

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
КРИВОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
ГІРНИЧО-МЕТАЛУРГІЙНИЙ ФАКУЛЬТЕТ

КАФЕДРА МЕТАЛУРГІЇ ЧОРНИХ МЕТАЛІВ І ЛИВАРНОГО ВИРОБНИЦТВА

**ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА**  
**до випускної атестаційної роботи бакалавра**

**зі спеціальності 136 – Металургія**

**«УДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ХОЛОДНОГО ПРОКАТУВАННЯ  
ТОНКОЛИСТОВОЇ СТАЛІ»**

Виконав:

Студент групи МТ 20-1

\_\_\_\_\_ Ілля ДЕРКАЧ

Керівник кваліфікаційної роботи

\_\_\_\_\_ Вікторія ЧУБЕНКО

Нормоконтролер

\_\_\_\_\_ Вікторія ЧУБЕНКО

Завідувач кафедри

\_\_\_\_\_ Сергій САВЕЛЬЄВ

Кривий Ріг  
2024 р.

## РЕФЕРАТ

до випускної кваліфікаційної роботи на тему:

### УДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ХОЛОДНОГО ПРОКАТУВАННЯ ТОНКОЛИСТОВОЇ СТАЛІ

Пояснювальна записка: \_\_\_\_ с., 3 табл., \_\_\_\_ рис., \_\_\_\_ джерел.

**Об'єкт дослідження:** холодне прокатування тонколистової сталі.

**Предмет дослідження:** розподіл режимів обтиснення при холодному прокатуванні тонколистової сталі.

**Мета роботи:** розробити удосконалену технологію виготовлення тонколистової сталі.

**Методи дослідження:** аналіз сучасного стану прокатного виробництва та його розвиток, моделювання процесів прокатування за допомогою комп'ютерної програми, розрахункові методи визначення режимів обтиснень, визначення енергосилових параметрів прокатування при виготовленні тонколистової сталі холодним прокатуванням.

**Результати роботи:** виконано аналіз сучасного стану листопрокатного виробництва, проаналізовано обладнання, що використовується для виготовлення тонких та обрано раціональний прокатний стан. Виконано розподіл режимів обтиснень, визначено витрати енергії на холодне прокатування, виконано перевірку прокатних валків на міцність.

ТОНКИЙ ЛИСТ, ХОЛОДНЕ ПРОКАТУВАННЯ, БЕЗПЕРЕРВНИЙ ПРОКАТНИЙ СТАН, РОБОЧИЙ ВАЛОК, РЕЖИМИ ОБТИСНЕННЯ, ВИТРАТИ ЕНЕРГІЇ

## ЗМІСТ

ВСТУП.....	
1 АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА.....	
1.1. Характеристика та призначення тонколистової сталі.....	
1.2 Матеріали для виготовлення листової сталі.....	
1.3 Інструмент для прокатування листів.....	
1.4 Режими обтиснення при холодному прокатуванні тонколистової сталі .....	
1.5 Обладнання для отримання тонкого холоднокатаного листа..	
2 ІНОВАЦІЙНІ РЕШЕННЯ З ХОЛОДНОГО ПРОКАТУВАННЯ ТОНКИХ ЛИСТІВ.....	
2.1 Моделювання процесу холодного прокатування листів....	
2.2 Визначення параметрів обробки тонкого листа....	
2.3 Технологічний процес холодного прокатування тонколистової сталі.....	
2.4. Розрахунок режимів обтиснення для холодного прокатування тонких листів.....	
2.5 Визначення енергосилових параметрів при холодному прокатуванні тонкого листа.....	
2.5 Перевірка прокатних валків на міцність.....	
ВИСНОВКИ.....	
ЛІТЕРАТУРНІ ДЖЕРЕЛА.....	
ДОДАТКИ.....	

## ВСТУП

Виробництво металів та сплавів має великий вплив на розвиток народного господарства. Металургійне виробництво забезпечує розвиток будівництва, машинобудування, сільського господарства, літакобудування, верстатобудування тощо.

Металургійне виробництво займається випуском чавуну, сталі, феросплавів та інших металів та сплавів. Прокатна продукція – це кінцева продукція усього металургійного виробництва. Технологія прокатування – це кінцева стадія металургійного виробництва. Через це до прокатної продукції пред'являють високі вимоги з якості виробів та продуктивності процесів.

Розвиток прокатного виробництва базується на використанні удосконаленого обладнання та підвищенні якості матеріалів, велика увага приділяється відділочним операціям, що забезпечують потрібну якість поверхні, точність розмірів, міцність матеріалу, зносотривкість.

Велика увага приділяється виготовленню листової продукції через те, що існує безліч галузей, де вона використовується, широко розповсюджена у використанні різних виробів, машин, механізмів, використовується при створенні різних корпусів, перекриттів. Особлива увага приділяється виготовленню тонкого листа.

З листового матеріалу виготовляють велику кількість відносно легких зварних та штампованих виробів, що використовується в загальному та транспортному машинобудуванні, будівництві та інших галузях промисловості. Листовий прокат використовується при виробництві гнутих профілів, що дозволяє зменшити собівартість продукції. До листового прокату пред'являють особливі вимоги з якості поверхні, точності розмірів, коробоватості, планшетності. Тонкий лист виготовляється холодним прокатуванням, що є доволі складною технологією, що потребує складного

вартісного обладнання, великих витрат енергії. Тому в роботі пропонується удосконалити технологію виготовлення тонкого листа за рахунок зменшення витрат енергії. Для цього потрібно визначити обладнання для здійснення холодного прокатування тонкого листа, розрахувати режими обтиснення, визначити витрати енергії.

Процес холодного прокатування є доволі трудомісткий, на що витрачається великі витрати енергії та потрібно задіяти складне обладнання. Розподіл зусиль та деформації при обтисненні під час холодної обробки дуже складно дослідити в виробничих умовах, через дуже високу вартість таких експериментів.

Використання комп'ютерних програм, здатних будувати процеси обробки металів тиском, дозволить значно спростити умови дослідження процесів прокатного виробництва. Такі програми дозволяють створювати моделі, які точно відображають параметри обробки тиском, де можна прослідити усі перетворення, які відбуваються при обтисненні металевих листів. Дослідження холодного прокатування за допомогою інженерного програмного комплексу DEFORM 3D є актуальним, тому, що воно дозволяє суттєво скоротити час на проведення експериментів, прискорює процес визначення раціональних режимів обробки, що забезпечують зменшення витрат зусиль та енергії, покращення якості виробів, збільшення продуктивності процесу та зменшення собівартості тонких листів.

## **1 АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА**

### **1.2. Характеристика та призначення тонколистової сталі**

Тонколистовий прокат – це один з найбільш затребуваних видів продукції. Існує безліч технологій, що дозволяють отримати тонкий лист з потрібними властивостями. Такий прокат може поставлятися замовникам як в

окремих листах, так і в рулонах. Тонкий лист має широкий діапазон розмірів і різні властивості.

Тонким вважається лист, який має товщину, меншу 4 мм і ширину, що дорівнює 2000 мм. Також до тонколистового прокату відносять жерсть, яка має товщину 0,07 мм і фольгу, що має товщину менше 0,015 мм.

Тонкий лист має наступні відмінності:

- наявність обрізної або необрізної кромки;
- різні фактури поверхні;
- різні внутрішні структури;
- різний ступінь точності.

Тонкий лист використовується в багатьох галузях народного господарства. Він широко використовується для виробництва смуг, тонких стрічок, зварних труб, для виробництва профільного металопрокату, кутників, швелерів. Також листовий прокат можна використовувати для виготовлення будь-яких металоконструкцій, мостових переходів та несучих елементів будівель та перекрить, широко використовується в автомобільній та промисловості, тракторо- та авіабудуванні. Основні властивості тонколистової продукції залежать від складу матеріалу з якого його виготовлено, від технологічних особливостей виробництва прокату.

Додаючи до сплаву легуючі компоненти, можна істотно підвищити корозійну стійкість, пластичність, гнучкість, здатність до електропровідності, теплопровідності листів, збільшити опір деформації та руйнуванню, підвищити термін придатності матеріалу. Для збільшення терміну експлуатації тонкого листа на його поверхню наносять захисне покриття (оцинкування, обміднення тощо).

Сфера застосування тонкого листа залежить від його властивостей, які, у свою чергу, залежать від технології виготовлення. Тонкий лист можна виготовляти як гарячим прокатуванням, так і холодним.

Гарячекатаний лист широко застосовується в будівельній промисловості, для зведення різних конструкцій та металоспруд, для покриттів та перекрить,

при штампуванні. Така продукція забезпечує високу міцність і стійкість до зовнішніх впливів.

Листовий прокат з вуглецевої та легованої сталі, що має товщину 0,06 – 0,05 мм широко застосовують для виготовлення консервних банок, кришок до скляної тари. Широке розповсюдження має холоднокатана конструкційна сталь звичайної якості, що має товщину 0,2-2,0 мм, кровельна сталь. В електромашинобудуванні використовують трансформаторну та динамну сталь для отримання генераторів, силових трансформаторів, двигунів та інших електричних машин. У хімічній, нафтовій, харчовій промисловості широко використовують корозійну тонколистову сталь.

Холоднокатаний прокат широко застосовують в облицювальних роботах, для побудови огорож, в меблевому виробництві, для виготовлення фурнітури, прикрас, годинників, різних аксесуарів.

Оцинкований лист використовують в машинобудуванні при виготовленні корпусів автомобілів, а також і в інших галузях народного господарства, де потрібні матеріали, які мають високу стійкість до дії зовнішніх чинників та корозії. Фольга та жерсть широко застосовується в хімічній та харчовій промисловості. Також її можна використовувати при створенні металоконструкцій декоративного і захисного типу.



Рисунок 1.1 – Тонколистова сталь в рулонах

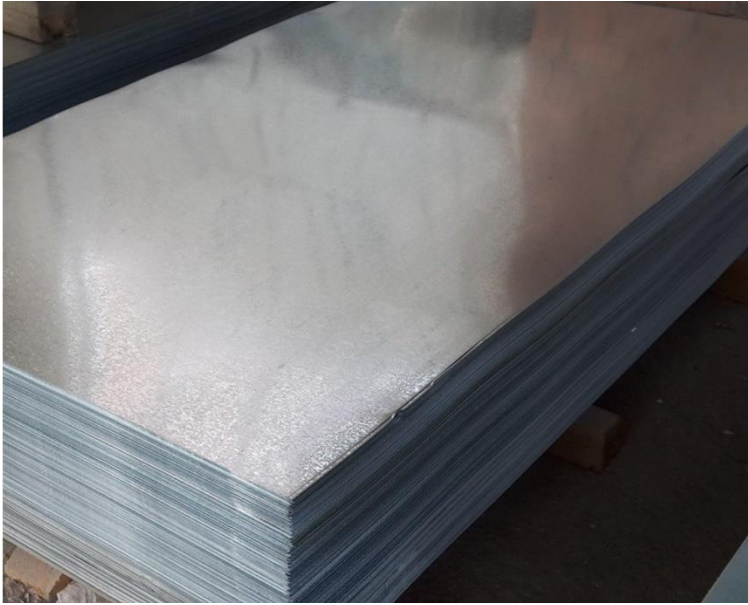


Рисунок 1.2 – По листовая сталь

## 1.2 Матеріали для виготовлення листової сталі

Для виготовлення тонколистового прокату, в залежності від його призначення, використовують різні марки сталей та сплавів. Широко використовується низьковуглецева сталь. Листи, отримані з такого матеріалу мають підвищену міцність, не схильні до корозії, такий матеріал зберігає свої якісні показники при низькій температурі, може використовуватися там, де діють великі навантаження, має достатній запас міцності. Використовується такий матеріал при будівництві болтових, клепанних та зварних металоконструкцій, при створенні зварних з'єднань, при побудові мостів та естакад.

Легована сталь високої якості використовують для виробництва трубного прокату, з нього виготовляють безліч елементів для різних машин та механізмів, що використовуються в машинобудуванні, будівництві. Широко використовується сталь, що леговано марганцем наступних марок: 15Г, 20Г, 25Г, 30Г, 40Г, 50Г, 65Г. Застосовуються низьколеговані сталі, що мають малий вміст вуглецю, наприклад, 25ХСА, 30ХГСА, 30ХГС. Ці сталі мають достатньо



високу пластичність, високі механічні та антикорозійні властивості, добру зварюваність і міцність при високих температурах.

Широко використовують напівжорстку сталь для застосування листів у агресивному середовищі, до таких сталей відносять наступні марки: 08X18H10, 09X15H8Ю, 09X17H7Ю [1 – 4].

Листову сталь, яку піддають штампуванню, глибокому витягненню прокатують зі сталі 08 – сталі 35. Для виготовлення листів холодним прокатуванням широко використовують наступні марки якісної легованої сталі: 10Г2А, 13ХНЗВ2ФР, 15ХГСА, 12Х13А.

За ступенем відділки якісну вуглецеву сталь поділяють на листи з особливо високою відділкою поверхні, з високою відділкою, з покращеною та з нормальною відділкою. Якісну вуглецеву сталь постачають за ступенем штампуємості. За технічними вимогами така листовая сталь повинна мати визначену внутрішню структуру металу, тобто форму та розміри внутрішніх зерен та склад цементиту, що впливає на якість листових виробів та шорсткість їх поверхні. Для отримання виробів з гладкою поверхнею, наприклад, крил автомобілей, добре використовувати сталь з дрібнозернистою структурою, що забезпечує низьку шорсткість поверхні. Також сталеві листи з дрібнозернистою структурою добре дозволяють виконувати великі ступені деформації під час холодного штампування.

Листи з вуглецевої сталі звичайної якості використовують для підземних та надземних комунікацій, виготовляють різні верстати та агрегати, машини та механізми тощо. Для отримання таких виробів використовують марки сталі Ст0-Ст6. Широко використовуються сталі марок Ст1кп, Ст1нс, Ст1сп, Ст2кп, Ст2нс, Ст2сп, Ст3кп, Ст3нс, Ст3сп [1, 2]. З таких марок прокатують листи, що мають товщину від 0,8 до 2,0 мм.

Кровельну тонколистову сталь виготовляють з м'якої вуглецевої сталі, що має товщину від 0,4 до 0,82 мм.

Декапіровальну тонколистову сталь виготовляють товщиною від 0,25 до 2,0 мм та постачають відпаленому стані.

Також виготовляють тонколистову сталь, що має покриття цинком, хромом, алюмінієм, оловом, свинцем.

У харчовій промисловості широко використовують білу (лужну) жерсть, що має захисне покриття оловом, цинком, хромом, лаком. Таке покриття перетворює жерсть чорну в білу і підвищує корозійну стійкість.

Листова електротехнічна сталь у своєму складі має сплав заліза з кремнієм, товщина такого листа від 0,5 до 2 мм, виготовляється у вигляді стрічок або рулонів. Має магнітом'який феромагнітний матеріал. Характеризується відмінними властивостями для використання у магнітних полях. Використовують для отримання магнітопроводів, для виготовлення трансформаторів, магнітів, генераторів, електродвигунів, дроселів, ферорезонансних стабілізаторів, тощо. Якість електромагнітної сталі характеризується електромагнітними властивостями, коерцитивною силою, індукцією. Електротехнічна сталь, зазвичай, постачається у відпаленому стані.

Холодне прокатування здійснює великий вплив на властивості матеріалу, що обробляється. Ступінь обтиснення листів при прокатуванні має суттєвий вплив на властивості матеріалу через те, що відбувається зміна розміру та форми зерна внутрішньої структури та границь між ними у металевих виробках [5]. Ступінь обтиснення при прокатуванні листових матеріалів впливає на зміну витрат енергії, що в свою чергу позначається на вартості виробництва продукції. Технології холодного прокатування при отриманні тонких листів потребують подальшого вивчення, дослідження і удосконалення з метою збільшення продуктивності процесу, покращення якості тонких листів, зменшення витрат енергії та собівартості виробництва.

Якщо збільшити ступінь деформації, зростають опір деформації і границя течії металу, а густина матеріалу холоднокатаного листа буде зменшуватися до тих пір поки обтиснення не досягне 85 % (рис.1.3). Далі густина матеріалу збільшується, що ускладнює обробку та може призвести до руйнування.



Рисунок 1.3 – Вплив ступеню обтиснення на густину сталевих матеріалів

Суттєве зміцнення оброблюваного матеріалу відбувається при малих деформаціях. У випадку збільшення ступеню деформації понад 50 % такі зміни відбуваються менш інтенсивно, матеріал втрачає свої пластичні властивості і подальша пластична деформація і обтиснення металу буде ускладнено. На здатність металевих сплавів до пластичної деформації суттєвий вплив має форма кристалічної решітки. Наприклад, виявлено, що сплави з ГЦК решіткою зміцнюються більше за сплави з ОУК решіткою. Також на деформаційне зміцнення має суттєвий вплив наявність дислокацій в структурі, їх поведінки під час накопичення, від їх взаємного розташування та взаємодії між ними. Чим більше задіяно у процесі деформації систем ковзання, тим відбувається сильніше зміцнення металевих сплавів, утворюється наклеп поверхневого шару, що ускладнює подальшу обробку пластичною деформацією.

Холодне прокатування має суттєвий вплив на електричні та магнітні властивості матеріалу. При обробці коерцитивна сила збільшується, а магнітна проникливість зменшується. При обробці з'являється металографічна структура, яка пов'язується з неоднорідним розповсюдженням домішок, меж зерен. З'являється анізотропія металу. З метою уникнення негативного впливу

холодної обробки виконують нагрівання металу та сплаву, що дозволяє підвищити пластичність. На рисунку 1.4 показано вплив температури нагрівання матеріалу на подовження, границю міцності, густину, де видно, що подовження при температурі понад 400<sup>0</sup>С збільшується, а границя міцності зменшується, густина сталевих матеріалів також при цій температурі збільшується.

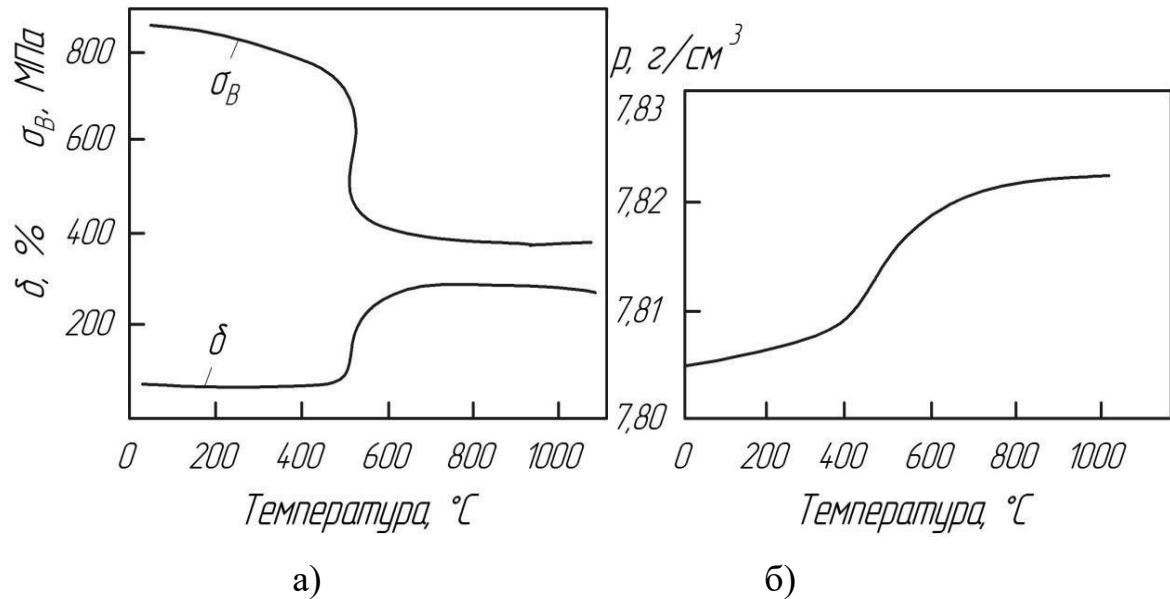


Рисунок 1.4 – Вплив температури нагрівання на механічні властивості сталевих матеріалів: а) зміна границі міцності; б) вплив температури на подовження

З рисунку видно, що нагрівання матеріалу, що обробляється до температури, яка менша за 400<sup>0</sup>С істотного впливу на властивості не має.

Таким чином, для отримання якісного листа потрібно робити відновлення нагріванням.

Під час такого нагрівання відбувається рекристалізація матеріалу. Що забезпечує отримання рівновісних кристалів в сталевих виробках при холодному прокатуванні.

Основні вимоги до холоднокатаних тонких листів відповідають стандартам та технічним умовам. Стандартами регламентуються геометричні розміри та їх відхилення: товщину, ширину, допуски на розміри,

контролюються дефекти: хвилястість, коробоватість, площинність, планшетність. Пред'являють вимоги до механічних властивостей.

Пред'являють спеціальні вимоги до якості, що характеризується наступним: тріщинами, пузирями, вм'ятинами, подряпинами, вкатоною окалиною. Такі дефекти не тільки погіршують зовнішній вигляд тонких листів, але також погіршують механічні та технологічні властивості матеріалу.

За станом поверхні холоднокатану листову сталь за стандартом класифікується на три групи:

- 1) на лицьовій поверхні холоднокатаного листа не допускається подряпини, а на протилежній допускається у межах допуску;
- 2) на лицьовій поверхні холоднокатаного листа в межах половини допуску допускаються подряпини;
- 3) на лицьовій поверхні холоднокатаного листа в межах половини допуску допускаються подряпини, на протилежній стороні допускається у межах мінусового допуску.

Дозволяється шорсткість холоднокатаних листів в межах  $R_a = 0,8-1,6$  мкм, кількість мікровиступів допускає 50 на 1 см профілю. Для листів з наступним декапіруванням шорсткість поверхні складає  $R_a = 1,0 \dots 1,7$  мкм. Для виробництва жерсті їх поверхня повинна складати  $R_a = 0,2-0,5$  мкм.

З метою забезпечення високої якості холоднокатаних листів потрібно забезпечити систематичний контроль, починаючи від вихідного матеріалу, перевіряючи якість вихідної сировини, матеріалів та напівфабрикатів на відповідність до стандартів та технічним умовам.

Далі відбувається плавочний контроль, технологічний та кінцевий.

Плавочний контроль виконуються у плавильних цехах, на цьому контроль визначається хімічний склад матеріалу.

Технологічний контроль – полягає у тому, щоб забезпечити якість прокату на усіх стадіях прокатування.

Кінцевий контроль полягає у остаточному визначено якості холоднокатаного листа. Контроль відбувається за рахунок відбору проб,

виготовлення зразків, їх випробування, сортування, пакування, маркування, сертифікацію.

### **1.3 Інструмент для прокатування листів**

В якості інструменту для отримання тонкого листа холодним прокатуванням використовуються циліндричні прокатні валки. Прокатна кліть має чотири прокатних валка: два робочих і два опорних. До матеріалу робочих валків приділяється особлива увага. Такі валки повинні бути достатньо міцними і жорсткими, мати велику твердість тому, що вони сприймають великі навантаження, виконують великі обтиснення, забезпечують великі ступені деформації. Тому, при виготовленні прокатних валків для отримання тонких листів особлива увага приділяється матеріалу, з якого вони виготовляються. Для виготовлення прокатних валків використовують високолеговані хромові сталі. Якщо вали мають діаметр менший за 300 мм, їх виконують з марок сталей: сталь 9Х, 9ХФ. Якщо прокатні валки мають діаметр більший за 30 мм, їх виготовляють зі сталей марок – 9Х2, 9Х2В. Прокатні валки піддають термічній обробці: загартування з відпуском, що дозволяє підвищити твердість прокатних валків. Піддають шліфуванню.

Опорні валки для холодного прокатування листів виготовляють з хромової легованої сталі 9Х. Інколи їх роблять складеними з двох частин: з кованої або литої серцевини та насадженого на цю серцевину кованого бандажу, який виготовляють з хромонікельмолібденової або хромомолібденової сталі. Також опорні валки можуть складатися з серцевини з легованої сталі та чавунного бандажу.

Холодне прокатування тонких листів відбувається в умовах великих контактних напружень, що виникають на поверхні контакту валків та смуги. Це призводить до утворення значних пружних деформацій, виникає сплюснення прокатних валків, довжина дуги контакту збільшується.

Особлива увага при холодному прокатуванні приділяється зменшенню коефіцієнта тертя тому, що від впливає на зусилля прокатування, а

шорсткість поверхні. Відомо, що холодне прокатування відбувається у жорстких умовах, виникає великий тиск, здійснюється велика деформація, тому, існує прагнення зменшити коефіцієнт тертя. Це можливо при ретельному очищенні поверхні матеріалу, що обробляється.

Гарантовано зменшує коефіцієнт тертя змащення. Поряд з цим змащення зменшує опір деформації, тиск металу на валки, уповільнює зношення поверхні прокатних валків, дозволяє виконати більш великі обтиснення, зменшити енергосилові параметри, підвищує якість поверхні листового матеріалу. Особливу увагу змащенню потрібно приділяти на останніх проходах з метою забезпечення високої якості листів. В якості мастила добре використовувати мінеральні мастила, органічні жири. Ефективним є змащення, що має у своєму складі поверхнево-активні речовини.

Використовуючи мастила коефіцієнт тертя можна розрахувати за формулою:

$$f = R[0,07 - \frac{0,1 \cdot v^2}{2 \cdot (1 + v) + 3v^2}],$$

де  $R$  – коефіцієнт, що залежить від типу мастила.

#### **1.4 Режими обтиснення при холодному прокатуванні тонколистової сталі**

Розподіл обтиснення за проходами має різні режими (рис. 1.5):

- Рівномірний режим обтиснення – при якому відносне обтиснення у всіх проходах приблизно однакове.
- Спадний режим обтиснення – спостерігається коли відносне обтиснення зменшується від першого до останнього проходу.
- З мінімальним обтисненням в середніх проходах.
- З максимальним обтисненням в середніх проходах.

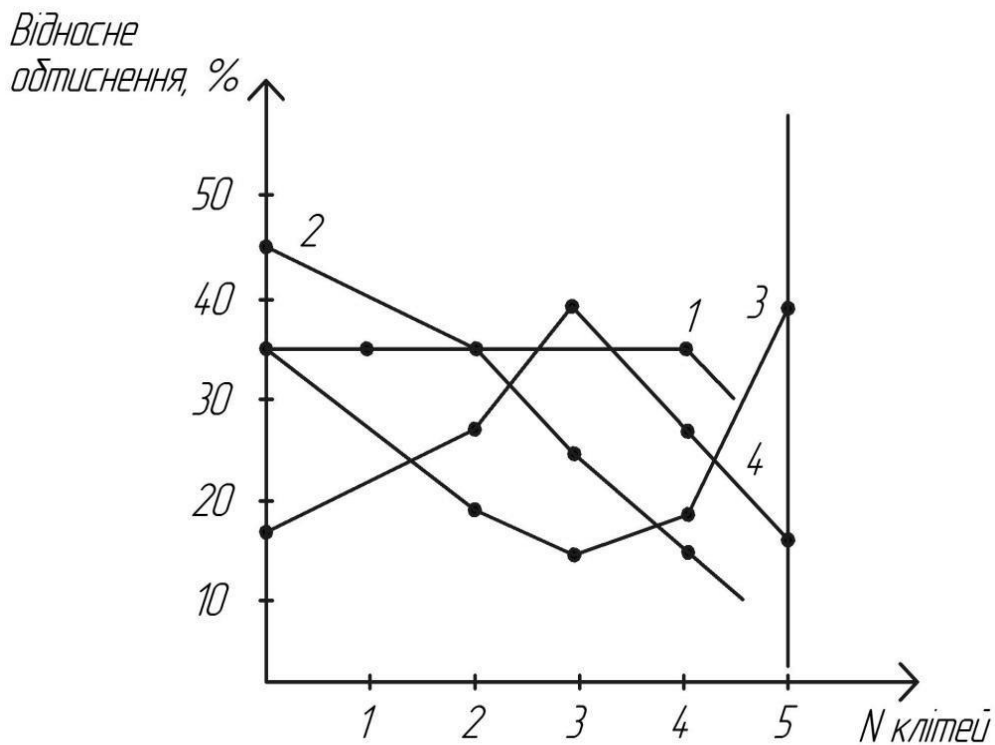


Рисунок 1.5 – Режим обтіснень в залежності від типу стана, оброблюваного матеріалу та товщини листа: 1 – рівномірний; 2 – спадний; 3 – з мінімальними обтісненнями в середніх проходах; 4 – з максимальними обтісненнями в середніх проходах

Рівномірний режим обтіснення використовується на 4-ри та 5-ти клітьових станах при прокатуванні жерсті, низько вуглецевої тонколистової сталі на 3-и клітьовому стані.

Спадний режим обтіснення використовується в більшості випадків при прокатуванні низьковуглецевої сталі через те, що вона має здібність до зміцнення, тому на кожному проході призначаються менші обтіснення.

Режим з мінімальним обтісненням в середніх проходах використовується при прокатуванні жерсті на безперервному п'ятиклітьовому прокатному стані 1200. З метою зменшення кількості перевалок робочих валків клітей 4 та 5 в останніх проходах виконують підвищене обтіснення.

З максимальним обтісненням в середніх проходах використовується для того, щоб уникнути нерівномірності до початку холодного прокатування. В третьому проході дають обтіснення, що допускається міцністю валків.



Величина сумарного обтиснення залежить від: хімічного складу сталі, її механічних властивостей, а також умов деформації та необхідності забезпечення визначених фізико-механічних властивостей сталі.

Таблиця 1

***Режими обтиснень в залежності від типу стану, матеріалу листа та товщини***

Стан холодного прокатування	Обробляема сталь	Товщина листа, мм	Відносне обтиснення, %
Безперервний п'яти клітьовий 1200	жерсть	0,25	88,8
	жерсть	0,36	87
	трансформаторна	0,35	66÷68
Безперервний чотири клітьовий 1680	низьковуглецева	0,5÷1	75÷66,8
	10Г2А	1÷2	50÷60
	13ХНЗВ2ФР	0,8	70÷73
	15ХГСА	1	66÷67
Безперервний три клітьовий 740	низьковуглецева	0,8÷1,5	50÷60
	12Х13	0,8	65
	12Х13	1,4	53
	Сталь 35	1	60
Безперервний чотири клітьовий 1700	низьковуглецева	0,4÷0,5	75÷80
	низьковуглецева	1,0÷1,5	62÷66

Безперервний чотири клітьовий 2000	низьковуглецева	0,4÷0,5	75÷80
	низьковуглецева	0,7÷1,5	62÷72
	низьковуглецева	2,0	60
Реверсивний 1200	трансформаторна	0,35÷0,5	40÷66
	12 Г2А	1,2	47
	низьковуглецева	0,5	60
Реверсивний 1680	12 Г2А	1,2	47
	12 Г2А	1	56

### 1.5 Обладнання для отримання тонкого холоднокатаного листа

Основне обладнання для отримання тонкого листа – це прокатний стан холодного прокатування. Обирають прокатний стан залежно від призначення та товщини листової сталі, програми випуску, обсягу виробництва.

У випадку невеликого обсягу виробництва тонколистової сталі, коли встановлення прокатного стану безперервного принципу дії не вигідно, встановлюють одно клітьові реверсивні чотиривалкові прокатні стани холодної обробки. Їх використовують для отримання листів, що мають товщину більше 0,5 мм, також можна їх використовувати при невеликому обсягу виробництва жерсті, трансформаторної та нержавіючої листової сталі. Реверсивні прокатні стани мають невелику продуктивність, яка менша за продуктивність безперервних прокатних станів 3-5 разів, але вони більш зручні, легше при настроюванні для прокатування листів різної товщини. Їх широко використовують при прокатуванні невеликої кількості листів з різного матеріалу. При прокатуванні на такому прокатному обидва кінця смуги заправляють у моталки і вони не підлягають обробці, що зменшує вихід годного матеріалу.

Холодне прокатування листів на безперервних чотиривалкових три-, чотири-, п'яти-, шестиклітьових прокатних станах відбувається рулонними способом.

Схема шестиклітьового безперервного стану холодного прокатування наведено на рис. 1.6. Такі стани призначено для отримання жерсті, що має товщину 0,09 – 1,5 мм, для прокатування листів товщиною 0,8 мм і шириною до 1200 мм. Кліть кварто має прокатні валки, розмірами 600/1420x1350. Швидкість прокатування дорівнює 40 м/с. Вихідною заготовкою для таких станів служить гарячекатана штаба, яка має товщину від 1,8 мм до 3,0 мм і ширину від 700 до 1250 мм. вихідний матеріал постачається у рулонах масою до 30 т.

Також, для отримання жерсті, що має товщину від 0,18 до 0,35 мм і ширину до 1250 і листів товщиною до 2 мм і шириною до 2100 використовують п'ятиклітові безперервні прокатні стани холодного прокатування. Швидкість прокатування таких стані дорівнює 30 м/с. вихідною заготовкою служить гарячекатаних лист товщиною від 2 до 6 мм, який постачається у рулоні, що має масу від 40 до 80 т.

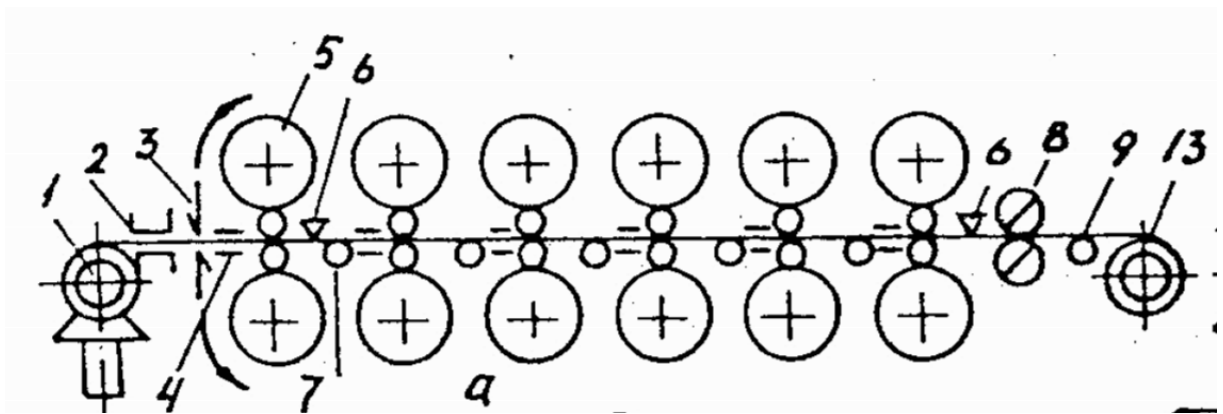


Рисунок 1.6 – Схема шестиклітьового безперервного стану холодного прокатування тонких листів: 1 – розмотувач; 2 – стикозварювальна машина; 3 – гільйотинні ножиці; 4 – роликівий стіл для спрямування листа; 5 – неперевертна чотиривалкова прокатна кліть стану; 6 – контроль товщини

листа; 7 – ролики для вимірювання натяжіння листа; 8 – летучі ножиці; 9 – напрямні ролики; 13 – моталка

На рисунку 1.7 показано чотириклітьовий стан холодного прокатування, який використовується для отримання листів, товщиною від 0,4 до 2,5 мм і шириною до 2350. Такий прокатний стан має кліті кварто з розмірами прокатних валків 530/1420х(1450-2500). Максимальна швидкість прокатування на таких станах досягає 25 м/с. Вихідна заготовка – гарячекатана штаба, що має товщину від 2 мм до 8 мм у рулонах масою від 25 до 50 т.

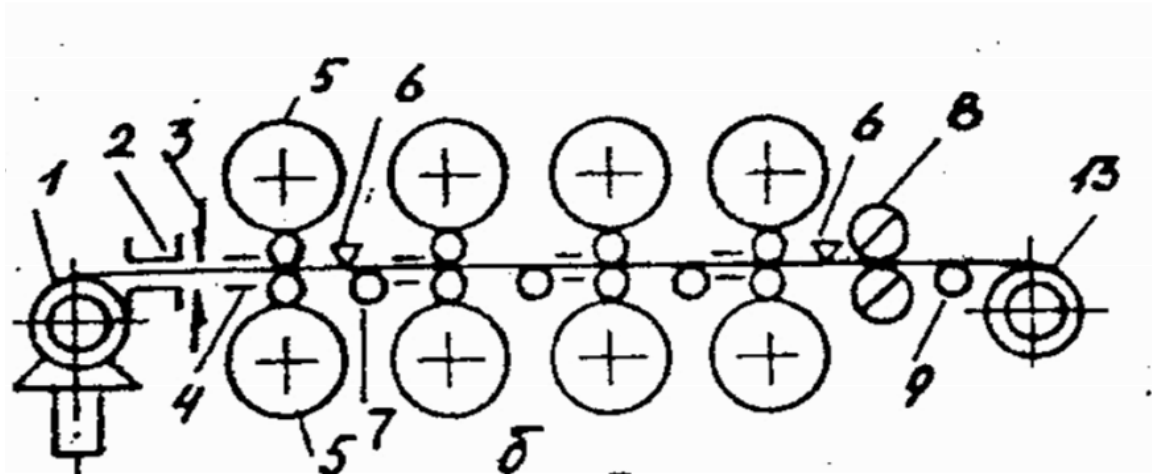


Рисунок 1.7 – Схема чотиривалкового безперервного стану холодного прокатування тонких листів: 1 – розмотувач листів; 2 – стикозварювальна машина; 3 – гільйотинні ножиці; 4 – стіл для спрямування листа; 5 – нереверсивна чотиривалкова прокатна кліть; 6 – вимірювач товщини листа; 7 – вимірюючі ролики для натяжіння листа; 8 – летучі ножиці; 9 – напрямні ролики; 13 – моталка

На рисунку 1.8 наведено одноклітьовий реверсивний стан холодного прокатування. Такий прокатний стан призначено для отримання листів, що мають товщину від 0,2 мм до 2,5 мм і ширину до 1550 мм. Вихідна заготовка – гарячекатана штаба, що має товщину до 4,5 мм у рулонах масою до 15 т.

прокатування на таких станах здійснюють у декілька проходів у реверсивному режимі. Кліть кварто має наступні розміри: 500/1700x700 мм. Перед кліттю встановлено по одній моталці. Швидкістю прокатування дорівнює від 5 до 15 м/с. Такі прокатні стани легко перебудовують на прокатування листів різної товщини. Але такі стани мають невелику продуктивність, яка менше за продуктивність за безперервні в 4 рази.

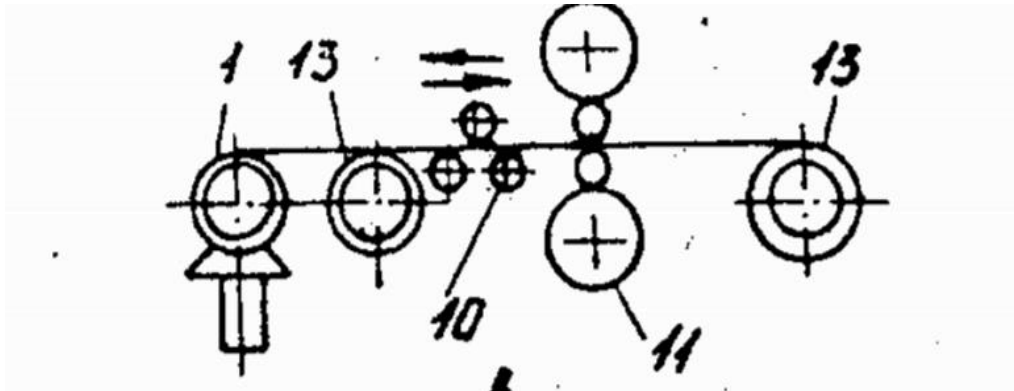


Рисунок 1.8 – Схема одноклітьового чотиривалкового реверсивного стану холодного прокатування тонких листів: 1 – розмотувач листів; ; 10 – правильно-тягнуча кліть; 11 – реверсивна чотиривалкова робоча кліть; 13 – моталка

Для підвищення жорсткості робочих клітей прокатного стану з метою отримання найтонших листів використовують багатовалкові прокатні стани: шестивалкові, дванадцятивалкові та двадцятивалкові.

На таких станах можна отримати лист товщиною від 2 мкм до 0,5 мм. Для них вихідною заготовкою служить підкат, що має товщину від 0,5 мм до 1,5 мм.

Дванадцятивалкові прокатні стани (рис. 1.9) мають робочі валки діаметром від 10 до 50 мм, які опираються на опорні валки та опорні ролики. Швидкість прокатування на від 1 до 10 мм/с.

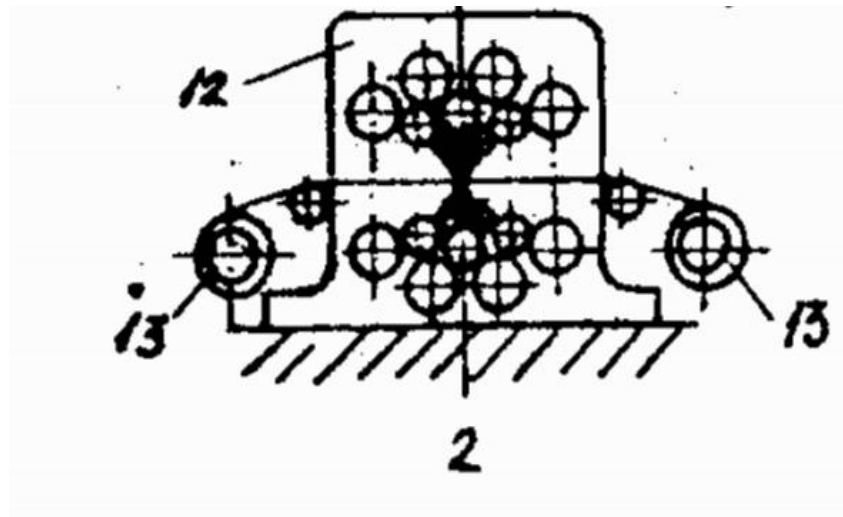


Рисунок 1.9 – Схема багатоклітьового реверсивного стану: 2 – стикозварювальна машина; 12 – двадцятивалкова реверсивна кліть; 13 – моталка

Для поштучного прокатування коротких тонких листів використовують одноклітьовий нереверсивних прокатний стан, схема якого показана на рисунку 1.9. При прокатуванні на цьому стані листи рухаються тільки в один бік. Цей прокатний стан має низьку продуктивність.

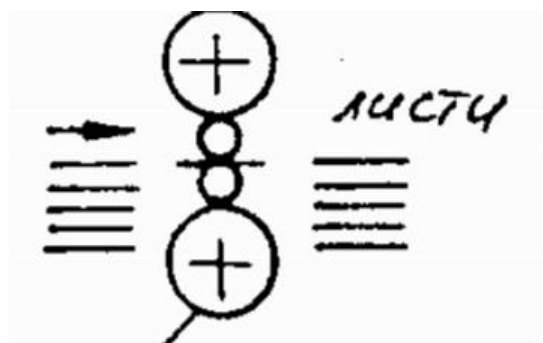


Рисунок 1.10 – Схема чотиривалкового нереверсивного однокльтового прокатного стану

Реверсивні прокатні стани це багато валкові прокатні стани, які мають у своєму складі два робочих валка, а останні опорні, що дозволяє збільшити жорсткість прокатного стану та отримати понад тонкі листи.

Для отримання тонких стрічок шириною 1000-2200 мм та фольги товщиною 1,0001-0,03 мм (рис. 1.6). Такі листопрокатні стани за принципом дії є реверсивними. Мають два робочих валка, діаметр яких може дорівнювати від 3 до 55 мм. Довжина бочки прокатних валків може бути рівною до 500 мм. Вони мають велику жорсткість робочих клітей, що дозволяє забезпечити високу точність прокатування та якість отриманої смуги.

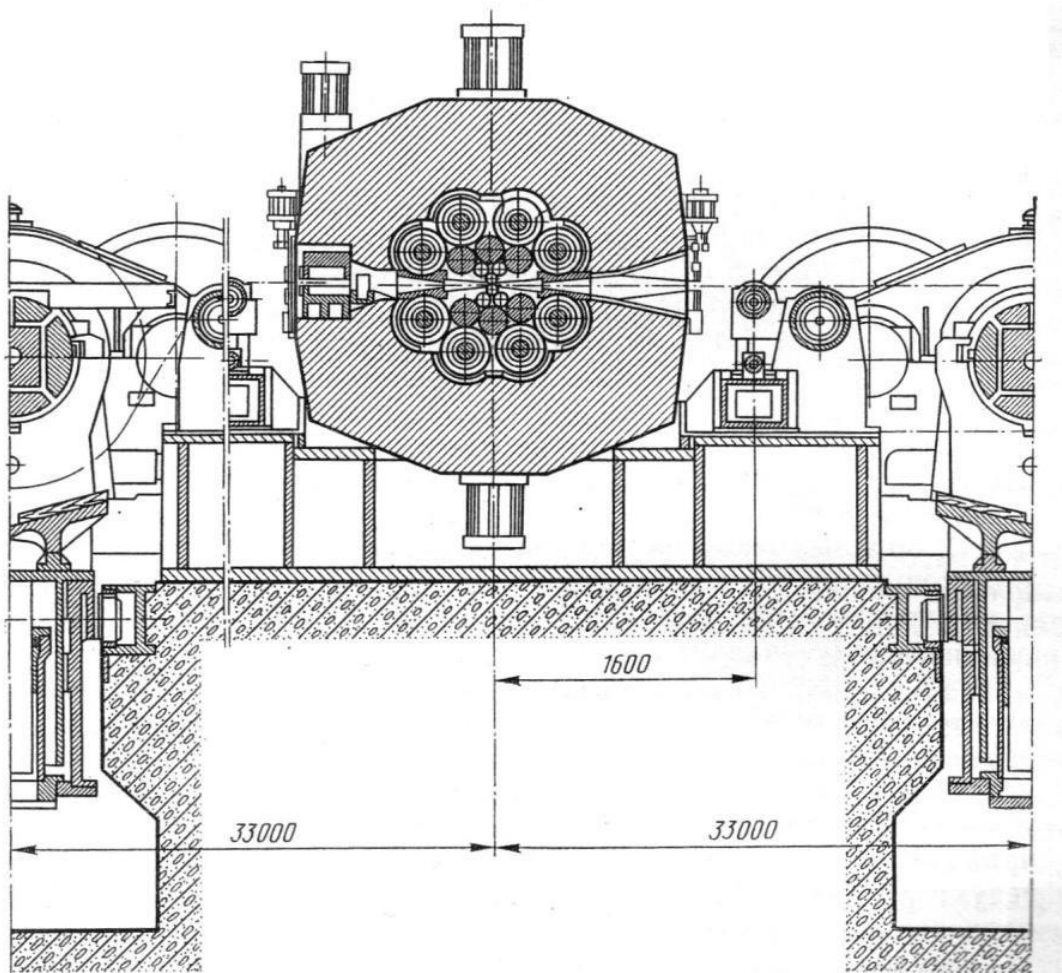


Рисунок 1.11 –Робоча кліть 20-ти валкового стану

Травлення виконують в безперервних травильних агрегатах у сірчаній або соляній кислоті (рис. 1.12). процес травлення відбувається наступним чином: гарячекатаних лист з розмотувача 1 задають у роликотправильні

машини 3 за допомогою тягнучих роликів 2. Задній кінець попереднього і передній кінець наступного листа обрізають на гільйотинних ножицях 4 і зварюють їх у безперервну стрічку на стикозварювальній машині 5. На гратознімачу 6 зачищають місце стику. Перелічені операції виконують на нерухомій стрічці. З метою забезпечення безперервності процесу травлення передбачувано в агрегаті петле накопичувач 8. З нього смуга по напрямним 10 безперервно надходить до травильної ванни 10. Далі, після травлення, лист надходить до промивної ванни 11. У цій ванні з листів змивають залишки кислотних розчинів. Після цього лист надходить до сушильної камери 13, де і відбувається сушка. Бічні кромки обрізають на дискових ножицях 14, а на ножицях поперечного розрізання 15 видаляють місця стикового зварювання листів, після чого знову відбувається змотування травлених листів у рулони, для цього використовується моталка 16.

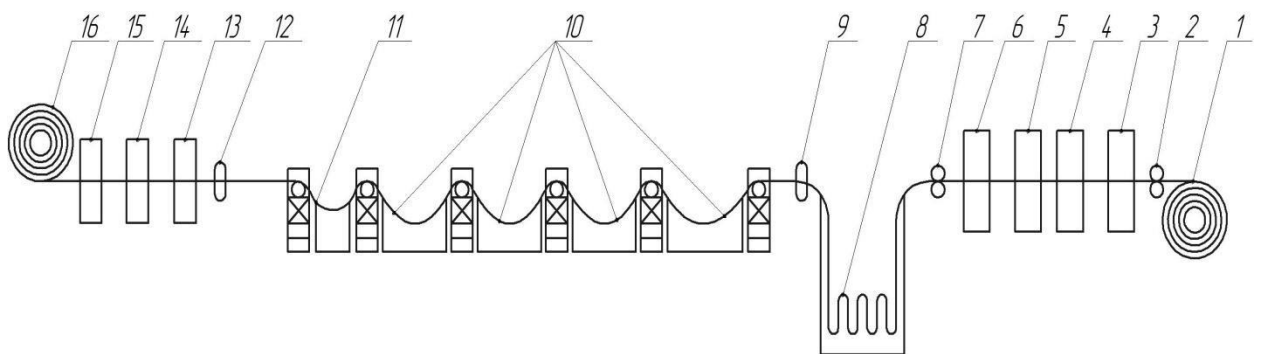


Рисунок 1.12 – Схема безперервного травильного агрегату: 1 – розмотувач гарячекатаних листів; 2 – тягнучі ролики; 3 – роликоправильні машини; 4 – гільйотинні ножиці; 5 – стикозварювальна машина для зварювання смуг; 6 – гратознімач; 7 – ролики; 8 – петле накопич; 9 – напрямні; 10– травильна ванна; 11 – ванна для промивання; 12 – напрямні ролики; 13 – сушильна камера; 14 – дискові ножиці для обрізі бічних кромки; 15 – ножиці поперечного розрізання; 16 – моталка для змотування протравлених рулонів



Для збільшення швидкості травлення потрібно підвищити концентрацію сірчаної кислоти. Максимальну швидкість можна досягти при концентрації, що буде складати 25%  $H_2SO_4$ . Але для практичного застосування рекомендується використовувати травильні розчини, що мають концентрацію 20-22%  $H_2SO_4$ .

Також для збільшення швидкості травлення можна підвищити температуру травильного розчину до 80-90° С.

Для забезпечення безперервності процесу травлення відбувається електрозварювання кінців рулонів, що дозволяє збільшити масу рулонів та підвищити продуктивність процесу холодного прокатування листів.

Також можна виконувати травлення і у розчині соляної кислоти. Ця кислота має рід переваг у порівнянні з сірчаною кислотою. А саме, відбуваються рідкі випадки перетравлювання листової сталі та покращується якість, більш довготривале збереження травильних здібностей, отримується краща поверхня листа.

Процеси травлення використовують для очищення листового. Також виконати очищення можна, використовуючи механічне очищення, що забезпечить зняття окалини з поверхні гарячекатаних рулонів. Таке очищення виконується за допомогою дробеструйних устаткувань. Під час такого очищення з метою видалення окалини на поверхню металу викидається дріб під ударами якого окалина розрихлюється, подрібнюється і видаляється. Ця дріб вироблена з чавуну, зі сталевого литва, зі сталевого дроту, що добре видаляє окалину.

### ***Холодне прокатування листової сталі***

Холодне прокатування тонких смуг та листів здійснюється на одноклітьових чотиривалкових та багатовалкових прокатних станах ку реверсивному режимі прокатування, де відбувається обтиснення за кілька

проходів або на багатоклітьових прокатних станах. Під час прокатування на прокатні валки інтенсивне подають охолоджувальну рідину, в яку входить емульсія з водою.

Для прокатування тонких смуг та жерсті, що мають товщину від 0,14 мм, використовують багатоклітьові прокатні стани холодного прокатування. На одноклітьових багатовалкових прокатних станах холодного прокатування можна прокатувати найтоншу тонку стрічку, яка має товщину до 0,002 мм.

Для зняття наклепу, що утворився під час холодного прокатування виконують термічну обробку – відпал, який здійснюють у колпакових печах або у агрегатах безперервного відпалу при температурі, яка дорівнює 900°C.

В агрегатах ектролітичного очищення виконують попереднє видалення залишок емульсії та різних забруднень.

Для підвищення штампуємості тонких листів, їх піддають дресируванню на одноклітьових дресирувальних станах, де виконують невелике обтиснення, що дорівнює 1-2%.

### ***Термічна обробка та відділка холоднокатаної листової сталі***

Після холодного прокатування виконують відділочні операції в листах або рулонах. До відділочних операцій відносять наступні операції: термічну обробку, дресирування, правка.

При холодному прокатуванні тонкого листа поверхневий шар металу зміцнюється набуває наклепу, що ускладнює подальше його обтиснення та обробку. Потрібно усунути наклеп, що виник під час прокатування. Для його усунення та отримання якісної структури металу, що має необхідні механічні та технологічні властивості, холоднокатану листову сталь піддають відпаленню. Виконують рекристалізаційне відпалення у термічних печах. Для цього тонкий лист нагрівають до температури 650-

720°C. Така температура забезпечує рекристалізаційні зміни в металі, потрібні фізичні та механічні властивості.

Відпалення листової сталі здійснюється при холодному прокатуванні і є остаточною термічною обробкою. З метою попередження поверхневого шару листа від окислення, відпалення виконують у захисному середовищі. В якості обладнання використовують для відпалення вуглецевої сталі встановлюють ковпакові печі. За конструкцією вони бувають багатостопні та одностопні. Останні печі отримали більше розповсюдження тому, що вони мають більш якісний обігрів матеріалу та меншу масу печі, що дозволяє зменшити висоту будівлі цеху та мостових кранів, що розташовано у цеху. Така конструкція більше доступна у обслуговуванні, має більш просте завантаження печі.

Один ковпак ковпакової печі, звичайно, обслуговує від 3 до 4 стендів. Посад ковпака нагрівають до потрібної температури, після чого його знімають та переносять на інший стенд. Таких захід дозволяє використовувати тепло, яке акумульовано у футеровці ковпака, який нагріто, для нагрівання наступного посаду, що забезпечує збільшення продуктивності процесу нагрівання.

Далі відбувається прискорене охолодження. Для його здійснення використовують спеціальні охолоджувальні ковпаки. Ці ковпаки розташовують над муфелями після перенесення ковпака, що нагріває, на інший стенд. Процес охолодження забезпечує вентилятор. Як температура охолонуть до 300°C виконують прискорення. Для цього використовують воду, що надходить по трубопроводу.

Також відпалення можна виконувати і у безперервних печах. Такі печі є високопродуктивними. Вони дозволяють прискорити процес через те, що листову сталь має високу швидкість проходження в печі при нагріванні. В безперервних печах відбувається розмотування рулонів, зварювання кінців, що забезпечує безперервний рух листа через піч, нагрівання в печі та охолодження. Далі лист виходить з печі, зварні шви вирізають і

змотують листи у рулони. Перевага безперервного відпалення у тому, що покращується якість листів, він має за усією довжиною однакові механічні властивості, зменшується хвилястість листів та їх коробоватість.

### *Дресування холоднокатаної сталі*

Для підвищення якості отриманого листа виконують відділочну операцію – дресування. Ця операція зосереджена на тому, щоб виконати остаточне холодне прокатування з невеликими обтисненнями, які дорівнюють від 0,5 до 3,0 %. Така операція попереджає з'явлення ліній зсуву, що забезпечує якісне штампування, зменшує шорсткість поверхневого шару листа, збільшує його твердість. Після виконання дресування м'яка низьковуглецева сталь набуває деяку пружність, збільшується її міцність та якість поверхневого шару. Дресувальні листи широко використовують у автотракторній промисловості.

Для виконання операції дресування використовують одно- або дво-кліткові чотиривалкові прокатні стани. Вони за конструкцією подібні до станів холодного прокатування. Робоча кліть у своєму складі має два робочих і два опорних прокатних валка.

Схему дресувального прокатного стану наведено на рисунку 1.13.

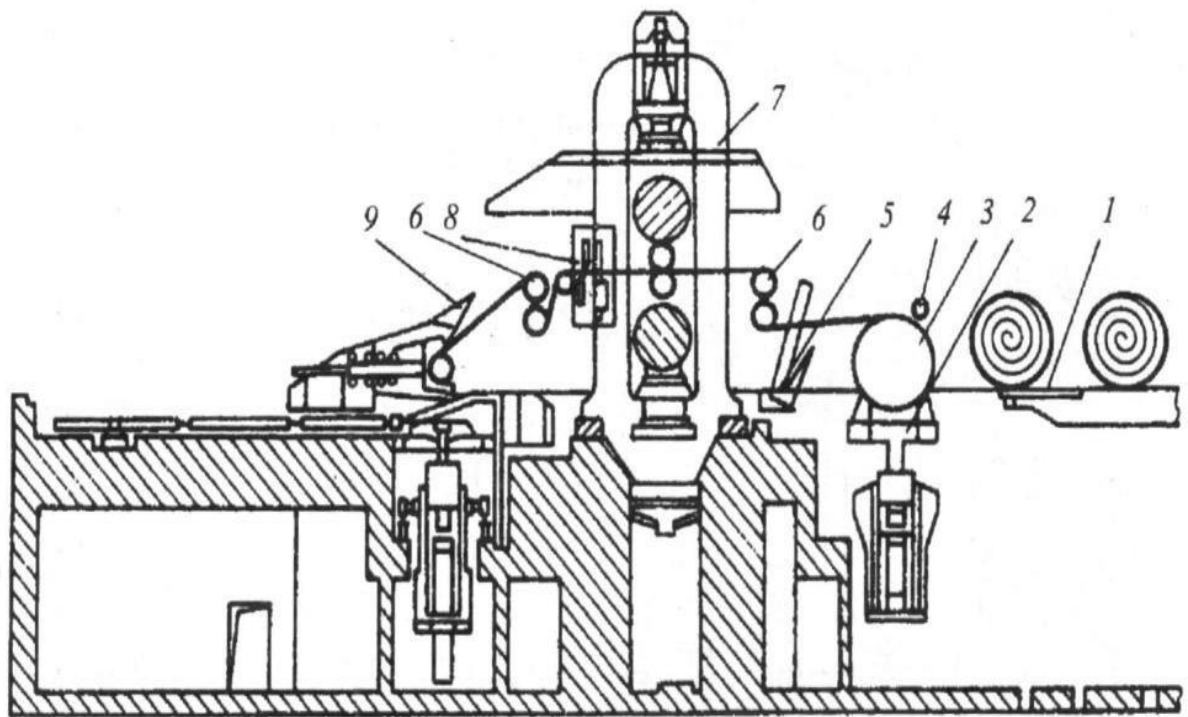


Рисунок 1.13 – Схема одноклітьового дресирувального стану: 1 – транспортер листів; 2 – візок зі столом для підйому матеріалу; 3 – розмотувач; 4 – притисний ролик; 5 – відгортувач кінцу рулону з ножицями; 6 – натяжні ролики; 7 – дресирувальна робоча кліть; 8 – ножиці; 9 – моталка з ременем

Дресування листів на наведеному стані здійснюється з натягінням. При цьому відбувається не тільки обтиснення листової сталі і правлення розтягом. При дресування тонколистової сталі натягіння повинно складати 0,7-0,8 межі текучості матеріалу. Для забезпечення більш високої якості поверхні листа, бажано використовувати робочі валки більшого діаметру. З метою уніфікації їх діаметрів використовують ті ж діаметри валків, що і на станах холодного прокатування, рівними від 400 до 600 мм.

Під час дресування листів, розмотувачі та перші натяжні ролики або перша робоча кліть працюють у режимі гальмування. Це забезпечує створення натягіння. Таке натягіння забезпечується моталкою та

другими натяжними роликками, які працюють при дресируванні у режимі двигуна.

### ***Поперечне та поздовжнє розрізання рулонів***

Розрізання рулонів як поперечна, так і поздовжнє - це також є відділочними операціями. Таке розрізання забезпечують наступними агрегатами: агрегати поперечного розрізання листа на мірні довжини; агрегати поздовжнього розрізання широкого листа на більш вузькі смуги з наступним змотуванням у рулони; агрегати комбінованого розрізання, як для поздовжнього, так і поперечного.

Після розрізання отримані листи надходять до контрольно-маркувального столу, де відбувається контроль номінальних розмірів та їх відхилення, контроль твердості, площинності, коробоватості, планшетності, хвилястості.

Далі відбувається маркування та змотування у рулони.

Це все обладнання розташовується у цеху так, як показано на рис. 1.14.

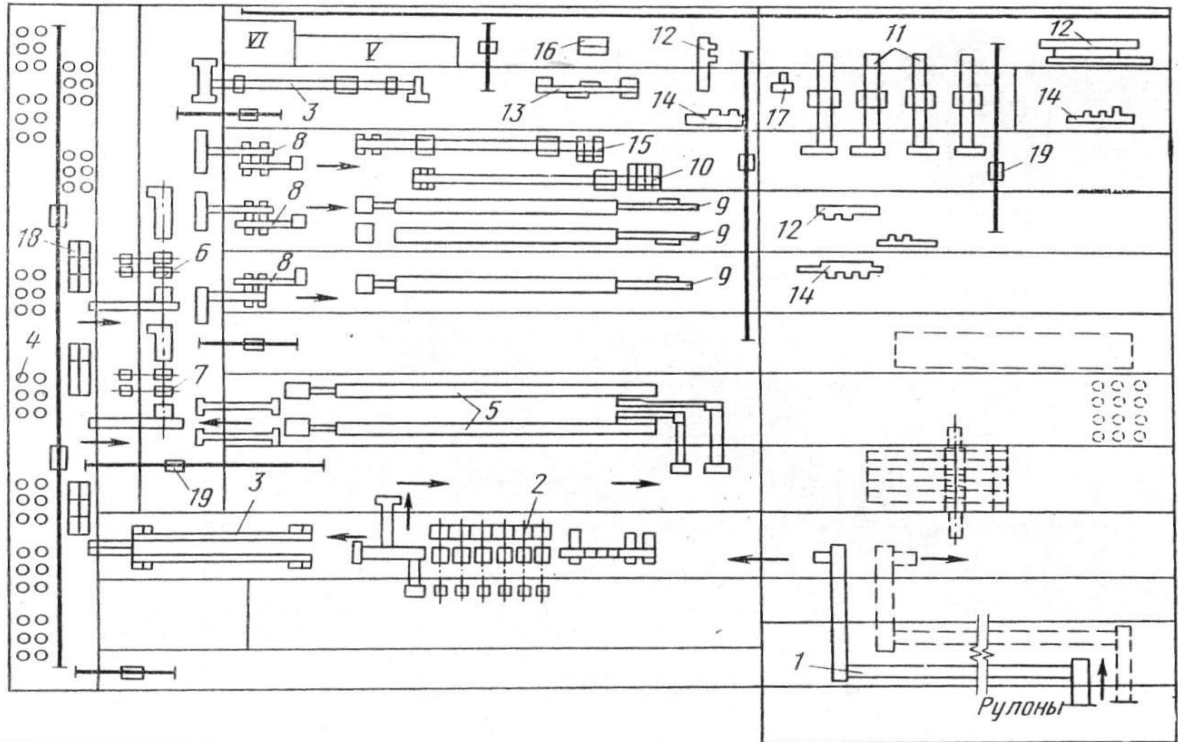


Рисунок 1.14 – План цеха з шестиклітьовим станом 1400 нескінченної прокатки конструкції УЗВМ: 1 – безперервний правильний агрегат; 2 – шестиклітьовий чотиривалковий стан холодного прокатування 1400; 3 – агрегати електролітичної очистки; 4 – ковпаків печі; 5 – безперервні агрегати відпалу; 6,7 – двоклітьовий дресирувальний стан 1400; 8 – агрегати підготовки рулонів; 9,10 – агрегати електролітичного луження і хромування; 11 – агрегати поперечного розрізання; 12 – агрегати упаковки пачок жерсті; 13 – агрегати упаковки рулонів; 14 – сортувальні агрегати; 15 – агрегати вакуумного алюмініювання; 16 – ножиці; 17 – ваги; 18 – стенди охолодження рулонів; 19 – поперечні візки

## **2 ІНОВАЦІЙНІ РЕШЕННЯ З ХОЛОДНОГО ПРОКАТУВАННЯ ТОНКИХ ЛИСТІВ**

### **2.1 Моделювання процесу холодного прокатування листів**

У дослідженнях було використано інженерний програмний комплекс DEFORM 3D, де було ретельно вивчено характер внутрішніх змін в металі, мікроструктуру металовиробів, енергетичні витрати на процес.

Під час дослідження процесу холодного прокатування тонких листів за допомогою програми DEFORM 3D було визначено вплив величини обтиснення матеріалу на витрати енергії при обробці, що дало змогу побудувати удосконалену технологію, яка забезпечує зменшення витрат енергії і, відповідно, зниження собівартості процесу обтиснення.

Для цієї мети було створено модель холодного прокатування тонкого листа в програмному комплексі DEFORM 3D;

Для побудови технології було визначено зусилля деформації та їх розподіл у осередку при холодній обробці.

При моделюванні холодного прокатування було використано матеріали обробки: довжина смуги дорівнювала  $l=1000$  мм, ширина смуги приймала значення  $b=1000$  мм, потрібно було отримати тонкий лист, товщина якого дорівнює  $h=1,5$  мм. Діаметр прокатних валків 200 мм довжина 1200 мм. Процес прокатування починався при температурі  $20^{\circ}\text{C}$ . В процесі дослідження змінювався ступінь обтиснення матеріалу з метою виявлення раціонального.



Використовуюючи комп'ютерну програму DEFORM 3D в дослідженнях було змодельовано початкову заготовку, розташовано її у просторі, визначено процес взаємодії інструменту та заготовки, зазначено умови тертя та характер процесу теплообміну. В результаті моделювання здійснено позиціонування прокатних валків відносно заготовки, як показано на рис. 2.1. На схемі показано мить захоплення металу прокатними валками, що відбувається на початковій стадії прокатування, що було визначено у першому кроці моделювання. Зі схеми видно, яким чином робочі валки обтискують листовий матеріал, обертаються, смуга рухається поступово назустріч обертанню валків.

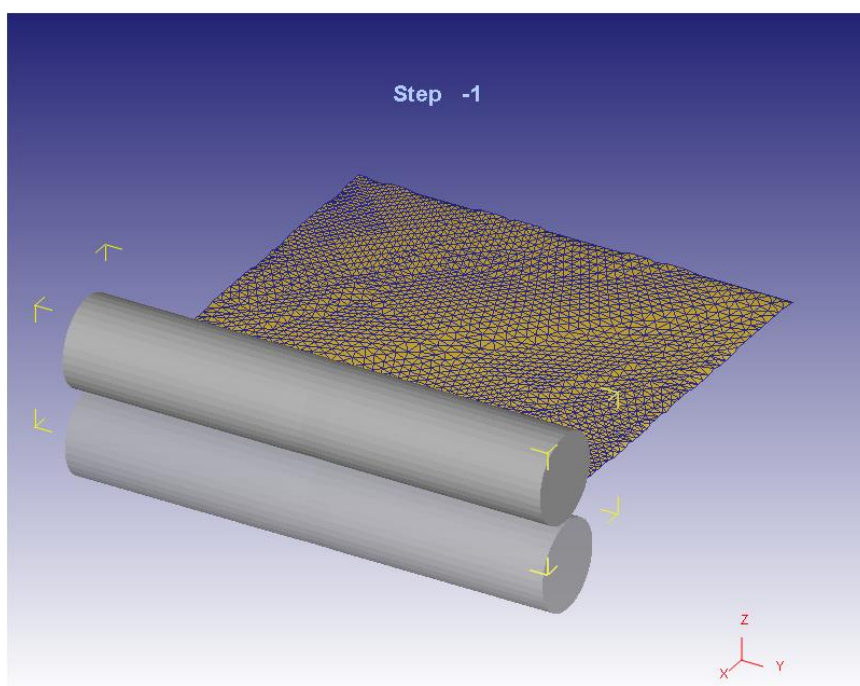


Рисунок 2.1 – Моделювання процесу захоплення листа прокатними валками

На рисунку 2.1 видно, що було побудовано сітку кінцевих елементів на заготовці. Кількість цих елементів дорівнює 2051.

Головним інструментів при обтисненні виступає верхній робочий валок, який обтискує метал за висотою. Виконано позиціонування інструменту відносно заготовки.

Матеріал оброблюваної заготовки було визначено з бібліотеки комп'ютерної програми. В дослідженнях було використано холоднокатаний

лист з низьковуглецевої вуглецевої сталі марки AISI-1015\_(20-1200C). Визначено його властивості: напруження течії металу та зміна величини напруження в залежності від ступеню обтиснення. Було визначено вплив величини деформації при обробки на зміну величини напруження матеріалу. Такі зміни були представлені на діаграмі «Напруження-деформація», яку наведено на рис. 2.2.

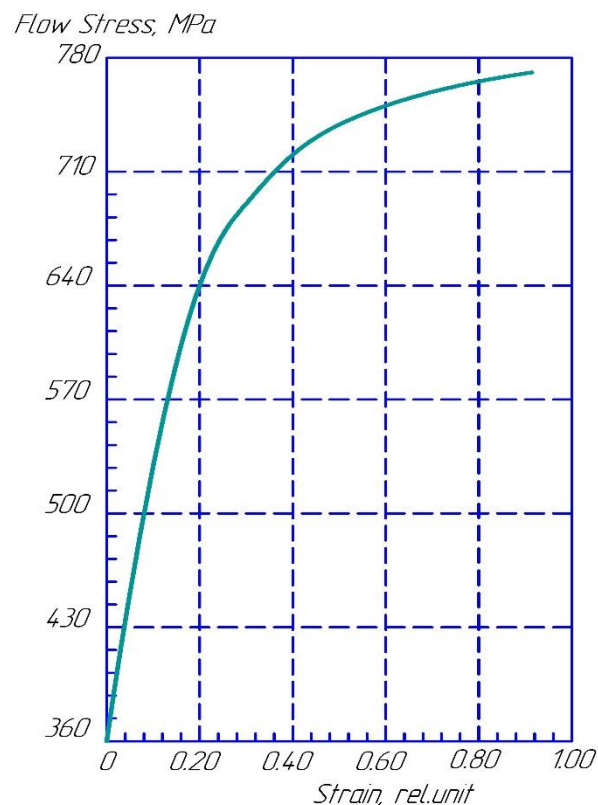


Рисунок 2.2 – Діаграма напруження-деформація

На діаграмі видно, при яких напруженнях починається пластична деформація матеріалу, яка забезпечує зменшення навантаження в умовах пластичної деформації. Вивчаючи діаграму, ми можемо зробити висновок, що при ступені деформації, яка менша за 30 %, відбувається тільки пружна деформація металевих виробів, яка не веде до зміни форми та розмірів матеріалу, вихідна заготовка здатна відновлювати свої розміри після знаття навантаження. Пластична деформація, яка веде до зміни форми та розмірів

оброблюемого листа, буде здійснюватися тоді, коли ступінь обтиснення перевищить 35 %.

Границю течії металу визначали за енергетичним законом, який описується формулою:

$$\sigma = \varepsilon^n \cdot u^m + y, \quad (2.1)$$

де  $\sigma$  – напруження пластичної деформації деформуемого матеріалу;

$\varepsilon$  – відносна деформація матеріалу;

$u$  – швидкість деформації;

$n$  – показник ступеню деформації;

$m$  – проказник швидкості деформації;

$y$  – постійна матеріала, що залежить від його марки.

Ступінь деформації матеріалу  $\varepsilon$  визначається за формулою:

$$\varepsilon = \Delta h / h_0, \quad (2.2)$$

де  $\Delta h$  – величина абсолютного обтиснення, яка визначається за формулою:

$$\Delta h = h_0 - h_1 \quad (2.3)$$

де  $h_0, h_1$  – відповідно початкова і кінцева товщина листа.

Визначено пружні властивості матеріалу, що досліджується. Ці властивості характеризуються модулем Юнга  $E$  та коефіцієнтом Пуассону  $\mu$ . Такі коефіцієнти стандартні і залежить від марки матеріалу, вони дорівнюють відповідно  $E = 0,3$  та  $\mu = 1,5 \cdot 10^5$ .

Для моделювання відбулося позиціонування досліджуємих об'єктів одного відносно іншого в умовах холодного прокатування тонких листів. Визначено точність позиціонування. Коефіцієнт тертя між інструментом та заготовкою прийнято рівним для умов холодної обробки – 0,1. Встановлюємо, що процес тертя задано за законом Зибеля. В дослідженнях було згенеровано контакт між заготовкою та верхнім робочим валком, який є головним інструментом, а також між заготовкою та нижнім робочим валком.

Встановлено методику розрахунку параметрів обробки і моделювання процесу обтиснення металу. Розрахунки здійснювалися у системі одиниць SI. При моделюванні ввикористовувався аналіз за законом Лагранжа.

Для здійснення процесу моделювання було виявлено типи досліджуємих об'єктів: листова заготовка була віднесено до пластичного типу, де аналіз виконується на підставі заданих значень границі течії металу, робочі валки було віднесено до жорсткого типу, тобто вважалося, що він не деформується.

Таким чином, було створено базу даних для моделювання процесу холодного прокатування тонкого листа, було згенеровано модель процесу, що дозволило здійснити дослідження холодного прокатування та встановити основні характеристики обтиснення та деформації тонкого листа, зміни напруження та вплив обтиснення на напруження при холодній обробці, дослідити процеси перетворення в осередку деформації, що утворюється при прокатуванні, зміни зусиль та моментів в залежності від параметрів обробки.

Таким чином, було згенеровано базу даних, що дало можливість провести моделювання холодного прокатування тонких листів у комп'ютерній програмі DEFORM 3D. Процес моделювання відбувався у 100 кроків.

Такий процес моделювання дозволяє відтворити процес холодного прокатування тонких листів, не використовуючи дороговартісного обладнання, а тільки моделюючи його роботу, що дозволило визначити характеристики та параметри процесу, дослідити вплив обтиснення металу на зміну зусиль та моментів і виявити зміни у осередку деформації під час прокатування.

## **2.2 Визначення параметрів обробки тонкого листа**

В результаті дослідження при моделюванні було виявлено течію металу в осередку деформації за викривленою сіткою, визначено векторне поле переміщення металу в осередку деформації (рис. 2.4).

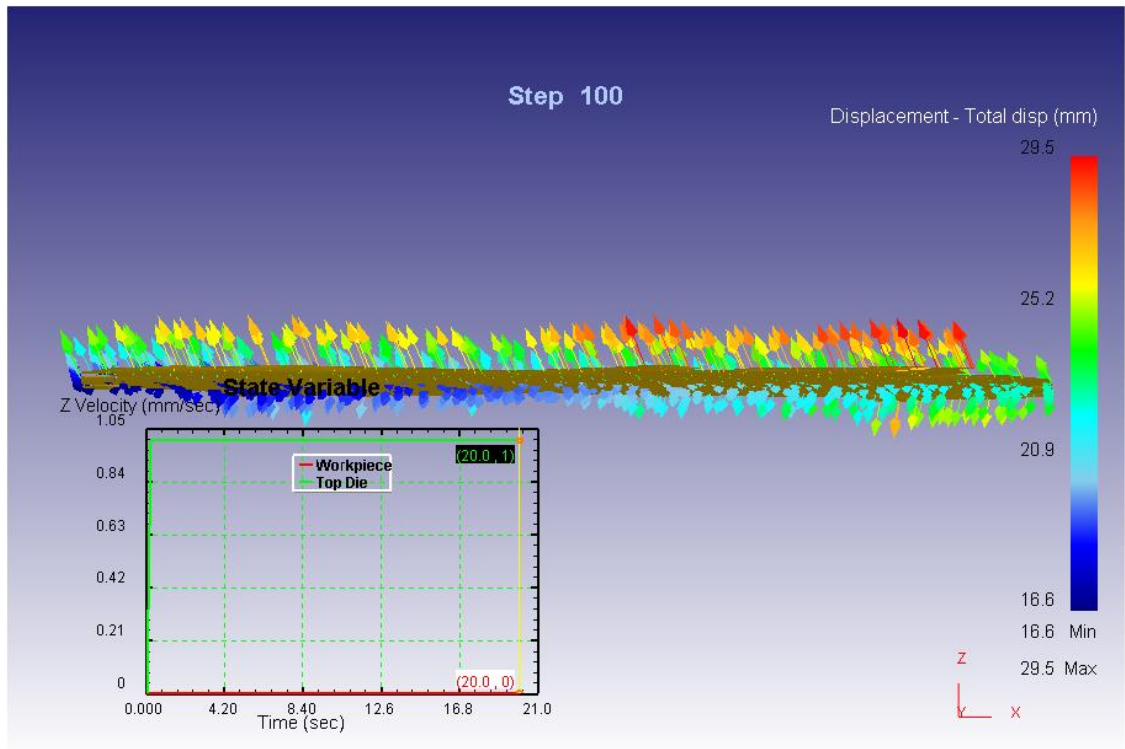


Рисунок 2.4. – Векторне поле переміщення металу при прокатуванні

Дослідивши рисунок 2.4, ми бачимо, що векторне поле переміщення досягає максимальних значень від дії верхнього робочого валка на початковій стадії процесу прокатування. такі результати переміщення пояснюються тим, що на початковій стадії відбувається захоплення металу робочими валками, виникають великі зусилля. У подальшому процес холодного прокатування здійснюється в сталому режимі і інтенсивність векторного поля знижується і, відповідно зусилля зменшуються.

Для визначення раціональних режимі обробки, було досліджено зміну зусилля, що витрачається на процес холодного прокатування. Такі зміни наведено на рисю 2.5.

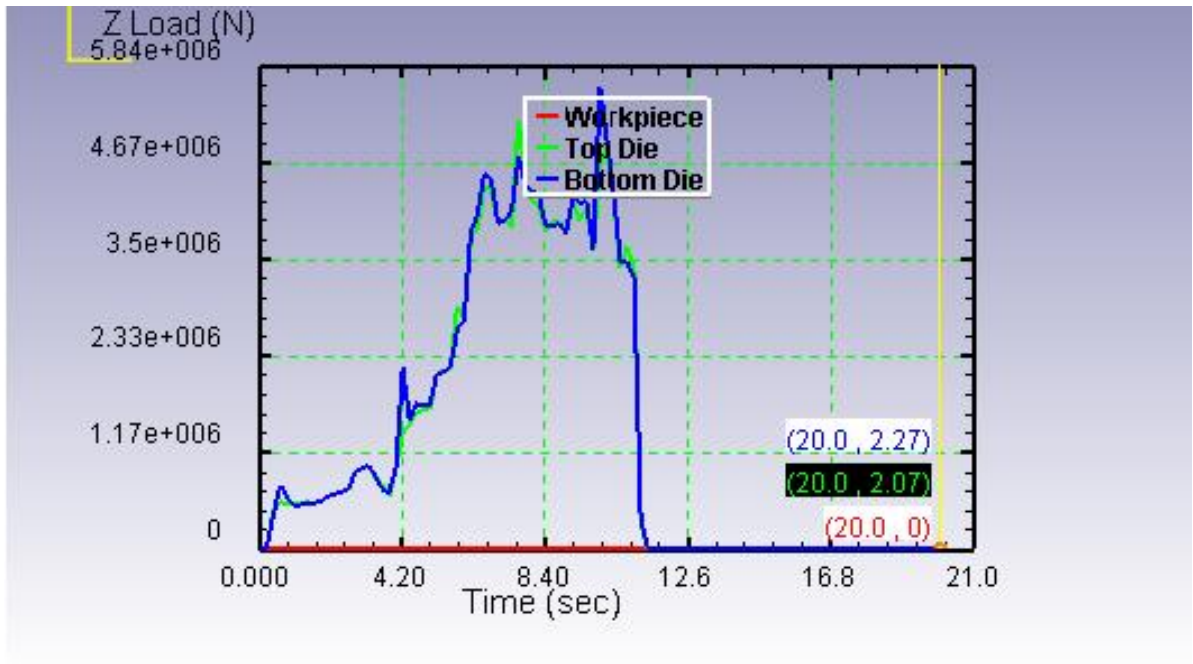


Рисунок 2.5 – Зусилля прокатування

З рисунка 2.5 видно, що зусилля прокатування збільшується в перші 9 секунд після початку прокатування і досягає 5,5 МН. В подальшому відбувається різке зменшення зусилля обробки. Це свідчить про те, що відбувся процес захоплення, і настав сталий процес обтиснення металу, де заштовхуючи сили прибираються і деформація металу відбувається сама по собі.

Досліджено зміну моменту прокатування, що впливає на потужність обробки. Результати дослідження наведено на рис. 2.6.

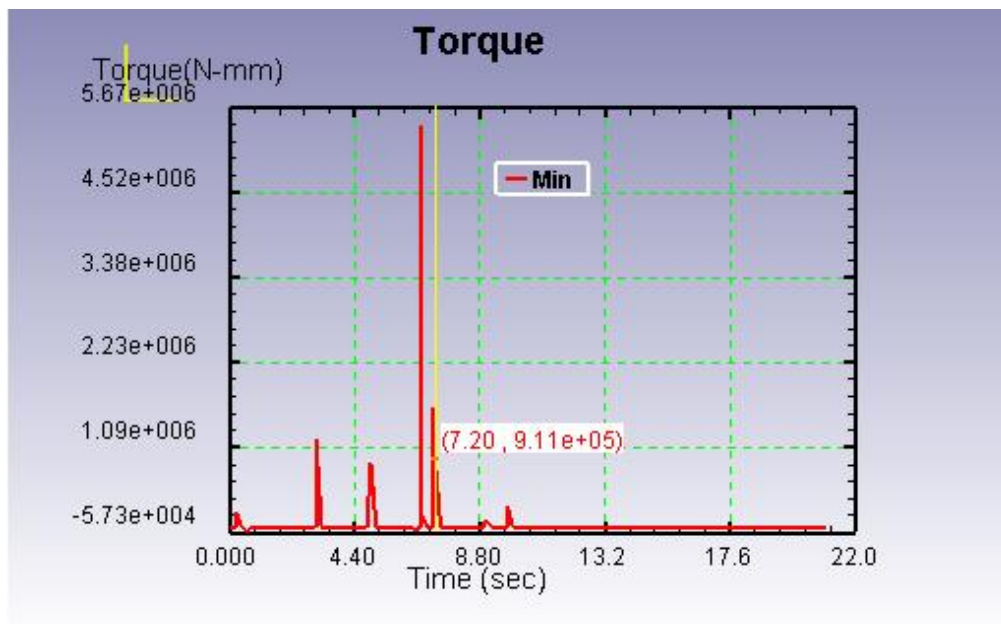


Рисунок 2.6 – Зміна крутячого моменту

З рисунка 2.6 видно, що крутячий момент з початку обробки періодично змінюється і досягає максимальних значень на 7 секунд після початку холодного прокатування. Після чого настає сталий процес прокатування і крутячий момент знижується.

В результаті моделювання встановлено ефективну ступінь деформації, яка дорівнює 70 %. Така ступінь деформації дозволяє отримати листи з максимальною міцністю та твердістю.

У випадку підвищення ступеню деформації виникають негативні наслідки, через то, що відбувається збільшення витрат зусилля прокатування та моментів, збільшує напруження поверхного шару металу, відбувається пружня деформація та зміщення робочих валків, що погіршує якість поверхні отриманих листів, та може призвести до виникнення технологічних дефектів таких, як мікротріщини, мікрволокна.

Зменшення ступеню деформації також призводить до виникнення негативних наслідків, а саме відбувається зниження твердості і міцності матеріалу, що обробляється. Це дає змогу листовому виробу деформуватися під дією навантаження під час роботи. Також зменшення величини обтиснення

забезпечує збільшення часу, що витрачається на обробку матеріалу, що веде до зниження продуктивності процесу обробки.

Результати дослідження наведено у табл. 2.1.

Таблиця 2.1. Результати моделювання холодного прокакування тонких листів

$\sigma$ , МПа	$b$ , mm	$h_0$ , mm	$h_1$ , mm	$\varepsilon$ , %	$\Delta h$	$P$ , MN	$M$ , MNm
740	1000	5	1,5	70	3,5	5,5	0,198
765	1000	7	1,5	78,6	5,5	6,9	0,248
735	1000	4	1,5	62,5	2,5	4,9	0,176

В результаті моделювання процесу прокатування тонкого листа холодною обробкою було визначено границю течії металу, вплив на неї величини обтиснення. Були з'ясовані раціональні режими обтиснення, які в подальшому буде використано при розробці технології отримання тонкого листа холодним прокатуванням.

### **2.3 Технологічний процес холодного прокатування тонколистової сталі**

Технологічний процес холодного прокатування тонколистового прокату складається з наступних операцій:

- отримання початкового матеріалу;
- підготування вихідного матеріалу до прокатування;
- транспортування до нагрівальної методичної печі
- нагрівання початкового матеріалу;
- отримання гарячекатаного товстого листа;
- охолодження гарячекатаного листа;
- підготування гарячекатаного листа до холодного прокатування;
- видалення окалини;
- травлення в кислотних розчинах;
- прокатування тонкого листа на станах холодного прокатування;



- термічна обробка холоднокатаного листа;
- дресирування з невеликими обтисненнями холоднокатаного листа;
- розрізання на мірні довжини;
- змотування у рулони, клеймування.

Гарячекатані рулони отримують на широкосмугових станах гарячого прокатування. Ширина такого рулону відповідає ширині холоднокатаної листової сталі і визначається за формулою:

$$B_{вм} = B_{л} + (20 + 40), \quad (2.4)$$

$B_{вм}$  – товщина вихідного матеріалу;

$B_{л}$  – товщина холоднокатаного листа.

У тому випадку коли відбувається одноразове обрізання кромки для використання листа у холодному штампуванні, обрізі складають 20 мм. у випадку дворазового обрізання, обріз буде складати 40 мм.

Травлення здійснюється у розчинах соляної або сірчаної кислоти з метою очищення поверхні гарячекатаного рулону від окалини. Здійснюється зварювання заднього кінця попередньої смуги з кінцем наступного. Швидкість травлення збільшується при збільшенні температури розчину. Для травлення розчин попередньо підігрівають до температури 80-90<sup>0</sup>С.

Холодне прокатування тонкого листа відбувається за розрахованими режимами обтиснення. При визначенні режимів обтиснення потрібно виконати наступне:

- обрати схем прокатування;
- визначити масу і розміри вихідних матеріалів
- визначити допустимі зусилля та моменти прокатування;
- розрахувати максимально допустимі обтиснення;
- визначити розподіл обтиснень за прокатними клітями;
- розрахувати режими за проходами;
- оцінити енергосилові параметри прокатування.

Вибір схеми прокатування залежить від типу прокатного стану, кількості прокатних клітей, проходів, способу прокатування

При холодному прокатуванні допускається ступінь деформації 50 – 70 %. Виходячи з цих даних визначається товщина заготовки. Довжина її залежить від схеми прокатування.

Маса вихідного матеріалу розраховується за формулою:

$$G = bhl\gamma \quad (2.5)$$

де  $G$  – маса початкового матеріалу;

$b, h$  – відповідно товщина і висота вихідного матеріалу;

$l$  – довжина;

$\gamma$  – густина матеріалу.

#### **2.4. Розрахунок режимів обтиснення для холодного прокатування тонких листів**

Для отримання холоднокатаного листа розмірами 1,5x1000 мм з низьковуглецевої сталі 20Х рулонним способом з рулону масою 10 т, використаємо обладнання – шестиклітьовий стан 1400. У цього прокатного стану усі кліті кварто, що мають діаметр робочих валків 600 мм, опорних валків 1500 мм. Довжина бочки валків дорівнює 1700 мм. прокатний стан працює в безперервному режимі. Максимальна швидкість прокатування для стана – 25м/с.

Товщина початкового листа визначається за формулою:

$$h_0 = \frac{h_k}{1 - \varepsilon_{\Sigma}}, \quad (2.6)$$

де  $h_k$  – кінцева товщина листа;

$\varepsilon_{\Sigma}$  – сумарне обтиснення металу за усіма проходами.

У дослідженнях визначено, що переваги має сумарне обтиснення, що дорівнює 70 %, або 0,7.

Після підстановки отримаємо наступне:

$$\frac{1,5}{1 - 0,7} = 5 \text{ мм.}$$

Значить, в якості початкового матеріалу обираємо гарячекатаний лист, який має товщину 5 мм.

Прокатування будемо виконувати, використовуючи схему прокатування з послідовним зменшенням ступеню обтиснення за рухом прокатування, від першої до останньої прокатної кліті. Така схема забезпечує рівномірне розподілення зусилля прокатування і навантаження за усіма прокатними клітями. Зменшення величини обтиснення буде давати компенсацію зі збільшення контактного тиску та зміцнення металу при холодному прокатуванні тонкого листа.

Сумарне абсолютне обтиснення буде складати:

$$\Delta h_{\Sigma} = h_0 - h_k = 5 - 1,5 = 3,5 \text{ мм.}$$

Отримані обтиснення розподіляємо за шістьма проходами.

$$2+1+0,2+0,1+0,1+0,1=3,5 \text{ мм}$$

Швидкість прокатування у кожній прокатній кліті визначалася за формулою:

$$v_i = \frac{v_k - h_k}{h_i}, \quad (2.7)$$

де  $v_k$  – швидкість прокатування у останньої прокатної кліті, для обраного прокатного стану  $v_k = 20$  м/с;

$v_i$  – швидкість прокатування у кожній кліті.

Після підстановки у передостанній прокатній кліті, отримаємо:

$$v_5 = \frac{20 - 1,5}{1,6} = 11,56 \text{ м/с.}$$

У попередній прокатних клітях

$$v_4 = \frac{20 - 1,6}{1,7} = 10,8 \text{ м/с.}$$

$$v_3 = \frac{20 - 1,7}{1,8} = 10,11 \text{ м/с}$$

$$v_2 = \frac{20 - 1,8}{2,0} = 9,1 \text{ м/с}$$

$$v_1 = \frac{20 - 2,0}{3,0} = 6,0 \text{ м/с.}$$

Отримані величини заносимо у табл. 2.2.

Таблиця 2.2 – Режими холодного прокатування тонколистової сталі

Номер проходу	Величина абсолютного обтиснення, мм	Висота листа, мм	Відносне обтиснення, %	Швидкість прокатування, м/с
1	2,0	3,0	67	6,0
2	1,0	2,0	50	9,1
3	0,2	1,8	11	10,11
4	0,1	1,7	5,9	10,8
5	0,1	1,6	6,25	11,56
6	0,1	1,5	6,6	20,0

З таблиці видно послідовне зменшення висоти оброблюваної смуги завдяки її обтиснення прокатними валками. Величини абсолютного і відносного обтиснення зменшуються від проходу до проходу, що дозволяє уникнути суттєвого зміцнення поверхневого шару металу, що обробляється і отримати якісну зовнішню поверхню листа.

## 2.5 Визначення енергосилових параметрів при холодному прокатуванні тонкого листа

Витрати енергії на холодне прокатування мають суттєвий вплив на собівартість виробництва.

Розрахунок зусилля холодного прокатування виконується за формулою:

$$P = \frac{0,4 \cdot D^3 [\sigma]}{l + L - 0,5B}, \quad (2.8)$$

де  $D$  – діаметр прокатного валка;

$[\sigma]$  – допустиме напруження для матеріалу валків: чавун 70-80 МПа; сталь 120-160 МПа;

$B$  – ширина листа, що прокатується;

$l$  – довжина шийки валка;

$L$  – довжина бочки валка.

Максимальне обтиснення буде дорівнювати:

Для бочки прокатного валка:

$$\Delta h_{\max} = \frac{0,32D^5[\sigma]^2}{[(L+l-0,15B)PB]^2}, \quad (2.9)$$

Для шийки прокатного валка дорівнює:

$$P = \frac{0,4d^3[Ru]}{l}, \quad (2.10)$$

$d$  – діаметр шийки валка;

$l$  – довжина шийки.

Максимальне обтиснення, виходячи з міцності шийки прокатного валка буде дорівнювати:

$$\Delta h_{\max} = \frac{0,32d^5[Ru]^2}{(PB)^2}. \quad (2.11)$$

Виходячи з потужності двигуна, максимальне обтиснення може дорівнювати:

$$\Delta h_{\max} = \frac{N}{K_n \cdot P \cdot B \cdot v}, \quad (2.12)$$

$N$  – потужність двигуна;

$K_n$  – коефіцієнт, що враховує тип підшипників, які встановлено: кочення

$K_n=1,05-1,1$ ;  $K_n=1,1-1,2$ ;

$v$  – швидкість прокатування.

на енергосилові параметри суттєво впливає середнє значення границі текучості, яке збільшується від проходу до проходу через зміцнення металу за формулою:

$$\sigma_{\text{ср}} = \sigma_{\tau} + A\sqrt{\varepsilon}, \quad (2.13)$$

де  $\sigma_{\tau}$  – базова межа течії, МПа;

$A$  – емпіричний коефіцієнт, який залежить від марки матеріалу, для даної сталі  $A=50$ .

Середній контактний тиск знаходимо за формулою:

$$P_{cp} = 1,15\sigma_{\tau} \left( 1 + \frac{2 \cdot f_y l_{di} - \Delta h_i}{3h_i} \right), \quad (2.14)$$

де  $f_y$  – коефіцієнт тертя;

$\sigma_{\tau}$  – напруження течії, визначено в результаті моделювання (табл. 2.1):  
 $\sigma_{\tau}=740$  МПа

$l_{di}$  – довжина осередку деформації з урахуванням сплюснення прокатних валків при холодному прокатуванні.

Довжина осередку деформації при холодному прокатуванні знаходиться за формулою Зикова:

$$l_d = C_i + \sqrt{\frac{R - \Delta h A_i}{A_i - B_i + C_i^2}}, \quad (2.15)$$

де  $R$  – радіус робочого валка;  $R=300$  мм;

$A_i, B_i, C_i$  - умовні параметри для кожного проходу.

Параметри визначаються за формулами:

$$A_i = \frac{9500}{1,5\sigma_i}; \quad (2.16)$$

$$B_i = \frac{2}{3} f \frac{D}{h_i}, \quad (2.17)$$

де  $D$  – діаметр прокатного валка;

$$C_i = \frac{R}{A_i} - B_i \left( 1 - \frac{\Delta h_i}{3h_i} \right). \quad (2.18)$$

Холодне прокатування тонкого листа здійснюється з натяжінням, що штучно створюється для отримання якісного виробу. Натяжіння враховується при визначенні сили прокатування за формулою:

$$P'_{cp} = P_{cp} \left( 1 - \frac{q_0 - q_i}{2P_{cp}} \right), \quad (2.18)$$

де  $(q_0 - q_i)$  величина натяжіння між клітями.

Розподілимо натяжіння між клітями наступним чином:

1 – 200 МПа; 2 – 190 МПа; 3 – 180 МПа; 4 – 170 МПа; 5 – 160 МПа;  
6 – 150 МПа.

Розраховуємо зусилля прокатування за кожним проходом.  
Результати розрахунку заносимо в таблицю 2.3.

Потужність двигуна залежить від моменту на валу двигуна і визначається за формулою:

$$N = M_{ДВ} \cdot n_{ДВ}, \quad (2.19)$$

де  $M_{ДВ}$  - момент на валу двигуна стану холодно прокатування.

Загальний момент, що виникає на валу двигуна, потрібний для приводу валків робочої кліти визначається за формулою:

$$M_{ДВ} = \frac{M_{ПР}}{i} + M_{ТР} + M_{ХХ}, \quad (2.20)$$

де  $M_{ПР}$  - момент прокатування;

$i$  - передаточне число редуктора;

$M_{ТР}$  - момент тертя;

$M_{ХХ}$  - момент холостого ходу;

Момент прокатування залежить від зусилля прокатування і розраховують за формулою:

$$M_{ПР} = 2P\psi l_{\alpha}, \quad (2.21)$$

де  $P$  - повне зусилля прокатування, що необхідне для деформації;

$\psi$  - коефіцієнт плеча рівнодіючої, залежить від виду прокатування, при холодному прокатуванні дорівнює **0,19...0,25**. Приймаємо 0,2.

Момент тертя враховує вплив сил тертя у підшипниках робочих валків та тертя у передаточних механізмах. Першу складову знаходять з виразу:

$$M_{ТР1} = Pdf_1, \quad (2.22)$$

де  $d$  - діаметр шийки валка;

$f_1$  - коефіцієнт тертя для підшипників ковзання дорівнює **0,01...0,03**, для підшипників котіння приймає значення **0,003**.

Друга складова враховує втрати в передаточних механізмах, до склад яких входять зубчасті передачі:

$$M_{TP} = \frac{1}{\eta} \cdot \frac{M_{TP1}}{i} \cdot \frac{D_P}{D_{on}}, \quad (2.23)$$

де  $\eta$  - к.к.д. кожної зубчастої передачі **0,96...0,98**.

Момент холостого ходу залежить від маси прокатних валків і розраховують за формулою:

$$M_{X.X} = \sum \frac{G_n \cdot f_2 \cdot d_n}{2i_n}, \quad (2.24)$$

де  $G_n$  - маса деталі, яка обертається, у нашому випадку – це прокатні валки ;

$f_2$  - коефіцієнт тертя у підшипникових опорах даного валка;

$d_n$  - діаметр цапфи опорного валку;

$i_n$  - передаточне число між двигуном та прокатним валком.

Результати розрахунку заносимо у табл. 2.3.

Таблиця 2.3 – Енергосилові параметри холодного прокатування тонкого листа

№ проходу	Межа текучості, МПа	Довжина осередку деформації, мм	Зусилля прокатування, МН	Момент прокатування, МН/м	Момент на валу двигуна, МН/м	Потужність на валу двигуна, кВт
1	710	16,5	18,25	3,6	3,9	240
2	740	15,6	23,7	4,5	5,1	255
3	745	14,9	23,3	4,6	5,2	235
4	747	12,8	17,9	3,5	3,8	205
5	748	12,3	17,5	3,4	3,75	234
6	749	11,9	16,8	3,3	3,65	288

## 2.5 Перевірка прокатних валків на міцність

Стан холодного прокатування тонких листів – це складне обладнання, працює у важких умовах. Головний інструмент прокатних станів – це робочі валки. На них при роботі діють великі навантаження. Через це потрібно



перевірити робочі валки на міцність з метою забезпечення якісної роботи. На прокатні валки діють сили прокатування, виникає крутячий та згинаючий момент, які повинні бути безпечними.

Максимальне значення згинаючого моменту  $M_{згб}$  листових станів зосереджене у середині бочки валків і визначається за формулою:

$$M_{згб} = \frac{P_l}{4} \left( a - \frac{b}{2} \right), \quad (2.25)$$

де  $P_l$  – максимальне зусилля, що діє на валки при прокатуванні, МН;

$a$  – відстань між опорами, яка складається з довжини бочки та довжини шийки валка і дорівнює:

$$a = L + l, \text{ м}; \quad (2.26)$$

де  $L$  – довжина бочки робочого валка, м;  $L = 1400$  мм;

$l$  – довжина шийки прокатного валка, м;  $l = 200$  мм;

$b$  – ширина тонкого листа, м;  $b = 1000$  мм.

Тоді відстань між опорами для прокатних валків буде дорівнювати:

$$a = 1400 + 200 = 1600, \text{ м}.$$

Виникає згинаюче напруження в небезпечних перерізах  $\sigma_{зз.}$ , яке утворюється від дії згинаючого моменту і визначається за формулою:

$$\sigma_{зз.} = \frac{M_{згб}}{W_b}, \quad (2.27)$$

де  $W_b$  – момент опору перерізу бочки валка, знаходиться за формулою:

$$W_b = 0,1 \cdot D_b^3. \quad (2.28)$$

Для шийки робочого валка максимальний згинаючий момент діє в місці переходу шийки в бочку. Такий момент визначають за формулою:

$$M_{згш} = \frac{P_l \cdot l}{4}. \quad (2.29)$$

Виникає напруження на шийці валка в небезпечному місці, яке визначається за формулою:

$$\sigma_{зз.} = \frac{M_{згш}}{W_{ш}}, \quad (2.30)$$

де  $w_{ш}$  – момент опору перерізу у шийці робочого валка, визначається за формулою:

$$w_{ш} = 0,1 d_{ш}^3, \quad (2.31)$$

де  $d_{ш}$  - діаметр шийки робочого валка.

Виникає напруження зсуву та результуючі напруження в шийці валка, що визначаються за формулою:

$$\tau = \frac{M_{кр}}{W_{кр}}. \quad (2.32)$$

де  $W_{кр}$  - момент опору поперечного перерізу валка по бочці, визначається за формулою:

$$W_{кр} = 0,2 \cdot d_{ш}^3. \quad (2.33)$$

Визначаємо результуючі напруження за обома перерізами. Для цього використовуємо формулу:

$$\sigma_{рез} = \sqrt{\sigma_{зг}^2 + 3\tau^2}. \quad (2.34)$$

Порівнюють розраховане навантаження з гранично допустимим нормальним навантаженням  $[\sigma]$  і визначають запас міцності валка за формулою  $k$ :

$$k = [\sigma] / \sigma_{рез}$$

Перевірку на міцність будемо виконувати для найбільш навантажених. Такими прокатними валками є прокатні валки другої кліті.

Максимальний згинаючий момент, що діє по середині бочки прокатних валків, буде дорівнювати:

$$M_{зг} = \frac{23,7}{4} \left( 1,60 - \frac{1,0}{2} \right) = 9,48 \text{ МН};$$

В небезпечних перерізах виникають напруження, величина яких залежить від згинаючого моменту і дорівнює:

$$\sigma_{32} = \frac{M}{W_{\sigma}} = \frac{9,48}{0,11} = 94,2 \text{ МПа} .$$

де  $W_{\sigma}$  - момент опору перерізу бочки опорного валка, який дорівнює:

$$W_{\sigma} = 0,1 \cdot D_{\sigma}^3 = 0,1 \cdot 1,05^3 = 0,11 \text{ м}^3 .$$

Діаметр бочки опорного валка дорівнює:

$$D_{\sigma} = 1050 \text{ мм} = 1,05 \text{ м}$$

Для шийки валка максимальний згинаючий момент діє в місці переходу шийки в бочку валка.

$$M_{зг.ш} = \frac{P_{л} \cdot l}{4} = \frac{23,7 \cdot 0,2}{4} = 1,185 \text{ МН} \cdot \text{м},$$

Де довжина шийки дорівнює:  $l=200 \text{ мм}=0,2 \text{ м}$ , діаметр шийки валка:  $d_{ш}=200 \text{ мм}=0,2 \text{ м}$ .

Напруження в шийці опорного валка дорівнює:

$$\sigma_{32} = \frac{M}{W_{ш}} = \frac{1,185}{0,11} = 10,77 \text{ МН} .$$

Напруження зсуву та результуючі напруження в шийці валка:

$$\tau = \frac{4,5}{1,6} = 6,09 \text{ МПа} .$$

де  $W_{кр}$  - момент опору перетину валка по бочці;

$$W_{кр} = 0,2 \cdot d_{ш}^3 = 0,2 \cdot 0,2^3 = 0,0016 \text{ м}^3 .$$

Визначаємо результуючі напруження по обом перетинам:

$$\sigma_{рез} = \sqrt{\sigma_{32}^2 + 3\tau^2} = \sqrt{10,77^2 + 3 \cdot 6,09^2} = 14,4 \text{ МПа} .$$

Результуюче навантаження менше гранично допустимого  $[\sigma_6]$ .

Існує чотирикратний запас міцності.

Розподіл напруження та згинаючих моментів показано на рисунку 2.3

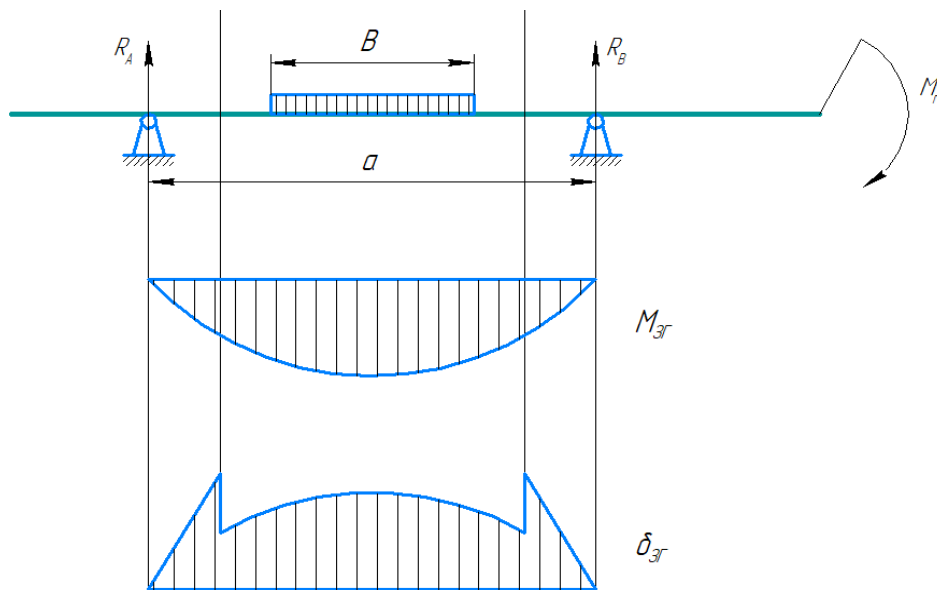


Рисунок 2.3 – Розподіл напруження та згинаючих моментів

З рисунка в 2.3 видно, що максимальні значення моментів знаходяться по середині бочки прокатних валків, а зусиль максимальні значення виникають при переході з бочки прокатних валків на шийку через перепад поперечних перерізів.

## ВИСНОВКИ

В роботі було розглянуто призначення тонколистової сталі, вимоги, що пред'являють до тонких листів, матеріал, який використовується для виготовлення даної продукції, його структуру, склад та властивості. Визначено, що показники зносотривкості тонколистової сталі забезпечує хімічний склад матеріалу та його структура. Виявлено, що структура матеріалу цілком залежить від технологічних чинників, до яких відносять температуру обробки і ступінь обтиснення та деформації матеріалу.

Проаналізована способи виготовлення тонколистової сталі і надано перевагу холодному прокатуванню рулонним способом, що забезпечить високу продуктивність процесу обробки і задану якість, структуру та властивості листа.

Проаналізовано вихідний матеріал, що використовується для отримання тонких листів і надано перевагу гарячекатаному листовому матеріалу. Визначено його розміри, способи отримання та властивості.

Проаналізовано обладнання, що використовуються для отримання тонких листів холодним прокатуванням і надано перевагу шестиклітьовому безперервному прокатному стану холодного прокатування, який здатний забезпечити задану точність розмірів листа, шорсткість поверхні, планшетність, коробоватість листа.

Визначено послідовність операцій, що забезпечують отримання якісного листа. Розподілено режими обтиснення при прокатуванні раціональним способом, що забезпечує оптимальний розподіл витрат енергії при обробці. І дозволяє удосконалити технологію виготовлення листової продукції холодним прокатуванням. Виконано перевірку прокатних валків на міцність, де видно, що вони витримують навантаження, які виникають при холодному прокатуванні.

## ЛІТЕРАТУРНІ ДЖЕРЕЛА

1. Серeda Б.П., Прищип М.Г., Кругляк І.В., Васильченко Т.О. Прокатка листів та штаб: навчально-методичний посібник для студентів ЗДІА спеціальності 6.05040104, 7.05040104, 8.05040104 «Обробка металів тиском» / Б.П. Серeda, М.Г. Прищип, І.В. Кругляк, Т.О. Васильченко – Запоріжжя, ЗДІА, 2012. – 199 с.
2. Серeda, Б.П. Металознавство та термічна обробка чорних та кольорових металів [Текст]: підручник / Б.П. Серeda. – Запоріжжя: ЗДІА, 2008. – 302 с. Бібліогр.: с. 310. – 300 прим. ISBN 978-966-7101-96-1

3. Серета, Б.П. Нові матеріали в металургії [Текст]: навч. посіб. для студ. вищ. навч. закл. / Б.П. Серета. – Запоріжжя: ЗДІА, 2009. – 396 с. Бібліогр.: с. 310. – 300 прим. ISBN 978-966-7101-96-1
4. Серета, Б.П. Прокатне виробництво [Текст]: навч. посіб. для студ. вищ. навч. закл. / Б.П. Серета. – Запоріжжя: ЗДІА, 2008. – 312 с. Бібліогр.: с. 310. – 300 прим. ISBN 978-966-7101-96-1
5. Визначення впливу режиму обтиснення при прокатуванні на внутрішню будову металу/Чубенко В.А., Хіноцька А.А.//Качество минерального сырья. Кривой Рог, 2018 Т2 С. 151-159.
6. Прищип, М.Г. Механічна обробка та зварювання металів [Текст]: навчальний посібник для студентів спеціальності ОМТ /М.Г. Прищип – Запоріжжя: ЗДІА, 2003 – 124 с.
7. Прищип, М.Г. Технологічні лінії та комплекси металургійних цехів [Текст]: Конспект лекцій /Прищип М.Г. Таратута К.В. – Запоріжжя: ЗДІА, 2006 – 139 с. Бібліогр.: с. 139.
8. Серета, Б.П. Обробка металів тиском [Текст]: навч. посіб. для студ. вищ. навч. закл. / Б.П. Серета. – Запоріжжя: ЗДІА, 2009.
9. Коновалов, Ю.В. Справочник прокатника [Текст]: Кн.А. Производство горячекатанных листов и полос /Коновалов Ю.В. – М.; Теплотехник, 2008 – 640 с.
10. Воробей, С.А. Основные направления повышения качества горячекатаного и холоднокатаного широкополочного проката [Текст]: /С.А. Воробей, Г.В. Левченко, А.Н. Пугноки и др. - Теория и практика металлургии, 2005 - № 4,5 – с. 44 – 49.
11. Щербаных, Э.Н. Проект технологического перевооружения НШС 1700 ОАО «ММК им. Ильича» (Э.Н Щербаных, А.В. Нурашкин, В.М Павтиев, О.В. Клименко //Сучасні проблеми металургії. Наукові вісті, т.в. Пластична деформація металів. Дніпрпетровськ, 2005 – с. 255 – 258.

12. Чубенко В.А, Хіноцька А.А. Технологія процесів прокатування: Навчальний посібник. – Кривий Ріг: Видавець ФОП Чернявський Д.О., 2017. – 170 с.
13. Бережний М.М., Чубенко В.А. Основи проектування технологічних ліній та комплексів металургійних цехів: Монографія. – Кривий Ріг: Видавничий дім, 2010. – 444 с.
14. В. М. Данченко, В.О.Гринкеч, О.М.Головко. Терія процесів обробки металів тиском: Підручник. – Дніпропетровськ: Пороги, 2008. – 370 с.
15. Визначення впливу режиму обтиснення при прокатуванні на внутрішню будову металу/Чубенко В.А., Хіноцька А.А.//Качество минерального сырья. Кривой Рог, 2018 Т2 С. 151-159.
16. Процессы деформации металла на основе многовалковых калибров: Монография [Текст] / И.К.Огинский, В.Н.Данченко, А.А.Самсоненко, В.В. Бояркин. – Днепропетровськ: Пороги, 2011. – 355 с.
17. Компьютерное моделирование процесса обработки металлов давлением [Текст] / В.Н.Данченко, А.А.Миленин, В.И. Кузьменко, В.А.Гринкевич. – Днепропетровск. Системные технологии, 2005. – 448 с.
18. Исследование очага деформации при продольном прокатывании с точки зрения реологической концепции [Текст] / Н.Н.Бережной, В.А.Чубенко, А.А.Хиноцкая, С.О.Мацешин// Восточно-Европейский журнал передовых технологий– том 1 № 7 (73) (2015), - с. 31-35 doi:10.15587/1729-4061.2015.38059
19. Kodjaspirov, G. E. Effect of thermomechanical processing on structure and corrosion-mechanical properties of AISI 321 steel [Text] / G. E. Kodjaspirov, A. I. Rudkoy, V. V. Rybin // Advanced Materials Research. – 2010 – Vol. 89-91. – P. 769–772. doi:10.4028/www.scientific.net/amr.89-91.769
20. Faraji, G. Accumulative Torsion Back (ATB) Processing as a New Plastic Deformation Technique [Text] / G. Faraji, H. Jafarzadeh //Materials and Manufacturing Processes. – 2012 – Vol. 27, Issue 5 – P. 507–511. doi: 10.1080/10426914.2011.593235

21. Вплив швидкості деформації на зміну напруження при поздовжньому прокатуванні [Текст] / Чубенко В.А., Хіноцька А.А. //Гірничий вісник. – 2019, Випуск 105. – С. 42 – 46.
22. Практическое руководство к программному комплексу DEFORM-3D: учебное пособие [Текст] / В.С.Паршин, А.П.Карамышев, И.И.Некрасов и др. – Екатеринбург: УрФУ, 2010. – 266 с.
- 23.Василев Я.Д. Теорія поздовжньої прокатки / Я.Д. Василев, О.А. Мінаєв. – Підручник. – Донецьк: УНІТЕХ, 2009. – 488 с.
- 24.Коновалов Ю. В. Пути решения температурной задачи прокатки / Ю. В. Коновалов, А. С. Хохлов // Обработка материалов давлением: сборник научных трудов. – Краматорск: ДГМА. 2012. – № 2 (31). – С. 185-188.
- 25.Бережний М.М. Енергетичний баланс осередку деформації при прокатуванні/ М.М.Бережний, А.А.Хіноцька, В.А.Чубенко// Ресурсозберігаючі технології виробництва та обробки тиском матеріалів у машинобудуванні: Зб. наук. пр. – Луганськ: вид – во СНУ ім. В.Даля, 2012. – С. 60 – 67.