

**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**

Другий (магістерський)

(рівень вищої освіти)

на тему **Управління якістю поверхні тонкоштабового прокату з метою її  
покращення в умовах холодної прокатки**

Виконав: студент II курсу, групи 8.1361-омт  
спеціальності 136 Металургія

(код і назва спеціальності)

освітньої програми Обробка металів тиском

(код і назва освітньої програми)

М.М. Пчела

(ініціали та прізвище)

Керівник

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

Рецензент

доц. каф. МТЕТБ, доц, к.т.н. А.В. Явтушенко

Запоріжжя – 2022 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 другий (магістерський) рівень  
Спеціальність 136 «Металургія»  
(код та назва)  
Освітньо-професійна програма Обробка металів тиском  
(код та назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри МТЕТБ

Ю.О. Белоконь

“ 08 ” 09 2022 року

## ЗАВДАННЯ

### НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ / ПРОЕКТ СТУДЕНТУ

Пчелі Микиті Миколайовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи (проекту) Управління якістю поверхні тонкоштабового прокату з метою її покращення в умовах холодної прокатки

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 “02” 06. 22 р. № 597-с

2. Строк подання студентом роботи 08 грудня 2022 року

3. Вихідні дані до роботи: Матеріали переддипломної практики, курсові проекти, технічна документація ЦХП-1 ПАТ «Запоріжсталь», літературні джерела.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити): Реферат. Вступ. Загальна частина. Дослідницько-розрахункова частина. Технологічна частина. Механічна частина. Заходи з поліпшення умов праці при виробництві холоднокатаних штаб.

Мета кваліфікаційної роботи – покращення якості поверхні тонкоштабового прокату шляхом управління параметрами прокатки і застосування нових пристроїв для регулювання натягання та форми штаби при прокатуванні.

Визначити основні тенденції розвитку і удосконалення технології виробництва штаб, заходи щодо забезпечення економії енергії і якості продукції. Розробити технічні рішення щодо підвищення якості продукції і зменшення енерговитрат. Виявити залежність продуктивності стана від швидкості прокатки і маси рулону з урахуванням інших істотних факторів із застосуванням сучасного програмного комплексу MathCAD Prime 8. Проаналізувати потенційно небезпечні і шкідливі виробничі фактори і розробити заходи щодо захисту від них.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень) Схеми сучасних станів для холодної прокатки штаб, креслення основних видів кліті кварто, технологічна схема ЦХП-1, травильного відділення, розміщення обладнання в цеху, схеми обвідних роликів, графіки залежності продуктивності стана від маси рулонів і швидкості прокатки, схеми автоматичного пристрою для зниження локальної неплоскостності штаб і комбінованого регулювання площинності штаб.

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата
		завдання прийняв
Вступ, реферат, 1–5, висновки, перелік літератури	Проценко В.М., доц. каф. МТЕТБ	

7. Дата видачі завдання 08.09.2022 року.

### КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1.	Реферат, вступ, загальна частина.	12.09.22 – 13.10.22	
2.	Дослідно-розрахункова, технологічна і механічна частини.	17.10.22 – 18.11.22	
3.	Охорона праці, висновки, оформлення ПЗ і креслень, підготовка доповіді і презентації.	21.11.22 – 09.12.22	

Студент

\_\_\_\_\_ (підпис)

**Пчела М.М.**

\_\_\_\_\_ (прізвище та ініціали)

Керівник проекту (роботи)

\_\_\_\_\_ (підпис)

**Проценко В.М.**

\_\_\_\_\_ (прізвище та ініціали)

Нормоконтроль пройдено

Нормоконтролер

\_\_\_\_\_ (підпис)

**Явтушенко А.В.**

\_\_\_\_\_ (прізвище та ініціали)

## Реферат

Пояснювальна записка дипломного проекту (роботи) містить: 104 с., 41 рис., 4 табл.; використано літературних джерела 24.

Об'єкт дослідження – неперервний стан холодної прокатки 1680 металургійного заводу ПАТ «Запоріжсталь» та технологія прокатки на ньому рулонного тонкоштабового прокату з маловуглецевих марок сталі.

Мета роботи – покращення якості поверхні тонкоштабового прокату шляхом управління параметрами прокатки і застосування нових пристроїв для регулювання натягання та форми штаби при прокатуванні.

Методи розрахунків – стандартні методики розрахунків, які використовуються в прокатному виробництві. Розрахунки і комп'ютерне моделювання у системі САПР AutoCAD Mechanical 2020 і MathCAD Prime 8.

Отримані результати і їх новизна – встановлено, що підвищення якості поперечного профілю штаби і зниження енергосилових параметрів прокатки може забезпечуватися шляхом застосування валків з обвідними роликками, які мають випуклу і вогнуту поверхню. Показано, що управління якістю поверхні тонкоштабового прокату може здійснюватися шляхом управління епюрою питомих натягів і напруженим станом рулонів. Застосовано комп'ютерну програму AutoCAD Mechanical для моделювання обвідних роликків і MathCAD Prime 8 для розрахунків продуктивності прокатного стану.

Отримані результати рекомендуються для впровадження на неперервному стані холодної прокатки ПАТ «Запоріжсталь» з метою покращення якості штаб і техніко – економічних показників виробництва.

ХОЛОДНА ПРОКАТКА, ПЛОЩИННІСТЬ ШТАБИ, РІЗНОТОВЩИННІСТЬ, НАПРУЖЕННЯ, УПРАВЛІННЯ ЯКІСТЮ, СТАН, КЛІТЬ, ПРОКАТНІ ВАЛКИ, ПРОТИЗГІН, ОБВІДНІ РОЛИКИ, МОДЕЛЮВАННЯ.

## ЗМІСТ

	с.
ВСТУП .....	7
1 ЗАГАЛЬНА ЧАСТИНА .....	9
1.1 Технологічний процес прокатки штаб в умовах ЦХП-1 .....	9
1.2 Опис конструкцій і роботи основного устаткування ЦХП-1 .....	12
1.3 Аналіз параметрів режиму деформації на НСХП 1680 .....	19
1.4 Аналіз вузьких місць та заходи щодо реконструкції .....	21
1.5 Новітні досягнення в технології прокатного виробництва .....	26
2 ДОСЛІДНИЦЬКО – РОЗРАХУНКОВА ЧАСТИНА .....	36
2.1 Вступ .....	36
2.2 Управління якістю поверхні тонкоштабового прокату з метою її покращення в умовах холодної прокатки.....	37
2.2.1 Розрахунок профілювань валків станів холодної прокатки.....	37
2.2.2 Регулювання площинності штаб на багатоклітьовому стані холодної прокатки .....	41
2.2.3 Регулювання площинності штаб на дресирувальному стані .....	46
2.2.4 Алгоритм керування площинністю штаб у листопрокатному цеху .....	49
3 ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА .....	56
3.1 Стан проблеми .....	56
3.2 Основні проблеми стабілізації геометричних параметрів тонколистового прокату .....	58
3.3 Пристрої для регулювання натягання та форми штаби при прокатці .....	64
3.4 Поздовжні напруження у штабі при випуклому натяжному (обвідному) ролику .....	78
4 МЕХАНІЧНА ЧАСТИНА .....	83
4.1 Оптимізація продуктивності станів холодної прокатки .....	83
4.1.1 Вступ .....	83
4.1.2 Постановка задачі дослідження .....	83
4.1.3 Методика дослідження .....	84
4.1.4 Результати досліджень .....	88

	6
4.1.5 Висновки .....	90
5 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ТЕХНОГЕННА БЕЗПЕКА .....	94
5.1 Аналіз потенційних небезпечних і шкідливих факторів виробничого середовища .....	94
ВИСНОВКИ .....	97
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ .....	99
Додаток А - Публікація за темою кваліфікаційної магістерської роботи	101

## ВСТУП

В умовах вільного ринку металопродукції першочергового значення набувають показники якості. Для листів і штаб до них слід віднести, перш за все, точність розмірів, площинність і різнотовщинність штаб. Останнім часом, у зв'язку з підвищеними вимогами до штампуємості автолиста, замовники металу посилили вимоги до фізико-механічних властивостей прокату, зокрема до пластичності.

Для підвищення якості своєї продукції прокатники у всьому світі, перш за все в Японії, Німеччині, США, а також в країнах Латинської Америки, Індії і Китаю, давно приступили до глобальної модернізації прокатного обладнання. По всьому світу розповсюдилися такі технології як “литво-прокатки” SVC - безперервне регулювання товщини штаби в процесі прокатки.

Аналіз численних прикладів модернізації прокатного обладнання, приведених в літературі, показує, що модернізація не в змозі кардинально змінити ситуацію в боротьбі за якість прокату. Причини цього закладені в неможливості зміни традиційної схеми прокатної кліти, яка має істотні конструктивні недоліки.

Сучасна прокатна кліть, наприклад, кварто, складається із станини, двох опорних валків, двох робочих валків, гідронатискних або електромеханічних пристроїв і механізмів противигину опорних і робочих валків. У такій кліті зовнішні сили, що створюють зусилля прокатки, прикладаються до шийок валків, тобто на їх кінцях. З боку штаби на валки діють реактивні сили, що викликають в них великі моменти, що згинають. В результаті у валках виникає небезпечна напруга, яка сприяє виникненню мікротріщин в робочому шарі і його руйнування.

При існуючій схемі прикладення зовнішніх сил до шийок валків, неможливо також добитися найменшої різнотовщинності по ширині штаби, незважаючи на застосування противигину валків.

В даний час до продукції широкоштабових станів холодної прокатки висуваються жорсткі вимоги, пов'язані з необхідністю підвищення її конкурентоспроможності на світовому ринку, потреби якого в останнє десятиліття істотно змінилися. Основним критерієм, що визначає конкурентоспроможність продукції, є якість, яка забезпечується за рахунок мінімізації різнотовщинності і неплоскостності штаби.

Якість профілю штаби (різнововщинність і площинність) формується головним чином під час гарячої прокатки. Холодна прокатка мало змінює відносну величину поперечної різнововщинності, але робить істотний вплив на площинність штаби, і в цьому питанні важлива роль належить раціональній вихідній профілізації валкового вузла [1].

істотний вплив на показники прокатування штаби має натягання. Воно виконує роль стабілізуючого чинника, що сприяє вирівнюванню витяжок по ширині штаби. Питоме натягання (на 1 мм ширини) розподіляється по ширині нерівномірно: воно більше на тих ділянках, які мають меншу витяжку. З літератури відомо [2], що навіть за відсутності натягання при ідеально рівному обтисненні по ширині, швидкість течії металу в осередку деформації по ширині штаби розподіляється нерівномірно. При нерівномірній деформації по ширині, нерівномірність швидкостей течії посилюється. На тій ділянці штаби, на якій висотна деформація з якихось причин зменшується, тобто висота щілини збільшується, витяжка знижується. При натяганні цієї ділянки штаба отримує додаткове розтягнення. Контактний тиск знижується, пружне сплющування валків зменшується, профіль штаби і контактний тиск по ширині штаби вирівнюються.

В останні роки все більшої актуальності набувають роботи зі створення автоматизованих систем управління якістю (АСУЯ) продукції, що забезпечують конкурентоспроможність вітчизняних підприємств, у тому числі й чорної металургії, на світових ринках [1].

Для побудови ефективних АСУЯ необхідне вирішення комплексу завдань, що включають дослідження процесів формування вектора показників якості та техніко-економічних показників, розробку інформаційного, математичного та програмного забезпечення систем.

В результаті модернізації існуючих прокатних станів і, перш за все, прокатних клітей ПАТ «Запоріжсталь» якість листового і штабового прокату значно покращилася. Проте, не дивлячись на успіхи, досягти тієї якості, якої вимагають сьогодні від прокатників замовники, поки не вдається.

Мета роботи – покращення якості поверхні тонкоштабового прокату шляхом управління параметрами прокатки і застосування нових пристроїв для регулювання натягання та форми штаби при прокатуванні



## **1 ЗАГАЛЬНА ЧАСТИНА**

### **1.1 Технологічний процес прокатки штаб в умовах ЦХП-1**

Неперервний стан холодної прокатки (НСХП) 1680 призначений для прокатки холоднокатаного листа товщиною 0,5...2,0 мм, швидкість прокатки - до 10 м/с, довжина бочки валків 1680 мм, діаметр робочих і опорних валків 510 і 1420 мм. Робочі валки приводяться від електродвигуна потужністю 3300 кВт через шестеренну кліть. У якості підкату використовується гарячекатана штаба товщиною 2...3,8 мм з масою рулону до 15 т. Сумарне обтиснення на цих станах досягає 80 %. Цей стан є основним постачальником холоднокатаної листової сталі ПАТ «Запоріжсталь».

Після заправлення штаби в першу кліть прокатка ведеться на постійній заправній швидкості, поки передній кінець штаби пройде всі кліті і на моталці утворює 2...3 витка штаби. Потім швидкість підвищується до робочої, і рулон прокатується з постійною робочою швидкістю. Перед звареним швом швидкість прокатки вповільнюється. Потім робиться розгін стана до робочої швидкості, і далі все повторюється. При підході заднього кінця штаби швидкість прокатки зменшується з робочої до заправної, після чого задній кінець прокатується з постійною заправною швидкістю. Після паузи починається прокатка рулону.

Значна частина штаби прокатується зі змінною швидкістю, що впливає на параметри процесу прокатки: силу прокатки, натягнення штаби, товщину штаб, обтиснення, коефіцієнт тертя тощо.

Зварені шви прокатуються на вповільненій швидкості, через нестабільність механічних властивостей швів і зміну товщини. Якщо при проходженні зварених швів між валками швидкість прокатки не знижувати, то це веде до сильних ударів і може відбутися розрив штаби [1].

Для того щоб не знижувати швидкість прокатки при проходженні зварених швів, потрібно забезпечити однакові механічні властивості металу

штаби і металу шва і мінімальну різновтовщинність підкату. Вирівнювання меж плинності матеріалу штаби і матеріалу шва може бути досягнуто зменшенням обтиснення по шву за рахунок зняття ґрата на мінус.

Для зміни швидкості валків стана застосовують двигуни, що забезпечують швидкий розгін і зупинку.

При багаторазовому обтисненні штаби відбувається її значний розігрів, тому виникає необхідність примусового охолодження валків і штаби. Для охолодження використовують технологічне змащення. Змащення при холодному прокатуванні знижує коефіцієнт тертя між валками і штабою до 0,02...0,06, завдяки чому зменшуються сила прокатки і опір деформації. Прокатка зі змащенням забезпечує більше обтиснення, знижує витрати енергії, зменшує зношування валків, і підвищує якість листової сталі.

Змащення повинно добре прилипати до валків, забезпечуючи рівномірну плівку між валками і штабою що прокатується, і під час прокатки не повинне видавлюватися. Змащення утворює поділяючий ковзний шар між валками і штабою що прокатується. Змащення також повинно легко віддалятися з поверхні листовий сталі після прокатки. Більш успішні вважаються емульсії на основі мінеральних мастил. Емульсія подається по обидва боки робочої кліті в місця контакту валків і штаби та на метал що прокатується. Для готування емульсій і подачі її на валки робочої клітей існує спеціальна установка. На стан емульсію подають за допомогою насосів. Для очищення емульсії використовують фільтри і магнітні сепаратори. Для охолодження емульсії використовують охолоджувачі. Ефективність змащення залежить не тільки від правильного вибору їхнього складу, але і від способу подачі на штабу і валки [2].

Холодна прокатка здійснюється зі значним натягом, що знижує силу прокатки, стабілізує процес прокатки і служить у якості регулюючого фактора товщини штаби.

Звичайно на штабу в першій кліті діє тільки передній натяг, а в останній і проміжній клітях діє передній і задній натяг. Між клітями натяг створюється

за рахунок неузгодженості швидкостей, а передній натяг в останній кліті – моталкою.

Особливість холодної прокатки – це виникнення наклепу, в результаті чого різко зростають границя текучості, межа міцності і зменшується відносне подовження.

Холодна пластична деформація металу супроводжується значним виділенням тепла, тому температура штаби досягає 150...250° С [3].

Прокатка на НСХП характеризується високими швидкостями деформації, які впливають на межу плинності. Але цей вплив незначний і його звичайно не враховують.

Натяг штаби істотно впливає на товщину штаби: зі збільшенням натягу товщина штаби зменшується. При стійкому процесі прокатки для забезпечення високої точності розмірів штаби по довжині доцільно підтримувати натяг у межах 0,2 -0,4  $\sigma_T$ .

Механічні властивості підкату по довжині штаби розподіляються нерівномірно. Через неоднорідність хімічного складу в слябах у гарячекатаних рулонах виникає додаткова неоднорідність через різні режими охолодження кінців і середини штаби. Кінці штаби остигають швидше, у результаті межа міцності металу на початку і наприкінці рулону вище, ніж у середині, на 10...18%.

Зміна товщини і натяг штаби по фазі збігаються зі зміною зазору між валками через биття валків.

Швидкість прокатки впливає на поздовжню різнотовщинність через коефіцієнт тертя, границю текучості матеріалу, що прокатується, і внаслідок зміни товщини масляної плівки.

Зі збільшенням швидкості прокатки підвищується температура металу внаслідок теплового ефекту пластичної деформації. Збільшення температури металу приводить до зниження межі плинності і до зменшення сили прокатки і товщини штаби.

Важливим завданням прокатки є одержання необхідних механічних властивостей, тому що структура і штампуємість листової сталі, визначаються режимом холодної прокатки. При критичному ступені деформації (наприклад, 7...10% для сталі 08кп) при рекристалізації утворюються дуже крупні зерна. При малій ступені деформації, зерна гарячекатаного металу майже не дробляться, і далі ріст зерна не спостерігається, тому що відсутня рекристалізація. При збільшенні ступені деформації зерна фериту дробляться і витягаються в напрямку прокатки, відбувається розрив міжзеренної речовини, границі зерен майже зникають, цементит також витягається уздовж прокатки [4].

Межа міцності і межа плинності холоднокатаної відпаленої сталі зростає зі збільшенням ступеня деформації. При холодній прокатці сумарне обтиснення становить 50...80 %, а одержання необхідних механічних властивостей забезпечують підбором оптимального хімічного складу сталі і режиму відпалу.

## **1.2 Опис конструкцій і роботи основного устаткування ЦХП-1**

У прокатному відділенні відбувається прокатка в клітях закритого типу з робочими валками діаметром 465 - 510 мм, і опорними 1210 - 1420 мм. На рис 1.1 зображена прокатна кліть закритого типу НСХП 1680.

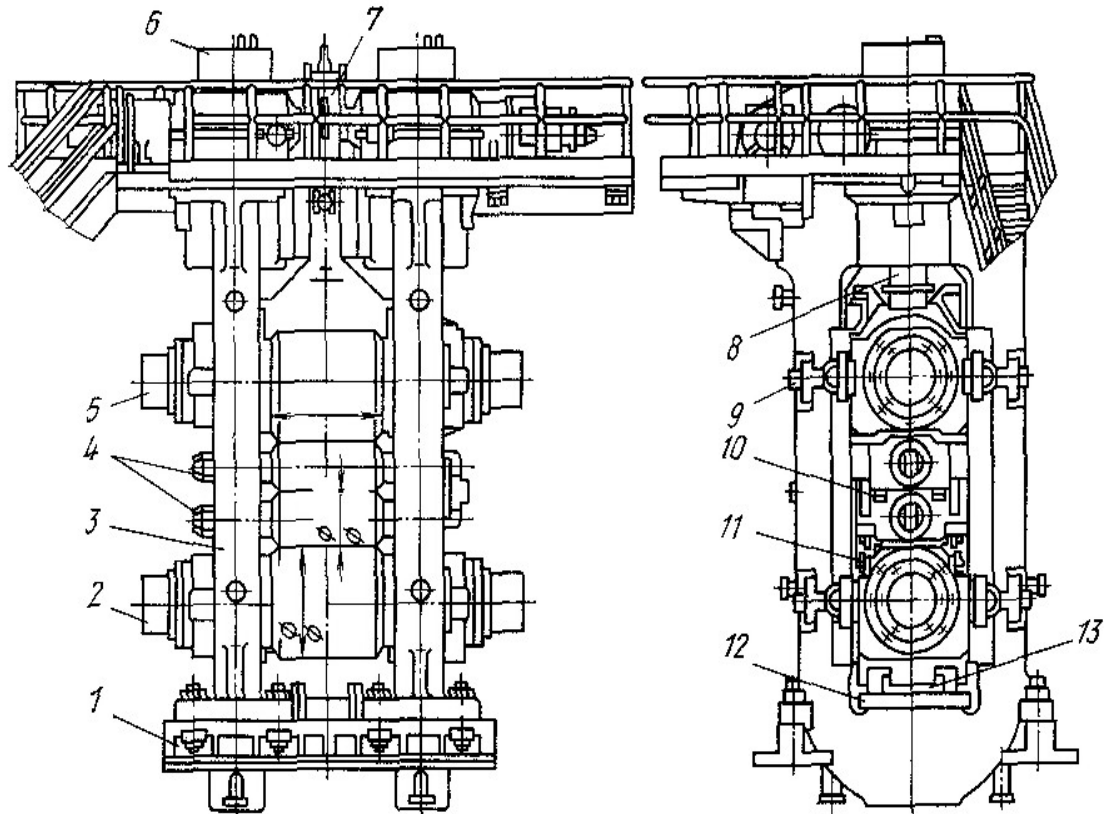
При зміні повного комплексу робочих і опорних валків застосовують гідравлічний пристрій, що врівноважує.

На рис 1.2 показаний загальний вид пристрою для гідравлічного зрівноважування верхніх робочого і опорного валків стана 1680. Зрівноважування робочих і опорних валків здійснюється за допомогою гідравлічних плунжерів 3, які розташовані між подушками опорних і робочих валків.

Шестеренна кліть, представлена на рис 1.3 і призначена для поділу крутного моменту на опорні валки. Шестеренні кліті роблять відкритими (зі

знімною кришкою). Вони складаються з наступних основних елементів: станини; кришки; шестерень; подушок з підшипниками.

Станини і кришки відливають із модифікованого або високоміцного чавуну (марок ВЧ45-5, СЧ32-52); підшипники – бабітові або роликові конічні; шестерні виготовляють із кованої легованої сталі марок 40ХН, зуби піддають поверхневому гартуванню [5].



1 – плитовина; 2 – нижній опорний валок; 3 – станина; 4 – робочі валки; 5 – верхній опорний валок; 6 – натискний механізм; 7 – механізм врівноваження верхнього опорного валка; 8 – натискний гвинт; 9 – гідрозаслонка; 10 – гідроциліндр; 11 – направляючі бруси для зміни робочих валків; 12 – полоз'я для зміни опорних валків

**Рисунок 1.1** – Прокатна кліть закритого типу НСХІІ 1680 ПАТ «Запоріжсталь»

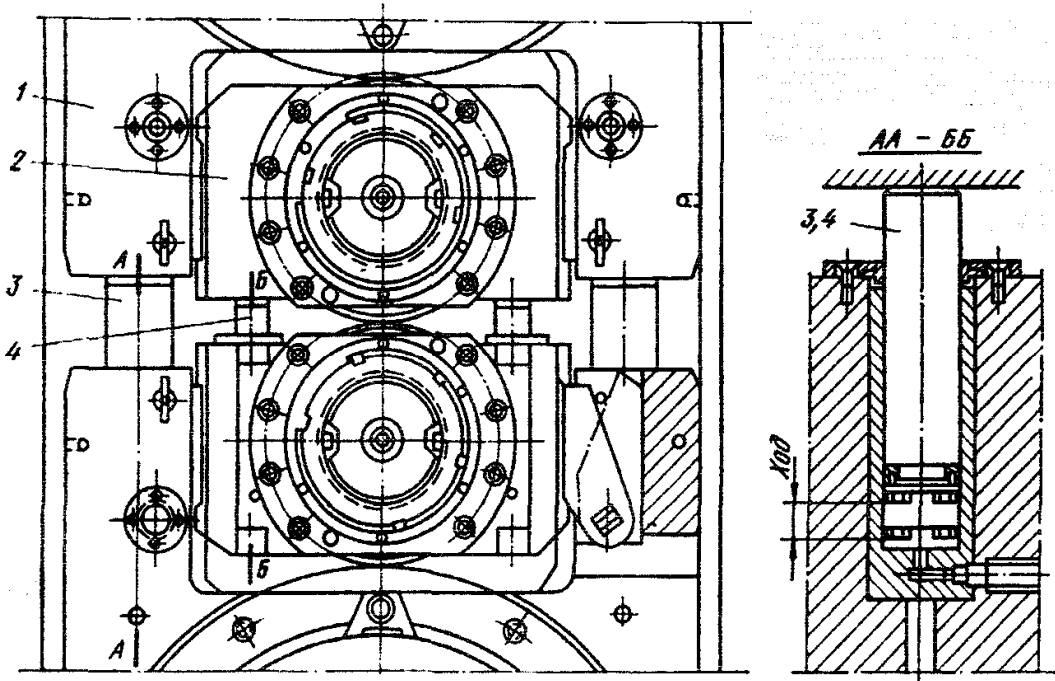


Рисунок 1.2 – Гідравлічне урівноважування верхнього робочого і опорного валків чотиривалкової кліті стана 1680

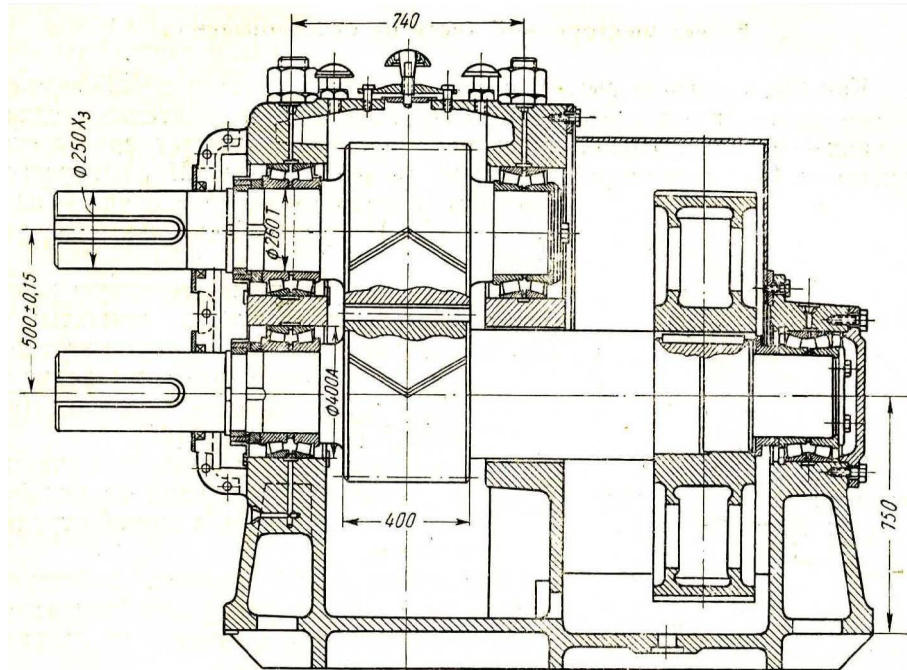
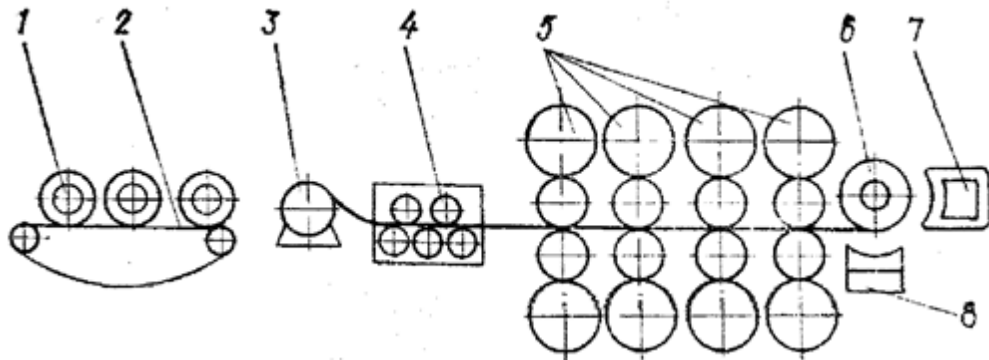


Рисунок 1.3 – Шестеренна кліть для привода валків чотиривалкової кліті стана 1680 конструкції НКМЗ

На рис. 1.4 зображена схема чотирьох клітьового неперервного стана холодної прокатки - 1680.



1 – протравлені рулони, 2 – транспортер, 3 – розмотувач, 4 – правильно-натяжна машина, 5 – валки робочих клітей, 6 – моталка, 7, 8 – коліска знімача

**Рисунок 1.4** – Схема чотирьоклітьового неперервного стана холодної прокатки 1680 ПАТ «Запоріжсталь»

Протравлені рулони 1 краном установлюються на ланцюговий транспортер 2, і передаються на розмотувач 3. Кінець штаби відгинається і задається в тягнучі ролики правильно-натяжної машини 4. Потім тягнучими роликами штаба задається у валки робочих клітей 5 (із заправною швидкістю).

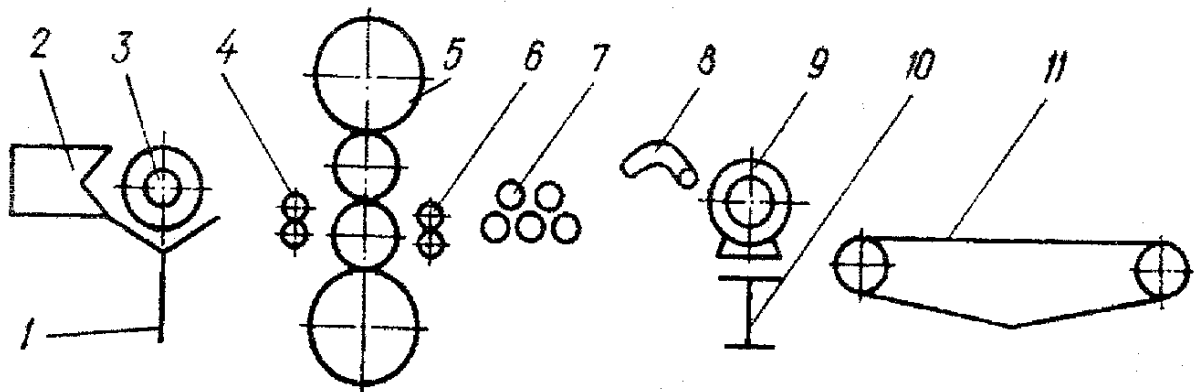
Штаба, пройшовши робочі валки 4-ї кліті, задається в барабан моталки 6. Після намотування 3...4 витків створюється натяг між 4 кліттю і моталкою, стан розганяється до робочої швидкості.

Після прокатки рулону, коли на головках розмотувача залишається два-три витка штаби, швидкість стана вповільнюється до заправної, після чого кінець штаби пропускають через робочі кліті. На барабані моталки кінець штаби фіксується коліскою знімача 8, і рулон убирається на пакувальне сковзало, потім по ланцюговому конвеєрі рулони транспортуються в термічне відділення [6].

На рис. 1.5 представлена схема одноклітьового дресирувального стану 1700. Рулони подаються ланцюговим транспортером 11 з відділення відпалу.

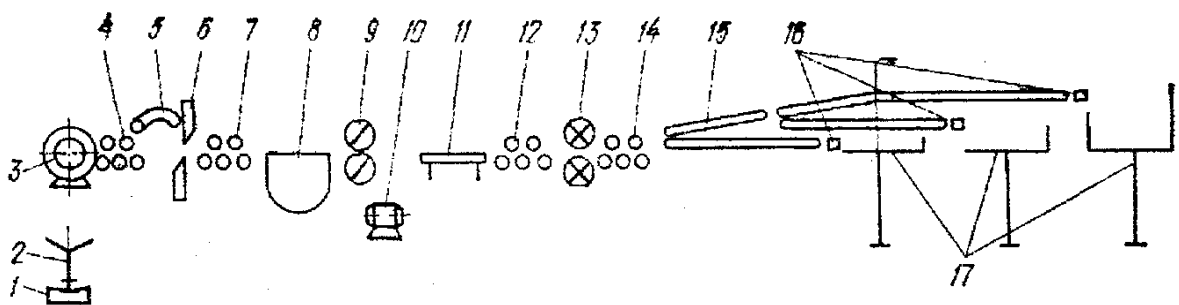
З ланцюгового транспортера рулон кантується і механізмом подачі 10 подається на розмотувач 9. Передній кінець рулону відгибачем 8 відгинається і задається на заправній швидкості в правильно-тягнучу машину 7, а потім у натяжний пристрій 6. Пройшовши валки робочої кліти 5, передній кінець штаби проходить задній натяжний пристрій 4 і намотується за допомогою захлестувача 2 на барабан моталки 3.

На рис. 1.6 представлена схема агрегату поперечного різання, призначеного для порізу штаб з вуглецевих сталей товщиною 0,6...2,0 мм, шириною 700...1500 мм на листи довжиною 1...6 м зі швидкістю 1,5...6 м/с.



1, 3 – барабан моталки, 2 – захлестувач, 4 – натяжний пристрій, 5 – валки, 6 – натяжний пристрій, 7 – правильно-тягнуча машина, 8 – відгибач, 9 – розмотувач, 10 – механізм подачі, 11 – транспортер

**Рисунок 1.5** – Схема одноклітьового дресирувального стану 1700



**Рисунок 1.6** – Схема агрегату поперечного різання холоднокатаних штаб

За допомогою крана рулони встановлюються на конвеєр 1. Черговий рулон за допомогою пересувного гідравлічного стола 2 насувається на

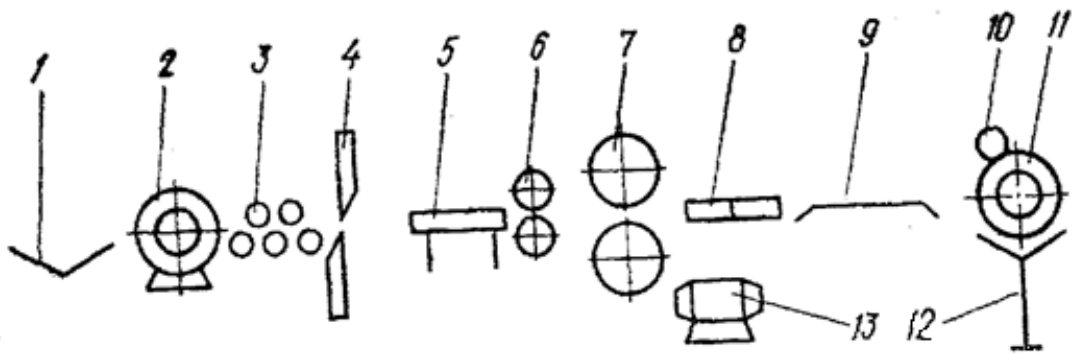


консольний барабан розмотувача 3; останній автоматично розклинається (збільшується його діаметр) і повертається в положення, необхідне для відгинання переднього кінця штаби магнітним відгибачем 6, при цьому ролик 4 опускається. Передній нерівний кінець штаби (довжиною 1 - 2 м) відрізається гідравлічними гільйотинними ножицями 6, подається роликами 7 на похилий стіл 8 і скидається в бічний короб для обрізки.

Бічні крайки штаби відрізаються дисковими ножицями 9 і змотуються в тугі мотки кромкомоталкою 10. Остаточне виправлення штаби здійснюється другою правильною машиною 12, після чого штаба розрізається на листи мірної довжини летучими барабанними ножицями 13. Петлеві столи 8 і 11 призначені для забезпечення можливості вирівнювання швидкості дискових ножиців зі швидкістю обох правильних машин.

Пакетуючий пристрій 17 складається із трьох секцій: перша – для бракованих листів, а інші дві для придатних. Листи направляються на пакетуючі столи розподільним стрічковим транспортером 15. Над нижньою областю цього транспортера встановлені перемикаючі електромагніти. Перемикання цих магнітів здійснюється від імпульсу приладів 11 контролю якості поверхні штаби, розташованих перед другою правильною машиною. Перед надходженням на пакетуючі столи придатні листи промаслюються в пристроях 16 [6].

На рис. 1.7 представлена схема агрегату поздовжнього різання холоднокатаних штаб. Цей агрегат призначений для обрізки бічних крайок рулонної штаби і різання її на вузькі стрічки. Параметри вихідних рулонів: маса до 30 т, товщина штаби 0,4 - 2,0 мм, ширина 750 - 1550 мм. Готові вузькі рулони: маса до 10 т, зовнішній діаметр до 1600 мм, внутрішній діаметр 600 мм, ширина 80 мм і більше.



**Рисунок 1.7** – Схема агрегату поздовжнього різання холоднокатаних штаб

Вихідний рулон зі стелажа 1 устанавлюється на барабан розмотувача 2, кінець штаби відгинається магнітним вигибачем 3 і обрізається ножицями 4, подається в пристрій, що промаслює, 5. Штаба проходить через контрольномаркувальний стіл 6 і дисковими багатопарними ножицями 7 розрізається на вузькі стрічки; при заправленні агрегату візок машини 8 під'їжджає до дискових ножиців і схоплює кінець стрічок, затискаючи їх між своїми роликами, безпосередньо при виході стрічок з ножів ножиців. Потім при одночасному обертанні ножів ножиців візок по напрямних переміщається до моталки 11, перед якою спеціальним пристроєм стрічки розводяться друг від друга й задаються в щілину барабана. Формування рулону стрічки здійснюється на моталці за допомогою притискного ролика, що качає, 10. Рулони стрічок за допомогою пересувного піднімального стола 12 передаються на поворотний стіл і далі краном - на упаковку. При різанні стрічок на ножицях одночасно здійснюється обрізка бічних крайок, які змотуються на кромкомоталці 18 [5].

Барабанні ножиці є однією з основних машин для різання металу. Вони набули широкого застосування для холодного різання сталевих штаб товщиною до 3 мм. Пристрій і принцип роботи полягають у наступному. На двох барабанах по їх утворюючим радіально закріплені ножі (по одному або по трьох на кожному барабані). Штаба рухається безупинно і подається до ножиців роликами (або валками останньої кліті неперервного стана) з постійною швидкістю. При зустрічі верхнього і нижнього ножів відбувається

різання штаби. Для створення розриву між відрізними шматками штаби швидкість вихідного рольганга повинна бути більше швидкості штаби перед ножицями.

### **1.3 Аналіз параметрів режиму деформації на НСХП 1680**

Слід зазначити, що створення необхідних умов для ведення ідеального процесу холодного прокатування на діючих станах пов'язане з труднощами організаційного і технологічного характеру. Ці труднощі полягають в прийнятих на кожному заводі режимах обтиснень, технологічних схемах, що склалися, традиціях і навичок персоналу. Тому сенс даного дослідження бачиться не тільки і не стільки у визначенні умов для ведення ідеального процесу холодного прокатування, скільки у виявленні оптимальних умов ведення процесу холодного прокатування як з енергетично сприятливої сторони, так і з боку отримання високої якості прокату (з низькою подовжньою і поперечною різнотовщинністю, хорошою планшетністю, високою точністю).

#### *Вибір обтиснення*

До холоднокатаних листів висуваються високі вимоги по планшетності і різнотовщинності, а також ряд інших вимог до якості листа, які виступають обмежуючим чинником при виборі режимів обтиснень.

#### *Обтиснення в першій кліті*

При прокатуванні в першій кліті заднє натягнення практично відсутнє, унаслідок чого штаба при великих обтисканнях погано центрується і має тенденцію зміщуватися убік від лінії прокатки [3]. Ця обставина обмежує обтискання в першій кліті. Крім того обтискання в першій кліті обмежується тим, що гарячекатаний підкат має істотну різнотовщинність (першу кліть необхідно використовувати для регулювання товщини штаби за допомогою САРТ і тому вона повинна мати резервну потужність для забезпечення

належного діапазону регулювання) [7].

Важливим доводом в захист знижених обтиснень в перших клітках неперервного стану є те, що ефект самовирівнювання різнотовщинності помітно виявляється лише тоді, коли деформаційне зміцнення металу порівняно невелике. Отже, зниження обтиснень в перших клітках сприяє самовирівнюванню подовжньої різнотовщинності.

#### *Обтиснення в останній клітці стана*

При виборі величини обтиснення в останній клітці безперервних станів враховують, що дуже велике обтиснення утрудняє надходження мастила в зону деформації, внаслідок чого погіршується якість поверхні. іноді йдуть на збільшення обтиснення в останній клітці з тим, щоб мати між останньою і передостанньою клітками підвищену товщину штаби [4]. Це зменшує вірогідність обриву штаби при натягненні. Завдяки значній деформації в останній клітці температура штаби зростає і при змотуванні штаби в рулон складає близько 200°C. Це сприятливо позначається на якості профілю прокатої штаби, оскільки відбувається штаби розтягуванням при підвищеній температурі.

Обтиснення в останній клітці не може бути малим також тому, що з його величиною пов'язана якість регулювання товщини штаби на виході неперервного стана. Для умов роботи чотириклітьового стану 1700 Маріупольського меткомбінату при прокатуванні сталі з 2,0 на 0,5 мм відносне обтиснення в четвертій клітці складає 23%. При 20%-ній допустимій зміні натягнення штаби вальцювальник зможе відпрацювати відносну різнотовщинність штаби.

#### *Вибір натягання штаби*

Коливання обтиснень в першій клітці неперервного стану холодної прокатки (до 10 – 15 %), викликані подовжньою різнотовщинністю гарячекатаних штаб і роботою грубого регулятора товщини здійснюють істотний вплив на профіль і форму прокатаних штаб і весь процес прокатки.

Одна і та ж нерівномірність деформації при прокатуванні в області короба призводить до меншого в 1,2...1,4 рази відхилення штаби від плоского стану, чим при прокатуванні хвилястої штаби.

Переднє натягання діє на форму коробоватої штаби ефективніше, ніж на хвилясту штабу. У зв'язку з цим, зважаючи на специфіку роботи перших клітей і наявність достатнього запасу пластичності металу, розрахунок профілізацій і режиму обтиснень необхідно проводити з урахуванням прокатки в них штаб з деякою коробоватістю

Переднє натягання найбільш ефективно впливає на профіль і форму штаби в межах до 40 - 50 МПа. Подальше збільшення натягання з метою поліпшення їх площинності недоцільне [8].

#### *Температурні умови прокатки*

Процес холодної прокатки виявляється найбільш стабільним при температурі валків 55 – 60°C, яка забезпечується при температурі емульсії 45 – 50°C і її витраті 420 – 630 м<sup>3</sup>/год. При цьому гаряча емульсія має хорошу відмиваючу здатність. При охолодженні емульсією валків на штабі менше відкладається жирова, що призводить до утворення сажі при відпалі. Прокатка ж на емульсії з температурою вище 55°C викликає інтенсивне випаровування, яке перешкоджає візуальному спостереженню за профілем прокатуваних штаб.

В даний час на стані холодної прокатки ПАТ «Запоріжсталь» валки охолоджуються емульсією з температурою 45 – 50°C. Це дозволило збільшити продуктивність стана і на 0,5% кількість металу, відсортованого по дефектам площинності.

### **1.4 Аналіз вузьких місць та заходи щодо реконструкції**

Неперервний чотириклітьовий стан 1680 ПАТ «Запоріжсталь» є високомеханізованим станом з високим ступенем автоматизації. Проте стан має ряд недоліків, які заважають підвищенню обсягів виробництва і якості прокату.

1. існуюча емульсійна система на стані – малопотужна, витрата емульсії 260 м<sup>3</sup>/год (на всі кліті). Через це погіршується якість прокату, а також відбувається перегрів валків і не забезпечується проектна швидкість прокатки 10 м/с.

Введення в мінеральні мастила 20-40 % жирових присадок, а також застосування, як змащувачів, прокатних емульсолів дозволяє забезпечити надійний захист штаби від дефектів при змотуванні в рулон і зменшити енерговитрати на прокатку. Використання емульсолів водорозчинного типу дозволяє підтримувати постійною концентрацію масляної фази в прокатній емульсії.

Основною причиною утворення сажі на поверхні прокату є залишки мастила. Для зменшення сажоутворення при відпалі ефективно застосування водорозчинних промаслюючих складів, прокатку шліфованими валками, якісне видалення емульсії з поверхні прокату.

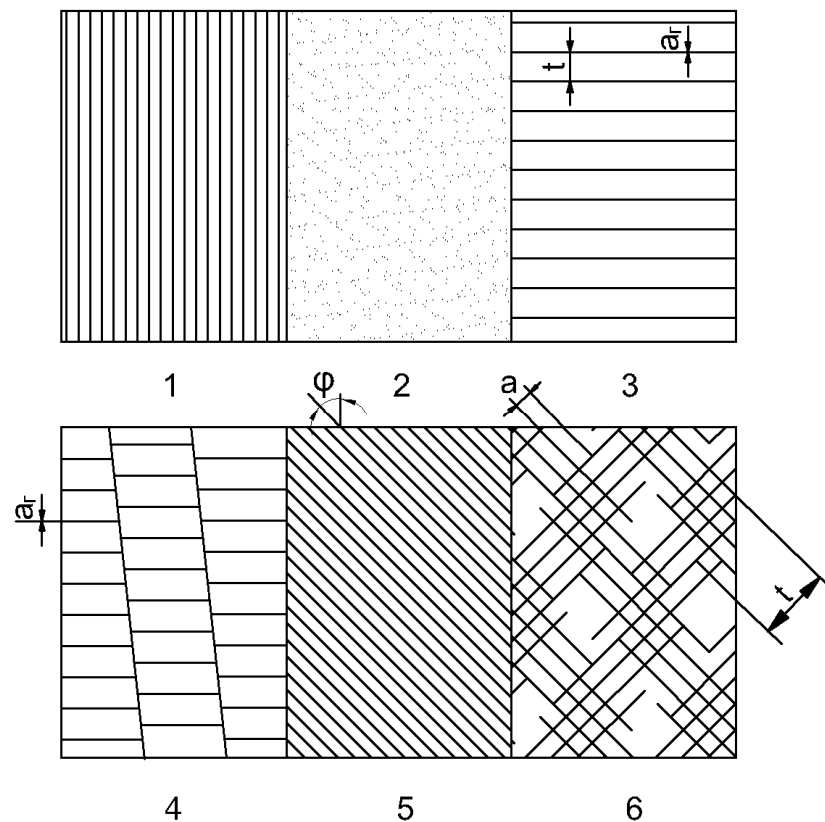
Пропонується реконструювати емульсійну систему стана з метою забезпечення витрати емульсії на стан 700 - 800 м<sup>3</sup>/год. Ця реконструкція дозволить підвищити продуктивність стана і поліпшити якість прокату.

2. Реконструювати існуючий агрегат для промаслення рулонів з установкою пристрою для промаслення сталевого прокату в електричному полі. Це дозволить збільшити швидкість промаслення з 1,5 – 3 м/с до 4 – 6 м/с, з меншою витратою мастила (щільність нанесення мастила – 1,5 г/м<sup>2</sup> на робочій швидкості).

3. Застосувати використання валків з регулярним рельєфом поверхні.

На неперервних станах холодної прокатки в першій і чистовій (4-та кліть на стані 1680), а іноді і в передчистовій клітях використовують робочі валки з насіченою поверхнею  $R_a = 3 - 6$  мкм, а в проміжних клітях (3-я кліть на стані 1680) – валки зі шліфованою поверхнею ( $R_a = 0,8 - 1,6$  мкм). Застосування насічених валків в кліті 1 обумовлено необхідністю покращення умов захвату штаби і запобігання пробуксовки валків по штабі в процесі прокатки. В чистовій і передчистовій клітях нанесення на поверхню штаби шерохватості запобігає зварюванню витків рулону в процесі рекристалізаційного відпалу в ковпакових печах.

Вплив рельєфу валків різного типу на параметри прокатки вивчався в лабораторних і промислових умовах [9]. Досліди проводилися на стані з валками діаметром 100 мм і окружною швидкістю  $v \approx 0,3$  м/с. Поверхні типу 1, 5, 6 (рис. 1.8.) створювалися шліфуванням наждачним папером, а поверхня 2 - прокаткою наждачного паперу у валках. Поверхня типу 3 створювалася нанесенням на валок подовжніх рисок з різним кроком (довжина рисок по колу валка  $a_r = 0,1 \dots 0,15$  мм, глибина  $0,05 \dots 0,1$  мм). Поверхня типу 4 створювалася також при віброшліфуванні валка абразивним кругом ( $a_r = 0,7 \dots 1,0$  мм,  $t = 1 \dots 1,5$  мм). Прокатувалися штаби розмірами  $H = 1-1,3$  мм  $B \approx 20$  мм без зміни зазору між валками. Технологічне мастило - емульсол Т. Під час прокатки випередження вимірювалося методом кернових відміток, силу прокатки - месдозами з тензометричними датчиками.



1 — шліфування при  $\phi = 0$ ; 2 — насічка; 3 — хвилястий з подовжніми ризками; 4 - хвилястий із зміщеними подовжніми гранями; 5 - шліфування з  $\phi > 0$ ; 6 - шліфування з  $\phi < 0$  («клітка»).

**Рисунок 1.8** – Рельєф поверхні валка

По дослідних величинах випередження і сили прокатки розраховувалися коефіцієнт тертя і середній нормальний тиск:

$$\gamma_c = \sqrt{Sh / R_c}; \quad (1.1)$$

$$f = 0,5\alpha_c / (1 - 2\gamma_c / \alpha_c); \quad (1.2)$$

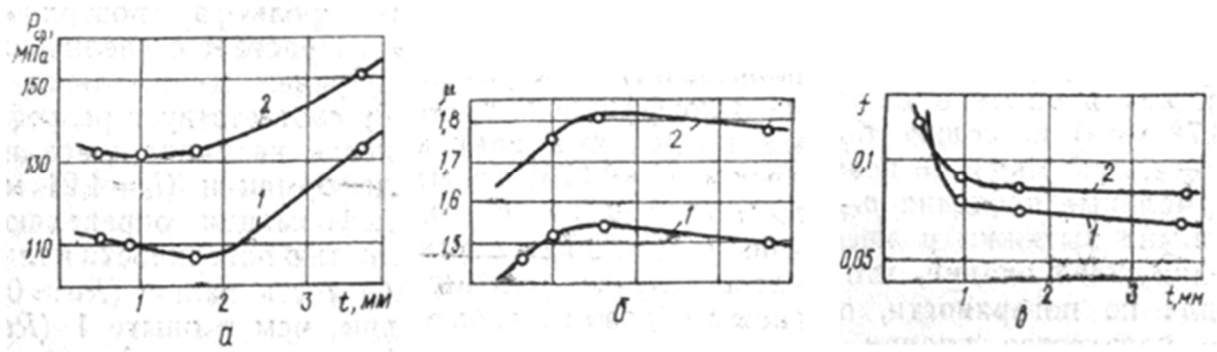
$$p_{cp} = P / Bl_c; \quad (1.3)$$

де  $S$  — випередження;  $h$  — товщина штаби після прокатки;  $P$  — сила прокатки;  $B$  — середня ширина штаби в осередку деформації;  $R_c$ ,  $l_c$ ,  $\alpha_c$ ,  $\gamma_c$  - радіус валків, довжина дуги контакту, кут захвату та нейтрального перетину.

Результати досліджень, представлені на рис. 1.9, указують на помітний вплив рельєфу поверхні валка на параметри прокатки. При прокатуванні з обтиском  $\varepsilon \approx 32\%$  (досліди 1-6) у шліфованих валках (рельєф типу 1) коефіцієнт тертя має мінімальне значення 0,074, а при прокатуванні у насічених валках (рельєф типу 2) коефіцієнт тертя максимальний 0,185, що обумовлене збільшенням опору ковзанню металу на поверхнях контакту в осередку деформації. При використанні регулярного рельєфу поверхні типу 3 коефіцієнт тертя зростає із збільшенням кроку подовжніх западин. Причому мінімальне його значення 0,075 (досвід 6) відповідає рельєфу з кроком западин  $t = 3,6$  мм, коли величина кроку приблизно дорівнює довжині осередку деформації  $l_c = 4,21$  мм. В цьому випадку умови деформації визначаються головним чином шорсткістю поверхні валків. Оскільки в досліді 6 шорсткість валка ( $R_a = 0,7...0,78$  мкм) дещо більше, ніж в досліді 1 ( $R_a = 0,44...0,65$  мкм), то коефіцієнт тертя і середній нормальний тиск дещо більше, а коефіцієнт витяжки декілька менше. При зменшенні кроку западин, що утрудняє ковзання металу по поверхні, особливо в зоні відставання, де кількість западин завжди більша, відбувається збільшення витяжки в зоні випередження і, разом з цим, збільшення коефіцієнту тертя (досліди 3-5).

Внаслідок неспівпадання в одному вертикальному перетині осередку деформації западин верхнього і нижнього валків, процес прокатки у валках з подібним рельєфом виявляється несиметричним і викликає появу в об'ємі подовжнього розтягуючого напруження, що деформується [9].





**Рисунок 1.9** - Зміна середнього нормального тиску (а), коефіцієнта витяжки (б), коефіцієнта тертя (в) залежно від кроку подовжніх западин на поверхні валка при  $\epsilon$ , %: 1 - 32; 2 - 41 (поверхня типу 3).

Наявністю подовжнього розтягуючого напруження можна пояснити великі значення коефіцієнта витяжки (1,52...1,54) при прокатці у валках з  $t = 0,9...1,6$  мм в порівнянні з прокаткою в шліфованих валках ( $\mu = 1,48$ ) (рис. 1.9, б, досліди 1, 4, 5). При цих же значеннях  $t$  отримані і мінімальні величини нормального контактного напруження (106,4 - 110,5 МПа проти 120,4 МПа в досліді 1).

Таким чином, при прокатуванні у валках з подовжніми западинами (рельєф 3) на поверхні існують оптимальні параметри рельєфу, які забезпечують максимальну витяжку штаби при однаковій шорсткості поверхні валків. При прокатуванні у валках з насіченою поверхнею коефіцієнт витяжки мінімальний, а середня нормальна напруга в 1,28-1,83 рази вище, ніж в дослідях 1, 3 - 6. Аналогічні залежності отримані при деформації металу з обтиском  $\epsilon = 41\%$  (рис. 1.9) і при повторних дослідженнях з обтиском  $\epsilon = 25\%$ , що підтверджує достовірність отриманих результатів. При прокатуванні в таких валках виступи на штабах виразно видно на профілеграмах, а їх висота дорівнює  $R_t = 6...10$  мкм.

Валки з рельєфом типу 4 мають такі ж переваги, що і валки з рельєфом типу 3 і дозволяють підвищити стійкість штаби проти зсуву на край бочки.

Рельєф валків з косим орієнтуванням ліній западин і гребнів (тип 5, 6) виявляється енергоємнішим при будь-яких значеннях кута  $\varphi > 0$  в порівнянні з рельєфом типу 1. Досліди показують, що прокатка у валках з таким профілем приводить до збільшення коефіцієнту тертя в 1,2 - 1,25 рази, а середнього нормального напруження в 1,1 - 1,13 рази у порівнянні з прокаткою у валках з  $\varphi = 0$ .

## 1.5 Новітні досягнення в технології прокатного виробництва

Прогрес в прокатному виробництві грає визначальну роль в машинобудуванні, рівень якого характеризує стан вітчизняної економіки. Технології прокатки, ступінь їх досконалості і новизни, технічні характеристики прокатного устаткування в значній мірі визначають якість готового прокату.

Гаряча і холодна прокатка широких штаб є завершальними операціями в процесі виробництва прокату. Саме на цій стадії виникають проблеми з якістю, від якої залежить ціна і об'єм реалізації готової продукції.

Метою модернізації сучасного листопрокатного виробництва є, перш за все, підвищення якості продукції і продуктивності прокатних станів. Для цього встановлюються гідронатискні пристрої (ГНП) замість традиційних електромеханічних, упроваджуються системи противигину валків, осьового і кутового зрушення валків, використовуються досконаліші схеми автоматичного регулювання товщини штаби.

У літературі [10] звертається увага на такі технології, як литво тонких слябів, прокатка надтонкої гарячекатаної штаби, безперервне литво і прокатка товстого листа, прокатні кліті з розширеним діапазоном настройки, нові системи автоматизації. Важливим технічним досягненням на думку фахівців є створення нового безперервного агрегату литва і прокатки Luna на заводі фірми ABS (Acciaierie Bertoli Safau, Удіне/Італія).

Нова технологія включає безперервний процес литва, прокатки, відпалу, випробування, правки, дробеструйної обробки, обробки і упаковки прокату. Міні-завод розрахований на випуск круглих і квадратних заготовок з вуглецевих, низьколегованих, корозійно стійких, підшипникових і пружинних сталей для машинобудування і автомобільної промисловості.

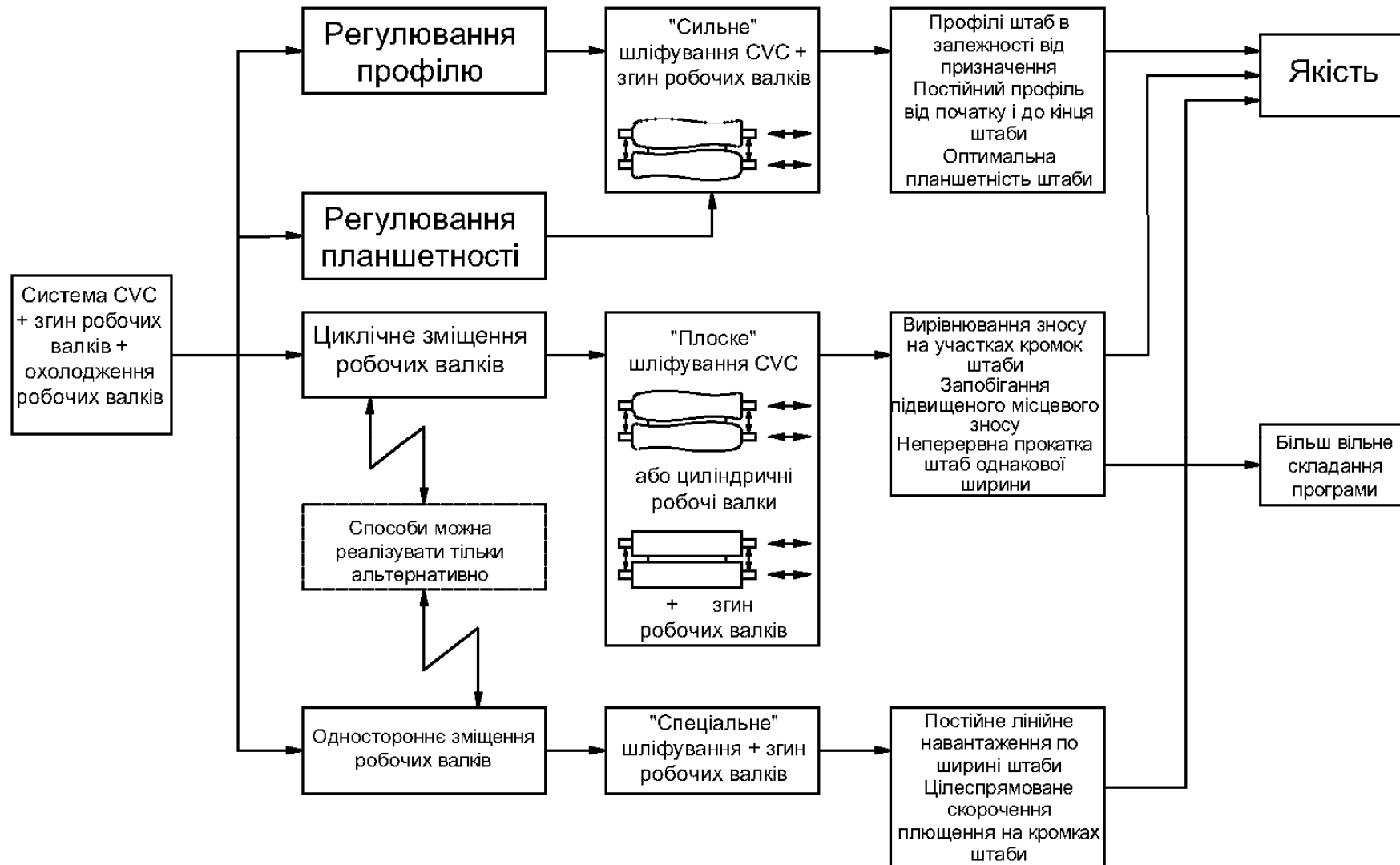
Розроблена фірмою SMS-DEMAG (Дюсельдорф) технологія високоякісної прокатки (High-Tech-Rolling) представляє набір оптимально узгоджених між собою модулів в замкнутій системі [10]. Технологія SVC (безперервна зміна профілю штаби) займає в ній ключову позицію. High-Tech-

Rolling є сукупністю виконавчих механізмів і систем регулювання. Для регулювання товщини штаби передбачені гідравлічні натискні механізми, а для отримання бажаного профілю використовується технологія бочкоподібності валка, що безступінчасто змінюється. За допомогою SVC на кожній кліті точно встановлюються значення бочкоподібності, закладені в програмі прокатки. У поєднанні з швидкореагуючим пристроєм противигину валків виходить виконавська система з високою динамікою регулювання товщини і профілю штаби. На рис. 1.10 показана стратегія виробництва штаб, а на рис. 1.11 - схема регулювання товщини, профілю і планшетності на широкоштабовому стані гарячої прокатки фірми Thyssen Stahl AG в Бескерверті (Німеччина).

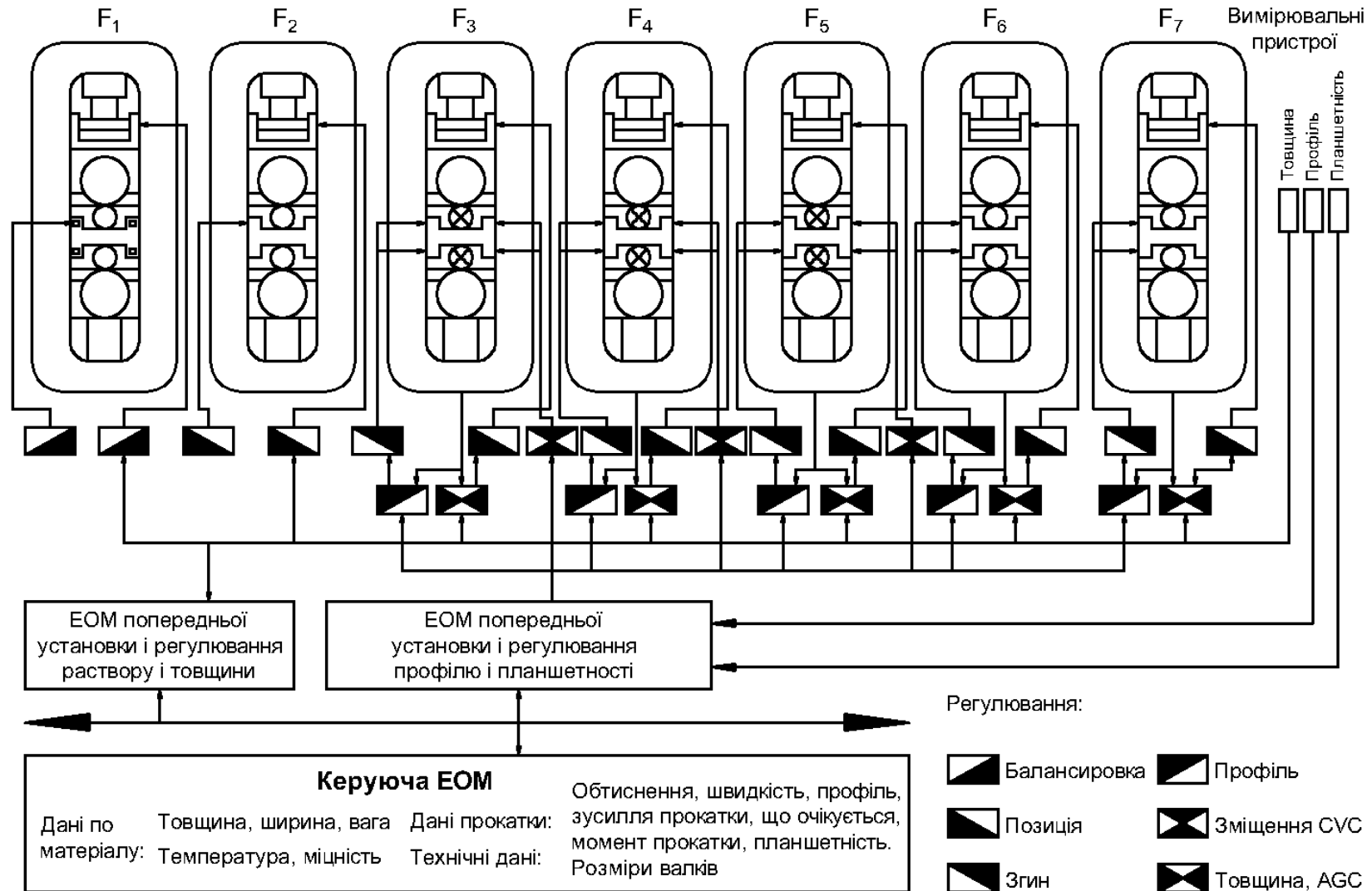
На клітях F3 - F5 встановлені системи SVC, а на клітях F3 – F7 системи вигину робочих валків. Задані ЕОМ, що управляє, (див. рис. 1.11) виробничі дані приймаються ЕОМ регулювання міжвалкового зазору валків і товщини штаби і ЕОМ регулювання профілю і планшетності штаби.

ЕОМ регулювання міжвалкового зазору і товщини штаби розраховує значення для попередньої установки міжвалкового зазору валків і передає відповідні значення на систему регулювання натискним гідравлічним механізмом клітей F1-F7. ЕОМ профілю і планшетності розраховує, виходячи з прийнятих даних, значення для попередньої установки міжвалкового зазору валків і видає їх на пристрій позиційного регулювання системи переміщення SVC. Така ж інформація поступає на регулювальні контури профілю, які у свою чергу передають задані значення для відповідної системи противигину робочих валків.

Сигнали коректування, що поступають з вимірювального приладу планшетності, приймаються відповідними системами регулювання, після чого спрацьовують системи противигину робочих валків [10].



**Рисунок 1.10** – Стратегія виробництва штаб найвищої якості



**Рисунок 1.11** – інтегровані пристрої регулювання товщини, профілю і планшетності на широкоштабовому стані гарячої прокатки фірми Thyssen Stahl AG в Беккерверте

Принцип дії системи CVC полягає в наступному (рис. 1.12) [10].

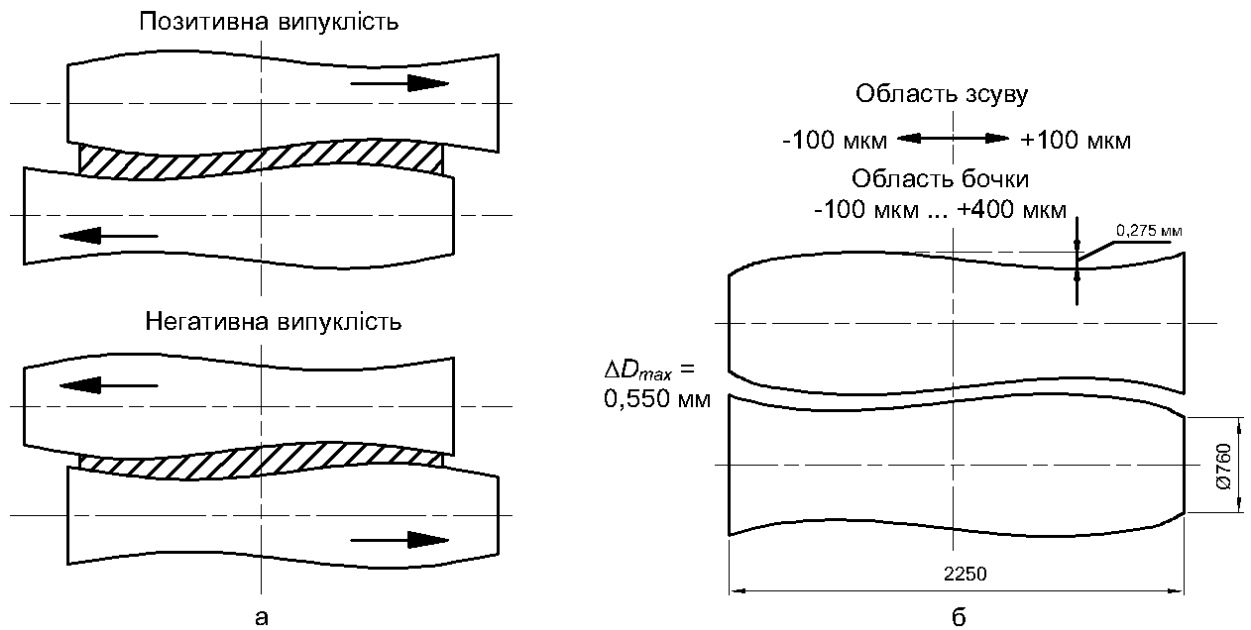
Верхній і нижній робочі валки мають S - образний профіль, ідентичний для обох валків. Валки зміщені щодо один одного на  $180^\circ$ , тому вони доповнюють один одного, утворюючи параболічно симетричний контур міжвалкового зазору. При подовжньому взаємному зсуві відбувається *геометрична* зміна контуру міжвалкового зазору з ефектом негативної або позитивної випуклості валка залежно від напрямку зсуву. Оскільки сумарний зсув вибирається плавно, то випуклість валка змінюється безперервно відповідно до умов прокатки.

Відповідно до технології CVC в перших клітках стана гарячої прокатки форма міжвалкового зазору настроюється на потрібний профіль штаби, який витримується в останніх клітках, що забезпечує її планшетність. Для цього використовується *противигин* робочих валків. На рис. 1.13 показано співвідношення між необхідною зміною зусиль противигину і прокатки залежно від ширини штаби. Таким же чином автоматично витримується постійним контур міжвалкового зазору і профіль штаби при зміні зусилля прокатки по довжині штаби.

При односторонній хвилястості кромки автоматично приводяться в дію натискні механізми останньої клітки, які повертають валки до тих пір, поки штаба не стане рівною.

із-за місцевого зносу робочих валків, особливо при прокатуванні штаб з високоміцного матеріалу, в профілі штаби можуть виникати випуклі плями або потовщення на кромках штаби, які на стані холодної прокатки приводять до непоправних дефектів планшетності, а на стані гарячої прокатки - до поперечної разнотолщинності штаби. Для усунення даного дефекту застосовують циклічне зрушення робочих валків.

із-за пружного сплющення валків в області кромки штаби часто виникає зменшення профілю. Це явище усувають шліфівкою контура робочого валка на певну довжину. При максимальній ширині штаби валки мають мінімальну випуклість бочки.



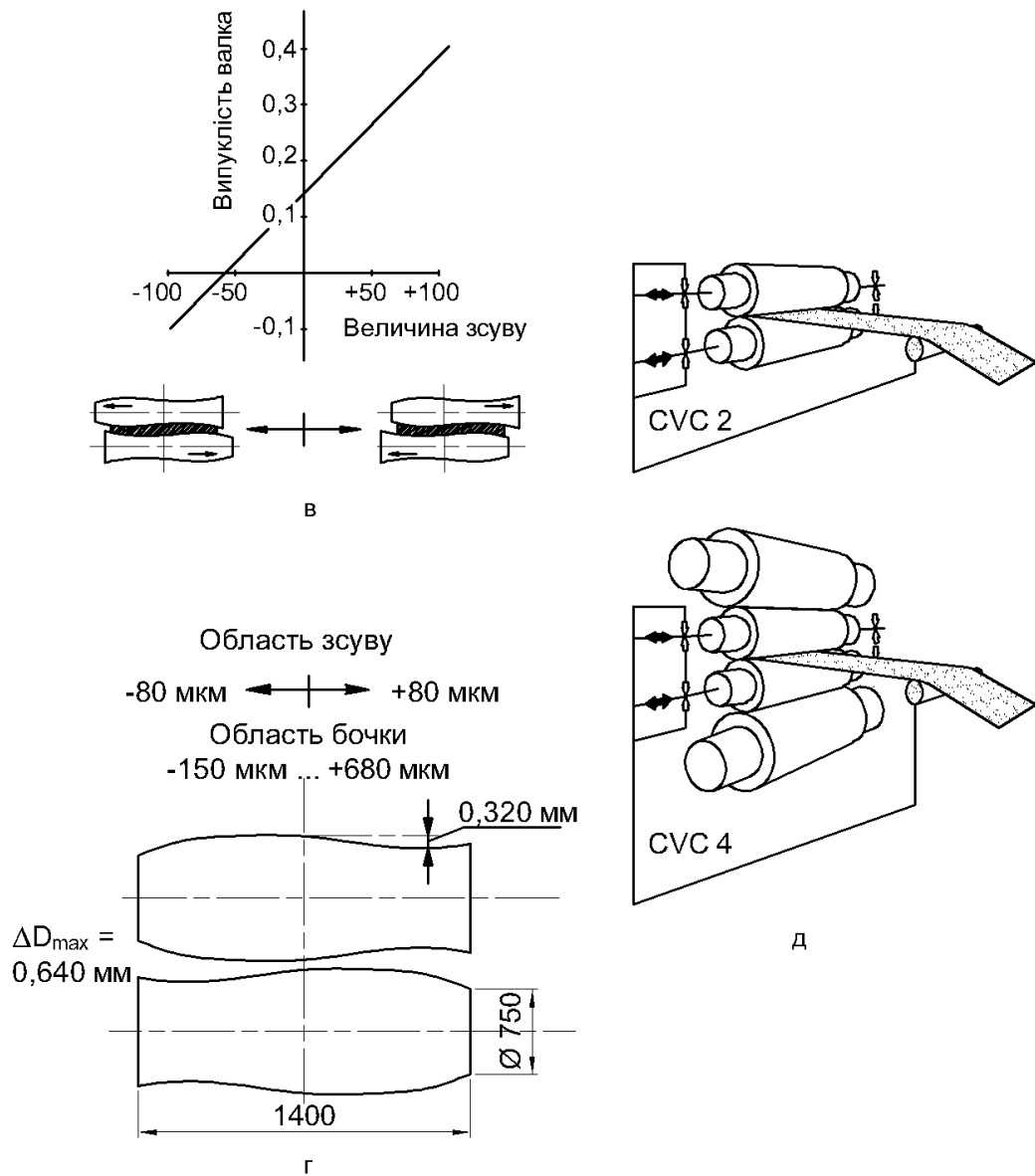
а - принцип неперервної зміни штаби (НСШ); б - конструкція валків НЗШ для стану гарячої прокатки; в - залежність між величиною зсуву і регулюємою випуклістю за допомогою системи НЗШ; г - конструкція валків НЗШ для дресирувального стану; д - застосування системи SVC у різних схемах прокатки штаб; е - прокатний стан з SVC; ж - осьове переміщення валків в підшипниках Моргойла на кліті ДУО

**Рисунок 1.12** - Принцип дії системи SVC

У разі прокатки вузьких штаб, при зрушенні валків відбувається зміна випуклості валка - вона збільшується. Таким чином, компенсується природний прогин робочих і опорних валків і створюються умови для регулювання планшетності на останній кліті [10].

У тандем - станах холодної прокатки планшетність штаби при правильному розподілі обтиснення визначається останньою кліттю, тому в неї вбудована система SVC, що працює спільно з системами противигину робочих валків і натискних гідравлічних механізмів.

Як приклади реалізації технології High-Tech-Rolling і технології SVC фірмою СМС Шлоеманн Зімаг Акциенгезельшафт можна привести широкоштабовий стан гарячої прокатки 2050 мм (введений в експлуатацію в 1990 р.) і стан холодної прокатки (1988 р.) в Китаї.



**Рисунок 1.12 - Продовження**

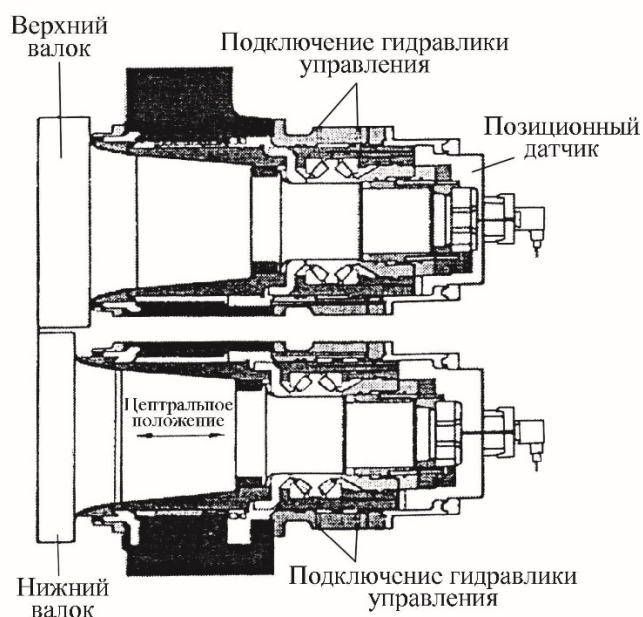
На стані гарячої прокатки, на ділянці чорнової групи, застосовані гідронатискні механізми, що використовуються як установочні органи в автоматичній системі регулювання ширини прокату. High-Tech-Rolling в чистовій групі клітей представлена установочними і регулюючими системами: гідронатискними механізмами, системою CVC і системою противигину робочих валків, спільна робота яких забезпечує високу якість кінцевої продукції (прокатки в полі допуску, мінімальна подовжня і поперечна різнотовщинність, висока планшетність). Усі сім чистових клітей оснащені гідромеханічними механізмами. Електромеханічні установочні механізми



служать тільки для компенсації зносу робочих валків і для переміщення валків при перевалці. Максимальне зусилля прокатки складає 45 МН на клітках F1 - F3 і 40 МН на F4 - F7. Швидкість електромеханічної установки валків 5 мм/с, гідравлічної, - 3 мм/с. Всі чистові кліти оснащені системами CVC і системами вигину робочих валків. На рис. 1.14 показана сучасна кліть F3 [10].

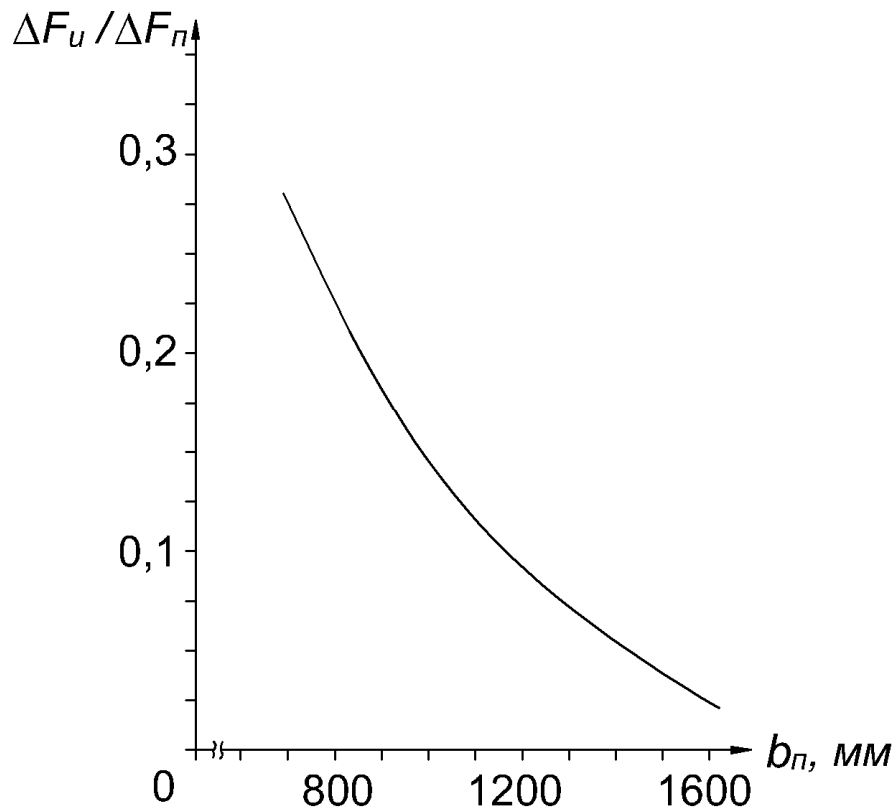


e)



ж)

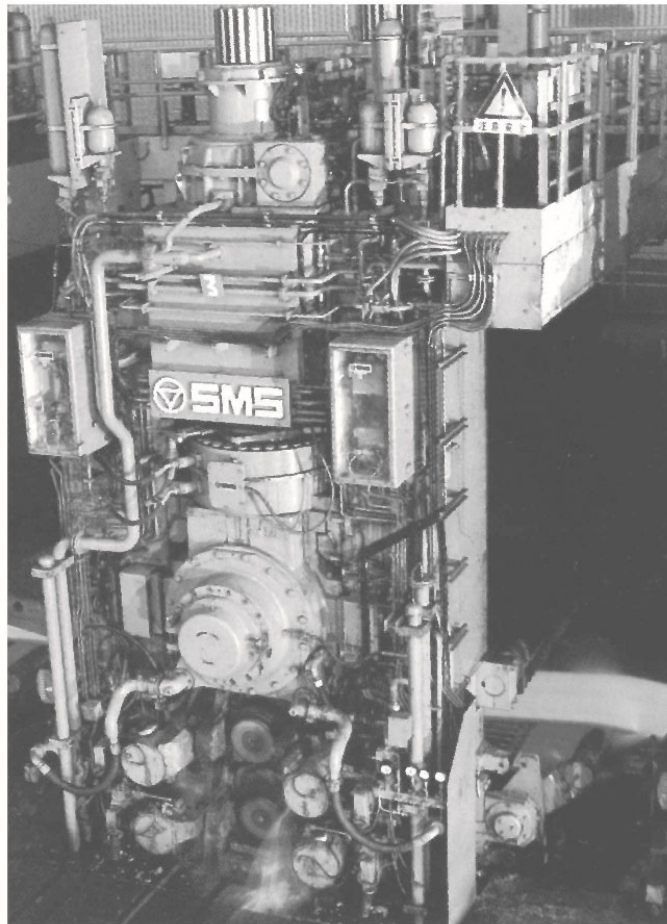
**Рисунок 1.12 - Закінчення**



**Рисунок 1.13**– Залежність коефіцієнта кореляції ( $\Delta F_u / \Delta F_n$ ) від ширини штаби:

$\Delta F_u$  і  $\Delta F_n$  – зміна зусилля відповідно противигину і прокатки

На п'ятиклітьовому стані холодної прокатки фірми Шлоеманн-Зімаг прокатують травлену гарячекатану штабу завтовшки 1,8...6,0 мм з отриманням холоднокатаної штаби товщиною 0,3...3,5 мм, а також високолеговану сталеву штабу з високою межею міцності (рис. 1.15). Ширина штаби складає 900...1850 мм; максимальна швидкість прокатки 1900 м/хвил; ємкість накопичувача - 720 м. Для отримання максимальної якості (по планшетності і допускам) стан обладнаний системою CVC на кліті № 5 для безступінчастого регулювання міжвалкового зазору [10].



**Рисунок 1.14** – Сучасна прокатна кліть F3



**Рисунок 1.15** – Неперервний стан – тандем з пристроями для перевалки валків

## 2 ДОСЛІДНИЦЬКО – РОЗРАХУНКОВА ЧАСТИНА

### 2.1 Вступ

На сучасних безперервних і дресирувальних станах існують такі основні засоби та канали, які можуть бути використані під час регулювання площинності штаб [8]:

1) гідровигин робочих валків і їхній перекис у вертикальній площині - оперативні канали, що функціонують у темпі з процесом прокатки;

2) диференційована подача охолоджувальної рідини по довжині бочки валків - менш оперативний (інерційний) канал, який також функціонує в темпі з процесом;

3) верстатні профілювання валків - не можуть змінюватися в процесі прокатки;

4) режим прокатки (дресирування) (швидкість, натяг, обтиснення) - непрямий канал, який можна використати під час регулювання площинності завдяки можливості зміни деформаційних умов за шириною штаби (збільшення або зменшення прогину валків, тобто збільшення або зменшення обтиснення на краях штаби та досягнення протилежного ефекту в її середній частині).

Верстатне профілювання валків слугує для компенсації їхнього прогину від зусилля прокатки (дресирування) і вирівнювання деформації по ширині штаби. Правильний вибір вихідного верстатного профілювання валків дає змогу забезпечити хорошу площинність штаб завдяки розширенню можливостей і діапазону оперативних каналів регулювання.

## 2.2 Управління якістю поверхні тонкоштабового прокату з метою її покращення в умовах холодної прокатки

### 2.2.1 Розрахунок профілювань валків станів холодної прокатки

Верстатне профілювання робочих валків задається залежно від типорозміру штаб, що прокочуються (ширини, товщини і марки сталі). В процесі прокатки вихідним верстатним профілюванням керувати неможливо.

Обчислити значення верстатних профілювань можна за формулою (2.1):

$$z_{ст.р.}(y) = \frac{1}{2} \{ [h(y) - h(0)] + [z_{р.п.}(y) - z_{р.п.}(0)] \} - z_T(y) + z_p(y), \quad (2.1)$$

де  $z_{р.п.}(0)$ ,  $z_{р.п.}(y)$  – сплющування робочого валка і штаби в зоні контакту на початку координат і по ширині штаби ( $y=0$  - середина штаби,  $-B/2 \leq y \leq +B/2$ ,  $B$  - ширина штаби), мм;

$z_T(y)$  – теплове профілювання робочого валка, мм;

$z_p(y)$  – загальний прогин робочого валка під дією зусилля прокатки і зусилля гідровигину, мм;

$h(y)$ ,  $h(0)$  – оцінка товщини штаби, мм.

Прогин робочого валка розраховували за формулою:

$$z_p(y) = \int_0^y \{ G_{p_p}(y, \xi) [q(\xi) - P(\xi)] d\xi \pm G_{F_p} F(\xi) d\xi \} + \int_y^l \{ G'_{p_p}(y, \xi) [q(\xi) - P(\xi)] d\xi \pm G_{F_p} F(\xi) d\xi \}, \quad (2.2)$$

де  $q(\xi)$  – функція міжвалкового тиску;

$P(\xi)$  – функція, що описує погонне зусилля прокатки;

$F(\xi)$  – функція, що описує погонне зусилля гідровигину;

$G(y, \xi)$  – функція впливу (Гріна) для обчислення прогинів від спільної дії згинальних моментів і поперечних зусиль має такий вигляд:

$$G_{p_p}(y, \xi) = k_p \left\{ \left( \frac{y}{l} \right)^2 \cdot \left[ 3 \left( \frac{\xi}{l} \right) - \left( \frac{y}{l} \right) \right] + (1 + \nu_p) \left( \frac{y}{l} \right) \left( \frac{D_p}{l} \right)^2 \right\}, \quad (2.3)$$

$$G'_{p_p}(y, \xi) = k_p \left\{ \left( \frac{\xi}{l} \right)^2 \cdot \left[ 3 \left( \frac{y}{l} \right) - \left( \frac{\xi}{l} \right) \right] + (1 + \nu_p) \left( \frac{\xi}{l} \right) \left( \frac{D_p}{l} \right)^2 \right\}, \quad (2.4)$$

$$G_{F_p}(y, \xi) = k_p \left\{ \left( \frac{y}{l} \right)^2 \cdot \left[ 3 \left( \frac{l_F^*}{l} \right) - \left( \frac{y}{l} \right) \right] + (1 + \nu_p) \left( \frac{y}{l} \right) \left( \frac{D_p}{l} \right)^2 \right\}, \quad (2.5)$$

$$k_p = \frac{l^3}{6E_p J_p}; \quad (2.6)$$

$G_{Pp}(y, \xi)$ ,  $G_{Fp}(y, \xi)$  – функція впливу для прогину робочого валка від дій рівномірно розподіленого навантаження на одиницю довжини і додаткового вигину валків;

$l$  – половина довжини бочки робочих валків, м;

$y$  – координата по ширині штаби, м;

$\xi$  – точка прикладання згинального навантаження;

$D_p$  – діаметр робочого валка, м;

$\nu_p$ ,  $E_p$  – коефіцієнт Пуассона, модуль Юнга матеріалу робочого валка;

$l_F^*$  – відстань від точки докладання зусилля гідровигину валків до центральної лінії прокатки (до середини штаби), м;

$J_p$  – момент інерції окружності робочого валка:

$$J_p = \frac{\pi D_p^4}{64}, \text{ м}^4.$$

Сплющення робочого валка в зоні контакту зі штабою обчислювали за формулою (2.7), в якій враховується режим прокатки і діаметр робочих валків.

$$z_{p.n.}(y) = [a_1 + a_2 P(y)] z_H(y), \quad (2.7)$$

де  $z_H(y)$  – сплющування валка за Герцом:

$$z_H(y) = 2P(y) C_p \ln \left( \frac{\sqrt[3]{e^2 D_p}}{2C_p P(y)} \right);$$

$$C_p – \text{постійна пружності} \left( C_p = \frac{1 - \nu_p^2}{\pi E_p} \right);$$

$P(y)$  – функція зусилля прокатки, Н;

$a_1$ ,  $a_2$  – емпіричні коефіцієнти, одержувані експериментально для кожного конкретного прокатного стану.

Величину теплової опуклості робочих валків обчислювали за формулою [8]:

$$z_T(y) = \alpha \cdot \delta t \cdot D_p \cdot y/l, \quad (2.8)$$

де  $\delta t$  – різниця температур по довжині бочки валка, °С;

$\alpha$  - коефіцієнт температурного розширення, °С<sup>-1</sup>; (для сталі  $\alpha \approx 13 \cdot 10^{-6}$  °С<sup>-1</sup>).

### Приклад

Довжина бочки валка  $L_\delta = 2,03$  м ( $l = 1,015$  м).

Діаметр робочого валка  $D_p = 0,6$  м.

Відстань від точки докладання зусилля гідровигину робочих валків до центральної лінії штаби  $l_F^* = 1,375$  м.

$\Delta h = [h(\epsilon) - h(0)] = -0,07 \div -0,01$  мм (менше значення відповідає опуклості підкату, більше - холоднокатаній штабі);  $\epsilon = B/2$ .

Модуль Юнга  $E_p \approx 2,1 \cdot 10^5$  МПа.

Коефіцієнт Пуассона  $\nu_p = 0,33$ .

Результати обчислень представлені в табл. 2.1.

**Таблиця 2.1** - Результати обчислень за формулою (2.1) і рекомендовані значення верстатних профілювань робочих валків стана 2030

№ з/п	Ширина штаби, мм	Зусилля прокатки, МН	Величина пружної деформації робочого валка, мм		Різниця сплющування робочого валка і штаби в зоні контакту, мм	Тепловий профіль робочого валка, мм	Сумарне верстатне профілювання робочих валків за клітьми, мм					
			Від зусилля прокатки	Від зусилля гідровигину			1	2	3	4	5	
1	1000-1250	9-11	0,1453	±0,0765	0,0049	±0,0461	0,40÷0,20	0,20÷0,10	0,20÷0,10	0,20÷0,10	0,40÷0,30	
		11-13	0,1744									0,0054
		13-15	0,2034									0,0060
3	1300-1550	11-13	0,1737	±0,0849	0,0047	±0,0538	0,30÷0,10	0,10÷0,00	0,10÷0,00	0,10÷0,00	0,20÷0,10	
		13-15	0,2027									0,0059
4	1600-1800	11-13	0,1230	±0,0927	0,0038	±0,0653	0,20÷0,10	0,10÷0,00	0,10÷0,00	0,10÷0,00	0,20÷0,00	
		13-15	0,1434									0,0042
		15-17	0,1639									0,0046

Примітки:

значення сумарного верстатного профілювання розраховані з використанням формули зв'язку поперечного профілю та епюри питомих натягів і обрані залежно від заданого виду епюри питомих натягів у прокатаній штабі: профілювання валків 1-ї кліті повинно перевищувати величину прогину робочих валків для створення невеликої некрайової неплоскостності в штабі з метою стійкішого її положення на виході цієї кліті; профілювання валків 2-4-ї кліті повинно мати значення, дещо менше від прогину робочих валків, для отримання в штабі незначної крайової неплоскостності, тому що це знижує ймовірність обривів штаб;

під час розрахунку теплового профілю валка різниця температур по довжині бочки валка прийнята  $\delta t = 10^\circ\text{C}$ ;

зусилля гідровигину для розрахунку приймали рівним  $F = 475 \text{ кН}$  (50%)



### *2.2.2 Регулювання площинності штаб на багатоклітьовому стані холодної прокатки*

Систему автоматичного регулювання площинності штаб (САРП) на багатоклітьовому стані холодної прокатки докладно розглянуто в роботі [8] на прикладі п'ятиклітьового стану 2030 нескінченної прокатки. У цій же роботі на основі результатів досліджень ефективності роботи САРП зроблено такі висновки, підтверджені досвідом її експлуатації:

1) засоби регулювання площинності перших  $(n-1)$  клітей  $n$ -клітьового прокатного стану слід використовувати для стабілізації процесу, тобто за їхньою допомогою необхідно створювати в штабі в різних міжклітьових проміжках епюри питомих натягів, які забезпечують поперечну і поздовжню стійкість штаби [8].

2) засоби регулювання останньої  $n$ -ї кліті необхідно використовувати для формування напружено-деформованого стану рулонів холоднокатаних штаб, що відповідає вимогам подальшої технології оброблення металу та забезпечує одержання готового прокату заданої якості, зокрема й заданої площинності.

У роботі [8] показано, що найскладнішими для регулювання є локальні види неплщинності, які часто не можна усунути за допомогою САРП, що функціонує тільки за "відхиленням".

Роботи, що сприяють запобіганню утворенню локальних потовщень на гарячекатаному підкаті - однієї з головних причин утворення локальної неплщинності, не завжди призводять до позитивного результату [8 та ін.]). Тому необхідно передбачити можливість регулювання площинності на вузьких ділянках по ширині штаб на станах холодної прокатки.

Важливість такого підходу підтверджується практикою прокатного виробництва, яка засвідчила, що локальна неплщинність холоднокатаних штаб є бракувальною ознакою готового прокату та однією з причин утворення

дефектів поверхні, таких як "штаби-лінії ковзання", "плями злипання зварювання" під час обробки в лінії ковпакових печей.

Як уже зазначалося вище, системи автоматичного регулювання площинності штаб на сучасних станах холодної прокатки працюють, як правило, за принципом "замкнутого" управління - за відхиленням [8]. За такого регулювання важко усунути локальну неплщинність, яка виникає на штабі в різних міжклітьових проміжках у міру викочування локальних потовщень. Крім того, з огляду на транспортне запізнювання регулювальних впливів (стресометр розташовано на відстані приблизно 2,5 м від останньої кліті) і порівняно малі обтиснення в останній кліті, а також недостатньо точну й надійну реакцію вимірювача на локальну неплщинність (зони вимірювання найчастіше не повністю перекриваються відповідними ділянками штаби), необхідно вдосконалювати відомі способи регулювання. Тому пропонується включити в САРП на стані холодної прокатки додатковий канал, що функціонує за принципом "розімкнутого" управління - за збуренням [8].

Перший принцип регулювання (за відхиленням) детально проаналізовано в літературі, тому розглянемо другий.

Суть його полягає у визначенні місця розташування локального потовщення на підкаті та подальшого регулювання за допомогою диференційованої подачі МОР (мастильно – охолоджуючої рідини) на відповідну ділянку робочих валків.

Алгоритм визначення локальних потовщень на підкаті наведено нижче (рис. 2.1).

Задається граничне значення локального потовщення на підкаті  $\Delta H_{зад}$ , яке з максимальною ймовірністю може призвести до виникнення локальної неплщинності (блок 1).

Проводиться введення товщини гарячекатаної штаби  $H_i$  ( $i=1, \dots, N$  – задана кількість вимірів) за її шириною (блок 2).



Рисунок 2.1 – Алгоритм визначення локальних потовщень на підкаті [8]

Усі товщини розбиваються на групи, що складаються з трьох значень, для яких знаходиться поріг порівняння  $\bar{H}_k$  (блок 4-10):

$$\bar{H}_k = \frac{1}{3} \sum_{i=m}^{m+2} H_i, \quad (2.9)$$

де  $k = 1, 2, \dots, M$  - кількість ділянок штаби, для яких обчислюється поріг порівняння:  $M=N/3$ ;  $m=1, 4, 7, 10, \dots, N-2$ .

Усередині кожної виділеної групи товщин обчислюється різниця між значеннями  $H_i$  і порогом порівняння (блок 13):

$$\Delta H_i = |\bar{H}_k - H_i|. \quad (2.10)$$

Далі перевіряється умова (блок 14):

$$\Delta H_i \leq \Delta H_{\text{зад}}. \quad (2.11)$$

Якщо умова (2.11) виконується, то ймовірність виникнення локальної неплотинності на цій ділянці штаби мінімальна;

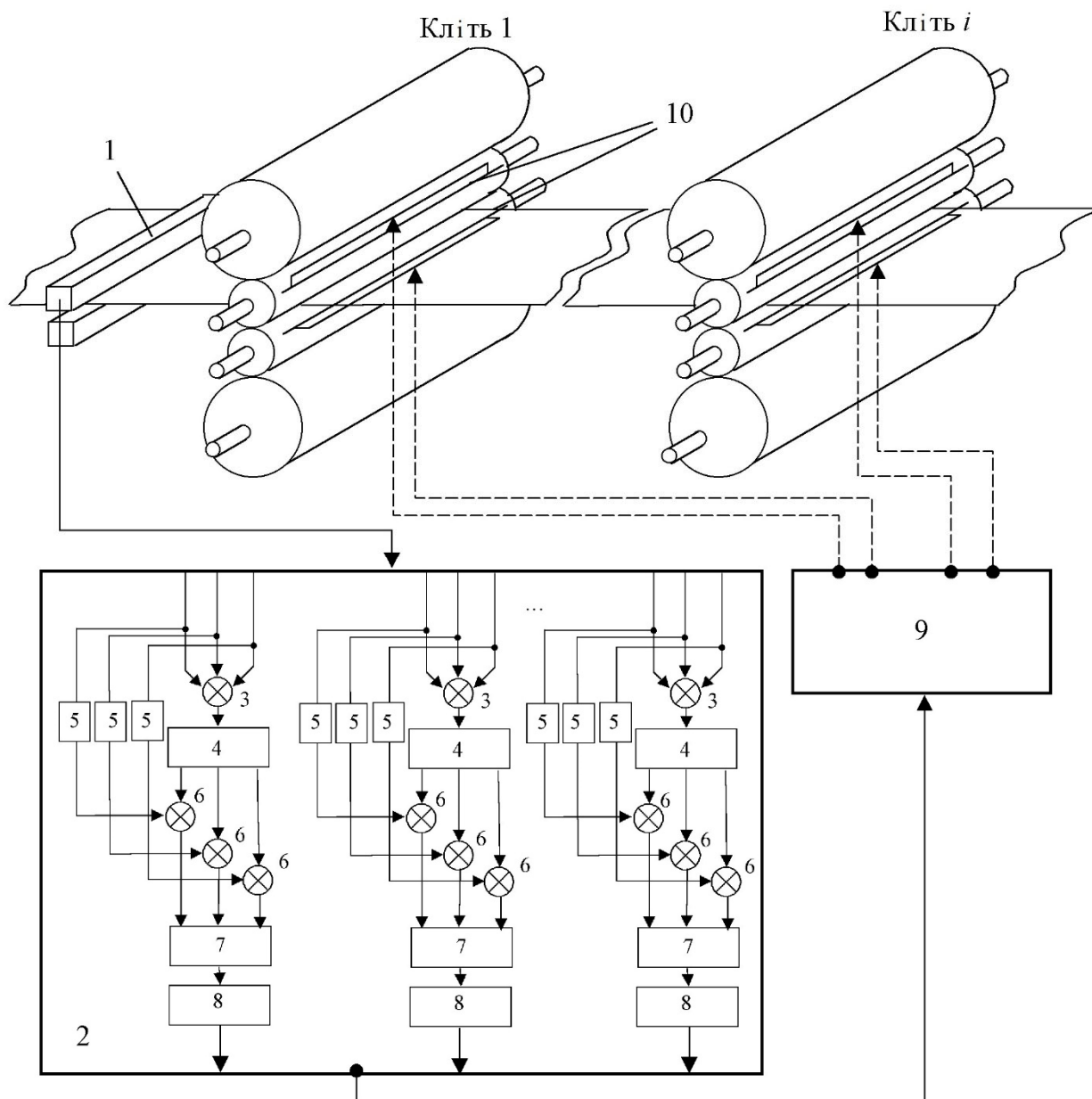
інакше, на  $i$ -ій ділянці ширини штаби присутнє локальне потовщення (ймовірність утворення локальної неплотинності максимальна), значення індексу  $i$  запам'ятовується (блок 15).

Розроблений алгоритм реалізовано в автоматичному пристрої, який працює таким чином (рис. 2.2).

Сигнали з вимірювача товщини підкату за шириною 1, встановленого на вході першої кліти, надходять в арифметичний блок 2 визначення локальних потовщень на підкаті та запам'ятовування їхнього місця розташування. Усі дискретні значення товщини підкату по ширині розбиваються на групи, що складаються з трьох значень.

У суматорі 3 вони підсумовуються, а вихідне значення з нього в дільнику 4 ділиться на три, таким чином, знаходиться величина порога порівняння.

інвертовані значення товщини з інверторів 5 надходять в суматори 6, де обчислюється різниця між значеннями товщини і порогом порівняння, що надходить з блоку 4.



**Рисунок 2.2** - Автоматичний пристрій для зниження локальної неплщинності холоднокатаних штаб: позначення в тексті

У блоці 7 відбувається порівняння  $\Delta H_i$  із заданим значенням  $\Delta H_{зад}$ . Якщо  $\Delta H_{\phi i} \leq \Delta H_{зад}$ , то локальне потовщення відсутнє і зміни в регулювання процесу не вносяться; якщо  $\Delta H_{\phi i} > \Delta H_{зад}$ , то на  $i$ -ій ділянці ширини штаби є локальне потовщення, а значення індексу  $i$  запам'ятовується в блоці 8. З цього блоку сигнал про індекс  $i$  подається в блок технологічної автоматики 9, звідки надходить сигнал у систему охолодження прокатних валків 10, у якій

здійснюється перерозподіл подачі охолоджувальної рідини таким чином, щоб на ділянку валків, що відповідає ділянці штаби з дефектом, подавалася максимальна кількість охолоджувальної рідини.

### ***2.2.3 Регулювання площинності штаб на дресирувальному стані***

Ефективність регулювання площинності штаб на дресирувальному стані залежить від правильного вибору верстатних профілювань валків і адекватного оперативного коригування регулювальних впливів (гідровигин, перекис).

Методика комбінованого регулювання площинності штаб на дресирувальному стані (в лінії ковпакових печей) охоплює тактичний і оперативний рівні (рис. 2.3). На тактичному рівні для окремих досить великих груп типорозмірів штаб здійснюється обчислення верстатних профілювань робочих валків дресирувального стану на основі інформації про діапазон зміни полів залишкових напруг у відпалених рулонах і заданих діапазонах зміни характеристик епюр залишкових напружень у дресированих штабах. Оперативний рівень передбачає коригування значень керівних впливів дресирувального стану в разі відхилення вимірної епюри питомих натягів у штабі на виході стану від заданої.

Алгоритм тактичного рівня наведено нижче.

1) Виділення групи металу (набір з  $N$  плавок, що складаються з  $M$  рулонів), що направляється на відпал у відділення ковпакових печей.

2) Вимірювання епюри питомих натягів у холоднокатаній штабі під час прокатки одиниці продукції ( $m$ -го рулону з  $n$ -ї плавки)  $\sigma^{n m}_{хол}(y)_{изм}$ .

3) Обчислення залишкових поздовжніх напружень у відпаленій штабі  $\sigma_{ост.к}(y)$  виходячи з обраного режиму відпалу в ковпакових печах і вимірної епюри питомих натягу в холоднокатаній штабі  $\sigma^{n m}_{хол}(y)_{изм}$ .

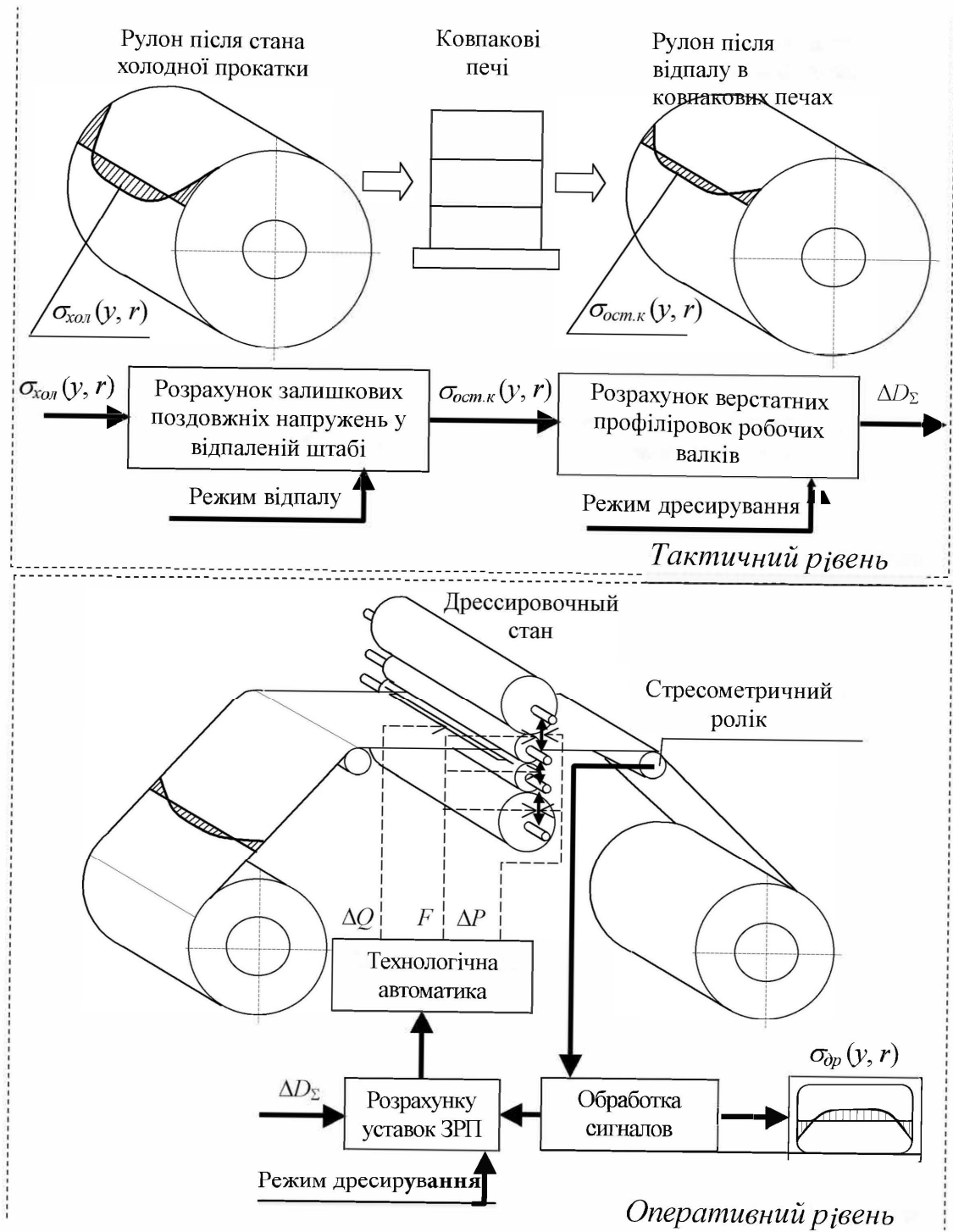


Рисунок 2.3 - Комбіноване регулювання площинності штаб на дресувальному стані

4) Апроксимація епюри залишкових напружень у відпаленій штабі ортогональними поліномами Лежандра та обчислення коефіцієнтів внеску окремих поліномів в епюру  $C^{nm}_{k(\kappa)}$  (далі - характеристики епюри питомих натягів) на кожен рулон.

5) Усереднення  $C^{nm}_{k(\kappa)}$  по всій плавці

$$C^m_{k(\kappa)} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N C^{nm}_{k(\kappa)}. \quad (2.12)$$

6) Завдання характеристик епюри залишкових напружень дресированої штаби  $C^m_{k(\partial p)}$  (зад) на кожен плавку.

7) Вибір режиму дресування (зусилля  $P^m_{др}$ , передній натяг  $\sigma^{m_1}$ , швидкість  $V^m_{др}$ ) для кожної порції металу з умови отримання заданих механічних властивостей і шорсткості штаб.

8) Обчислення сумарного верстатного профілювання робочих валків дресувального стану  $\Delta D^m_{\Sigma}$  для кожної плавки або декількох плавкоз близьких типорозмірів штаб, виходячи із заданого режиму дресування, розрахованих характеристик епюри залишкових напруг у відпаленій штабі  $C^m_{k(\kappa)}$  і заданих характеристик епюри залишкових напруг дресированої штаби  $C^m_{k(\partial p)}$  (зад) :

$$\begin{aligned} \Delta D^m_{\Sigma} = & -5,8794 + 0,0544[C^m_{2(\partial p)} \text{ (зад)} + C^m_{4(\partial p)} \text{ (зад)} + C^m_{6(\partial p)} \text{ (зад)}] - \\ & - 0,0376 C^m_{2(\kappa)} - 0,0245 C^m_{4(\kappa)} - 0,0191 C^m_{6(\kappa)} - 1,6976 h + 0,0025B - \\ & - 0,0298 F^m_{др} - 0,8369 P^m_{др} + 0,0436 \sigma^{m_1} + 0,1306 V^m_{др}, \end{aligned} \quad (2.13)$$

де  $h^m$ ,  $B^m$  - товщина і ширина штаби  $m$ -ї плавки відповідно,

$F^m_{др}$  - гідровигин робочих валків дресувального стану.

Під час розрахунку значення гідровигину приймається рівним нулю  $F^m_{др} = 0$ .

9) Усереднення  $\Delta D^m_{\Sigma}$  за всіма плавками.

$$\Delta D_{\Sigma} = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M \Delta D^m_{\Sigma}. \quad (2.14)$$

10) Обчислення значень гідровигину  $F^m_{др}$  для кожної плавки за усередненим  $\Delta D_{\Sigma}$  і за заданого режиму дресування:

$$F^m_{др} = -197,1213 + 1,8245[C^m_{2(\partial p)} \text{ (зад)} + C^m_{4(\partial p)} \text{ (зад)} + C^m_{6(\partial p)} \text{ (зад)}] - \quad (2.15)$$



$$- 1,2607 C_{2(\kappa)}^m - 0,8227 C_{4(\kappa)}^m - 0,6403 C_{6(\kappa)}^m - 56,9168 h + 0,0830B - \\ - 33,5276 \Delta D_{\Sigma} - 28,0602 P_{др}^m + 1,4626 \sigma_{1+}^m + 4,3788 V_{др}^m.$$

На оперативному рівні регулювання розподілу питомих натягів у дресированій штабі здійснюється за відхиленням. Основні принципи цього методу регулювання розглянуто в [8 та ін.], тому не будемо на них зупинятися.

#### **2.2.4 Алгоритм керування площинністю штаб у листопрокатному цеху**

Під час розроблення алгоритмів управління враховували час проходження металу технологічним ланцюгом цеху і величину проміжків часу, протягом яких можна впливати на ті чи інші характеристики площинності на різних агрегатах цеху. Тому було виділено два рівні управління: тактичний і оперативний [8].

На тактичному рівні розв'язується завдання проектування і вибору регулювальних впливів на безперервному і дресировальному станах (для вуглецевих марок сталей) за заданих значень верстатних профілювань і режимів прокатки та дресировання, а також із заданих діапазонів значень вибору режимів термообробки на АНВ (агрегат неперервного відпалу і КП (ковпакові печі) тих варіантів, які необхідні для отримання в загальному випадку заданої площинності готового прокату (зокрема, плоского). Алгоритм управління площинністю штаб на тактичному рівні наведено нижче.

1) Завдання виду і характеристик неплщинності готового прокату:  $A_2$  и  $T_2$ .

2) Обчислення залишкових напружень у готовій штабі:

$$\sigma_{ост.к}^{(1)} = E' \left( \frac{1}{\chi^*} \frac{A_2}{T_2} \right)^2 + \sigma_{кр}, \quad (2.16)$$

де  $E' = \frac{E}{1 - \nu^2}$ ,  $E$ ,  $\nu$  – модуль Юнга і коефіцієнт Пуассона,  $E = 2,1 \cdot 10^5$

МПа,  $\nu = 0,3$ ;

$\chi^*$  – емпіричний коефіцієнт, що залежить від розподілу амплітуди по довжині штаби, од,  $\chi^* = 0,75 - 1,20$ ;

$$\sigma_{\text{ед}} = k \frac{E\pi}{12(1 - \nu^2)} \left( \frac{h_0}{b} \right)^2, k - \text{коефіцієнт, що враховує вид неплщинності}$$

(при крайовій неплщинності  $k = 50$ , при некрайовій неплщинності  $k = 100$ );

$h_0, b_0$  – товщина і ширина готової штаби, мм.

3) Вибір із заданих діапазонів значень режиму оброблення в АТВ, найсприятливіших для отримання заданих механічних і електромагнітних властивостей металу (для АНВ - натяг, швидкість оброблення і температури, для КП - температура і час оброблення).

4) Обчислення залишкових напружень у холоднокатаній штабі

$\sigma^{(1)}_{\text{ост.о}}(y)$ , виходячи з  $\sigma^{(1)}_{\text{ост.к}}(y)$  і обраних значень режиму обробки в АТВ.

Під час обробки в АНВ:

якщо  $\sigma^{(1)}_{\text{ост.к}}(y) < 0$ , то

$$\sigma^{(1)}_{\text{ост.о}}(y) = \bar{\sigma}_n + \frac{\sigma^{(1)}_{\text{ост.к}}(y) + \bar{\sigma}_p [c - d(T_p + 273,15)(20 + \lg \frac{t_p}{60})]}{[a - b(T_n + 273,15)(20 + \lg \frac{t_n}{60})][c - d(T_p + 273,15)(20 + \lg \frac{t_p}{60})]} \quad (2.17)$$

де  $\bar{\sigma}_n, \bar{\sigma}_p$  – середній питомий натяг штаби в секціях нагріву і рекристалізації, МПа;  $T_n, T_p, t_n, t_p$  – температура, °С і час термічної обробки, хв. у секціях нагріву і рекристалізації;  $a, b, c, d$  – емпіричні коефіцієнти, що враховують розміри штаб і марку сталі:  $a = 1,6 - 2,7$ ;  $b = (0,09 - 0,12) 10^{-3}$ ;  $c = 1,1 - 1,8$ ;  $d = (0,006 - 0,1) 10^{-3}$ ;

якщо  $\sigma^{(1)}_{\text{ост.к}}(y) \geq 0$ , то

$$\sigma^{(1)}_{ocm.o}(y) = \frac{\sigma^{(1)}_{ocm.k}(y)}{[a - b(T_H + 273,15)(20 + \lg \frac{t_H}{60})][c - d(T_p + 273,15)(20 + \lg \frac{t_p}{60})]}. \quad (2.18)$$

Під час обробки в КП:

$$\begin{aligned} \sigma^{(1)}_{ocm.o}(y) = & \sigma^{(1)}_{ocm.k}(y) [a_1 - b_1(T_{B1} + 273,15)(20 + \lg t_{B1})]^{-1} \times \\ & \times [a_2 - b_2(T_{B2} + 273,15)(20 + \lg t_{B2})]^{-1} \times \\ & \times [c - d(T_{Ocp} + 273,15)(20 + \lg t_O)]^{-1} - \bar{\sigma}_{хол}. \end{aligned} \quad (2.19)$$

5) Апроксимація епюри залишкових напружень у холоднокатаній штабі ортогональними поліномами Лежандра та обчислення коефіцієнтів внеску окремих поліномів в епюру  $C^{(1)}_k$  (далі коефіцієнти апроксимації епюри) [8]:

$$C^{(1)}_k = f(\sigma^{(1)}_{ocm.o}).$$

6) Вибір із заданих діапазонів значень режиму прокатки на  $n$ -клітьовому стані (натягу на моталці, швидкість прокатки, зусилля прокатки в  $n$ -й кліті).

7) Розрахунок уставок засобів регулювання площинності (ЗРП) в  $n$ -й кліті (перекіс  $\Delta P_{n(p)}$  і гідровигин  $F_{n(p)}$  робочих валків, диференційована за довжиною бочки валків подача ЗОР (змащувально-охолоджуваного розчину)  $\Delta Q_{n(p)}$ ) по  $C^{(1)}_k$  і обраними значеннями режиму прокатки.

8) Порівняння розрахованих значень  $\Delta P_{n(p)}$ ,  $F_{n(p)}$ ,  $\Delta Q_{n(p)}$  з їхніми допустимими значеннями (допустимі значення задають виходячи з конструкційних і технологічних особливостей відповідних систем стану).

9) Якщо розраховані значення СРП не виходять за межі допустимого діапазону, то ухвалюють рішення про вибір цих значень регулювальних впливів і виставляють відповідні уставки (в автоматичному або ручному режимах), у протилежному разі обирають гранично можливе значення СРП і коригують регулювальні впливи на АТО (агрегат термообробки) (у допустимому діапазоні).

10) Варіювання технологічних чинників в АТО проводиться з урахуванням ступеня їхнього впливу на механічні та електромагнітні

властивості металу в заздалегідь заданих технологічно обґрунтованих діапазонах.

Під час обробки штаби в АНВ (агрегат неперервного відпалу) обчислюється епюри питомих натягів:

при  $\sigma^{(2)}_{ocm.o}(y) > 0$

$$\sigma^{(2)}_{ocm.k}(y) = \{(\sigma^{(2)}_{ocm.o}(y) - \bar{\sigma}_H) [a-b(T_H + 273,15)(20+lg\frac{t_H}{60})] - \sigma_B\} \times \\ \times \{c-d(T_p + 273,15)(20+lg\frac{t_p}{60})\}, \quad (2.20)$$

при  $\sigma^{(2)}_{ocm.o}(y) \leq 0$

$$\sigma^{(2)}_{ocm.k}(y) = \sigma^{(2)}_{ocm.o}(y) \{a-b[(T_H + 273,15)(20+lg\frac{t_H}{60})]\} \times \\ \times \{c-d(T_p + 273,15)(20+lg\frac{t_p}{60})\}. \quad (2.21)$$

Під час обробки штаби в АНВ насамперед варіюється режим натягу, що має найменший вплив на механічні та електромагнітні властивості прокату. Потім швидкість проходження штаби через агрегат, і в останню чергу температурний режим у різних секціях і зонах агрегату (у напрямку руху штаби: нагрівання, витримка тощо).

Під час обробки в КП насамперед варіюється час витримки, а потім температура.

1) Варіювання проводиться до виконання умови:

$$|\sigma^{(1)}_{ocm.k}(y) - \sigma^{(2)}_{ocm.k}(y)| \leq \Delta \quad (2.22)$$

де  $\sigma^{(1)}_{ocm.k}(y)$ ,  $\sigma^{(2)}_{ocm.k}(y)$  - залишкові поздовжні напруження, розраховані через  $A_z$  і  $T_z$ , після коригування режиму відпалу;  $\Delta$ - задана величина помилки.

Для прокату вуглецевих марок сталі на початок алгоритму (після блоку 2) додаються такі блоки:

а) Вибір режиму обробки на РПМ (роліко-правильна машина), найбільш сприятливого для отримання заданих механічних властивостей.

б) Обчислення залишкових напружень у дресированій штабі  $\sigma_{ост.др}(y)$ , виходячи з  $\sigma^{(1)}_{ост.к}(y)$  і обраних значень режиму обробки в РПМ.

в) Вибір із заданих діапазонів значень режиму обробки на дресирувальному стані (зусилля дресування, передній натяг), найбільш сприятливого для отримання заданих механічних властивостей.

г) Розрахунок значень ЗРП (засобів регулювання площинності) дресирувального стану (перекіс  $\Delta P_{др(p)}$  і гідровигин  $F_{др(p)}$  робочих валків).

д) Порівняння розрахованих  $\Delta P_{др(p)}$  і  $F_{др(p)}$  з їхніми припустимими значеннями (припустимі значення задають, виходячи з конструкційних і технологічних особливостей відповідних систем дресирувального стану).

е) Якщо розраховані значення ЗРП не виходять за межі допустимого діапазону, то ухвалюють рішення про вибір цих значень ЗРП і виставляють відповідні уставки (в автоматичному або ручному режимах). В іншому разі здійснюватимуть варіювання середнього питомого натягу на виході ДС доти, доки розраховані значення ЗРП за абсолютною величиною не будуть перевищувати допустимі. Якщо неможливо підібрати значення ЗРП під час варіювання натягу в усьому допустимому з технологічного погляду діапазоні, то коригуються величини верстатних профілювань робочих, а за необхідності й опорних валків дресирувального стану.

Алгоритм, призначений для оперативного рівня підсистеми, можна описати так:

1) Вимірювання фактичних значень характеристик неплщинності відпалених штаб  $A^{(узм)}_{от}$ ,  $T^{(узм)}_{от}$ .

2) Перевірка умови

$$\frac{A^{(узм)}_{от}}{T^{(узм)}_{от}} \leq \frac{A_c}{T_c}. \quad (2.23)$$

3) Якщо умова (2.23) виконується, то режим обробки штаби в АТО (агрегат термообробки) залишається незмінним.

4) У разі невиконання умови (2.23) проводиться варіювання технологічних факторів АТО з урахуванням ступеня їхнього впливу на

механічні та електромагнітні властивості металу в заздалегідь заданих технологічно обґрунтованих діапазонах (див. п. 10 тактичного рівня).

5) Обчислення епюри питомих натягів у відпаленій штабі за змінених значень технологічних факторів обробки штаби в АНВ (агрегат неперервного відпалу):

при  $\sigma^{(np)}_{ocm.o}(y) > 0$

$$\begin{aligned} \sigma^{(3)}_{ocm.k}(y) = & \{(\sigma^{(np)}_{ocm.o}(y) - \bar{\sigma}'_H) [a-b(T'_H + 273,15)(20+lg\frac{t'_H}{60})] - \sigma'_B\} \times \\ & \times \{c-d[(T'_P + 273,15)(20+lg\frac{t'_P}{60})]\}, \end{aligned} \quad (2.24)$$

де  $\sigma^{(np)}_{ocm.o}(y)$  - епюра питомих натягів у прокатаній штабі, виміряна стресометричним роликком на стані або отримана розрахунком за фактичними характеристиками непощинності штаби на вході в АНВ, МПа;

$\bar{\sigma}'_H, \bar{\sigma}'_P, T'_H, T'_P, t'_H, t'_P$  - змінені значення технологічних факторів обробки штаби в АНВ;

при  $\sigma^{(np)}_{ocm.o}(y) \leq 0$

$$\begin{aligned} \sigma^{(3)}_{ocm.k}(y) = & \sigma^{(np)}_{ocm.o}(y) \{a-b(T'_H + 273,15)(20+lg\frac{t'_H}{60})\} \times \\ & \times \{c-d(T'_P + 273,15)(20+lg\frac{t'_P}{60})\}, \end{aligned} \quad (2.25)$$

б) Варіювання факторів здійснюється до виконання умови:

для електротехнічних марок сталей

$$|\sigma^{(1)}_{ocm.k}(y) - \sigma^{(3)}_{ocm.k}(y)| \leq \Delta_d, \quad (2.26)$$

для вуглецевих марок сталей

$$|\sigma^{(1)}_{ocm.k}(y) - \sigma^{(3)}_{ocm.k}(y)| \leq \Delta_y, \quad (2.27)$$

$\Delta_d, \Delta_y$  - задана величина помилки для електротехнічних і вуглецевих марок сталей відповідно.

Для електротехнічних марок сталей обчислення завершуються, а для вуглецевих марок сталей тривають.

7) Вимірювання фактичних значень характеристик неплщинності дресированих штаб  $A^{(\phi)}_{др}$ ,  $T^{(\phi)}_{др}$ .

8) Перевірка умови

$$\frac{A^{(\phi)}_{др}}{T^{(\phi)}_{др}} \leq \frac{A_z}{T_z}. \quad (2.28)$$

9) Якщо умова (2.28) виконується, то режим обробки штаби на дресирувальному стані залишається незмінним. В іншому разі проводиться варіювання значення зусилля гідровигину валків і натягу на виході стану (в рамках граничних величин). Якщо за обраних граничних величин зусилля гідровигину валків і натягу умова (2.28) не виконується, то коригуються величини верстатних профілювань робочих, а за необхідності й опорних валків дресирувального стану.

Запропоновані алгоритми дадуть змогу визначати коригувальні впливи на кожному агрегаті цеху, для отримання готових штаб із заданою площинністю.

## 3 ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА

### 3.1 Стан проблеми

При прокатці на безперервних та реверсивних станах холодної прокатки на площинність штаби впливають всі технологічні чинники, що змінюються, і, як показують дослідження [3], розподіл питомих напружень розтягу може бути вкрай нерівномірним.

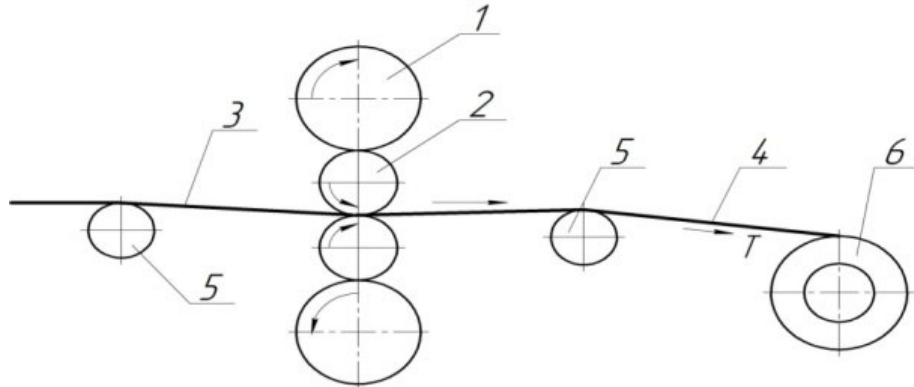
Засобом регулювання таких важливих показників поперечного перерізу, як профіль і планшетність штаби може слугувати контрольований розподіл питомих натягань по ширині штаби. існують контактні роликові тензometri, які дозволяють досить точно вимірювати питомі натягання по ширині штаби. Однак технічних засобів, які дозволяли б безпосередньо управляти питомим натяганням при прокатці, не існує. Питоме натягання можна змінювати непрямым чином, шляхом зміни загального натягання в комплексі з роботою системи противигину валків. Регулювання теплового профілю валка занадто інерційно і застосовується на дуже тонких штабах. Слід зауважити, що зміна питомих натягань тільки в певних межах позитивно впливає на планшетність. При натяганні менше граничного є небезпека підвищити коробоватість штаби, а при натяганні вище верхньої межі збільшується небезпека утворення хвилі по кромках [4].

В даний час на станах холодної прокатки за чистовою кліттю перед моталками застосовуються гладкі обвідні ролики з циліндричною твірною бочки (рис. 3.1). При виході штаби з валків штаба огинає обвідний ролик і змотується на моталку. В якості обвідних роликів використовуються тензометричні ролики (стресометри) які дозволяють встановити, що напруга розтягування по ширині нерівномірна.

Практика показує що натягання розподіляється по параболічній залежності з максимумом на крайках штаби. Такий характер розподілу натяжінь обумовлює притиснення один до одного витків на крайках рулону. У



результаті максимальний міжвитковий тиск на крайках рулону викликає злипання (зварювання) витків при відпалі, що в подальшому призводить до утворення дефекту «злам». Такий дефект часто зустрічається на дресувальних станах холодної прокатки.



1 - опорні валки; 2 – робочі валки; 3,4 – штаба; 5 – обвідний ролик з регулярним рельєфом поверхні; 6 – моталка

**Рисунок 3.1** – Схема розташування робочої кліти і обвідний ролик

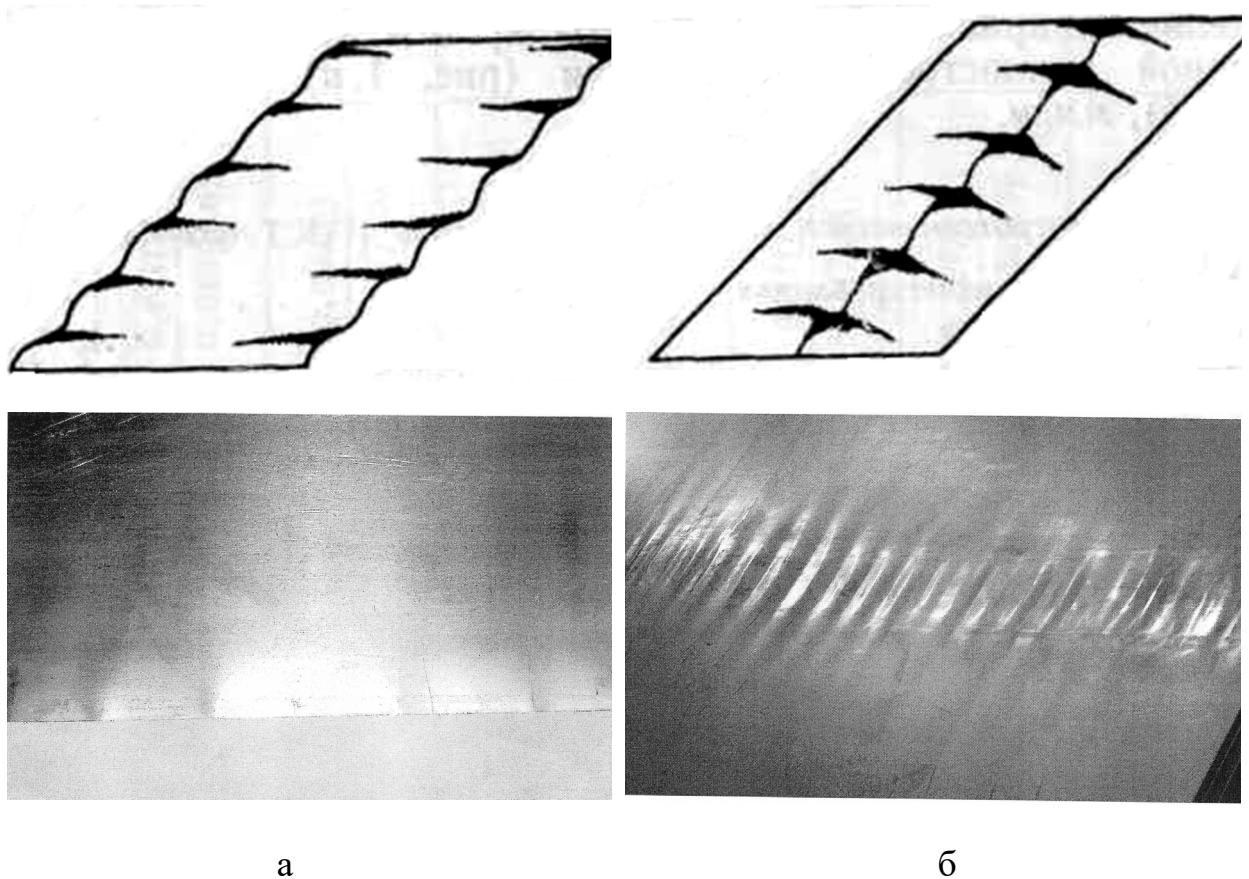
Для зменшення ймовірності появи «зламів» необхідно забезпечення рівномірним розподілом напружень по ширині штаби при змотуванні її в рулон.

Згідно з експериментальними даними відомо, що при змотуванні штаби моталка створює натягання в смузі, середнє значення якого не перевищує  $\sigma_n \approx 40 \text{ Н/мм}^2$ . У разі нерівномірних по ширині витяжок поздовжні напруги  $\sigma_n$  на крайових ділянках виявляються суттєво більше, ніж на середній ділянці рулону [1, 11]. Внаслідок цього крайові ділянки рулону отримують щільне змотування і значні міжвиткові напруги, що стискаються, результатом дії яких є злипання-схоплювання витків, неоднакові умови відпалу штаби по ширині.

Нижче розглядаються шляхи вирішенню проблеми нерівномірності розтягуючих повздовжніх напружень на станах холодної прокатки штаб.

### 3.2 Основні проблеми стабілізації геометричних параметрів тонколистового прокату

Згідно існуючим нормам вітчизняних і зарубіжних стандартів до основних показників, що визначають якість тонколистового прокату, відносяться відхилення по товщині і форма листів і штаб. Допустимі відхилення по товщині, як правило, визначають максимально можливий діапазон поздовжньої різнотовщинності для рулонного прокату і листів даного сортаменту. Форма листів і штаб визначається кривизною кромek (серповидністю), або величиною хвилястості (рис. 3.2, а) і коробоватості (рис. 3.2, б), мм/м (ГОСТ 26877-91).



**Рисунок 3.2** – Хвилястість (а) і коробоватість (б) прокатоної штаби

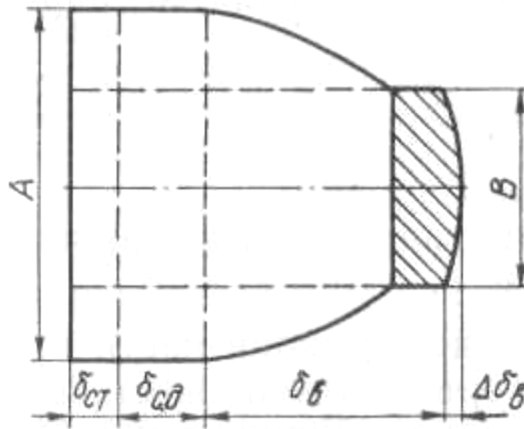
Причиною відхилень товщини і форми тонколистового прокату від заданої є нестабільність умов деформації штаби по довжині і ширині при прокатці.

Для отримання листів і штаб, що не мають різнотовщинності і викривлення форми поверхні, необхідним є забезпечення постійності витяжки по довжині і ширині на всіх етапах переділу, починаючи від сляба і закінчуючи холоднокатаною продукцією. Форма штаб в значній мірі визначається якістю обробки тонколистового прокату (дресирування, цинкування і лудіння, поздовжнє і поперечне різання), особливо в тих лініях, в яких рулон піддається перемотуванню і можлива місцева, нерівномірна по ширині пластична деформація штаби.

Коливання товщини листів і штаб в поздовжньому і поперечному напрямі і відповідні зміни їх форми виникають унаслідок непостійності тиску металу на валки  $P$  в процесі прокатки. Коливання тиску приводять до змін пружної деформації кліті прокатного стану, що виражається в непостійності зазору  $\delta$  між робочими валками. Пружні деформації активної утворюючої зазору валків складаються з пружної деформації станини  $\delta_{ст}$  і пружної деформації комплексу сполучних деталей  $\delta_{сд}$ , які є сумою деформації підшипників, подушок, натискних гвинтів, тощо, а також пружної деформації валків  $\delta_v$ .

Поздовжня різнотовщинність штаби визначається сумою деформації  $\delta_{ст}$ ,  $\delta_{сд}$ , і тієї частини нерівномірної по довжині бочки пружної деформації  $\delta_v$ , яка є постійною на ділянці ширини прокатуваної штаби ( $\delta_v = \text{const}$ ), а поперечна різнотовщинність в абсолютних величинах залежить від тієї частини  $\delta_v$ , яка непостійна на ділянці  $B$  ширини штаби  $\Delta\delta_v$  (рис. 3.3).

Будь який вплив на осередок деформації при прокатці супроводжується зміною тиску металу на валки і відповідним відхиленням від сталого розподілу обтискання по ширині внаслідок зміни пружних деформацій.



$A$  – відстань між опорами подушок валків;  $B$  – ширина листа;  
 $\delta_{ст}$ ,  $\delta_{cd}$ ,  $\delta_b$  – деформація станини, з'єднувальних деталей і валків

**Рисунок 3.3** – Схема складових пружної деформації робочої кліті

Окрім цього, на форму і профіль штаби можуть впливати інші, більш повільні чинники. До них відносяться: початкове профілювання валків, знос валків і тепловий профіль валків.

Перераховані вище чинники, які визначають профіль і форму штаби в процесі тонколистової прокатки, можна розділити на керовані і некеровані. До керованих відносяться чинники, які можуть бути змінені в процесі прокатки. До некерованих - ті, які змінюються в часі незалежно від оператора.

Одні і ті ж чинники залежно від конструкції станів і наявності на станах засобів регулювання технологічних параметрів можуть проявляти себе по відношенню до профілю і форми штаби як некеровані впливи на процес прокатки, і як керовані впливи.

Нестабільність некерованих чинників, що визначають форму і профіль, а також неправильна настройка стану приводять до отримання неякісного листа стосовно поздовжньої різновтовщинності, профіля і форми.

Ряд операцій по переробці готового тонколистового прокату по суті були б неможливі без забезпечення необхідного ступеня і рівномірності деформації по ширині. Так, наявність хвилі і короба при штампуванні різних виробів (кузовів автомашин, корпусів холодильників і т. п.) приводить до

зморшкоутворення або до «хлопунів» на площинах виробів. Нерівномірно обжата по ширині, (навіть будучи відпаленою), широка штаба при поздовжньому розрізанні на більш вузькі штаби дає помітні викривлення, тобто серповидність. Серповидна штаба погано змотується в рулон, приводячи до телескопічності, погано формується при формуванні зварних труб і гнутих профілів і тому подібне.

Виникнення нерівномірності витяжки по ширині в процесі прокатки або обробки тонколистового штабового прокату є однією з причин аварійних зупинок станів і агрегатів обробки, а отже, однією з причин втрати продуктивності. Крім того, забезпечення рівної форми листів є одним з основних обмежень при розробці оптимальних режимів обтискань при прокатці штаб і листів на реверсивних клітках і визначенні оптимальної настройки безперервних тонколистових станів.

Штаби, що мають дефекти форми, які навіть не виходять за межі стандартів, створюють складнощі при подальшій обробці: серповидність штаб приводить до телескопічності рулонів, хвилястість по краях не забезпечує щільного змотування рулонів, ускладнює поздовжнє різання таких рулонів на вузькі рівні штаби. Проте навіть прокатані з мінімальною різнотовщинністю і правильної форми штаби нерідко втрачають якість при обробці на безперервних обробних лініях. Так, при транспортуванні штаби з натягненням на обвідних роликах при втраті центрівки штаби або перекосі ролика може з'явитися одностороння або двостороння хвиля по краях штаби. З'являються хвилі по краях і при поганій настройці дискових ножиць, особливо на тонких профілях.

Усунути дефекти геометрії тонколистового прокату можна наступними способами:

1. Стабілізація параметрів підкату. Стабілізація впливає на величину тиску металу на валки в процесі прокатки і на розподіл витяжки по довжині і ширині. Відомо, що нерівномірний нагрів слябів, значна різниця в температурах переднього і заднього кінців прокатуваної штаби,

нерівномірність ширини прокату, відхилення (вище за допустимі межі) в розподілі хімічного складу злитку, відмінність в стані поверхні на окремих ділянках рулону, тощо - приводять до коливань зусилля прокатки і до нестабільності величини зазору між валками. Усунення цих дефектів і їх впливу на різнотовщинність повинно досягатися безперервним вдосконаленням технологічного процесу по всьому металургійному циклу і конструкцій устаткування.

2. Зведення до мінімуму впливу зміни зусилля прокатки на величину зазору між валками.

Резервом зниження різнотовщинності за рахунок саморегулювання через натягнення в межах зони нечутливості регуляторів натягнення є така настройка головних приводів клітей безперервних станів, при якій жорсткість їх електромеханічних характеристик збільшується від перших клітей до останніх.

Аналогічним чином певний вплив на саморегулюючу дію натягнення на товщину надає співвідношення коефіцієнтів жорсткості по клітях безперервного стану. Відносне зниження жорсткості до останніх клітей безперервного стану забезпечує додаткове посилення ефекту поздовжнього самовирівнювання штаби при прокатці на стані без яких-небудь додаткових засобів регулювання товщини. Зниженню поперечної різнотовщинності сприяють вибір правильного профілю робочих і опорних валків, підбір оптимальних співвідношень  $V/L$ ;  $D_p/D_0$ , де  $D_p$  - діаметр робочих валків;  $D_0$  - діаметр опорних валків;  $V$  - ширина штаби;  $L$  - довжина опорної ділянки бочок опорних валків. Одним з ефективних засобів підвищення жорсткості прокатних клітей і зниження поздовжньої різнотовщинності є переведення шийок опорних валків на підшипники рідинного тертя, що дозволяє збільшити діаметри шийок і зменшити прогини валків.

Введення конічних скосів по краях бочок опорних валків дозволяє добитися більш рівномірної по довжині бочки пружної деформації валків. Проте застосування різних профіліровок валків дозволяє знижувати

поперечну різнотовщинність в обмеженому діапазоні із-за нестабільності умов самого процесу прокатки, оскільки будь-яка профіліровка відповідає певному тиску прокатки, температурним умовам роботи валків і профілю підкату.

3. Забезпечення постійності геометрії прокату за допомогою регулювання процесу.

Цей шлях стабілізації геометрії прокату передбачає застосування різних систем регулювання процесу прокатки. В даний час на безперервних листових станах знаходять широке застосування системи регулювання швидкості, натягнення і товщини.

Ці системи в основному забезпечують зниження поздовжньої різнотовщинності.

Недоліком створених систем регулювання поздовжньої різнотовщинності є мала швидкодія основного виконавчого пристрою - систем електроприводів нажимних пристроїв або головних приводів. Подолання цього недоліку може бути досягнуте значним підвищенням швидкодії виконавчих пристроїв або розробкою самоналагоджувальних систем регулювання поздовжньої різнотовщинності, що працюють у функції попереднього контролю за дією сигналу.

Зниження хвилястості і коробоватості забезпечується самовирівнюванням витяжки по ширині за рахунок натягнення. Це явище полягає в тому, що нерівномірність витяжки по ширині приводить до відмінностей в розподілі питомого натягнення по ширині і підвищенню витяжки на ділянках з великим натягненням [12].

Не зупиняючись на технологічних способах стабілізації параметрів підкату, розглянемо сучасний стан автоматичного регулювання процесу прокатки, а також конструктивного вдосконалення клітей і створених на цій базі нових систем управління.

### 3.3 Пристрої для регулювання натягання та форми штаби при прокатці

Одним із методів зміни міжвалкового зазору для отримання якісного поперечного профілю штаби є раціональне верстатне профілювання бочок робочих та опорних валків.

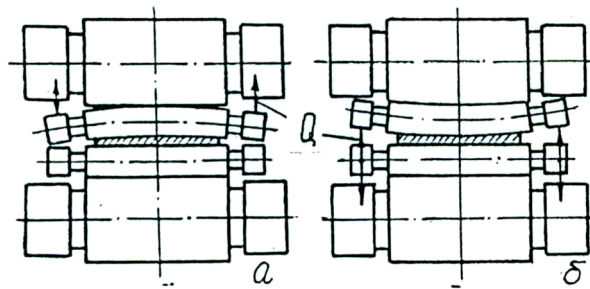
Верстатне профілювання може бути в деякому ступені замінене вибіркоким впливом охолодження робочих валків 5 - 10 секційними колекторними пристроями. Для зміни міжвалкового зазору, на відповідну ділянку валків змінюють подачу охолоджувача (мастильно-охолоджуюча рідина МОР). Недоліком цього методу профілювання валків є, як відомо, його інерційність. Регулювальний ефект цього методу проявляється через 20 - 30 хвилин після зміни подачі охолоджувача [1].

В даний час для регулювання міжвалкового зазору використовують гідравлічні пристрої впливу на подушки робочих валків. Суть впливу гідроприскоїв полягає у вигині робочих валків відносно вертикальної осі кліті (рис. 3.4) [1].

Додатковий вигин (б) вимагає менших зусиль і його застосовують для зниження розтягуючих напружень на кромках та усунення коробоватості штаби. Противигин (а) вимагає для регулювання більшого зусилля і його використовують для збільшення поздовжніх напружень за рахунок зменшення коефіцієнта витяжки на кромках та усунення хвилястості кромки.

При роботі з циліндричними валками, коли довжина пружного контакту між робочими і опорними валками дорівнює довжині їх бочок, зусилля противигина викликає збільшення міжвалкових тисків  $q(y)$  і сплющення на крайових ділянках бочок валків. При випуклих валках, коли довжина контакту  $2b < L$ , і при дії противигину, збільшення зазору на краях бочок робочих валків може відбуватися не за рахунок сплющення, а в результаті зменшення власного прогину робочих валків і збільшення довжини  $2b$  площадки контакту.





а – додатковий вигин; б – противигин

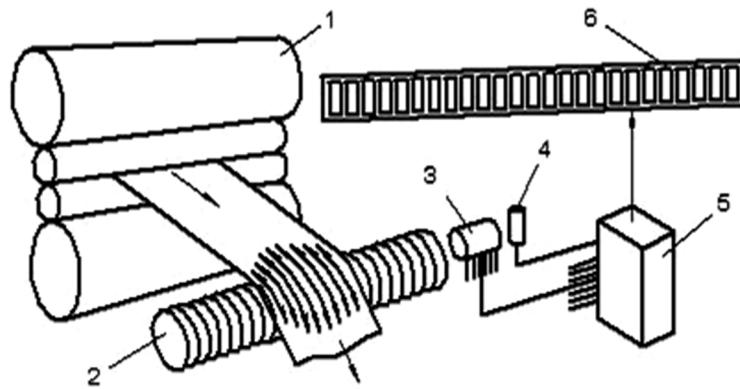
( $Q$  – зусилля на торцях плунжерів гідроциліндрів)

**Рисунок 3.4** – Схема дії гідравлічних приладів на робочі валки

У певних умовах ( $2b < B$ ) робочий валок отримує негативний вигин (випуклістю на штабу, що прокочується). Таким чином, власне прогин робочого валка під дією противигину зменшується в порівнянні з таким при його відсутності і більшою мірою при наявності випуклих опорних валків.

З метою підвищення ефективності дії противигину робочих валків розроблено ряд конструкцій пристроїв, що забезпечують переміщення робочих валків не тільки у вертикальній, але і в горизонтальній площинах.

Оцінка отриманої форми штаби виконується стресометром (рис. 3.5) [1]. Стрілки по ширині штаби показують рівень діючих розтягуючих напружень у перерізі штаби. Форма епюри напружень показує, що штаба прокочується з великими розтягуючими напруженнями в середині ширини, що свідчить про прокатку з великими коефіцієнтами витяжок у середині і меншими розтягуючими напруженнями на кромках. У даному варіанті прокатки поздовжні перетини кромки отримують більше подовження, ніж поздовжні перетини в середині ширини штаби. У результаті такої прокатки штаба отримує хвилясті кромки [1].



1 - прокатна кліть; 2 - ролик-стресометр; 3 - струмоз'ємний пристрій; 4, 5 - електронний перетворювач; 6 – табло

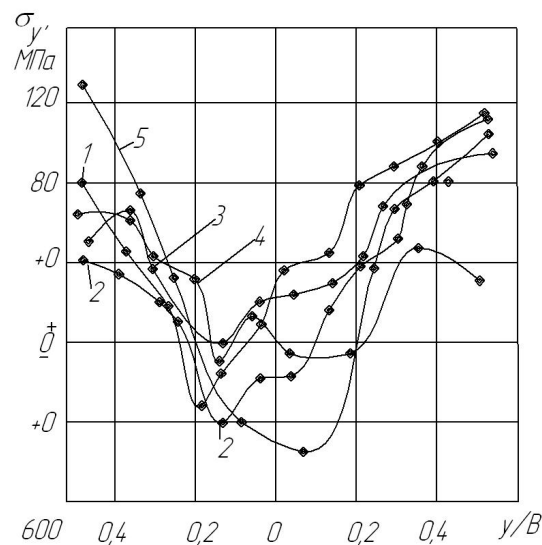
**Рисунок 3.5** – Схема механічного стресометра

Холодну прокатку на безперервних станах виконують з натягуванням штаби на міжклітьових ділянках і при змотуванні її на моталку. Практично у всіх випадках прокатки має місце нерівномірний розподіл поздовжніх напружень по ширині штаби [11]. Як видно з рис. 3.6, на кромках штаби діють тільки розтягуючі напруги, а в середній частині ширини спостерігаються стискаючі напруги, обумовлені анізотропією деформації зерен металу. Отже найбільші величини напруг натягання  $\sigma_H$  мають місце на кромках штаби, а мінімальні по осі штаби. Такий процес холодної прокатки штаб обумовлений необхідністю центрування штаби по осі валків за рахунок більшого натягання кромки. Експериментальні дослідження показують що відмінність між величинами напружень по ширині штаби може досягати  $\delta\sigma_H = 100 \dots 160 \text{ Н/мм}^2$ .

Нерівномірність розподілу розтягуючих напружень перед входом в подальшу кліть створюється завдяки різниці витяжок і нерівномірності швидкостей поблизу осередку деформації по ширині штаби [1].

Нерівномірність напруг  $\sigma_H$  робить відповідний вплив на розподіл нормальних контактних напружень, пружних деформацій валків, пластичних деформацій по ширині штаби та її планшетність. При цьому великі величини напружень розтягу на крайових ділянках штаби обумовлюють зниження середніх нормальних контактних напружень, потоншення кромки і збільшення

поперечної різнотовщинності штаби, підвищують ймовірність розриву штаби. Для зниження нерівномірності розподілу напружень  $\sigma_H$  по ширині штаби і підвищення якості її профілю і форми використовують різні пристрої і способи. У тому числі відомі пристрої гідравлічного вигину (рис. 3.4) і осьового зсуву робочих валків, які певною мірою дозволяють регулювати поперечну форму міжвалкового зазору, компенсуючи тим самим вплив нерівномірності розтягуючих напружень  $\sigma_H$  перед кліттю [11].

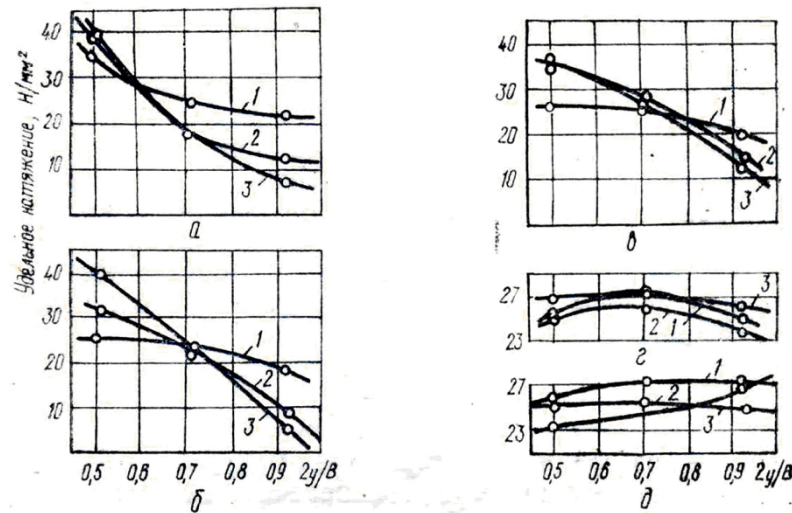


**Рисунок 3.6** – Розподіл поздовжніх напружень в смузі при прокатці на реверсивному стані 1680 (1-4) і за кліттю 4 безперервного стану (5).

У роботах [13, 14] теоретично і експериментально обґрунтована можливість регулювання нерівномірності розподілу поздовжніх розтягуючих напружень по ширині штаби на міжклітьовій ділянці і площинності штаби накладенням додаткового поля поздовжніх розтягуючих напружень протилежного виду за допомогою профільованих направляючих роликів, встановлюваних поблизу осередку деформації.

Нижче представлена частина експериментального матеріалу [3] по дослідженню розподілу поздовжніх напружень по ширині штаби, отриманого на універсальній розривній машині. Розміри штаби 0,22x90 мм. Напруги вимірювали за допомогою тензометричних датчиків, наклеєних у різних

повздовжніх перетинах на половині ширини штаби. Напруги вимірювали по ширині штаби при навантаженнях  $T = 100 - 600$  Н на відстані  $L_d = 25, 35, 50, 100, 180$  мм від осі ролика. З рис. 3.7 випливає, що при  $L_d/B = 2$  ( $L_d = 180$  мм) питомі натягання по ширині штаби практично не змінюються і не залежать від величини випуклості ролика, тобто від закону розподілу по ширині зовнішнього навантаження. При  $L_d/B = 0,56$  помітно вплив випуклості ролика на розподіл питомих натягань  $\Delta\sigma_y$  по ширині штаби, інтенсивність яких зростає із зменшенням  $L_d/B$ . У цій серії дослідів встановлено, що нерівномірність додатку до кінців штаби зовнішнього навантаження проявляється в смузі на відстані  $L_d/B \leq 1$ . Однак при пластичній деформації і наявності неплоскостності штаби виявляється і при  $L_d/B > 2$  [15].



**Рисунок 3.7** – Розподіл питомих повздовжніх напружень в смузі при  $L_d/B = 0,278$  (а),  $0,39$  (б),  $0,56$  (в)  $1,11$  (г),  $2$  (д) і діаметральної випуклості ролика, мм ( $2f_{н.р.}$ ):  $1-0,5$ ;  $2-1,2$ ;  $3-3,0$

Експерименти щодо впливу на штабу профільованими направляючими роликками також показали можливість регулювання параметра  $\delta\mu/\mu$  по ширині штаби ( $\mu$  – середній коефіцієнт витяжки штаби;  $\delta\mu$  – різниця коефіцієнтів витяжок на крайовій ділянці штаби і в середині ширини штаби) [15].

Так, у дослідженнях [15] встановлено, що при розтягуванні тонкої плоскої штаби (товщина  $0,22$  мм) із застосуванням обвідних роликів з

випуклістю на діаметр  $f = 0,5 \dots 0,3$  мм має місце нерівномірний розподіл поздовжніх напружень розтягу по ширині штаби. Нерівномірність напруги розтягнення  $\sigma_H$  по ширині збільшується при збільшенні випуклості ролика і наближенням ділянки навантаження до валків. Максимальна нерівномірність розподілу  $\sigma_H$  (при силі натягання  $T = 500$  Н) має місце на відстані  $L_0 \approx 0,56 B$  ( $L_0$  и  $B$  – відповідно відстань від осі ролика і ширина штаби –  $B = 90$  мм). У цьому випадку по осі штаби  $\sigma_H \approx 40$  Н/мм<sup>2</sup> та на кромці  $\sigma_H \approx 0$ . При  $L_0/B \geq 1,1$  напруга розтягування практично рівномірно розподіляється по ширині штаби, а величина випуклості не впливає на різницю напруг по ширині, що відповідає теоретичним положенням [15] для пружного розтягування плоскої штаби.

При дослідженні розподілу напружень по ширині штаби на безперервному і реверсивному станах 1680 холодної прокатки встановлено [16]:

- при увігнутих (вироблених) профілях бочок обвідних (тензометричних) роликів максимальні розтягуючі напруги діють на кромках штаби;
- застосування обвідних (тензометричних) роликів з випуклістю 3 ... 10 мм спостерігається зниження нерівномірності розподілу напружень розтягу по ширині штаби, а в ряді випадків має місце рівномірний розподіл розтягуючих напружень без погіршення умов процесу прокатки;
- підйом рівня поверхні тензометричного ролика на 12 ... 27 % щодо лінії прокатки сприяє зменшенню поздовжніх розтягуючих напружень на кромках штаби на 20 ... 23 %.

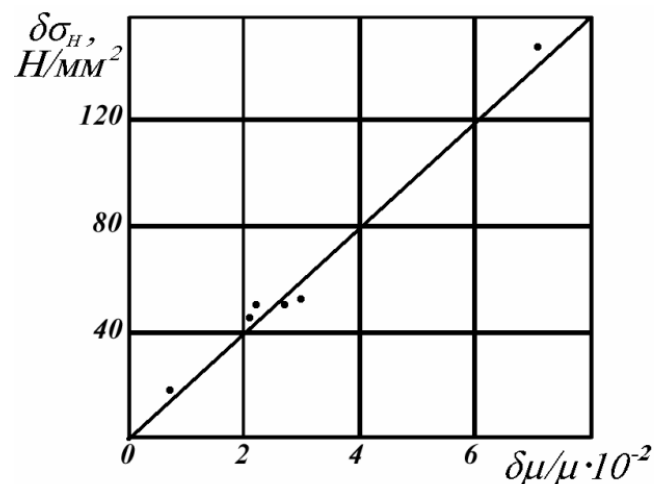
Відповідно до даних [14] при квадратичному законі зміни нерівномірності деформації по ширині штаби, поздовжні залишкові напруги можна визначити за формулою:

$$\delta\sigma_H = aE \frac{\Delta\mu}{\mu} \left[ 16 \left( \frac{2y}{B} - \frac{1}{2} \right)^4 - \frac{1}{5} \right], \quad (3.1)$$

де  $\delta\sigma_H$  – різниця натягання по ширині штаби між серединою і кромкою штаби;  
 $E$  – модуль пружності матеріалу штаби;  $B$  – ширина штаби ( $y = 0 \dots B/2$ );  $a$  –  
 коефіцієнт вирівнювання напруг ( $a = 1,2$ ).

З розрахунків з використанням формули (2.1) випливає, що при  $\delta\sigma_H = 160$  Н/мм<sup>2</sup> і  $B = 1000$  мм відносна різниця коефіцієнтів витяжок становить  $\delta\mu/\mu = 8 \cdot 10^{-4}$ , амплітуда хвилі коробоватості дорівнює  $A = 9,2$  мм.

Аналогічні дані отримані і в експериментальних дослідженнях на станах 1700 холодної прокатки (рис. 3.8) [8]. Як випливає з рис. 3.7, зі збільшенням відносної різниці  $\delta\mu/\mu$  різниця напруг розтягування  $\delta\sigma_H$  лінійно, збільшується і при  $\delta\mu/\mu = 8 \cdot 10^{-4}$  параметр  $\delta\sigma_H$  становить  $\delta\sigma_H = 160$  Н/мм<sup>2</sup>, що відповідає розрахунковим даними.



**Рисунок 3.8** – Вплив відносної різниці коефіцієнтів витяжок по ширині штаби на нерівномірність розподілу поздовжніх розтягуючих напружень (штаба товщиною  $h = 0,8 \dots 2,0$  мм і шириною  $B = 1000 - 1420$  мм, стан 1700)

Дефект форми штаби на міжкільтьовій ділянці і нерівномірність розтягуючих напружень  $\sigma_H$  можна усунути, як зазначено вище, впливом профільованих (випуклих) направляючих роликів, параметри профіліровки які визначаються з виразу [5] (при  $2b_V = L_P$ ):

$$\delta\sigma_H = aE \frac{E \cdot S}{A_K^2} \left[ 1 + \frac{R_P}{S} - \frac{f_{HP}}{S} \right], \quad (3.2)$$

де  $S$  – відстань між твірною ролика і лінією прокатки;  $A_K$  – відстань між осями ролика і валків;  $f_{HP}$  – випуклість ролика на радіус;  $R_P$  – радіус ролика;  $L_P$  – довжина ролика;  $2b_y$  – відстань від осі штаби до розглянутого поперізного перерізу.

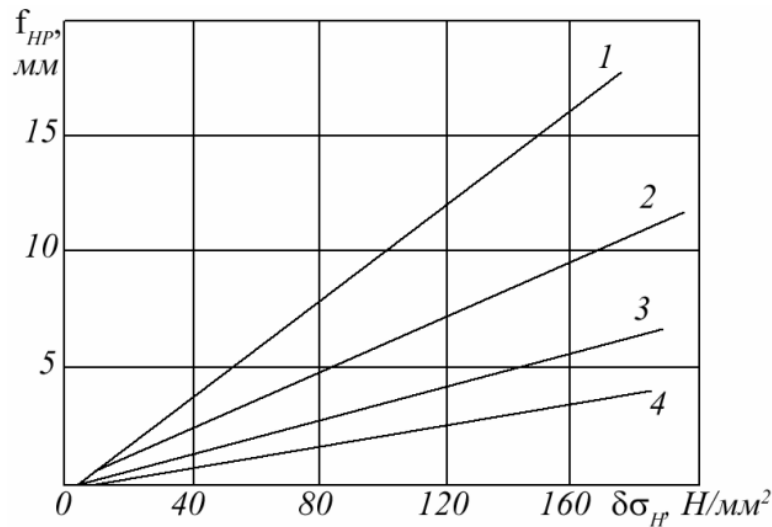
Не враховуючи через малість третьої складової в дужках і вирішуючи рівняння (3.2) щодо  $f_{HP}$  при  $2b_y = L_P$  (контакт штаби по всій довжині ролика) отримаємо:

$$f_{HP} = \frac{\delta\sigma_H \cdot A_K^2}{\alpha E \cdot (S + R_P)} \quad (3.3)$$

Необхідна величина випуклості ролика при ширині штаби  $B < L_P$  ( $B/L_P < 1$ ) або при неповній компенсації напруг  $\delta\sigma_H$  (або величини коробоватості  $A$ ) визначається з виразу [11]:

$$f_{HP}^B = f_{HP} \left( \frac{B}{L_P} \right)^2 \quad (2.4)$$

Як впливає із залежностей (3.1 – 3.4) і рис. 3.9, величина випуклості направляючого ролика обумовлена геометричними параметрами стана ( $A_K$ ,  $S$  и  $R_P$ ), різницею розтягуючи напруг  $\delta\sigma_H$  (або різницею витяжок по ширині штаби, бо  $\delta\sigma_H/E = \delta\mu/\mu$ ). Так, при  $A_K = 2000$  мм,  $R_P = 125$  мм,  $S = 40$  мм,  $B/L_P = 0,59$  (стан 1700),  $\delta\sigma_H = 160$  Н/мм<sup>2</sup>,  $E = 220000$  Н/мм<sup>2</sup> для компенсації різниці натягання достатня випуклість ролика під штабою в межах  $f_{HP} = 5,5$  мм. Для середніх значень  $\delta\sigma_H = 80$  Н/мм<sup>2</sup>, випуклості ролика  $f_{HP} = 7,75$  мм і штаби шириною  $B = 1200$  мм ( $B/L_\delta \approx 0,70$ ,  $L_a = L_P$  – довжина бочки валка) штаба повністю контактує з роликом, чим компенсується збільшення довжини середньої ділянки ширини штаби за рахунок утворення коробоватості, усувається різниця натягання  $\delta\sigma_H$  і поліпшується форма штаби [11].



**Рисунок 3.9** – Випуклість направляючого ролика для вирівнювання поздовжніх напружень по ширині штаби при  $2b_y/L_P$ : 1 – 1,0; 2 – 0,84; 3 – 0,6; 4 – 0,4 ( $A_K = 2,0$  м;  $R_P = 250$  мм,  $S = 40$  мм) [11]

Таким чином, з метою зниження нерівномірності розподілу розтягуючих напружень  $\sigma_H$  по ширині штаби і зниження нерівномірності деформації по ширині осередку деформації наступної кліті рекомендується встановлювати напрямні (обвідні) ролики з випуклим профілем твірної при  $f_{HP} = 5 \dots 9$  мм (на радіус) зі зменшенням до чистової кліті (передбачається зменшення коробоватості штаби). Для забезпечення змотування штаби на моталку з рівною щільністю контакту витків по ширині і  $\delta\sigma_H = 30 \dots 40$  Н/мм<sup>2</sup> випуклість обвідного ролика перед моталкою встановлюють в межах  $f = 3 \dots 3,5$  мм на його довжині [1].

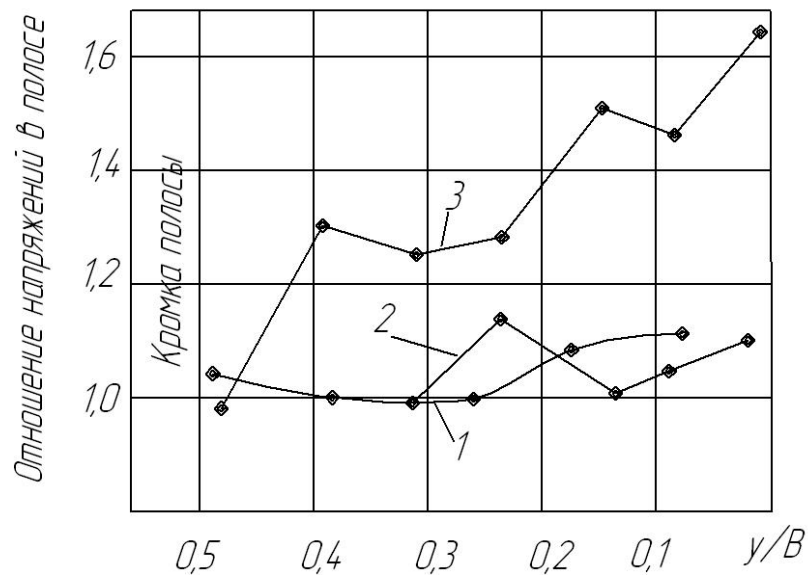
Раніше [17] було показано, що прикладення до кінця штаби поздовжніх розтягуючих сил обумовлює перерозподіл розтягуючих напружень в поперечному перерізі, відповідному ділянці защемлення штаби (в осередку деформації металу у валках). Якщо на ділянці защемлення існує нерівномірне по ширині штаби поле розтягуючих напружень, то в результаті відповідного зовнішнього впливу на вільний кінець штаби можливо змінити форму епюри поздовжніх напруг і, разом з цим, форму штаби (величину неплоскостності).



Для впливу на напружений стан і форму штаби запропоновані різні пристрої. Найбільш розповсюдженим способом регулювання форми міжвалкового зазору і розподілу обтиснення (коефіцієнтів витяжки, поздовжніх розтягуючих напружень) є противигин робочих валків гідравлічних пристроїв, вбудованих в їх подушку. Однак ефективність впливу противигину валків обмежується міцністю підшипників шийок робочих валків. У зв'язку з цим в якості додаткового (або самостійного) каналу впливу на характер розподілу коефіцієнтів витяжок і поздовжніх напружень по ширині штаби може бути використано пристрій регулювання з профільованими роликами.

У роботі [15] наведені результати досліджень впливу профілірованих роликів (випуклого і увігнутого), встановлених перед і за валками на зміну нерівномірності розподілу коефіцієнтів витяжок по ширині свинцевої штаби з вихідною товщиною  $H = 0,62 \dots 1,26$  мм і шириною  $B = 70$  мм. Штаби прокачували у валках діаметром  $D_p = 100$  мм, а обвідні ролики мали випуклість  $f_{np} = 0,45$  мм і увігнутість  $f_{np} = -0,35$  мм. В результаті досліджень встановили, що відносне обтиснення ( $\varepsilon = 0,1 \dots 0,4$ ), товщина штаби і коефіцієнт тертя в осередку деформації не роблять помітного впливу на коефіцієнт нерівномірності витяжок по ширині штаби ( $k_n = \mu_c / \mu_k$ ), ( $\mu_c$  і  $\mu_k$  коефіцієнти витяжок по осі і на кромці штаби). На коефіцієнт  $k_n$  основний вплив надають величина профіліровки роликів, відстань між осями ролика і валків, і кут  $\theta$  нахилу лінії до валку. Вплив цих факторів описується рівнянням регресії, з якого випливає, що збільшення параметрів  $f_{np}$  і  $\theta$  коефіцієнт витяжки по осі штаби збільшується, а при збільшенні параметра  $L_p$  – зменшується.

Дослідні дані представлені на рис. 3.10, на якому по осі ординат відкладені значення відношення показань магнітоанізотропного датчика в різних точках ширини штаби до мінімальних значень цих показань на межклітьових проміжках. Як видно з рис. 3.9, величини напруг на кромках штаби виявляються на 15 – 60 % менше, ніж у середині.

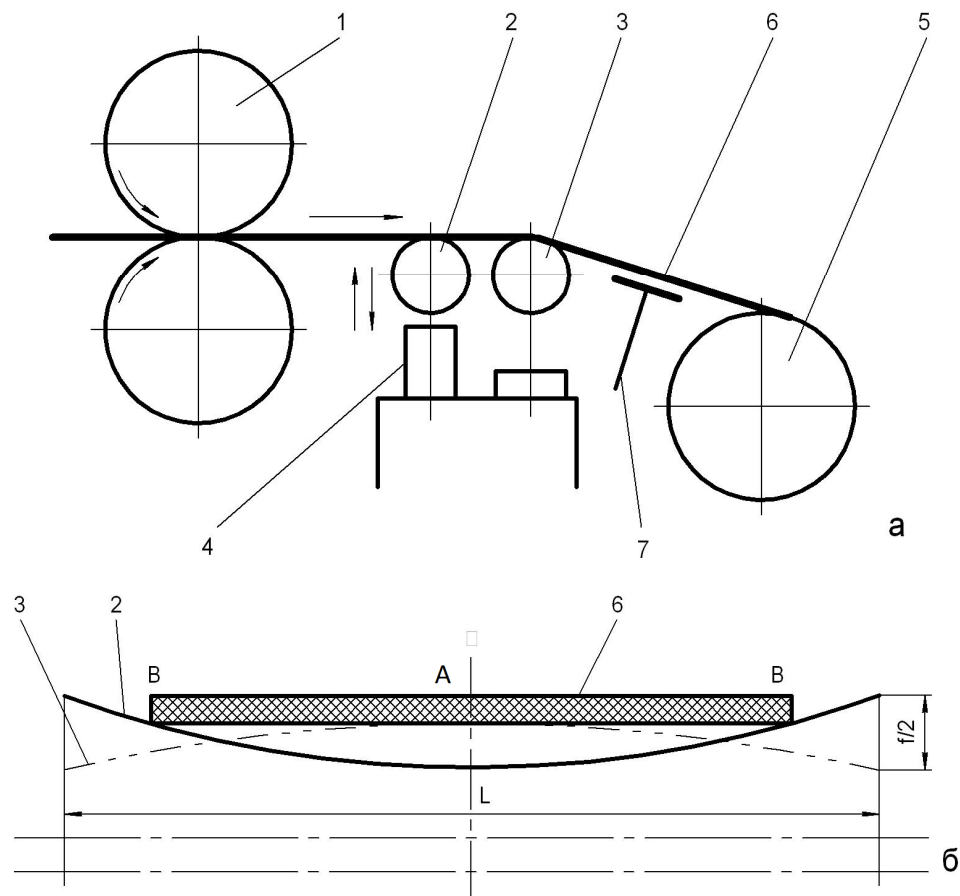


**Рисунок 3.10** – Відношення напружень по ширині штаби при її товщині  $h = 0,92-1,5$  мм після кліти 3 (1) і перед нею (2, 3) [1]

Вище було показано, що прикладення до кінця штаби поздовжніх розтягуючих зусиль обумовлює перерозподіл розтягуючих напружень в поперечному перерізі, відповідному ділянці защемлення штаби (в осередку деформації металу у валках). Якщо на ділянці защемлення існує нерівномірне по ширині штаби поле розтягуючих напружень, то в результаті відповідного зовнішнього впливу на вільний кінець штаби можливо змінити форму епюри поздовжніх напруг і, разом з цим, форму штаби (величину непланшетності). Для впливу на поле напруженого стану і форму штаби пропонується застосовувати пристрої, представлені на рис. 3.11.

При прокатуванні штаби 6 датчик 7 показує, наприклад, наявність великих натягань на ділянці "А" (рис. 3.11, б), що відповідає отриманню штаби з хвилястістю. У цьому випадку керуюча система видає команду на підйом ролика 2 до контакту з ділянками "В" до отримання епюри з рівномірним розподілом поздовжніх напруг. Якщо максимальні напруги розтягнення діють на ділянках "В" (коробчастість) ролик 2 опускають вниз, зменшуючи при цьому розтягуючі напруги на кромках штаби у напрямку вирівнювання

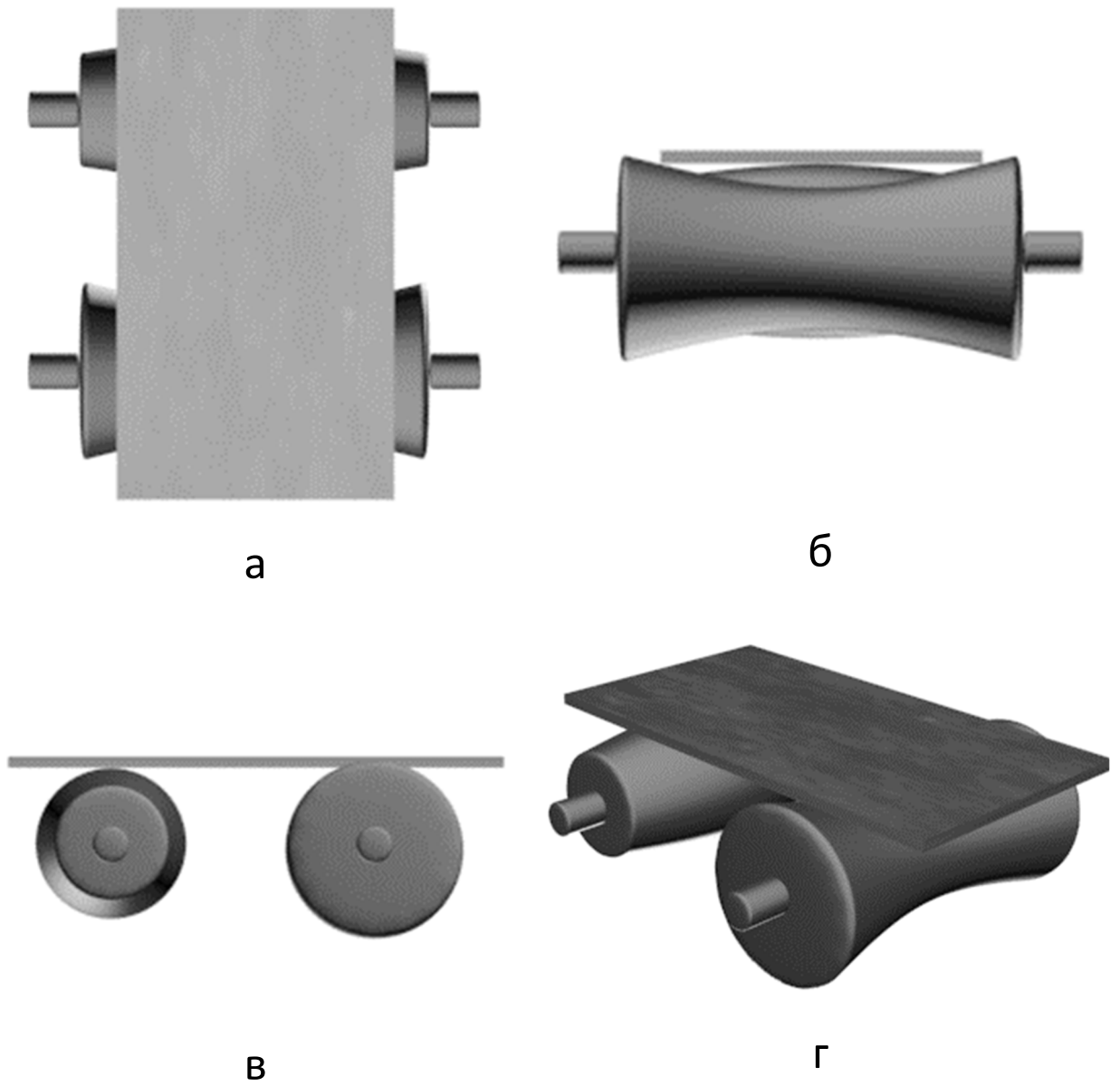
поздовжніх напружень по ширині штаби. Рівномірний розподіл напружень розтягу по ширині штаби забезпечує отримання планшетної штаби.



а - схема пристрою; б - схема контактування штаби з роликком  
 1 - чистова кліть; 2 - рухомий ролик; 3 - стаціонарний ролик; 4 -  
 гідропривід; 5 - моталка; 6 - штаба; 7 - вимірювач напружень

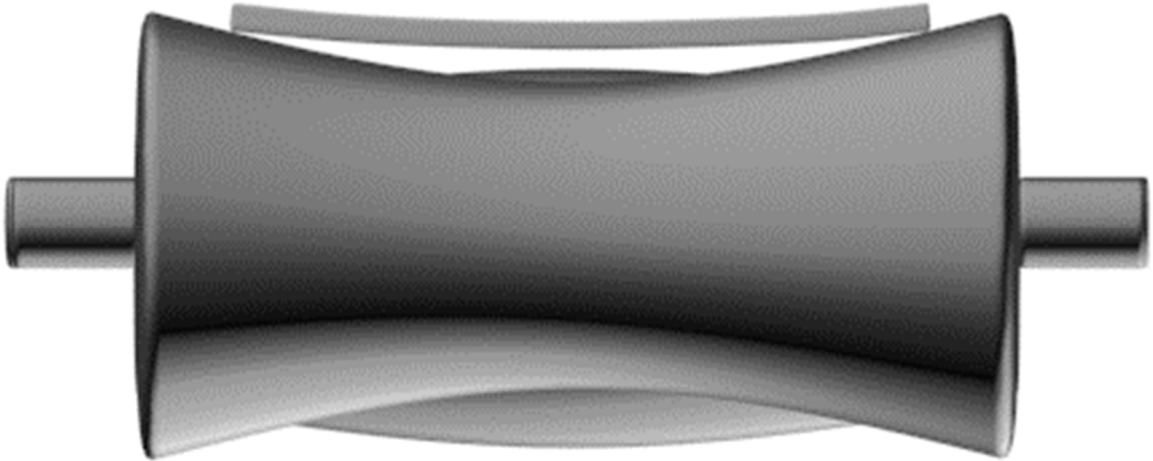
**Рисунок 3.11** – Пристрій регулювання форми штаби при холодній прокатці [11]

Вимірювання розподілу напружень натягання виконується тензометром 7, який розташований на ширині штаби. На рис. 3.11,б показана форма твірних бочок роликів 2, 3 параболічного вигляду. Ролик 2 може бути цілісним або секційним по довжині. Сигнал з датчика 7 про характер розподілу поздовжніх напружень передається в електронну систему, яка управляє переміщенням ролика 2 за допомогою гідроприводу 4 вгору або вниз [11].

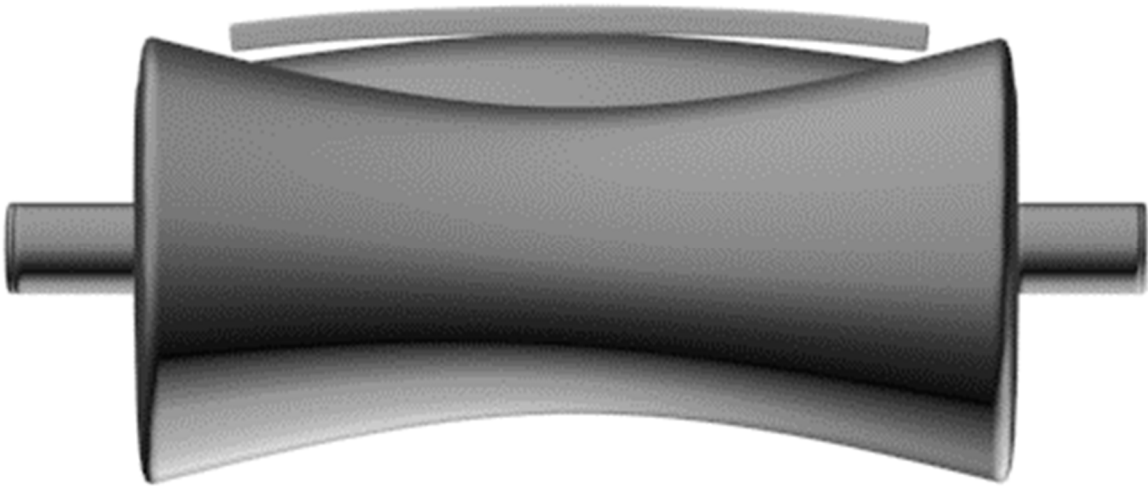


а – вид зверху; б – вид спереду; в – вид зліва; г – перспектива

**Рисунок 3.12** – Проекції обвідних роликів відповідно до рис. 3.11



а



б

а – випуклий ролик опущений; б – випуклий ролик піднятий.

**Рисунок 3.12 а** – Вид спереду обвідних роликів відповідно до рис. 3.11

Фізичний процес вирівнювання по ширині штаби напруг натягання полягає в тому, що дія роликів 2, 3 передається в осередок деформації штаби в кліті 1, сприяє вирівнюванню нормальних контактних напружень і коефіцієнтів витяжок в поздовжніх шарах по ширині штаби. Тобто сприяє отриманню планшетної полоси. Це також забезпечує рівномірний розподіл міжвиткових напружень при змотуванні штаби в рулон моталкою 5, що запобігає злипанню-зварюванню витків рулону при безокисному їх відпалі і утворенню дефекту "злам" при дресируванні штаби [11].

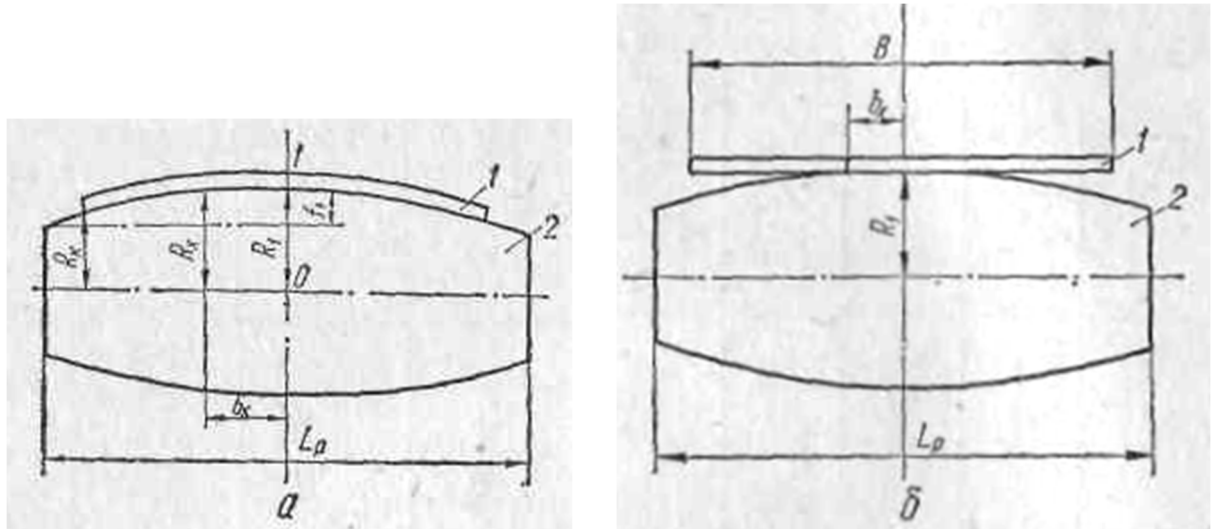
Представлені результати досліджень дозволяють рекомендувати роликові пристрої впливу на штабу для використання на прокатних станах, як це представлено в роботі [11] (рис. 3.11, 3.12).

### **3.4 Поздовжні напруження у штабі при випуклому натяжному (обвідному) ролику**

При розтягненні штаби, яка опирається на випуклий ролик, поздовжні напруження на деяких ділянках її довжини нерівномірно розподілені по ширині штаби. Причому внаслідок більш великих поздовжніх деформацій по осі штаби напруги можуть істотно перевищувати напруги на крайках. Таке розподілення поздовжніх напружень розтягнення по ширині необхідно створювати у штабі після виходу її з кліті для зменшення обривності швів зварних рулонів (стани холодної прокатки) і зменшення утяжки ширини штаби (стани гарячої прокатки). Це можливо здійснити при застосуванні в міжклітьових ділянках неперервних станів натяжних (обвідних) роликів з випуклим профілем бочки.

За допомогою отриманих теоретичних залежностей [15] можливо встановити різницю поздовжніх пружних деформацій і напружень в середній частині ширини і на крайках штаби в залежності від деяких параметрів прокатного стану і в першому наближенні вибрати необхідну випуклість і місце установки обвідного або натяжного ролика.

В залежності від величини натягання штаба торкається ролика по всій ширині (рис. 3.13 а), або деякою частиною (рис. 3.13 б). Розглянемо умови деформації штаби для першого випадку. При цьому вважаємо, що у кінці штаби прикладено напруги, рівномірно розподілені по її ширині.



**Рисунок 3.13** – Схема контактування штаби з випуклим роликом по всій ширині (а) і деякій частині (б)

Пружна деформація волокон при згинанні навколо ролика пропорційна центральному куту  $\varphi_x$ , в якому міститься дуга контакту  $l_x$  (рис. 3.14). Оскільки кут  $\varphi_x$  при випуклому ролику зменшується від осі штаби до її крайок, то і деформація штаби повинна зменшуватись у цьому напрямку. Різниця у величині абсолютної деформації волокон по осі полоси в будь-якому поздовжньому перетині її ширини визначається формулою:

$$\Delta l_x = l_1 - l_x = R_1 \cdot \varphi_1 - R_x \cdot \varphi_x \quad (3.4)$$

де  $R_1, R_x$  – радіус випуклого ролика по осі і в будь-якому перетині довжини його бочки;  $\varphi_1$  і  $\varphi_x$  – центральний кут по осі і в будь-якому поздовжньому перетині ширини штаби;  $l_1$  і  $l_x$  – довжина дуги охвату ролика штабою по осі ролика і в будь-якому перетині.

Зміна радіусу по довжині випуклої бочки ролика описується виразом:

$$R_x = R_1 - f_1 \cdot \frac{4 \cdot b_x^2}{L_p^2} \quad (3.5)$$

де  $f_1$  – випуклість ролика по радіусу;  $b_x$ - відстань від осі штаби до перетину, що розглядається;  $L_p$  – довжина бочки ролика.

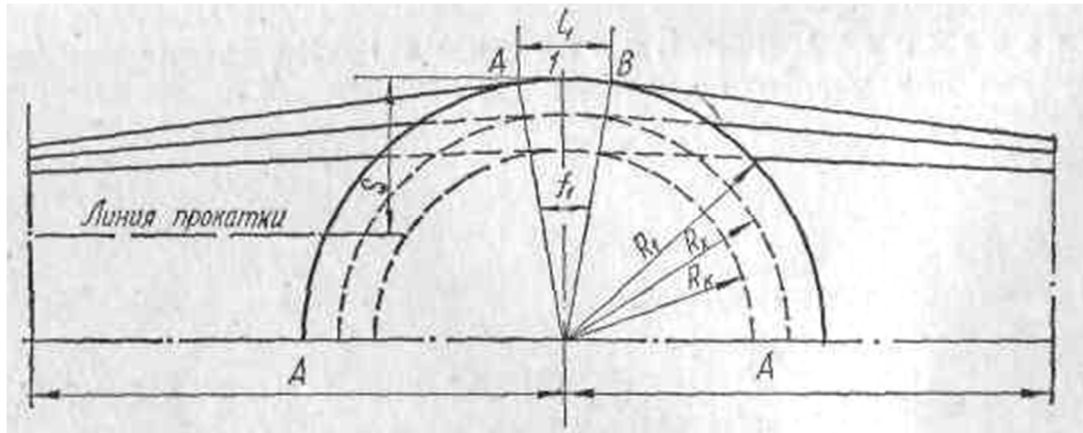


Рисунок 3.14 – Схема до виводу формул

Кути  $\varphi_1$  і  $\varphi_2$  з рис. 3.14 дорівнюють:

$$\operatorname{tg} \varphi_1 \approx \varphi_1 = \frac{2s}{A}; \quad (3.6)$$

$$\operatorname{tg} \varphi_x \approx \varphi_x = \frac{2}{A}(s - f_x) = \frac{2}{A}\left(s - 4f_1 \frac{b_x^2}{L_p^2}\right), \quad (3.7)$$

де  $s$  – відстань від лінії прокатки до поверхні ролика;  $A$  - відстань від осі ролика до осі робочої кліті.

Підставляючи вирази (2.5 – 2.7) в (2.4) отримаємо:

$$\Delta l_x = \frac{2R_1 s}{A} \left[ 1 - \left( 1 - \frac{4f_1}{R_1} \cdot \frac{b_x^2}{L_p^2} \right) \right] \cdot \left( 1 - \frac{4f_1}{s} \cdot \frac{b_x^2}{L_p^2} \right). \quad (3.8)$$

Зменшення відносної деформації по ширині штаби

$$\Delta \varepsilon_x = \varepsilon_1 - \varepsilon_x = \frac{\Delta l_x}{2A} = \frac{R_1 s}{A^2} \left[ 1 - \left( 1 - \frac{4f_1}{R_1} \cdot \frac{b_x^2}{L_p^2} \right) \right] \cdot \left( 1 - \frac{4f_1}{s} \cdot \frac{b_x^2}{L_p^2} \right) \quad (3.9)$$

де  $\varepsilon_1$  і  $\varepsilon_x$  – відносна деформація по осі штаби і в будь-якому перетині по її ширині.

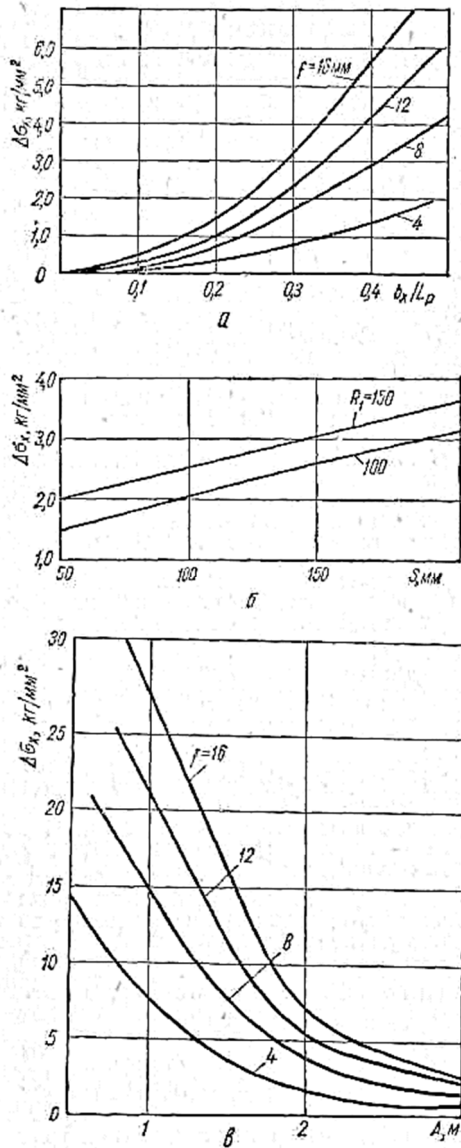
З виразу (3.9) витікає, що при випуклому ролику, на який спирається натягнута штаба, найменша деформація на крайці штаби, коли  $b_x \rightarrow L_p$ . У цьому випадку  $\Delta \varepsilon_x$  має максимальне значення. Деформація  $\varepsilon_1$  по осі штаби (максимальна) визначається напругами, діючими в поздовжньому перетині.



Вираз (3.9) і закон Гука дають можливість визначити різницю напружень розтягнення по ширині штаби в плоскості осі ролика

$$\Delta\sigma_x = \sigma_1 - \sigma_x = \Delta\varepsilon_x \cdot E, \quad (3.10)$$

де  $E$  – модуль пружності штаби;  $\sigma_1$  і  $\sigma_x$  – напруги розтягання по осі штаби і в будь-якому перетині по її ширині.



Результати розрахунків по формулі (3.10) представлені на рис. 3.15. Як видно, різниця між напруженнями натягання в середній частині штаби і на країці збільшується по мірі збільшення ширини штаби  $b_x$  і випуклості ролика. Так, при  $b_x/L_p = 0,45$  і  $f_1 = 16$  мм напруження розтягнення на країці  $6,9 \text{ кг/мм}^2$  менше, ніж по осі штаби (рис. 3.15, а). Піднімання випуклого ролику відносно лінії прокатки сприяє підвищенню напружень у середині ширини штаби та їх зменшенню на крайках ( $\Delta\sigma_x$  підвищується) (рис. 3.15, б). Цьому також сприяє збільшення радіусу ролика. Наближення ролика до осі робочої кліті (зменшення відстані  $A$ ) викликає перерозподіл розтягуючих напружень по ширині штаби.

Рисунок 3.15 – Залежність  $\Delta\sigma_x$  від  $b_x/L_p$  (а,  $R = 150$  мм,  $s = 80$  мм,  $A = 3$  м),  $s$  (б,  $b_x/L_p = 0,3$ ,  $f_1 = 12$  мм,  $A = 3$  м),  $A$  (в,  $R_1 = 150$  мм,  $s = 80$  мм,  $b_x/L_p = 0,3$ ).

При  $A = 1$  м розтягуючі напруження на крайках в залежності від величини  $f_1$  зменшується на 7,0 – 30 кг/мм<sup>2</sup> відносно напруг на осі штаби (рис. 3.15, в).

При прокатці широкоштабової сталі в гарячому і холодному стані з натяганням, поздовжні розтягуючі напруження розподіляються нерівномірно. Умови деформації металу обумовлюють виникнення на крайках максимальних розтягуючих напружень. Застосування випуклих обвідних (натяжних) роликів забезпечує зменшення напруг розтягання на крайках і вирівнювання епюри поздовжніх напружень по ширині штаби на міжклітьовій ділянці. Необхідна для цієї мети випуклість ролика визначається виразом (3.9 і 3.10). Для отримання більш широкого поля регулювання поздовжніх напружень, обвідні випуклі ролики, що встановлюються біля клітей, повинні переміщуватися уздовж руху штаби ( $A \neq \text{const}$ ).

Формули (3.9 і 3.10) дозволяють визначати  $\Delta\sigma_x$  по ширині штаби в площині осі ролика. По мірі віддалення від ролика нерівномірність розподілу  $\Delta\sigma_x$  зменшується, і на деякій відстані поздовжні напруження вирівнюються по ширині, тоді  $\Delta\sigma_x = 0$ . В дослідженнях автора [15]  $\Delta\sigma \rightarrow 0$  при  $L/B = 1,0 - 1,5$ , де  $L$  – довжина ділянки штаби, на якій  $\Delta\sigma > 0$ ;  $B$  – ширина штаби. В інших умовах деформації це відношення може бути дещо іншим. Тому у загальному випадку можна записати  $L = n \cdot B$ , де  $n$  – коефіцієнт пропорційності. Враховуючи, що напруження розтягання на пружній ділянці  $L$  змінюються за лінійним законом, знаходимо

$$\Delta\sigma'_x = \Delta\sigma_x \cdot E \cdot \left(1 - \frac{L_y}{n \cdot B}\right), \quad (3.11)$$

де  $L_y$  – відстань від осі ролика до розглядаємого перетину штаби.

При великій випуклості ролика, відносно товстій штабі або невеликому натяганні штаба не контактує з роликом по всій ширині (рис. 3.13, б) і це дещо знижує величину  $\Delta\sigma_x$ .

## **4 МЕХАНІЧНА ЧАСТИНА**

### **4.1 Оптимізація продуктивності станів холодної прокатки**

#### ***4.1.1 Вступ***

Значне розширення виробництва і необхідність підвищення якості тонколистового холоднокатаного металу вимагають удосконалення існуючих і створення нових високопродуктивних та економічних широкоштабових станів холодної прокатки.

Найважливішими параметрами широкоштабового стана холодної прокатки є швидкість прокатки, маса рулонів, що прокатуються а також рівень механізації та автоматизації процесу прокатки [18, 19].

Продуктивність і економічність прокатного стана підвищується разом з підвищенням швидкості прокатки і маси рулонів тільки до деякої межі. Подальше підвищення цих параметрів, забезпечуючи деяке зростання продуктивності стана, робить його експлуатацію неекономічною, оскільки темпи зростання капітальних і експлуатаційних витрат випереджають темпи зростання продуктивності стана.

#### ***4.1.2 Постановка задачі дослідження***

При проектуванні нового обладнання велике значення має економічний аналіз технічних параметрів, що приймаються, для станів, що створюються і визначення економічних меж їх підвищення.

Тип прокатного стана і схема технологічного процесу, як правило, визначаються сортаментом і заданою продуктивністю, а швидкість прокатки і масу рулону вибирають звичайно на основі прикидочних розрахунків. Потім за допомогою економічного розрахунку визначають ефективність вибраних вихідних даних. Цей звичайний шлях вибору, незважаючи на накопичений досвід, часто буває недостатньо об'єктивним, оскільки не може врахувати складної залежності і взаємодії усіх параметрів прокатного стана і процесу

прокатки. Тому обрані дані не завжди забезпечують отримання максимально можливої продуктивності і найкращих техніко-економічних показників роботи обладнання.

*Метою роботи* є виявлення доцільних меж підвищення швидкості і маси рулонів штаби, що проектується, виявлення залежності продуктивності стана від цих найважливіших параметрів з урахуванням інших істотних факторів: динамічних характеристик привода, кількості зварних швів, часу допоміжних і заправочних операцій, режиму прокатки, частоти змін валків тощо. Наступний економічний аналіз знайденої залежності дозволить зробити обґрунтовані висновки щодо доцільних меж підвищення швидкості прокатки і маси рулонів.

іншою метою є розробка програми для виконання розрахунків за відомою методикою [18] із застосуванням сучасного програмного комплексу MathCAD Prime 8 [20 - 23].

#### **4.1.3 Методика дослідження**

Пошук оптимальних параметрів прокатного стана обґрунтований тим, що він дозволяє встановити, на які максимальні швидкості прокатки доцільно розробляти нові засоби автоматизації, змазки, системи охолодження тощо, вибирати найбільш ефективні технологічні параметри обладнання з оптимальними техніко-економічними показниками.

Середньогодинна розрахункова продуктивність стана може бути визначена за формулою [1]:

$$Q_{ср} = \frac{3600 \cdot q}{c_1 \cdot \frac{q}{v_{пр}} + c_2 \cdot (1+k) \cdot v_{пр} + (c_3 + c_4 \cdot k) \cdot \frac{1}{v_{пр}} + c_5 + k \cdot c_6 + q \cdot c_7}, \quad (4.1)$$

де  $q$  – маса рулону, т;  $v_{пр}$  – швидкість прокатки, що встановилася, м/с;  $c_1 - c_7$  – коефіцієнти, які визначаються за наступними формулами.

$$c_1 = \frac{1}{\rho_{п} \cdot b \cdot h_k}, \text{ м/т}; \quad (4.2)$$

де  $\rho_{п}$  – щільність металу штаби, т/м<sup>3</sup>;  $b$  – ширина штаби, м;  $h_k$  – кінцева товщина штаби, мм.

$$c_2 = \frac{1}{2} \cdot \left( \frac{1}{a_p} + \frac{1}{a_T} \right), \text{ с/м}^2; \quad (4.3)$$

де  $a_p$  – прискорення при розгоні головного приводу стана, м/с<sup>2</sup>;  $a_T$  – сповільнення при гальмуванні головного приводу стана, м/с<sup>2</sup>.

$$c_3 = \frac{1}{2} \cdot \left( \frac{1}{a_p} + \frac{1}{a_T} \right) \cdot v_3^2 - l_{3.c}, \text{ м}; \quad (4.4)$$

де  $v_3$  – заправочна швидкість, м/с;  $l_{3.c}$  – довжина штаби, прокатоної на заправочній швидкості на початку і у кінці циклу, м.

$$c_4 = \frac{1}{2} \cdot \left( \frac{1}{a_p} + \frac{1}{a_T} \right) \cdot v_{\Pi}^2 - l_{\text{уст.}\Pi}, \text{ м}; \quad (4.5)$$

де  $v_{\Pi}$  – понижена швидкість прокатки при проходженні зварного шва, м/с;  $l_{\text{уст.}\Pi}$  – довжина штаби, прокатоної на зниженій швидкості, що встановилася,  $v_{\Pi}$  при проходженні зварного шва через усі робочі кліті, м.

$$c_5 = t_{3.0} - \left( \frac{1}{a_p} + \frac{1}{a_T} \right) \cdot v_3, \text{ с}; \quad (4.6)$$

де  $t_{3.0}$  – час неперекриваємих допоміжних і заправочних операцій (включаючи прокатку переднього і заднього кінців на заправочній швидкості), с.

$$c_6 = \frac{l_{\text{уст.}\Pi}}{v_{\Pi}} - \left( \frac{1}{a_p} + \frac{1}{a_T} \right) \cdot v_{\Pi}, \text{ с}; \quad (4.7)$$

$$c_7 = \frac{3600 \cdot t_{\Pi.B}}{Q_{\Pi.B}}, \text{ год/т}; \quad (4.8)$$

де  $t_{\Pi.B}$  – норма часу на перевалку стана, год.;  $Q_{\Pi.B}$  – планова норма металу, що прокатується між двома перевалками, т.

Враховуючи, що

$$l_{3.c} \gg \frac{1}{2} \cdot \left( \frac{1}{a_p} + \frac{1}{a_T} \right) \cdot v_3^2 \quad \text{і} \quad t_{3.0} \gg \left( \frac{1}{a_p} + \frac{1}{a_T} \right) \cdot v_3,$$

можна практично прийняти:

$$c_3 = -l_{3.c} \quad \text{і} \quad c_5 = t_{3.0}.$$

$$\text{Кількість зварних швів в рулоні: } k = \frac{q}{q_1} - 1,$$

де  $q_1$  – маса гарячекатаного рулону перед зваркою, т.

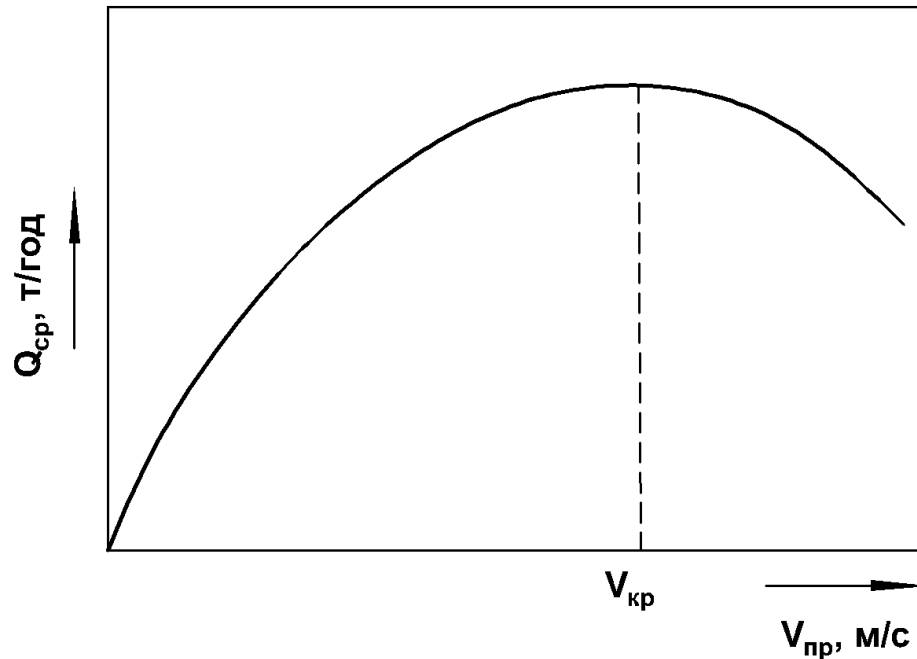
Рівняння (4.1) є загальним для усіх багатоклітьових станів холодної прокатки. Воно встановлює безпосередній аналітичний зв'язок між розрахунковою середньою годинною продуктивністю, з одного боку, і швидкістю прокатки і масою рулону, з іншого боку, враховуючи при цьому інші, найбільш суттєві фактори. Аналіз рівняння (4.1) показує, що при постійній масі рулону  $q$  крива  $Q_{\text{ср}} = f(v_{\text{пр}})$  має наступний характер (рис. 4.1): спочатку вона доволі різко підвищується, потім зростання уповільнюється, при деякому значенні  $v_{\text{пр}}$  крива має максимум, а потім починає зменшуватися. Таким чином, підвищення швидкості прокатки призводить до зростання продуктивності тільки до відомої межі.

Швидкість прокатки, при якій продуктивність максимальна, умовно називається критичною швидкістю прокатки  $v_{\text{кр}}$ . Величина  $v_{\text{кр}}$  залежить від коефіцієнтів  $c_1 - c_7$ , що визначаються параметрами кожної групи станів (товщина і ширина прокату, норми перевалок, стан циклу прокатки тощо). Дослідження впливу основних параметрів стана і технологічного процесу прокатки на величину  $Q_{\text{ср}}$  і  $v_{\text{кр}}$  наведено нижче. Однак не слід вважати, що неперервні стани повинні проектуватися на швидкість прокатки, яка дорівнює  $v_{\text{кр}}$ . При збільшенні швидкості прокатки і наближенні її до  $v_{\text{кр}}$  ефективність витрат, пов'язаних з підвищенням швидкості прокатки неухильно знижується, оскільки на кожну одиницю приросту швидкості забезпечується усе менший приріст продуктивності стана [18].

Непропорційність між швидкістю прокатки і продуктивністю пояснюється тим, що при більш високих швидкостях усе більша частина часу циклу прокатки кожного рулону повинна витрачатися на розгони і гальмування і усе менша – на прокатку при швидкості, що встановилася.

Швидкість  $v_{\text{кр}}$  відповідає такому циклу, у якому час прокатки на швидкості, що встановилася,  $t_{\text{уст}}$  дорівнює нулю (після розгону негайно починається гальмування). Подальше підвищення швидкості взагалі позбавлено сенсу, оскільки стан не буде встигати гальмуватися до заправочної швидкості при випуску кінців рулону. Тому перша частина кривої на рис. 1

при  $v_{пр} > v_{кр}$  має лише теоретичний характер, який пояснюється структурою рівняння (4.1) і на практиці реалізована бути не може. Але навіть при  $v_{пр} = v_{кр}$  максимальна проектна швидкість практично не буде використана, оскільки майже увесь цикл прокатки буде складатися з розгонів і гальмувань.



**Рисунок 4.1** – Характер кривої  $Q_{ср} = f(v_{пр})$  при постійній масі рулону ( $q = \text{const}$ )

Отож, остаточну відповідь на питання про те, на яку швидкість прокатки потрібно проектувати новий або реконструювати діючий стан, може дати тільки економічний розрахунок. Зрештою нас цікавить економічно доцільна межа швидкостей прокатки, визначити яку потрібно за спеціальною методикою [18].

Слід відмітити, що непропорційність між продуктивністю і швидкістю прокатки неминуча при рулонному способі виробництва, який за самою схемою переривчастий і пов'язаний з постійними розгонами, гальмуваннями і зупинками стана. Тому необхідно вести розробку нових, неперервних процесів холодної прокатки, які не пов'язані з розмотуванням і змотуванням штаби у рулони.

#### 4.1.4 Результати досліджень та їх обговорення

Розглянемо залежність продуктивності прокатного стана від швидкості прокатки на прикладі чотириклітьового стана 1700 для прокатки маловуглецевих сталей і автолиста (аналог стана 1680 ПАТ «Запоріжсталь»). При визначенні вихідних параметрів і режимів обтиснень використовуємо практичні дані заводу ММК (м. Маріуполь), на якому встановлений цей стан.

Розрахунок проводимо в програмному комплексі Mathcad Prime 8 [20 – 22], рис. 4.2. Будуємо графіки залежностей, рис. 4.3 і за допомогою функції **maximize** ( $Q_{\text{ср}}$ ,  $v_{\text{пр}}$ ) Mathcad Prime 8, знаходимо максимуми кривих 1-8, тобто  $v_{\text{кр}}$  для кожної кривої і будуємо криву **M** на рис. 4.3

З графіків на рис. 3 видно, що величина  $v_{\text{кр}}$  знаходиться у межах 38 – 40 м/с. Слід зазначити, що визначення середньої продуктивності необхідно виконувати з урахуванням загрузки двигунів головного приводу робочих клітей по моменту, оскільки може статися так, що вибраний привід не в змозі забезпечити прокатку штаб усіх профілерозмірів, що розглядаються, з максимальною швидкістю.

На рис. 4.4 наведено тривимірні графіки залежності середньогодинної продуктивності чотириклітьового стана 1700 в залежності від швидкості прокатки і маси рулонів, побудовані відповідно до рис. 4.3.

Аналогічні розрахунки були проведені і для інших умов прокатки. На рис. 5 і в табл. 1 наведена зведена інформація цих розрахунків.

Фізичний сенс зміщень положення критичної швидкості прокатки, наведених на графіках рис. 4.3 і 4.5 полягає у тому, що при змінненні того чи іншого параметру змінюється процент часу роботу стана при швидкості, що не встановилася. Як відмічалось вище, критична швидкість відповідає такому циклу, коли час прокатки при швидкості, що встановилася, дорівнює нулю (увесь цикл складається з розгонів і гальмувань). Тому при скороченні часу розгонів і гальмувань у загальному часі циклу положення критичної швидкості зсувається у бік більших швидкостей прокатки.



Це спостерігається, наприклад, при збільшенні параметрів  $a_p$ ,  $a_t$ , що дозволяє безпосередньо форсувати розгони і гальмування стана. Аналогічно при прокатуванні більш тонкої і вузької штаби (зменшенні  $h_k$  і  $b$ , див. рис. 5, д, е) зменшується маса штаби, що проходить крізь стан в одиницю часу. Тому на її розгони і гальмування необхідно затратити менше часу.

У той же час змінення часу допоміжних операцій (рис. 4.5, в) не змінює співвідношення між часом роботи стана при швидкості, що не встановилася і встановилася, тому положення  $v_{кр}$  не залежить від величини  $t_{з.о.}$ .

З графіку на рис. 3 витікає, що на продуктивність стана суттєвий вплив здійснює маса рулонів  $q$ . При малій масі рулонів зростання продуктивності у функції швидкості прокатки відбувається значно повільніше, ніж при великій масі рулонів.

**Таблиця 4.1** – Позначення до рис. 4.5

Рис.	Параметри	Номер кривої					
		1	2	3	4	5	6
а	$a_p, \text{м/с}^2$	1,0	1,67	2,35	2,8	-	-
	$a_t, \text{м/с}^2$	1,19	2,0	2,8	3,34	-	-
б	$v_{п}, \text{м/с}$	2	4	6	8	10	15
в	$t_{з.о.}, \text{с}$	140	120	100	80	60	40
г	$q_1, \text{т}$	5	7,5	10	15	-	-
д	$h_k, \text{мм}$	0,4	0,6	0,8	-	-	-
е	$b, \text{мм}$	1000	1280	1450	-	-	-

У той же час при малих швидкостях прокатки збільшення маси рулону не дає помітного збільшення продуктивності стана. Максимальна маса рулону обмежується, як відомо, співвідношенням його зовнішнього і внутрішнього діаметрів з урахуванням можливостей регулювання швидкості двигуна моталки. Однак максимальну масу рулону слід визначати економічним розрахунком.

#### ***4.1.5 Висновки***

Наведена методика визначення оптимальної продуктивності і техніко-економічних показників сучасних неперервних тонкоштабових станів холодної прокатки. У програмному комплексі MathCAD Prime 8 виконано розрахунки і визначено вплив основних параметрів прокатки на продуктивність стана, а саме, швидкості прокатки, маси рулонів, темпів розгону і гальмування двигунів головного приводу, зниженої швидкості проходження зварних швів, часу допоміжних і заправочних операцій, маси гарячекатаних рулонів перед зварюванням, товщини і ширини штаби, що прокатується. Для станів основних типів визначено граничні швидкості прокатки, перевищення яких призводить до зниження продуктивності стана.

За основний профілерозмір приймаємо штабу товщиною  $h_k := 0.8$  мм, шириною  $b := 1.28$  м, що прокатується з підкату товщиною  $h_0 := 2.75$  мм.

Параметри стана і режими обтиснень:  $h_1 := 1.85$  мм;  $h_2 := 1.2$  мм;

$h_3 := 0.9$  мм;  $\rho_n := 7.85$  т/м<sup>3</sup>;  $l_{p1} := 7$  м;  $l_{12} := 4$  м;  $l_{23} := 4$  м;  $l_{34} := 4$  м;

$l_{4M} := 3.9$  м. З урахуванням наведених вище даних приймаємо наступні значення вихідних параметрів:

$a_p := 2.35$  м/с<sup>2</sup>;  $a_T := 2.8$  м/с<sup>2</sup>;  $v_n := 10$  м/с;  $l_{3.c1} := 7$  м;  $t_{3.o} := 60$  с;

$q_1 := 5$  т;  $t_{n.e1} := 0.2$  год;  $n := 4$ ;  $Q_{n.e} := 2000$  т.

Вплив маси рулона на продуктивність стана досліджуємо в діапазоні 5-40 тонн з кроком 5 тонн. Таким чином  $q$  дорівнює:

$q = 0, 5 \dots 40 =$

0  
5  
10  
15  
20  
25  
30  
35  
40

т.

Далі визначаємо коефіцієнти  $c_1 - c_7$ :

$$c_1 := \frac{1}{\rho_n \cdot b \cdot h_k \cdot 10^{-3}} = 124 \text{ м/т}; \quad c_2 := \frac{1}{2} \cdot \left( \frac{1}{a_p} + \frac{1}{a_T} \right) = 0.39 \text{ с}^2/\text{м};$$

$$c_3 := - \left( l_{3.c1} + l_{p1} \cdot \frac{h_0}{h_k} + l_{12} \cdot \frac{h_1}{h_k} + l_{23} \cdot \frac{h_2}{h_k} + l_{34} \cdot \frac{h_3}{h_k} + l_{4M} \right) = -54.7 \text{ м};$$

$$l_{3.c2} := l_{p1} \cdot \frac{h_0}{h_k} + l_{12} \cdot \frac{h_1}{h_k} + l_{23} \cdot \frac{h_2}{h_k} + l_{34} \cdot \frac{h_3}{h_k} + l_{4M} = 47.7 \text{ м};$$

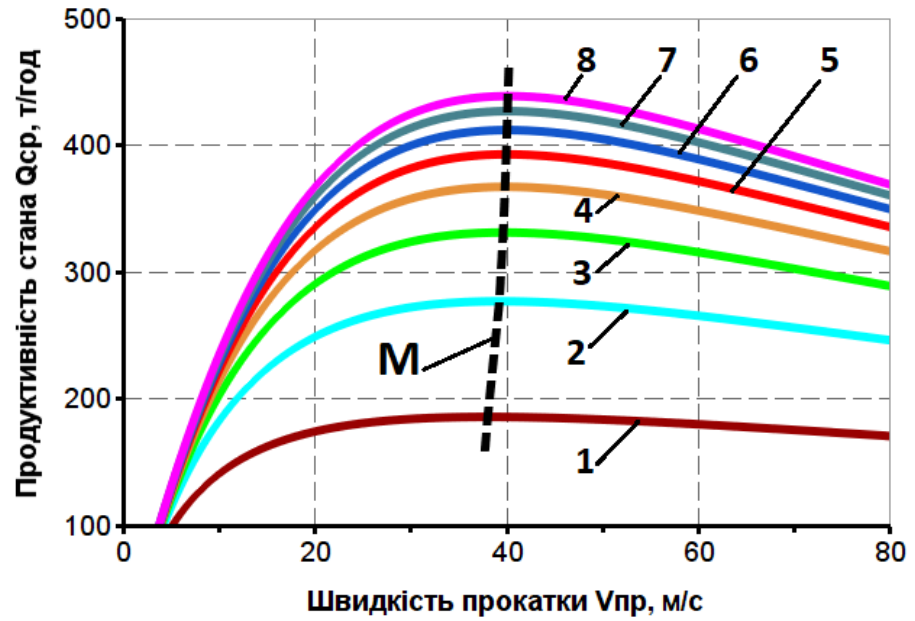
$$l_{ycm.n} := l_{3.c2} - l_{p1} \cdot \frac{h_0}{h_k} - l_{4M} = 19.8 \text{ м}; \quad c_4 := \frac{1}{2} \cdot \left( \frac{1}{a_p} + \frac{1}{a_T} \right) \cdot v_n^2 - l_{ycm.n} = 19.4 \text{ м};$$

$$c_5 := t_{3.o} = 60 \text{ с}; \quad c_6 := \frac{l_{ycm.n}}{v_n} - \left( \frac{1}{a_p} + \frac{1}{a_T} \right) \cdot v_n = -5.9 \text{ с}; \quad c_7 := \frac{3600 \cdot t_{n.e1} \cdot n}{Q_{n.e}} = 1.4 \text{ год/т.}$$

Після підстановки коефіцієнтів  $c_1 - c_7$  в рівняння (1) отримуємо:

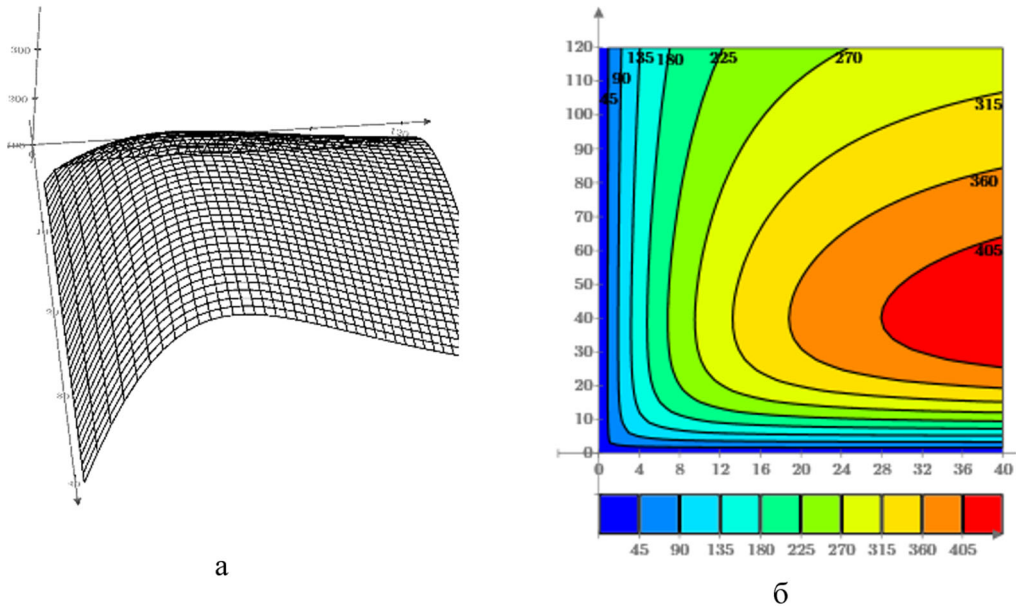
$$Q_{cp}(q, v_{np}) := \frac{3600 \cdot q}{0.27 \cdot q + \frac{128.28 \cdot q - 74.1}{v_{np}} + 0.078 \cdot v_{np} \cdot q + 65.85}.$$

**Рисунок 4.2** – Розрахунок продуктивності прокатного стана в програмному комплексі MathCAD Prime 8 в залежності від швидкості прокатки при різній масі рулонів



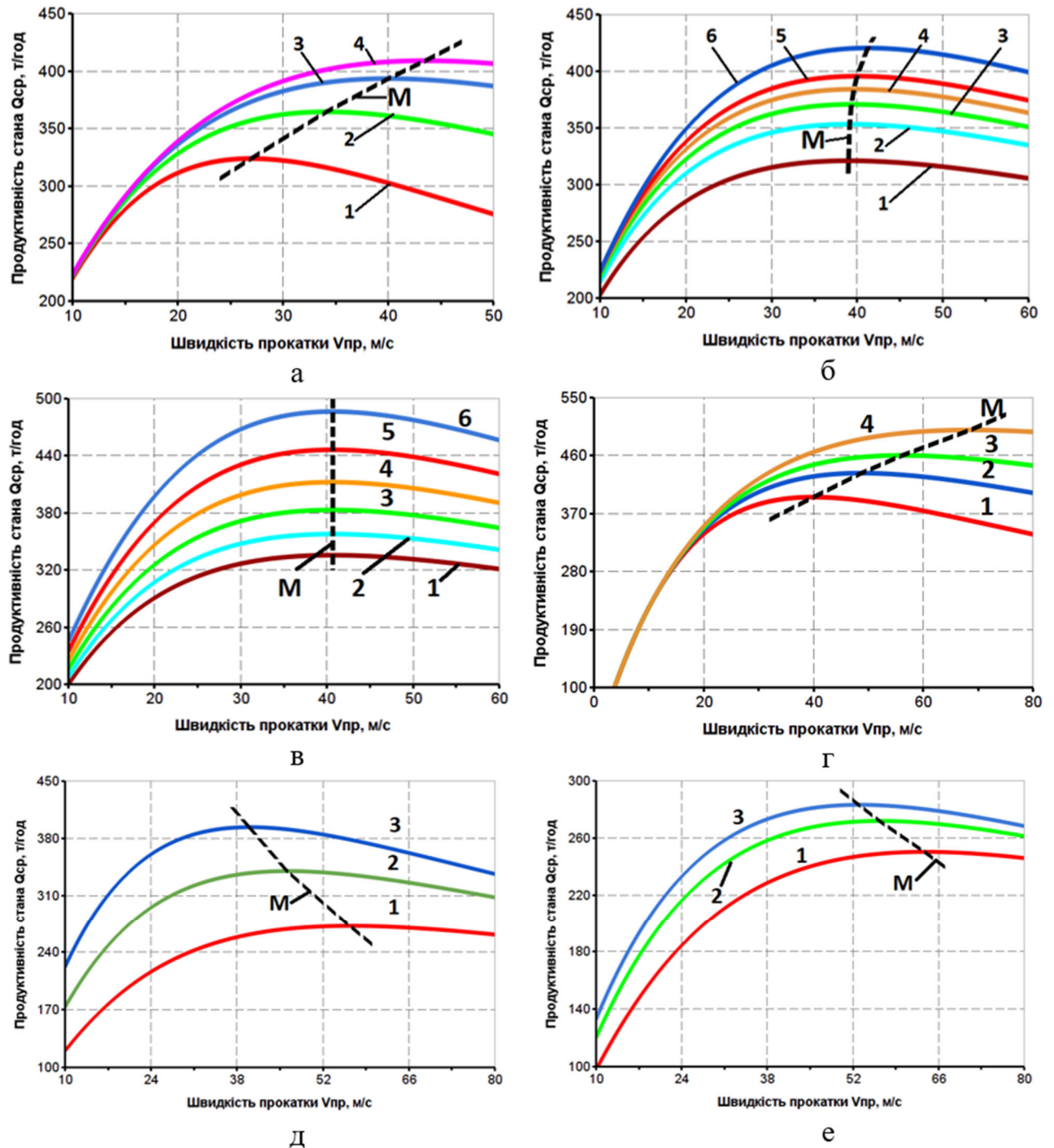
1 – 5 т; 2 – 10 т; 3 – 15 т; 4 – 20 т; 5 – 25 т; 6 – 30 т; 7 – 35 т; 8 – 40 т;  
 M – максимум продуктивності стана

**Рисунок 4.3** – Зміна середньогодинної продуктивності чотирикільцевого стана 1700 в залежності від швидкості прокатки при різній масі рулонів



а – графік поверхні; б – графік ліній рівня (контурний графік)

**Рисунок 4.4** – Тривимірні графіки залежності середньогодинної продуктивності стана 1700 в залежності від швидкості прокатки і маси рулонів



**Рисунок 4.5** – Залежність середньогодинної продуктивності чотирьохкільцевого стана 1700 від швидкості прокатки:

а – при різних темпах розгону і гальмування двигунів головного приводу ; б – при різній величині зниженої швидкості проходження зварних швів; в – при різному часі допоміжних і заправочних операцій; г – при різній масі гарячекатаних рулонів перед зварюванням; д – при різній товщині штаби; е – при різній ширині штаби; (М – лінія максимумів продуктивності)

## 5 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ТЕХНОГЕННА БЕЗПЕКА

### 5.1 Аналіз потенційних небезпечних і шкідливих факторів виробничого середовища

ЦХП - 1 відноситься до ііб категорії за ГОСТ 12.1.005-88, тому що витрат енергії робітника становить приблизно 178 ккал/год.

Слід зазначити, що умови роботи вальцювальників на безперервному стані холодної прокатки «1680» ускладняється тим, що їхня робоча зона розташована в безпосередній близькості до стана і незахищена закритою кабіною. Через застосування постійно, що розширюється асортиментів, мастил, необхідні для забезпечення високошвидкісного процесу, у повітрі робочої зони можливе надходження низьке- і високомолекулярних жирних кислот, окису вуглецю, хлору, аерозолі масла. Це вимагає устаткування безперервного стана холодної прокатки «1680» місцевою витяжкою, вентиляцією. Технічні засоби безпеки на стані холодної прокатки повинні забезпечувати захист працюючих від підвищеного рівня шуму (екрани, пульти керування, шумозахисні кабіни), а також виключати можливість:

- ведення процесу при несправності кінцевих вимикачів, пристроїв заземлення, огорожень робітників;
- вимикання стана при перебуванні працюючих у небезпечній зоні біля стана.

У запобігання травмування повинні бути виключені всі роботи з ручним завданням або іншими операціями на стані. Спостерігаються випадки травмування частинами валків, які відлітають, і ін. частками. Через неякісний метал і порушення технології підготовки валків можливо їхнє руйнування, що може стати причиною травмування працюючих.

На безперервному стані холодної прокатки «1680» такі шкідливі фактори, як теплове випромінювання і вібрація відсутні.

На безперервному стані холодної прокатки «1680» застосуємо безперервний процес прокатки, тобто метал перебуває відразу у всіх клітках, які зменшують час процесу прокатки й кількість допоміжних операцій, це зменшує можливі випадки травматизму.

Вальцювальники і їх підручні повинні дотримувати ряду правил техніки безпеки [24].

Насамперед, це стосується робіт, пов'язаних з перебуванням працюючих біля робочої клітки стана: перевалки, зачищення, чищення емульсійного колектору. Варто змити в клітці залишки масла або емульсії, покласти внизу дошку й після цього приступитися до роботи. Перед пуском стана вальцювальник повинен переконається у відсутності людей у небезпечній зоні біля стана, справності кнопки аварійної зупинки. Біля стана не повинне бути обривів, деталей стана. Проходи повинні бути вільні, підлога сухих і чистий, перекриттів гофрованими металевими плитами. Необхідно перевірити справність захисних корпусів, які заземлюють електродвигуни й апаратури, а також огороження, прийомного стола, стелажів, кріплень що рухаються й обертаються.

Пари змазуючо-охолодної рідини, можуть викликати роздратування слизуватої оболонки верхніх дихальних шляхів.

Травмонебезпечні операції по стропуванню і перевезенню валків на візку; остання повинна завантажуватися не вище ботів. При стропуванні і знятті валків працюючі повинні стояти збоку візка.

На ділянці безперервного стана холодної прокатки «1680», внаслідок роботи устаткування, виникає підвищений шум 90...92 дБА при нормі 85 дБА ГОСТ 12.1.003-83.

Оцінка факторів виробничого середовища і трудового процесу наведена в таблиці 5.1.

Таблиця 5.1 - Оцінка факторів виробничого і трудового процесу

Робоче місце – вальцювальник

№ п/п	Фактори виробничого середовища й трудового процесу	Норм. знач. (ГДК, ГДУ)	Фактичне значення	ііі клас: шкідливі й небезпечні умови й характер праці			Час дії фактору за зміну, %
				I	II	III	
1	Шкідливі хімічні речовини, мг/м <sup>3</sup> <u>I клас небезпеки</u>						
	Ангідрид хромовий	0,01	0,06			6,0	90
	Оксид марганцю	0,05	0,39			7,8	90
	<u>іі клас небезпеки</u>						90
	Акролеїн	0,2	0,66		3,3		
	<u>ііі клас небезпеки</u>						90
	Ангідрид сірчистий	10	16,83	1,63			90
	Вуглецю оксид	20	25	1,25			90
	Масла мінеральні	5	6,78	1,36			
2	Пил переважно фиброгенної дії мг/м <sup>3</sup>	4,0	4,8	1,2			95
3	Вібрація (загальна й локальна) дБ.						
4	Шум, дБА	85	92		7		90
5	інфразвук дБ						
6	Ультразвук дБ						
7	іонізуюче випромінювання: - радіочастотний діапазон, В/м; - діапазон промислової частоти, кв/м; - оптичний діапазон (лазерне випромінювання), вт/м <sup>2</sup>						
8	Мікроклімат у приміщенні:						
	- температура повітря <sup>0</sup> С;	16-27	32,1		5,1		100
	- швидкість руху повітря, м/с;	0,2-0,5	0,5				
	- відносна вологість повітря, %;	70-60	40				
	- інфрачервоне випромінювання, Вт/м <sup>2</sup>						
9	Температура навколишнього повітря(під час роботи на відкритому повітрі), <sup>0</sup> С: - улітку - узимку						
10	Атмосферний тиск						
11	Вага й напруженість праці.						



## ВИСНОВКИ

**1. У загальній частині** роботи наведена технологія виробництва холоднокатаних штаб в цеху холодної прокатки ЦХП-1 меткомбінату «Запоріжсталь». Розглянуто основні технічні характеристики обладнання цеху. Наведено аналіз параметрів режиму деформації на НСХП 1680, вибір обтиснення в першій і останній клітях стана, вибір натягання штаби і температурних умов прокатки. Виконано аналіз вузьких місць та запропоновано заходи щодо реконструкції, зокрема використання валків з регулярним рельєфом поверхні.

За літературними джерелами встановлено, що розроблена фірмою SMS-DEMAC технологія SVC (безперервна зміна профілю штаби) забезпечує найкращу якість штаби щодо площинності. Така технологія закладена у проект реконструкції прокатного виробництва ПАТ «Запоріжсталь».

**2. У дослідницько – розрахунковій частині** розглянуто технологічні аспекти та практичні рішення низки важливих завдань листопрокатного виробництва: управління площинністю та якістю поверхні холоднокатаних листів та штаб; контролю та прогнозування нерівномірності механічних властивостей у тонкоштабовому прокаті; побудови та практичного впровадження автоматичної системи управління якості (АСУЯ), що включає окремі взаємопов'язані підсистеми управління всіма регламентованими показниками якості продукції ЦХП-1 ПАТ «Запоріжсталь».

Розглянуто метод управління площинністю штаб, що включає два рівні:

- тактичний – вирішується завдання проектування, тобто. заздалегідь (до прокатки конкретного типорозміру) задаються уставки засобів регулювання на основних агрегатах цеху в залежності від заданої площинності готового прокату;
- оперативний – проводиться коригування уставок на кожному агрегаті залежно від величини відхилення фактичної неплщинності від заданого значення.

Розроблені матеріали допоможуть на практиці вирішити одне з найважливіших завдань – адекватного контролю та оцінки ступеня мінливості властивостей металу за довжиною та шириною штаби.

**3. У технологічній частині** для стабілізації геометричних параметрів тонколистового прокату, зниження нерівномірності розподілу розтягуючих напружень по ширині штаби і зниження нерівномірності деформації по ширині осередку деформації запропоновано встановити направляючі (обвідні) ролики з випуклим профілем поверхні за останньою кліткою стана перед моталками. Це зменшить нерівномірність повздовжніх розтягуючих напруг та поліпшить змотування штаби в рулон, покращить якість поперечного перетину штаби і процес її змотування.

Показано, що завдяки застосуванню випуклих обвідних роликів може бути досягнуто вирівнювання поздовжніх напружень натягання по ширині штаби зі зменшенням неплочинності і поліпшенням якості формування рулону. Слід також очікувати деякий позитивний вплив роликів через штабу і на поле контактних напружень в осередку деформації кліті.

**4. У механічній частині** розроблено програму для виконання розрахунків із застосуванням сучасного програмного комплексу MathCAD Prime 8. Наведена методика визначення оптимальної продуктивності і техніко-економічних показників сучасних неперервних тонкоштабових станів холодної прокатки. Визначено вплив основних параметрів прокатки на продуктивність стана, а саме, швидкості прокатки, маси рулонів, темпів розгону і гальмування двигунів головного приводу, зниженої швидкості проходження зварних швів, часу допоміжних і заправочних операцій, маси гарячекатаних рулонів перед зварюванням, товщини і ширини штаби, що прокатується. Для станів основних типів визначено граничні швидкості прокатки, перевищення яких призводить до зниження продуктивності стана.

**5. У розділі «Охорона праці та техногенна безпека»** виконано аналіз потенційних небезпечних і шкідливих факторів виробничого середовища та оцінку факторів виробничого і трудового процесу на робочому місці вальцювальника.

**ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ**

1. **Николаев В. А.** Прокатка широкополосной стали : монографія. Київ : Освіта України, 2009. 268 с.
2. **PanjkoVIC V.** Friction and the Hot Rolling of Steel. 2nd ed. Boca Raton, FL: CRC Press, 2014. 234 p.
3. **Николаев, В. А.** Холодная прокатка полос : ч.2. Учебное пособие. Запорожье : ЗГИА, 2014. 241 с.
4. **Василев Я. Д., Мінаєв О. А.** Теорія поздовжньої прокатки : підручник. Донецьк : УНіТЕХ, 2009. 488 с.
5. **Королев, А. А.** Конструкция и расчет машин и механизмов прокатных станков : учебное пособие. Москва : Metallurgiya, 1985. 376 с.
6. **Целиков А. И.** Машины и агрегаты металлургических заводов. В 3-х томах. Т. 3. Машины и агрегаты для производства и отделки проката : учебник для ВУЗов. Москва : Metallurgiya, 1988. 680 с.
7. **Коновалов Ю. В.** Справочник прокатчика. Справочное издание в 3-х книгах. Книга 2. Производство холоднокатаных листов и полос. Москва : «Теплотехник», 2008. 608 с.
8. **Божков А. И.** Плоскостность тонколистового проката : монографія. Москва : ИНТЕРМЕТ ИНЖИНИРИНГ, 1998. 264 с.
9. **Николаев В. А.** Процессы обработки металлов давлением : монографія. Запорожье : Акцент Инвест – трейд, 2014. 192 с.
10. **Делюсто Л. Г.** Основы прокатки металлов в постоянных магнитных полях : монографія. Москва : Машиностроение, 2005. 272 с.
11. **Николаев В. А., Жученко С. В.** Регулирование плоскостности полос при холодной прокатке роликовыми устройствами. Металлургическая и горнорудная промышленность. 2011. № 7. С. 235-239.
12. **Железнов Ю. Д.** Системные основы интенсификации производства широкополосной стали : монографія. Москва : Metallurgiya, 1986. 152 с.

13. **Николаев, В. А.** Профилирование и износостойкость листовых валков : монография. Киев : Техніка, 1992. 158 с.
14. **Железнов Ю. Д.** Статистические исследования точности тонколистовой прокатки : монография. Москва : Metallurgy, 1974. 240 с.
15. **Николаев В. А.** Продольные напряжения в полосе при выпуклом натяжном (обводном) ролике. Metallurgy and coke chemistry, сб. №40. Киев : Техніка, 1974. С. 69-73.
16. **Николаев В. А.** Распределение натяжений в полосе при неравномерном нагружении концов. Metallurgy and coke chemistry. Киев : Техніка, 1974. № 41. С. 57-63.
17. **Николаев В. А.** Распределение продольных напряжений в полосе. Изв. вузов. Черная металлургия. 1978. №11. С. 75-77.
18. **A. V. Yavtushenko, V. M. Protsenko, Yu. A. Belokon and Yu. V. Bondarenko.** Productivity Optimization of Cold Rolling Mills. Steel in Translation, 2020, Vol. 50, No. 5, pp. 335–339. <https://link.springer.com/article/10.3103/S0967091220050125>.
19. **Василев Я. Д.** Инженерные модели и алгоритмы расчета параметров холодной прокатки : монография. Москва : Metallurgy, 1995. 368 с.
20. **Цепин М. А.** Использование специализированных программ при разработке технологических процессов обработки металлов давлением. Цветные металлы. 2007. № 5. С. 98 – 101.
21. **Очков В. Ф.** Mathcad 14 для студентов, инженеров и конструкторов : монография. Санкт-Петербург : БХВ-Петербург, 2007. 368 с.
22. **Шестаков Н. А.** Расчеты процессов обработки металлов давлением в Mathcad (решение задач энергетическим методом) : монография. Москва : МГИУ, 2008. 333 с.
23. **Проскурович О. В., Бойчук В. А.** Комп'ютерні технології економічного аналізу : навч. посіб. Львів : Новий Світ, 2012. 310 с.
24. **Жидецкий В. Ц.** Основы охраны труда : монография. Львов : Афиша, 2000. 351 с.

**ДОДАТОК А****Публікація за темою кваліфікаційної магістерської роботи**

Міністерство освіти і науки України  
Запорізький національний університет  
Інженерний навчально-науковий інститут ім. Ю.М. Потебні  
Запорізька міська рада  
Запорізька обласна державна адміністрація  
Національний університет «Львівська політехніка»  
Національний університет «Києво-Могилянська Академія»  
Національний університет кораблебудування імені Адмірала Макарова  
Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»  
Харківський національний автомобільно-дорожній університет  
Київський національний університет будівництва і архітектури  
Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського  
Національний транспортний університет

## **МАТЕРІАЛИ**

II ВСЕУКРАЇНСЬКОЇ НАУКОВО-ПРАКТИЧНОЇ КОНФЕРЕНЦІЇ ЗА  
УЧАСТЮ МОЛОДИХ НАУКОВЦІВ  
**«АКТУАЛЬНІ ПИТАННЯ СТАЛОГО НАУКОВО-ТЕХНІЧНОГО ТА  
СОЦІАЛЬНО-ЕКОНОМІЧНОГО РОЗВИТКУ РЕГІОНІВ УКРАЇНИ»**

**18-20 жовтня 2022 року**

Запоріжжя

2022

2

### Список використаних джерел

1. Гладков Н.А., Нестеров А.С. Поведение железорудных материалов с различной степенью восстановления в вязко-пластичной зоне / Сборник научных трудов ИЧМ. Совершенствование технологии доменного производства. Москва : Металлургия, 1988. С.127-31.

2. Большаков В.И., Гладков Н.А., Шутылев Ф.М., Богачев Ю.А. Эффективность распределения окатышей в шихте доменных печей / Металлургическая и горнорудная промышленность. 2002. № 6. С .11-15.

УДК 621.771 (076)

Пчела М.М., магістрант 2 курсу  
Науковий керівник – к.т.н., доцент Проценко В.М.

### **УПРАВЛІННЯ ЯКІСТЮ ПОВЕРХНІ ТОНКОШТАБОВОГО ПРОКАТУ З МЕТОЮ ЇЇ ПОКРАЩЕННЯ В УМОВАХ ХОЛОДНОЇ ПРОКАТКИ**

*Інженерний навчально-науковий інститут ім. Ю.М. Потєбні Запорізького національного університету, кафедра металургійних технологій, екології та техногенної безпеки*

В останні роки все більшої актуальності набувають роботи зі створення автоматизованих систем управління якістю (АСУЯ) продукції, що забезпечують конкурентоспроможність вітчизняних підприємств, у тому числі й чорної металургії, на світових ринках [1].

Для побудови ефективних АСУЯ необхідне вирішення комплексу завдань, що включають дослідження процесів формування вектора показників якості та техніко-економічних показників, розробку інформаційного, математичного та програмного забезпечення систем.

Розглянуто технологічні аспекти та практичні рішення низки важливих завдань листопрокатного виробництва:

- управління площинністю та якістю поверхні холоднокатаних листів та штаб;
- контролю та прогнозування нерівномірності механічних та електромагнітних властивостей у тонколистовому прокаті;
- побудови та практичного впровадження АСУЯ, що включає окремі взаємопов'язані підсистеми управління всіма регламентованими показниками якості продукції ЦХП-1 ПАТ «Запоріжсталь».

Розглянуто метод управління площинністю штаб, що включає два рівні:

- тактичний – вирішується завдання проектування, тобто, заздалегідь (до прокатки конкретного типорозміру) задаються уставки засобів регулювання на основних агрегатах цеху в залежності від заданої площинності готового прокату;
- оперативний – проводиться коригування уставок на кожному агрегаті залежно від величини відхилення фактичної неплоскості від заданого значення.

Розроблені матеріали допоможуть на практиці вирішити одне з найважливіших завдань – адекватного контролю та оцінки ступеня мінливості властивостей металу за довжиною та шириною штаб, що є метою роботи.

#### Список використаних джерел

1. A.V. Yavtushenko, V.M. Protsenko, Yu.A. Belokon and Yu.V. Bondarenko. Productivity Optimization of Cold Rolling Mills. *Steel in Translation*, 2020, Vol. 50, No. 5, pp. 335–339.

УДК 669.16

Пшенична Т.О., магістрантка 2 курсу, Зануда Т.О., магістрантка 2 курсу  
Науковий керівник – д.т.н, професор Скачков В.О.

### **ТЕХНОЛОГІЧНІ ОСОБЛИВОСТІ ВИРОБНИЦТВА ФЕРОСПЛАВІВ НА ОСНОВІ ЗАЛІЗА, АЛЮМІНІЮ, КРЕМНІЮ І КАРБІДУ КРЕМНІЮ**

*Інженерний навчально-науковий інститут ім. Ю.М. Потебні  
Запорізького національного університету, кафедра металургійних технологій,  
екології та техногенної безпеки*

Найбільш ефективними є комплексні феросплави, в яких містяться хімічні елементи для розкислення, легування та модифікації різних марок сталі. У патенті [1] наводиться комплексний феросплав на основі заліза для мікролегування та розкислення сталі, що складається з бору, кремнію, алюмінію, марганцю та барію. У патенті [2] пропонується комплексний феросплав, в якому додатково до хімічного складу попереднього патенту вводиться 1,0 - 2,5% вуглецю. Зміст цих патентах марганцю і бору обмежують області їх застосування.

Кремній у сплаві служить для розкислення сталі. Він зв'язує кисень і азот у оксиди та нітриди. Алюміній, що має більшу спорідненість до кисню, ніж бор і кремній, сприяє запобіганню утворенню нітридів і оксидів, це додатково підвищує засвоєння сталлю бору. Вуглець присутній в комплексному боровмісному феросплаві в якості домішки і позитивно впливає на структуру сталі, що обробляється, збільшуючи міцність і твердість металу.

З метою вдосконалення структури та підвищення механічних властивостей спеціальних марок стали можливе використання карбіду кремнію, який виконує роль розкислювача та лігатури.

Для легування та модифікації чавуну з метою підвищення механічних властивостей і створення компактної структури вуглецю можливе застосування комплексного феросплаву, в якому міститься мідь, алюміній і магній. Мідь збільшує рухливість легуючих атомів шляхом збільшення швидкості їхньої дифузії. Магній збільшує швидкість графітизації та забезпечує процес компактування графіту. Алюміній бере участь у процесах розкислення і використовується як носій магнію.