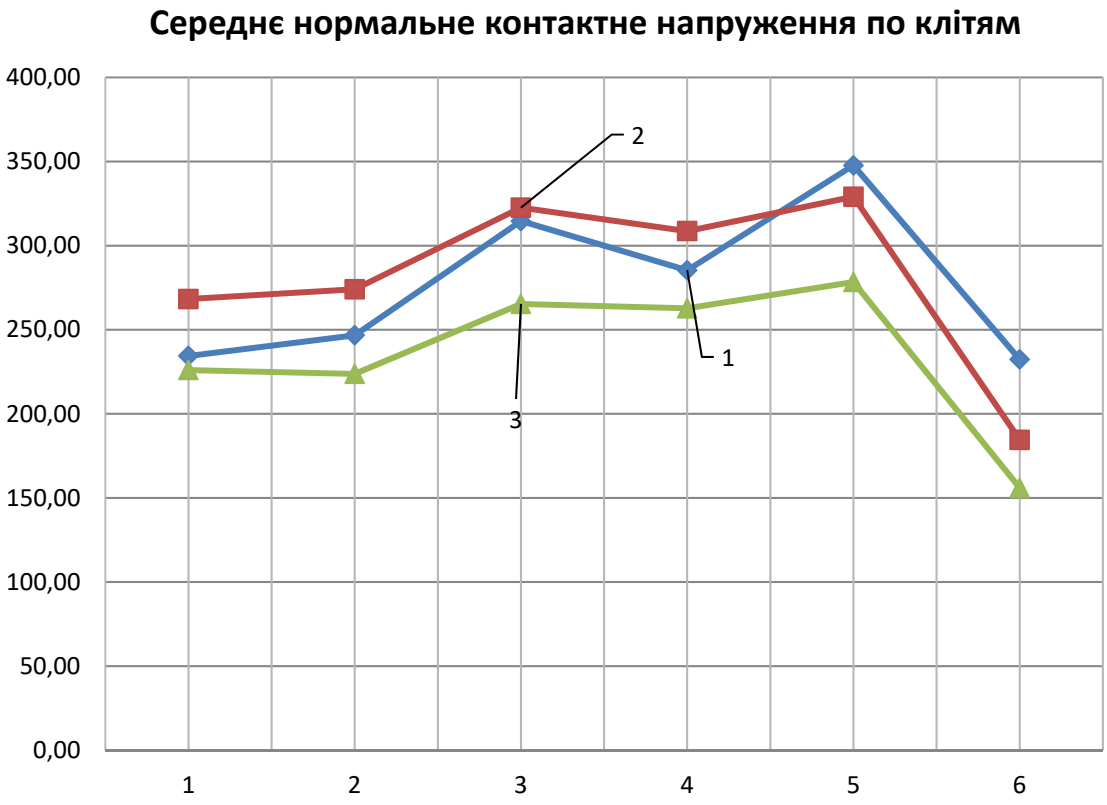


Рисунок 3.5 - Зміна середньої нормальної напруги $P_{ср}$ в штабах (1 - штаба 2,5×1510, 2 - штаба 3х1400, 3 - штаба 3,5×1400).

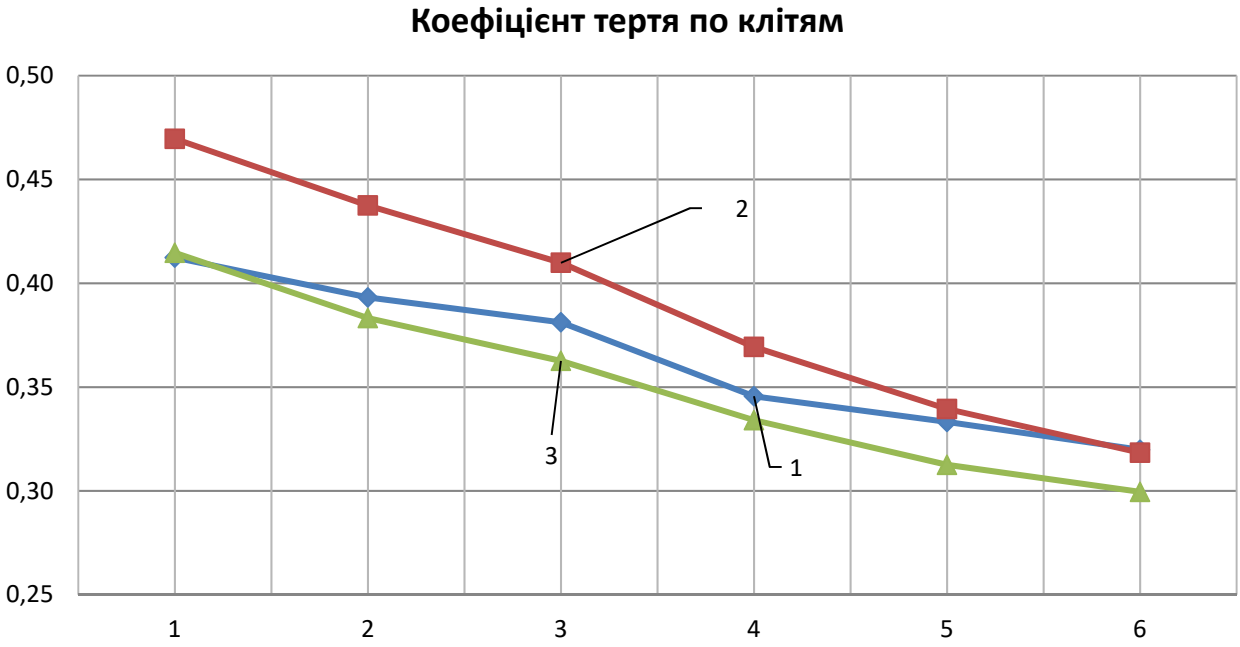


Рисунок 3.6 - Зміна коефіцієнта тертя f (1 - штаба 2,5×1510, 2 - штаба 3×1400, 3 - штаба 3,5×1400).



Рисунок 3.7 - Зміна коефіцієнта тертя $f_П$ (1 - штаба 2,5×1510, 2 - штаба 3×1400, 3 - штаба 3,5×1400).

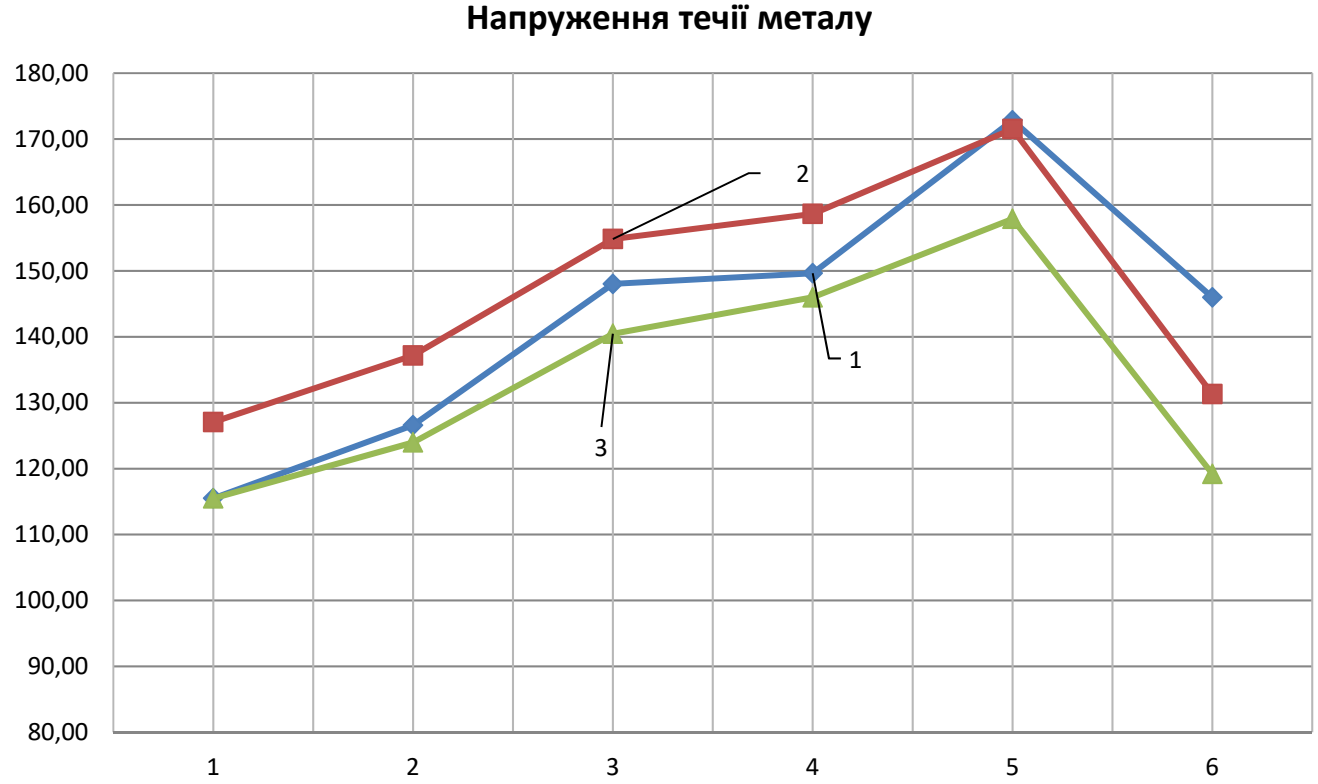


Рисунок 3.8 - Зміна напруги протікання металу через кліті $\sigma_Т$ (1 - штаба 2,5×1510, 2 - штаба 3×1400, 3 - штаба 3,5×1400).

Висновки

Проблема прокатного виробництва полягає в підвищенні точності виготовлення штаби, зниженні металоємності і зниженні споживання електроенергії. Значною мірою цього можна досягти за рахунок контролю силових параметрів процесу прокатки через кліті.

Тому, проаналізувавши вплив різних факторів на внутрішні напрження в металі і середнє нормальне контактне напруження, використовуючи літературу (В.А. Ніколаєв), був складений алгоритм розрахунку, який наводиться у третьому розділі магістерської роботи.

Результати розрахунку параметрів гарячої прокатки заносяться в таблиці, а за результатами розрахунку будуються графіки. Отримані графіки, а саме індекс міцності по клітям стану. У графічній візуалізації отриманих результатів видно, що показники потужності при розрахунку параметрів крутного моменту і енергосилових параметрів мають розбіжності з експериментальними даними.

Розрахувавши параметри гарячої прокатки і проаналізувавши отримані дані, було встановлено, що метод розрахунку актуальний і сьогодні.

Також, керуючись силовими параметрами процесу прокатки через кліті станів і виходячи з експериментальних значень сили прокатки, можна розробити раціональні режими деформації в клітях, які дозволять знизити рівень неплоскості прокату.

4. ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ТЕХНОГЕННА БЕЗПЕКА

4.1. Аналіз шкідливих і небезпечних факторів у виробничому середовищі

У створені несприятливі умови для обслуговуючого персоналу. Основними шкідливими факторами в цеху є виділення великої кількості тепла, пилу і газів, а також шум [27].

В процесі плавлення сировини в повітря робочої зони можуть потрапляти такі газоподібні речовини: CO, SO_2, NO_2 та ін.

Шкідливим фактором у виробничому середовищі може бути наявність високих концентрацій пилу в повітрі робочої зони.

Висока температура в робочому просторі призводить до випаровування металу з подальшим утворенням конденсату і утворенням дрібнодисперсного пилу.

Заповнення печі, укладання шихти та ряд інших операцій також можуть супроводжуватися викидами пилу.

При деяких операціях процесу вторинного переплаву можуть виникати механічні, аеродинамічні і теплові шуми. Вібрація може створюватися тими ж блоками, які є джерелами шуму.

У зв'язку з наявністю великої кількості надлишкового тепла в цеху відбувається значне підвищення температури повітря. Підвищений тепловий вплив на організм людини призводить до перенапруження його терморегуляційних функцій і може стати причиною порушення теплового балансу організму.

Несприятливий вплив високих температур повітря посилюється під впливом випромінюваного тепла. Потоки теплового випромінювання в цеху створюють в основному інфрачервоні промені з довжиною хвилі до 10 мкм.

Аналіз шкідливих і небезпечних виробничих факторів і карта умов праці представлені в таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 – Оцінка факторів виробничого трудового процесу

Ніз/	Фактори виробничого середовища та робочої сили Процес	Нормативне значення	Фактична вартість	III класи шкідливих та небезпечних умов праці, характер праці			Тривалість дії коефіцієнта за зміну, %
				I клас	II клас	III клас	
1	Шкідливі хімічні речовини, мг/м^3: Клас небезпеки 1 Ангидрид хрома Оксид марганцю Клас небезпеки 3 Сірководень Діоксид азоту Чадний газ	 0,01 0,05 10 2,0 20,0	 0,07 0,39 10,8 0,55 5,0	 1,08 	 	 7 7,8 	 90
2	Пил фіброгенний, г/м^3	4	18,4			4,6	90
3	Рівень шуму, дБА	80	86	6			90
4	Вібрація (локальна), дБ	109	116			7	90
5	Мікроклімат в приміщенні: - Температура, °С - Повітряна швидкість, м/с - Відносна вологість повітря, % - Інфрачервоне випромінювання, Вт/м^2	 16-27 0,2-0,6 40-60 140	 30 0,71 45 650	 3 1,18 511			 90
6	Тяжкість і інтенсивність роботи	Категорія роботи - важка, III напружена					

Таким чином, аналіз умов праці дозволяє зробити висновок про належність умов праці до III класу 3-го ступеня. На робочому місці є 3 фактори першого ступеня і 4 фактори третього ступеня.

4.2. Розробка заходів щодо захисту від впливу небезпечних і шкідливих факторів виробничого середовища

Пил шкідливо впливає на організм людини, подразнюючи шкіру, очі, слизові оболонки ротової порожнини, вуха. Проникаючи в легені, він може спричиняти специфічні професійні захворювання, такі як силікоз, силікатоз, антракоз тощо. [28].

Найбільш ефективними засобами боротьби з пилом є механізація виробничих процесів з герметизацією операцій, пов'язаних з просіюванням, змішуванням і транспортуванням сипучих матеріалів і аспірацією пилу з місць її утворення, а також розпилення води при різних робочих операціях, пов'язаних з пилоутворенням. Також необхідно використовувати засоби індивідуального захисту органів дихання, зокрема, пелюстковий респіратор СБ-2, який виключає вплив пилу на організм працівників [29].

Одним з основних заходів профілактики можливих отруєнь чадним газом (II), діоксидом сірки, оксидом азоту (II) та іншими газами є своєчасне виявлення місць їх виділення або скупчення. Ці місця є газонебезпечними. Перелік таких місць і майданчиків складається заздалегідь і затверджується головним інженером заводу. Працівники санітарних лабораторій та газорятувальних служб щодня за встановленим графіком стежать за станом повітря у всіх газонебезпечних місцях. У разі виявлення викидів або скупчень газу негайно вживаються заходи щодо припинення допуску людей до газонебезпечних зон та локалізації джерела газовиділення.

Для поліпшення мікроклімату на робочих місцях забезпечується природна і механічна подача повітря за рахунок продувних установок з підготовкою повітря на штатних кондиціонерах на постійні робочі місця. Необхідна також витяжна вентиляція з використанням місцевої витяжної і штучної вентиляції [30].

Надмірний шум негативно впливає на продуктивність. Тривалий вплив шуму може призвести до погіршення слуху, а іноді і до глухоти. Шум негативно впливає на серцево-судинну і центральну нервову системи.

Для захисту виробничого персоналу від шуму обладнання його повністю закривають герметичним звукоізоляційним кожухом, який зазвичай виготовляють із сталевих листів товщиною 2-3 мм, а внутрішні поверхні облицьовують звукопоглинаючими матеріалами. Звукоізоляційний кожух монтується на еластичні прокладки, а машина ретельно віброізолюється від фундаменту, запобігаючи жорсткий контакт машини з кожухом. Отвори для циркуляції повітря і проходу комунікацій обладнуються шумоглушниками або герметизуються ущільнювачами.

Підвищений тепловий вплив на організм людини призводить до перенапруження його терморегуляційних функцій і може стати причиною порушення теплового балансу організму. Вимивання сполук хлору з організму призводить до зниження кислотності шлункового соку і виникнення захворювань шлунково-кишкового тракту [29].

Щоб зменшити шкідливий вплив тепла на організм людини, стіни і колони повинні бути теплоізольовані. З боків печей для захисту від променів тепла повинні бути влаштовані екрани у вигляді щитів з металевих листів і азбесту.

4.3. Заходи електробезпеки

Основним електрообладнанням печей є автоматичні вимикачі, пічні трансформатори, короткі мережі, автоматичні регулятори руху електродів і електромагнітні металеві змішувачі.

Небезпеку електротравм у цеху створює різне електрообладнання: електроприводи (зокрема апаратура керування), підйомно-конвеєрні пристрої, внутрішньозаводський електротранспорт, зварювальні апарати, освітлювальні установки, ручний електроінструмент тощо. Існує ризик дотику до струмоведучих частин або захисних пристроїв. Під час роботи електродвигунів можливий випадковий контакт із проводами, які подають електричний струм, якщо їхні клеми розташовані на корпусі двигуна у відкритій клемній коробці. Це становить небезпеку у разі відсутності належної ізоляції та захисту.

На окрему увагу заслуговують переносні електродвигуни, які використовуються в роботі різних переносних електроінструментів. Якщо корпус такого електродвигуна знаходиться під напругою, то в результаті тісного контакту з великою контактною поверхнею виникає небезпека сильного ураження працівників електричним струмом.

На ділянках цеху розташована велика кількість електродвигунів, щитів, електроприладів, обладнання, комплектної трансформаторної підстанції. Для електрообладнання потрібна напруга 380В. Електричний струм також використовується для освітлення приміщень з необхідною напругою 220В. Таким чином, майстерня відноситься до категорії з підвищеним ризиком ураження людей електричним струмом.

При нормальній експлуатації трипровідна мережа з ізольованою нейтраллю більш безпечна. В аварійному режимі більш безпечна чотирипровідна мережа з надійно заземленою нейтраллю. Мережі з глухозаземленою нейтраллю використовуються там, де неможливо забезпечити хорошу ізоляцію проводів, так як існує висока температура і вологість повітря, агресивне середовище, велика протяжність мережі. Ефективною мірою захисту трифазних чотирипровідних мереж напругою до 1000В з глухозаземленою нейтраллю є захисне занулення [30].

4.4. Протипожежні та техногенні заходи безпеки

Причинами пожеж можуть бути дефекти будівельних конструкцій, споруд, планування приміщень, пристрої зв'язку, дефекти обладнання, порушення режимів технологічного процесу, неправильна робота, недбалість персоналу, самозаймання, розряди атмосферної та статичної електрики.

Приміщення цеху можна віднести до категорії «D» (пожежонебезпечні), так як вони призначені для негорючих речовин і матеріалів в холодному стані.

У цеху передбачена система пожежної сигналізації, яка призначена для автоматичного виявлення та видачі пожежних сигналів, активації апаратури аварійної сигналізації, формування керуючих сигналів для системи пожежної

сигналізації, відключення вентиляції технологічних агрегатів.

Автоматичні установки водяного пожежогасіння є найбільш поширеними, надійними і дешевими. В якості засобів пожежогасіння застосовують струмені крапельної води, водно-хімічні піни і емульсії, легкомеханічні піни з додаванням змочувальних речовин. Дренчерне обладнання – наземна система; Дренчерні головки постійно відкриті. Дане обладнання використовується в основному для створення водяних завіс по периметру будівлі, що перешкоджають поширенню пожеж.

Для гасіння пожеж застосовують також хімічні пінні вогнегасники ВХП-10 і вуглекислотні вогнегасники ВВ-2, ВВ-5 і ВВ-8, а також пересувні вогнегасники ВВ-25 і ВВ-80 [31].

4.5. Захисне заземлення та конструкція захисного відключення

У цеху захисне заземлення за допомогою заземлювальних пристроїв прийнято як засіб захисту від електричного струму, так як на підприємстві використовується трифазний змінний струм з напругою 380/220 В.

Підбираємо конструкцію комбінованого заземлювального пристрою і визначаємо його опір поширенню струму короткого замикання на землю при наступних умовах: вертикальні електроди зі сталевих труб діаметром 100 мм, довжиною 2м, верхні кінці яких з'єднуються між собою за допомогою горизонтального електрода - сталевої смуги перетином 4×40 мм, закладені в грунт на глибину H_0=0,75м (рис. 4.1). Вибераємо тип заземлювача виносного контуру. Грунт перемішують. Кліматична зона об'єкта II.

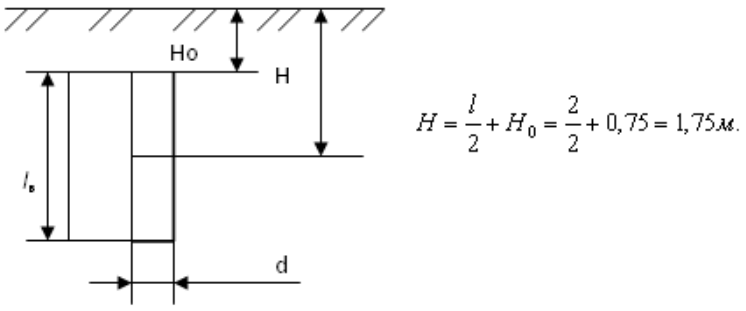


Рисунок 4.1 - Схема розташування заземлюючого провідника в землі.

Розрахунковий опір розсіювання електродів – вертикального R_b і горизонтального R_g – визначається за такими формулами [31]:

$$R_B = \frac{\rho}{2\pi \cdot l_в}\left(\ln\frac{2 \cdot l_в}{d} + \frac{1}{2}\ln\frac{4H + l_в}{4H - l_в}\right), \quad (4.1)$$

де $l_в$ - довжина вертикального електрода, см;

d - діаметр електрода, см;

H - виїмка електрода посередині його довжини (див. рис. 4.1).

Опір горизонтальної смуги:

$$R_г = \frac{\rho_г}{2\pi \cdot l_п}\ln\frac{2 \cdot l_п^{\,2}}{в \cdot H_0}, \quad (4.2)$$

де $\rho_г$ – розрахунковий питомий опір грунту, Ом см;

$H_о$ – глибина закладання смуги, см;

c – ширина сполучної планки, см;

$l_п$ – довжина сполучної планки, см.

Розрахунковий питомий опір грунту, Ом см:

$$\rho_г = \psi \cdot \rho, \quad (4.3)$$

де ψ - кліматичний коефіцієнт; для суміщеного заземлювача і клімату II. ψ=1,6 [30];

ρ - питомий опір грунту, Ом·см. ρ = 10000 Ом·см [30].

$$\rho_в = \psi \cdot \rho = 1{,}6 \cdot 10000 = 1{,}6 \cdot 10^4 \text{ Ом·см.}$$

$$R_B = \frac{1{,}6 \cdot 10^4}{2 \cdot 3{,}14 \cdot 200}\left(\ln\frac{2 \cdot 200}{10} + \frac{1}{2}\ln\frac{4 \cdot 175 + 200}{4 \cdot 175 - 200}\right) \approx 50{,}7 \text{ Ом.}$$

Знаходимо приблизну кількість вертикальних заземлювачів в ланцюзі:

$$n = \frac{R_B}{R_Д}, \quad (4.4)$$

де $R_Д$ = 4 Ом - допустимий опір заземлюючого провідника для установок з напругою до 1000 В з ізольованою нейтраллю [30].

$$n = \frac{50{,}7}{4} = 13.$$

Візьмемо відстань між заземлюючими провідниками:

$$a = 2 \cdot l_b, \tag{4.5}$$

$$a = 2*200 = 400 \text{ см}.$$

Далі з урахуванням того, що отриманий заземлювач закільцьований і що число заземлювачів становить 13 шт, а коефіцієнт $\frac{a}{l_b} = \frac{400}{200} = 2,$ використання електродів заземлюючого провідника з урахуванням їх взаємного екранування – $\eta_{е.з} = 0,66$ [30]. Визначимо кількість заземлювачів з урахуванням їх взаємного екранування:

$$n_З = \frac{n}{\eta_{е.з}} = \frac{13}{0,66} \approx 20. \tag{4.6}$$

Довжина смуги, що з'єднує заземлювачі, см:

$$l_п = 1,05 \cdot a \cdot n_з, \tag{4.7}$$

$$l_п = 1,05 \cdot 400 \cdot 20 = 8400 \text{ см} = 8,4 \text{ м}$$

то

$$R_г = \frac{1,6 \cdot 10^4}{2 \cdot 3,14 \cdot 8400} \ln \frac{2 \cdot 8400^2}{0,4 \cdot 750} = 4 \text{ Ом}.$$

Фактичний опір горизонтального заземлювача при взаємному екрануванні:

$$R_Г = \frac{R_г}{\eta_Г}, \tag{4.8}$$

де $\eta_Г = 0,34$ – коефіцієнти використання горизонтального заземлення [30].

$$R_Г = \frac{4}{0,34} = 11,8 \text{ Ом}.$$

Знайдемо опір поширенню прийнятої групи заземлювального провідника, Ом:

$$R = \frac{R_В \cdot R_Г}{R_В \cdot \eta_г + R_Г \cdot \eta_{в.} n_з}, \tag{4.9}$$

$$R = \frac{50,7 \cdot 11,8}{50,7 \cdot 0,34 + 11,8 \cdot 0,66 \cdot 20} = 3,5 \text{ Ом}.$$

Цей опір менше необхідного $R_Д$ = 4 Ом, тому приймаємо цей результат за кінцевий.

Отже: проектований заземлювач являє собою петлеву розпірку, що складається з 20 вертикальних стрижневих електродів довжиною і діаметром 2м і горизонтального електрода у вигляді сталевої смуги перетином 4×40 мм, закладеної в землю на глибину 0,75 м (рис. 4.2).

У той же час, згідно з умовами безпеки, потрібне безумовне відключення агрегату при замиканні фази на корпус, а напруга контакту U_d не повинна перевищувати 42В. Для виконання цих умов передбачаємо установку захисного відключення (УЗО), що реагує на потенціал пакета (рис. 4.3). У цьому випадку ми використовуємо реле напруги, в якому напруга спрацьовування становить U_s = 30В, активний опір обмотки $R_р$ = 400Ом, індуктивний опір X = 200Ом [30].

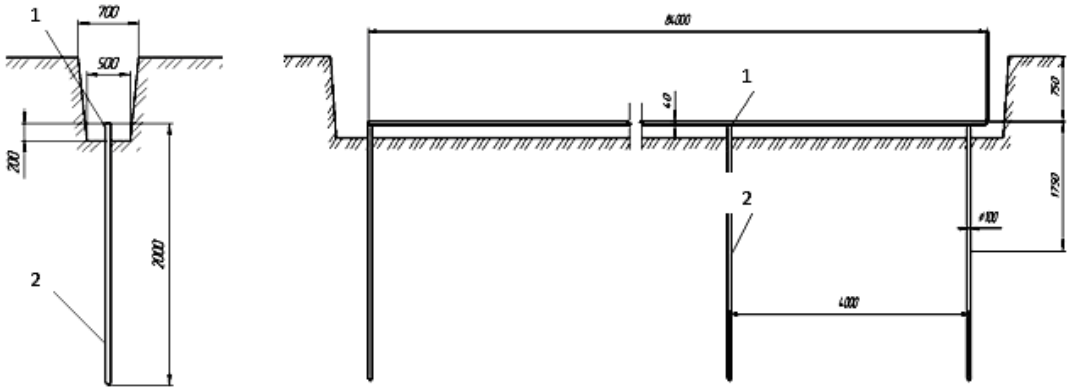


Рисунок 4.2 - Розташування заземлюючих провідників трансформаторної підстанції: 1 - смуги, що з'єднують заземлюючі провідники; 2 – заземлюючий провідник.

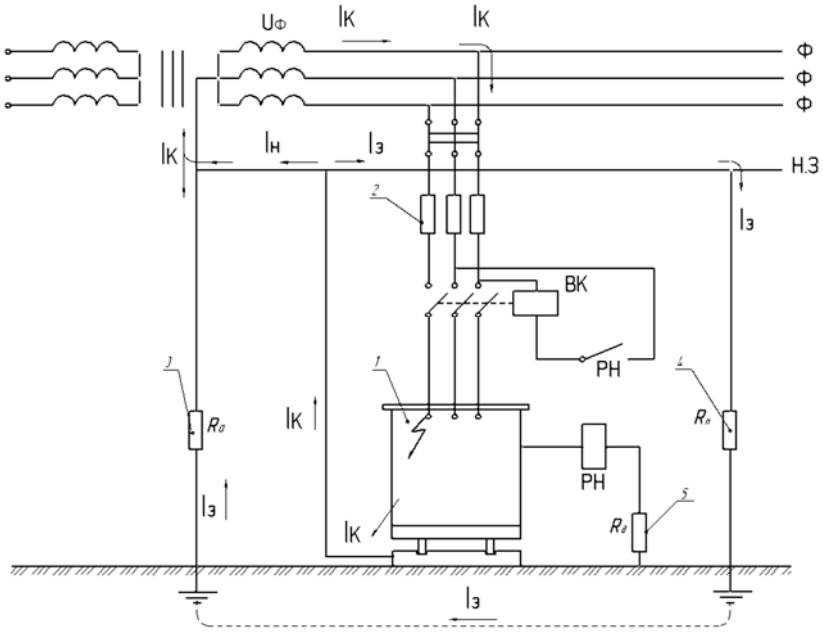


Рисунок 4.3 – Принципова схема диференційного струму: 1 – трансформатор; 2 – пристрої захисту від струму короткого замикання (запобіжники); R_p - опір повторному заземленню нульового проводу; R_0 - опір робочого заземлення нейтралі трансформатора; R_d - опір допоміжного заземлення трансформатора; I_k - струм короткого замикання; I_z - струм замикання на землю; $I_н$ - частина струму короткого замикання, яка протікає по нульовому захисному провіднику; ВК – котушка спрацьовування автоматичного вимикача; РН – реле напруги; F – фазні провідники; Н.З. є нульовим захисним провідником.

Знайдемо опір допоміжного заземлення r_B, при якому буде працювати рециркуляційна аквакультура, з рівняння напруги відгуку реле Us:

$$U_c = U_д \frac{\sqrt{R_p^2 + X_p^2}}{\sqrt{\left(R_p + r_B\right)^2 + X_p^2}}, \tag{4.10}$$

де R_p і X_p - активний і індуктивний опір обмотки реле, Ом;

U_d – допустимо для дотика, В.

Підставляємо відповідні значення напруги спрацьовування реле в рівняння (4.10) і отримуємо:

$$30 = 42 \cdot \frac{\sqrt{400^2 + 200^2}}{\sqrt{\left(400 + r_B\right)^2 + 200^2}}.$$

$$1764 \cdot (400^{2} + 200^{2}) = 900 \cdot [(400 + r_{B})^{2} + 40000].$$

Так

$$r_B^2 + 800 \cdot r_B - 552000 = 0.$$

Де знаходимо опор допоміжного заземлення:

$$r_B = \frac{-800 + 1687{,}6}{2} = 444 \ \ Ом.$$

Таким чином, якщо напруга контакту досягає 42В, то пристрій захисного відключення буде працювати при опорі допоміжного заземлення r_B=444 Ом.

Висновок

1. Умови праці в феросплавному цеху відносяться до III розряду 3-го ступеня. На робочому місці є 3 фактори першого ступеня і 4 фактори третього ступеня. Згідно з показниками, робоче місце повинно бути зважене особливо шкідливими і особливо важкими умовами праці.

2. З метою зменшення шкідливого впливу тепла на організм людини стіни і колони повинні бути теплоізольовані. З боків печей для захисту від променів тепла повинні бути влаштовані екрани у вигляді щитів з металевих листів і азбесту.

3. У цеху захисне заземлення за допомогою заземлювальних пристроїв прийнято як засіб захисту від електричного струму, оскільки на підприємстві використовується трифазний змінний струм напругою 380/220В.

ВИСНОВКИ

Проблема прокатного виробництва полягає в підвищенні точності прокатки штаби, зниженні металоємності і зниженні споживання електроенергії. Значною мірою цього можна досягти за рахунок контролю силових параметрів процесу прокатки через кліті.

Тому, проаналізувавши вплив різних факторів на внутрішні напруження в металі і середню нормальну напругу контакту, був складений алгоритм розрахунку, який наводиться у другій частині дипломної роботи.

Результати розрахунку параметрів гарячої прокатки заносяться в таблиці, а за результатами розрахунку будуються графіки, а саме графіки індексу міцності по клітях стану. У графічній візуалізації отриманих результатів видно, що показники потужності при розрахунку параметрів крутного моменту і енергосилових параметрів мають розбіжності з експериментальними даними. Розрахувавши параметри гарячої прокатки і проаналізувавши отримані дані, було встановлено, що метод розрахунку актуальний і сьогодні.

Також, керуючи силовими параметрами процесу прокатки через кліті станів і виходячи з експериментальних значень сили прокатки, можна розробити раціональні режими деформації в клітях, які дозволять знизити рівень неплоскості прокату.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Николаев, В.А. Горячая прокатка листов и полос / В.А. Николаев. – Запорожье: ЗГИА, 2013. – 169 с.

2. Клименко, П.Л. Упрочнение стали и цветных металлов при холодной и горячей деформации / П.Л. Клименко. – Днепропетровск: Пороги, 2011. – 187 с. – ISBN 978-617-518-133-1.

3. Василев, Я. Д. Теорія поздовжньої прокатки: [підручник] / Я. Д. Василев, О. А. Мінаєв. – Донецьк: УНІТЕХ, 2009. – 488 с.

4. Прищип М.Г. Методичний посібник для виконання курсових робіт з дисципліни ТЛ і КМЦ та загальної частини дипломних проектів для студентів спеціальності 7.090218 спеціалізації ММО, МО та ОМТ :- Запоріжжя: ЗДІА, 2002. - 74с.

5. Ніколаєв, В.О. Виробництво плоского прокату / В.О. Ніколаєв, В.Л. Мазур. – Запоріжжя, ЗДІА, 2010. – 320 с.

6. Ніколаєв, В.О. Холодная прокатка листов и полос / В.О. Ніколаєв. – Запоріжжя, ЗДІА

7. Середа Б.П. Обробка металів тиском: [навчальний посібник] / Б.П. Середа, - Запоріжжя: ЗДІА, 2009 – 344 с.

8. Середа Б.П. Прокатне виробництво [навчальний посібник] / Б.П. Середа, Запоріжжя: ЗДІА, 2008 – 352 с.

9. Технологічні лінії та комплекси металургійних цехів. Конспект лекцій / Укл. М.Г. Прищип, К.В. Таратута – Запоріжжя, ЗДІА. 2006 – 139 с.

10. Теоретичні та експерементальні дослідження процесів ОМТ, методичні вказівки до лабораторних робіт для студентів ЗДІА спеціальності ОМТ / Укл.: М.Г. Прищип, І.В. Кругляк, Ю.О. Бєлоконь. – Запоріжжя, ЗДІА, 2010. 47с.

11. Разработка и освоение новых режимов прокатки и профилей валков / Прищип Н.И. Отчет по НИР – Запорожье – Мариуполь. 1983 – 67 с.

12. Technology of Rolled Stock production [Summary of Lectures] / N. I. Prischip – Zaporozhstal Steel Works. UNIDA training programme, 1986. 227 p.

13. Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень [Текст]: ДСН 3.36.042-99: Вступ.1999-12-01. 9 с. (російською мовою)

14. Державні будівельні норми. Будівлі та споруди. Будинки адміністративного та побутового призначення: ДБН В.2.2 – 28:2010: затв. Мінрегіон України 30.12.10 : вступ з 10.10.11.- К. : ПАТ «Київський ЗНДІЕП». 2010. 28 с.: "Укрархбудінформ". UKND 91.040.99

15. Державні будівельні норми. Протипожежний захист. Пожежна безпека будівельних об'єктів: ДБН В.1.1.7-2002: Затв. Державний комітет будівництва України 03.12.02 : введений з 01.05.03. Київ: УкрНІПБ. 2002. 44 с. (російською мовою)

16. ДСТУ Б В.2.5-38:2008. Інженерне обладнання будівель і споруд. Блискавкозахист будівель і споруд. Знайомство. 2009-01-01. Київ: Міністерство регіонального розвитку України. 2008. 65 с. (російською мовою)

17. НАПБ А.01.001-2004. Правила пожежної безпеки в Україні [Текст]. "Подано. 2004-11-04. Київ: Міністерство надзвичайних ситуацій України. 2004. 143 с. (російською мовою)