

Міністерство освіти і науки України
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

Факультет прикладних інформаційних технологій та електроінженерії
(повна назва факультету)

Кафедра автоматизації технологічних процесів та виробництв
(повна назва кафедри)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття освітнього ступеня

магістр

(назва освітнього ступеня)

на тему: Розробка та дослідження автоматизованої системи керування процесом
прокатування алюмінію

Виконав: студент

VI курсу, групи КАм-61

спеціальності

174 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

(шифр і назва спеціальності)

(підпис)

Лещук М.Р.

(прізвище та ініціали)

Керівник

(підпис)

Медвідь В.Р.

(прізвище та ініціали)

Нормоконтроль

(підпис)

(прізвище та ініціали)

Завідувач кафедри

(підпис)

Савків В.Б.

(прізвище та ініціали)

Рецензент

(підпис)

Золотий Р.З.

(прізвище та ініціали)

Тернопіль
2023

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Охорона праці			
Безпека в надзвичайних ситуаціях			

7. Дата видачі завдання _____

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1.	Ознайомлення з завданням до кваліфікаційної роботи	25.11.2023	<i>Виконано</i>
2.	Підбір наукових джерел по темі роботи	26.11.2023-28.11.2023	<i>Виконано</i>
3.	Опрацювання наукових публікацій та збір даних по темі роботи	29.11.2023-1.12.2023	<i>Виконано</i>
4.	Виконання дослідження згідно мети кваліфікаційної роботи	2.12.2023-4.12.2023	<i>Виконано</i>
5.	Оформлення першого та другого розділів	5.12.2023-7.12.2023	<i>Виконано</i>
6.	Оформлення третього розділу	8.12.2023-10.12.2023	<i>Виконано</i>
7.	Оформлення розділу четвертого розділу	11.12.2023-13.12.2023	<i>Виконано</i>
8.	Виконання завдання до підрозділу «Охорона праці»	14.12.2023-15.12.2023	<i>Виконано</i>
9.	Виконання завдання до підрозділу «Безпека в надзвичайних ситуаціях»	16.12.2023-17.12.2023	<i>Виконано</i>
10.	Оформлення кваліфікаційної роботи	18.12.2023-19.12.2023	<i>Виконано</i>
11.	Нормоконтроль	19.12.2023-20.12.2023	<i>Виконано</i>
12.	Перевірка на плагіат	21.12.2023	<i>Виконано</i>
13.	Попередній захист кваліфікаційної роботи	22.12.2023	<i>Виконано</i>
14.	Захист кваліфікаційної роботи		

Студент

_____ (підпис)

Лещук М.Р.

_____ (прізвище та ініціали)

Керівник роботи

_____ (підпис)

Медвідь В.Р.

_____ (прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

Кваліфікаційна робота магістра складається з пояснювальної записки та графічної частини (ілюстративний матеріал – слайди).

Об'єм графічної частини дипломної роботи становить _____.

Об'єм пояснювальної записки складає 76 друкованих сторінок формату А4.

В роботі використано 27 літературних джерел.

У роботі було розроблено автоматизовану систему керування технологічним процесом прокатки алюмінію для виготовлення фольги.

Було розглянуто основні аспекти процесу прокатування алюмінію, основні параметри, як необхідно контролювати. Встановлено, що процес має характерні особливості та вимагає активного процесу керування в режимі реального часу.

Для побудови системи було описано технічні характеристики прокатного стану, розроблено конфігурацію системи, описано основні функції керування.

В роботі було розроблено систему автоматизованого керування процесом холодної прокатки алюмінію. На основі аналізу основних залежностей та моделей процесу прокатування було розроблено ефективну систему керування на базі контролера SIMATIC TDC та SIMATIC S7-400.

Ключові слова: КОНТРОЛЕР, ПРОКАТКА, НАТЯГ, АЛЮМІНІЙ, АВТОМАТИЧНИЙ КОНТРОЛЬ.

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

WR (англ. Work roll) – робочий ролик.

BUR (англ. Backup roll) – задній ролик.

ACR (англ. Automatic current regulator) – автоматичний регулятор струму.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	7
1. АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА	8
1.1. Характеристики алюмінію та його сплавів	8
1.2. Особливості процесу прокатування алюмінію.....	16
2 ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА	24
2.1. Характеристика технологічного прокатування алюмінію	24
2.2. Різні види прокатних станів	26
3 КОНСТРУКТОРСЬКА ЧАСТИНА	36
3.1 Технічні характеристики стану, який підлягав автоматизації.....	36
3.2. Конфігурація системи.....	39
3.3. Система автоматизації процесу	41
3.4. Функції керування.....	43
3.5. Базова система автоматизації.....	45
4. НАУКОВО-ДОСЛІДНА ЧАСТИНА.....	51
4.1 Основні залежності, які використовувались для забезпечення автоматизованого контролю.....	51
5. СПЕЦІАЛЬНА ЧАСТИНА.....	57
5.1 Базові механіки процесів прокатування	57
6 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ.....	64
6.1 Організація охорони праці при роботі з системою управління.....	64
6.2 Електробезпека	66
6.3 Розрахунок заземлення	69

ОСНОВНІ ВИСНОВКИ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ	73
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ	74

ВСТУП

Оскільки промислові технології розвиваються та стають більш доступними для широкого кола виробників, можна очікувати, що все більше галузей почнуть покладатися на автоматизовані рішення. Наприклад, автоматизація у виробничій галузі має на меті запропонувати покращення якості продукції, продуктивності та стабільності виробничого процесу.

Напівавтоматичні процеси виконують автоматизацію в межах параметрів, заданих людиною-оператором. Такого роду процеси забезпечують більшу гнучкість у виробничому процесі, оскільки процес можна визначити в більшій різноманітності, а проміжні перевірки якості та виправлення можна зробити для забезпечення правильності процесу. У таких процесах людино-машинний інтерфейс необхідний для передачі бажаних параметрів процесу автоматизації та для керування частинами автоматизованого виробництва. У паперовій і металургійній промисловості роликові катки використовуються для пресування і стискання кінцевого продукту.

Коли ці рулони використовуються у виробництві, вони піддаються сильному фізичному навантаженню, і ролики зношуються під час використання. Зажим — це точка контакту між двома валками, і форма валка впливає на тиск затискання. Якщо рулон занадто сильно зношується, тиск на затискач стане нерівномірним, і якість кінцевого продукту погіршиться.

Тому розробка автоматизованих систем, які будуть автоматично регулювати процес прокатування листових виробів є актуальною задачею на сьогоднішній час, оскільки дозволить підвищити якість продукції.

1. АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА

1.1. Характеристики алюмінію та його сплавів

Переваги алюмінію. Властивості алюмінію роблять його одним із найбільш вигідних і універсальних матеріалів, які використовуються сьогодні.

Алюміній:

- Легкий — алюміній та його сплави важать лише приблизно на одну третину ваги рівного об'єму заліза, сталі або міді.

- Міцність — за відповідних умов міцності деякі алюмінієві сплави дорівнюють або перевищують міцність деяких сталей. Міцні алюмінієві сплави можуть бути в два-три рази міцнішими за сталь за такої ж ваги.

- Криостійкість — на відміну від сталі, титану та багатьох інших матеріалів, які стають крихкими при дуже низьких (криогенних) температурах, алюміній залишається пластичним і навіть набуває міцності при зниженні температури. Ця властивість робить алюміній дуже корисним у дуже холодному кліматі та для транспортування надзвичайно холодних матеріалів, таких як зріджений природний газ (-260°F [-162°C]).

- Пластичність і придатність до роботи — алюмінієві сплави можна легко формувати та виготовляти всіма стандартними методами обробки металу.

- Можливість з'єднання — алюмінієві сплави можна з'єднувати всіма відповідними основними методами, включаючи зварювання, механічні з'єднання та склеювання.

- Відбиває — алюмінієві сплави зі стандартною комерційною обробкою зазвичай відбивають понад 80 відсотків видимого світла та понад 90 відсотків інфрачервоного випромінювання, що робить алюміній

ефективним відбивачем або захистом від світла, радіохвиль і теплового випромінювання.

- Теплопровідність — алюміній є чудовим теплопровідником, придатним для кухонного посуду та теплообмінників; він ефективніший, фунт за фунт, ніж мідь.

- Електропровідність. Алюміній також є чудовим провідником електрики, який зазвичай використовується в таких важких системах, як лінії електропередач високої напруги, шини та локальні та будівельні розподільні системи.

- Стійкість до корозії — алюміній під дією повітря утворює прозору природну оксидну плівку, яка захищає його поверхню від подальших реакцій і захищає від корозії під час звичайної погоди. Спеціальні алюмінієві сплави, обробки та/або покриття можуть бути обрані для максимізації корозійної стійкості в конкретних сферах застосування.

- Нетоксичний — прокатні алюмінієві сплави нетоксичні, легко чистяться та не вбирають вологу. З цих причин вони широко використовуються для приготування та пакування їжі.

- Негорючий — алюмінієвий прокат не горить і не виділяє шкідливих газів під впливом тепла. Це безпечніше, ніж багато інших матеріалів, де пожежа є потенційною небезпекою.

- Можливість вторинної переробки. Стійкість алюмінію до корозії та реакції з більшістю звичайних матеріалів підтримує його в хорошому стані протягом усього терміну служби більшості продуктів. Алюмінієвий брухт широко переробляється, що зменшує потреби в утилізації відходів і вплив виробництва нових матеріалів на навколишнє середовище.

Плоскопрокатний алюмінієвий F листовий прокат — лист, плита та фольга — протягом багатьох років становив найбільший обсяг алюмінієвої продукції, що щорічно поставляється, випереджаючи інші форми, такі як

лиття, екструзія, дріт, пруток і пруток, поковки і удари, а також порошки і пасти.

Алюмінієві листи є надзвичайно універсальним матеріалом не лише завдяки індивідуальним характеристикам, які йому можна надати на прокатному стані, але й через його придатність до широкого діапазону процесів обробки, виготовлення та з'єднання.

Йому можна надати широкий спектр поверхонь: з візерунком, фарбою, покриттям, полірованою, кольоровою, покритою, ламінованою, анодованою, травленою або текстурованою. Його можна обробляти різними способами: стригти, пиляти і свердлити. Його легко формувати: гнути, рифляти, тягнути або штампувати. Його можна легко з'єднати з самим собою або з іншими матеріалами: заклепками, болтами, кліншами, пайкою, пайкою, зварюванням і клеєм. Його застосувань занадто багато, щоб перерахувати їх повністю.

До них відносяться такі знайомі товари, як: цоколі лампочок, банки з-під напоїв і їжі, кухонне начиння; побутова техніка; маркізи та жалюзі; сайдинг, покрівля, опалубка, жолоби та навісні панелі для житлових, комерційних, промислових та підсобних будівель; дорожні знаки, номерні знаки; теплообмінники; автомобільні конструкції та екстер'єри; панелі вантажівок, причепів і фургонів; корпуси малих човнів і обшивка літаків.

Алюмінієву пластину можна сформувати безпосередньо в міцні форми однакової товщини. Це також може служити як «бланком», з якого можна виготовити складні деталі великої площі, наприклад ребристі пластини крила сучасних літаків. З нього можна зварювати великі, міцні, довговічні конструкції. Серед багатьох інших застосувань алюмінієва пластина використовується для виготовлення залізничних гондол і вагонів-цистерн, бойової броні для військових танків і транспортних засобів, надбудов великих торговельних і військових суден і морських нафтових вишок, резервуарів для зберігання і транспортування надхолодного зрідженого

природного газу, літаків структурні частини та компоненти космічного корабля.

Алюмінієва фольга знайома більшості людей як популярна форма м'якої, дуже тонкої (0,00065 дюйма [0,0165 мм] товщини) домашньої кухонної фольги: її легко згорнути, вона непроникна для води та пари, вогнестійка та теплопровідна і тепловідбиваючий, і негостинний для цвілі.

Але алюмінієва фольга також виготовляється з твердіших і міцніших сплавів, міцність яких може наближатися до сталі. Різноманітність властивостей, доступних алюмінієвій фользі, робить її корисною в застосуванні, починаючи від захисної упаковки харчових продуктів, фармацевтичних препаратів та багатьох інших споживчих товарів, до ламінованих пароізоляційних бар'єрів та ізоляції в будівлях, до штучних ялинок, звукових перетворювачів/приймачів діафрагм. , жорсткі контейнери та скріплені клеєм структурні соти.

Спеціальні типи листів і пластин можуть виготовлятися для певних застосувань. Деякі приклади включають: анодований лист, бронепластина, лист для пайки, лист декоративної панелі, лист для промислової покрівлі, лист для літографії, пофарбований лист, лист з малюнком, лист для емалювання фарфору, відбиваючий лист, покрівельний лист для сільської місцевості, конічний лист і плита, інструментальна плита, лист для даху причепа, протекторна плита, лист з вініловим покриттям.

■ Плита алюмінієва прокат товщиною одна чверть дюйма (6,3 мм) або більше. Алюмінієва плита — це виріб прямокутної форми та поперечного перерізу, товщиною 0,250 дюйма (6,3 мм) або більше. Він може мати обрізані або спиляні краї. Зазвичай він виготовляється в плоскому вигляді (але може бути згорнутим) або в різних спеціальних формах або виготовленні. Деякі виробники алюмінієвих плит можуть виконати додаткову обробку або застосувати спеціальну обробку поверхні, щоб плита була придатною для бажаного застосування. (Примітка. Якщо продукти замовляються відповідно

до метричних специфікацій із використанням метричних розмірів, пластина визначається як така, що має товщину > 6 мм; однак загальноприйнята стандартна товщина для 0,250" становить 6,3 мм.).

■ Менше однієї чверті дюйма (6,3 мм) товщиною до восьмитисячних дюйма (0,20 мм), його називають «листом». Алюмінієвий лист — це виріб прямокутної форми та поперечного перерізу, товщиною від $> 0,0079$ дюйма (0,20 мм) до 0,249 дюйма (6,3 мм). Він може мати обрізані, розрізані або розпиляні краї. Він може виготовлятися в рулонах, або плоскої форми, або в різноманітних спеціальних формах чи виготовленні. Деякі виробники алюмінієвих листів можуть виконувати додаткову обробку або застосовувати спеціальну обробку поверхні, щоб листовий виріб відповідав бажаному застосуванню. (Примітки: коли продукти замовляються відповідно до метричних специфікацій за допомогою метричних розмірів, аркуш визначається як товщина від $> 0,20$ мм до ≤ 6 мм. Раніше аркуш визначався як $\geq 0,006$ дюйма (0,15 мм) до 0,249 дюйма (6,3 мм).)

■ Більш тонкий, ніж це, це «фольга». Звичайна алюмінієва фольга – це рулонний виріб із прямокутним поперечним перерізом і товщиною \leq до 0,0079 дюйма (0,20 мм). Вона доступна в рулонній формі або плоских листах. Деякі виробники алюмінієвої фольги можуть виконувати додаткову обробку або спеціальну обробку поверхні, щоб що виріб із фольги підходить для бажаного застосування. (Примітки: коли продукти замовляються відповідно до метричних специфікацій із використанням метричних розмірів, фольга визначається як товщина $\leq 0,20$ мм. Раніше фольга вважалася товщиною $< 0,006$ " (0,15 мм).)

Фактичне проходження алюмінію через прокатний стан — це лише один крок — хоча й центральний — у всебічній послідовності. Кожен плоский прокат має свої кінцеві властивості не лише завдяки самому процесу прокатки, а й його життєво важливим взаємодіям із: підготовчими етапами легування, лиття, скальпування та попереднього нагрівання; проміжний

відпал; і такі пізніші етапи обробки, як термічна обробка розчину або остаточний відпал, розтягування, вирівнювання, різання, обрізка країв і старіння.

Сучасні алюмінієві прокатні заводи виконують багато або всі з цих операцій, відбираючи, регулюючи та координуючи їх науково, щоб виробляти плоский прокат із точними розмірами, властивостями та іншими характеристиками, визначеними кожним клієнтом. Загальний вид плавильного алюмінієвого заводу приведено на рис. 1.1.

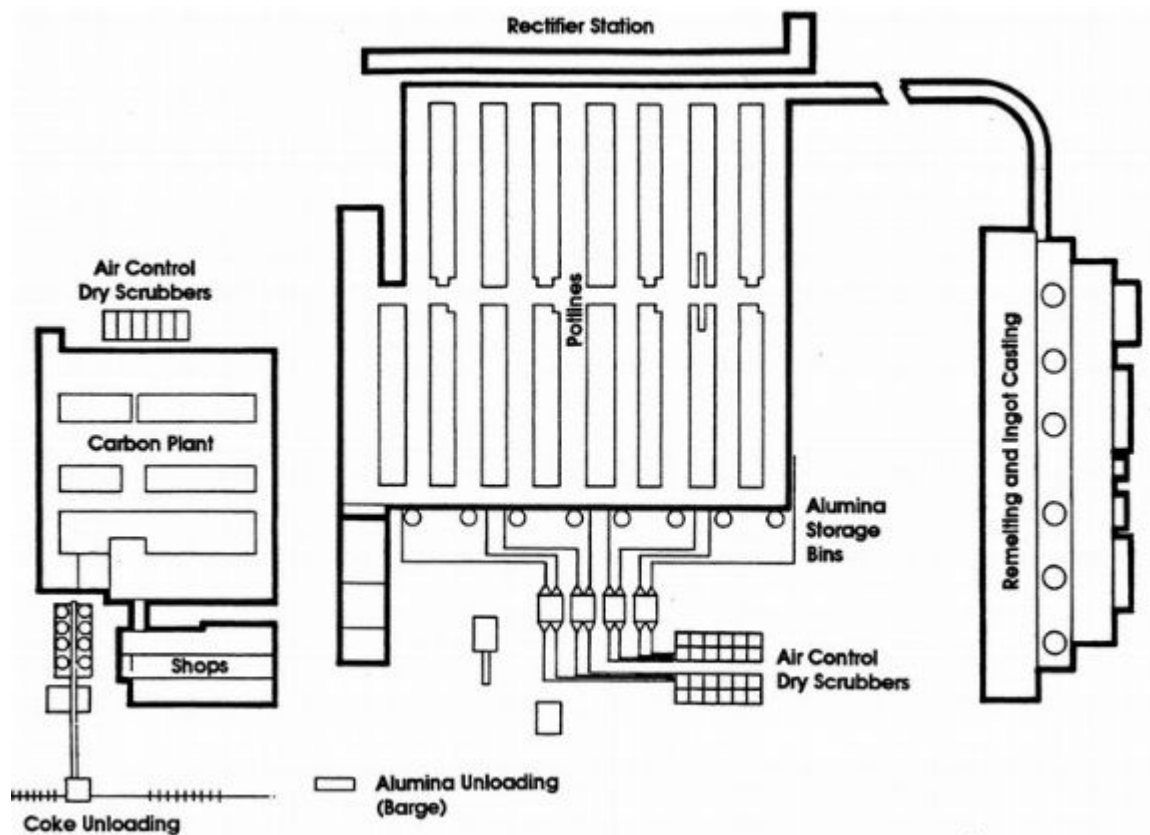


Рис. 1.1. План поверху, типовий завод з виплавки алюмінію

До того часу, як алюміній з'явився на сцені, людство мало тисячолітній досвід лиття та кування металів і кілька сотень років навчилося згортати їх у листи, плити та навіть фольгу. Прокат металу, можливо, практикувався в розвинених країнах ще на початку 16 століття. Всі ці знайомі методи обробки металу були адаптовані та застосовані до алюмінію.

Перша алюмінієва сковорода була виштампована в 1890 році, і більша частина алюмінію, виробленого до 1900 року, використовувалася для приготування їжі. Човни з алюмінієвим корпусом були побудовані в 1890-х роках, у тому числі гоночна яхта США «Defender» з алюмінієвими пластинами в 1895 році. До 1903 року близько 6,5 мільйонів фунтів (3 мільйони кг) алюмінію споживалося щорічно, приблизно одна третина цього в формі листа. У тому ж році алюмінієва фольга була вперше згорнута у Франції; згортання алюмінієвої фольги в Сполучених Штатах почалося в 1913 році для обгортання цукерок і жувальної гумки. Тонкі алюмінієві обшивки з'явилися на літаках ще в 1917 році (на моноплані Junkers J-4 і біплані Dornier DO-1, попереднику сьогоденного «напруженого літака». обшивка» конструкції літака). Практичний метод виробництва листів Alclad — міцного алюмінієвого сплаву, покритого тонким шаром іншого алюмінієвого сплаву для підвищення стійкості до корозії — був розроблений у Сполучених Штатах у 1926 році. З того часу було розроблено багато інших плакованих алюмінієвих виробів для таких таких як захист від корозії, зовнішній вигляд поверхні або полегшення паяння.

Технологічний прогрес. Фундаментальні принципи та конструкції металопрокатних станів були встановлені наприкінці 19-го століття, але вдосконалення їх технології та металургії тривали протягом 20-го століття.

Алюмінієвий прокат неухильно вигравав як у якості, так і в ефективності завдяки прогресу у власній специфічній технології, а також удосконаленням, застосованим до металопрокату в цілому. Типовий алюмінієвий прокатний завод приведено на рис. 1.2.

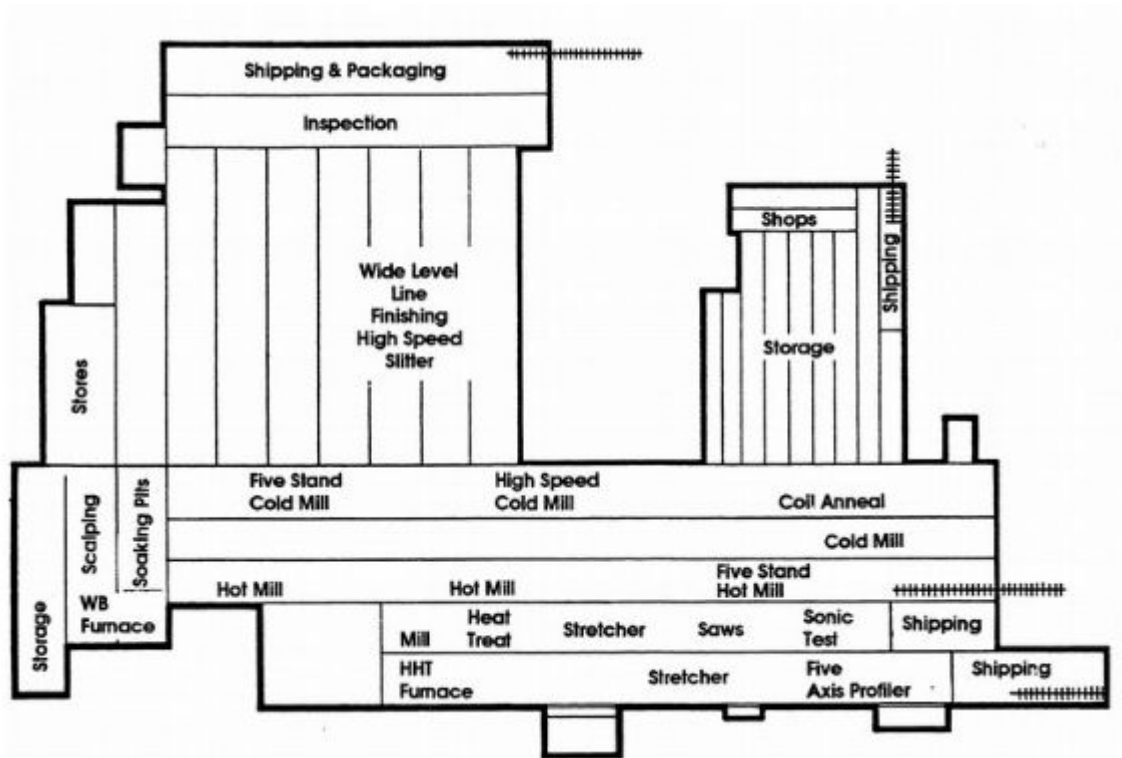


Рис. 1.2 План поверху, типовий алюмінієвий прокатний завод

Стани безперервної гарячої та холодної безперервної прокатки листів почали працювати в Сполучених Штатах у 1926 році. Повідомлялося, що максимальна швидкість першого в США холодного «смугового» стану становила лише близько 200 футів на хвилину (60 м/хв.); сучасні холодні млини працюють приблизно в 35 разів швидше!

Прокатна промисловість перейшла з парових машин на електрику; вона побудувала спеціальні млини та більші багатоцільові млини. Стандартні конфігурації стану «двох» і «чотирьох», які були введені в експлуатацію на початку, з прокатними валками, «укладеними» вертикально, все ще є основними для прокатної промисловості. Однак пізніше вони були доповнені різними «кластерними» конструкціями з робочими валками, які підтримувалися двома або більше резервними валками кожен.

Протягом десятиліть безпека, ефективність, вартість і якість продукції були покращені завдяки впровадженню автоматичних транспортно-

розвантажувальних пристроїв, маніпуляторів, напрямних, щитків, підйомно-перекидних столів; автоматичні перемикачі валків, компактні вимірювальні комірки на підшипниках качення, зворотні зв'язки контролю калібру, вирівнювання навантаження та захист від перевантаження; запрограмоване застосування охолоджуючої/мастильної рідини; та багато інших технічних досягнень.

Останніми роками алюмінієві прокатні стани впроваджують комп'ютеризоване керування технологічним процесом, контроль якості та відстеження запасів, а також удосконалений контроль калібру та форми, щоб досягти ще вищої якості та сталості продукції. Комп'ютеризація, у свою чергу, вказує шлях до таких подальших розробок, як комп'ютерно-інтегроване виробництво, статистичний контроль процесів і виробничі розклади точно вчасно. Ці останні досягнення спрямовані на підвищення якості продукції та надійності доставки, а також на зниження виробничих витрат. Алюміній, який має початкову товщину в два фути (0,6 м), може пройти милю (1,6 км) через великі прокатні стани, печі, фрези та розтяжки, щоб вийти у вигляді тонкого листа товщиною лише кілька сотих дюйма (кілька десятків міліметра). І він пройшов довгий шлях, перш ніж дістатися до прокатного стану.

1.2. Особливості процесу прокатування алюмінію

Алюмінієві сплави можна прокатувати холодним способом до товщини приблизно 0,002 дюйма (0,05 мм). Чистий (низьколегований) алюміній можна холодно згорнути у фольгу товщиною 0,0001 дюйма (0,0025 мм).

Перший прохід через одноклітєвий стан холодної прокатки може зменшити товщину матеріалу приблизно на 50 відсотків. Подальші проходи можуть зменшити товщину на аналогічну або меншу кількість. Лист, призначений для холодної прокатки до товщини приблизно до 0,040 дюйма

(1 мм), як правило, гаряче прокатують приблизно до 0,120-0,240 дюйма (3-6 мм) перед початком холодної прокатки.

Зі збільшенням робочого зміцнення потрібно більше енергії, щоб прокатувати лист тонше. Понад певний ступінь твердості метал може тріснути, якщо його знову прокатувати. Це накладає практичні обмеження на ступінь зменшення товщини холоднокатаного прокату, якого можна досягти за безперервну серію проходів. Якщо необхідне подальше зменшення товщини, лист необхідно відпалити, як описано вище, щоб розм'якшити метал для подальшої холодної прокатки. Ступінь холодної прокатки, що виконується після (або без) відпалу, розраховується для досягнення бажаних властивостей прокату: або його остаточний стан, або умови, необхідні для досягнення кінцевого стану.

Для створення поверхні, що відбиває, на холоднокатаному аркуші, під час останніх проходів прокатують відрізки меншої товщини. Найяскравіші поверхні виходять за допомогою високошліфованих робочих валків. Типовий одноклітинний холодний стан може прокатувати лист зі швидкістю приблизно 1525-1830 м/хв за кожен прохід.

Незважаючи на те, що лист надходить на стан «холодним», при кімнатній температурі, тертя та тиск прокатки можуть підвищити його температуру приблизно до 80°C або більше. Це надлишкове тепло має бути видалено відповідним охолоджувачем/мастильним матеріалом.

Холодна прокатка на тандемному (багатоклітковому) стані регулюється тими ж загальними принципами, що й холодна прокатка в одній кліті. Тандемний стан застосовує кілька зменшень товщини за один прохід і легко відповідає або перевершує продуктивність однокліткового. Мастила, що використовуються для холодної прокатки, зазвичай складаються з несучої присадки в легкому нафтовому дистилляті.

Оливи з меншою в'язкістю ефективніше передають тепло та покращують продуктивність кочення. Нижня межа в'язкості визначається

випаровуванням олії, температурами спалаху та горіння при температурах прокатки.

Нафтово-водяні емульсії були розроблені для високошвидкісної холодної прокатки і були прийняті на деяких заводах. Мастила для кочення фільтруються для видалення залишків зносу кочення, а потім рециркулюють.

Довжина аркуша, загорнутого в один рулон, залежить від діаметра рулону та товщини листа. Відстань 965 мм між внутрішнім радіусом 255 мм і зовнішнім радіусом 1220 мм (діаметр котушки 510-2440 мм) може вмістити 760 шарів листа, згорнутого до типової товщини 0,05 дюйма (1,25 мм).

Одна така котушка могла б утримувати смужку алюмінієвого листа довжиною понад 3,25 кілометра, яка починалася зі зливка товщиною 610 x 7315 мм.

Плоский прокат товщиною більше 6,3 мм зазвичай не згортається в рулони, а доставляється на робочий стіл і нарізається на задану довжину.

Контроль калібру та профілю.

З розвитком технології вимоги до листових продуктів на плоскокатаних алюмінієвих виробках для точності товщини (калібру), площинності та форми поперечного перерізу стали більш вимогливими, і технологія прокатки активно розвивається.

Спочатку технологія прокатки була зосереджена головним чином на досягненні рівномірної товщини по всій довжині прокату. В останні роки він додав більш складну можливість контролювати поперечну товщину. Зміна товщини поперечної ширини називається профілем, і її можна контролювати під час процесу прокатки.

Профіль можна додатково описати як такий, що складається з двох основних компонентів, а саме корони та клина. Для більшості сплавів краї листа будуть трохи тоншими, ніж центр (позитивна корона), в результаті легкого вигину або викривлення робочих валків, коли вони працюють, щоб зменшити товщину слябу.

Чим вище навантаження прокатки, тим більше ступінь вигину робочих валків і тим вище вінець. Більш розбавлені сплави (більш м'які) іноді схильні мати більш товсті кромки, ніж центр, або негативну корону, умова, яка може мати негативний вплив на площинність під час наступних проходів холодної прокатки.

Клин — це різниця в товщині двох країв, де лист збільшується в товщині поперек смуги, і може бути спричинений або непаралельними робочими валками, або нерівномірним розподілом температури в зазорі між валками. Для багатьох застосувань листів і плит потрібен максимально плоский профіль поперечного перерізу з постійною товщиною смуги. З іншого боку, для деяких застосувань потрібен позитивний профіль, трохи товщий до середини, ніж до країв.

Формування необхідного профілю смуги найлегше досягається на товстому гарячому металі, тобто під час гарячої прокатки в одну кліть або на вході та середніх валках тандемного стану гарячої прокатки. Площинність кінцевого продукту значною мірою залежить від прокатки останньої кліті, через яку він проходить, її вихідної кліті.

Досягнення максимально можливої площинності зазвичай є однією з головних цілей холодної прокатки. Контроль товщини, звичайно, практикується на кожному етапі прокатки; але це найбільш критично в останньому стані редукції, який надає виробу остаточну товщину. Щоб товщина та профіль могли ефективно контролюватись, їх необхідно як точно виміряти, так і точно скорегувати.

Сучасна комп'ютеризована технологія прокатки дає змогу вимірювати товщину, площинність і профіль виробу, коли він виходить із кліті стану, порівнювати їх із заданими значеннями та регулювати прокатний стан для внесення відповідних поправок під час прокатки. Такі контури зворотного зв'язку вимірювання/контролю дозволяють виробляти листи та плити з більш точними профілями, ніж будь-коли раніше. У деяких випадках цикли

зворотного зв'язку можуть бути доповнені циклами «прямої подачі», у яких виріб вимірюється як на підході до робочих валків, так і на виході з них, і ці два вимірювання можуть сигналізувати про автоматичне налаштування стану вчасно для корекції прокатки продукту, оскільки він потрапляє в робочі валки.

Товщина продукту (калібр) може бути виміряна під час прокатки за допомогою контактних валків або шляхом безконтактного вимірювання рентгенівського або іншого випромінювання, що проходить через метал. Рівність поверхні може бути виміряна сегментованими контактними роликками або лазерними променями. Миттєва корекція товщини під час прокатки може бути здійснена шляхом активації гідравлічних поршнів, які переміщують валки трохи вгору або вниз, щоб за потреби відрегулювати зазор між валками.

Розглядання товщини та профілю збігаються, коли відривна сила, прикладена прокатом, викликає відхилення робочих валків. Доступні різноманітні методи (так звані «приводи») для контролю ширини та/або профілю під час прокатки.

Вони включають:

- Нахил валків: робочі валки можуть бути нахилені не паралельно вертикально, щоб протидіяти та виправити непаралельні поверхні продукту в протилежному напрямку.

- Схрещування валків: робочі валки можна «схрещувати» (зробити трохи непаралельними по горизонталі), переміщаючи їх кінцеві кріплення, щоб змінити розподіл сил кочення. Цей тип регулювання виконується між проходами прокатки.

- Локалізоване охолодження валків: контрольоване збільшення або зменшення охолодження локальних сегментів валків можна використовувати для контролю теплового розширення та звуження, а отже, для контролю

форми валка під час прокатки. Це може бути суттєвим методом контролю холодної прокатки.

- Згинання валків: Робочі валки або резервні валки можна згинати у вертикальній або горизонтальній площині, щоб компенсувати зусилля кочення або виправити вхідний профіль. Рулонним згином можна керувати динамічно, під час прокатки.

- Ступінчасті опорні валки: опорні валки можуть бути встановлені з циліндричними центральними секціями більшого діаметру та меншими діаметрами на кінцях, щоб зосередити свій тиск на робочі валки трохи більше ширини прокату. Ширина «кроку» може бути фіксованою властивістю резервного рулону, або вона може бути регульованою, створеної за допомогою знімних зовнішніх гільз або сегментів гільз на центральному рулоні. Ступінчасті валки встановлюються або регулюються між проходами прокатки.

- Осьове зміщення рукавних опорних валків: рукав, встановлений на опорному ролику, можна переміщати з боку в бік, ковзаючи рукавом уздовж ролика, зміщуючи область тиску на робочий ролик. Гільзи верхнього та нижнього опорних роликів можуть рухатися в одному або протилежному напрямках залежно від типу необхідної корекції. Оскільки ці втулки мають термоусадкову посадку на сердечниках, їх можна зміщувати лише між проходами прокатки.

- Осьове зміщення циліндричних робочих валків: звичайні циліндричні робочі валки можуть самі зміщуватися з боку в бік, щоб перерозподілити їх тиск на продукт. Верхній і нижній робочі валки можуть зміщуватися в одному або протилежному напрямках. Перемикання здійснюється між проходами прокатки.

- Осьове зміщення нециліндричних робочих валків: Замість звичайного прямого циліндра робочі валки можуть виготовлятися з хвилеподібним профілем від кінця до кінця; тобто злегка опуклу форму до одного кінця, яка

плавно змінюється на злегка увігнуту форму до іншого. Коли два таких робочих вальця використовуються разом, форму зазору між ними можна змінювати, зміщуючи їх по осі в протилежних напрямках. Переміщення двох увігнутих сегментів один навпроти одного дозволяє виробу, що проходить між ними, виступати в середині, утворюючи увінчаний профіль або виправляючи небажану увігнутість.

Зміщення двох опуклих сегментів навпроти стискає середину виробу та формує увігнутий профіль або виправляє небажане коронування. Розміщення опуклих і увігнутих сегментів навпроти створює виріб із постійною поперечною товщиною, але «хвилястим» профілем, який може вимагати розплющування шляхом подальшої прокатки.

- Гнучкі опорні ролики: були доступні опорні ролики, які можна гідравлічно розширювати в центрі або на кінцях, щоб викликати динамічне згортання або увігнуття під час прокатки у відповідь на петлі зворотного зв'язку датчика/комп'ютера. Крім того, «самокомпенсуючий» опорний валок, більш гнучкий на кінцях, ніж на середині, бореться з небажаним згортанням продукту, надаючи пружний опір, приблизно пропорційний різним ступеням відривної сили по всьому зазору валка. Гнучкі опорні ролики також розширюють ефективний діапазон згинання робочих валків.

Деякі з цих методів можна застосовувати в поєднанні з іншими. Вибір систем вимірювання, контурів зворотного зв'язку та систем приводів для будь-якого конкретного прокатного стану залежить від власної продукції та умов експлуатації цього стану.

Деякі продукти, такі як алюмінієві пластини проступей настилів і сходинок, вимагають текстурування або тиснення під час остаточного прокату. Замість звичайних гладких поверхонь один або обидва робочі валки матимуть візерунок, який переноситься на аркуш під час його проходження, під час прокатки чи наступних операцій обробки, а також часто на останній кліті тандемного стану.

Тиснення: згорнутий аркуш проходить через набір валків з метою перенесення спеціального малюнка з вигравіруваних валків на поверхню рулону. На відміну від виготовлення протекторної пластини, де більш глибокий малюнок видавлюється з одного боку металу, тиснення не зменшує помітно товщину металу. Рельєфний алюмінієвий лист зі специфічними візерунками, такими як «зерно дерева» або «ромб», широко використовується в архітектурі.

2 ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА

2.1. Характеристика технологічного прокатування алюмінію

Процес прокатки повинен виробляти плиту або лист не тільки з точними розмірами, але й такими іншими характеристиками, як: площинність, якість краю та правильний профіль товщини; задані фізичні властивості; і відсутність поверхневих дефектів. Отже, перш ніж йти за зливком по лінії прокатки, давайте подивимося на сам прокатний стан. Основними частинами прокатного стану є два циліндри з приводом від двигуна, які називаються «робочими валками».

Ці обертові ролики протягують алюміній і зменшують його товщину до ширини зазору між ними.

Товстий злиток можна переробити на тонкий лист або шляхом багаторазового пропускання його між тими самими робочими валками та кожного разу звужуючи зазор, або шляхом пропускання його через серію валків із поступово меншими зазорами. Робочі валки, які фактично стикаються з алюмінієм і формують його, лежать в основі масивного вузла науково розроблених і точно виготовлених деталей, які складають сучасний прокатний стан.

Основні механічні компоненти млина також включають:

- Кліть млина: міцна конструкція, яка підтримує різні частини та витримує величезні напруги, що виникають під час кочення.
- Опорні валки, функцією яких є підтримка робочих валків від надмірного згинання та вібрації.
- Привідні двигуни, які забезпечують обертання робочих валків і проштовхування алюмінію через зазор валків.

- Редуктори, які перетворюють швидкості обертання двигунів у відповідні швидкості обертання та крутний момент (поворотну силу) для робочих валків.

- Приводні шпинделі, які передають силу обертання двигунів на робочі валки.

- Обладнання для згинання валків, здатне викликати легке, контрольоване згинання валків для компенсації теплового розширення або інших спотворень і, таким чином, контролю площинності продукту.

- Машини для регулювання зазору, щоб точно встановити зазор між робочими валками, а потім підтримувати його проти опору сплаву, що піддається зменшенню товщини.

- Системи охолодження для нанесення рідкого охолоджувача/мастила на валки.

А також для листових верстатів, обладнання для обробки рулонів і сердечників для встановлення, видалення та транспортування важких рулонів листового прокату. Компоненти, які безпосередньо застосовують механічну силу, яка зменшує товщину алюмінію, мають бути міцними та точними, здатними прикладати зусилля до мільйонів фунтів з рівномірною точністю в кілька сотих або тисячних часток дюйма.

Слід використовувати рулони відповідного діаметру та поверхні. Автоматичне обладнання для зміни валків дозволяє відносно легко адаптувати стан до мінливих вимог до продукції. Не менш важливими, ніж великі механічні компоненти, є системи керування, які визначають товщину та форму продукту, а також комп'ютери, які аналізують дані та керують системами налаштування млина, щоб підтримувати допуски на продукт під час роботи млина.

Кілька параметрів прокатного стану контролюються оператором або комп'ютером. Вони можуть включати: зазор між валками, зусилля валків, крутний момент валків, охолодження валків, згинання валків, нахил валків і

натягнення листа. Сьогодні на багатьох млинах оператор може попередньо встановити такі параметри, а потім дозволити комп'ютеру автоматично запустити млин через встановлений процес (рис. 2.1).

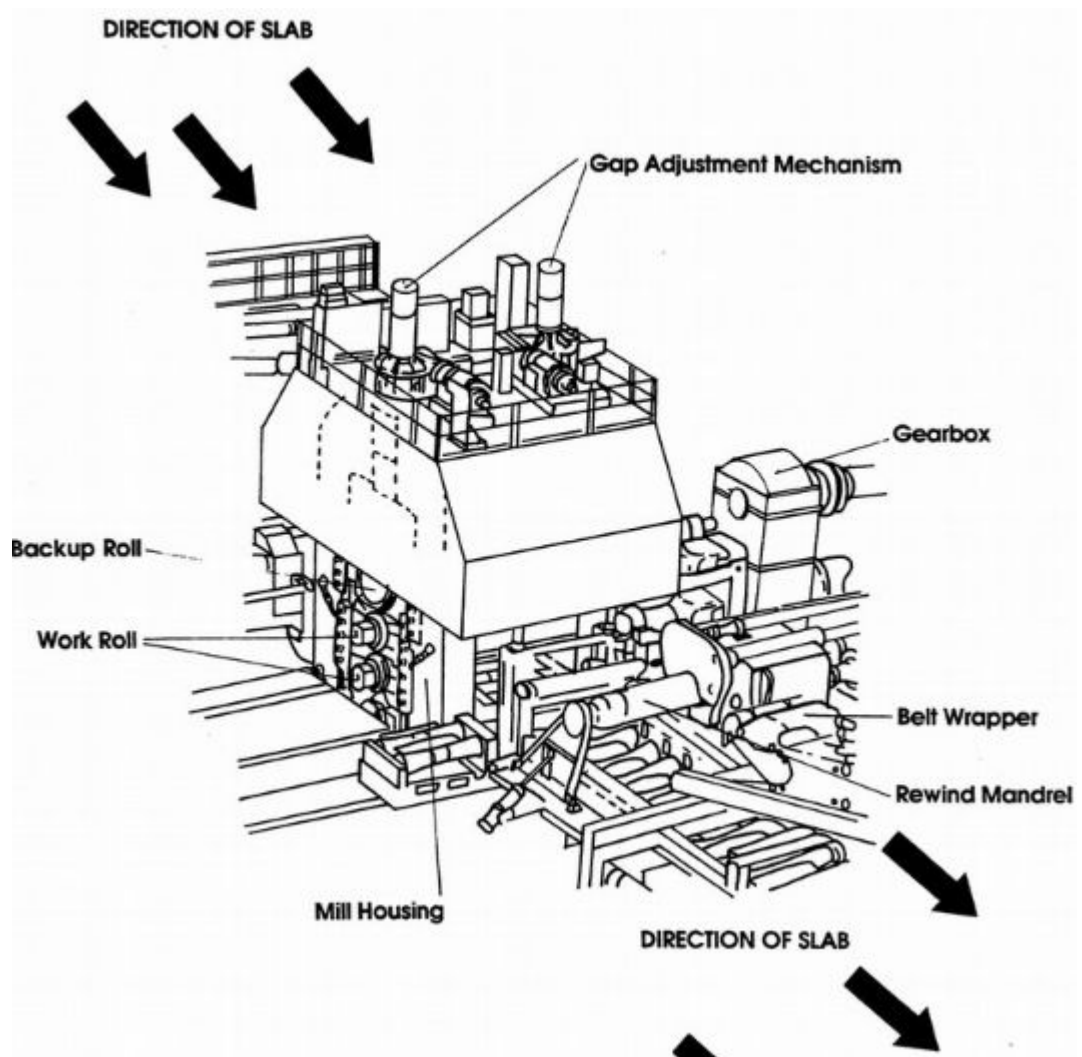


Рис. 2.1. Основні ознаки чотирипрокатного стану.

2.2. Різні види прокатних станів

Стан з одним набором робочих валків є «одноклітковим» прокатним станом; кілька комплектів робочих валків у скоординованих рядах утворюють «багатоклітковий» або «тандемний» стан.

Млинові валки. Тверді сталеві валки мають точну конструкцію. Залежно від виробу, поверхня рулону може варіюватися від тьмяної до

дзеркально яскравої. Діаметр рулону не повинен відрізнятися від специфікації більш ніж на дві з половиною десятитисячних дюйма.

Щоб компенсувати згинання та теплову деформацію, робочий валик може бути вигнутим або увігнутим — валок товщий або тонший на кілька тисячних дюйма навколо середини, ніж на кінцях. Валок Амільла — це просто довгий гладкий сталевий циліндр із віссю. має форму для захоплення та обертання потужними двигунами. Уявна простота його форми приховує багато складної техніки. Це повинен бути майже ідеальний циліндр з гладкою, але твердою поверхнею. Він також повинен бути досить жорстким, щоб не згинатися надмірно з високою силою, необхідною для розплющування злитка або пластини з алюмінієвого сплаву.

Алюмінієвий виріб отримує задану поверхню безпосередньо від контакту з робочими валками, які, отже, повинні мати призначений тип поверхні. Обробка поверхні валків також дуже важлива як для ефективності прокатки, так і для якості продукції. Залежно від специфікацій, плоский алюмінієвий прокат може виготовлятися з відносно шорсткою поверхнею «млинарної обробки» або з більш гладкими поверхнями, аж до «світлого листа» з дзеркальною гладкістю включно.

У той же час ступінь шорсткості валка багато в чому визначає, наскільки ефективно він зможе «вгризтися» в алюміній і за допомогою тертя проштовхнути його через щілину валка. Грубіший перекаат застосовує більше тертя та сильніший укус ніж більш гладкий валок, тому шорсткіший валок може застосовувати більше зменшення товщини за прохід — важливий фактор ефективності млина.

Щоб забезпечити достатнє тертя з гладкою поверхнею кочення, може знадобитися зменшити застосування охолоджуючої/мастильної рідини. Це, в свою чергу, зменшує швидкість відведення тепла і викликає необхідність компенсаційних змін у плані прокатки. Через такі міркування економічно важливо використовувати рулони з поверхнею, що відповідає типу продукту,

який буде вироблений. Клієнт, який був би задоволений обробленим алюмінієм, може бути настільки ж задоволений гладкою обробкою. Однак невиправдано гладкі валки можуть накласти однаково непотрібні покарання на роботу млина. Також важливо підтримувати якість поверхні робочого ролика під час експлуатації. На гарячих валках слід уникати навіть найменших дефектів, щоб запобігти локальному прилипанню алюмінію та утворенню поверхневих дефектів прокату.

Валки для гарячої обробки часто вбирають невелику кількість оксиду алюмінію або навіть металевого алюмінію, явище, відоме як «покриття валиком». У певних межах це може бути вигідно, оскільки воно має тенденцію до збільшення тертя та підвищення ефективності роликів. Слід бути обережним, щоб уникнути надмірного накопичення, яке може призвести до дефектів поверхні продукту через відбиток або відшарування оксиду.

Щоб забезпечити високу якість продукції, якість поверхні робочого ролика ретельно контролюється на предмет надмірного зносу, псування чи пошкодження. Хромування робочих валків було прийнято для підвищення твердості поверхні, покращення обробки поверхні та продовження терміну служби робочих валків. Розчин для прокатки, охолоджуючі рідини або масляні емульсії є ще одним параметром, який ретельно контролюється. Комп'ютерне керування забезпечує оптимальне додавання теплоносія до робочих валків. Контрольоване нанесення охолоджуючої рідини покращує контроль температури робочого валика, таким чином покращуючи контроль форми та в кінцевому результаті одержуючи більш плоску пластину або лист.

Крім того, конструкція валків тісно пов'язана із загальною конструкцією стану, оскільки при зміні розміру та властивостей валків виникають важливі компроміси. Діаметр рулону та жорсткість рулону є двома найважливішими факторами. За інших рівних умов ефективність млина у зменшенні товщини продукту залежить від діаметра робочого валка.

Площинність виробу значною мірою залежить від жорсткості валка, яка, у свою чергу, залежить як від діаметра валка, так і від сталі, з якої він виготовлений. Робочі валки з відносно малим діаметром можуть зменшити товщину алюмінію більшою мірою за один прохід, ніж валки з більшим діаметром. З іншого боку, рулони меншого діаметру згинаються легше, ніж ті, що мають більший діаметр, тому важче підтримувати однакову точну площинність продукту. Загальна гнучкість рулону зростає з довжиною. Чим ширшим має бути рулонний виріб, тим довшим має бути рулон і тим більша ймовірність його відхилення без опори.

Прогинанню рулону можна до певної міри протидіяти, «увінчавши» рулон: тобто зробивши його трохи більшим у діаметрі на кілька тисячних дюйма (десяті частки міліметра) у середині, ніж на кінцях. Оскільки коронування є фіксованим розміром, він може точно компенсувати лише відповідну фіксовану величину прогину валків. Це означає, що будь-який один валок з вінцем повністю підходить лише для певних режимів прокатки з відповідними сплавами та зменшенням товщини. Він не матиме точної правильної форми для інших завдань прокатки.

Більше того, він не зможе компенсувати або може навіть спотворити виріб, якщо дозволити прогину валків стати більшим або меншим, ніж заплановано. Як альтернатива, за деяких обставин робочі валки можуть бути «увігнутими» — зробити трохи меншим діаметром у центрі, ніж на кінцях — для компенсації передбачуваного теплового розширення, яке в іншому випадку спричинило б небажане згортання.

Рулони меншого діаметру також більш вразливі до горизонтального відхилення в напрямку проходження. Тертя алюмінію, що проходить між валками, має тенденцію тягнути їх у тому самому напрямку та може спричинити відхилення рулону, доки його пружність не подолає тертя та не зафіксує його знову. Таким відхиленням слід запобігти шляхом відповідного вибору розміру рулону та/або забезпечення горизонтально стабілізуючих

опорних валків. Завдяки своїй більшій масі більші робочі валки можуть поглинати або віддавати певну кількість тепла з меншою загальною зміною температури, ніж менші.

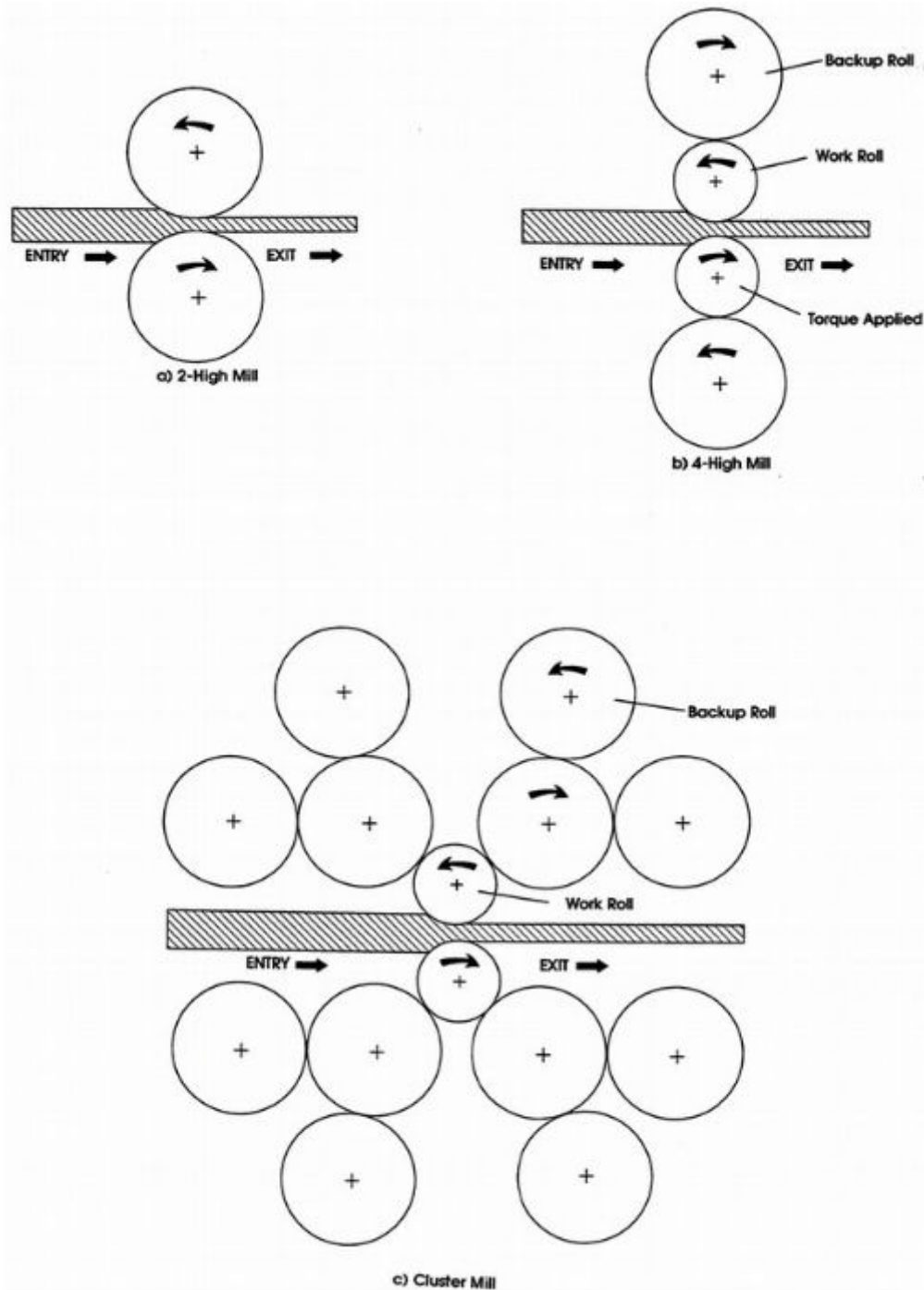


Рис. 2.2. Поширені конфігурації ролонів: дві висоти; чотири висоти; кластер.

Таким чином, рулони більшого діаметру мають більшу терmostійкість. Більші, масивніші робочі валки також мають більшу фізичну інерцію — більший опір змінам руху. Тому для прискорення та уповільнення їхнього обертання потрібно більше енергії, що може суттєво вплинути на конструкцію та економіку стану, особливо для реверсивних станів та інших прокатних станів із пуском і зупинкою.

В принципі, щоб зменшити алюміній до будь-якої бажаної товщини, потрібні лише два робочі ролики. Однак у комерційній практиці робочі валки зазвичай підтримуються «резервними валками», які притискаються до робочих валків і обертаються разом з ними, але ніколи не торкаються продукту. Робочий валок або резервний валок можуть приводитися безпосередньо в рух двигунами млина. Інший валок стає натяжним роликом, обертаючись тертям веденого валка.

Найпоширенішою схемою є «чотиривисокий» стан, у якому два робочі валки розміщені один над одним, і кожен підтримується опорним валком, над верхнім робочим валком і під нижнім, у вертикально розташованій конфігурації «чотири (рулони) високо». У цій конфігурації основною метою опорних валків є підтримання точної рівномірної площинності продукту шляхом запобігання надмірному вертикальному відхиленню робочих валків.

Таким чином, основною вимогою до опорного рулону є міцність, яка досягається за рахунок достатнього діаметра, щоб протистояти «відривній силі», що застосовується через стійкість алюмінію до деформації. Опорний ролик більшого діаметру може дозволити використовувати робочий ролик меншого діаметру і, в той же час, збільшити термічну стабільність пристрою, діючи як тепловідвід або джерело для робочого ролика. Однак більш масивний опорний валок також збільшує інерцію прокатного стану та вимагає більше енергії для прискорення та уповільнення.

Термостабільність та інерція можуть впливати на вибір опорного валку, але домінуючим фактором завжди є його здатність контролювати відхилення

робочого валика. Опорні ролики також застосовуються в інших конфігураціях для боротьби з горизонтальним відхиленням робочого ролика, а також вертикальним відхиленням. Це досягається шляхом розміщення опорних валків поза вертикальною віссю стосу робочих валків таким чином, щоб їх сила проти робочих валків була спрямована як вертикально, так і горизонтально.

Конфігурації з використанням кількох опорних валків зазвичай називаються «кластерними станами» і зазвичай використовуються для прокатки тонких виробів. Комбінація робочих валків і опорних валків у сильному контакті один з одним створює можливість того, що дуже невеликі відхилення від ідеальної округлості, які були б прийнятними для будь-якого окремого валку, можуть призвести до неприйнятної відхилення для всього стосу.

Крім того, невелика прийнятна кількість «пропуску» в підшипниках, які підтримують кожен ролик, також може призвести до неприйнятних відхилень від ідеального обертання, оскільки задіяно більше роликів (і більше підшипників). Таким чином, шліфування валків і підшипники валків повинні бути достатньо точними, щоб підтримувати «ексцентриситет» (відхилення від центру) усього пакету валків, як єдиного цілого, у межах, необхідних для точної гладкої товщини продукту.

Діаметри рулонів мають бути з точністю до 2,5 десятитисячних дюйма (0,006 мм). Загальний ексцентриситет стека може бути в межах 4 десятитисячних дюйма (0,01 мм) або менше. У термінах прокатки алюмінію «гарячий» і «холодний» мають більше технічних визначень, ніж їхнє загальне значення. «Гаряча» прокатка означає прокатку при досить високій температурі металу, щоб уникнути деформаційного зміцнення (деформаційного зміцнення) під час деформації металу.

«Холодна» прокатка означає прокатку металу при досить низькій температурі, щоб відбулося деформаційне зміцнення, навіть якщо сплав

відчуває себе гарячим. На практиці температура гарячої прокатки може настільки знизитися під час прокатки, що дозволить відбутися деформаційне зміцнення. Звичайно, для прокатки холодного металу потрібно більше енергії, ніж для металу, розм'якшеного при досить високій температурі.

Холодна прокатка може забезпечити більш гладку кінцеву поверхню та інший стан, ніж гаряча прокатка. Найтонші вироби підлягають холодному прокату до кінцевої товщини. Гарячі стани зараз прокатують лист зі швидкістю, що наближається до 2000 футів за хвилину (600 м/хв). Млин холодної прокатки може прокатувати лист зі швидкістю до 7000 футів на хвилину (2135 м/хв) або більше.

Гаряча прокатка має принаймні два важливі металургійні ефекти:

1. Вона зварює пори, залишені в результаті лиття, утворюючи щільніший і міцніший метал.

2. Він розщеплює та розподіляє тверді складові заліза та кремнію, які утворилися на межі зерен. Ця дія перетворює крихкий литий сплав у пластичний деформований сплав, оскільки фрагментовані та розподілені складові створюють менший опір внутрішньому потоку металу, необхідному для пластичності.

Графік скорочення або зменшення за один прохід і спрямованість прокатки має дуже важливий вплив на деякі характеристики пошкодження високоміцних авіаційних сплавів. Температура прокатки також впливає на зовнішній вигляд і структуру кінцевого продукту. Нижчі температури гарячої прокатки дають відносно яскравіші поверхні продукту та подовжені зерна сплаву, тоді як вищі температури гарячої прокатки можуть викликати рекристалізацію в металі. Температура прокатки вибирається відповідно до властивостей продукту, яких необхідно досягти. Занадто висока температура може послабити межі зерен і викликати розтріскування меж.

Отже, температура прокатки підтримується на 20–90°F (від 10 до 50°C) нижче певної межі — «солідусу» або температури затвердіння — кожного

сплаву. Холодна прокатка – металургійні ефекти. На атомарному рівні тверді метали мають структуру «кристалічної решітки»: його атоми розташовані за регулярним шаблоном, який в ідеалі можна розглядати як стопку плоских площин.

Коли метал деформується, як це відбувається при плоскому прокатуванні, області кристала «ковзають» одна повз одну вздовж цих «площин ковзання»; такі «лінії ковзання» іноді видно на поверхні металу. Площини решітки ніколи не бувають ідеальними. У них є розриви та зсуви, які називаються «дислокаціями», які мають тенденцію блокувати ковзання та таким чином протистояти деформації.

Прокатка або інша холодна деформація має тенденцію ламати та зміщувати площини решітки, тим самим збільшуючи кількість дислокацій, які протистоять силі, і роблячи метал міцнішим і твердішим. Цей ефект навмисно викликаний як «~ зміцнення» (деформаційне зміцнення) для зміцнення виробів з алюмінієвих сплавів. Різноманітні застосування деформаційного зміцнення включені в «Н-відпуск» і деякі з «Т-відпуску» алюмінію.

Такий же ефект зміцнення може виникнути передчасно, до завершення прокатки; небажано, якщо замовляється м'який виріб. У таких випадках проводиться відпал, щоб скасувати наклеп, який стався. Деформаційне зміцнення має природну межу для кожного сплаву, оскільки воно фактично напружує сплав до його межі міцності.

Кількість дислокацій, які може розвинути кристалічна решітка, обмежена, а отже, і її максимальна міцність. Зі збільшенням наклепу метал може витримувати зростаючу силу без руйнування; але він зберігає менший резерв проти додаткової сили. Метал, підданий холодній обробці до максимальної межі, може бути зламаний лише незначною додатковою деформацією.

Таким чином, холодна обробка або деформаційне зміцнення застосовується до ступеня, необхідного специфікаціями продукту, що передбачає компроміс між максимальною міцністю та максимальною пластичністю. Тепло відпалу знімає спотворену структуру решітки, що зміщується, і дозволяє їй знову реформуватися у відносно незміщених площинах, відновлюючи пластичність за рахунок набутої міцності.

3 КОНСТРУКТОРСЬКА ЧАСТИНА

3.1 Технічні характеристики стану, який підлягав автоматизації

Холодна прокатка алюмінію - це процес прокатки для зменшення товщини з подальшою метою покращення міцності, якості поверхні та формованості заготовки шляхом проведення процесу прокатки при кімнатній температурі [1].

Алюмінієві сплави можна прокатувати холодним способом до товщини приблизно 0,05 мм. Чистий (низьколегований) алюміній можна холодно прокатувати у фольгу товщиною 0,0025 мм. Смугу, призначену для холодної прокатки до товщини приблизно до 1 мм, зазвичай гаряче прокатують приблизно до 3-6 мм перед початком холодної прокатки.

Під якістю в цій галузі розуміють матеріал, який має однакові властивості по всій довжині та ширині: однакову товщину, відсутність внутрішнього напруження (хороша площинність), якість поверхні [2] тощо.

Під час прокатки стан піддається порушенням, які впливають на товщину, форму та натяг продукту. Перший з них – це зміна товщини вхідної смуги. Вхідна смуга попередньо пройшла гарячу прокатку та має деяку схему зміни товщини, характерну для гарячого стану.

По-друге, млин нарізається на низькій швидкості та прискорюється до робочої швидкості після намотування головного кінця катушки на мотальну машину. Подібний процес уповільнення спостерігається при битті на кінці катушки. Добре відомо, що тертя між робочими валками (WR) і смугою змінюється, коли швидкість прокатки збільшується від швидкості нитки до швидкості обертання, спричиняючи зміни сили валка та подальші порушення калібру та натягу [3].

Зі збільшенням робочого зміцнення потрібно більше енергії, щоб прокатувати лист тонше. Понад певний ступінь твердості метал може тріснути, якщо його знову прокатувати [4].

Це накладає практичні обмеження на ступінь зменшення товщини холоднокатаного прокату, якого можна досягти за безперервну серію проходів. Якщо необхідне подальше зменшення товщини, лист необхідно відпалити, як описано вище, щоб розм'якшити метал для подальшої холодної прокатки.

У роботі увага зосереджена на контролі калібру або товщини смуги, форми та натягу під час холодної прокатки плоскостанової алюмінієвої смуги за наявності збурень, які повторюються від рулона до бобіни.

На рис. 3.1 показано основні компоненти алюмінієвого одноклітинного стану холодної прокатки з 4 висотами, а також представлено деякі терміни, які використовуються в решті цієї роботи.

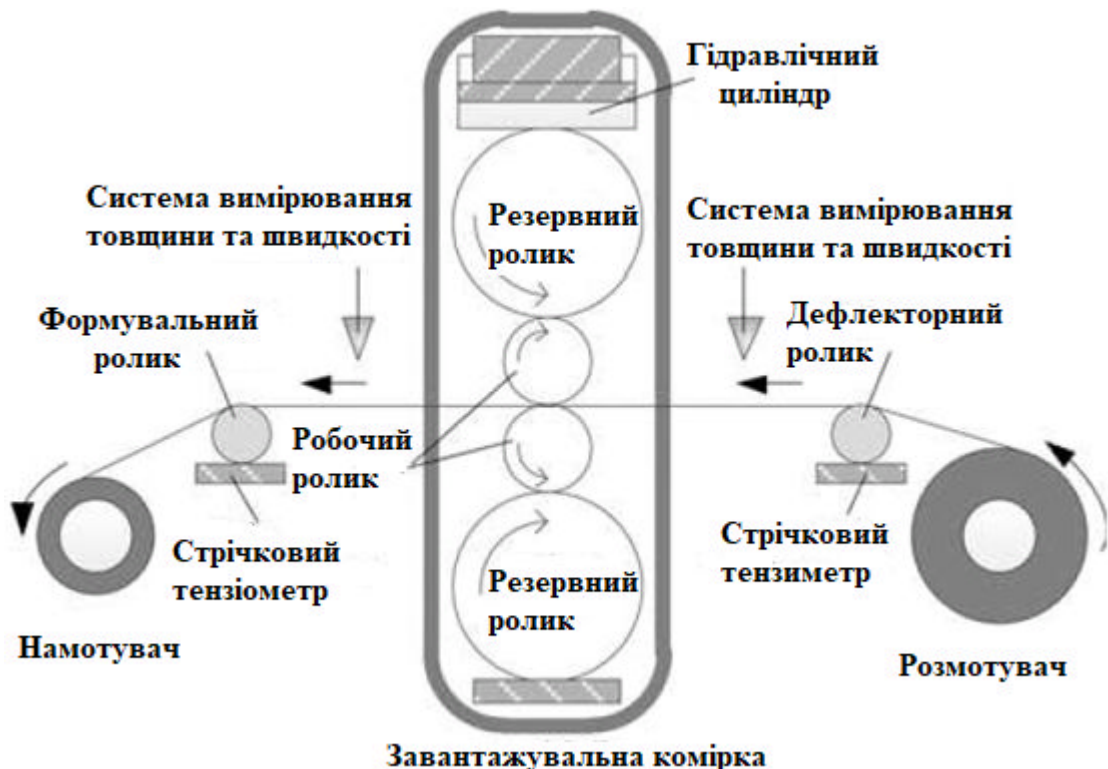


Рис. 3.1. Структура стану холодної прокатки алюмінію

Основні технічні характеристики стану наведені в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Технічні характеристики стану для холодної прокатки алюмінію

Назва	Значення
тип млина	одностійковий 4-висотний холодний прокатний стан
тип моталки	консольна піраміда
максимальна швидкість млина, м/хв	1500
максимальне зусилля розкатки, кН	16 000
максимальна вага катушки, кг	20000
максимальний зовнішній діаметр катушки, мм	2500
діапазон згинальних зусиль, кН	-350~500
Діаметр WR (робочого валка), мм	370–400
Діаметр BUR(заднього валка), мм	1110–1150
ширина вхідної смуги, мм	830–1700
товщина вхідної смуги, мм	2–10
навантажувальна товщина, мм	0,2–4,0

Точність по товщині та точність форми є двома найважливішими показниками якості в процесі прокатки смуги [5, 6].

Під час прокатки металів, особливо остаточної холодної прокатки листових матеріалів, зміна товщини по довжині, а також площинність по ширині смуги повинні контролюватися в межах дуже жорстких допусків [7].

3.2. Конфігурація системи

Згідно з нашим попереднім інженерним досвідом, характеристики процесу холодної прокатки алюмінію та тенденції розвитку комп'ютерної системи керування слід враховувати при проектуванні структури комп'ютерної системи, щоб зробити систему передовою, надійною, простою та розумною.

Конструкція системи керування станом холодної прокатки дотримується принципу «високошвидкісного керування, високошвидкісного зв'язку характеристик розтягування стану». В останні роки, завдяки розвитку комп'ютерних технологій і гідравлічних сервотехнологій, цикли керування замкнутими гідравлічними системами скоротилися зі 100 до 10 мс, а деякі з них навіть < 2 мс.

Через взаємодію між функціями холодної прокатки швидкість оновлення даних зв'язку між контролерами становить < 1 мс. На основі параметрів обладнання та схеми процесу ми розробили апаратну та програмну конфігурацію системи автоматизованого керування виробничою лінією.

Система автоматизації використовує 3-рівневий комп'ютерний контроль, який включає виконавчі механізми та датчики (рівень 0), базовий рівень автоматизації (рівень 1) і рівень автоматизації процесів (рівень 2), щоб реалізувати відстеження мережевих даних, налаштування динамічної адаптивної процедури кочення, модель самонавчання та автоматичний контроль усього процесу прокатки.

Структура стану холодної прокатки алюмінію показана на рис. 3.2 та 3.3. Архітектура автоматизації стану холодної прокатки включає наступні три рівні [12]:

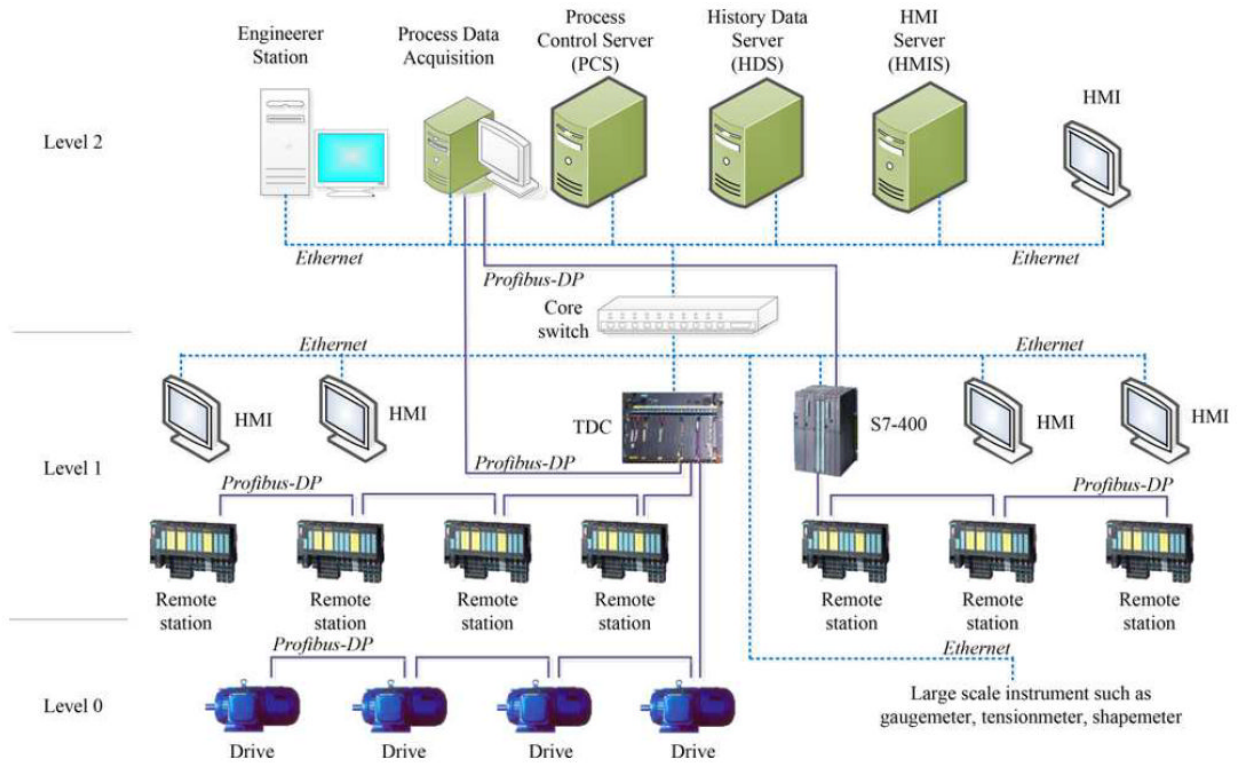


Рис. 3.2. Структура стану холодної прокатки алюмінію

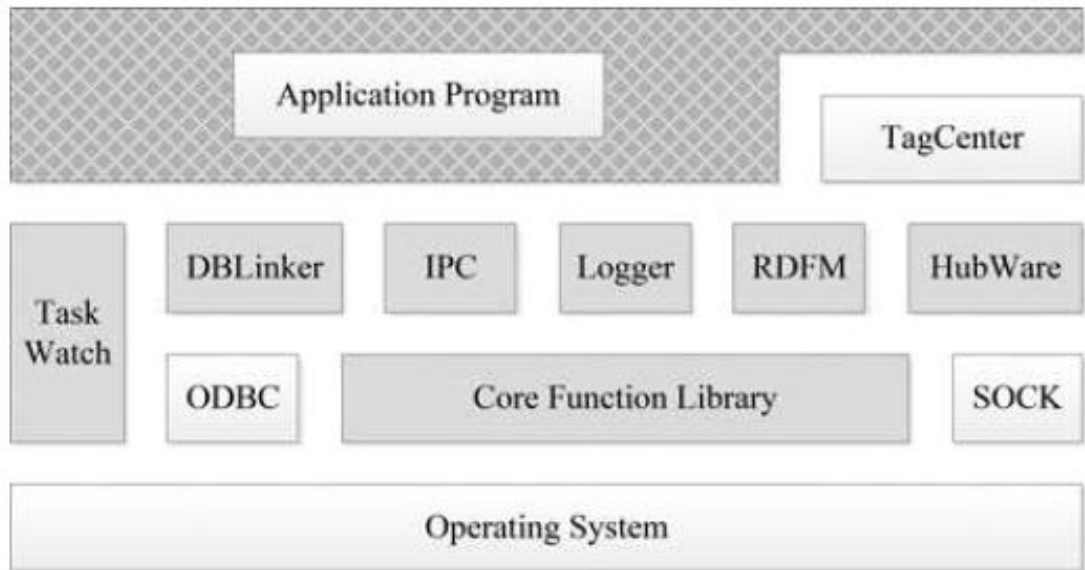


Рис. 3.3. Системна архітектура керування зв'язком PCDP

Рівень 2: згідно зі специфікаціями даних котушки на вході та виході, цей рівень є відповідальним для пошуку найкращої установки млина для забезпечення високої якості та продуктивності. На основі статичних моделей

цей рівень включає процедуру оптимізації налаштування та адаптивний цикл, який покращує специфікацію налаштування для кожної нової котушки.

Рівень 1: Відповідно до опорних сигналів рівня 2 і вимірних сигналів процесу, на цьому рівні генеруються відповідні керуючі сигнали для приводів. Цей рівень включає динамічну модель і головну логіку млина. Крім того, він записує змінні процесу, необхідні для адаптивних функцій рівня 2.

Рівень 0: Цей рівень включає датчики, моторні приводи та гідравлічні приводи для контролю зазору.

3.3. Система автоматизації процесу

Структура програмного забезпечення.

Операційна система та прикладне програмне забезпечення використовують складні та загальні комерційні продукти. Проміжне програмне забезпечення є основним програмним забезпеченням для підтримки системи автоматизації процесів або платформи розробки прикладного програмного забезпечення та робочого середовища. Його головна роль полягає в тому, щоб захистити відмінності між апаратною платформою та операційною системою, а також складність основної операційної системи, зробити розробників додатків простим і уніфікованим середовищем розробки та зменшити складність розробки та обслуговування прикладного програмного забезпечення для автоматизації процесів.

У цьому проекті використовується наша незалежно розроблена платформа розробки керування процесами проміжного програмного забезпечення (PCDP), системна архітектура якої показана на рис. 5, де підключення до відкритої бази даних (ODBC) є скороченням від підключення до відкритої бази даних; керування файлами даних у реальному часі (RDFM), міжпроцесний зв'язок (IPC), HubWare, Logger, DBLinker, TagCenter і TaskWatch вказують на керування файлами даних у реальному часі,

керування міжпроцесним зв'язком, зовнішнє керування журналом тривоги, керування підключенням до бази даних, керування тегами інтерфейсу людина–машина (HMI) та керування системними процесами відповідно.

Як дуже складна програмна система, система управління рівня 2 повинна бути реалізована різними рівнями, різними функціями багатьох завдань. Зазвичай воно поділяється на проміжне програмне забезпечення, прикладну програму, операційну систему та системне програмне забезпечення, які показано на рис. 3.4.

Прикладне програмне забезпечення може реалізувати вільне поєднання відповідно до конфігурації виробничого обладнання та функцій, і може бути окремо модернізовано та частково реформовано, що забезпечує велику зручність та простір для подальшого розширення та оновлення системи.

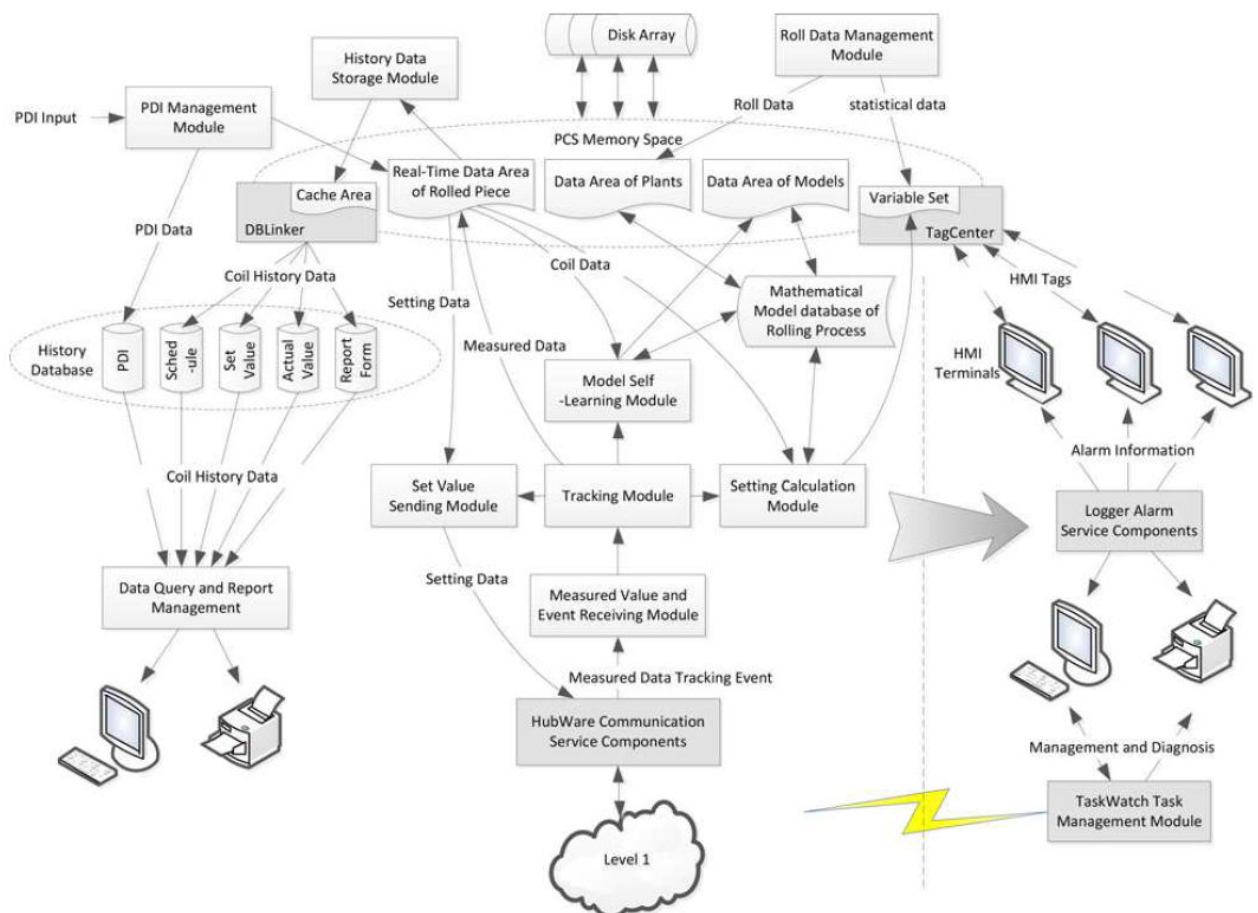


Рис. 3.4. Структурна схема прикладного програмного забезпечення

3.4. Функції керування.

Система керування процесом — це комплексна програмна система, що включає стратегію переміщення, розрахунок заданого значення, збір вихідних даних, вихід заданого значення, самоадаптацію та самонавчання математичних моделей. Це одна з найважливіших частин системи автоматичного керування.

На рис. 3.5 показано керування процесом прокатки.

Керування може бути організовано відповідно до таких функцій:

- Первинні дані та керування графіком прокатки: відповідно до виробничого плану оператор вводить і редагує первинні дані алюмінієвої котушки в екран НМІ, а потім зберігає дані у відповідній системі керування базою даних. Інформація про основні первинні дані (PDI) включає поточний номер рулону, номер рулону, що надходить, товщину, ширину, вагу, довжину, діаметр рулону, склад матеріалу, товщину при подачі тощо.
- Дані про прокату відстеження: метою відстеження є визначення фактичного положення та стану прокату на виробничій лінії, щоб запуснути відповідні програми в обумовлений час для виконання інших функцій керування процесом. Функція відстеження Рівня 2 базується на результатах відстеження, надісланих з Рівня 1.

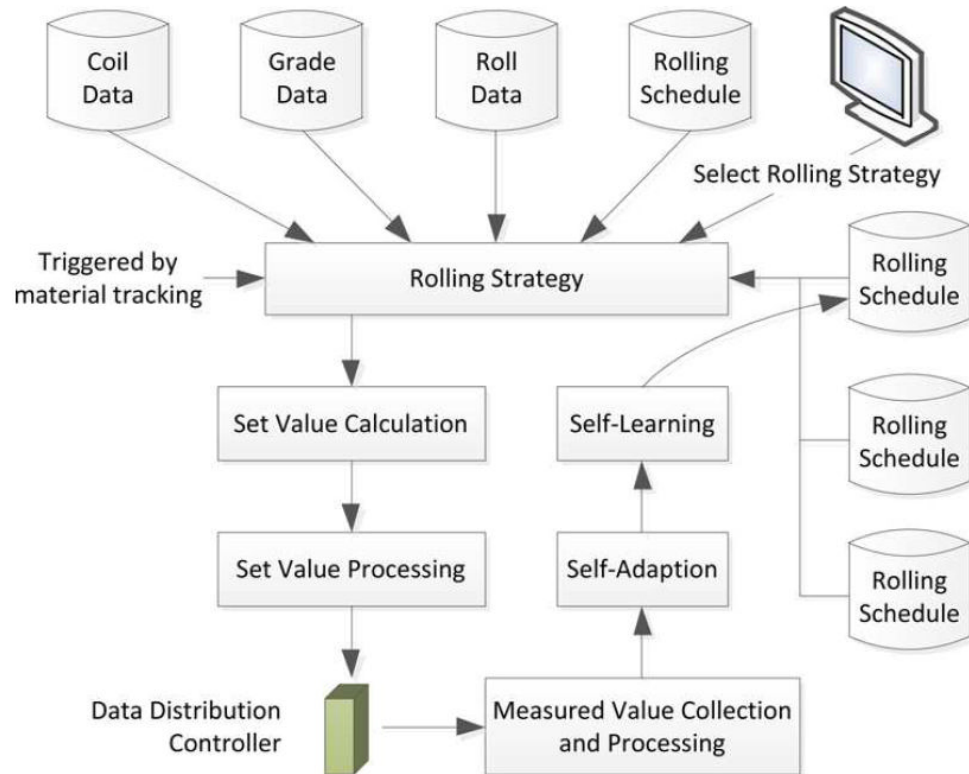


Рис. 3.5. Функціональна схема системи керування

- Розрахунок налаштувань постійних параметрів: функція розрахунку налаштувань постійних параметрів є основною функцією системи керування процесом, а також передумовою та основою комп'ютерного керування. Модель контролю налаштувань складається з двох частин: моделі рухомої стратегії та моделі розрахунку налаштувань.

- Самоадаптація та самонавчання математичних моделей: значення параметра керування процесом є початковою точкою автоматичного контролю калібру (AGC) і автоматичного контролю форми (ASC). Точність значення налаштування безпосередньо впливає на ефективність і ефект контролю товщини та форми. Щоб підвищити точність заданого значення, математична модель модифікується вимірними даними, щоб

постійно адаптуватися до еволюції обладнання та середовища з часом.

- Керування зовнішнім зв'язком: Модуль передачі даних в основному призначений для збору та обробки виміряного значення з Рівня 1, а також для надсилання встановленого значення на Рівень 1, коли розрахунок закінчено. Сервер управління процесом безпосередньо обмінюється даними з технологією управління приводом (TDC) і S7-400 рівня 1 через компонент HubWare проміжного програмного забезпечення PCDP.

- Керування НМІ: Екран НМІ поділяється на два типи: екран дисплея та екран введення. Інформація про керування процесом доступна на екрані дисплея. Необхідні дані та команди вводяться в комп'ютер через екран введення або клавіатуру. Модуль керування НМІ викликає компоненти HubWare проміжного програмного забезпечення PCDP до функції програмного інтерфейсу після завершення обчислення налаштувань і відображає встановлене значення на терміналах НМІ. Крім того, він відстежує дії НМІ, щоб запустити відповідну програму у відповідь на різні команди керування оператора.

3.5. Базова система автоматизації

Контролери та комунікації.

Сімейство програмованих логічних контролерів (PLC) Siemens SIMATIC складається з кількох типів ліній масштабованих центральних процесорів (CPU). Залежно від типу та швидкості контуру керування

користувач може вибрати оптимальний ПЛК, необхідний для його застосування.

Як показано на рис. 3.6, SIMATIC TDC і S7-400 прийняті як контролери базової системи автоматизації. SIMATIC TDC вирішує навіть складні завдання приводу, керування та технології з максимальною кількістю і найкоротшим часом циклу на одній платформі.



Рис. 3.6. Контролери базової системи автоматизації SIMATIC TDC та SIMATIC S7-400

Система використовується особливо для великих установок у технологічних процесах, енергетичних і приводних техніках. Потужні процесорні модулі SIMATIC TDC дозволяють обробляти максимальну кількість кадрів за короткий час циклу до 100 мкс. Розробка навіть складних керуючих структур здійснюється ефективно за допомогою безперервної функціональної схеми (CFC) і послідовної функціональної схеми (SFC) стандартних мов SIMATIC, а також великої бібліотеки функціональних блоків. Користувач отримує максимальну гнучкість, створюючи власні бібліотеки користувача на основі коду ANSIC.

S7-400 - програмований логічний контролер. Майже будь-яке завдання автоматизації можна реалізувати за допомогою відповідного вибору компонентів S7-400. Модулі S7-400 мають блочну конструкцію для поворотного монтажу в стійку. Для розширення системи доступні стійки

розширення. Структура топології мережі приймає ієрархічний дизайн, який повністю враховує характеристики потоку інформації та потоку даних у виробництві холодного прокату.

Зв'язок між контролерами, серверами, НМІ, великими приладами та іншими комп'ютерами покладається на промислову Ethernet. Оптичний кабель використовується для тривалого дистанційного зв'язку за допомогою кабелю крученої пари на короткі відстані. Profibus — це формат обміну повідомленнями, спеціально розроблений для високошвидкісного послідовного введення/виведення (I/O) у програмах автоматизації фабрик і будівель.

Це відкритий стандарт і визнано найшвидшою польовою шиною, що працює сьогодні. Впровадивши мережеву шину між основним контролером (master) і його каналами вводу/виводу (slave), ми децентралізували введення/виведення, що можна побачити на рис. 4, де TDC і S7-400 служать майстрами Profibus, віддалені станції вводу/виводу та контролери приводів служать підлеглими мережами Profibus. Кожен підлеглий обробляє інформацію та надсилає вихідні дані своєму головному.

Функції керування.

Основна система автоматизації реалізує логічне керування, керування послідовністю та важливі функції технологічного керування, а також контролює стан роботи обладнання. Це забезпечує високоавтоматизовану роботу та контроль процесу та безпосередньо впливає на якість та вихід всієї лінії [19].

1. Регулювання гідравлічного зазору (HGC): Положення циліндра контролюється регулятором положення із замкнутим циклом, який автоматично регулює опорний потік для гідравлічного сервоклапана. Існують окремі регулятори положення оператора та приводу. Сторони оператора та сторони приводу поєднані програмним керуванням, яке підтримує рівень між двома сторонами коли обидві сторони рухаються разом. Кожна сторона має

блокувальні клапани, які можуть зупинити рух циліндра, і випускний клапан, який може скинути тиск у циліндрі. Гідравлічні циліндри встановлюють лінію проходу та змінюють відкриття зазору під час прокатки, щоб зберегти товщину смуги.

2. Обнулення млина: для обнулення проміжок валків закривається за допомогою гідравлічних капсул. Фактичне значення зазору встановлюється на певне значення при заданій силі крену. Під час процедури обнулення млина HGC працює в режимі керування зусиллям валків, щоб вирівняти зазор між валками.

Програма калібрування — це кроковий контролер, який створює технологічне середовище для обнулення та калібрування лічильників положення та нахилу. Базова послідовність калібрування завжди необхідна, якщо немає зв'язку між лічильником і положенням підставки. Це може статися, коли втрачається підрахунок (перезапуск керування загвинчуванням, збій живлення, збій датчика положення та збій лічильника) або коли змінилися робочі умови (зміна рулону, регулювання положення лінії проходу).

3. AGC (автоматичний вимірювальний контроль): Під час процесу прокатки відхилення товщини або зміна твердості в матеріалі вхідної смуги спричиняє трансформацію сили прокату, яка, зі свого боку, спричиняє трансформацію в подовженні кліті та, таким чином, відхилення від цільової товщини смуги. Це перетворення використовується в системі керування зусиллям крену шляхом порівняння перетворення з цільовим значенням зусилля крену. Ці відхилення сили крену коригуються на основі принципу габарита. Це призводить до збереження зазору між валками і, отже, товщини матеріалу незмінними. Як показано на рис. 3.7, AGC корекція розглядається HGC як додатковий еталон позиції.

4. ASC (автоматичний контроль форми): з 4-високим станом сила реакції прокатки призводить до прогину BUR і WR, сплющення WR та інших

проблем в процесі прокатування. Це призводить до нерівномірності товщини смуги рулонного матеріалу та проблем із формою, як показано на рис. 3.8.

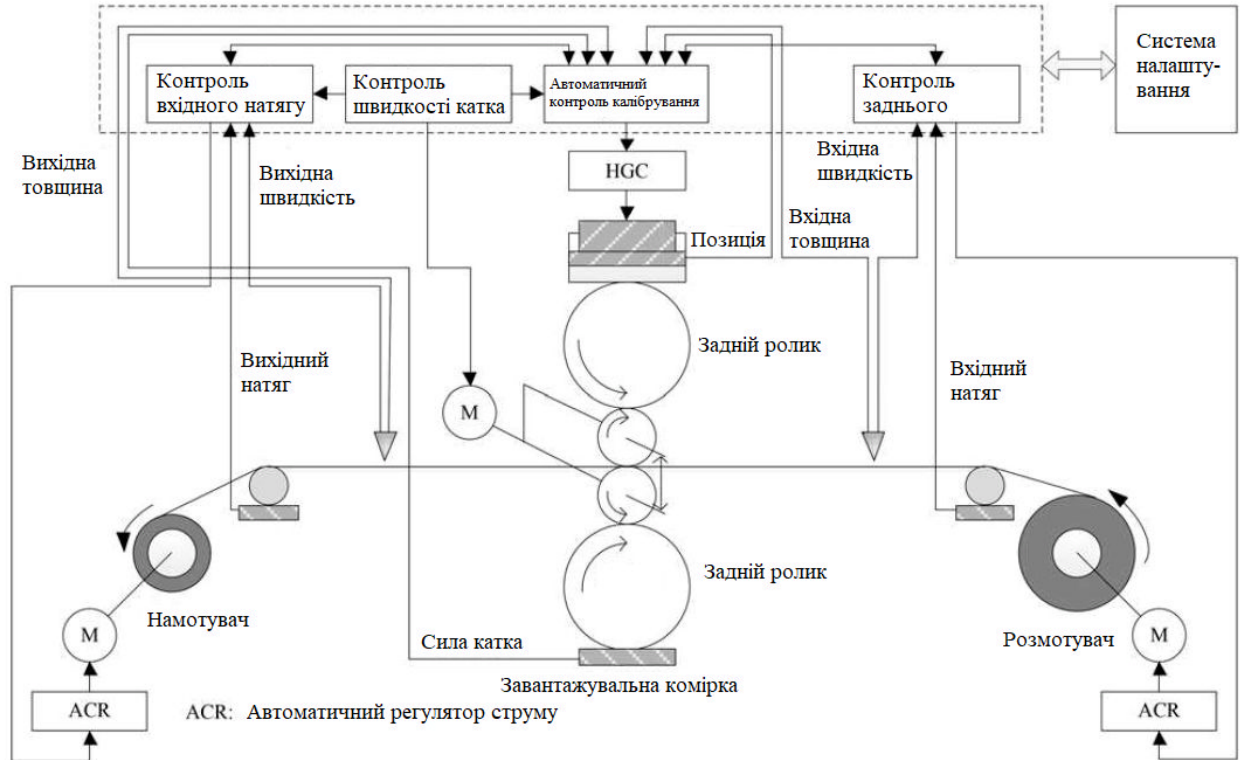


Рис. 3.7. Схема автоматичного вимірювального контролю.

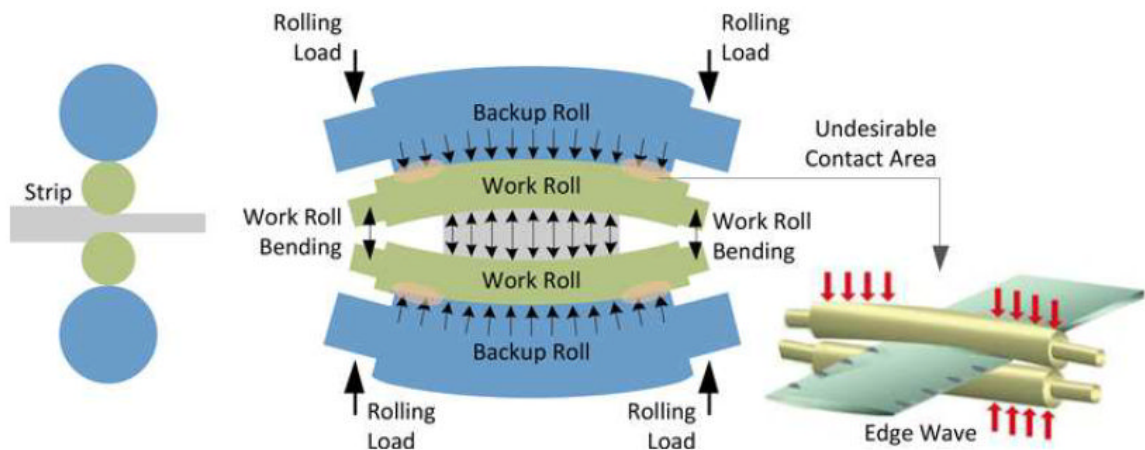


Рис. 3.8. Профіль зазору під час прокатування

Особливо на голові смуги та в кінці смуги виникають високі градієнти змін сили рулону. Для покращення результату керування при зміні сили крену модель процесу враховує цю змінну збурення, а виконавчі механізми

форми керуються пілотом. Операційна модель розраховує керовані змінні для приводів форми з урахуванням правил, зазначених у моделі процесу, і існуючих змінних збурень. Розрахунок маніпуляційних змінних здійснюється шляхом мінімізації дефекту форми за допомогою методу квадрата помилки.

Тут враховуються різні динамічні поведінки окремих приводів таким чином, щоб уникнути небезпечного розподілу натягу смуги під час керування. Після розрахунку виконавчі команди виводяться на формувальні приводи кліті. Виконуючими командами є згинання валка, нахил валка та охолодження валка.

Автоматичний контроль натягу (АТС): Натяг головним чином відіграє наступні ролі в холодній прокатці алюмінію:

- запобігає бічному руху;
- покращення площинності смуги;
- зменшення сили кочення;
- правильне регулювання товщини смуги [20, 21].

Натяг безпосередньо впливає на точність товщини, точність форми та якість поверхні виробу, додатково впливає на швидкість прокатки, і її необхідно ефективно контролювати для швидшої та кращої прокатки. АТС використовує комбінований режим керування натягом, який є комбінацією прямих і непрямих петель натягу.

Пряма петля натягу використовує вимірний натяг як зворотний зв'язок і уникає впливу зміни діаметра котушки, зміни швидкості кочення, крутного моменту без навантаження, але його контрольний ефект слабкий на низькій швидкості. Петля непрямих петель натягу використовує натяг, розрахований за крутним моментом і діаметром котушки. Його контрольний ефект вищий, ніж пряма петля натягу на низькій швидкості.

Цей комбінований метод має такі переваги, як швидка реакція, хороша стабільність непрямих петель натягу, висока точність і відсутність постійної похибки прямих петель натягу.

4. НАУКОВО-ДОСЛІДНА ЧАСТИНА

4.1 Основні залежності, які використовувались для забезпечення автоматизованого контролю

Рівняння сили.

Відома модель Сімса широко представлена в літературі як корисна для розробки керування [8].

У моделі Сімса питома сила крену представлена

$$P = Wkk_tQ_pL, \quad (4.1)$$

де W — ширина смуги;

k — опір деформації;

k_t — ефект натягу;

Q_p — функція сили крену;

L — прогнозована довжина контакту.

Посилаючись на рис. 4.1, який приблизно представляє смугу в зоні валкового укусу, вхідна смуга має товщину H на своїй центральній лінії та рухається до валкового укусу зі швидкістю v_{in} . Стрічка виходить із захвату рулону товщиною h по центральній лінії та зі швидкістю v_{out} [9–11].

Прогнозована довжина контакту виражається як

$$L = \sqrt{R'(H - h)} \quad (4.2)$$

Сплюснутий, але все ще круглий радіус валків, який можна отримати зі співвідношення Хічкока [12]

$$R' = R \left[1 + \frac{16(1 - \nu)^2}{\pi E(H - h)} \right] \quad (4.3)$$

де R — вихідний радіус WR ,

ν і E — коефіцієнт Пуассона та модуль Юнга для WR відповідно.

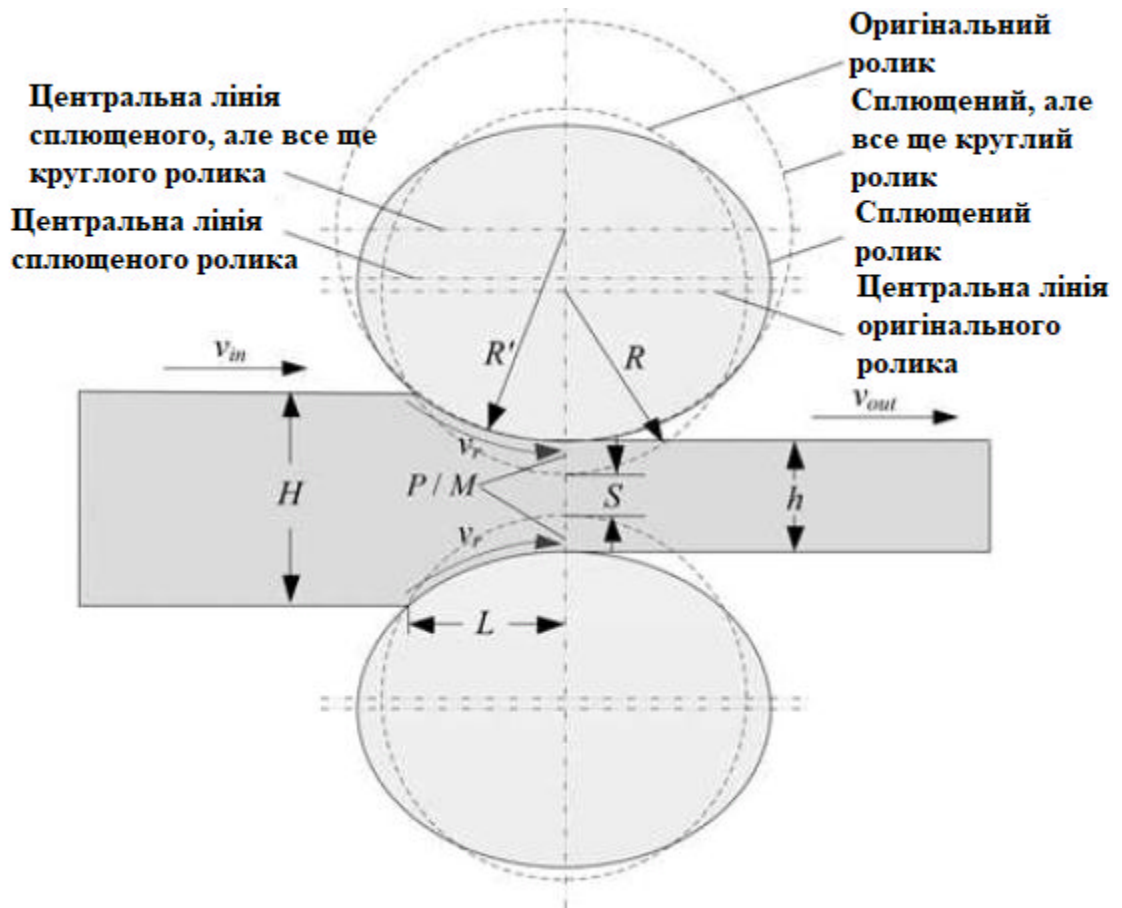


Рис. 4.1. Область перекусу при розкатуванні

Рівняння каліброметра.

Типовим і основним завданням моделювання є те, що пов'язане з налаштуванням зазорів між валками в стані. Оскільки велика деформаційна сила P , необхідна для зменшення товщини смуги від товщини на вході H до товщини на виході h , призводить до того, що рама кліти, що утримує валки, розтягується, а прокатні валки згинаються та сплющуються.

Результатом є товщина на виході як функція сили P .

У спрощеній формі це можна виразити як [13]

$$h = S + f(P), \quad (4.4)$$

де S — зазор без навантаження;

$f(P)$ — розтягнення стану.

Як показано на рис. 4.1, зазвичай використовувана спрощена модель товщини рівняння каліметра або рівняння пружини має наступний вигляд [14]

$$h = S + \frac{P}{M}, \quad (4.5)$$

де M — модуль пружності або коефіцієнт жорсткості;

P/M — приблизне значення розтягування.

Величина, яку млин розтягує, насправді не є лінійною, як це запропоновано у наведеному вище рівнянні вимірювача. Величина розтягування є комбінацією розтягування в корпусі млина та прогину в пакеті валків. Розтягнення корпусу млина зазвичай є нелінійним при низьких зусиллях і стає майже лінійним із зусиллям при високих зусиллях.

Прогинання стосу валків включає згинання шийок валків і сплющування валків у точці контакту зі смугою та між опорним валком (BUR) і WR. Типовим є відхилення стека яке лінійно залежить від сили, але значно змінюється зі зміною ширини смуги.

На рис. 4.2 зроблено спробу показати залежність між положенням зазору, розтягуванням стану та товщиною смуги [14].

Рівняння прямого ковзання.

Пряме ковзання є результатом різниці між швидкістю вихідної смуги та швидкістю WR [15] і визначається так

$$f = \frac{v_{\text{out}} - v_r}{v_r}, \quad (4.6)$$

де v_{out} є швидкістю вихідної смуги;

v_r є швидкістю WR.

Якщо швидкість смуги на виході неможливо виміряти безпосередньо, ковзання вперед можна отримати шляхом вимірювання натягу та товщини смуги [16]. Більш корисною моделлю є модель, описана Фордом та ін. в [17].

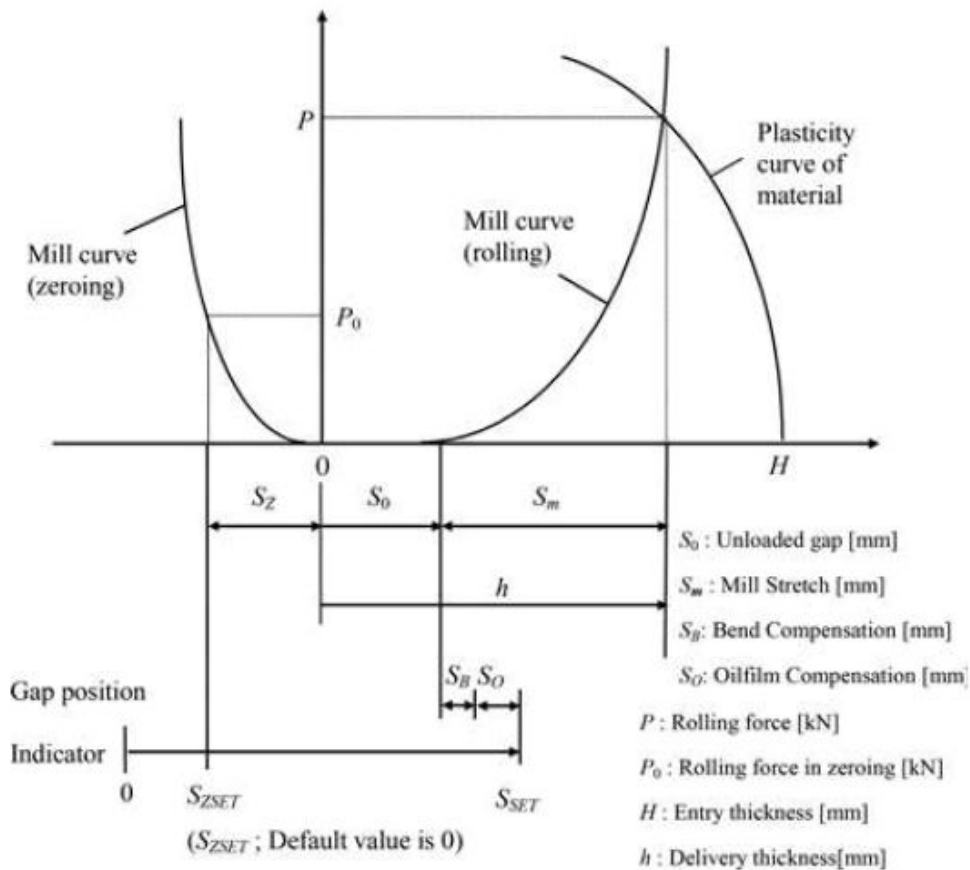


Рис. 4.2. Характеристики розтягування фрези

У цій моделі, яка часто застосовується для холодних станів і використовується в роботі, описаній у цій статті, ковзання вперед виражається як

$$f = \frac{R'}{h} \beta_n^2, \quad (4.7)$$

де σ_{in} і σ_{out} – напруги розтягування стрічки на вході та виході відповідно;

μ – коефіцієнт тертя.

І далі

$$\beta_n = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{H-h}{R'}} - \frac{(H-h)k + \sigma_{in}H - \sigma_{out}h}{4kR'\mu} \quad (4.8)$$

У випадку холодної прокатки μ приймається як коефіцієнт тертя ковзання. У випадку гарячої прокатки μ береться як коефіцієнт тертя прилипання, який апроксимується емпіричним співвідношенням, наведеним у Робертса [18]

$$\mu = 0.00027T_F - 0.08, \quad (4.9)$$

де T_F є температурою смуги в градусах Фаренгейта.

Ефективність 3-рівневої концепції контролю була перевірена для забезпечення якості продукту та досягнення очікуваної мети проектування.

Цей успіх був результатом не одного фактора, а ретельної координації загальної комп'ютерної системи управління. Це включало точну модель контролю налаштувань, добре розроблені стратегії керування, реалізацію структурованого дизайну, простий і практичний робочий екран, точне калібрування моделювання стану перед прокаткою, а також наявність повністю перевірених інструментів інженерного аналізу для першого дня прокатки.

Система швидко була введена в дію, і в результаті цих зусиль вона продовжує користуватися дуже стабільною високою продуктивністю. На рис. 4.3 показано холоднокатані алюмінієві рулони, виготовлені виробничою лінією, яка контролюється комп'ютерною системою керування. Гарантоване значення точності товщини системи автоматизації показано в таблиці 4.1, а гарантований допуск точності площинності (2σ) становить $10I$. На основі розрахунку налаштування на рівні 2 і з AGC, ASC і ATC на рівні 1 можна гарантувати точність товщини та площинності холодної алюмінієвої стрічки.



Рис. 11. Алюмінієві рулони холодної прокатки.

Таблиця 2 – Гарантоване значення точності товщини.

	Діапазон товщини виробу, mm	Допуск по товщині (2σ), μm
Точність товщини	1	2
	$0.1 \leq h \leq 0.2$	± 2
	$0.2 < h \leq 0.4$	± 3
	$0.4 < h \leq 0.6$	± 5
	$0.6 < h \leq 1.0$	± 6
	$1.0 < h \leq 2.0$	± 8
	$2.0 < h$	± 12

5. СПЕЦІАЛЬНА ЧАСТИНА

5.1 Базові механіки процесів прокатування

Застосування холоднокатаної алюмінієвої смуги традиційно було у виробництві банок для напоїв, упаковці харчових продуктів, будівництві та автомобільній промисловості. Тенденції включають прокат більш широких смуг до 2000 мм і зменшення ширини від 0,35 мм і 0,30 мм до 0,25 мм. Також було передбачено зменшення товщини та допусків на форму.

На рис. 5.1 представлені різні типи станів холодної прокатки, які пропонує один виробник. Вибір млина залежить від необхідної продуктивності, сплаву, стану та вимог до обробки матеріалу. Найбільш звичайним підходом було б розпочати з крупнокаліберних станів холодної прокатки 6 або 4 (2.1 або 2.2 на рис. 5.1). Кажуть, що вони пропонують гнучкість, щоб охопити повний спектр сплавів у широкому діапазоні калібру від 14 до 0,3 мм. Потужність цих млинів може досягати 100 000 тонн на рік. Якщо потрібна ще більша продуктивність, рекомендується безперервна лінія холодної прокатки, на якій використовується дво- чи триклітєвий тандемний стан.

Вони можуть бути використані для великосерійного виробництва обмеженої номенклатури продукції. Потужність такої лінії становитиме близько 300 тис. тонн на рік. Стани-тандеми для прокатки сталевих смуг зазвичай містять більше клітей залежно від обсягу виробництва. Часто стани холодної прокатки сталевих смуг можуть містити до шести клітей. Останньою стійкою може бути навіть 6-високий млин.

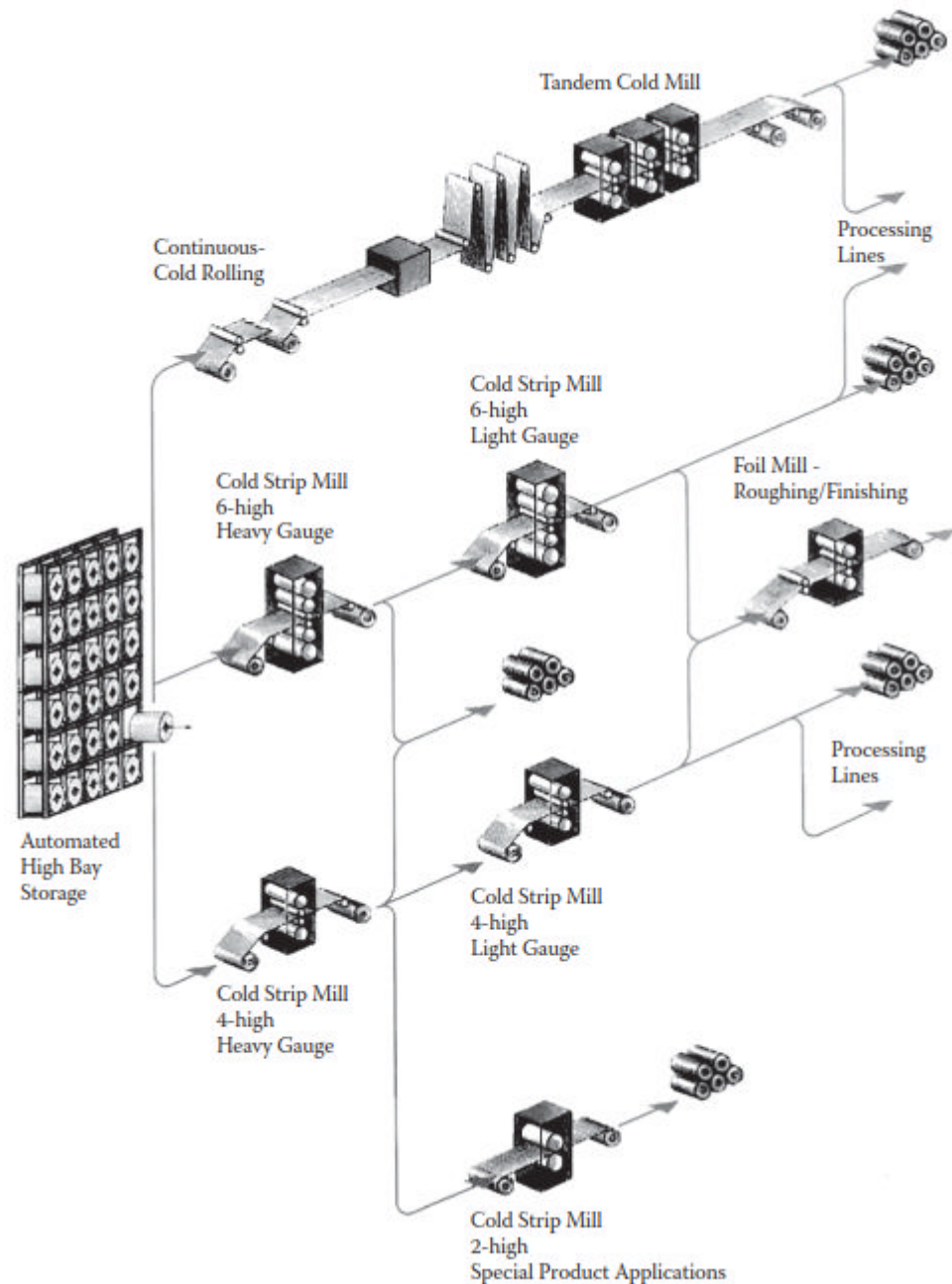


Рис. 7 Стани холодної прокатки для алюмінієвих сплавів.

Для подальшої переробки після стану великого калібру використовуються смугові стани легкого калібру. Вони можуть мати 6- або 4-висотний дизайн. Їх можна використовувати для згортання калібрів до 0,02 мм. Зокрема, млин 6-го типу зі зміщенням проміжних валків може бути використаний для чорнкової обробки фольги. Потужності складають близько 30 000 тонн на рік. Нарешті, для спеціальних застосувань, таких як

полірувальна прокатка матеріалу з яскравою фінішною поверхнею, можна використовувати двохвисокий стан з обмеженим скороченням при низькій швидкості пропускання.

Подальша переробка до алюмінієвої фольги може бути виконана на спеціальних 4-х висотних млинах.

У промисловості спостерігається тенденція до зменшення розмірів калібру, і їх частка на ринку зростає. При швидкості прокатки понад 1000 м/хв необхідний якісний контроль процесу. До швидкостей 1500 м/хв використовуються 4-рядні циліндричні роликотідшипники та 2-рядні осьові роликотідшипники.

Якщо швидкість прокатки перевищує 1500 м/хв, замість них використовуються підшипники з масляною плівкою. У міру того як питомий тиск прокатки збільшується до тонкості, сплющування валків і згинання валків збільшуються. Особливу увагу слід приділяти краям смуги, оскільки сплющування рулону поступово зменшується від навантаженого центру рулону до менш навантажених сегментів рулону за межами смуги.

Крім того, розвивається несприятлива термічна корона, яка набуває значення при більш тонких калібрах. Зустрічне згинання валків виявляється неефективним, оскільки стрічка закладена в рулони. Як наслідок, часто виникає так звана проблема «провалу краю», що призводить до затягування країв, що, у свою чергу, може спричинити чверть пряжки або розрив краю. Відповідно, основною проблемою холодної прокатки є послаблення локального тиску на кромки, не впливаючи на загальну площинність або форму.

Для цього були розроблені різноманітні передові технології керування, такі як зонне охолодження валків, надувні опорні валки або використання б-ти млинів із бічним зміщенням проміжних валків. У холодному робочому режимі (нижче 100°C) підйом дислокації та поперечне ковзання дуже обмежені. Матеріал зазнає значного деформаційного зміцнення, де зазвичай

відбувається руйнування до досягнення стабільного стану. Визначена деформація застосовується під час холодної прокатки, щоб досягти бажаної міцності виробу шляхом деформаційного зміцнення та отримати плоский лист із чітко визначеними та іноді структурованими поверхнями.

Додаткова зміна мікроструктури викликається подальшим дробленням і вирівнюванням складових часток. Міцність сплавів Al-Mg (Mn, Cu), що не піддаються термічній обробці, груп AA3xxx або AA5xxx заснована на зміцненні твердого розчину і, меншою мірою, на дисперсоїдах. Для цих сплавів деформаційне зміцнення під час холодної прокатки може збільшити міцність до 400 МПа. Однак сильна взаємодія магнію з дислокаціями може призвести до проблем із піковим напруженням і зубчастими кривими течії (ефект Портевена–Ле Шательє) і, як наслідок, формування лінії Людерса. Можна вжити заходів, щоб уникнути цього ефекту, але зазвичай вони призводять до втрати міцності.

З цієї причини сплави, які піддаються старінню (AA2xxx, AA6xxx), часто використовуються для панелей, таких як кузови автомобілів, де однорідні поверхні є домінуючою характеристикою продукту. Міцність цих сплавів заснована на дисперсійному зміцненні, яке виходить після обробки розчином і подальшого старіння. У будь-якому випадку, мікроструктурні та текстурні характеристики гарячекатаної стрічки визначають досяжну якість продукту після холодної прокатки та нагрівання.

На особливу увагу при холодній прокатці всіх груп сплавів заслуговує контроль бажаної орієнтації зерна (текстури). Текстура визначає анізотропію різних властивостей листа, які мають вирішальне значення для більшості наступних операцій обробки. Для застосування в корпусах банок анізотропія зазвичай виражається відсотковим рівнем вуха витягнутої чашки.

$$(\sigma + d\sigma)(h + dh) - \sigma h = 2p R d\varphi \sin \varphi \pm 2\mu p R d\varphi \cos \varphi. \quad (5.1)$$

Іншим показником якості є значення r , яке визначає відношення деформації ширини листа до товщини листа при одновісній деформації. Сильні варіації текстури призводять до відмінностей у значеннях r , що спричиняє нерівномірність товщини під час будь-якої операції глибокого витягування. Для сплавів, які не піддаються термічній обробці, проходи холодної прокатки та умови відпалу повинні бути розроблені таким чином, щоб відповідати вимогам щодо міцності та текстури.

Розвиток текстури під час холодної прокатки показано на рис. 5.2 для сплавів AA3104 і AA5182. Частково рекристалізована гарячекатана стрічка демонструватиме типову текстуру прокатки (β -волокно), що призводить до лущення $0/45^\circ$.

Домінуючі компоненти кубічної текстури, присутні в повністю рекристалізованій гарячекатаній смузі, призведуть до лущення $0/90^\circ$, у той час як компонент кубічної текстури, повернутої RD, створює додаткові вуха на $0/180^\circ$. Профілі чашок із шести або восьми вушних раковин відображають інтенсивність різних текстурних компонентів.

Подальша холодна прокатка та, можливо, процедури проміжного відпалу, які пристосовані до стану гарячекатаної смуги, можуть бути виконані таким чином, щоб анізотропія була збалансованою, а в той же час зміцнення досягло бажаного рівня міцності. Розвиток колосіння з відповідних різних початкових текстур і для різних холодних обтисків показано в нижній частині.

Хоча швидкі сучасні комп'ютери тепер дозволяють навіть тривимірне чисельне моделювання процесів формування, таких як прокатка простий метод плит все ще використовується в промисловості, напр. для розрахунку навантаження на кочення. Еволюція текстури та розшарування у листовому виробництві сплавів Al-Mg-Mn. Знак перед останнім членом залежить від положення сляба в укусі валка. Від входу до нейтральної площини рулонний матеріал тече повільніше, ніж обертаються валки, тому матеріал втягується

силами тертя. Після нейтральної площини швидкість матеріалу перевищує швидкість обертання валків, тому напрямок сил тертя змінюється.

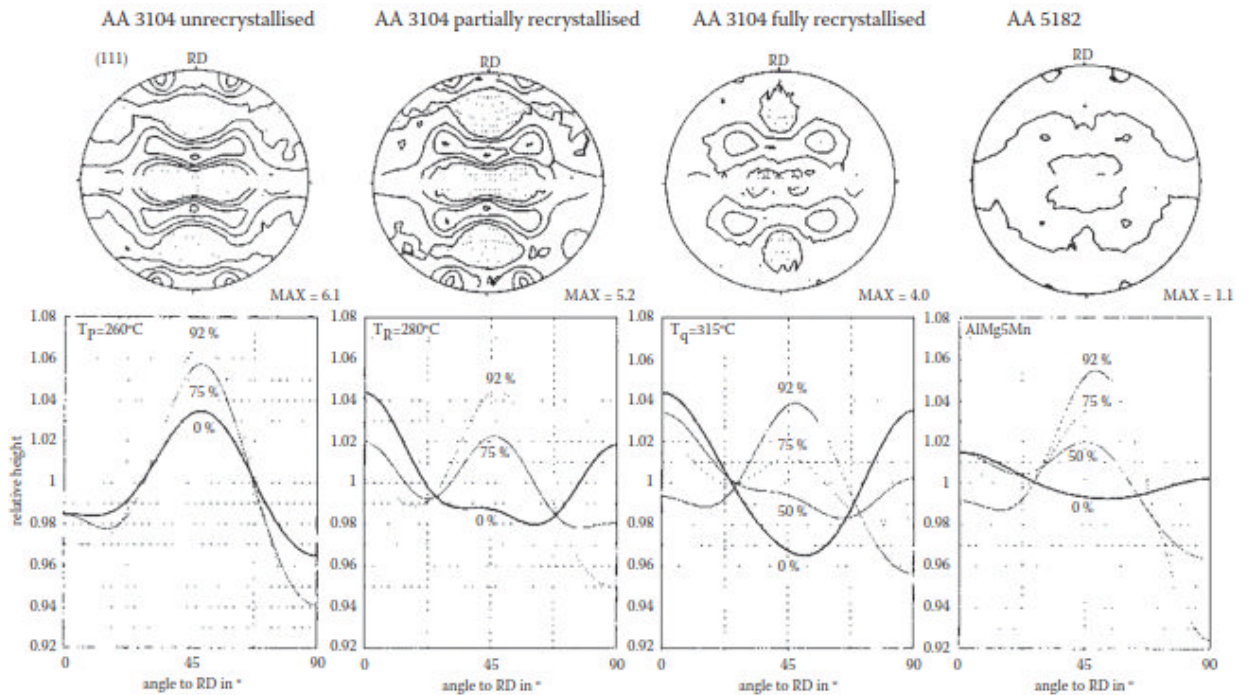


Рис. 5.2. Основна механіка прокатки

Класичні теорії кочення обговорювалися в численних книгах, тому детальне обговорення тут не потрібне. Розгляд сил, що діють на заштриховану плиту прокату, як показано на рис. 5.3, призводить до так званого рівняння фон Кармана–Зібеля, яке є основою для розрахунку навантаження кочення.

Зони від входу до нейтральної площини та від нейтральної площини до виходу називаються зонами зворотного та прямого ковзання відповідно. Опускаючи диференціали другого порядку в рівнянні і перегрупування призводить до рівняння фон Кармана–Зібеля. Це рівняння, однак, досить важко розв'язати, і з 1920-х років були запропоновані різні спрощення для полегшення його вирішення як у гарячій, так і в холодній прокатці.

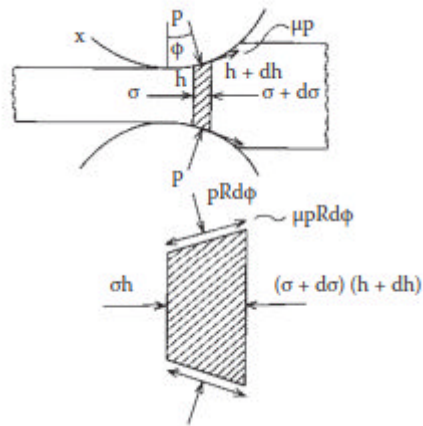


Рис. 5.3 Напруження та сили, що діють на плиту з прокату.

Сьогодні через збільшення використання комп'ютерів ці рішення втрачають своє значення, оскільки диференціальне рівняння тепер можна розв'язати чисельно без будь-яких подальших спрощень.

6 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

6.1 Організація охорони праці при роботі з системою управління

Охорона праці розглядає проблеми забезпечення здорових і безпечних умов праці. Виявляє і вивчає можливі причини нещасних випадків, професійних захворювань, аварій, вибухів, пожеж і розробляє систему заходів і вимог з метою виключення цих причин і створення безпечних і сприятливих для людини умов праці.

Завдання охорони праці є зведення до мінімуму імовірності пошкодження або захворювання працівників з одночасним забезпеченням комфорту при максимальній продуктивності праці.

Навчання працівників безпеці праці проводять відповідно до вимог ГОСТ 12. 0.004 - 79, який встановлює порядок і види навчання. На всіх підприємствах і в організаціях незалежно від характеру і ступеню небезпеки виробництва навчання працівників проводять при підготовці нових робітників, проведенні різноманітних видів інструктажів і підвищенні кваліфікації.

Контроль за своєчасним і якісним навчанням виконує відділ охорони праці чи інженер з охорони праці, або ІТП, на якого наказом керівника підприємства покладено ці обов'язки. Ті, що вперше поступають на роботу, навчання проходять згідно з "Типовим положенням про підготовку і підвищення кваліфікації робітників". В журналі обліку навчальної роботи реєструють навчальну тему, за якою проводилось навчання.

Інструктаж працюючих поділяють на вступний, початковий, на робочому місці, повторний, позаплановий і початковий.

Вступний інструктаж з усіма, хто поступає на роботу незалежно від їх освіти і стажу роботи по даній професії, проводить інженер з охорони праці за програмою, затвердженою головним інженером підприємства, про

проведення вступного інструктажу з обов'язковим підписом того, хто проводив інструктаж і того, хто його отримував.

Початковий інструктаж на робочому місці, повторний, позаплановий і поточний проводить керівник робіт.

Початковий інструктаж на робочому місці проводять при прийомі на роботу нових робітників за інструкцією з охорони праці, розробленою для окремих професій або видів робіт. Всі робітники після цього інструктажу і перевірки знань 2-5 змін (залежно від навичок і стажу роботи) працюють під наглядом бригадира чи майстра, потім оформляється допуск до їх самостійної праці.

Повторний інструктаж проходять всі працівники незалежно від кваліфікації, освіти і стажу роботи через три місяці. Його проводять з метою перевірки знання робітниками правил і норм з охорони праці.

Позаплановий інструктаж проводять коли змінилися правила охорони праці або технологічний процес, обладнання, інструмент та інші фактори, що впливають на безпеку праці; коли працівники порушують правила охорони праці, що можуть призвести чи призвели до травм, аварій чи пожежі, вибуху. Його проводять індивідуально чи з групою робітників однієї професії за програмою початкового інструктажу на робочому місці. При його реєстрації вказують причину, яка спричинила його проведення.

Умови праці мають велике значення практично для всіх виробничих показників - продуктивності праці, якості робіт, безпеки працівників та інше.

Санітарно-гігієнічні умови праці характеризуються показниками виробничого середовища - рівнем освітлення, мікрокліматичними параметрами, загазованістю і запиленістю повітряного середовища, рівнем шуму і вібрації, наявністю іонізуючого випромінювання та інше.

6.2 Електробезпека

Електричні установки, з якими доводиться мати справу практично всім працюючим по встановленню та налагодженню засобів автоматизації, виявляють для людини велику потенційну небезпеку, яка збільшується у зв'язку з тим, що органи чуття людини не можуть на відстані виявити присутність електричної напруги на обладнанні.

Степінь ураження електричним струмом залежить від цілого ряду факторів: значення сили струму, електричного опору тіла людини та тривалості протікання через неї струму, виду та частоти струму, індивідуальних властивостей людини та умов навколишнього середовища.

Конструкція електроустановок має відповідати умовам їх експлуатації та забезпечувати захист персоналу від дотику з струмоведучими та рухомими частинами, а обладнання - від попадання всередину посторонніх твердих тіл та води.

Конструкція, вид виконання, спосіб встановлення, клас ізоляції застосовуваних провідників, кабелів, пристроїв та іншого електрообладнання відповідають вимогам електробезпеки. За ступенем ураження людей електричним струмом котельня відноситься згідно ПУЕ 1.1.13 до категорії приміщень з підвищеною небезпекою (висока температура, можливість одночасного дотику до металевих елементів технологічного обладнання або металоконструкцій будинку та металевих корпусів електрообладнання).

У нормальному режимі роботи обладнання - можливість ураження працівників електричним струмом виключена. Але на випадок аварії для запобігання ураження струмом людей передбачене захисне заземлення. Згідно ПУЕ 1.7.65 допустимий опір заземлення повинен бути не більшим 10 Ом.

При виконанні монтажних робіт використовуються переносні електроінструменти (електродрилі, електрошліфувальні установки, тощо). Для забезпечення безпечної праці корпуси однофазних електроприймачів повинні занулюватись.

Захист людини від ураження електричним струмом в мережах з зануленням здійснюється тим, що при замиканні одної з фаз на занулений корпус в ланці цієї фази виникає струм короткого замикання, що діє на струмовий захист (плавкий запобіжник, автомат), в результаті чого відбувається відключення аварійної ділянки від мережі. Крім того, ще до спрацювання захисту струм короткого викликає перерозподіл напруги в мережі, що приводить до зниження напруги корпусу відносно землі. Таким чином, занулення зменшує напругу дотику та обмежує час, на протязі якого людина, що доторкнулася до корпусу, може потрапити під дію напруги.

Для того, щоб забезпечити швидке (на протязі декількох секунд) відключення аварійної ділянки, струм короткого замикання повинен бути достатньо великим. Відповідно до вимог ПУЕ струм короткого замикання повинен не менше ніж в три рази перевищувати номінальний струм плавкої вставки найближчого запобіжника або номінальний струм нерегульованого розчеплювача автоматичного вимикача. При використанні автоматичних вимикачів, що мають тільки електромагнітний розчіплювач (відсічку), струм короткого замикання повинен перевищувати значення струму встановлення миттєвого спрацювання в 1,25-1,4 рази в залежності від номінального струму.

В однофазних електроприймачів, що включені між фазним та нульовим робочим проводами, занулення корпусів слід виконувати з допомогою окремого (третього) провідника, який повинен з'єднувати корпус електроприймача з нульовим захисним проводом. В таких випадках під'єднувати корпуси електроприймачів для забезпечення електробезпеки до нульового робочого проводу недопустимо, оскільки при його розриві

(перегоранні запобіжника) всі під'єднані до нього корпуси виявляться під фазною напругою відносно землі.

В мережі з зануленням недопустимо використовувати заземлення окремих електроприймачів, не під'єднавши їх перед цим до нульового захисного провідника. В цьому випадку при замиканні фази на заземлений, але не приєднаний до нульового захисного провідника корпус створюється коло струму через заземлення цього корпусу та заземлення нейтралі джерела струму. Такий випадок небезпечний, оскільки засоби захисту не зможуть відключити такий електроприймач через мале значення струму і тому небезпечна напруга на всіх корпусах може зберігатися тривалий період, поки заземлений приймач не буде відключений вручну.

Важливо відмітити, що якщо занулений корпус одночасно заземлений, то це тільки покращує умови безпеки, оскільки забезпечує додаткове заземлення нульового захисного проводу.

Для ізоляції людини від частин електроустановок, що знаходяться під напругою, використовуються основні та допоміжні ізолюючі засоби, а саме слюсарно-монтажний інструмент з ізольованими ручками, коврики, ізолюючі підставки, тощо.

У приміщеннях, де знаходяться вимірювальні прилади, необхідно забезпечити виконання заходів по боротьбі з статичною електрикою (тобто прилади повинні бути заземлені). Найпростішим засобом є підтримка відносної вологості повітря на рівні 50 - 60 % за допомогою побутового електрозволожувача.

Підлогу слід виконувати відповідно до ГОСТ 12.4.124-83, використовуючи антистатичне покриття на проходах і біля робочих місць.

Робітникам рекомендовано носити одягу з природних матеріалів або з комбінованих - природних і штучних волокон. Для зняття електростатичних зарядів з одяжі слід використовувати антистатика побутового призначення.

Оскільки корпуси приладів виконані з металу, то для усунення небезпеки ураження людини електричним струмом (можливий пробій на корпус приладу) використовується захисне заземлення.

6.3 Розрахунок заземлення

Розрахуємо систему заземлення для електроустаткування, яке працює від напруги 220 В.

$$R_{\text{за}} \leq \frac{U}{I_f} = \frac{220}{66} = 3.3 \leq 4 \text{ Ом}$$

Визначаємо опір ґрунту: $\rho = k_n * \rho_n = 2 * 200 = 400 \text{ Ом м}$,

де k_n - коефіцієнт підсилення;

ρ_n — питомий опір ґрунту (вибирається з довідкової літератури).

Визначаємо опір одиночного вертикального заземлювача:

$$R_B = \frac{\rho}{2\pi} \left(\ln \frac{2l}{d} + \frac{1}{2} * \frac{4t+1}{4t-1} \right)$$

де t - відстань від середини заземлювача до поверхні ґрунту, м;

l, d - довжина і діаметр стержня заземлювача, м;

$$R_B = 96 \text{ Ом.}$$

Визначаємо опір сталевій полосі, що з'єднує стержневі заземлювачі:

$$R_H = (\rho / 2\pi) * \ln(l^2 / dt) = 61 \text{ Ом.}$$

Визначаємо орієнтовне число стержневих заземлювачів:

$$n = R_B / [r_B] \eta_B = 96 / 4 * 1 = 24 \text{ шт.};$$

r_B - допустимий по нормам опір заземляючого пристрою,

η_B - коефіцієнт використання вертикальних заземлювачів (для орієнтовного розрахунку приймається рівним 1).

Приймаємо розміщення вертикальних заземлювачів по контуру з відстанню між сталевими заземлювачами рівним 2l. З довідкової літератури визначаємо $\eta_B = 0,66$ і $\eta_r = 0,39$.

Визначаємо необхідну кількість вертикальних заземлювачів

$$n = R_B / [r_B] \eta_B = 96 / (4 * 0,66) = 36$$

Розраховуємо загальний розрахунковий опір аземлюючого пристрою R з врахуванням з'єднувальної полоси

$$R = R_B R_H / (R_B \eta_r + R_H \eta_B n) = 3,9 \text{ Ом.}$$

Розрахунок проведено правильно, оскільки виконується умова $R \leq [r_B]$.

Розрахунок штучного заземлення:

Приймаємо, що опір захисного заземлення не повинен перевищувати 4 Ом:

$$R_{33} = \frac{R_c R_n}{R_c + R_n} \leq 4 \text{ Ом}$$

де R_{33} – опір захисного заземлення;

R_c – опір стержневих заземлювачів;

R_n – опір поперечних заземлювачів.

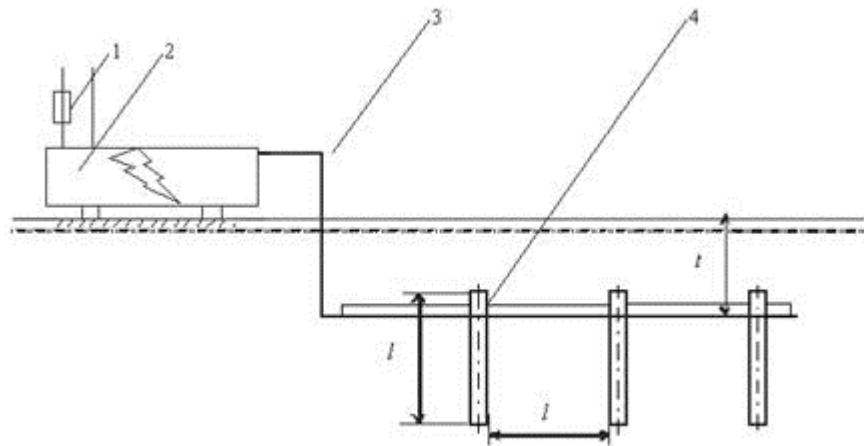


Рисунок 6.1 - Пристрій заземлення

4 – плавка вставка; 2 – електроустановка; 3 – з'єднувальна штаба; 4 – трубчатий заземлювач

Опір одиночного стержневого заземлювача розтіканню електричного струму:

$$R_{oc} = \frac{\rho_r}{2\pi l} \left(\ln \frac{2l}{d} + \ln \frac{4h'+l}{4h'-l} \right)$$

де h – відстань від поверхні ґрунту до заземлювача і становить 0,8 м;

l – довжина стержневого заземлювача 3 м;

d – діаметр стержневого заземлювача 50 мм.

$$R_{oc} = \frac{750}{2 \cdot 3,14 \cdot 3} \left(\ln \frac{2 \cdot 3}{0,05} + \ln \frac{4 \cdot 0,8 + 3}{4 \cdot 0,8 - 3} \right) = 39,8 \cdot (0,18 + 3,43) = 143,8 \text{ Ом}$$

Опір одиночного поперечного заземлювача:

$$R_{on} = \frac{\rho_r}{2\pi l} \ln \frac{2l^2}{bh'}$$

де l – довжина поперечного заземлювача 2,5 м;

b – ширина полоси заземлювача 30 мм;

ρ_r – розрахунковий опір ґрунту: для поперечних електродів 1000 Ом·м, для стержневих електродів 750 Ом·м.

$$R_{on} = \frac{1000}{2 \cdot 3,14 \cdot 2,5} \ln \frac{2 \cdot 2,5^2}{0,03 \cdot 0,8} = 63,7 \cdot 6,25 = 398,1 \text{ Ом}$$

В наслідок взаємовпливу вводимо коефіцієнт використання заземлювачів:

$$\eta = \frac{R_0}{nR_p}$$

де R_d – допустимий опір заземлення, що становить 4 Ом;

R_0 – опір одиночного заземлювача.

З цієї формули методом ітерацій підбирають n , при якому $\eta = 1$:

n	R_n	R_c	R_o	η
1	398,1	143,8	105,6	26,1
5	398,1	143,8	105,6	5,2
10	398,1	143,8	105,6	2,6
15	398,1	143,8	105,6	1,7
20	398,1	143,8	105,6	1,3
25	398,1	143,8	105,6	1,1
26	398,1	143,8	105,6	1,0
27	398,1	143,8	105,6	0,9

Отже приймаємо кількість одиночних заземлюючих електродів рівною

26.

ОСНОВНІ ВИСНОВКИ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ

У роботі було розроблено автоматизовану систему керування технологічним процесом прокатки алюмінію для виготовлення фольги.

Було розглянуто основні аспекти процесу прокатування алюмінію, основні параметри, як необхідно контролювати. Встановлено, що процес має характерні особливості та вимагає активного процесу керування в режимі реального часу.

Для побудови системи було описано технічні характеристики прокатного стану, розроблено конфігурацію системи, описано основні функції керування.

В роботі було розроблено систему автоматизованого керування процесом холодної прокатки алюмінію. На основі аналізу основних залежностей та моделей процесу прокатування було розроблено ефективну систему керування на базі контролера SIMATIC TDC та SIMATIC S7-400.

Впровадження розробленої системи забезпечить покращення якості виробництва та зменшення кількості браку.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Singh R.V. Aluminium rolling: processes, principles and applications. McGraw-Hill Education LLC. Aluminum, 2011. 686 p.
2. Uppgård T. Estimation of post-rolling effects in cold rolled aluminum strips. Örebro University, Långhuset, Fakultetsgatan, Sweden, 2008. 16 p.
3. Garimella S.S., Srinivasan K.C. Application of iterative learning control to coil-to-coil control in rolling, IEEE Trans. Control Syst. Technol. 6. (2), 1998. p. 281–293.
4. Aluminum Association: Rolling aluminum: from the mine through the mill Aluminum Association, Waldorf, MD, USA, 2008. 135 p.
5. Zhang H.Y., Sun J., Zhang D., ET AL. Improved smith prediction monitoring AGC system based on feedback-assisted iterative learning control. J. Cent.-South Univ. 21, 2014. p. 3492–3497.
6. Zhang F., Xiang X., Wang B., ET AL. Virtual gauging system for hot strip mill', Sens. Transducers. 172. (6), 2014. p. 105–110.
7. Durrón K., Groves C.N. Self-tuning control of a cold mill automatic gauge control system. Int. J. Control. 65. (4), 1996. p. 573–588.
8. Katori H., Yoshitani N., Ueyama T., ET AL. Application of two-degree-of-freedom control system to automatic gauge control. Proc. of American Control Conf., 1992. p. 806–810.
9. Groover M.P. Fundamental of modern manufacturing: materials, processes, and systems. John Wiley & Sons. Hoboken. USA, 2007. 1025 p.
10. Kutz M. Mechanical engineers' handbook manufacturing and management John Wiley & Sons. Hoboken. USA, 2006. 834 p.
11. Hameed W.I., Mohamad K.A. Strip thickness control of cold rolling mill with roll eccentricity compensation by using fuzzy neural network. Engineering. 6. (1), 2014. p. 27–33.

12. Pires C.T., de Á., Ferreira H.C., ET AL. Adaptation for tandem cold mill models. *J. Mater. Process. Technol.* 7. (209), 2009. p. 3592–3596.
13. Reeve P.J., MacAlister A.F., Bilkhu T.S. Control, automation and the hot rolling of steel. *Philos. Trans. R. Soc. A Math. Phys. Eng.Sci.* 357, 1999. p. 1549–1571.
14. Zhang F., Zhang Y., Hou J., ET AL. Thickness control strategies of plate rolling mill. *Int. J. Innov. Comput. Inf. Control.* 11 (4), 2015. pp. 1227–1237.
15. Pittner J., Simaan M.A. An initial model for control of a tandem hot metal strip rolling process. *IEEE Trans. Ind. Appl.* 46. (1), 2010. p. 46–53.
16. Ginzburg V.B. High-quality steel rolling. Marcel Dekker, New York, USA, 1993
17. Ford H., Ellis E.F., Bland D.R. Cold rolling with strip tension – part I: a new approximate method of calculation and comparison with other methods’, *J. Iron Steel Inst.* 168, 1951. p. 57–72.
18. Roberts W.L. Hot rolling of steel. Marcel Dekker, New York, USA, 1983.
19. Jiao Z., He C., Wang J., ET AL. Development and application of automation control system to plate production line. 11th Int. Conf.Control, Automation, Robotics and Vision, Singapore, December, 2010. p. 678–681.
20. Hoshino I., Okamura Y., Kimura H. Observer-based multivariable tension control of aluminum hot rolling mills. *Proc. 35th Conf. On Decision and Control*, Kobe, Japan, December, 1996. p. 1217–1222.
21. Cao X.K. Measurement of stresses at the roll/strip interface during cold rolling of aluminum. PhD thesis. Queen’s University. Kingston. ON. Canada, 1994.
22. А.Г. Микитишин, М.М. Митник, П.Д. Стухляк, В.В. Пасічник Комп’ютерні мережі. Книга 1. [навчальний посібник] (Лист МОНУ №1/11-8052 від 28.05.12р.) - Львів, "Магнолія 2006", 2013. – 256 с.

23. А.Г. Микитишин, М.М. Митник, П.Д. Стухляк, В.В. Пасічник Комп'ютерні мережі. Книга 2. [навчальний посібник] (Лист МОНУ №1/11-11650 від 16.07.12р.) - Львів, "Магнолія 2006", 2014. – 312 с.
24. Микитишин А.Г., Митник, П.Д. Стухляк. Комплексна безпека інформаційних мережевих систем: навчальний посібник – Тернопіль: Вид-во ТНТУ імені Івана Пулюя, 2016. – 256 с.
25. Микитишин А.Г., Митник М.М., Стухляк П.Д. Телекомунікаційні системи та мережі : навчальний посібник для студентів спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» – Тернопіль: Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, 2017 – 384 с.
26. Введення в компютерну графіку та дизайн: Навчальний посібник для студентів спеціальності 174 "Автоматизація, компютерно-інтегровані технології та робототехніка"/Укладачі: О.В. Тотосько, П.Д. Стухляк, А.Г. Микитишин, В.В. Левицький, Р.З. Золотий - Тернопіль: ФОП Паляниця В.А., 2023 - 304с. <http://elartu.tntu.edu.ua/handle/lib/41166>.
27. Пилипець М. І. Правила заповнення основних форм технологічних документів : навч.-метод. посіб. / Уклад. Пилипець М. І., Ткаченко І. Г., Левкович М. Г., Васильків В. В., Радик Д. Л. Тернопіль : ТДТУ, 2009. 108 с. <https://elartu.tntu.edu.ua/handle/lib/42995>.
28. Проектування мікропроцесорних систем керування: навчальний посібник/ І.Р. Козбур, П.О. Марущак, В.Р. Медвідь, В.Б. Савків, В.П. Пісьціо.–Тернопіль: Вид-во ТНТУ імені Івана Пулюя, 2022.–324с.
29. Я.І. Проць, В.Б. Савків, О.К. Шкодзінський, О.Л. Ляшук. Автоматизація виробничих процесів. Навчальний посібник для технічних спеціальностей вищих навчальних закладів. – Тернопіль: ТНТУ ім. І.Пулюя, 2011. – 344с.
30. Основи наукових досліджень і теорія експерименту : Навчальний посібник / укл. Ю. Б. Капаціла, П. О. Марущак, В. Б. Савків, О. П. Шовкун.

Тернопіль : ФОП Паляниця В.А., 2023. 186 с.». <http://elartu.tntu.edu.ua/handle/lib/40843>.

31. Методичний посібник для здобувачів освітнього ступеня «магістр» всіх спеціальностей денної та заочної (дистанційної) форм навчання «Безпека в надзвичайних ситуаціях» / В.С. Стручок –Тернопіль: ФОП Паляниця В. А., – 156 с. <https://elartu.tntu.edu.ua/handle/lib/39196>.

32. Навчальний посібник «Техноекологія та цивільна безпека. Частина «Цивільна безпека»» / автор-укладач В.С. Стручок – Тернопіль: ФОП Паляниця В. А., – 156 с. <http://elartu.tntu.edu.ua/handle/lib/39424/>

33. Платформа .NET та мова програмування С# 8.0: навчальний посібник / Коноваленко І.В., Марущак П.О. – Тернопіль: ФОП Паляниця В. А., 2020 – 320 с. /Рекомендовано до друку Вченою радою Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя. Протокол № 10 від 20 жовтня 2020 року

34. Капаціла Ю.Б., Михайлишин Р.І., Савків В.Б., Методичні вказівки до виконання кваліфікаційної роботи бакалавра спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології». Тернопіль.: Видавництво ТНТУ. 2021. 40 с.

35. Савків В.Б., Капаціла Ю.Б., Михайлишин Р.І. Методичні вказівки до виконання кваліфікаційної роботи бакалавра спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології». Тернопіль.: Видавництво ТНТУ. 2021. 50 с. <https://elartu.tntu.edu.ua/handle/lib/35172>

36.