

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

ІНЖЕНЕРНИЙ НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ  
ім. Ю.М. ПОТЕБНІ

Кафедра металургійних технологій, екології та техногенної безпеки

## Кваліфікаційна робота / проект

Перший (бакалаврський)

(рівень вищої освіти)

на тему Дослідження формозмінення гарячекатаної сталеві штаби завтовшки 1,2 – 1,6 мм зі сталі 08Ю при змотуванні в рулон для прогнозування площинності у холодному стані

Виконав: студент  V  курсу, групи  6.1369-м-з   
спеціальності  136 Металургія

(код і назва спеціальності)

освітньої програми  Обробка металів тиском

(код і назва освітньої програми)

В. С. Кудрін

(ініціали та прізвище)

Керівник

доц. каф. МТЕТБ, с.н.с., к.т.н. В.М. Проценко

Рецензент

доц. каф. МТЕТБ, доц., к.т.н. О.С. Воденнікова

Запоріжжя – 2024 року

## МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

**Запорізький національний університет**

(повне найменування вищого навчального закладу)

Інженерний навчально – науковий інститут ім. Ю.М. Потебні

Кафедра металургійних технологій, екології та техногенної безпеки  
Рівень вищої освіти перший (бакалаврський) рівень  
Спеціальність 136 «Металургія»  
(код та назва)  
Освітньо-професійна програма Обробка металів тиском  
(код та назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри МТЕТБЮ.О. Белоконь“ 12 ” 02 2024 року**ЗАВДАННЯ****НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ / ПРОЕКТ СТУДЕНТУ**Кудріну Володимиру Сергійовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи (проекту) ***Дослідження формозмінення гарячекатаної сталевій штаби завтовшки 1,2 – 1,6 мм зі сталі 08Ю при змотуванні в рулон для прогнозування площинності у холодному стані***

керівник роботи (проекту) Проценко Віктор Максимович, к.т.н., с.н.с.,  
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом вищого навчального закладу від “26” 12. 23 р. № 2212-с2. Строк подання студентом роботи 24 травня 2024 року3. Вихідні дані до роботи: Матеріали переддипломної практики, курсові проекти, технічна документація ЦХП-1 і ЦГПТЛ ПАТ «Запоріжсталь», літературні джерела, інтернет-ресурси4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити): Реферат. Вступ. Загальна частина. Технологічна частина. Механічна частина. Охорона праці та техногенна безпека. Висновки..Мета кваліфікаційної роботи – аналіз формозмінення гарячекатаної штаби завтовшки 1,2 – 1,6 мм зі сталі 08Ю в рулоні, прогнозування

площинності остиглої штаби та розробка рекомендацій щодо зниження втрат металу у цеху холодної прокатки від неплщинності гарячекатаної штаби.

Розглянути модель формозміни штаби в процесі змотування та охолодження рулону. Розробити модель зміни площинності штаби в процесі змотування та охолодження рулону гарячекатаної сталі. Дослідити вплив опуклості, шорсткості та натягу при змотуванні штаби в рулон на процес формозміни при змотуванні та охолодженні рулону. З'ясувати причини зниження продуктивності неперервного стану холодної прокатки 1680.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень) Графіки залежностей, схеми дії натягіння, напруг і деформацій штаби, схеми до розрахунку чотирироlikової листопрямильної машини тощо.

#### 6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата
		завдання прийняв
Вступ, реферат, 1–4, висновки, перелік літератури	Проценко В.М., доц. каф. МТЕТБ	

7. Дата видачі завдання 12.02.2024 року.

### КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1.	Реферат, вступ, розділ 1.	12.02.24 – 13.03.24	
2.	Розділи 2 - 3	16.03.24 – 17.04.24	
3.	Охорона праці (розділ 4), висновки, оформлення ПЗ і креслень, підготовка доповіді і презентації.	20.04.24 – 24.05.24	

Студент

\_\_\_\_\_ (підпис)

Кудрін В. С.

(прізвище та ініціали)

Керівник проекту (роботи)

\_\_\_\_\_ (підпис)

Проценко В.М.

(прізвище та ініціали)

Нормоконтроль пройдено  
Нормоконтролер

\_\_\_\_\_ (підпис)

Бєлоконь Ю.О.

(прізвище та ініціали)

## Реферат

Пояснювальна записка бакалаврської роботи містить: 62 с., 11 рис., 3 табл.; використано літературних джерела 22.

Об'єкт дослідження – обладнання листопрокатних цехів, зокрема ПАТ «Запоріжсталь», формозмінення гарячекатаної сталеві штаби при змотуванні в рулон, продуктивність прокатного стану, листопрямильні машини.

Метою бакалаврської роботи є аналіз формозмінення гарячекатаної штаби завтовшки 1,2 – 1,6 мм зі сталі 08Ю в рулоні, прогнозування площинності остиглої штаби та розробка рекомендацій щодо зниження втрат металу у цеху холодної прокатки від неплщинності гарячекатаної штаби.

Методи розрахунків – стандартні методики розрахунків у програмних комплексах Mathcad Prime 9, Excel. Розрахунки і комп'ютерне моделювання у системі САПР AutoCAD Mechanical 2020.

Отримані результати і їх новизна – розглянуто модель формозміни штаби в процесі змотування та охолодження рулону. Розроблено модель зміни площинності штаби в процесі змотування та охолодження рулону гарячекатаної сталі. Досліджено вплив опуклості, шорсткості та натягу при змотуванні штаби в рулон на процес формозміни при змотуванні та охолодженні рулону.

З'ясовано причини підвищення часу перезаправки рулонів на неперервному стані холодної прокатки 1680, що знижує продуктивність стану. Запропоновано технічне рішення, яке дозволяє звести до мінімуму перевищення часу перезаправки рулонів та полегшить роботу оператора стану.

Отримані результати рекомендуються для впровадження у прокатних цехах ПАТ «Запоріжсталь» з метою, підвищення якості продукції, зменшення енерговитрат і втрат металу.

**ПРОКАТКА, ШТАБА, РУЛОН, ЗМОТУВАННЯ, ПЛОЩИННІСТЬ, ФОРМОЗМІНЕННЯ, ПЕРЕЗАПРАВКА, ПРОДУКТИВНІСТЬ СТАНУ.**

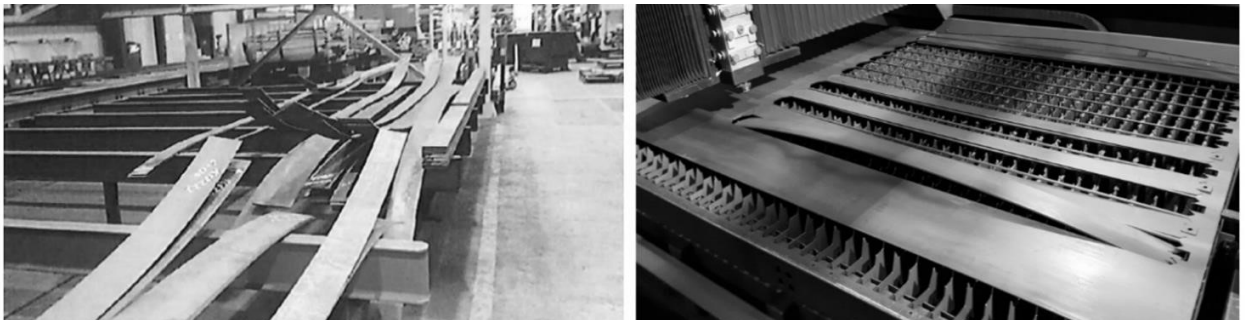
## ЗМІСТ

ВСТУП .....	6
1 ЗАГАЛЬНА ЧАСТИНА .....	9
1.1 Загальна характеристика неплщинності і її опису на різних ділянках ширини штаби .....	9
1.2 Зменшення часу перезаправки стану 1680 порулочної прокатки .....	12
2 ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА .....	16
2.1 Виникнення проблеми втрати стійкості рулонами гарячекатаної штаби .....	16
2.2 Охолодження рулону і його вплив на площинність штаби ....	17
2.3 Перевірка моделі зміни площинності штаби у процесі змотування та охолодження рулону .....	25
3 МЕХАНІЧНА ЧАСТИНА .....	28
3.1 Листоправильні машини. Призначення і класифікація листоправильних машин .....	28
3.2 Багатороликові листоправильні машини .....	36
3.3 Провка сталевго листа на чотирироликовій листоправильній машині .....	38
3.4 Згинання сталевго листа на трироликовій згинальній машині	40
4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ТЕХНОГЕННА БЕЗПЕКА .....	44
4.1 Загальні заходи щодо безпеки в прокатному виробництві .....	44
4.1.1 Обслуговування клітей і сполучальних частин між ними	44
4.1.2 Експлуатація валкової арматури .....	49
4.1.3 Експлуатація змащувальних пристроїв .....	50
4.1.4 Вбирання окалини .....	52
4.1.5 Перевалка валків і ремонт станів .....	54
4.1.6 Управління станами і оздоблювальними агрегатами .....	56
ВИСНОВКИ .....	58
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ .....	60

## ВСТУП

Посилення вимог споживачів плоского металопрокату до таких показників якості, як точність геометричних розмірів та площинність, а також прагнення виробника до зниження витрат на виготовлення продукції призводить до необхідності підвищення ефективності виробництва. Це особливо актуально у сьогоднішній ситуації на ринку металопрокату, що характеризується зниженням цін через надлишок виробничих потужностей у світі.

Споживачі гарячекатаних штаб і листів (включаючи цехи холодної прокатки) все частіше позначають як проблему не тільки дефект «неплощинність», а й деформацію після розкрою, викликану залишковою напругою (рис. 1).



**Рисунок 1** – Деформація гарячекатаного листа після розкрою

Дослідження формування внутрішніх напруг і площинності гарячекатаних штаб з метою більш глибокого розуміння та прогнозування цих процесів є важливим та актуальним завданням, вирішення якого дозволить скоротити витрати споживачів гарячекатаного прокату. При обробці штаби в клітках стану гарячої прокатки формується її товщина, ширина та профіль поперечного перерізу. Однак виміряна на виході останньої клітки чистової групи площинність штаби не є остаточною: вона може значно відрізнятись від

площинності, яка вимірюється у споживача. Це свідчить про те, що при змотуванні та охолодженні рулону площинність гарячекатаних штаб може змінюватися під впливом внутрішніх напруг та високої температури.

Вивченню питань, пов'язаних із площинністю гарячекатаних штаб, присвячено багато робіт [1 - 3]. Проте процеси формозміни гарячекатаної штаби при змотуванні залишаються недостатньо вивченими.

Наукова проблематика полягає у дослідженні напружено-деформованого стану та теплового стану гарячекатаних рулонів у процесах змотування та охолодження залежно від товщини, ширини, поперечного профілю, шорсткості та неплщинності штаби, а також режимів змотування та охолодження. Розуміння закономірностей зміни напружено-деформованого та теплового станів гарячекатаного рулону дозволяє визначати нерівномірність витяжки металу по ширині і, як наслідок, прогнозувати зміну площинності штаби при змотуванні та охолодженні.

Досліджувана проблема актуальна для всіх металургійних підприємств зі станами гарячої прокатки штаб, у тому числі і для ПАТ «Запоріжсталь»: маршрут обробки гарячекатаних штаб у ЦГПТЛ і ЦХП-1 включає агрегат підготовки гарячекатаних рулонів, де вирізаються ділянки штаби з критичною величиною неплщинності для виключення втрат, пов'язаних зі збоями в стикозварювальних машинах і відведеннями в накопичувачах наступних агрегатів: агрегату нормалізації та безперервно-травильного агрегату. Для підкату з допустимою неплщинністю агрегат підготовки гарячекатаних рулонів може бути виключений з маршруту обробки, що знижує витрати виробництва. Однак відсутність достовірної інформації про фактичну площинність штаб, що надходять із цеху гарячого прокату в цех холодної прокатки сталі, призводить до появи ризику утворення додаткових втрат.

Все це зумовлює актуальність дослідження процесів формозміни гарячекатаних штаб при змотуванні в рулон та подальшому охолодженні.

Попередні дослідження показали, що процес формозміни при змотуванні та охолодженні рулону після гарячої прокатки надає значний вплив на площинність штаби на кінцевих ділянках. На площинність комплексно впливає режим натягу, довжина, товщина, ширина, профіль поперечного перерізу, шорсткість, неплщинність та температурний профіль штаби.

Метою бакалаврської роботи є аналіз формозмінення гарячекатаної штаби завтовшки 1,2 – 1,6 мм зі сталі 08Ю в рулоні, прогнозування площинності остиглої штаби та розробка рекомендацій щодо зниження втрат металу у цеху холодної прокатки від неплщинності гарячекатаної штаби.

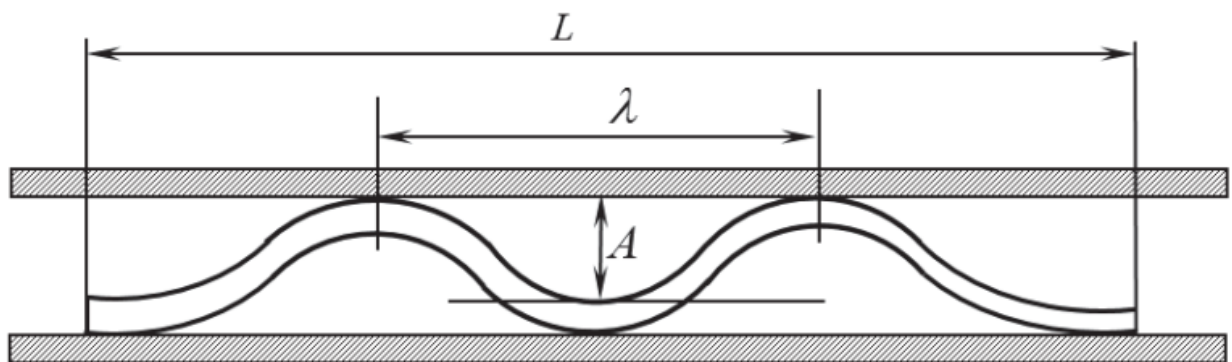
Отримані результати можуть бути використані на металургійних підприємствах повного циклу, зокрема на ПАТ «Запоріжсталь» і інших підприємствах, що виробляють холоднокатаний прокат.



## 1 ЗАГАЛЬНА ЧАСТИНА

### 1.1 Загальна характеристика неплщинності і її опису на різних ділянках ширини штаби

Неплщинність є однією з геометричних характеристик і визначається відхиленням штаби від плоскої форми. Величина неплщинності характеризується амплітудою - максимальним відхиленням штаби від площини  $A$  на заданій довжині  $L$  і періодом – відстанню між сусідніми вершинами  $\lambda$  (рис. 1.1).



**Рисунок 1.1** – Визначення характеристик неплщинності штаби

Існує два способи опису неплщинності на різних ділянках ширини штаби, що характеризується координатою  $z$  (рис. 1.2). Через нерівномірність залишкової напруги  $\Delta\sigma_{зал}(z)$  та нерівномірність довжини  $\Delta L(z) = L(z) - L$  [1]. Враховуючи, що гарячекатана штаба в процесі обробки піддається впливу високої температури, при якій протікають процеси релаксації напруги, доцільніше визначати форму штаби відносним подовженням різних ділянок штаби по ширині:

$$\Delta\varepsilon(z) = \Delta L(z)/L \quad (1)$$

Загальноприйнято вимірювати подовження штаби в I-UNIT, одиниця якої дорівнює  $10^{-5}$  м/м [1].

Роботи [1-5], спрямовані на отримання сталевих гарячекатаної штаби, що відповідає найбільш високим вимогам стандартів (ДСТУ 19903-74, EN 10029, JIS G 3193 та інших), припускають, що після обробки в чистовій групі клітей стану гарячої прокатки процес формування площинності припиняється і подальша обробка незначно впливає на вже сформовану в процесі прокатки площинність.

Дійсно, саме в процесі інтенсивної пластичної деформації, що протікає в чистовій групі клітей стану гарячої прокатки, формуються геометричні характеристики штаби. Однак під впливом температури внутрішні напруги, що виникають при подальшій обробці (на відвідному рольгангу, при змотуванні штаби і при охолодженні рулону), змінюють форму гарячекатаної штаби, сформовану в чистовій групі клітей. У ряді робіт описуються процеси формозміни гарячекатаної штаби на відвідному рольгангу або у Койлбоксі і в рулоні, що змотується, до яких можна віднести наступні.

По-перше, площинність штаби може порушуватися на відвідному рольгангу або у Койлбоксі при охолодженні внаслідок пластичної деформації штаби під впливом термічних напруг. Це докладно описано роботах [4-7]. Більше того, у роботах [7-9] пропонується заздалегідь формувати спеціальну неплщинність, яка компенсуватиме подальший вплив термічних напруг на форму штаби. Подібний підхід можна застосувати при поширенні математичної моделі формозміни гарячекатаної штаби та на наступні операції – змотування штаби в рулон та його подальше повільне охолодження.

По-друге, наявність рулонної кривизни, яка спостерігається на гарячекатаній штабі в холодному стані. Рулонна кривизна утворюється за рахунок двох процесів, викликаних вигином штаби в процесі змотування: пластичного деформування безпосередньо при змотуванні [5-7] та релаксації напруг під впливом високої температури [8]. Наявність на гарячекатаній штабі

рулонної кривизни свідчить, що при подальшому повільному охолодженні у разі дії поздовжньої напруги відбуватиметься зміна довжини штаби через релаксацію. При різній величині поздовжньої напруги по ширині штаби явище релаксації також впливатиме на її форму.

Зміна площинності гарячекатаної штаби є складним та багатофакторним процесом, тому основним методом дослідження є зазвичай математичне моделювання. Через багатофакторність досліджуваного процесу доцільно його розділити на декілька частин. Можна виділити чотири складові процесу формозміни гарячекатаної штаби, які в основному і визначають її підсумкову формозміну. Це, по-перше, формування напружено-деформованого стану рулону у процесі змотування штаби; по-друге, зміна температури у процесі охолодження рулону; по-третє, зміна напружено-деформованого стану під впливом термічної напруги; і, по-четверте, формозміна гарячекатаної штаби внаслідок прояву реологічних властивостей матеріалу штаби (повзучість).

Модель напружено-деформованого стану рулону гарячекатаної сталі повинна обов'язково включати в себе облік утворення міжвіткових зазорів. Це пов'язано з тим, що утворення зазорів призводить до значної зміни напружено-деформованого стану рулонів при змотуванні. Згідно з експериментальними даними, представленими в роботах [9-11], навіть в умовах змотування холоднокатаних штаб утворюються міжвіткові зазори. Глибина проникнення зазорів може сягати 30% від ширини штаби, а зростання напруг може становити 3,5 рази. Існування в рулоні гарячекатаної штаби глибоких міжвіткових зазорів підтверджується наявністю окислених кромek на нетравлених гарячекатаних штабах.

Сформований при змотуванні штаби напружено-деформований стан рулону в процесі охолодження змінюватиметься через зменшення геометричних розмірів. Вплив охолодження на напружено-деформований стан рулону може бути значним через нерівномірність зміни температури за обсягом.

Таким чином аналітичний огляд показав, що під впливом температури внутрішні напруги, що виникають при змотуванні штаби в рулон і при охолодженні рулону, змінюють форму гарячекатаної штаби.

## **1.2 Зменшення часу перезаправки стану 1680 порулонної прокатки**

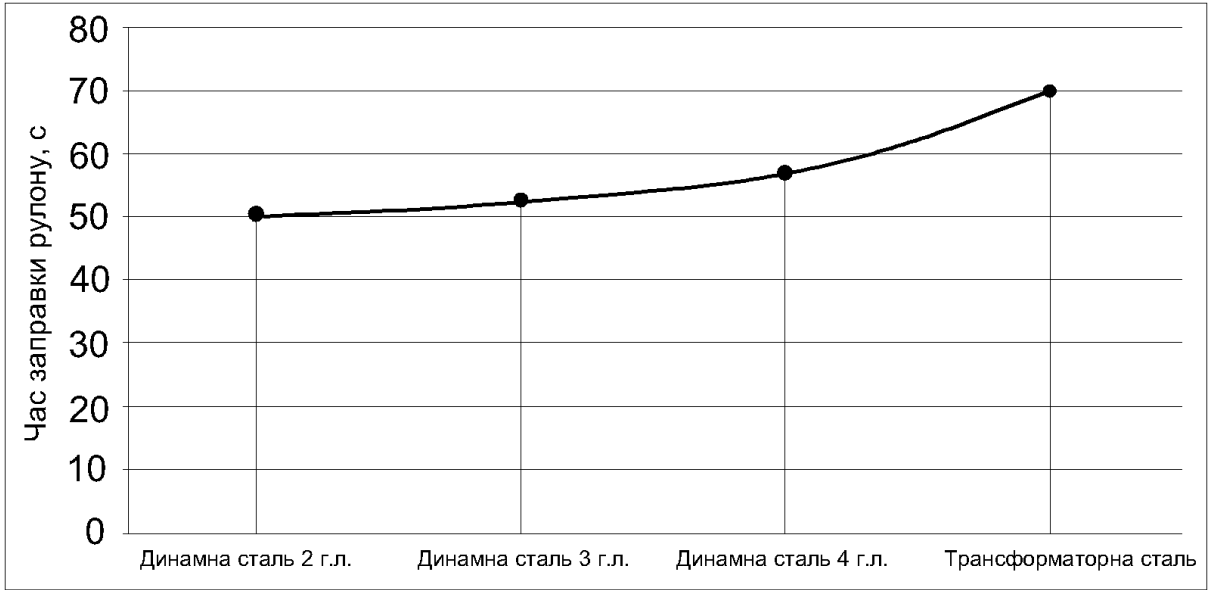
Вивчивши статистичні дані про виробництво стану холодної прокатки 1680 порулонної прокатки за один рік, було виявлено, що час посадки на розмотувач рулонів шириною від 1270 мм до 1500 мм займає в середньому 42 секунди, що значно менше 50-70 секунд, які займає посадка рулонів шириною від 1025 мм до 1150 мм. Процес завдання вузького металу вимагає чіткого позиціонування рулону на візку розмотувача по висоті. При непотраплянні однієї з головок у сформовану гільзу рулону відбувається посадка рулону на 1 головку, що веде до зминання кінцевої ділянки рулону та його подальшому виправленню.

Дані технологічні операції додають близько 10 хвилин до прокатки одного рулону, що в повторному підрахунку на один рік знижує продуктивність стану 1680 на 2,5 тис. тон.

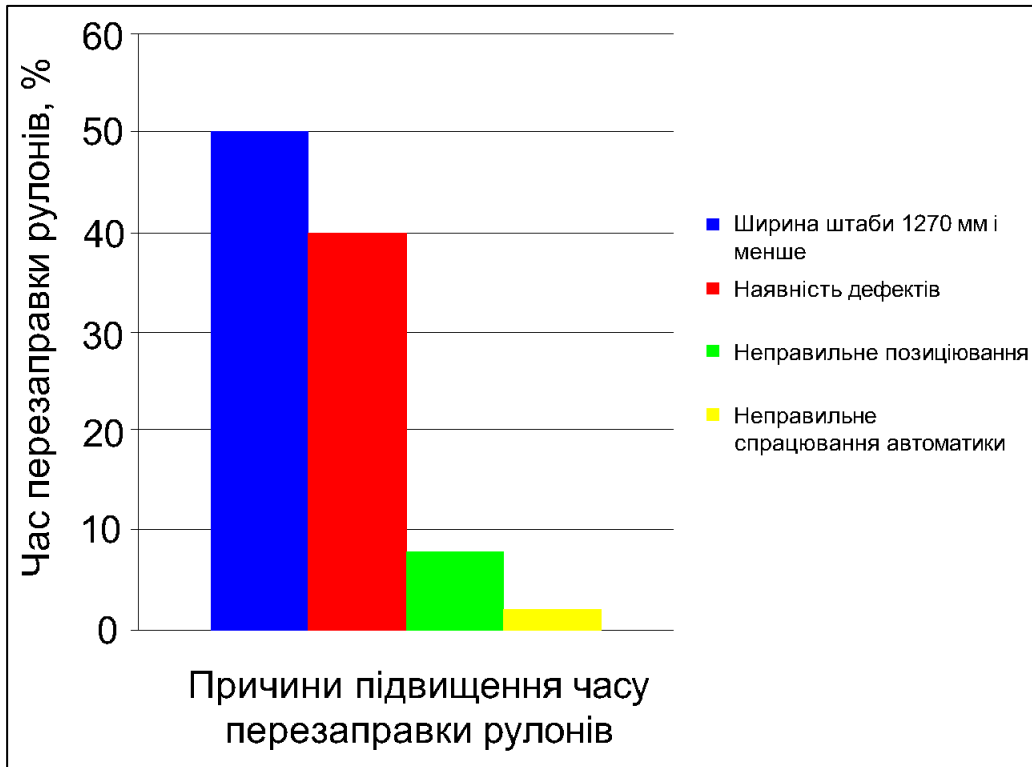
Розбивши дані про виробництво стану 1680 за сортаментом продукції, що прокатується, встановлено, що середній час заправки рулонів 4-х видів сталей, таких як, трансформаторна і динамна (2, 3, 4 груп легування) перевищує середній час завдання ( $t=42$  сек.) на 8-28 секунд (рис. 1.2), унаслідок чого знижується продуктивність стану.

На основі проведеного аналізу статистичних даних були виявлені причини підвищення часу перезаправки рулонів (рис. 1.3):

1. Дефекти: завороти, кінцеві ділянки, що точать, відігнутий задній кінець штаби.



**Рисунок 1.2** – Залежність середнього часу заправки рулонів від сортаменту на неперервному стані холодної прокатки 1680 ПАТ «Запоріжсталь»

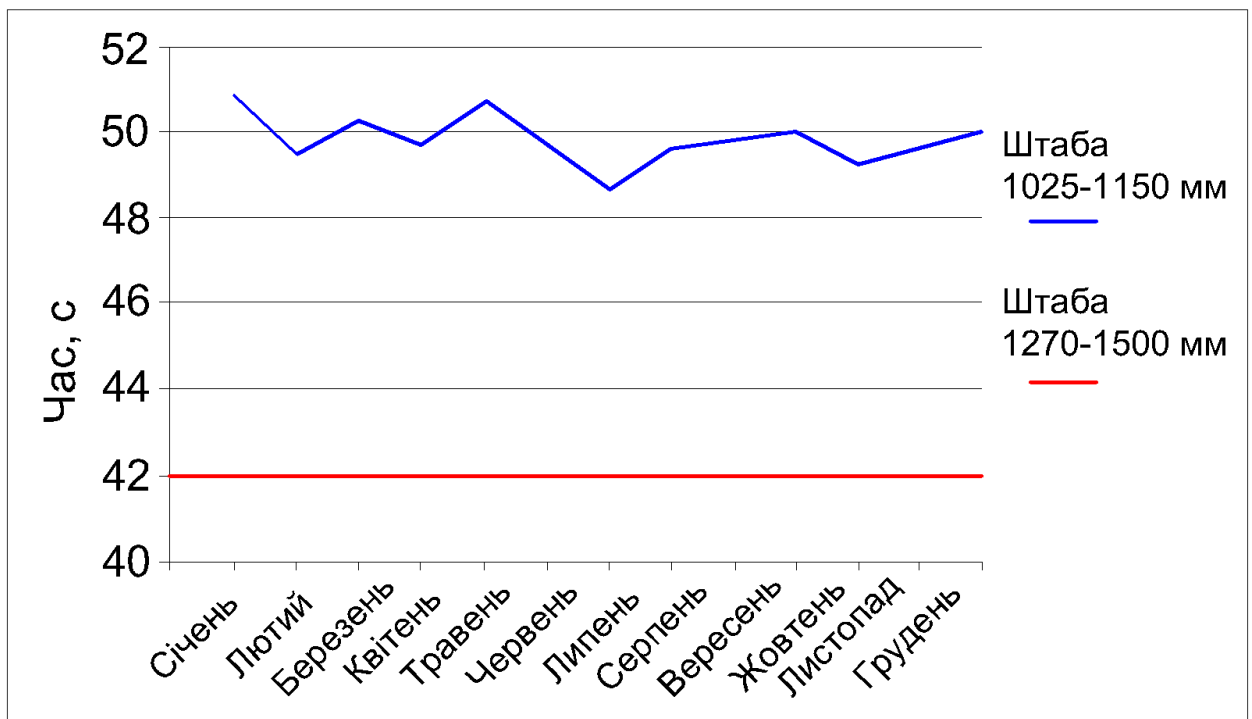


**Рисунок 1.3** – Причини підвищення часу перезаправки рулонів

2. Неправильне спрацювання автоматики: відсутність готовності завдання рулону на розмотувач, відсутність переднього положення візка, зупинки візка на шляху до переднього положення, несправність гідромоторів, відстеження маловагових рулонів (менше 8 тон), відсутність положення про розведення головок розмотувача, порив ланцюга гідромотору, неправильне налаштування кінцевих.

3. Ширина металу менше 1150 мм (рис. 1.4).

4. Неправильне розташування рулонів по висоті.



**Рисунок 1.4** – Середній час посадки рулону на розмотувач широкої і вузької штаби

На підставі отриманих даних, було запропоновано технічне рішення, яке полягає у встановленні 3-х камер високої роздільної здатності, додаткового світлового обладнання та додаткового монітора на робочому місці оператора, на який і виводитиметься трансляція з камер.

Дане технічне рішення не вимагає значних фінансових і матеріальних витрат, але дасть істотний економічний ефект. Дві камери можуть бути встановлені на головках розмотувача, одна позаду візка на спеціальному штативі. Всі камери повинні бути в захисному коробі, щоб уникнути ризику пошкодження при сході кінцевої ділянки штаби з головок розмотувача. Так само повинна бути передбачена можливість вільного доступу до камер, без витрат значного часу, для того щоб протерти їх від парів емульсії, які летять від першої кліті стану. Світло має бути встановлене з боку оператора, що дозволить отримати більш чітку картину з камери того, що відбувається на розмотувачі, і дозволить вчасно з'ясувати неоптимальність циклу подачі рулону, що виконується.

Все це в цілому дозволить уникнути таких недоліків у роботі, як завороти, посадка рулону на 1 головку розмотувача, допоможе знизити витратний коефіцієнт стану 1680 порулонної прокатки і підвищити його продуктивність.

Виходячи з вищесказаного можна зробити такі висновки: цей захід дозволить звести до мінімуму час перезаправки рулонів, полегшити роботу оператора та підвищити продуктивність неперервного стану холодної прокатки 1680 ПАТ «Запоріжсталь».

## 2 ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА

### 2.1 Виникнення проблеми втрати стійкості рулонами гарячекатаної штаби

**Втрата стійкості рулоном загалом - це просідання рулону.** Даний вид втрати стійкості характеризується тим, що внутрішня утворююча набуває форми овалу. Так само, на внутрішній твірній по лінії контакту рулону з підставкою утворюється закруглений виступ (рис. 2.1). Безпосередньою причиною просідання є рух витків один щодо одного через недостатню силу тертя при низькому міжвітковому тиск у рулоні.



**Рисунок 2.1** – Приклади просідання рулонів

**Втрата стійкості внутрішньої утворюючої рулону – дефект "пташка".** Дефект «пташка» являє собою гострий виступ внутрішньої утворюючої рулону (рис. 2.2). Безпосередня причина втрати стійкості даного виду є перевищення критичної величини тангенціальної напруги на внутрішніх витках.

Найбільш схильний до просідання тонкий та широкий сортамент (0,35 1250 мм). Імовірність просідання > 8 %.





**Рисунок 2.2** – Приклади виникнення дефекту «пташка»

Значний вплив на стійкість рулону має вага рулону. Зі зростанням маси рулону зростає ймовірність просідання. Вага просівших змоток в середньому на 0,5 – 2 т більше середньої ваги змотування.

Значний вплив на просідання рулонів здійснює неплоскостність і різнотовщинність прокатої штаби: чим вони вище, тим вища ймовірність просідання рулонів [12].

Підвищення температури змотування також призводить до підвищення ймовірності просідання рулонів, а підвищення натягіння при змотуванні зменшує вірогідність виникнення цього виду браку.

Для виправлення вищезазначених видів браку необхідно здійснювати додаткове перемотування рулонів.

## **2.2 Охолодження рулону і його вплив на площинність штаби**

Температурне поле остигаючого рулону визначається рішенням рівняння теплопровідності в циліндричних координатах з анізотропними нелінійними коефіцієнтами, поданого у вигляді:

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial r} \left( \lambda_r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\lambda_r}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial}{\partial \varphi} \left( \lambda_m \frac{\partial T}{\partial \varphi} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda_m \frac{\partial T}{\partial z} \right) , \quad (2.1)$$

де  $T$  – температура;  $\tau$  – тимчасова координата;  $c$  і  $\rho$  – теплоємність і щільність матеріалу;  $r$ ,  $\varphi$  і  $z$  – координати по радіусу, по куту повороту і ширині рулону;  $\lambda_m$  і  $\lambda_r$  – коефіцієнт теплопровідності матеріалу штаби та за радіальним напрямком.

Для вирішення рівняння (2.1) необхідно знати початковий розподіл температури в рулоні та умови на межі. Граничні умови визначаються виразом:

$$\lambda_m \frac{\partial T}{\partial n} = \alpha_k (T_{\text{пов}} - T_{\text{ср}}) + \varepsilon \sigma (T_{\text{пов}}^4 - T_{\text{ср}}^4) , \quad (2.2)$$

де  $\alpha_k$  – коефіцієнт теплопередачі конвекцією;  $T_{\text{пов}}$  і  $T_{\text{ср}}$  – температура поверхні рулону та навколишнього середовища;  $\sigma$  – коефіцієнт теплопередачі випромінюванням абсолютно чорного тіла;  $\varepsilon$  – ступінь чорноти.

Початковий розподіл температури в рулоні, як правило, відомий з фактичних вимірів на відвідному рольгангу. Параметри теплоємності, щільності, теплопровідності, ступінь чорноти поверхні та коефіцієнт теплопередачі конвекцією з достатньою точністю визначаються з літературних джерел [7-9].

Алгоритм розрахунку температурного поля та напружено-деформованого стану рулону в процесі охолодження буде наступним:

1. Визначається напружено-деформований стан рулону при змотуванні; знаходяться внутрішні  $r_{ij}^B$  і зовнішні  $r_{ij}^{30B}$  радіуси  $i$ -их витків на  $j$ -их ділянках за шириною та величиною міжвіткових зазорів.

2. Визначається початковий розподіл температури в рулоні на основі відомої температури змотування.

3. На основі відомих міжвіткових зазорів розраховується коефіцієнт теплопровідності у радіальному напрямку; визначаються решта теплофізичних параметрів.

4. Методом кінцевих різниць вирішується рівняння теплопровідності. Розраховується температурне поле через певний час  $\tau$ .

5. Розраховується зміна переміщення на зовнішній  $u_{ij}^{30B}$  і внутрішній  $u_{ij}^B$  поверхнях  $i$ -их витків на  $j$ -их ділянках за шириною і величини міжвиткових зазорів і переходимо на п.3. Розрахунок триває до досягнення рулоном заданої температури, наприклад,  $100^\circ\text{C}$ .

На рис. 2.3 наведено графіки змінення температури витків рулону з часом за розрахунковими даними [13].

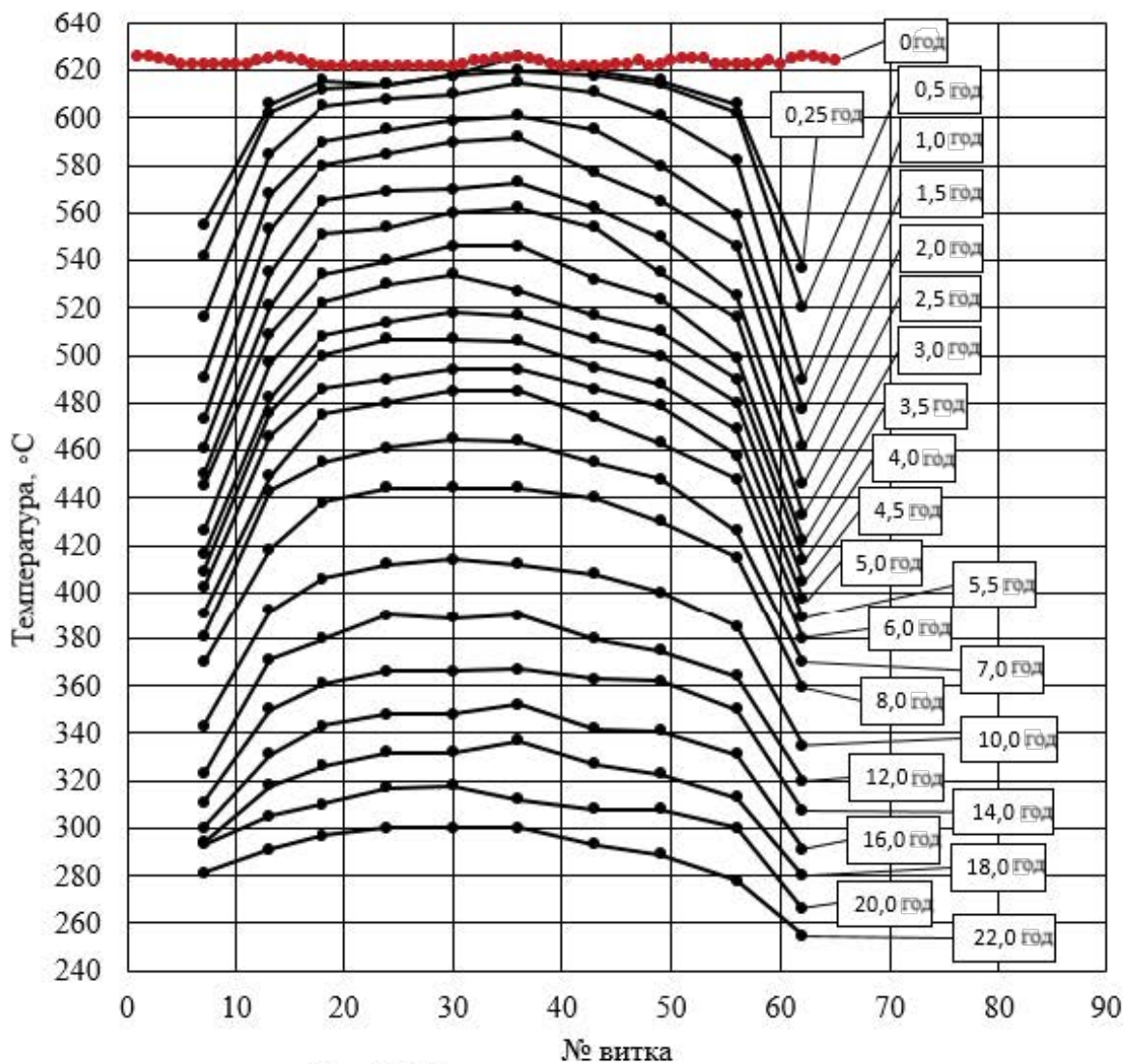


Рисунок 2.3 – Змінення температури рулону з часом

Величина зазору між сусідніми витками залежить від параметрів, що визначають напружено-деформований стан рулону, а саме: опуклість, шорсткість, неплщинність штаби та натягання при змотуванні. У свою чергу величина зазору між витками визначає теплопровідність у радіальному напрямку та як слідство впливає на тепловий стан рулону.

Напружено-деформований стан у процесі охолодження рулону характеризується розподілом тангенціальних напруг на внутрішньому та зовнішньому витках, особливо в точках з максимальною товщиною штаби, в даному випадку – у центрі штаби.

Однак зміна шорсткості майже не впливає на максимальне тангенціальне напруження на зовнішньому витку. Цей ефект пов'язаний із зворотним зв'язком. Зростання шорсткості знижує теплопровідність у радіальному напрямку. Це призводить до більшого градієнта температур і як наслідок збільшення тиску на зовнішніх витках. Тому зниження напруг із зростанням шорсткості штаби компенсується збільшенням напруг через зростання нерівномірності температури перетину рулону.

Неплщинність, що формується на зовнішніх і внутрішніх витках значно відрізняється. Це пояснюється тим, що в процесі змотування та охолодження на зовнішніх та внутрішніх витках діють тангенціальні напруги різного знаку. На зовнішніх витках формується коробоватість, але у внутрішніх витках формується хвилястість. Розглянемо зміну площинності штаби при змотуванні та охолодженні рулону в залежності від різних факторів.

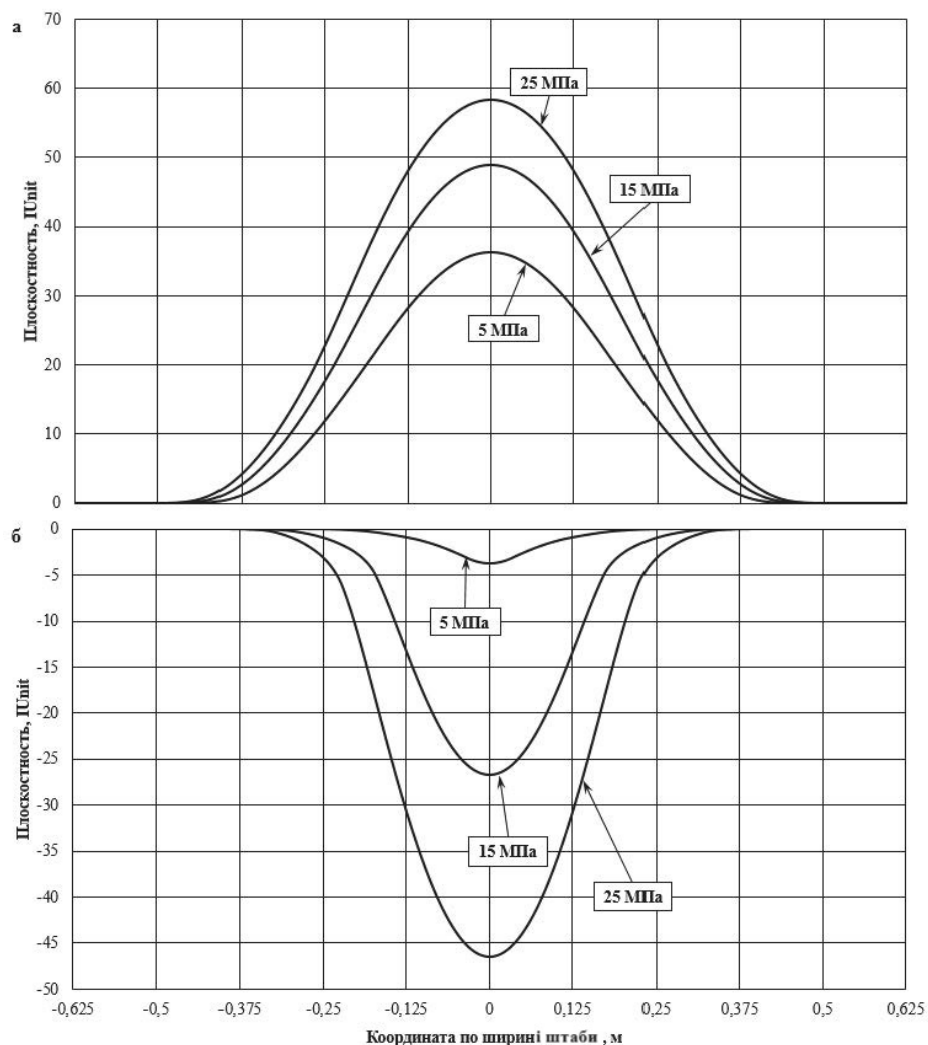
***Натяжіння при змотуванні.*** Вплив величини натяжіння при змотуванні штаби на тепловий стан рулону не такий істотний, як шорсткість, але при цьому однаково є значущим.

Різниця в часі охолодження до 400°C менше години і нерівномірність температури по перетину рулону відрізняється не більше ніж на 10°C. Вплив натяжіння на тепловий стан рулону пов'язаний з тим, що зростання натяжіння

зменшує міжвіткові зазори і як наслідок збільшує коефіцієнт теплопровідності у радіальному напрямку.

Натяжіння штаби при змотуванні має сильний вплив на напружено-деформований стан у процесі охолодження рулону. Зі зростанням натяжіння збільшується і рівень напруження.

Натяжіння дуже інтенсивно впливає на формозміну штаби при змотуванні та охолодженні рулону (рис. 2.4). Зростання натяжіння призводить до зростання площинності штаби і на зовнішньому і внутрішньому витках рулону [14].



**Рисунок 2.4** – Зміна площинності на зовнішньому (а) та внутрішньому (б) витках у процесі охолодження рулону в залежності від натяжіння штаби при змотуванні

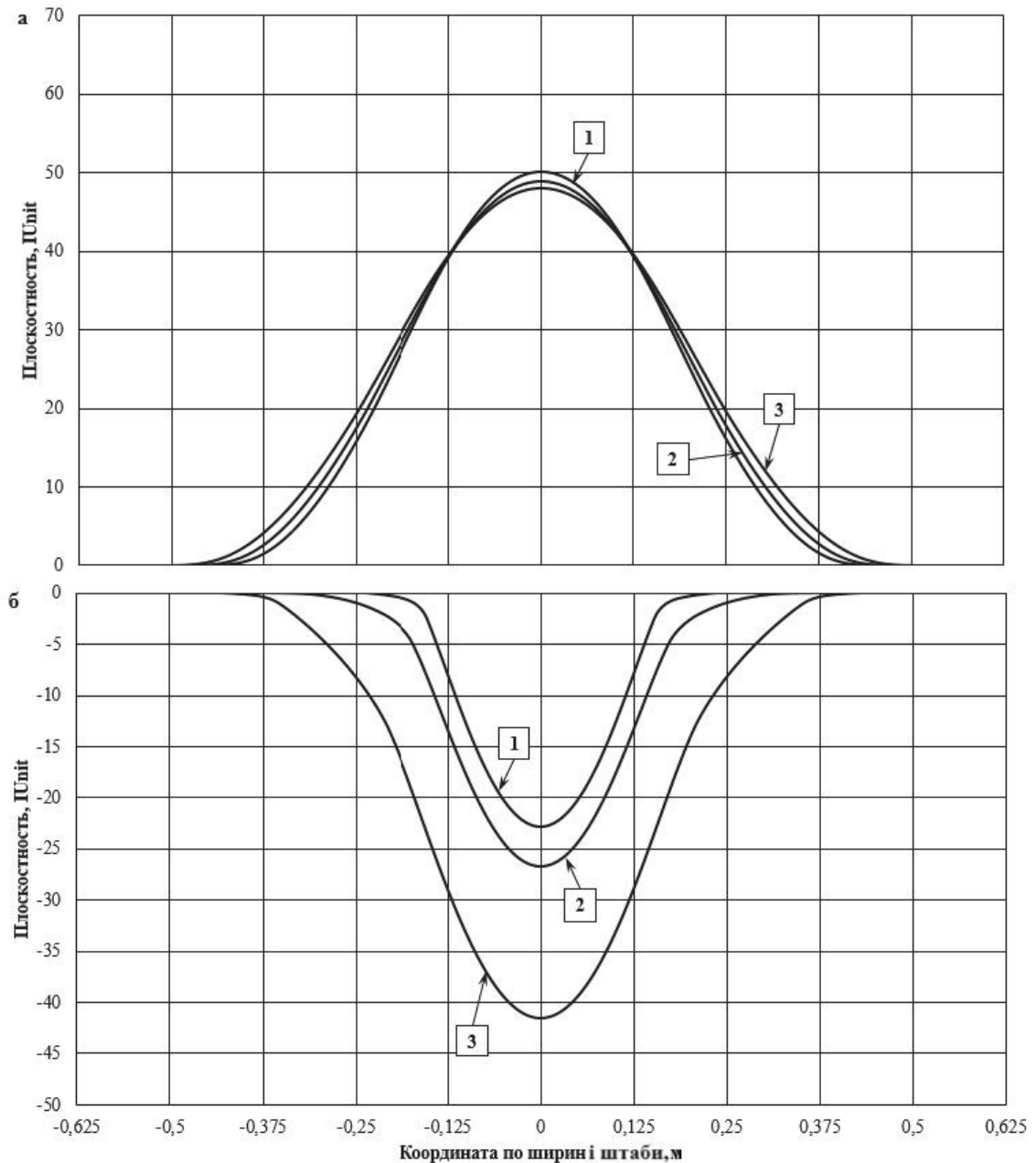
**Неплощинність штаби.** Неплощинність має суттєвий вплив на напружено-деформований стан рулону. Така сильна дія обумовлена тим, що при змотуванні коробуватої штаби внутрішні витки прилягають один до одного значно щільніше, ніж витки рівної чи хвилястої штаби. Поведінка зовнішніх витків залежно від виду неплощинності змотуваної штаби практично не залежить.

Незважаючи на те, що опуклість штаби має сильний вплив на напружено-деформований стан рулону при змотуванні, вплив опуклості штаби на тепловий стан у процесі охолодження рулону можна порівняти з впливом натягіння. Це пов'язано з тим, що зменшення зазору зі зменшенням опуклості поза зони контакту сусідніх витків компенсується зростанням зазору між сусідніми витками в зоні щільного притискання через зменшення міжвиткового тиску. Через це зниження опуклості призводить не тільки до зростання швидкості охолодження (приблизно на 1 годину), а й до зростання нерівномірності температури по перетину рулону (приблизно на 5°C).

Зміна неплощинності штаби забезпечується нерівномірністю діючих тангенціальних напруг по ширині рулону. Через те, що витки щільно прилягають один до одного тільки в центрі рулону, тангенціальні напруги впливають на поздовжню деформацію таким же чином лише в центрі штаби. З розподілу тангенційної напруги по товщині рулону слід, що інтенсивно процес формозміни при змотуванні та охолодженні рулону може протікати досить інтенсивно тільки на зовнішніх та внутрішніх витках. Найбільш повно процес зміни площинності штаби при змотуванні та охолодженні рулону характеризується на зовнішньому та внутрішньому витках.

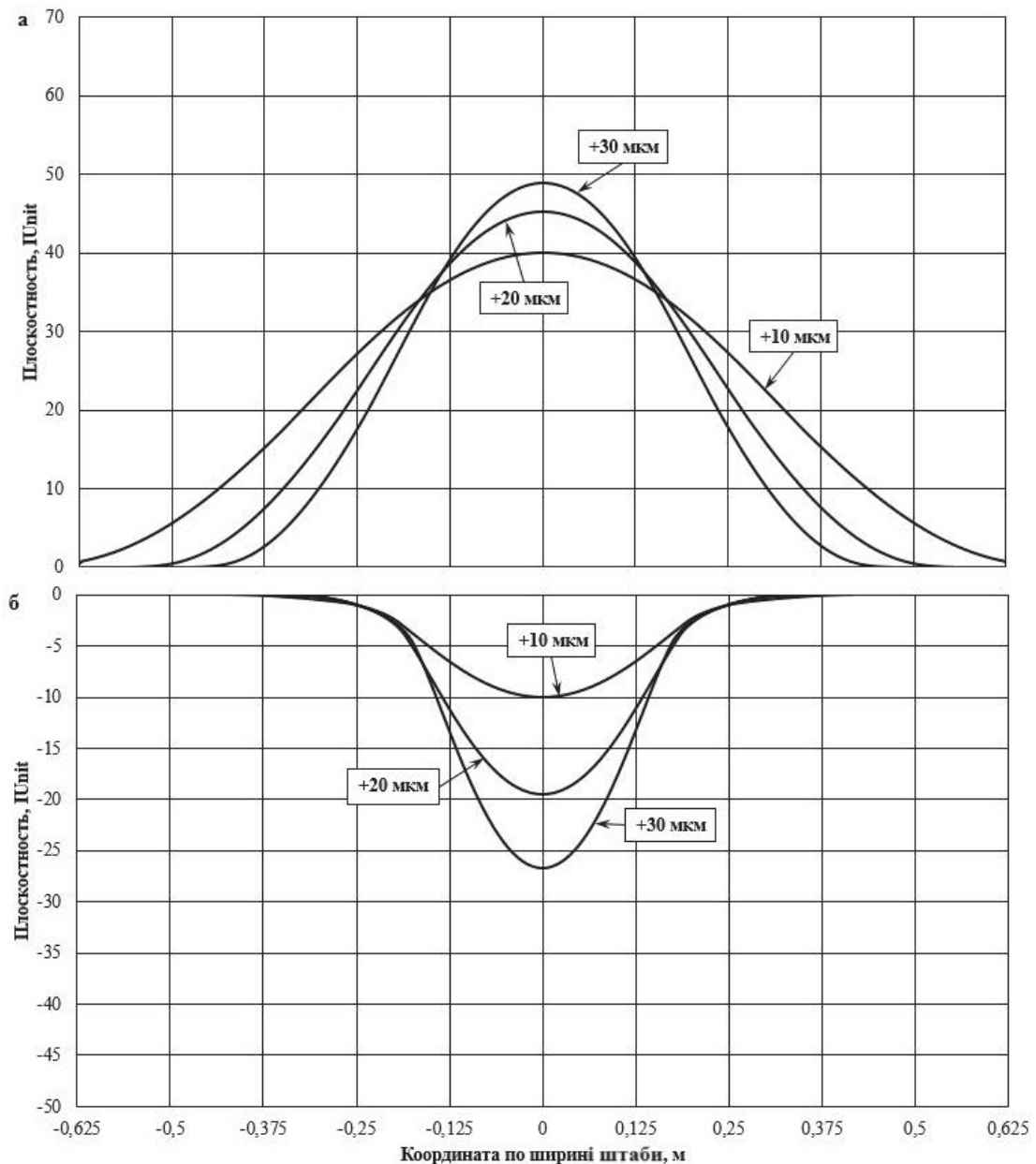
Неплощинність, що формується на зовнішніх і внутрішніх витках значно відрізняється. Це пояснюється тим, що в процесі змотування та охолодження на зовнішніх та внутрішніх витках діють тангенціальні напруження різних знаків. На зовнішніх витках формується коробоватість, а на внутрішніх витках формується хвилястість.

Вплив неплщинності штаби на процес формозмінення при змотуванні та охолодженні представлено на рис. 2.5. Вид неплщинності практично не впливає на процес формозміни на зовнішньому витку. Але на внутрішньому витку коробоватість штаби інтенсифікує процес формозміни.



**Рисунок 2.5** – Зміна площинності на зовнішньому (а) та внутрішньому (б) витках у процесі охолодження рулону в залежності від виду неплщинності штаби при змотуванні: 1 – хвилястість; 2 – рівна штаба; 3 – коробоватість

**Випуклість профілю поперечного перерізу штаби.** За рахунок перерозподілу напруг за шириною, опуклість штаби здійснює сильний вплив на процес формозміни, особливо на зовнішніх витках рулону (рис. 2.6). При зміні опуклості профілю поперечного перерізу штаби з 30 мкм до 10 мкм, коробоватість штаби на зовнішніх витках знижується з 50 IU до 40 IU.



**Рисунок 2.5** – Зміна площинності штаби на зовнішньому (а) та внутрішньому (б) витках у процесі охолодження рулону в залежності від опуклості штаби, що змотується



### 2.3 Перевірка моделі зміни площинності штаби у процесі змотування та охолодження рулону

Розрахунок формозміни штаби при змотуванні та охолодженні рулону здійснюється за наступним алгоритмом [15]:

1. Розраховується напружено-деформований стан рулону при змотуванні.
2. Використовуючи результати розрахунку напружено-деформованого стану, визначаються міжвіткові зазори в рулоні та теплофізичні коефіцієнти.
3. Розраховуються зміна теплового стану рулону за заданий проміжок часу.
4. Розраховується зміна напружено-деформованого стану рулону через термічні переміщення у процесі охолодження за заданий проміжок часу.
5. Розраховується величина пластичної деформації за механізмом повзучості за заданий проміжок часу та підсумовується з величиною накопиченої пластичної деформації за механізмом повзучості у попередні проміжки часу.
6. Визначається максимальна температура у рулоні. Якщо температура менше  $400^{\circ}\text{C}$ , то розрахунок закінчується. Якщо максимальна температура в рулоні більше  $400^{\circ}\text{C}$ , то розрахунок повертається до п.2.

Результати розрахунків за моделлю формозміни штаби в процесі змотування та охолодження рулону верифіковані на основі порівняння з вимірюванням неплщинності на багатофункціональному приладі RM-312 і неплщинності в холодному стані. Неоднозначність співвідношення між величинами ІУ та амплітуда/період неплщинності робить кореляційний аналіз кількісних показників виміряних величин неплщинності штаби недостовірним. Тому порівняння проводилося за якісним показником – вид неплщинності.

Вид неплоскостності штаби для вимірювань на багатofункціональному приладі RM-312 визначався за такими пороговими значеннями: хвилястість ( $< -10 \text{ IU}$ ); коробоватість ( $> 10 \text{ IU}$ ); рівна штаба (між  $-10 \text{ IU}$  та  $\leq 10 \text{ IU}$ ). При вимірі площинності в холодному стані штаба вважалася плоскою при амплітуді неплоскостності менше 5 мм.

Порівняння проводилося для 60 штаб завтовшки 1,2 – 1,6 мм, шириною 1280 мм, довжиною від 957 м до 981 м з марки сталі 08Ю на початковій, центральній та кінцевій ділянках. Результати порівняння представлені в таблиці 2.1.

**Таблиця 2.1** – Порівняння вимірювань на приладі RM-312 та результатів розрахунку з неплоскостністю, виміряної в холодному стані

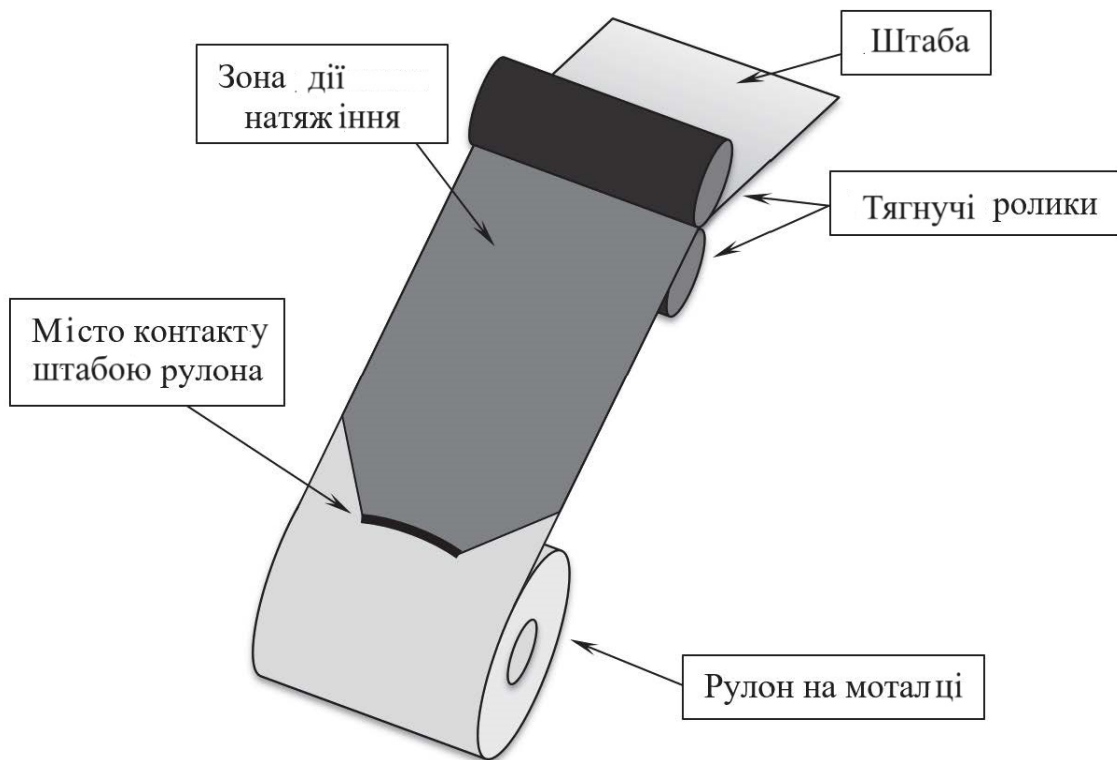
Виміряно у холодному стані	Виміряно на приладі RM-312				Теоретичний розрахунок			
	тип	головна ділянка	центральна ділянка	кінцева ділянка	тип	головна ділянка	центральна ділянка	кінцева ділянка
<b>хвиля</b>	<b>хвиля</b>	<b>41,7%</b>	<b>0,0%</b>	<b>0,0%</b>	<b>хвиля</b>	<b>61,7%</b>	<b>0,0%</b>	<b>0,0%</b>
	рівна	3,3%	0,0%	3,3%	рівна	0,0%	0,0%	0,0%
	короб	16,7%	0,0%	0,0%	короб	0,0%	0,0%	3,3%
<b>рівна</b>	хвиля	0,0%	3,3%	5,0%	хвиля	25,0%	3,3%	0,0%
	<b>рівна</b>	<b>0,0%</b>	<b>21,7%</b>	<b>1,7%</b>	<b>рівна</b>	<b>3,3%</b>	<b>25,0%</b>	<b>1,7%</b>
	короб	33,3%	10,0%	0,0%	короб	5,0%	6,7%	5,0%
<b>короб</b>	хвиля	0,0%	0,0%	8,3%	хвиля	0,0%	0,0%	0,0%
	рівна	0,0%	63,3%	73,3%	рівна	1,7%	63,3%	0,0%
	<b>короб</b>	<b>5,0%</b>	<b>1,7%</b>	<b>8,3%</b>	<b>короб</b>	<b>3,3%</b>	<b>1,7%</b>	<b>90,0%</b>
<b>Усього</b>		<b>46,7%</b>	<b>23,3%</b>	<b>10,0%</b>		<b>68,3%</b>	<b>26,7%</b>	<b>91,7%</b>

Точність на кінцевих ділянках штаби значно вища, ніж у центральній частині. Це пов'язано з тим, що у методиці враховується вплив на площинність прискореного охолодження на відповідному рольгангу. Проте, точність прогнозу площинності на кінцевих ділянках (до 92%) є достатньою для використання її у виробничому процесі.

По краях штаби спостерігається зона нульових напруг, що свідчить про відсутність контакту між витками. Це обумовлено насамперед впливом різновтовщинності (потовщення в середині штаби) на розподіл сили натягу по ширині в процесі змотування.

На моталці формуються різні зовнішні радіуси рулону по ширині. Навіть при рівномірному розподілі натяжіння в тягнучих роликах перед моталкою, в зоні контакту штаби з рулоном виникає нерівномірний розподіл сили натяжіння через різницю лінійних швидкостей на зовнішній поверхні. Також слід зазначити, що через складання різнотовщинності вже намотаних витків, навіть з урахуванням пружної радіальної деформації, на зовнішніх витках натяг менше критерію щільного змотування  $T < T_{пз}$ .

Схематично процес змотування штаби з поперечною різнотовщинністю представлений на рис. 2.6.



**Рисунок 2.6** - Схема дії натяжіння у разі змотування штаби з чечевицеподібним профілем поперечного перетину

## 3 МЕХАНІЧНА ЧАСТИНА

### 3.1 Листоправильні машини. Призначення і класифікація листоправильних машин

Листоправильні багатороликові машини поділяються на дві групи: з паралельним розташуванням роликів і з похилим. На перших здійснюють правку товстих ( $>12$  мм) і в деяких випадках попередню правку тонких листів. На других правку тонких листів і штаби (до 4 мм).

На машині з паралельним розташуванням роликів лист прогинається однаково під всіма роликами. В машині з похилими роликами між першими роликами лист отримує найбільший прогин; далі, по мірі просування листа, прогин його зменшується і в останніх роликах кривизна (коробоватість, хвилястість) повністю виправляється - у цьому полягає перевага правки листів (штаби) на цих машинах порівняно з виправленням на машинах із паралельним розташуванням роликів.

Основними параметрами листоправильних багатороликових машин є: діаметр роликів  $D$ , крок роликів  $t$ ; кількість роликів  $n$ ; довжина бочки роликів  $L$  і товщина листів  $h$ , що піддаються виправленню на цій машині [4].

Діаметр і крок роликів обумовлюють якість правки і зусилля на ролики правильної машини. Занадто великі крок і діаметр роликів не забезпечують необхідної точності правки, а при зменшенні  $t$  і  $D$  збільшується тиск на ролики і ускладняється конструкція машини [16].

Теорія визначення оптимальних величин кроку і діаметра роликів ще недостатньо розроблена, тому їх значення вибирають на підставі практичних даних залежно від товщини і ширини листів, що піддаються правці на цій машині. Крок роликів зазвичай приймають рівним  $t = 1,1D$ .

Точність правки обумовлена також числом роликів в одній машині: чим більше роликів, тим краще якість правки. Зазвичай для правки листів

товщиною більше 4 мм беруть 9-11 роликів, а при правці тонких листів - 13-17 роликів (в деяких випадках для особливо якісної правки 19-23 ролика).

Швидкість правки вибирають в залежності від продуктивності машини і товщини листів. На підставі практичних даних можна приймати наступні значення швидкості правки, м/с: для тонких листів (0,5-4 мм) 6-0,5; для товстих листів (4-30 мм) при холодній правці 0,5-0,1 і при гарячій правці 1,0-0,3.

Якість правки залежить також від якості поверхні робочих роликів і ступенях зносу. Так як при холодній правці знос роликів залежить від контактних напруг, то ці напруги не повинні бути занадто великими. Орієнтовно їх можна визначити за формулою Герца, припускаючи, що упругодеформуючий ролик (циліндр) радіусом  $R$  і довжиною бочки  $L$  лежить на нестискаємій площині (лист) та навантажений силою  $P$ .

$$\sigma_{\text{конт}} = 0,58\sqrt{PE/(bR)} < 2\sigma_T \quad (3.1)$$

де  $b$  - ширина листа;  $R$  - радіус ролика;  $E$  - модуль пружності матеріалу ролика;  $\sigma_T$  - границя текучості матеріалу листа, який піддається правці;  $P$  - максимальний тиск на ролик [5].

Підрахована за цією формулою максимальна контактна напруга не повинна перевищувати подвійної границі текучості штаби.

Для підвищення жорсткості листопривальної машини і досягнення високої якості і точності правки робочі ролики опираються на опорні ролики. Діаметр опорних роликів приймається рівним або більше діаметра робочих роликів. Довжина бочки робочих роликів визначається максимальною шириною листів, що виправляються. Довжина бочки опорних роликів визначається конструктивно в залежності від їх числа по довжині бочки робочих роликів [17].

Робочі й опорні ролики виготовляють з легованої сталі марок 9Х, ШХ15 і 12ХН2А (остання для роликів діаметром 90 - 100 мм), що має велику міцність, високу твердість і підвищений опір зносу. Бочки роликів піддають поверхневому гартуванню струмами промислової або високої частоти до

твердості 55-65 HRC. Ролики для гарячої правки виготовляють із середньовуглецевої сталі і наплавляють їх твердим сплавом (типу сормайт).

При виборі основних параметрів листопробивальних машин слід керуватися відповідними таблицями (нормальями), складеними ВНДІМетмашем і заводами - виготовлювачами цих машин СКМЗ і НКМЗ.

*Згинальні моменти, необхідні для правки штаби.*

Процес правки на багатороликових пробивальних машинах заснований на пружно - пластичному вигині штаби, яка рухається між роликками, які розташовані в шаховому порядку.

Для вигину штаби до неї треба докласти такий зовнішній згинаючий момент, який подолає би момент внутрішніх сил, що виникають внаслідок появи в полосі внутрішніх напружень протилежного знаку.

Коли між двома роликками лист згинається третім роликком, то можливі наступні три випадки розподілу внутрішніх напружень: 1) при пружному вигині; 2) при пластичному вигині; 3) при пружно - пластичному вигині.

1. Пружній вигин штаби - зовнішні шари металу стискаються (розтягуються), в нейтральному перетині деформація і напруження дорівнюють нулю. При вигині листа його нейтральний шар залишається тією ж довжиною  $dx$ , але при цьому внутрішні волокна стиснуться, а зовнішні розтягнуться. Подовження зовнішнього волокна підраховуємо так: до вигину листа  $AB = dx$ ; після вигину і придбання листом кривизни радіусом  $\rho$  довжина елемента  $dx$  з нейтрального перетину залишиться тією ж і її можна представити так:  $dx = \rho d\alpha$ . Довжина зовнішнього волокна буде більше  $dx$  і буде дорівнювати довжині дуги кола, що має радіус  $\rho + h/2$ , тобто

$$A_1B_1 = (\rho + h/2) d\alpha \quad (3.2)$$

Абсолютне подовження зовнішнього волокна:

$$\Delta l = A_1B_1 - AB = (\rho + h/2) d\alpha - \rho d\alpha = (h/2) d\alpha. \quad (3.3)$$

Відносною деформацією зовнішнього волокна (відносним подовженням) називається відношення абсолютної деформації до початкової довжини волокна  $\varepsilon = \Delta l / dx$ . Підставляючи значення  $\Delta l$  і  $dx$ , отримаємо

$$\varepsilon = \frac{(h/2)d\alpha}{\rho d\alpha} = h/2\rho \quad (3.4)$$

З теорії пружного вигину відомо, що, відповідно до закону Гука, відносна деформація дорівнює напрузі в матеріалі, поділеній на модуль пружності, тобто  $\varepsilon = \sigma / E$ . При виправленні матеріалу в поверхневому шарі його виникають напруги, які дорівнюють границі текучості, тому останній вираз буде мати вигляд  $\varepsilon_T = \sigma_T / E$  і формулу можна написати так:

$$h/2\rho = \sigma_T / E \quad (3.5)$$

звідки

$$\rho = h/2 \cdot E / \sigma_T \quad (3.6)$$

З цього рівняння випливає, що чим менше товщина листа, тим менший радіус згину треба повідомити листу, тобто тим глибше повинен бути прогин листа під роликом. Іншими словами, чим тонше лист, тим менше повинен бути діаметр роликів і крок їх ( $2=1,05 - 1,10$ ).

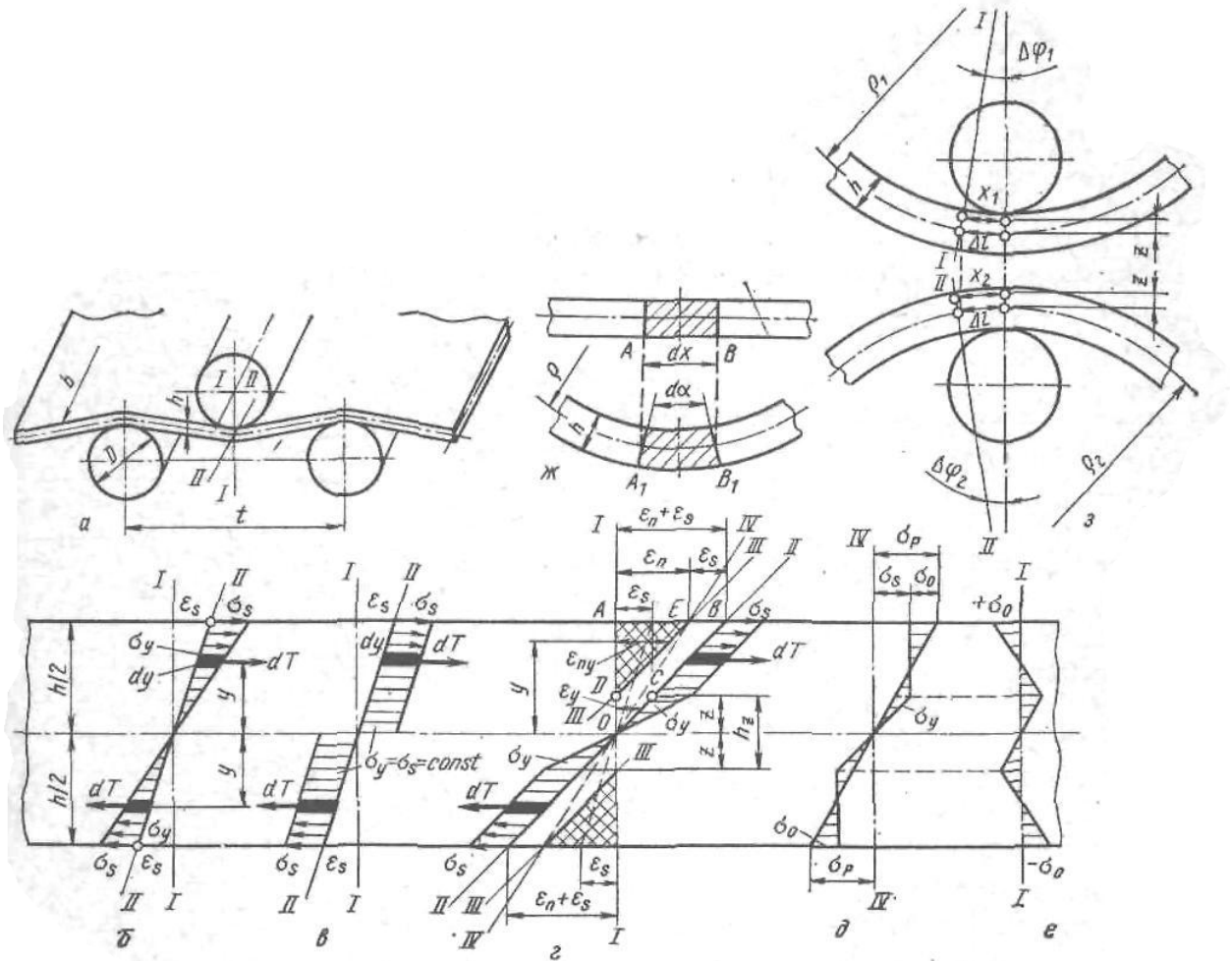
З формули також випливає, що чим більше границя текучості (модуль пружності для всіх марок сталі практично однаковий і дорівнює  $E=2,1 \cdot 10^5$  МПа), тим менший радіус згину треба давати листу при виправленні, тобто тим менше повинен бути крок роликів [6].

Таким чином, правку листів з найбільш міцних марок сталі треба виробляти на машинах, що мають велику кількість роликів (17 - 29) і невеликий крок їх розташування [18].

Візьмемо нескінченно малий шар металу  $dy$  (рис. 3.1) по товщині штаби на відстані  $y$  середнього нейтрального перетину. Елементарна площа цього шару дорівнює  $b dy$ , де  $b$  - ширина згинальної штаби. При пружному вигині в цьому перетині є напруга  $\sigma_y$  і на площадку діє сила, яка дорівнює  $dT = \sigma_y dF = \sigma_y b dy$ . Ця сила відносно середньої нейтральної осі складає елементарний

момент, який дорівнює  $dM = dTy = \sigma_y b y \cdot dy$ . Підсумовуючи (інтегруючи) всі елементарні моменти, що діють по висоті штаби отримаємо пружний момент внутрішніх сил:

$$M_y = 2b \int_0^{h/2} \sigma_y y dy \quad (3.7)$$



**Рисунок 3.1** – Схеми напруг і деформацій при правці штаби знакозмінним згином

Напругу  $\sigma_y$  можна виразити через напругу в поверхневому шарі, яка дорівнює межі текучості  $\sigma_T$ . Так як напруги розподіляються по прямій лінії, що проходить через нейтральний перетин, то справедливе співвідношення подібних трикутників:

$$\sigma_y / \sigma_m = \frac{y}{\frac{h}{2}} = 2y/h \quad (3.8)$$



Звідки  $\sigma_y = \frac{\sigma_T 2y}{h}$

Підставляючи значення в попереднє рівняння, отримаємо

$$M_y = 4\sigma_T \frac{b}{h} \int_0^{h/2} y^2 dy \quad (3.9)$$

Так як  $\frac{bh^2}{b} = W_y$  момент опору перетину штаби при пружному вигині щодо нейтральної осі, то отримаємо відомий вираз моменту вигину штаби прямокутного перетину:

$$M_y = \sigma_T W_y \quad (3.10)$$

Таким чином, момент пружного вигину пропорційний квадрату товщини штаби, тобто при збільшенні товщини штаби в два рази момент, необхідний для її вигину, збільшується в чотири рази. Так як деформація при вигині пружна (конвертована), то після зняття навантаження (наприклад, після підйому середнього ролика) полоса візьме свою первісну форму і перетин  $II - II$  знову зміститься з перетином  $I - I$ .

2. Пластичний вигин - напруги в металі по всьому перетину рівні границі текучості та після вигину матеріал отримує залишкову деформацію. Підставляючи значення  $\sigma_u$  в рівняння, отримаємо

$$M_n = 2\sigma_m b \int_0^{h/2} y dy = \sigma_T \frac{bh^2}{4} \quad (3.11)$$

Вираз  $\frac{bh^2}{4}$  за аналогією з  $W_y$  при пружному вигині називається пластичним моментом опору перетину щодо нейтральної осі.

Відношення моментів вигину і моментів опору при пластичному та пружному вигині для штаби прямокутного перетину дорівнює

$$\frac{M_n}{M_y} = \frac{W_n}{W_y} = 3/2 \quad (3.12)$$

Таким чином, момент внутрішніх сил при пластичному вигині штаби прямокутного перетину в 1,5 рази більше максимального моменту при пружному вигині.

3. Пружно - пластичний вигин . Пластична (залишкова) деформація не проникає наскрізь через всю товщину штаби: поверхневі шари деформуються пластично (напруга постійна і дорівнює границі текучості  $\sigma_T$ ), а внутрішні пружно. Правка металу на правильних машинах відбувається саме за цією схемою пружно-пластичного вигину.

Границя між пружною і пластичною зонами знаходиться на деякій відстані  $z$  від нейтральної осі.

При виправленні штаби не може бути чисто пластичного вигину  $\sigma_y = \sigma_T = \text{const}$  по всьому перетину (що можливо тільки при пластичному розтягуванні), так як при будь-якому нахилі перетину  $II - II$  до нейтральної осі (виключаючи як нереальний випадок, коли цей кут дорівнює нулю) існує пружне ядро перетину, в якому напруги дотримуються закону Гука (по прямій лінії) і досягають максимуму  $\sigma_y = \sigma_T$  тільки на границі між пружною і пластичною зонами перетину [19].

Для орієнтовного судження можна прийняти, що при самій інтенсивній деформації викривленої штаби першим активним роликком (другим по порядку розташування в машині), радіуси кривизни дорівнюють  $\rho_1 = \rho_2 = R$  тобто що полоса огинає ролик [7].

При застосовуванні на практиці значеннях  $R = (50 \div 100) h$  отримаємо

$$k_n = 1 - (50 - 100) \sigma_m / E \quad (3.13)$$

Для випадку правки штаби, яка характеризується  $\sigma_T = 550$  МПа і  $E = 2,15 \cdot 10^5$  МПа, отримаємо  $k_{\text{пmax}} = 0,87 - 0,75$ . Однак такий випадок практично неможливий, оскільки при виправленні на листопрямильних машинах полоса не може повністю огинати ролик. Якщо прийняти  $\rho_1 = \rho_2 = (2 - 3)R$ , що більш реально, то отримаємо  $k_{\text{пmax}} = 0,75 - 0,26$ .

При виправленні м'яких матеріалів  $k_{\text{п}}$  може мати верхню границю, а при виправленні високоміцних матеріалів - нижня границя вище зазначених значень.

Правильну машину зазвичай налаштовують таким чином, що найбільша правка (деформація) штаби здійснюється лише кількома першими роликами, а решта роликів (великим їх числом) повідомляють полосі поступово деформацію, що зменшується з метою отримання суворої прямолінійності. Практично це досягається переміщенням верхньої траверси з роликами і регулюванням висоти окремих роликів.

Для отримання більш простих розрахункових формул із достатньою точністю можна прийняти, що ступінь пластичної деформації поверхневих шарів штаби від другого ролика до передостаннього (перший і останній ролики не згинають штаби) змінюється за прямолінійним законом згідно рівняння

$$\kappa_{ni} = \kappa_2 \left(1 - \frac{i-2}{n-3}\right) \quad (3.14)$$

де  $\kappa_2$  - максимальне значення під другим роликом;  $n$  - число роликів в машині;  $i$  - порядковий номер ролика. При  $i = 2$  величина  $\kappa_{ni} = \kappa_2 = \kappa_{\text{пmax}}$ , при  $i = n - 1$   $\kappa_{ni} = 0$  (на передостанньому ролику) [8].

Момент внутрішніх сил під час пружно-пластичного вигину буде складатися з двох складових, відповідних внутрішній пружній зоні висотою:

$$2 \left( \frac{h}{2} - z \right) = h - 2z = h - h_z$$

$$M_{yn} = \sigma_T \frac{bh_z^2}{6} + \sigma_T b \left( \frac{h^2 - h_z^2}{4} \right) = \sigma_T \left( W_n - \frac{1}{2W_z} \right) \quad (3.15)$$

де  $W_z = bh_z^2/6$  - момент опору внутрішньої пружної частини перерізу висотою  $h_z = 2z$ . Відношення моментів опору при пружно-пластичному і чистому пружному вигині штаби

$$\frac{M_{yn}}{M_y} = \frac{W_n - 1/2W_z}{W_y} = 3/2 \left[ 1 - 1/3 \left( \frac{h_z}{h} \right)^2 \right] \quad (3.16)$$

При  $h_z = 0$  це відношення дорівнює 1,5 як для пластичного моменту. При  $h_z = h$  це відношення дорівнює одиниці. Таким чином

$$\frac{M_{ny}}{M_y} = 1 - 1,5,$$

тобто момент пластичного вигину більше максимального моменту пружного вигину і менше моменту пластичного вигину  $M_n > M_{yn} > M_y$ , тобто

$$2z = h_z = h(1 - k_n), \frac{h_z}{h} = 1 - k_n \quad (3.17)$$

Підставляючи останнє значення у рівняння, отримаємо формулу для визначення пружно - пластичного згинального моменту при вигині одним  $i$  - тим роликом:

$$M_{n.yi} = \frac{3}{2} M_y \left[ 1 - \frac{(1-k_n)^2}{3} \right] = M_y \left[ 1 + k_{ni} \left( 1 - \frac{k_{ni}}{2} \right) \right] = M_y (1 + k'_{ni}) \quad (3.18)$$

де  $k'_{ni} = k_{ni} \left( 1 - \frac{k_{ni}}{2} \right)$  - коефіцієнт пружно - пластичного вигину штаби одним  $i$  - тим роликом.

### 3.2 Багатороликові листопрямильні машини

У багатороликових листопрямильних машинах правка непощинності штаби здійснюється між двома рядами робочих роликів, причому ролики одного ряду розміщені у шаховому порядку по відношенню до роликів другого ряду.

Просвіт між верхніми і нижніми рядами робочих роликів регулюється і встановлюється дещо меншим товщини листа, що підлягає правці. Лист захоплюється обертанням робочих роликів і отримує при проходженні між роликами багатократні перегини, що знакомірно чергуються з напруженнями, що перевищують межу течії металу. Після правки більш витягнуті ділянки листа отримують пластичну деформацію стискання, а менш витягнуті – деформацію розтягнення. Тому поздовжня довжина по різному обтиснених при гарячому прокатуванні ділянок листа вирівнюються площинність поверхні листа покращується.

Для більш точної правки хвилястості і коробоватості поверхні листів у деяких листоправильних машинах застосовують спеціальні упори для вигину осі робочих роликів, утворюючих нерівномірний прогин листа при правці. Більш значному прогину наражаються менш витягнуті ділянки листа.

Багатороликові машини за розміщенням роликів і принципу регулювання їх положення виконуються двох типів – з *паралельними і непаралельними рядами роликів*.

В машинах з паралельними рядами роликів встановлюється прогин листа по висоті, а крайні ролики мають індивідуальне регулювання: переднього ролика – для більш зручного заведення листа у робочі ролики і заднього ролика – для забезпечення площинності листа після правки.

В машинах з непаралельними рядами роликів один ряд роликів має подвійне регулювання – за висотою і куту нахилу. Відстань між рядами роликів поступово збільшується до вихідної сторони.

В реальній ситуації металургійні заводи самі не конструюють листоправильні машини, а закупають їх у закордонних або вітчизняних виробників. Потужність електродвигунів приводів листоправильних машин, що поставляються, задана виробником у технічних умовах. Тому основна задача технології правки листа полягає у тому, щоб розрахувати оптимальні режими обтиснення листової заготовки робочими роликами листоправильних машин (як правило, закордонні виробники не повідомляють їх покупцю, який вимушений підбирати їх методом проб і помилок) таким чином, щоб на виході з машини лист мав мінімальні залишкові напруження і кривизну.

### 3.3 Правка сталевго листа на чотирироликовій листоправильній машині

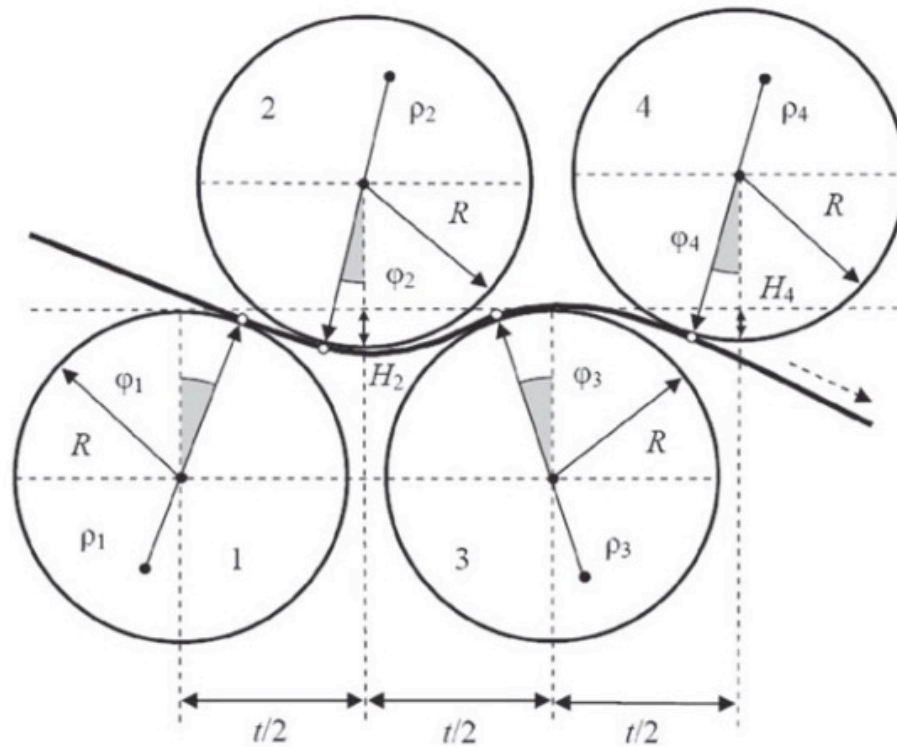
Складемо рівняння для коефіцієнтів кубічних поліномів, кривизни і радіусів кривизни нейтральної лінії листа у точках його торкання з роликами (рис. 3.2) [7].

*Перший і другий ролики:*

$$\begin{aligned}
 z_2 &= \left( \frac{t}{2} - R \sin \varphi_1 - R \sin \varphi_2 \right) \cos \varphi_1 + \\
 &+ [H_2 - R(1 - \cos \varphi_1) - R(1 - \cos \varphi_2)] \sin \varphi_1, \\
 y_2 &= - \left( \frac{t}{2} - R \sin \varphi_1 - R \sin \varphi_2 \right) \sin \varphi_1 + \\
 &+ [H_2 - R(1 - \cos \varphi_1) - R(1 - \cos \varphi_2)] \cos \varphi_1, \\
 a_1 &= \frac{3y_2 + \operatorname{tg}(\varphi_1 - \varphi_2)z_2}{z_2^2}, \quad b_1 = \frac{2y_2 + \operatorname{tg}(\varphi_1 - \varphi_2)z_2}{z_2^3}, \\
 \epsilon_{12} &= 2a_1, \quad \rho_{12} = \frac{1}{2a_1}, \quad \epsilon_{21} = \frac{2a_1 - 6b_1z_2}{\left[ 1 + (2a_1z_2 - 3b_1z_2^2)^2 \right]^{\frac{3}{2}}}, \quad \rho_{21} = \frac{1}{\epsilon_{21}}.
 \end{aligned}$$

*Другий і третій ролики:*

$$\begin{aligned}
 z_3 &= \left( \frac{t}{2} + R \sin \varphi_2 - R \sin \varphi_3 \right) \cos \varphi_2 + \\
 &+ [H_2 - R(1 - \cos \varphi_2) - R(1 - \cos \varphi_3)] \sin \varphi_2, \\
 y_3 &= - \left( \frac{t}{2} + R \sin \varphi_2 - R \sin \varphi_3 \right) \sin \varphi_2 + \\
 &+ [H_2 - R(1 - \cos \varphi_2) - R(1 - \cos \varphi_3)] \cos \varphi_2, \\
 a_2 &= \frac{3y_3 - \operatorname{tg}(\varphi_2 + \varphi_3)z_3}{z_3^2}, \quad b_2 = \frac{2y_3 - \operatorname{tg}(\varphi_2 + \varphi_3)z_3}{z_3^3},
 \end{aligned}$$



**Рисунок 3.2** – Схема до розрахунку кривизни і радіусів кривизни нейтральної лінії листа у точках його торкання з роликми чотирироlikової листопрilвної машини

$$\epsilon_{23} = 2a_2, \quad \rho_{23} = \frac{1}{2a_2}, \quad \epsilon_{32} = \frac{2a_2 - 6b_2z_3}{\left[1 + (2a_2z_3 - 3b_2z_3^2)^2\right]^{\frac{3}{2}}}, \quad \rho_{32} = \frac{1}{\epsilon_{32}}.$$

*Третій і четвертий ролики:*

$$z_4 = \left(\frac{t}{2} + R \sin \varphi_3 - R \sin \varphi_4\right) \cos \varphi_3 + \\ + \left[H_4 - R(1 - \cos \varphi_3) - R(1 - \cos \varphi_4)\right] \sin \varphi_3, \\ y_4 = -\left(\frac{t}{2} + R \sin \varphi_3 - R \sin \varphi_4\right) \sin \varphi_3 + \\ + \left[H_4 - R(1 - \cos \varphi_3) - R(1 - \cos \varphi_4)\right] \cos \varphi_3,$$

$$a_3 = \frac{3y_4 - \operatorname{tg}(\varphi_3 + \varphi_4)z_4}{z_4^2}, \quad b_3 = \frac{2y_4 - \operatorname{tg}(\varphi_3 + \varphi_4)z_4}{z_4^3},$$

$$\varepsilon_{34} = 2a_3, \quad \rho_{34} = \frac{1}{2a_3}, \quad \varepsilon_{43} = \frac{2a_3 - 6b_3z_4}{\left[1 + (2a_3z_4 - 3b_3z_4^2)^2\right]^{\frac{3}{2}}}, \quad \rho_{43} = \frac{1}{\varepsilon_{43}}.$$

Граничні умови задачі мають вигляд:

$$\rho_{12} = \rho_1, \quad \rho_{21} = -\rho_{23}, \quad \rho_{32} = -\rho_{34}, \quad \rho_{43} = \beta(\rho_{34})\rho_{34}.$$

Коефіцієнт пружинення нейтральної лінії листа при радіусі кривизни  $\rho$  дорівнює

$$\beta(\rho) = \frac{1}{1 - \left[ 3 \left( \frac{\rho \sigma_T}{h E} \right) - 4 \left( \frac{\rho \sigma_T}{h E} \right)^3 + \frac{(\Pi_p + \Pi_c)}{2E} \left( 1 - 3 \left( \frac{\rho \sigma_T}{h E} \right) + 4 \left( \frac{\rho \sigma_T}{h E} \right)^3 \right) \right]}.$$

Згинальний момент у поперечному перетині листа дорівнює:

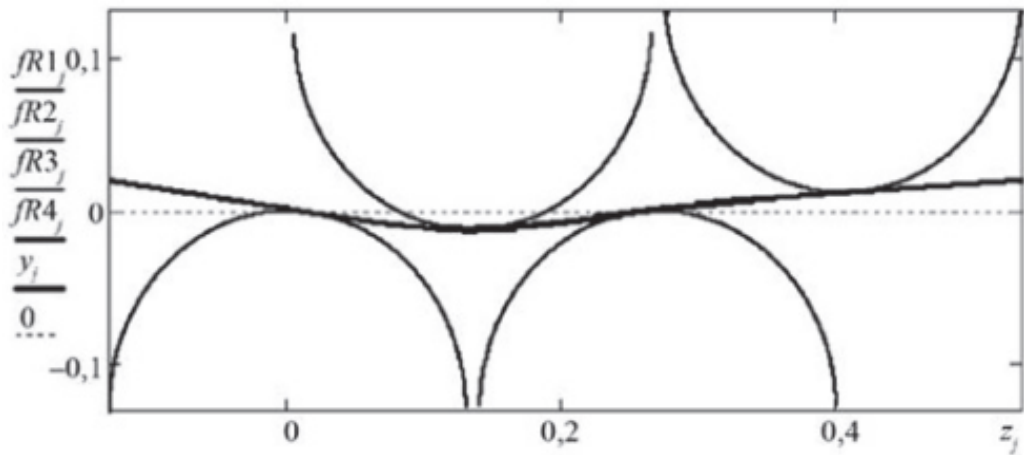
$$M(\rho) = \frac{bh^2\sigma_T}{4} - \frac{b\rho^2\sigma_T^3}{3E^2} + \frac{b(\Pi_p + \Pi_c)}{6\rho} \left( \frac{h}{2} - \frac{\sigma_T\rho}{E} \right)^2 \left( h + \frac{\sigma_T\rho}{E} \right).$$

Вирішуючи систему рівнянь при  $t = 0,27$  м,  $R = 0,125$  м,  $h = 0,01$  м,  $E = 2 \cdot 10^{11}$  Па,  $\sigma_T = 500 \cdot 10^6$  Па,  $H_2 = 0,012$  м,  $H_4 = -0,012$  м,  $\rho_1 = \infty$  м, отримуємо:  $\rho_2 = 0,406$  м,  $\rho_3 = 1,605$  м,  $\rho_4 = 29,538$  м,  $\varphi_1 = 8,06^\circ$ ,  $\varphi_2 = -0,49^\circ$ ,  $\varphi_3 = 6,69^\circ$ ,  $\varphi_4 = -3,70^\circ$  (рис. 3.3).

### 3.4 Згинання сталевго листа на трироликовій згинальній машині

Складемо рівняння для коефіцієнтів кубічних поліномів, кривизни і радіусів кривизни нейтральної лінії листа у точках його торкання з роликками (рис. 3.4) [17].

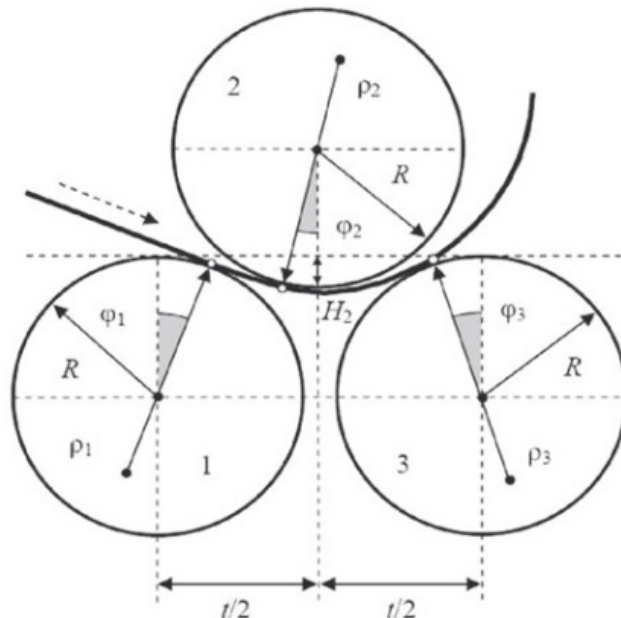




**Рисунок 3.3** – Результати розрахунку кривизни і радіусів кривизни нейтральної лінії листа у точках його торкання з роликми чотирироlikової листоправильної машини

*Перший і другий ролики:*

$$z_2 = \left( \frac{t}{2} - R \sin \varphi_1 - R \sin \varphi_2 \right) \cos \varphi_1 + \\ + [H_2 - R(1 - \cos \varphi_1) - R(1 - \cos \varphi_2)] \sin \varphi_1,$$



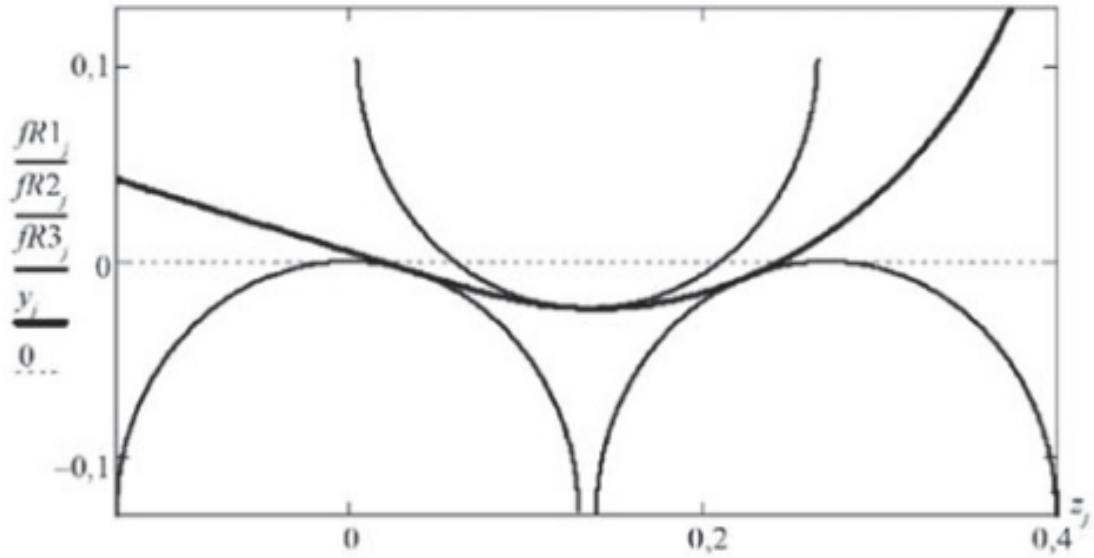
**Рисунок 3.4** – Схема до розрахунку кривизни і радіусів кривизни нейтральної лінії листа у точках його торкання з роликми трироlikової згинальної машини

$$\begin{aligned}
y_2 &= -\left(\frac{t}{2} - R \sin \varphi_1 - R \sin \varphi_2\right) \sin \varphi_1 + \\
&+ [H_2 - R(1 - \cos \varphi_1) - R(1 - \cos \varphi_2)] \cos \varphi_1, \\
a_1 &= \frac{3y_2 + \operatorname{tg}(\varphi_1 - \varphi_2)z_2}{z_2^2}, \quad b_1 = \frac{2y_2 + \operatorname{tg}(\varphi_1 - \varphi_2)z_2}{z_2^3}, \\
\varepsilon_{12} &= 2a_1, \quad \rho_{12} = \frac{1}{2a_1}, \quad \varepsilon_{21} = \frac{2a_1 - 6b_1z_2}{\left[1 + (2a_1z_2 - 3b_1z_2^2)^2\right]^{\frac{3}{2}}}, \quad \rho_{21} = \frac{1}{\varepsilon_{21}}.
\end{aligned}$$

*Другий і третій ролики:*

$$\begin{aligned}
z_3 &= \left(\frac{t}{2} + R \sin \varphi_2 - R \sin \varphi_3\right) \cos \varphi_2 + \\
&+ [H_2 - R(1 - \cos \varphi_2) - R(1 - \cos \varphi_3)] \sin \varphi_2, \\
y_3 &= -\left(\frac{t}{2} + R \sin \varphi_2 - R \sin \varphi_3\right) \sin \varphi_2 + \\
&+ [H_2 - R(1 - \cos \varphi_2) - R(1 - \cos \varphi_3)] \cos \varphi_2, \\
a_2 &= \frac{3y_3 - \operatorname{tg}(\varphi_2 + \varphi_3)z_3}{z_3^2}, \quad b_2 = \frac{2y_3 - \operatorname{tg}(\varphi_2 + \varphi_3)z_3}{z_3^3}, \\
\varepsilon_{23} &= 2a_2, \quad \rho_{23} = \frac{1}{2a_2}, \quad \varepsilon_{32} = \frac{2a_2 - 6b_2z_3}{\left[1 + (2a_2z_3 - 3b_2z_3^2)^2\right]^{\frac{3}{2}}}, \quad \rho_{32} = \frac{1}{\varepsilon_{32}}.
\end{aligned}$$

Вирішуючи систему рівнянь при  $t = 0,27$  м,  $R = 0,125$  м,  $h = 0,01$  м,  $E = 2 \cdot 10^{11}$  Па,  $\nu = 500 \cdot 10^6$  Па,  $H_2 = 0,024$  м і  $\rho_1 = \infty$  м, отримуємо:  $\rho_2 = 0,225$  м,  $\rho_3 = -0,272$  м,  $\varphi_1 = 15,83^\circ$ ,  $\varphi_2 = 3,16^\circ$ ,  $\varphi_3 = 20,63^\circ$  (рис. 3.5).



**Рисунок 3.5** – Результати розрахунку кривизни і радіусів кривизни нейтральної лінії листа у точках його торкання з роликами трироlikової згинальної машини

## **4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ТЕХНОГЕННА БЕЗПЕКА**

### **4.1 Загальні заходи щодо безпеки в прокатному виробництві**

#### **4.1.1 Обслуговування клітей і сполучальних частин між ними**

Безпечне обслуговування клітей прокатних станів, їх допоміжного обладнання та пристроїв досягається за дотримання певних умов. Усі частини прокатного стану та їх обладнання повинні бути розташовані так, щоб був безпечний доступ для огляду та ремонту їх, а під час роботи повністю виключалася б можливість зіткнення робітника з частинами обладнання, що обертаються. Усі знову споруджувані та існуючі на деяких заводах нереверсивні прокатні стани, крім головної сполучної муфти, забезпечені розчіпною муфтою, що дає можливість при нещасних випадках з людьми, при аваріях, а також при необхідності дрібних виправлень швидко відключити стан від двигуна [20].

При експлуатації прокатних станів можливі наступні види травм: захоплення частин одягу і кінцівок робочими валками або шпинделями, що обертаються, і сполучними муфтами, опіки, а також удари осколками металу що відлітають при прокатуванні, і окалини.

Травматизм у прокатних цехах відбувається головним чином на станах старого типу, де прокатка металу здійснюється із застосуванням ручної праці. Тому для ліквідації травматизму при прокатці металу необхідно максимально механізувати і автоматизувати процес прокатки і насамперед завдання металу у валки, а також здійснювати заміну старих станів сучасними.

Щоб уникнути травмування робочих муфтами, що обертаються, і шпинделями, усі сполучні шпинделі, муфти і корінні вали прокатних станів огороджують з боків ґратчастими або суцільними щитами або кожухами, а на

сортових і дротяних станах муфти і корінні вали також огорожуються. На високошвидкісних станах, де виникає небезпека розриву сполучних муфт, запобіжні кожухи повинні бути дуже міцними, щоб витримувати удари шматків муфт, що розірвалися.

Травмування робочих муфтами, що обертаються, або шпинделями має місце головним чином після ремонту, коли огорожувальні щити і кожухи ще не поставлені. Щоб унеможливити пуск стану за відсутності огорож муфт і шпинделів, влаштовують автоблокування, що автоматично відключає стан при відсутності огорожі, встановленої на строго визначеному місці.

Огородження сполучних шпинделів є обов'язковим для всіх прокатних станів, крім блюмінгів та слябінгів, у яких відстань між шпинделями забезпечує безпеку їх обслуговування. Шпинделі цих станів зазвичай огорожують міцним бар'єром і влаштовують майданчики з поручнями для обслуговування. Іноді в прокатних цехах спостерігаються травми через неправильне кріплення розпірок муфт дротом, коли кінці дроту, що стирчать, захоплюють одяг робочих під час роботи поблизу сполучних шпинделів. Тому кріплення розпірок необхідно проводити не дротом, а спеціальними хомутами.

При ручному регулюванні розчину валків натискними гвинтами, пристрої для керування (штурвал) розташовують у безпечному місці - на зовнішній торцевій стороні клітей послідовних і безперервних станів і на передній стороні клітей станів лінійного типу.

Для управління натискними гвинтами застосовують штурвали, так як важелі можуть викликати забиття робочих при втраті самогальмування.

Якщо прокатка металу супроводжується зміною розчину між валками, управління натискними гвинтами має бути електрифіковано.

Осьове налаштування валків при розташуванні болтів з торцевої сторони клітей лінійних станів вимагає особливих запобіжних заходів, оскільки поблизу шпинделів створюються дуже небезпечні умови під час регулювання.

Розрив запобіжних стаканів прокатних станів викликає небезпеку травмування робочих осколками, тому стакани огорожують захисними сталевими кільцями. Висота кілець повинна бути не менше ніж в 1,5 рази більша за висоту запобіжного стакану.

Вільні кінці прокатних валків (трефи) в крайніх клітках ліній стану закривають знімними чохлами або ковпаками, щоб уникнути травмування робітників.

Між прокатними станами та приміщеннями для двигунів має бути обладнана надійно діюча звукова або світлова сигналізація. Пуск в хід і зупинка двигуна проводяться тільки після отримання відповідного сигналу зі стану, причому про пуск двигуна подається суворо встановлений сигнал, який ясно чути на всіх робочих місцях. Встановлені сигнали у всіх випадках, крім аварійних, повинні подаватися тільки старшими робітниками, які несуть відповідальність за сигнали, що подаються.

До подачі сигналу про пуск стану майстер або старший вальцівник зобов'язаний перевірити справність стану та усіх його огорожувальних і запобіжних пристроїв і з'ясувати, чи немає робочого поблизу частин стану, що обертаються. Тільки після перевірки стану та видалення людей з небезпечних місць може бути дано сигнал про запуск двигунів.

При обертанні валків за допомогою електричних двигунів на робочих місцях стану повинні бути влаштовані аварійні вимикачі.

Для переходу людей через головний сполучний вал кожної лінії прокатних станів влаштовують перехідні містки, захищені від потрапляння гарячого металу суцільними бар'єрами. На безперервних станах замість окремих містків через сполучні вали кожної клітки влаштовують один суцільний місток вздовж усіх клітей зі спусками до кожної з них. Перехідні містки влаштовують також перед другою чорною кліткою, між чорновими клітками, між групами клітей після останньої чистової клітки. Влаштування містків має відповідати вимогам Правил безпеки у прокатному виробництві. Якщо

виникає небезпека вигину розкатів вгору або вбік, перехідні містки необхідно огороджувати з боку розкату міцним запобіжним щитом з листового металу заввишки не менше 1,8 м.

Відвідні рольганги від останньої кліті дрібносортних станів огороджують міцними суцільними бортами висотою не менше 300 мм, причому з боку проходів зазначені борти повинні мати нахил або вигин, що перешкоджає вискакуванню штаби, що рухається. У тих випадках, коли прокатка проводиться з великою швидкістю і на відвідних рольгангах можливе утворення петлі, над ними влаштовують ковпакоподібні сітчасті огороження знімного або розсувного типу.

Якщо між окремими клітями безперервних станів відсутні столи з направляючими жолобами, то між клітями повинні бути встановлені надійні огороження, що виключають можливість проходження людей.

Для запобігання виходу розкату у бік, прокатне поле на сортових станах лінійного типу огорожується міцними суцільними бортами з нахилом у бік розкату.

Виправлення валкової арматури та інших деталей кліті на ходу є небезпечним і неприпустимим. При обертанні валків перевіряти калібри і зазори між валками можна тільки в напрямку, протилежному захопленню, під час перерв у процесі прокатки, обов'язково користуючись спеціальними пристроями з довгими рукоятками.

Операція контролю розмірів прокату вручну в процесі прокатки надзвичайно небезпечна, тому необхідно впроваджувати дистанційний контроль.

Для безпечного доступу до механізмів великих та середніх клітей прокатних станів слід влаштовувати майданчики зі сходами та поручнями. При обслуговуванні невеликих клітей застосовують тимчасові майданчики та сходи.

На станах лінійного типу за наявності довгих розкатів або петель і за відсутності у станів достатніх площ, влаштовують підвісні жолоби або підземні кишені з розширенням гирла і в необхідних випадках із встановленням роликів.

Устя приймальних жолобів перекривають таким чином, щоб виключити можливість викиду металу, що прокочується через борт жолоба, з цією метою жолоби перекривають не тільки збоку, але і зверху.

Щоб уникнути попадання кінців розкочування в зазори між стиками, листи чи плити жолобів чи кишень повинні прилягати щільно друг до друга. Кишені, розташовані поруч, необхідно відокремлювати стінками. Для усунення випадків вискакування петель металу з вивідного жолоба кишені, а також для запобігання ударам кінцем розкочування, перед клітьми дрібносортних і дротяних лінійних станів встановлюють ударні коробки простої і надійної конструкції.

Жолоби, що служать для передачі металу від однієї лінії клітей до іншої, для попередження вискакування петель щільно накриваються кришками.

Для доступу до механізмів, розташованих нагорі, робочі кліті всіх прокатних станів (виключаючи невеликі дрібносортні, дротяні і тонколистові кліті), що обслуговуються з підлоги, обладнуються спеціальними майданчиками, огороженими поручнями та нижньою бортовою обшивкою. Для доступу на верх клітей влаштовують стаціонарні похилі сходи. На станах старого типу встановлення таких сходів неможливе, тому застосовують переносні сходи.

Регулювання валків безперервних станів зазвичай проводиться із зовнішнього боку клітей. Доступ до кліток повинен бути безпечним та зручним.

На станах лінійного типу настил підлоги в місцях прокатки і прибирання металу від стану влаштовують з гладких металевих плит, щоб уникнути застрягання кінця розкочування і утворення петлі в щілинах на стиках плит, що не



щільно прилягають одна до іншої. Підлогу на робочих місцях вальцівників виконують із рифлених плит або з металевих плит, що мають точкове наварювання.

Для забезпечення безпечного пересування людей по цеху передбачаються спеціальні проходи, надійно захищені від розкатів, що рухаються. Для проходів упоперек прольотів через рольганги, стелажі та холодильники влаштовують перехідні містки, захищене від ударів розкатом та тепловипромінювання. У великих сучасних цехах влаштовують поперечні тунелі з виходами до окремих станів і санітарно-побутових приміщень цеху.

Підлоги необхідно систематично очищати від пилу, окалини та розлитої олії. Запасну валкову арматуру, валки та інше прокатне обладнання необхідно акуратно складувати на стелажі у відведених місцях цеху.

#### ***4.1.2 Експлуатація валкової арматури***

Валкова арматура забезпечує правильне положення розкату при подачі та виході його з валків. До валкової арматури відносяться напрямні коробки з допусками, вивідні проводки, бруси, проводкові столи, лінійки та ін. Валкова арматура є і певним засобом безпеки, тому що попереджає такі небезпечні технологічні відступи при прокатці, як попадання розкочування на бурти валків, кайданів валків, згортання, викривлення та неправильний рух розкату при виході з валків, які створюють небезпеку травмування робітників.

Бруси та проводкові столи виконують зазвичай сталевими, досить масивними для забезпечення надійного кріплення до станини, без прогину та вібрації при русі в пропусках і проводках металу, що прокочується.

На нових дрібносортних і дротяних станах застосовують такий спосіб кріплення брусів до станин, який дає можливість заміни брусів разом з встановленими на них коробками або лінійками.

При установці брусів і проводкових столів на місці дотримуються умов, що забезпечують правильне розташування перепусток та проводок та безпечно їх обслуговування. Осі брусів і столів розташовують строго паралельно осі валків, установка по висоті регулюється відповідно до глибини калібру і місця, що займається по висоті проводки. Неодмінною умовою є відповідність перепусток і проводок діаметру робочих валків. Конструкція перепусток і проводок повинна виключати необхідність підправлення їх вручну.

Особливу увагу звертають на закріплення вивідних проводок або трубок, при цьому стежать за тим, щоб виключалася можливість їх вибивання при виході розкату [20].

У процесі прокатки вальцювальник повинен стежити за правильним розташуванням проводок. Різні відхилення проводок від норми викликають порушення правильного ходу розкату, що становить небезпеку для обслуговуючого персоналу.

Встановлення та налаштування валкової арматури проводяться кваліфікованим персоналом дуже ретельно.

Виправлення перепусток, лінійок та проводок під час обертання валків неприпустиме. Зміна та перестановка напрямних коробок, лінійок та проводок на ходу стану не допускається. Підкладання прокладок під коробки на ходу стану також забороняється.

#### ***4.1.3 Експлуатація змащувальних пристроїв***

Зазвичай змащування підшипників робочих клітей прокатних станів здійснюється централізовано. Аналогічним чином проводиться змащування всіх рухомих частин механізмів стану: натискних і врівноважувальних пристроїв, підйомних столів, робочих рольгангів тощо. У разі застосування текстолітових підшипників і охолодження шийок валків водою централізація змащування досягається за допомогою спеціальних пристроїв. За відсутності

централізованої системи змащування підшипників роблять лише у перервах між змінами чи під час зупинки стану. Такий порядок безпеки організації мастильних робіт особливо важливий при ручному змащуванні, що існує ще на деяких прокатних станах старої конструкції.

Для безпеки ручне змащування шийок валків при гарячій прокатці здійснюють з боку шпинделів або вільних кінців валків, а не з боку бочки. Крім того, змащування здійснюють з боку, протилежного обертання валків, і за допомогою допоміжних напрямних жердин.

Для доступу до шийок валків в огорожувальних кожухах сполучних шпинделів і вільних кінців валків вирізаються отвори для змащування.

Застосування змащування з автоматичною подачею не можна здійснювати без автоматичної сигналізації для попередження про неполадки в маслопідводній системі.

До всіх змащувальних пристроїв має бути забезпечений зручний та безпечний доступ.

Підвищені вимоги пред'являються до мастильних матеріалів прокатних станів [18]. Мастильні матеріали повинні мати високу температуру спалаху і дуже велику в'язкість, яка сприяє утворенню стійкої мастильної плівки між поверхнями, що труться.

При застосуванні підшипників відкритого типу слід мати на увазі необхідність наявності у мастила властивостей протистояти дії змиваючої води, що надходить на охолодження валків.

Щоб мастильний матеріал при роботі стану не горів, масло повинно мати температуру займання вище тієї температури, до якої можуть нагрітися шийки валків в нормальних умовах їх змащення та охолодження.

#### **4.1.4 Вбирання окалини**

Процес гарячої прокатки супроводжується утворенням та відділенням окалини. Інтенсивність утворення окалини на прокаті обумовлена температурою нагріву, швидкістю прокатки та хімічним складом металу. Значне відділення окалини має місце по всьому шляху руху металу, починаючи з транспортування злитків і заготовок від нагрівальних пристроїв до стану і закінчуючи прибиранням готової продукції від стану.

Видалення окалини проводиться вручну та механізовано. Ручне прибирання окалини з-під клітей станів та рольгангів є важкою та небезпечною операцією. На багатьох станах влаштовують тунелі для збирання окалини. Для безпечного обслуговування ширину проходу в тунелі роблять не менше 700 мм, а висоту не менше 2 м. Крім того, надійно захищають проходи в тунелях від попадання окалини та шматків гарячого металу. Освітлення тунелів, як правило, стаціонарне з напругою в мережі не вище 12 В. Конструктивно тунелі виконують так, щоб забезпечувалося природне провітрювання. Вхід і вихід з тунелю обладнують похилими сходами, кут нахилу яких не перевищує 45 град.

Для збору окалини з-під рольгангів влаштовують спеціальні бункери, конструкція яких виключає застрягання в них окалини та уламків металу, що прокочується.

У прокатних цехах набув широкого поширення найбільш безпечний та механізований спосіб змиву окалини з-під стану водою.

При цьому окалина, потрапляючи на спеціальні жолоби, захоплюється потоком води у відстійники, що знаходяться за межами території стану. При гідравлічному видаленні окалини стічні канали виконують з ухилом не менше 15 град. У старих прокатних цехах, де ухил не забезпечує мимовільного віднесення окалини з водою, влаштовують уздовж каналу додаткові зрошувачі, через які вода подається під тиском 1,5-2 атм. Відстійні басейни огорожують міцними бар'єрами чи стінками висотою щонайменше 1,1 м.

Щоб уникнути падіння робітників у басейн із боку тунелів, їх отвори, що виходять у басейн, також захищають бар'єром. Прибирання окалини з відстійників проводиться за допомогою грейферних кранів, причому це прибирання не пов'язане ні з роботою, ні з ремонтними роботами біля та, отже, відбувається в безпечних умовах. При збиранні окалини грейферним краном не допускається знаходження робітників на дні відстійника. Якщо для прибирання окалини під клітьми встановлюють коробки, які видаляються механізованим шляхом, то вживають необхідних заходів щодо забезпечення безпеки роботи в каналі та мінімального часу перебування в ньому обслуговуючого персоналу. Для цього під клітьми по довжині робочої частини валків встановлюють напрямні жолоби з випускними отворами, що відповідають розмірам розташованих під ними приймальних коробок.

Коробки розташовують безпосередньо під зазначеними отворами бункера щоб уникнути того, щоб окалина не потрапила на дно каналу, так як вона викликає необхідність очищення дна каналу ручним способом.

Переміщення вагонеток з коробками здійснюється рейками, укладеними на дні каналу. Рейкові шляхи слід утримувати в справному стані і періодично очищати від окалини, що обсипається при переміщенні повних коробок. Під рольгангами великих станів люки направляючих жолобів для спуску окалини повинні мати такі розміри, щоб у них не застрягали шматки металу, що відлітають від головної частини злитків. Зазвичай кут нахилу стінок направляючих приймальних жолобів має щонайменше 50 град. Зазначені заходи запобігають закупорюванню люків при видаленні окалини і виключають порушення нормальної роботи системи гідровидалення.

Видалення коробок з окалиною проводиться краном, підйомна частина якого обладнується траверсою із самозахопленнями та пристроями для механізованого розвантаження. Колодязі для видачі коробок з окалиною на поверхню перекривають міцними металевими плитами, прикріпленими до рами петлями або кутками, що направляють. Під час збирання окалини

відкриті отвори захищають переносними бар'єрами. Окалина, що утворилася при прокатці і що залишилася зверху на настилах, у процесі роботи станів видаляється убік межі робочого майданчика під час перерв у роботі.

Слід мати на увазі, що засмічення настилу окалиною може стати причиною травм внаслідок падіння працюючих на гарячі плити або штаби, що прокочуються [20].

#### ***4.1.5 Перевалка валків і ремонт станів***

У процесі роботи у зв'язку зі зносом бочки або калібрів валків, або у зв'язку з переходом на прокатку іншого профілю виникає необхідність у заміні (перевалці) валків. Крім того, внаслідок великих динамічних зусиль, що діють на обладнання прокатних станів та допоміжних механізмів, виникають поломки окремих деталей. Перевалка валків і поточні ремонти прокатних станів зазвичай виконуються силами виробничого та ремонтного персоналу прокатних цехів.

Робота із заміни валків та ремонтів станів є досить складною операцією, оскільки проводиться у короткі проміжки часу великою кількістю людей, які працюють на обмеженому майданчику та пов'язані з переміщенням та підняттям великих тягарів. Перед початком ремонту усі нагріті частини обладнання охолоджують водою.

Основним заходом безпеки при зміні валків та ремонтах станів є правильна організація праці. Зміну валків і поточний ремонт станів проводять за заздалегідь розробленими графіками з підготовкою необхідної кількості справного інструменту, мастильного обтирального матеріалу.

Майстер і бригадири забезпечують правильне розташування робітників. Розробляється докладний план послідовного виконання окремих операцій, докладно інструктується кожен робітник про виконувану ним роботу і про безпечні прийоми виконання кожної операції.

Зазвичай травми під час перевалки виникають внаслідок розкочування валків, неправильного їх транспортування та виконання інших ремонтних робіт. Для запобігання розкочування валків зберігання їх проводиться на спеціальних стелажах з вирізами. При укладанні валків біля стану під них встановлюють спеціальні дерев'яні підкладки (стелажі), причому основною вимогою безпеки є розміщення їх тільки в один ряд, щоб уникнути довільного розкочування валків. Стелажі для зберігання валків повинні мати стійку конструкцію. Відстань між рядами стелажів має становити щонайменше 1,5 м.

На практиці при заміні валків широко використовують такі пристрої, як скоби різних конструкцій та візки. Скоби використовують для заміни валків невеликих розмірів; зміну великих валків здійснюють за допомогою візка. Так, перевалка валків блюмінгу і слябінгу здійснюється за допомогою перевалочного візка.

На безперервних сортових станах валки видаляють зі станини і закладають у неї цілі комплекти за допомогою спеціальних рам, що переносяться краном. Валки збираються у збірній рамі заздалегідь на спеціально відведеному майданчику чи окремому приміщенні. Після цього валки комплектно вставляються в станину замість змінюваних, які видаляються зі станини також разом з іншою рамою.

При перевалці валків цілою кліткою валки також осторонь укладаються в запасні станини, і при заміні вся заздалегідь зібрана кліть встановлюється краном замість знятої. Такий спосіб перевалки валків є найбільш безпечним, так як при цьому необхідно дотримуватися звичайних заходів безпеки, пов'язаних з переноскою краном і встановленням великих тягарів.

Пуск стану після ремонту чи перевалки повинен проводитися за умови виконання певних вимог безпеки, що встановлюються заводськими інструкціями.

Перед пуском стану майстер або старший вальцівник виконує такі вимоги:

перевіряє весь стан, включаючи допоміжне обладнання, оскільки найменший недогляд при ремонті та складанні стану може призвести при пробному пуску до серйозних аварій та травматизму;

ретельно оглядає та перевіряє стан та наявність усіх огорожувальних та захисних пристроїв;

перевіряє наявність усіх робітників, які брали участь у ремонті, щоб ніхто не залишився у небезпечному місці;

перевіряє всі системи охолоджувальних та мастильних пристроїв.

Усі плити біля клітей та кришки на отвори в підлозі повинні бути укладені до пуску стану. Інструмент, матеріали, забраковані деталі, канати і т. п. прибирають з майданчика біля станів, а майданчик ретельно підмітають.

Тільки після вжиття цих заходів керівник, відповідальний за проведення поточного ремонту або перевалки валків, може дати вказівку про випробування та початок роботи стану. Перед пуском прокатного стану подають звуковий сигнал, що виразно сприймається всіма робітниками на будь-якій ділянці цеху.

Щоб при ремонті стану не було випадків травмування робочими механізмами (маніпуляторами, підйомними столами, врівноважувачами пристроями тощо) в результаті передчасного або випадкового їх пуску, перевалку валків, ремонт станів, а також ремонт оздоблювальних агрегатів здійснюють за системою ключів-жетонів. Жетоном є ключ, що розмикає пусковий ланцюг відповідного механізму, або ключ від механічного замку, що замикає його пусковий пристрій. Застосування ключів-жетонів є обов'язковою вимогою Правил безпеки в прокатному виробництві.

#### ***4.1.6 Управління станами і оздоблювальними агрегатами***

У сучасних високо механізованих прокатних цехах широко застосовується дистанційне керування прокатними станами та оздоблювальними агрегатами. Правильна організація управління станом та



іншим обладнанням є одним з основних заходів безпеки в прокатному виробництві. Пости і пульти управління розташовують у місцях, віддалених від джерел тепловипромінювань і забезпечують хорошу видимість обслуговуваного агрегату і прилеглих до нього ділянок руху металу.

Не можна розташовувати всередині пульта управління прилади та апарати, які виділяють велику кількість тепла або створюють значний шум (реостати, контактори, лопатеві вентилятори). Вся електропроводка, що знаходиться в пультах управління, повинна мати гарну ізоляцію. Механізми та деталі, які можуть опинитися під струмом, повинні бути надійно заземлені. Рукоятки контролерів і кнопки управління, і навіть контрольно-вимірвальна апаратура, що у пульті управління, розташовується з урахуванням максимальних зручностей у роботі оператора. Одночасно з цим вона не повинна відволікати увагу оператора від спостереження за роботою і всією площею агрегату, що обслуговується.

Пульти управління обладнують надійно діючою звуковою і світловою сигналізацією для повідомлення про режим роботи, пуск і зупинку агрегатів, що обслуговуються. Робочі місця операторів обладнують зручними кріслами з пружинним сидінням, зі спинкою і підлокітниками. У приміщеннях постів управління сучасних прокатних станів споруджують ізольовані кабіни з розміщенням у них умивальника та санвузла.

При обслуговуванні гарячих агрегатів станів гарячої прокатки, ножиць і пилок гарячого різання і т. д. на пультах і постах управління передбачається встановлення балонів або термосів з газованою водою.

## ВИСНОВКИ

1. Розглянуто модель напружено-деформованого стану та теплового стану гарячекатаної штаби у процесі охолодження. У моделі враховується утворення та зміна міжвіткових зазорів при змотуванні та охолодженні неплоскої, шорсткої та опуклої штаби.

2. Розроблено модель формозміни штаби в процесі змотування та охолодження рулону. Модель верифікована шляхом зіставлення розрахункового та фактичного виду неплоскості. Точність прогнозу виду неплоскості становить 62%, на кінцевих ділянках штаби до 92%.

3. На основі літературних даних розроблено модель зміни площинності штаби в процесі змотування та охолодження рулону гарячекатаної сталі. Досліджено вплив опуклості, шорсткості, опуклості та натягу при змотуванні штаби в рулон на процес формозміни при змотуванні та охолодженні.

4. Шорсткість сильно впливає на напружено-деформований стан та тепловий стан рулону. Однак через те, що зниження напруги зі зростанням шорсткості компенсується збільшенням напруги зі зростанням нерівномірності температури через зниження радіальної теплопровідності, процес формозміни штаби практично не залежить від величини шорсткості штаби.

5. Вид неплоскості практично не впливає на процес формозміни на зовнішньому витку. Але на внутрішньому витку коробоватість штаби інтенсифікує процес формозміни.

6. Натягіння штаби при змотуванні не так сильно впливає на тепловий стан рулону, як шорсткість штаби. Однак натягіння надає надзвичайно сильний вплив на напружено-деформований стан рулону і, як наслідок, на процес формозміни.

7. Вплив опуклості штаби на тепловий стан у процесі охолодження рулону приблизно співпадає з впливом натягу. За рахунок перерозподілу

напруг по ширині, опуклість штаби має сильний вплив на напружено-деформований стан рулону при охолодженні та процес формозміни, особливо на зовнішніх витках.

8. З'ясовано причини підвищення часу перезаправки рулонів на неперервному стані холодної прокатки 1680, що знижує продуктивність стану. Запропоновано технічне рішення, яке дозволяє звести до мінімуму перевищення часу перезаправки рулонів та полегшить роботу оператора стану.

9. Виконано розрахунки параметрів виправлення листа на чотирироlikовій правильній машині, а саме розрахунки радіусів кривизни листа у точках його торкання з роliками і кути торкання сталевого листа і роliків. Виконані розрахунки дозволяють прогнозувати ефективність процесу виправлення листа.

10. У розділі «Охорона праці та техногенна безпека» наведено загальні заходи щодо безпеки в прокатному виробництві, а саме, обслуговування клітей і сполучальних частин між ними, експлуатація валкової арматури, експлуатація змащувальних пристроїв, вбирання окалини, перевалка валків і ремонт станів, управління станами і оздоблювальними агрегатами тощо.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. George T. Halmos. Roll Forming Handbook. Taylor & Francis Group. 2006. Canada.
2. Wei-Wen Yu. Cold-Formed Steel Design- Third Edition- John Wiley and Sons, Inc. 2000. Canada.
3. Проценко В. М., Белоконь Ю. О. Технологія виготовлення гнутих профілів : навчально-методичний посібник для здобувачів ступеня вищої освіти магістр спеціальності 136 "Металургія" освітньо-професійної програми "Обробка металів тиском" Запоріжжя : ЗНУ, 2023. 104 с.
4. Yavtushenko A. V., Protsenko V. M., Belokon Yu. A., Bondarenko Y. V. Productivity Optimization of Cold Rolling Mills. Steel in Translation, 2020, Vol. 50, No. 5, pp. 335–339.
5. Проценко В. М., Бондаренко Ю. В., Явтушенко А. В. Технологія нагріву та нагрівальне обладнання в обробці металів тиском : навчально-методичний посібник для здобувачів ступеня вищої освіти бакалавра спеціальності 136 "Металургія" освітньо-професійної програми "Металургія". Запоріжжя : ЗНУ, 2021. 126 с.
6. Проценко В. М. Обтискне та сортове виробництво : методичні вказівки до лабораторних робіт для здобувачів ступеня вищої освіти бакалавра спеціальності 136 "Металургія" освітньо-професійної програми "Металургія". Запоріжжя : ЗНУ, 2020. 51 с.
7. Проценко В. М. Технологія виготовлення гнутих профілів : методичні вказівки до практичних занять для здобувачів ступеня вищої освіти магістра спеціальності 136 "Металургія" освітньо-професійної програми "Обробка металів тиском". Запоріжжя : ЗНУ, 2021. 45 с.
8. Ніколаєв В. О. Теорія обробки металів тиском : навчальний посібник. Запоріжжя : ЗДІА, 2015. 112 с.

9. Ніколаєв В. О. Теорія і технологія точної прокатки штаб : навчальний посібник для здобувачів ЗДІА металургійних спеціальностей денної та заочної форм навчання. Запоріжжя : ЗДІА, 2017. 100 с.
10. Ніколаєв В. О. Теорія прокатки штаб : навчальний посібник. Запоріжжя : ЗДІА, 2014. 259 с.
11. Yavtushenko A. V., Protsenko V. M., Bondarenko Y. V., Kirichenko A. G., Ping F. Y. Numerical experiment for the calculation of normal contact stress in the deformation canter when rolling a metal strip. *Journal of Engineering Sciences*, Volume 6, Issue 2 (2019), pp. E 31–E 35.
12. Проценко В. М. Прокатка листів та штаб : методичні вказівки до виконання практичних занять, контрольних робіт і самостійної роботи для здобувачів ЗДІА, що навчаються за спеціальністю 136 «Металургія» (спеціалізація «Обробка металів тиском») всіх форм навчання. Запоріжжя : ЗДІА, 2017. 67 с.
13. Ніколаєв В. О. Теорія та обладнання точної прокатки штаб: методичні рекомендації до виконання практичних завдань, контрольних і самостійних робіт для здобувачів ЗДІА напряму 8.0504104 ”Обробка металів тиском”. Запоріжжя : ЗДІА, 2016. 52 с.
14. Проценко В. М. Теорія та технологія точної прокатки штаб : методичні вказівки до лабораторних робіт для здобувачів ЗДІА, які навчаються за освітньо-професійною програмою «Обробка металів тиском» зі спеціальності 136 «Металургія», рівня вищої освіти «Магістр» денної і заочної форм навчання. Запоріжжя : ЗДІА, 2018. 40 с.
15. Проценко В. М. Профілювання валків листових станів : методичні вказівки до лабораторних робіт для здобувачів ЗДІА, які навчаються за освітньо-професійною програмою «Обробка металів тиском» зі спеціальності 136 «Металургія», рівня вищої освіти «Магістр» денної і заочної форм навчання. Запоріжжя : ЗДІА, 2018. 42 с.

16. Серета Б. П., Проценко В. М. Виготовлення спеціальних видів прокату : навчально-методичний посібник для здобувачів ЗДІА спеціальності 7.090404 "Обробка металів тиском". Запоріжжя : ЗДІА, 2012. 88 с.
17. Явтушенко О. В., Проценко В. М., Корнілов О. О. Розрахунок валків прокатних станів на міцність і деформацію у програмному комплексі «AutoCAD Mechanical». *Металургія : Збірник наукових праць*. Запоріжжя , 2018. Вип. 2 (40). С. 85 – 90.
18. Belokon Y., Yavtushenko A., Protsenko V, Bondarenko Y, Cheilytko A. Mathematical modeling of physical properties of anisotropic materials. *Conference Proceedings – METAL 2020. 29th International Conference on Metallurgy and Materials*. May 20 - 22, 2020, Brno, Czech Republic, EU. P. 440 – 445. <https://www.confer.cz/metal/2020/3500-mathematical-modeling-of-physical-properties-of-anisotropic-materials>. (Дата звернення: 15.09.2023).
19. Таратута К.В., Проценко В.М., Востоцький С.М. Комп'ютерне моделювання процесу волочіння сплавів на основі титану. IV Міжнародна науково-практична конференція Інформаційні моделюючі технології, системи та комплекси (ІМТСК-2023). 25-26 травня 2023 року. Черкаси. С 40 – 42. [https://fotius.cdu.edu.ua/wp-content/uploads/2023/06/Book\\_ІМТСК\\_2023.pdf](https://fotius.cdu.edu.ua/wp-content/uploads/2023/06/Book_ІМТСК_2023.pdf). (Дата звернення: 15.09.2023).
20. Румянцев В. Р., Кутузова І. О. Профілактика виробничого травматизму та професійних захворювань : навч. посібник. Запоріжжя : ЗДІА, 2015. 132 с.
21. ДСТУ 8302 : 2015. Бібліографічне посилання. Загальні положення та правила складання. [Чинний від 2016-07-01]. Вид. офіц. Київ : УкрНДНЦ, 2016. 16 с. (Інформація та документація).
22. ДСТУ 3008 : 2015. Звіти у сфері науки і техніки. Структура та правила оформлення. [На заміну ДСТУ 3008-95. Чинний від 2017-07-01]. Київ : Держстандарт України, 1995. 26 с. (Інформація та документація).