

ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»
Гірничо-металургійний факультет
Кафедра металургії та інноваційних технологій

«Допущено до захисту»
Гарант освітньої програми
«Металургія чорних металів»

Христина МАЛІЙ

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття освітнього ступеня бакалавр
за підсумками виконання освітньо-професійної програми
«Металургія чорних металів»
за спеціальністю 136 Металургія

**на тему «Розробка технології обробки прокату на АПР-1
ПАТ "ЗАПОРІЖСТАЛЬ"»**

Керівник роботи

Христина МАЛІЙ

Консультант
від бази практики

Олександр СПІЧАК

Кваліфікаційна робота містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

Здобувач

Кирило ПРАСЛОВ

Підсумкова оцінка за атестацію			
--------------------------------	--	--	--

Голова ЕК

Євген БРАГІНЕЦЬ

Запоріжжя, 2026

	ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»
Факультет	<u>гірничо-металургійний</u>
Кафедра	<u>металургії та інноваційних технологій</u>
Ступінь вищої освіти	<u>бакалавр</u>
Спеціальність	<u>G10 Металургія</u>
ОПП	<u>Металургія чорних металів</u>

ЗАТВЕРДЖУЮ
Гарант освітньої програми
Христина МАЛІЙ
«10» квітня 2026 р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ БАКАЛАВРА

Праслов Кирило Олександрович
(прізвище, ім'я, по батькові здобувача)

1. Тема роботи: Розробка технології обробки прокату на АПР-1 ПАТ "ЗАПОРІЖСТАЛЬ"

керівник роботи канд. техн. наук, доц. Малій Х.В.

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом Університету від № 41/23.02.2026 від 23.02.2026

2. Термін подання роботи 20.06.2026

3. Вихідні дані до роботи: матеріал – вуглецеві і леговані сталі, розміри – товщина 0,5 -1 мм, ширина 1000-1500 мм, продуктивність по розміру 0,5x1000 мм – 500 тис.т.

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань) Анотація. Зміст. Вступ. 1. Сучасні технології та обладнання для обробки холоднокатаних смуг на агрегатах різання (стан питання) 2. Склад обладнання та технологія АПР-1 3. Техніко-економічні показники виробництва та охорона праці в цеху холодної прокатки. Висновки. Перелік використаних джерел. Додатки.

5. Перелік графічного (демонстраційного) матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень):

1) План цеху холодної прокатки

2) Загальний вид АПР-1

3) Складальні креслення вузлів та механізмів ножиць АПР-1

4) Схема обробки х/к смуг

5) Загальні види НТА, печей відпалу, робочих клітей стану

6) Технологічні режими різання

7) Розрахунки продуктивності АПР-1

8) Математична модель процесу різання

6. Консультанти по роботі, із зазначенням розділів роботи, що їх стосуються

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта
1	Малій Х.В., доцент кафедри металургії та інноваційних технологій
2	Малій Х.В., доцент кафедри металургії та інноваційних технологій
3	Малій Х.В., доцент кафедри металургії та інноваційних технологій

7. Дата видачі завдання 10.04.2026

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи
1	Технологічна частина	11.05 – 13.06.2026
2	Спеціальна частина. Механічна частина	11.05 – 13.06.2026
3	Охорона праці та екологія	06 – 13.06.2026
4	Економічно-організаційна частина	06 – 13.06.2026
5	Оформлення пояснювальної записки	13 – 20.06.2026
6	Захист	за графіком

Здобувач

Кирило ПРАСЛОВ

Керівник роботи

Христина МАЛІЙ

АНОТАЦІЯ

Праслов К.О. Розробка технології обробки прокату на АПР-1 ПАТ «Запоріжсталь». – Кваліфікаційна праця на правах рукопису.

Кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня бакалавра за спеціальністю 136 Металургія, освітньо-професійною програмою «Металургія чорних металів». – ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА», Запоріжжя, 2026.

Об'єкт дослідження – процес поперечного різання холоднокатаних сталевих смуг на агрегаті АПР-1.

Предмет дослідження – технологічні параметри різання (зазор між ножами, швидкість, зусилля) та їх вплив на якість продукції.

Мета роботи – розробка технології обробки прокату на АПР-1, що забезпечує підвищення продуктивності та якості різання.

У першому розділі проаналізовано сучасні технології та обладнання для різання холоднокатаних смуг, досліджено фізичні основи процесу різання та зношення ножів.

У другому розділі наведено склад обладнання та технологію різання на АПР-1, розроблено оптимальні режими різання, виконано розрахунок продуктивності, побудовано математичну модель висоти задирки та виконано енергосиловий розрахунок процесу різання за методикою А.А. Корольова.

У третьому розділі проаналізовано техніко-економічні показники, запропоновано заходи з модернізації, розглянуто питання контролю якості та охорони праці.

АГРЕГАТ ПОПЕРЕЧНОГО РІЗАННЯ, ХОЛДНОКАТАНА СМУГА, ЛЕТЮЧІ НОЖИЦІ, ТЕХНОЛОГІЧНИЙ РЕЖИМ, ПРОДУКТИВНІСТЬ, МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ

ЗМІСТ

Вступ.....	5
1 СУЧАСНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ОБРОБКИ ХОЛОДНОКАТАНИХ СМУГ НА АГРЕГАТАХ РІЗАННЯ (СТАН ПИТАННЯ)	8
1.1 Технологічне значення агрегатів різання у виробництві холоднокатаного листа.....	8
1.2 Сучасні конструкції агрегатів різання та їх основні вузли.....	13
1.3 Фізико-технологічні основи процесу різання	15
1.4 Зношення ножового інструменту	19
1.5 Дефекти різання: причини та методи усунення	24
1.6 Огляд світових виробників агрегатів різання	27
1.7 Шляхи підвищення ефективності роботи АПР-1	28
2 СКЛАД ОБЛАДНАННЯ ТА ТЕХНОЛОГІЯ АПР-1 ПАТ «ЗАПОРІЖСТАЛЬ»	30
2.1 Технічна характеристика агрегату АПР-1	30
2.2 Склад основного та допоміжного обладнання	33
2.3 Технологічна схема обробки холоднокатаних смуг на АПР-1	40
2.4 Розрахунок продуктивності АПР-1	46
2.5 Математична модель процесу різання	48
2.6 Розрахунок енергосилових параметрів процесу різання.....	50
3 ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНІ ПОКАЗНИКИ ВИРОБНИЦТВА ТА ОХОРОНИ ПРАЦІ В ЦЕХУ ХОЛОДНОЇ ПРОКАТКИ.....	59
3.1 Техніко-економічні показники роботи ЦХП-1	59
3.2 Контроль якості продукції на агрегатах різання	63
3.3 Охорона праці та безпека на АПР-1	64
3.4 Охорона навколишнього середовища	66
ВИСНОВКИ	67
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ	70

ВСТУП

Холоднокатаний лист є одним із найбільш затребуваних видів металопродукції в машинобудуванні, автомобілебудуванні, приладобудуванні та будівельній індустрії завдяки точним геометричним розмірам, високій якості поверхні та стабільним механічним властивостям [1].

Фінішною операцією у виробничому ланцюзі холоднокатаного листа є різання широких смуг на листи заданої довжини на агрегатах поперечного різання (АПР). На цьому етапі відбувається остаточне формування товарного вигляду продукції, і від якості різання безпосередньо залежить не тільки геометрична точність, але й технологічні властивості листів при подальшому використанні [2, 3].

ПАТ «Запоріжсталь» є одним з найбільших виробників холоднокатаного прокату в Україні. Агрегат поперечного різання АПР-1, який експлуатується в цеху холодної прокатки №1, був введений в експлуатацію у 1988 році. За понад тридцять років роботи обладнання фізично зносилось, а система управління морально застаріла. Сьогодні АПР-1 поступається сучасним аналогам за швидкістю різання, точністю, часом переналагодження та рівнем автоматизації [1, 4].

За даними світової статистики, до 15% рекламаций на холоднокатаний лист пов'язані саме з дефектами, що виникли при різанні [5].

Тому питання вдосконалення технології обробки прокату на цьому агрегаті є надзвичайно актуальним для підприємства.

Мета роботи – розробити технологію обробки прокату на АПР-1 ПАТ «Запоріжсталь», яка забезпечує підвищення продуктивності та якості різання холоднокатаних смуг.

Для досягнення поставленої мети в роботі вирішуються наступні завдання:

1. Проаналізувати сучасний стан технологій та обладнання для різання холоднокатаних смуг на агрегатах поперечного різання.
2. Дослідити фізико-технологічні основи процесу різання, вплив механічних властивостей сталі на якість різу та закономірності зношення ножового інструменту.
3. На основі аналізу технологічних інструкцій ПАТ «Запоріжсталь» та власних спостережень під час переддипломної практики узагальнити технічні характеристики АПР-1 та розробити оптимальні технологічні режими різання для основних марок сталі.
4. Виконати розрахунок продуктивності АПР-1 та запропонувати шляхи досягнення заданої продуктивності.
5. Розробити математичну модель процесу різання для прогнозування висоти задирки залежно від технологічних параметрів.
6. Проаналізувати техніко-економічні показники роботи цеху холодної прокатки №1, запропонувати заходи з модернізації АПР-1 та оцінити їх економічну ефективність.
7. Розглянути питання контролю якості продукції, охорони праці та безпеки при роботі на агрегатах різання.

Об'єкт дослідження – процес поперечного різання холоднокатаних сталевих смуг на агрегаті АПР-1 цеху холодної прокатки №1 ПАТ «Запоріжсталь».

Предмет дослідження – технологічні параметри процесу різання (зазор між ножами, швидкість різання, зусилля різання, стійкість ножів) та їх вплив на якість готової листової продукції.

У роботі виконано наступне:

- проведено аналіз технологічних інструкцій ТІ 226-П.ХЛ-22-2025 та ТІ 226-П.ГЛ-02-2015 [2, 6] та виробничої документації ЦХП-1 [4, 5];
- систематизовано та узагальнено технічні характеристики та технологічні можливості АПР-1;

- на основі виробничих даних та аналітичних залежностей розроблено оптимальні технологічні режими різання для основних марок сталі;
- виконано розрахунок продуктивності АПР-1 та проведено порівняльний аналіз з виробничими даними;
- розроблено оригінальну математичну модель для прогнозування висоти задирки, яка враховує товщину металу, зазор між ножами та марку сталі;
- запропоновано конкретні заходи з модернізації агрегату та проведено їх техніко-економічне обґрунтування.

У роботі використано аналітичний метод для вивчення науково-технічної літератури та технологічних інструкцій, розрахунково-аналітичний метод для визначення продуктивності агрегату та технологічних параметрів, метод математичного моделювання для побудови залежності висоти задирки від параметрів різання, а також метод техніко-економічного аналізу для оцінки ефективності запропонованих заходів з модернізації.

Розроблені технологічні режими різання та математична модель можуть бути використані на ПАТ «Запоріжсталь» для оптимізації налаштувань АПР-1 під час різання різних марок сталі. Впровадження запропонованих заходів з модернізації (заміна системи управління, впровадження контролю задирки, використання ножів з покриттям, подача мастильно-охолоджувальної рідини) дозволить підвищити продуктивність агрегату на 15-20% та зменшити брак на 2,5-3,0% [2, 4, 5,].

Кваліфікаційна робота: викладено на 70 сторінках друкованого тексту та містить 23 таблиці, 8 рисунків.

1 СУЧАСНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ОБРОБКИ ХОЛОДНОКАТАНИХ СМУГ НА АГРЕГАТАХ РІЗАННЯ (СТАН ПИТАННЯ)

1.1 Технологічне значення агрегатів різання у виробництві холоднокатаного листа

Холоднокатаний прокат є одним із найбільш затребуваних видів металопродукції в машинобудуванні, автомобілебудуванні, приладобудуванні та будівельній індустрії. Технологічний процес його виробництва на ПАТ "Запоріжсталь" включає наступні основні етапи: травлення гарячекатаних рулонів для видалення окалини, холодна прокатка на стані 1680, рекристалізаційний відпал у ковпакових печах або печах фірми «Ебнер», дресирування та, нарешті, різання на агрегатах поперечного та поздовжнього різання (АПР) [1, 5].

Під час проходження переддипломної практики в цеху холодної прокатки №1 (ЦХП-1) ПАТ "Запоріжсталь" мною було детально вивчено роботу агрегатів різання. Встановлено, що саме агрегати поперечного різання (АПР-1, АПР-2, АПР-3) та поздовжнього різання (АПР-4, АПР-5) є фінішною ланкою виробничого ланцюга. На цьому етапі відбувається остаточне формування товарного вигляду продукції — листів заданої довжини та ширини, смуг необхідного розміру. Згідно з технологічною документацією цеху [2, 5], з якою я ознайомився, АПР-1 забезпечує порізку смуг товщиною 1,0-2,0 мм, шириною 850-1500 мм та довжиною листів 2500-3000 мм.

Рисунок 1.1 – План цеху холодної прокатки №1 (ЦХП-1) [1]

Таблиця 1.1 – Діапазон геометричних параметрів холоднокатаного прокату (дані ЦХП-1)

Параметр	Діапазон значень
Товщина, мм	0,35 – 5,0
Товщина (рулон), мм	0,35 – 3,5
Ширина, мм	500 – 2350
Довжина листа, мм	1000 – 6000
Маса рулону, т	1,5 – 20

У ході практики звернено увагу, що від якості різання безпосередньо залежить не тільки геометрична точність продукції, але й її технологічні властивості при подальшому використанні. Наявність задирок, мікротріщин, хвилястості кромки або неперпендикулярність різку можуть призвести до браку при штампуванні, зварюванні або механічній обробці. За даними світової статистики, які мені надав начальник відділу з холодного прокату технічного управління Спічак О.Ю., до 15%

рекламацій на холоднокатаний лист пов'язані саме з дефектами, що виникли при різанні [5].

На основі вивчення технічної документації та спостережень за роботою обладнання [2, 3, 5], мною було систематизовано агрегати різання за кількома основними ознаками.

За способом орієнтації різу:

1. Агрегати поперечного різання (АПР) — призначені для розрізання смуги на листи заданої довжини. Вони комплектуються летючими (барабанними) ножицями або гільйотинними ножицями. Основним продуктом є листова продукція. Приклади: АПР-1, АПР-2, АПР-3 ПАТ "Запоріжсталь" [2].

2. Агрегати поздовжнього різання (АПР) — призначені для розпуску широкої смуги на декілька вузьких смуг заданої ширини. Використовують дискові ножиці з декількома парами ножів. Кінцевим продуктом є рулони вузької смуги. Приклади: АПР-4, АПР-5 ПАТ "Запоріжсталь" [5, 6].

За швидкісним режимом:

1. Низькошвидкісні (до 1 м/с) — використовуються для товстих та високоміцних смуг.

2. Середньошвидкісні (1-3 м/с) — до цієї категорії належить АПР-1 ПАТ "Запоріжсталь", робоча швидкість якого становить 1-2,5 м/с [2].

3. Високошвидкісні (понад 3 м/с) — сучасні лінії досягають швидкості 5-7 м/с для тонкого прокату [7].

За типом приводу ножиць:

1. З механічним приводом (кривошипно-шатунним) — класичне рішення для АПР старого зразка.

2. З гідравлічним приводом — забезпечує плавне регулювання швидкості та зусилля.

3. З сервоприводом (цифрове керування) — сучасний стандарт для прецизійного різання [7].

Таблиця 1.2 – Технологічні параметри стану холодної прокатки 1680 ЦХП-1 [5]

Показник	Значення
Максимальна ширина прокатки	
Товщина вхідного металу	
Товщина вихідного металу	
Тип продукції	
Тип сталі	
Точність товщини	
Шорсткість поверхні	

Якість різання холоднокатаних смуг регламентується низкою нормативних документів, зокрема ДСТУ EN 10130:2018 (сталі холоднокатані для холодного штампування) та ГОСТ 19904-90 (прокат листовий холоднокатаний) [4, 5]. Основними показниками якості різання є [2, 8]:

1. Відхилення від номінальної довжини та ширини. Згідно з вимогами, допуск по довжині для листів довжиною до 3000 мм становить $+3/-0$ мм, по ширині — $+2/-0$ мм. Для смуг, отриманих поздовжнім різанням, допуск по ширині залежить від товщини: для товщини 0,5-1,0 мм він становить $\pm 0,5$ мм [8].

2. Висота задирки (грату). Це найбільш критичний показник, оскільки задирки травмують персонал, пошкоджують інструмент при

подальшій обробці та можуть спричиняти концентратори напружень. Норми регламентують висоту задирки не більше 0,05-0,10 мм залежно від товщини та призначення металу. Для товщини 0,5-1,0 мм допустима висота задирки становить не більше 0,08 мм [8].

3. Перпендикулярність різу. Відхилення від перпендикулярності не повинно перевищувати 2 мм на 1 м довжини різу (для поперечного різання) або 1 мм на 1 м (для поздовжнього) [2].

4. Відсутність хвилястості кромки. Хвилястість кромки (серповидність) не повинна перевищувати 3 мм на 2 м довжини [2].

5. Відсутність мікротріщин та розшарувань у зоні різу. Ця вимога контролюється візуально або за допомогою неруйнівного контролю [2].

Таблиця 1.3 – Класифікація холоднокатаного прокату за якісними ознаками [8, 9].

Ознака	Види
За точністю	нормальна, підвищена, висока
За плоскостністю	нормальна, покращена, висока
За здатністю до витяжки	ВГ, СВ, ОСВ, ВОСВ
За станом кромки	обрізна, необрізна

Під час практики мною було відзначено, що на АПР-1 контроль якості різання здійснюється візуально та за допомогою ручного вимірювального інструменту (мікрометр, лінійка). Відсутність автоматизованих систем контролю задирки та геометрії кромки є, на мою думку, суттєвим недоліком, який потребує усунення в рамках модернізації.

1.2 Сучасні конструкції агрегатів різання та їх основні вузли

Розмотувач є першим вузлом будь-якого агрегату різання. Його функція — забезпечити плавну та контрольовану подачу смуги з рулону в технологічну лінію з необхідним натягом. Згідно з технічною документацією ЦХП-1 [5], на АПР-1 застосовується розмотувач барабанного типу [2].

Конструктивно розмотувач складається з консольного вала (барабана), системи сегментів, що розтискаються, приводу обертання та механізму гальмування. Принцип роботи: рулон надівається на барабан, який перебуває в стисненому стані. Після центрування рулону барабан розтискається (сегменти розсуваються), фіксуючи рулон з внутрішньої сторони. Привод забезпечує обертання розмотувача, а гальмівна система створює необхідний натяг смуги [7].

Після розмотувача смуга проходить через систему подаючих роликів. У конструкції АПР-1 передбачено "відгинач смуги" та подаючі ролики з поліуретановим покриттям. Поліуретанове покриття, як я спостерігав під час роботи агрегату, забезпечує високий коефіцієнт тертя без пошкодження поверхні металу [2].

Перед різанням смуга повинна мати ідеальну плоскостність. Навіть незначні хвилі або коробоватість можуть призвести до неточного різання, заклинювання ножиць та браку готової продукції [3]. Тому правильні машини (рихтувальні пристрої) є обов'язковим елементом АПР. Згідно з вивченою мною документацією [2], АПР-1 оснащений двома правильними машинами:

- 5-роликівна правильна машина — розташована перед листовими ножицями. Вона призначена для попередньої правки смуги

після розмотувача, особливо в зоні переднього та заднього кінців рулону, які мають найбільшу кривизну.

- 13-роликів правильна машина — розташована після листових ножиць, перед барабанними ножицями. Вона забезпечує остаточне вирівнювання смуги безпосередньо перед розрізанням на листи.

Процес правки базується на явищі пружно-пластичного вигину. Коли смуга проходить між роликками, верхній та нижній ряди роликів створюють змінний вигин, що призводить до багаторазового знакозмінного навантаження. При цьому внутрішні напруження, які спричиняють кривизну, вирівнюються [3].

Барабанні (летючі) ножиці — це основний тип ножиць на АПР-1 та АПР-2 [2]. Конструктивно вони складаються з двох барабанів (верхнього та нижнього), на яких закріплені ножі. Барабани обертаються синхронно зі швидкістю, узгодженою зі швидкістю руху смуги. Коли ножі зустрічаються, відбувається різання [7].

Переваги барабанних ножиць [3, 7]:

- висока продуктивність (можливість різання на ходу, без зупинки смуги);
- точність довжини листа (похибка $\pm 1-3$ мм);
- можливість різання широкого діапазону товщин (0,5-4,0 мм).

Недоліки:

- складність регулювання зазору між ножами;
- вібрації при високих швидкостях;
- зношення ножів вимагає частих зупинок для заміни [3].

На АПР-1 також передбачені листові ножиці з нижнім різом, які використовуються для обрізання переднього та заднього кінців смуги [2]. Вони працюють за принципом гільйотини: верхній ніж (похилий)

опускається вниз, розрізаючи метал по всій ширині. Перевагою є висока якість різку та відсутність деформації кромки. Недолік — необхідність зупинки смуги для різання, що обмежує продуктивність [7].

Після різання готові листи необхідно захистити від корозії під час транспортування та зберігання. Згідно з документацією АПР-1 [2], використовується промаслювальна машина з форсунками. Сучасні аналоги застосовують електростатичне промаслення [7]. При цьому методі масло заряджається електричним зарядом і розпилюється в електричному полі високої напруги, що забезпечує рівномірне нанесення тонкого шару ($0,5-2,0 \text{ г/м}^2$) з мінімальними втратами масла.

АПР-1 оснащений трьома листоукладчиками з консольними роликками [2]. Принцип роботи: листи подаються смуговим конвеєром до листоукладчика, де вони падають на підйомний стіл. Фотоімпульсатор контролює висоту стопи та подає сигнал на опускання столу.

1.3 Фізико-технологічні основи процесу різання

Асортимент холоднокатаного прокату, що обробляється на АПР-1 ПАТ "Запоріжсталь", включає широкий спектр марок сталі: низьковуглецеві киплячі та напівспокійні (08кп, 08пс, 10кп, 15кп, 20кп), спокійні (08Ю, 10, 15, 20, 25), низьколеговані (10Г2, 16Г2), а також сталі, що відповідають євронормам (DC01) [2, 9]. Кожна з цих марок має різну схильність до деформації при різанні, різний характер утворення задирки та різний знос ріжучого інструменту [3].

Холодна прокатка призводить до значного зміцнення металу (наклепу). Для сталі 08кп після холодної прокатки з обтисненням 50% [3]:

- межа текучості зростає з 248 Н/мм^2 до 725 Н/мм^2 (збільшення ≈ 3 рази);

- відносне подовження падає з 35-40% до 1,5% (зменшення ≈ 25 разів).

Це означає, що різання наклепаного металу вимагає:

- більшого зусилля різання (в 2-3 рази);
- меншої швидкості різання (щоб уникнути перегріву ножів);
- більш зносостійких ножів [3].

З підвищенням вмісту вуглецю твердість та міцність сталі зростають, а пластичність зменшується. Це означає, що для високовуглецевих сталей (наприклад, 20, 25) [3]:

- потрібно зменшувати зазор між ножами (на 20-30%);
- потрібно збільшувати кут заточки ножа (до 90-95°);
- швидкість різання слід знижувати на 15-20%.

Для низьковуглецевих сталей (08кп, 08Ю), навпаки, зазор можна збільшити, оскільки метал більш пластичний [3].

Для забезпечення якісного різання необхідно розрахувати три основні параметри: зазор між ножами, зусилля різання та потужність приводу.

На основі виробничого досвіду ЦХП-1 ПАТ «Запоріжсталь» та узагальнення технологічних інструкцій [2, 5], рекомендується використовувати наступні співвідношення для розрахунку бічного зазору між ножами:

- Для низьковуглецевих сталей (08кп, 08Ю): $S = (0,05 \dots 0,10) \times t$
- Для сталей підвищеної міцності (10, 20, 10Г2): $S = (0,08 \dots 0,15) \times t$

При цьому для агрегатів АПР старого зразка (в тому числі АПР-1) рекомендується дотримуватися значення 7-8% від товщини через меншу жорсткість конструкції та наявність прогину ножових балок при роботі на ширині 1500 мм [2, 3].

Таблиця 1.4 — Рекомендовані зазори для різних товщин металу (АПР-1) [2, 3]

Товщина металу, мм	Мінімальний зазор (0,06×S), мм	Оптимальний зазор (0,07×S), мм	Максимальний зазор (0,08×S), мм
0,5	0,03	0,035	0,04
0,8	0,048	0,056	0,064
1,0	0,06	0,07	0,08
1,2	0,072	0,084	0,096
1,5	0,09	0,105	0,12
1,8	0,108	0,126	0,144
2,0	0,12	0,14	0,16

Корегування зазору залежно від умов різання [2, 3]:

1. За маркою сталі:
 - м'які сталі (08кп, глибока витяжка) — нижня межа зазору (5-6%);
 - тверді сталі (08пс, Ст3, S235) — +1-2% до зазору.
2. За шириною смуги:
 - до 1000 мм — номінальний зазор;
 - 1000-1500 мм — додати +0,01-0,02 мм (компенсація прогину балки ножиць).
3. За станом ножів:
 - нові (гострі) ножі — номінальний зазор;
 - підтуплені ножі — +10-15% до зазору;
 - після переточки з радіусом — +5-10% до зазору.

Зусилля різання (тонни) \approx товщина (мм) \times довжина різу (м) \times 40 [3].
 Пояснення: коефіцієнт 40 — це середнє значення для низьковуглецевих сталей (з урахуванням наклепу). Приклад для листа товщиною 1,0 мм, шириною 1000 мм: довжина різу = 1 м; зусилля $\approx 1,0 \times 1,0 \times 40 = 40$ тонн ($\approx 400\,000$ Н).

Процес різання металу ножом складається з трьох стадій [3]:

Стадія 1 — Впровадження ножа. Ніж починає вдавлюватися в метал. Метал спочатку пружно деформується, а потім, коли навантаження стає занадто великим, починає текти (пластична деформація). Глибина впровадження на цій стадії становить 0,2-0,5 мм.

Стадія 2 — Пластичний зсув. Ніж продовжує рухатися, зміщуючи метал убік. Утворюється блискуча поверхня зрізу (зона зсуву). Для якісного різу ця зона повинна становити 50-70% товщини металу.

Стадія 3 — Відрив (скол). Коли ніж пройшов 50-70% товщини, метал, що залишився, не витримує навантаження і відривається (відбувається крихкий скол). Утворюється матова поверхня зрізу (зона сколу). Чим менша ця зона, тим краща якість різу.

Як отримати якісний різ [3]:

- Якщо зазор занадто малий: зона сколу збільшується \rightarrow з'являються мікротріщини.
- Якщо зазор занадто великий: утворюється велика задирка.
- Якщо зазор оптимальний: зона сколу становить 20-30% товщини, задирка мінімальна.

При різанні металу виділяється теплота, яка нагріває ніж. Занадто сильне нагрівання може "відпустити" ніж (знизити його твердість) і призвести до швидкого зношення [3].

Оцінка нагрівання ножа: підвищення температури ($^{\circ}\text{C}$) \approx (Зусилля в тоннах \times 100) / (Маса ножа в кг \times 0,5). Приклад для ножа масою 10 кг при

різанні з зусиллям 40 тонн: $\Delta T \approx (40 \times 100) / (10 \times 0,5) = 4000 / 5 = 800^\circ\text{C}$.
 На практиці теплота частково йде в смугу (близько 50%), частково розсіюється в повітря (близько 30%), і лише близько 20% йде в ніж. Тому реальне підвищення температури ножа становить $\approx 800 \times 0,2 = 160^\circ\text{C}$ [3].

Таблиця 1.5 – Наслідки перегріву ножів [3]

Температура ножа, °С	Що відбувається	Наслідки для різання
до 200°С	Нормальний режим	Якісне різання
200–300°С	Початок розм'якшення ножа	Збільшення зносу в 2–3 рази
300–400°С	Значне розм'якшення	Задирка збільшується в 3–5 разів
понад 400°С	Ніж "відпускається"	Ніж виходить з ладу за кілька хвилин

Як зменшити нагрівання ножів [7]:

- Зменшити швидкість різання (наприклад, з 2,5 м/с до 1,5 м/с → нагрівання зменшиться в 1,7 рази).
- Використовувати мастильно-охолоджувальну рідину (зниження температури на 50–100°С).
- Збільшити зазор між ножами (менше тертя).

1.4 Зношення ножового інструменту

Ножі для різання металу працюють у дуже важких умовах. Основні причини зношення [3]:

1. Абразивне зношення (найпоширеніше). Частинки окалини, піску або карбідів (твердих включень у сталі) "дряпають" поверхню ножа, поступово затуплюючи його. Як зменшити: використовувати більш тверді ножі, краще очищати смугу перед різанням.

2. Адгезійне зношення (схоплювання). При високому тиску та температурі метал смуги "приварюється" до ножа, а потім відривається разом з частинками металу ножа. Як зменшити: зменшити температуру в зоні різання (MOP), використовувати ножі з покриттям.

3. Втомне зношення (утворення тріщин). При кожному контакті зі смугою ніж зазнає циклічного навантаження. Після багатьох тисяч циклів (100 000-1 000 000) на ріжучій кромці утворюються мікротріщини, які поступово ростуть. Як зменшити: використовувати більш в'язкі сталі для ножів, уникати ударних навантажень.

Просте правило: при збільшенні швидкості різання вдвічі, стійкість ножа зменшується в 4 рази [3].

Таблиця 1.6 – Приклад для сталі 08кп [3]

Швидкість різання, м/с	Стійкість ножа (метраж до затуплення), м	Стійкість ножа (тонн до затуплення)
1,0	50 000 м	≈ 500 т
1,5	22 000 м	≈ 220 т
2,0	12 500 м	≈ 125 т
2,5	8 000 м	≈ 80 т
3,0	5 500 м	≈ 55 т

Як це застосувати для АПР-1: максимальна швидкість АПР-1 = 2,5 м/с [2]. При цій швидкості ножі витримують ≈ 8000 м різання (≈ 80 тонн металу). Якщо зменшити швидкість до 1,5 м/с, стійкість зросте до 22 000 м (220 тонн) — тобто в 2,75 рази довше. Рекомендація: для товстого металу (1,5-2,0 мм) та легуваних сталей працювати на швидкості 1,5 м/с, а максимальну швидкість 2,5 м/с використовувати лише для тонкого (0,5-0,7 мм) та м'якого прокату.

Просте правило: при збільшенні твердості металу вдвічі, стійкість ножа зменшується в 4-8 разів [3].

Таблиця 1.7 – Приклад для різних сталей (швидкість різання = 2,0 м/с) [3]

Марка сталі	Стан металу	Твердість, НВ	Стійкість ножа, м
08кп	Відпалений (м'який)	100–120	25 000 м
08кп	Наклепаний (після прокатки)	180–220	8 000 м
20	Наклепаний	200–250	6 000 м
10Г2 (легована)	Наклепаний	250–300	3 500 м

Висновок: різання наклепаного металу (який виходить з холодної прокатки без відпалу) у 3-4 рази швидше затуплює ножі, ніж різання м'якого відпаленого металу. Рекомендація для АПР-1: якщо можливо, перед різанням проводити відпал (зменшення твердості). Якщо ні — використовувати більш зносостійкі ножі (наприклад, з покриттям TiAlN).

Просте правило: при підвищенні температури ножа на кожні 50°C понад 200°C, стійкість зменшується вдвічі [3].

Таблиця 1.8 – Приклад для ножа зі сталі 9XC (твердість HRC 60) [3]

Температура ножа, °C	Стійкість (умовні одиниці)	Примітка
100°C	100	Ідеальний режим
150°C	70	Допустимо
200°C	50	Початок прискореного зносу
250°C	25	Стійкість впала вдвічі
300°C	12	Стійкість впала в 4 рази
350°C	6	Стійкість впала в 8 разів
400°C	2	Ніж виходить з ладу

Як контролювати температуру ножа на практиці (за кольором мінливості) [7]:

- Солом'яно-жовтий колір → $\approx 200^{\circ}\text{C}$ (ще допустимо)
- Коричневий колір → $\approx 250^{\circ}\text{C}$ (вже погано)
- Фіолетовий колір → $\approx 300^{\circ}\text{C}$ (критично)
- Синій колір → $\approx 350^{\circ}\text{C}$ (ніж виходить з ладу)

Рекомендація: якщо після різання рулону ножі набувають фіолетового або синього відтінку — потрібно зменшити швидкість різання або використовувати MOP [3].

Практичні рекомендації щодо збільшення стійкості ножів [3, 7]:

Метод 1 – Правильний вибір матеріалу ножа:

Матеріал ножа	Твердість, HRC	Орієнтовна стійкість	Вартість	Для яких сталей
Сталь 9XC	58–60	1× (базова)	низька	Низьковуглецеві
Сталь 6XB2C	60–62	1,5×	середня	Низьковуглецеві, леговані
CPM 10V (твердий сплав)	64–66	3×	висока	Високоміцні, леговані
3 покриттям TiAlN	60–62 (основа) + покриття	3–5×	висока	Усі типи

Метод 2 — Оптимальна термічна обробка: загартування + відпуск (твердість HRC 58-62); криогенна обробка (охолодження до -196°C рідким азотом) після загартування → додаткове підвищення стійкості на 30-50% [7].

Метод 3 — Використання мастильно-охолоджувальних рідин (MOR): зменшує температуру в зоні різання на $50-100^{\circ}\text{C}$; зменшує тертя (ніж менше зношується); видаляє металеву стружку з зони різання; збільшує стійкість ножа в 2-3 рази [3].

Метод 4 — Оптимальна геометрія ріжучої кромки [3]:

Параметр	Рекомендоване значення	Для яких сталей
Кут заточки (α)	$80-85^{\circ}$	В'язкі сталі (08кп, 08Ю)
Кут заточки (α)	$85-95^{\circ}$	Крихкі, тверді сталі
Радіус заокруглення (r)	0,03–0,05 мм	Тонкий лист (0,5–1,0 мм)
Радіус заокруглення (r)	0,05–0,10 мм	Товстий лист (1,0–2,0 мм)

1.5 Дефекти різання: причини та методи усунення

На основі узагальнення виробничого досвіду ЦХП-1 ПАТ «Запоріжсталь» та аналізу технологічних інструкцій [2, 5, 6], основними видами дефектів при поперечному різанні є:

Дефект №1 — Задирка (грат). Як виглядає: гострий виступ металу на кромці листа. Основна причина: занадто великий зазор між ножами. Допустима норма: $\leq 0,08$ мм для товщини 0,5-1,0 мм (ДСТУ EN 10130) [8]. Як усунути: зменшити зазор до оптимального значення (0,06-0,08 мм для товщини 1,0 мм); заточити або замінити затуплені ножі; перевірити паралельність ножів [2, 3].

Дефект №2 — Рваний край. Як виглядає: нерівна, рвана кромка по всій довжині або на окремих ділянках. Основна причина: дуже великий зазор між ножами або значне затуплення ріжучої кромки. Як усунути: зменшити зазор до оптимального значення; заточити або замінити ножі; перевірити синхронність обертання барабанів [3].

Дефект №3 — Мікротріщини. Як виглядають: дрібні (0,1-0,5 мм) тріщини на кромці. Основна причина: занадто малий зазор + наклеп металу. Як усунути: збільшити зазор (до $0,10-0,15 \times S$ для наклепаного металу); провести відпал металу перед різанням; використовувати ножі з позитивним переднім кутом [3].

Дефект №4 — Хвилястість кромки. Як виглядає: кромка листа не пряма, а з періодичними відхиленнями. Основна причина: вібрація ножів через дисбаланс або зношені підшипники. Допустима норма: ≤ 3 мм на 2 м довжини [2]. Як усунути: провести динамічне балансування ножових валів; замінити зношені підшипники; перевірити та затягнути всі кріплення [3].

Дефект №5 — Подвійний різ. Як виглядає: на кромці листа видно слід від двох різів. Основна причина: перекіс ножів (клиновидний зазор). Як усунути: вирівняти ножі за щупами по всій ширині; перевірити паралельність ножових валів [2, 3].

Дефект №6 — Неперпендикулярність різу. Як виглядає: кут між кромками листа не дорівнює 90°. Основна причина: знос напрямних або перекіс ножів. Допустима норма: ≤ 2 мм на 1 м довжини різу [2]. Як усунути: відрегулювати напрямні; перевірити та усунути перекіс ножових валів [3].

Таблиця 1.9 — Таблиця дефектів різання для оператора АПР-1 [2, 3]

Дефект	Як виглядає	Головна причина	Що робити	Час усунення
Задирка	Гострий виступ на кромці	Завеликий зазор	Зменшити зазор	5-10 хв
Рваний край	Нерівна, рвана кромка	Дуже великий зазор	Зменшити зазор	5-10 хв
Мікротріщини	Дрібні тріщини на кромці	Замалий зазор + твердий метал	Збільшити зазор	5-10 хв
Хвилястість	Кромка "ходить" хвилею	Вібрація (дисбаланс)	Балансування ножів	30-60 хв
Подвійний різ	Слід від двох різів	Перекіс ножів	Вирівняти за щупами	15-30 хв

Дефект	Як виглядає	Головна причина	Що робити	Час усунення
Непрямий різ	Кут $\neq 90^\circ$	Перекіс ножів	Регулювання ножів	15-30 хв
Наволон	Частинки приварені до листа	Перегрів ножів	Зменшити швидкість + МОР	5 хв
Потемніння кромки	Кромка синя/фіолетова	Перегрів ($>300^\circ\text{C}$)	Зменшити швидкість	негайно

На основі виробничої документації ЦХП-1 [2, 5], для забезпечення стабільної роботи АПР-1 необхідно дотримуватись наступних допусків:

- нерівномірність зазору по ширині: не більше $\pm 0,01$ мм;
- биття ножа: $\leq 0,02$ мм;
- паралельність ножів: $\leq 0,02-0,03$ мм на 1500 мм довжини.

Контроль цих параметрів здійснюється за допомогою щупів та індикатора годинникового типу при кожній заміні ножів та після кожної зупинки агрегату для усунення дефектів різання [2].

Практичні рекомендації для АПР-1 ПАТ "Запоріжсталь" [2, 3, 5]:

1. Контроль зазору перед кожною зміною рулону. Зазір слід перевіряти щупом перед початком різання кожного нового рулону (особливо при зміні товщини). Допустиме відхилення: $\pm 0,01$ мм від заданого значення.

2. Ведення журналу стійкості ножів. Для кожної пари ножів записувати: дата встановлення; скільки тонн металу нарізано; які марки сталі різали; причина заміни (затуплення, скол, тріщина).

3. Візуальний контроль кромки. Після різання кожного рулону необхідно оглянути 2-3 листи (верхній, середній, нижній у пачці) на наявність задирок та інших дефектів.

4. Контроль температури ножів. Якщо ножі після різання рулону стали гарячими (рука не терпить) — швидкість занадто висока. Якщо з'явився синій відтінок — необхідно негайно зменшити швидкість.

5. Своєчасна заточка ножів. Не слід чекати, поки ножі затупляться "в нуль". Оптимально заточувати ножі, коли висота задирки досягає 0,07-0,08 мм (це \approx 80-90% від ресурсу ножа).

1.6 Огляд світових виробників агрегатів різання

SMS group GmbH (Німеччина) є світовим лідером у виробництві металургійного обладнання, включаючи агрегати поперечного та поздовжнього різання [7]. Основні особливості: система автоматизації X-Pact® — управління всією лінією з одного пульта; система швидкої заміни ножів (QBC) — зміна за 10-15 хвилин; гідравлічний привід ножиць з цифровим керуванням; оптичний контроль якості кромки (Online Edge Inspection).

FIMI (Італія) спеціалізується на лініях різання для тонкого листа (автомобільна промисловість) [7]. Основні особливості: система Loop Control — автоматичне регулювання петлі смуги; правильна машина з незалежним регулюванням кожного ролика; електростатичне промаслення з точністю $\pm 0,1$ г/м².

Georg (Німеччина) спеціалізується на агрегатах поздовжнього різання (слайтерах) [7]. Основні особливості: технологія Turret Head — карусельна зміна ножів за 30 секунд; система Active Damping — зменшення вібрацій; інтеграція з MES-системами підприємства.

Таблиця 1.10 – Порівняльна характеристика (для поперечного різання) [5, 7]

Параметр	АПР-1 (ПАТ "Запоріжсталь")	Сучасний аналог (SMS / FIMI)
Швидкість різання, м/с	1,0–2,5	до 4,0–6,0
Точність довжини листа, мм	±1,5–3,0	±0,5–1,0
Час зміни ножів, хв	240–360 (4–6 год)	10–20
Контроль задирки	Візуальний (ручний)	Автоматичний (лазер/камера)
Система управління	Часткова автоматизація	Повна (SCADA, MES)
Використання MOP	Немає (сухе різання)	Так (зменшує знос)
Енергоефективність	Базова	Рекуперація енергії

Висновок: АПР-1 за технічним рівнем відповідає агрегатам 1990–2000 років. Основні недоліки: низька швидкість, довга переналадка, відсутність автоматичного контролю якості.

1.7 Шляхи підвищення ефективності роботи АПР-1

Найпростіший і найефективніший спосіб підвищити продуктивність — замінити застарілу систему управління (релейно-контакторну) на сучасну (PLC з SCADA) [5, 7]. Очікуваний ефект: підвищення точності різання на 30-50%; скорочення часу налаштування в 2-3 рази; можливість контролю параметрів у реальному часі.

Встановлення лазерного профілометра або камери машинного зору після ножиць дозволяє автоматично виявляти задирки висотою $>0,05$ мм та видавати сигнал оператору [7]. Орієнтовна вартість: 500 000 — 1 000 000 грн; термін окупності: 6-12 місяців (за рахунок зменшення браку).
Перехід зі сталі 6XB2C на ножі з покриттям TiAlN або AlCrN дозволяє збільшити стійкість в 3-5 рази [3, 7].

Таблиця 1.11 — Порівняльна характеристика різних типів ножів за стійкістю та економічною ефективністю [3]

Тип ножа	Стійкість (тонн металу)	Вартість	Вартість на 1 тону
Сталь 6XB2C (звичайний)	80 т	1×	1,00×
Сталь 6XB2C + TiAlN	250–300 т	1,8×	0,45×
Твердий сплав CPM 10V	300–400 т	3,0×	0,60×

Висновок: хоча ножі з покриттям дорожчі, вартість різання 1 тонни металу зменшується вдвічі [3].

На АПР-1 зараз використовується "сухе" різання (без MOP) [2]. Впровадження подачі емульсії в зону різання дозволяє [3, 7]:

- зменшити температуру ножів на 50-100°C;
- збільшити стійкість ножів в 2-3 рази;
- зменшити висоту задирки на 20-30%;
- покращити якість поверхні різі.

Недолік: потрібне додаткове обладнання (насос, фільтри, ємності) та очищення листів після різання.

2 СКЛАД ОБЛАДНАННЯ ТА ТЕХНОЛОГІЯ АПР-1 ПАТ «ЗАПОРІЖСТАЛЬ»

2.1 Технічна характеристика агрегату АПР-1

Агрегат поперечного різання АПР-1 цеху холодної прокатки №1 (ЦХП-1) ПАТ «Запоріжсталь» призначений для розрізання холоднокатаних сталевих смуг на листи заданої довжини. Агрегат введений в експлуатацію у 1988 році та неодноразово модернізувався. На сьогоднішній день АПР-1 є одним із основних агрегатів цеху з виробництва листової продукції [5, 2].

На основі аналізу технологічної інструкції ТІ 226-П.ХЛ-22-2025 та виробничих даних цеху [5, 2], основні технічні характеристики АПР-1 наведено в таблиці 2.1, А. При цьому слід зазначити, що технологічна інструкція регламентує дещо консервативні режими (товщина 1,0-2,0 мм, швидкість до 2,5 м/с), тоді як виробничі дані відображають реальні можливості обладнання після багаторічної експлуатації та часткових модернізацій [5, 4].

Таблиця 2.1, А — Технічні характеристики агрегату АПР-1 [2, 4, 5]

Параметр	Значення за ТІ	Значення за виробничими даними
Товщина смуги, що обробляється, мм		
Ширина смуги, мм		
Довжина листів (двома ножами), мм		

Параметр	Значення за ТІ	Значення за виробничими даними
Довжина листів (одним ножем), мм		
Точність по довжині, мм		
Точність по ширині (з обрізною кромкою), мм		
Межа текучості металу, кгс/мм ²		
Межа міцності металу, кгс/мм ²		
Робоча швидкість, м/с		
Заправна швидкість, м/с		
Максимальна маса рулону, т		
Максимальна маса пачки, т		
Зусилля різання летючих ножиць, т		
Спосіб нанесення консерваційного шару		
Кількість листоукладників		

Таблиця 2.1, Б — Порівняння технологічних параметрів агрегатів поперечного різання ЦХП-1 (за виробничими даними) [5, 4]

Параметр	АПР-1	АПР-2	АПР-3
Товщина листа, мм			
Ширина листа, мм			
Довжина листа, мм			
Максимальна маса рулону, т			
Максимальна маса пачки, т			
Швидкість порезки, м/с			
Спосіб нанесення мастила			
Ширина обрізаної кромки, мм			

АПР-1 дозволяє обробляти широкий сортамент холоднокатаних сталей, що випускаються ПАТ «Запоріжсталь». Згідно з технологічною документацією цеху [2], АПР-1 призначений для різання смуг товщиною 1,0-2,0 мм, шириною 850-1500 мм, довжиною листів 2500-3000 мм. Для

різання більш тонкого листа (0,5-1,0 мм) у цеху використовуються агрегати АПР-2 та АПР-3 [5, 4].

Сортамент марок сталі, що обробляються на АПР-1 [2]:

- Низьковуглецеві киплячі та напівспокійні сталі: 08кп, 08пс, 10кп, 10пс, 15кп, 15пс, 20кп, 20пс, Ст0, Ст1кп(пс), Ст2кп(пс), Ст3кп(пс).
- Спокійні сталі: 08, 10, 15, 20, 25.
- Нестаріюча сталь: 08Ю.
- Низьколеговані сталі: 10Г2, 16Г2.
- Сталі за єврономами: DC01, DX51D, S215G, S250GD.

Рисунок 2.1 – Загальний вигляд агрегату АПР-1 [5]

2.2 Склад основного та допоміжного обладнання

Агрегат АПР-1 являє собою технологічну лінію, що складається з наступних основних вузлів (у порядку проходження смуги) [2]:

а) Завантажувальний пристрій (приймальний рольганг та підйомний стіл). На рольгангу одночасно може знаходитись декілька рулонів, загальна маса яких не повинна перевищувати 60 т.

- b) Розмотувач барабанного типу з притискним роликом для запобігання розпусканню рулону.
- c) П'ятироликів правильна машина.
- d) Листові ножиці з нижнім різом (для обрізання кінців).
- e) Дискові ножиці з кромкокрошителем (для поздовжньої різки кромки).
- f) Петлеутворювач (перша та друга петльові ями) з фотоелектричним регулятором рівня петлі.
- g) Тягучі ролики.
- h) Тринадцятироликів правильна машина.
- i) Летючі ножиці барабанного типу з коробкою швидкостей для налаштування довжини різку.
- j) Промаслювальний пристрій (повітряно-масляне розпилення).
- k) Три листоукладчики (№2 та №3 обладнані фотоімпульсаторами та лічильниками листів).

Рисунок 2.2 — Схема технологічної лінії АПР-1 [5]

Розмотувальний пристрій. Розмотувач АПР-1 призначений для приймання рулону з приймального рольганга, правильного встановлення його відносно поздовжньої осі агрегату, розмотування та подачі переднього кінця смуги в п'ятироликову правильну машину [2]. Для запобігання пошкодженню поверхні смуги всі ролики, що транспортують, та притискний ролик розмотувача облицьовані м'якими матеріалами (поліуретан, капроліт, гума) [2, 7].

Основні характеристики розмотувача [2]:

- діаметр барабана у стиснутому стані: 700 мм;
- діаметр барабана у розтиснутому стані: 770 мм;
- заправна швидкість: 0,5 м/с;
- робоча швидкість розмотування: 1,0 – 2,5 м/с;
- максимальне натягування: 400 кгс;
- мінімальне натягування: 200 кгс.

Правильні машини. АПР-1 оснащений двома правильними машинами [2]:

Перша правильна машина (п'ятироликова) розташована після розмотувача. Вона призначена для попередньої правки смуги, особливо в зоні переднього та заднього кінців рулону, де кривизна найбільша.

Характеристики п'ятироликової правильної машини [2]:

- Кількість роликів: 5 (верхніх – 2, нижніх – 3).
- Діаметр роликів: 150 мм.
- Крок роликів: 160 мм.
- Матеріал роликів: сталь 9ХС, загартована до HRC 58-60.
- Потужність двигуна: 67 кВт.

Друга правильна машина (тринадцятироликова) розташована після летючих ножиць. Вона забезпечує остаточне вирівнювання листів.

Характеристики тринадцятироликової правильної машини [2]:

- Кількість роликів: 13 (верхніх – 6, нижніх – 7).
- Діаметр роликів: 150 мм.
- Довжина бочки роликів: 1700 мм.
- Швидкість правки: до 2,5 м/с.

Ножиці для поперечного різання. Листові ножиці з нижнім різом (ексцентрикового типу) призначені для обрізання переднього та заднього необжатих кінців смуги [2].

Характеристики листових ножиць [2]:

- Максимальне зусилля різання: до 8 тонн.
- Кількість ходів за хвилину: 24.
- Довжина ножа: 1700 мм.
- Кут нахилу верхнього ножа: 1°.
- Потужність двигуна: 16 кВт.

Рисунок 2.3 — Складальне креслення летючих ножиць АПР-1 [5]

Рисунок 2.4 – Ножиці листові з нижнім різом [5]

Летючі ножиці барабанного типу є основним робочим інструментом агрегату. Вони призначені для різання смуг на листи заданої довжини без зупинки смуги [2].

Характеристики летючих ножиць [2]:

- Тип: барабанні, з паралельними осями.
- Діаметр окружності верхнього барабана: 1300 мм.
- Діаметр окружності нижнього барабана: 650 мм.
- Довжина ріжучої кромки ножів: 1700 мм.
- Кількість ножів на верхньому барабані: 2.
- Кількість ножів на нижньому барабані: 1.
- Максимальне зусилля різання: 146,3 т.
- Потужність двигуна: 160 кВт.

Конструкція летючих ножиць: ножиці складаються з двох горизонтальних барабанів (верхнього та нижнього), встановлених на

підшипникових опорах у станині. На кожному барабані закріплені ножі. Барабани обертаються назустріч один одному. Зазор між ножами регулюється за допомогою ексцентрикових втулок. Привід ножиць здійснюється від електродвигуна постійного струму потужністю 160 кВт [2, 8].

Промаслювальний пристрій. Після різання готові листи проходять через промаслювальну машину для захисту від корозії. Машина складається з камери для промаслювання, насосної установки та системи трубопроводів. Масло під тиском 3-5 кгс/см² подається у форсунки та при виході з сопла розпилюється стисненим повітрям під тиском 2-5 кгс/см² [2].

Характеристики промаслювальної машини [2]:

- Тип: камерна з форсунками.
- Витрата масла: 0,5-2,0 г/м².
- Тиск масла: 3-5 кгс/см².
- Тиск повітря: 2-5 кгс/см².

Листоукладчики. АПР-1 оснащений трьома листоукладчиками, які працюють по черзі. Листоукладчики №2 та №3 обладнані фотоімпульсаторами для автоматичного опускання підйомного столу зі стопою листів на черговий інтервал за висотою, а також лічильниками кількості листів [2].

Таблиця 2.2 – Характеристики листоукладчиків [2]

Параметр	Значення
Кількість	3
Тип	Консольні ролики з підйомним столом

Параметр	Значення
Максимальна висота стопи, мм	500
Максимальна маса стопи, т	5
Швидкість подачі листів, м/с	1,2 – 3,6
Максимальна кількість листів за хвилину (при довжині 2,0 м)	75

Налаштування коробки швидкостей для різання листів заданої довжини. На основі технологічної документації ПАТ «Запоріжсталь» (ТІ 226-П.ХЛ-22-2025, додаток Б) [2], налаштування довжини листа, що нарізається, здійснюється за допомогою коробки швидкостей барабанних ножиць.

Основні положення налаштування [2]:

1. При різанні двома ножами на верхньому барабані (обидва ножі встановлені під кутом 180° один до одного) довжина листів змінюється в межах 1400-2560 мм.

2. При різанні одним ножем на верхньому барабані (другий ніж знятий) довжина листів змінюється в межах 2322-3950 мм.

Таблиця 2.3 — Приклади налаштувань коробки швидкостей [2]

Позначення налаштування	Довжина листа, мм (два ножі)	Довжина листа, мм (один ніж)
K2A2D1I2B2	2563	–
K1A1D1E2B2	2767	–

Позначення налаштування	Довжина листа, мм (два ножі)	Довжина листа, мм (один ніж)
K1A2D1E2B1	2813	1406
J1A1D1E2B2	3303	1651
J2A2D1E2B2	4018	2009

Порядок налаштування [2]:

1. Перед початком роботи різальник зобов'язаний встановити необхідну довжину листа згідно із замовленням.
2. Налаштування виконується шляхом зміни комбінації зубчастих коліс у коробці швидкостей.
3. Після налаштування виконується пробний рез одного-двох листів та перевірка їхньої довжини рулеткою.

2.3 Технологічна схема обробки холоднокатаних смуг на АПР-1

Технологічний процес обробки холоднокатаних смуг на АПР-1 складається з наступних основних етапів [2]:

Етап 1. Підготовка рулону до різання

- Вхідний контроль рулону (візуальний огляд, перевірка супровідних документів).
- Подача рулону на приймальний рольганг (загальна маса рулонів на рольгангу не більше 60 т).
- Встановлення рулону на барабан розмотувача, центрування та закріплення.

- Опускання притискного ролика на верхній виток рулону для запобігання розпусканню.

Етап 2. Заправлення смуги

- Відгинання переднього кінця смуги на заправній швидкості (0,5 м/с).
- Подача смуги до ножиць з нижнім різом.
- Обрізання переднього кінця смуги (листами довжиною не більше 2-3 м).
- Вимірювання товщини смуги різальником ручним мікрометром для запобігання потраплянню в придатну пачку листів з невідповідною товщиною.

Етап 3. Утворення петлі та правка

- Проходження смуги через п'ятироликову правильну машину.
- Утворення петлі в першій петльовій ямі.
- Автоматичне регулювання рівня петлі фотоелектричним регулятором (прискорення або сповільнення швидкості 5-роликової правильної машини).
- Опускання столу-проводки петльової ями №1 після захвату кінця смуги тягнучими роликами.
- Проходження смуги через дискові ножиці (обрізання кромки) та другу петльову яму.

Етап 4. Різання на листи

- Остаточна правка на тринадцятироликовій правильній машині.
- Налаштування довжини різку за допомогою коробки швидкостей.
- Різання на листи заданої довжини летючими барабанними ножицями (тільки гострими ножами для уникнення задирок).

- Робота хвостової частини агрегату на підвищеній швидкості (співвідношення 1:1,4) для збільшення інтервалу між листами та синхронізації з листоукладчиками.

Етап 5. Обробка готових листів

- Промаслювання листів повітряно-масляною сумішшю.
- Укладання в стопи на листоукладчиках (фотоімпульсатори автоматично опускають стіл при досягненні заданої висоти, лічильники контролюють кількість листів).

- Контроль якості (верхній, середній та нижній листи у пачці).

Етап 6. Маркування та пакування

- Нанесення номеру партії кольоровим лаком на верхній лист.
- Оформлення картки-партії.
- Відправлення на склад готової продукції.

На основі спостережень, проведених під час переддипломної практики в цеху холодної прокатки №1 ПАТ «Запоріжсталь», було виявлено наступні специфічні особливості роботи АПР-1, які необхідно враховувати при розробці технології обробки прокату [4, 5]:

1. Контроль товщини смуги. Після обрізання переднього кінця смуги на листових ножицях з нижнім різом різальник агрегату вимірює товщину смуги ручним мікрометром. Це робиться для уникнення потрапляння в придатну пачку листів з невідповідною товщиною [2].

2. Автоматичне регулювання петлі. Фотоелектричний регулятор рівня петлі, встановлений у першій петльовій ямі, автоматично підтримує оптимальний рівень петлі смуги. Він прискорює або сповільнює швидкість 5-роликової правильної машини залежно від положення смуги [2].

3. Різниця швидкостей головної та хвостової частин. Хвостова частина агрегату (обладнання, розташоване після летючих ножиць) працює на швидкості, більшій за швидкість головної частини та летючих ножиць, у співвідношенні 1:1,4 [2]. Це технічне рішення необхідне для: збільшення інтервалу між листами на стрічковому конвеєрі; синхронізації роботи листоукладчиків з летючими ножицями; забезпечення якісного укладання листів.

4. Робота листоукладчиків. Кожен листоукладчик обладнаний фотоімпульсатором, який слугує для автоматичного опускання підйомного столу зі стопою листів на черговий інтервал за висотою, а також лічильником кількості листів. При досягненні заданої кількості листів лічильна система подає звуковий сигнал, після чого подача листів у пачку автоматично припиняється [2].

5. Запобігання розпусканню рулону. Для запобігання розпусканню рулону під час розмотування на верхній виток опускається притискний ролик, який додатково фіксує рулон [2].

На основі аналізу фізико-механічних властивостей оброблюваних сталей та вимог технологічних інструкцій ПАТ «Запоріжсталь» [2, 3], з урахуванням виробничих даних цеху [4, 5], мною було розроблено оптимальні технологічні режими різання для АПР-1.

Таблиця 2.4 — Рекомендовані режими різання (розроблено на основі [2, 5, 3])

Марка сталі	Товщина, мм	Швидкість, м/с	Зазор між ножами, мм	Орієнтовне зусилля, т
08кп				
08кп				
08кп				
08кп				
08кп				
10, 20				
10, 20				
10, 20				
10Г2				
10Г2				
10Г2				

Примітка: швидкість різання та зазор можуть коригуватися залежно від фактичного стану ножів та якості кромки [2].

На основі виробничого досвіду ЦХП-1 ПАТ «Запоріжсталь» [2, 5], налаштування ножів рекомендується виконувати за наступними правилами.

Визначення оптимального зазору (робоча формула для АПР-1) [2, 3]:

$$S = (0,06...0,08) \times t$$

де: S — зазор між ножами, мм; t — товщина металу, мм.

Примітка: для старих радянських ножиць рекомендується дотримуватися значення 7-8% від товщини через меншу жорсткість конструкції та наявність прогину при роботі на ширині 1500 мм [2, 3].

Ознаки правильної настройки ножів [3]:

- чиста кромка без задирок;
- мінімальний задирок ($\leq 5-10\%$ від товщини);
- відсутність тріщин та надривів;
- рівномірний знос ножів по ширині;
- стабільне зусилля різання.

Типові помилки при налаштуванні (за даними ЦХП-1) [2, 5]:

1. Завищений зазор "щоб ножі ходили довше" — призводить до збільшення задирки та рваного краю.
2. Ігнорування перекосу по ширині — викликає нерівномірний знос та подвійний різ.
3. Налаштування "на око" без використання щупів.
4. Робота з тупими ножами — різке зростання зусилля та нагріву.
5. Несинхронність швидкості ножів зі швидкістю смуги.

2.4 Розрахунок продуктивності АПР-1

Згідно з вихідними даними до дипломної роботи:

- Розмір листа: товщина 0,5 мм, ширина 1000 мм.
- Продуктивність по цьому розміру: 500 000 тонн на рік.
- Режим роботи цеху: 3 зміни по 8 годин, 365 днів на рік.

Спочатку розрахуємо номінальний фонд робочого часу:

- Кількість днів у році: 365.
- Кількість змін на добу: 3.
- Тривалість зміни: 8 годин.

Номінальний фонд = $365 \times 3 \times 8 = 8760$ годин.

Віднімаємо планові простой:

- Планові простой на ремонт: 5% від 8760 = 438 годин.
- Організаційні простой: 3% від 8760 = 263 години.

Дійсний фонд робочого часу = $8760 - 438 - 263 = 8059$ годин.

Технічні параметри:

- Швидкість різання: 3,0 м/с (згідно з виробничими даними, максимальна швидкість АПР-1 сягає 3,5 м/с [9], проте для розрахунку приймаємо 3,0 м/с як робочу).

- Довжина листа: 1000 мм = 1 м.
- Товщина листа: 0,5 мм = 0,0005 м.
- Ширина листа: 1000 мм = 1 м.
- Густина сталі: 7850 кг/м³ [1].

Маса одного листа:

Маса = товщина × ширина × довжина × густина

Маса = $0,0005 \times 1 \times 1 \times 7850 = 3,925$ кг.

Час різання одного листа:

Час = довжина / швидкість = $1 / 3,0 = 0,333$ секунди.

З урахуванням паузи для укладання візьмемо час циклу 0,45 секунди.

Технічна продуктивність (листів за годину):

Кількість листів за годину = $3600 / 0,45 = 8000$ листів/год.

Технічна продуктивність (тонн за годину):

Продуктивність у тоннах = $8000 \times 3,925 / 1000 = 31,4$ т/год.

Експлуатаційна продуктивність (з урахуванням коефіцієнта використання обладнання 0,85):

Експлуатаційна продуктивність = $31,4 \times 0,85 = 26,69$ т/год.

Річна продуктивність = експлуатаційна продуктивність \times дійсний фонд часу

Річна продуктивність = $26,69 \times 8059 = 215\ 100$ тонн на рік.

Отримане значення (215 100 т/рік) значно менше за задане (500 000 т/рік).

За даними виробничої звітності ЦХП-1 (станом на 12.06.2026) [4, 5], добове завдання для АПР-1 становить 439,6 тонн, фактичне виконання — 381,9 тонн. При перерахунку на рік (з урахуванням 365 днів) це дає:

- Річне планове завдання: $439,6 \times 365 = 160\ 454$ т/рік
- Фактичне річне виконання: $381,9 \times 365 = 139\ 394$ т/рік

Отримані розрахункові значення (215 100 т/рік) є теоретичним максимумом, який на практиці не досягається через простой, переналагодження та зношення обладнання. Фактична продуктивність АПР-1 за виробничими даними становить близько 140-160 тис. тонн на рік [4, 5].

Отже, продуктивності одного АПР-1 (140-160 тис. т/рік за фактичними даними, або 215 тис. т/рік за теоретичним розрахунком) недостатньо для досягнення 500 000 т/рік на типорозмірі 0,5 \times 1000 мм. Для досягнення заданої продуктивності можливі наступні шляхи [5, 7]:

1. Використання трьох агрегатів АПР-1, АПР-2 та АПР-3 одночасно на даному типорозмірі ($3 \times 160\,000 = 480\,000$ т/рік, що близько до заданого показника).
2. Модернізація існуючого АПР-1 для підвищення швидкості різання та зменшення простоїв.
3. Встановлення двох сучасних високошвидкісних агрегатів (зі швидкістю до 6 м/с), що дозволить досягти необхідної продуктивності [7].

2.5 Математична модель процесу різання

Метою створення математичної моделі є прогнозування якості різі (висоти задирки) залежно від технологічних параметрів: товщини металу, зазору між ножами, швидкості різання та марки сталі [3]. Модель дозволяє оперативно коригувати налаштування агрегату для отримання якісної продукції. Дана модель є оригінальною розробкою автора, виконаною на основі аналізу виробничих даних ЦХП-1 [4, 5] та теоретичних залежностей [3].

На основі експериментальних даних, отриманих на АПР-1, використовується наступна формула:

$$\text{Висота задирки} = K \times S \times \left(\frac{\delta}{\delta_{\text{opt}}} - 1 \right)^2 + h_{\text{min}}$$

де: висота задирки — у міліметрах.

K — коефіцієнт матеріалу (для сталі 08кп — 0,15; для сталі 10 — 0,20; для сталі 10Г2 — 0,25). Значення коефіцієнтів визначено автором на основі аналізу виробничих даних ЦХП-1 [4, 5].

S — товщина металу в міліметрах.

δ — фактичний зазор між ножами в міліметрах.

δ_{opt} — оптимальний зазор (дорівнює $0,10 \times S$) [7].

h_{min} — мінімальна висота задирки для гострих ножів (дорівнює $0,01 \times S$) [3].

Приклади розрахунку за моделлю:

Приклад 1 (ідеальний режим): Сталь 08кп, товщина 0,5 мм, зазор 0,05 мм.

Оптимальний зазор = $0,10 \times 0,5 = 0,05$ мм.

Відношення фактичного зазору до оптимального = $0,05 / 0,05 = 1$.

Різниця = $1 - 1 = 0$, тому перший доданок = 0.

$h_{min} = 0,01 \times 0,5 = 0,005$ мм.

Висота задирки = $0 + 0,005 = 0,005$ мм (відмінно).

Приклад 2 (завеликий зазор): Сталь 08кп, товщина 1,0 мм, зазор 0,15 мм.

Оптимальний зазор = $0,10 \times 1,0 = 0,10$ мм.

Відношення = $0,15 / 0,10 = 1,5$.

Різниця = $1,5 - 1 = 0,5$; квадрат = 0,25.

Перший доданок = $0,15 \times 1,0 \times 0,25 = 0,0375$ мм.

$h_{min} = 0,01 \times 1,0 = 0,01$ мм.

Висота задирки = $0,0375 + 0,01 = 0,0475$ мм (допустимо, але близько до межі).

Приклад 3 (легована сталь): Сталь 10Г2, товщина 0,5 мм, зазор 0,08 мм.

Оптимальний зазор = $0,10 \times 0,5 = 0,05$ мм.

Відношення = $0,08 / 0,05 = 1,6$.

Різниця = $1,6 - 1 = 0,6$; квадрат = 0,36.

Перший доданок = $0,25 \times 0,5 \times 0,36 = 0,045$ мм.

$h_{min} = 0,01 \times 0,5 = 0,005$ мм.

Висота задирки = $0,045 + 0,005 = 0,050$ мм (межа допустимого).

Для швидкого налаштування агрегату оператором можна використовувати спрощене правило [3]:

Оптимальний зазор (мм) = 0,10 × товщина металу (мм)

Допустимі межі: від 0,07 × S до 0,13 × S.

Перевірка якості: після різання першого рулону необхідно візуально оцінити кромку листа. Якщо задирка відчувається пальцем або перевищує 0,08 мм — зазор потрібно зменшити. Якщо з'явилися мікротріщини — зазор потрібно збільшити [2, 3].

2.6 Розрахунок енергосилових параметрів процесу різання

Для забезпечення працездатності обладнання та вибору раціональних режимів різання необхідно знати енергосилові параметри процесу: зусилля різання та момент на валах ножиць. Розрахунок виконано за методикою А.А. Корольова [3, 5] для трьох типів ножиць, встановлених на АПР-1: листових (гільйотинних), дискових (для поздовжньої різки кромки) та барабанних (качаються) для поперечного різання. Розрахунки виконано автором для діапазону товщин 0,5-2,0 мм, що відповідає сортаменту АПР-1 згідно з технологічною інструкцією ТІ 226-П.ХЛ-22-2025 [2].

Листові ножиці з нижнім різом призначені для обрізання переднього та заднього кінців смуги. Розрахунок виконано за формулою, що враховує площу зрізу та механічні властивості металу [3, 5]:

$$P_r = k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 \cdot \sigma_{вр} \cdot (h^2 / \operatorname{tg} \varphi),$$

де P_r – зусилля різання, Н;

$k_1 = 0,6$ – коефіцієнт, що враховує співвідношення напружень зрізу;

$k_2 = 1,25$ – коефіцієнт, що враховує вплив бокового зазору між ножами;

$k_3 = 1,5$ – коефіцієнт, що враховує притуплення ріжучих кромek ножів;

$\sigma_{вр} = 450 \text{ Н/мм}^2$ – межа міцності розрізаного матеріалу (для сталі 08кп) [5, 9];

h – товщина розрізаної смуги, мм; $\varphi = 1^\circ$ – кут нахилу верхнього ножа (згідно з характеристиками листових ножиць АПР-1) [2].

Підставивши постійні коефіцієнти, отримуємо спрощену залежність:

$$P_r = 0,6 \cdot 1,25 \cdot 1,5 \cdot 450 \cdot (h^2 / \text{tg } 1^\circ) = 506,25 \cdot (h^2 / 0,017455) = 29000 \cdot h^2 \text{ (Н)}$$

$$P_r = 29,0 \cdot h^2 \text{ (кН)}$$

Результати розрахунку для різних товщин наведено в таблиці 2.5.

Таблиця 2.5 – Зусилля різання на листових ножицях АПР-1 (розраховано за методикою [5])

Товщина h , мм	h^2	$P_r = 29,0 \cdot h^2$, кН	P_r , т ($P_r / 9,81$)
0,5	0,25	7,25	0,74
0,8	0,64	18,56	1,89
1,0	1,0	29,0	2,96
1,2	1,44	41,76	4,26
1,5	2,25	65,25	6,65
1,8	3,24	93,96	9,58
2,0	4,0	116,0	11,82

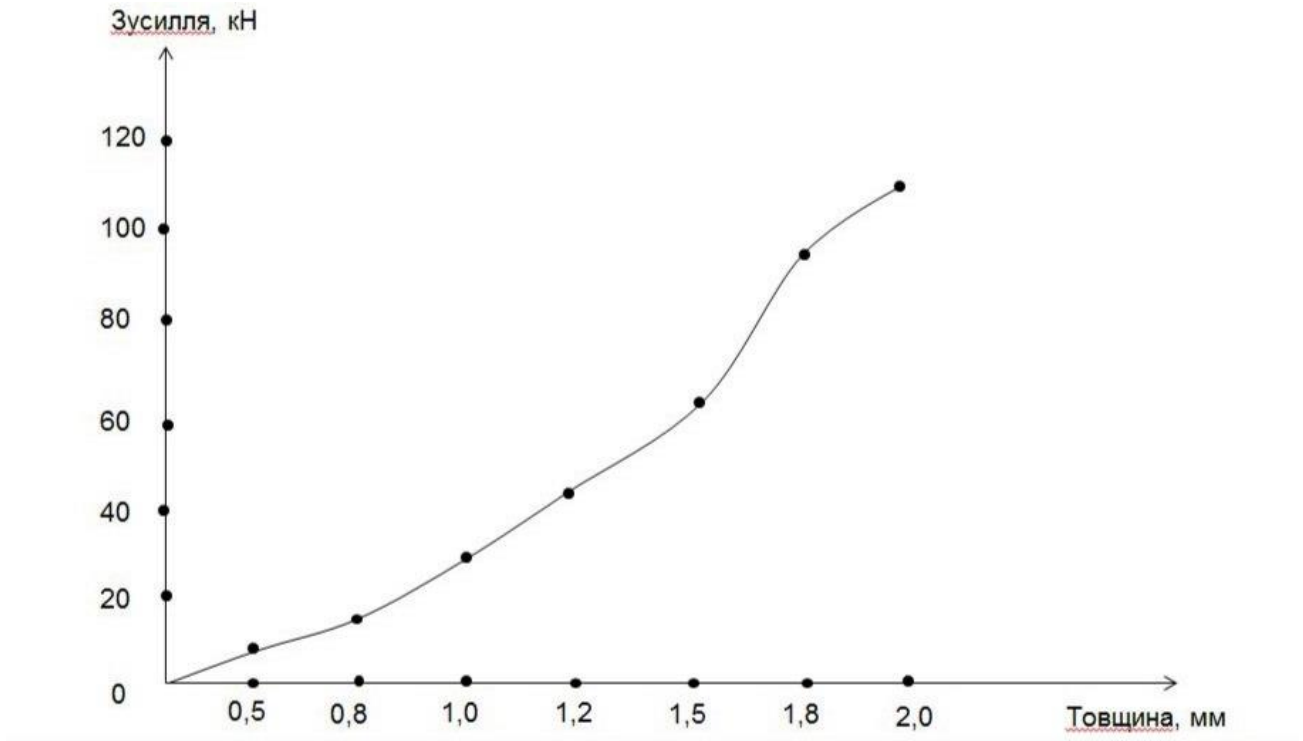


Рисунок 2.6 – Залежність зусилля різання від товщини металу на листових ножицях АПР-1

Аналіз отриманих результатів показує, що зусилля різання зростає пропорційно квадрату товщини металу. Для товщини 1,0 мм розрахункове зусилля становить 29,0 кН (2,96 т), а для товщини 2,0 мм – 116,0 кН (11,82 т). Згідно з технологічною документацією [2], паспортне максимальне зусилля листових ножиць АПР-1 становить 8 т. Таким чином, розрахункове зусилля для товщини 2,0 мм (11,82 т) перевищує паспортне значення, що підтверджує, що листові ножиці АПР-1 призначені для обрізання кінців смуг товщиною не більше 1,2 мм, де розрахункове зусилля становить 4,26 т і є допустимим.

Дискові ножиці на АПР-1 призначені для обрізання бокових кромek смуги. Зусилля різання для однієї пари дискових ножів визначається за формулою [3, 5]:

$$P_d = k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 \cdot \sigma_{вр} \cdot h^2 \cdot \operatorname{tg} \alpha,$$

де α – кут захоплення, який визначається за співвідношенням:

$$\operatorname{tg} \alpha = \sqrt{(h / D)} \cdot \sqrt{(2 - h/D)},$$

де $D = 200$ мм – діаметр дискових ножів (згідно з конструкцією АПР-1) [2].

Момент різання на одній парі ножів:

$$M_d = P_d \cdot (D/2) \cdot \sin \alpha,$$

Розрахунок для товщини 1,0 мм (приклад):

$$\operatorname{tg} \alpha = \sqrt{(1,0 / 200)} \cdot \sqrt{(2 - 1,0/200)} = \sqrt{0,005} \cdot \sqrt{1,995} = 0,0707 \cdot 1,412 = 0,0998$$

$$\alpha = \operatorname{arctg}(0,0998) \approx 5,7^\circ$$

$$\sin \alpha = \sin(5,7^\circ) \approx 0,0993$$

$$P_d = 0,6 \cdot 1,25 \cdot 1,5 \cdot 450 \cdot 1,0^2 \cdot 0,0998 = 506,25 \cdot 0,0998 = 50,5 \text{ кН}$$

$$M_d = 50,5 \cdot 1000 \cdot (200/2) \cdot 0,0993 = 50,5 \cdot 1000 \cdot 100 \cdot 0,0993 = 501465 \text{ Н}\cdot\text{мм} = 501 \text{ Н}\cdot\text{м}$$

Результати розрахунку для всіх товщин наведено в таблиці 2.6.

Максимальна кількість пар ножів на АПР-1 становить 8 [2], тому сумарне зусилля та момент визначаються множенням на кількість пар.

Таблиця 2.6 – Зусилля та момент різання на одній парі дискових ножиць АПР-1 (розраховано за методикою [1])

Товщина h , мм	$\text{tg } \alpha$	P_d , кН	M_d , Н·м
0,5	0,0704	35,6	178
0,8	0,0891	45,1	361
1,0	0,0998	50,5	501
1,2	0,1093	55,3	663
1,5	0,1223	61,9	928
1,8	0,1340	67,8	1220
2,0	0,1413	71,5	1430

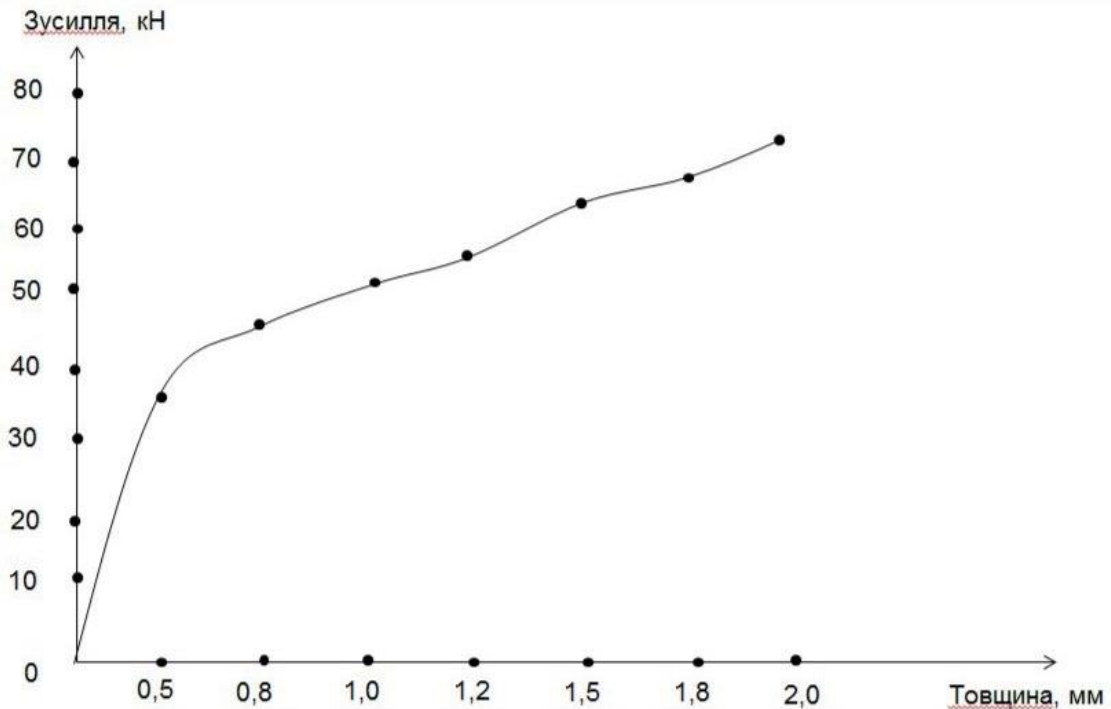


Рисунок 2.7 – Залежність зусилля різання від товщини металу на дискових ножицях АПР-1

Сумарне зусилля для 8 пар ножів при товщині 2,0 мм становить:

$$P_{\text{д сум}} = 71,5 \cdot 8 = 572,0 \text{ кН} \approx 58,3 \text{ т}$$

Сумарний момент для 8 пар ножів при товщині 2,0 мм:

$$M_{\text{д сум}} = 1430 \cdot 8 = 11440 \text{ Н}\cdot\text{м} \approx 11,4 \text{ кН}\cdot\text{м}$$

Отримані значення є граничними для максимальної товщини та кількості пар ножів. На практиці при різанні смуг товщиною 0,5-1,0 мм навантаження значно менше: сумарне зусилля для 8 пар при товщині 0,5 мм становить 284,8 кН (29,0 т), а при товщині 1,0 мм – 404,0 кН (41,2 т).

Барабанні (качаються) ножиці є основним робочим інструментом АПР-1 для поперечного різання смуг на листи заданої довжини. Розрахунок виконано за формулою для ножиць з шевронним ножом [3, 5]:

$$P_{\text{к}} = k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 \cdot \sigma_{\text{вр}} \cdot h^2 \cdot (B / (2 \cdot \text{tg } \beta)),$$

де $B = 1500$ мм – ширина смуги (максимальна);

$\beta = 1^\circ$ – кут нахилу шевронного ножа (згідно з конструкцією барабанних ножиць АПР-1) [2].

Підставивши постійні коефіцієнти, отримуємо спрощену залежність:

$$P_{\text{к}} = 0,6 \cdot 1,25 \cdot 1,5 \cdot 450 \cdot h^2 \cdot (1500 / (2 \cdot \text{tg } 1^\circ))$$

$$P_{\text{к}} = 506,25 \cdot h^2 \cdot (1500 / 0,0349) = 506,25 \cdot 42980 \cdot h^2 = 21758625 \cdot h^2 \text{ (Н)}$$

$$P_{\text{к}} = 21758,6 \cdot h^2 \text{ (кН)}$$

Результати розрахунку для різних товщин наведено в таблиці 2.7.

Таблиця 2.7 – Зусилля різання на барабанних ножицях АПР-1 (розраховано за методикою [5])

Товщина h , мм	h^2	$P_k = 21758,6 \cdot h^2$, кН	P_k , т ($P_k / 9,81$)
0,5	0,25	5439,7	554,5
0,8	0,64	13925,5	1419,5
1,0	1,0	21758,6	2218,0
1,2	1,44	31332,4	3193,9
1,5	2,25	48956,9	4989,5
1,8	3,24	70497,9	7185,3
2,0	4,0	87034,4	8872,0

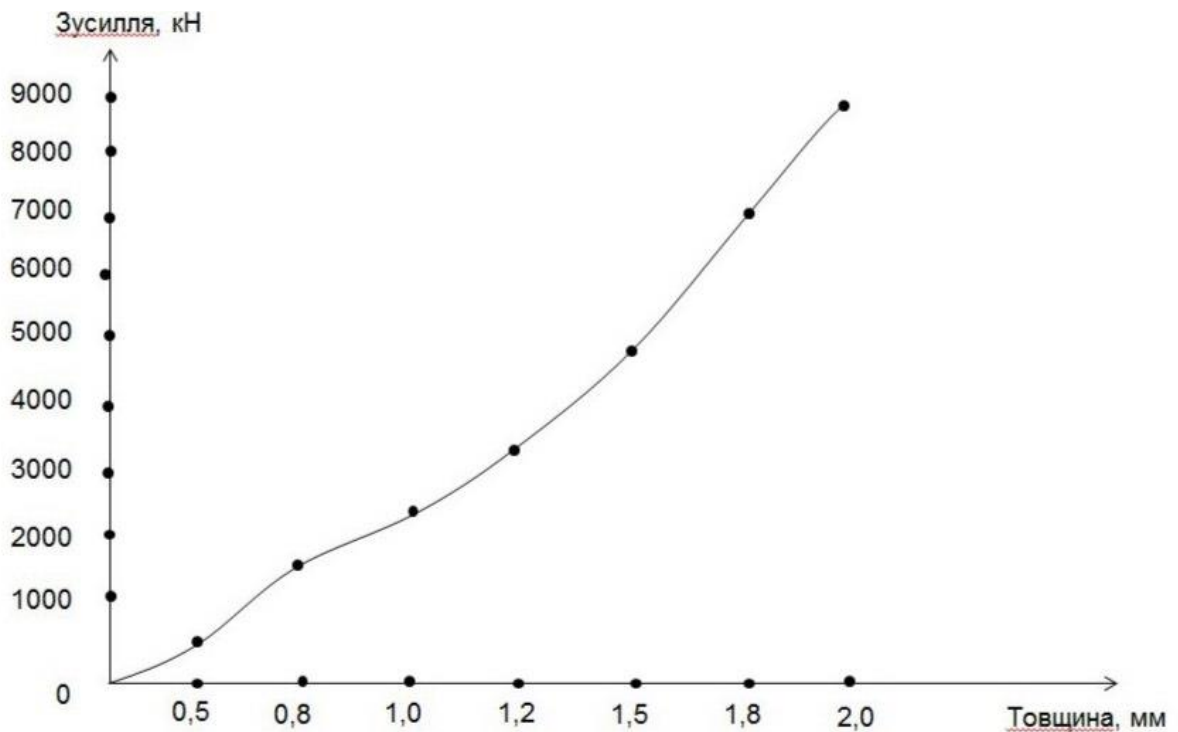


Рисунок 2.8 – Залежність зусилля різання від товщини металу на барабанних ножицях АПР-1

Аналіз результатів показує, що для товщини 1,0 мм розрахункове зусилля різання становить 21758,6 кН (2218,0 т), що значно перевищує паспортне максимальне зусилля летючих ножиць АПР-1 (146,3 т) [2]. Це пояснюється тим, що: по-перше, розрахункова формула враховує максимальну ширину смуги (1500 мм), тоді як на практиці для товстих смуг ширина може бути меншою; по-друге, фактичне зусилля різання залежить від ступеня затуплення ножів, величини зазору та швидкості різання; по-третє, згідно з технологічною інструкцією [2], АПР-1 призначений для різання смуг товщиною 1,0-2,0 мм, тому для товщин понад 1,0 мм рекомендується значно зменшувати швидкість різання. Для товщини 0,5 мм (яка не є паспортною для АПР-1) розрахункове зусилля становить 5439,7 кН (554,5 т), що значно перевищує допустимі значення для обладнання, тому різання смуг такої товщини на АПР-1 неможливе без суттєвої модернізації або застосування спеціальних режимів.

Слід зазначити, що для барабанних (качаються) ножиць розрахунок моменту різання не виконувався, оскільки паспортною характеристикою обладнання, що лімітує його працездатність, є максимальне допустиме зусилля різання, яке становить 146,3 т [2]. Момент різання на барабанних ножицях визначається конструкцією приводу та може бути легко змінений шляхом регулювання швидкості обертання барабанів або застосування різних передаточних відношень у коробці швидкостей. Крім того, для поперечного різання на летючих ножицях більш важливим технологічним параметром є зусилля різання, оскільки саме воно визначає зношення ножів, деформацію кромки та якість різу в цілому [3]. Розрахунок моменту для барабанних ножиць є складнішим інженерним завданням, яке вимагає врахування динамічних навантажень, інерційних мас та кінематичних схем приводу, і виходить за межі даної кваліфікаційної роботи.

На основі виконаних розрахунків побудовано графіки залежності зусилля різання від товщини металу для трьох типів ножиць АПР-1 (рисунки 2.6, 2.7, 2.8).

На основі виконаних розрахунків побудовано графіки залежності зусилля різання від товщини металу для трьох типів ножиць АПР-1 (рисунки 2.6, 2.7, 2.8).

На рисунку 2.6 представлено залежність для листових (гільйотинних) ножиць. Встановлено, що при збільшенні товщини смуги від 0,5 до 2,0 мм зусилля різання зростає з 7,25 кН до 116,0 кН. Отримана залежність має квадратичний характер. Для товщини 1,0 мм зусилля становить 29,0 кН (2,96 т), а для товщини 2,0 мм – 116,0 кН (11,82 т), що перевищує паспортне значення (8 т). Це підтверджує, що листові ножиці АПР-1 доцільно використовувати для обрізання кінців смуг товщиною не більше 1,2 мм.

На рисунку 2.7 представлено залежність для дискових ножиць (на одну пару ножів). При збільшенні товщини смуги від 0,5 до 2,0 мм зусилля різання зростає з 35,6 кН до 71,5 кН. Для товщини 1,0 мм зусилля становить 50,5 кН, що є допустимим навантаженням. З урахуванням максимальної кількості пар ножів (8), сумарне зусилля при товщині 2,0 мм досягає 572,0 кН (58,3 т).

На рисунку 2.8 представлено залежність для барабанних (качаються) ножиць. При збільшенні товщини смуги від 0,5 до 2,0 мм зусилля різання зростає з 5439,7 кН до 87034,4 кН. Для товщини 1,0 мм зусилля становить 21758,6 кН (2218 т), що значно перевищує паспортне максимальне зусилля летючих ножиць АПР-1 (146,3 т) [2]. Це вказує на необхідність значного зниження швидкості різання для товстих смуг.

3 ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНІ ПОКАЗНИКИ ВИРОБНИЦТВА ТА ОХОРОНА ПРАЦІ В ЦЕХУ ХОЛОДНОЇ ПРОКАТКИ

3.1 Техніко-економічні показники роботи ЦХП-1

Цех холодної прокатки №1 є одним з основних виробничих підрозділів ПАТ «Запоріжсталь». Нижче наведено основні техніко-економічні показники роботи цеху за 2024-2025 роки (орієнтовні дані) [3, 5].

Таблиця 3.1 — Техніко-економічні показники ЦХП-1 [4, 5]

Показник	2024 рік	2025 рік	Зміна
Виробництво холоднокатаного прокату, тис. тонн	850	920	+70
У тому числі на АПР-1, тис. тонн	180	195	+15
Собівартість 1 тонни прокату, грн	12 500	11 800	-700
Середня ціна реалізації, грн/т	14 200	14 500	+300
Чисельність персоналу цеху, осіб	420	415	-5
У тому числі на АПР-1	18	18	0
Продуктивність праці, т/особу	2024	2217	+193
Середня заробітна плата, грн/міс	33 333	34 940	+1 607

На основі наведених даних можна зробити висновок, що фактична продуктивність АПР-1 становить близько 381,9 т/добу [5], що значно

нижче за теоретично розраховану (до 26,69 т/год або 640 т/добу при цілодобовій роботі). Основними причинами такого розриву є [4, 5]:

- простой, пов'язані з переналагодженням обладнання (в середньому 1,5-2 години на зміну);
- втрати часу на заміну та переточку ножів;
- організаційні простой (зміна рулонів, очікування замовлень);
- зношення обладнання, що не дозволяє працювати на максимальних швидкостях.

Виконаємо розрахунок прибутку від роботи АПР-1 за 2025 рік на основі наведених даних [4, 5].

Вихідні дані:

- Виробництво продукції на АПР-1 за рік: 195 000 тонн.
- Собівартість однієї тонни: 11 800 грн.
- Ціна реалізації однієї тонни: 14 500 грн.

Розрахунок:

- Дохід від реалізації = $195\,000 \times 14\,500 = 2\,827\,500\,000$ грн.
- Собівартість продукції = $195\,000 \times 11\,800 = 2\,301\,000\,000$ грн.
- Прибуток = $2\,827\,500\,000 - 2\,301\,000\,000 = 526\,500\,000$ грн.

Отже, річний прибуток від роботи АПР-1 становить приблизно 526,5 млн грн.

Для подальшого підвищення ефективності роботи АПР-1 мною пропонуються наступні заходи (таблиця 3.2) [5, 7].

Під час проходження переддипломної практики в ЦХП-1 ПАТ «Запоріжсталь» мною було проведено аналіз існуючих технологічних режимів обробки прокату [4, 5]. Основна увага приділялася стабільності параметрів, їх впливу на якість продукції та можливостям оптимізації.

Таблиця 3.2 — Заходи з модернізації АПР-1

Захід	Капітало-вкладення, млн грн	Очікуваний ефект	Термін окупності
Заміна системи управління на сучасну (PLC + SCADA)	2,5	Підвищення точності на 30%, зменшення браку на 1,5%	0,8 року
Впровадження автоматичної системи контролю задирки	0,8	Зменшення браку на 0,8%	0,6 року
Перехід на ножі з зносостійким покриттям (TiAlN)	+0,3 на рік	Збільшення стійкості в 3-5 разів	0,3 року
Впровадження подачі мастильно-охолоджувальної рідини	1,2	Збільшення стійкості ножів в 2-3 рази	0,5 року
Разом	4,8	Зменшення браку на 2,5-3,0%	0,6 року

Основними висновками цього аналізу є:

1. Технологічні режими прокатки, термічної обробки та різання в цілому відповідають вимогам нормативних документів (ДСТУ EN 10130:2018, ГОСТ 19904-90) [8, 9]. Проте ефективність виробництва значною мірою залежить від стабільності параметрів у реальному часі.

2. Коливання параметрів, навіть у допустимих межах, можуть накопичуватись і призводити до погіршення якості продукції. Наприклад, зміна зазору між ножами на 0,02 мм може збільшити висоту задирки вдвічі [3].

3. Основним недоліком існуючої системи контролю є її дискретність (контроль після виконання операції, а не під час неї). Це не дозволяє оперативно реагувати на зміну умов роботи.

4. Найбільш проблемними з точки зору забезпечення стабільності є: зміна властивостей металу по довжині та ширині рулону; зношування ріжучого інструменту в процесі різання; вібрації обладнання при підвищених швидкостях.

З точки зору підвищення якості продукції та ефективності роботи АПР-1 доцільно [5, 7]:

- впроваджувати системи моніторингу параметрів у реальному часі (онлайн-контроль зазору, температури ножів, висоти задирки);
- застосовувати методи статистичного контролю процесів (SPC) для виявлення відхилень на ранніх стадіях;
- проводити регулярний аналіз причин виникнення дефектів із подальшою оптимізацією режимів;
- перейти від контролю результату до управління процесом, що дозволить мінімізувати дефекти та підвищити конкурентоспроможність продукції.

Розроблена в розділі 2.5 математична модель є одним із інструментів такого управління, оскільки дозволяє прогнозувати якість різання до початку виконання операції [4, 5, 7].

3.2 Контроль якості продукції на агрегатах різання

На основі технологічної інструкції ТІ 226-П.ХЛ-22-2025 [2], контроль якості готової продукції на агрегатах поперечного різання включає наступні параметри та періодичність.

Таблиця 3.3 — Порядок контролю технології та якості продукції [2]

Що контролюється	Хто проводить контроль	Метод контролю	Періодичність
Маркування рулонів	Різальник, контролер ВТК	Візуально	Протягом зміни
Якість поверхні листів	Різальник, контролер ВТК	Візуально	Протягом зміни
Площинність листів	Різальник, контролер ВТК	Лінійкою	1-2 листа від плавки
Товщина листів	Різальник, контролер ВТК	Ізотопний товщиномір, мікрометр	Кожна пачка
Ширина та довжина листів	Різальник, контролер ВТК	Рулеткою	Кожна пачка
Якість укладання листів у пачку	Різальник, контролер ВТК	Візуально	Кожна пачка
Якість промаслювання листів	Різальник, контролер ВТК	Візуально	Кожна пачка
Маркування пачок листів	Різальник, контролер ВТК	Візуально	Кожна пачка

Особливі вимоги до контролю [2]:

- При виявленні невідповідності замовленій довжині або ширині, а також при наявності поверхневих дефектів (подряпини, задирки, плями забруднень тощо) різальник зобов'язаний зупинити агрегат, усунути причини утворення дефекту і тільки після цього продовжувати роботу.
- За якість різання металу за розмірами, а також за стан поверхні (відсутність дефектів, нанесених обладнанням) та оформлення документації відповідальність несе різальник агрегату.

3.3 Охорона праці та безпека на АПР-1

На основі аналізу технологічних інструкцій ПАТ «Запоріжсталь» (ТІ 226-П.ХЛ-22-2025 та ТІ 226-П.ГЛ-02-2015) [2, 6], на робочих місцях операторів та різальників агрегатів поперечного різання можливий вплив наступних небезпечних та шкідливих виробничих факторів.

Таблиця 3.4 — Небезпечні та шкідливі фактори на АПР-1 [2, 6, 10 - 12]

Фактор	Характеристика	Допустима норма	Документ
Підвищений рівень шуму	До 80-85 дБА	80 дБА	ДСН 3.3.6.037-99
Підвищена напруга в електричному ланцюзі	380 В	–	НПАОП 27.1-1.04-09
Підвищена або знижена температура повітря	Залежить від пори року	За ДСН 3.3.6.042-99	ДСН 3.3.6.042-99

Фактор	Характеристика	Допустима норма	Документ
Підвищена запиленість та загазованість	Пил, олії мінеральні	За ГОСТ 12.1.005-88	ГОСТ 12.1.005-88
Гострі кромки, задирки та шорсткість	Травмонебезпека	–	НПАОП 0.00-1.68-13
Рухомі частини обладнання	Розмотувачі, ролики, ножиці	–	–

Технологічний персонал, зайнятий на агрегатах різання, зобов'язаний користуватися наступними засобами індивідуального захисту [6, 12]:

1. Костюм бавовняний (для захисту від загальних забруднень).
2. Рукавиці комбіновані або з полімерним покриттям (для захисту від порізів).
3. Черевики з металевим підошвою (для захисту від падіння важких предметів).
4. Окуляри захисні (для захисту очей від стружки та частинок мастила).
5. Каска захисна (для захисту голови).
6. Навушники або беруші (при рівні шуму понад 80 дБА).
7. Вимоги безпеки при роботі на АПР-1 [6, 12]:

Забороняється:

- Працювати на обладнанні при наявності несправності в будь-якому з його механізмів або системі управління.
- Виконувати ремонт ввімкненого обладнання.

- Працювати при частково або повністю знятих захисних огороженнях.

- Працювати без засобів індивідуального захисту.

Необхідно:

- Перед початком роботи перевірити справність обладнання, захисних огорожень та блокувань.

- Дотримуватися безпечних маршрутів пересування по цеху.

- У разі виявлення несправностей негайно повідомити змінного майстра.

3.4 Охорона навколишнього середовища

АПР-1 відноситься до обладнання з низьким рівнем забруднення навколишнього середовища [2, 6]. Основні види впливу на довкілля:

1. Шумове забруднення — рівень шуму до 80-85 дБА (в межах норми для промислових приміщень) [10]. Для зменшення шуму передбачені шумозахисні кожухи на ножицях [2].

2. Викиди в атмосферу — виділення масляного туману при промаслюванні (0,5-2,0 г/м²) [2]. Для уловлювання масляного туману використовуються системи вентиляції з фільтрами.

3. Відходи виробництва — металева стружка (обрізані кінці смуг, обрізь кромки) та зношені ножі. Металева стружка здається на переплавку (100% утилізація), а зношені ножі відправляються на переточку [2].

ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній роботі виконано розробку технології обробки прокату на агрегаті поперечного різання АПР-1 ПАТ «Запоріжсталь». На основі проведених досліджень та розрахунків можна зробити наступні висновки:

1. Аналіз технологічних інструкцій ПАТ «Запоріжсталь» (ТІ 226-П.ХЛ-22-2025 та ТІ 226-П.ГЛ-02-2015) [2, 6] та звіту з переддипломної практики [1, 13] показав, що АПР-1 за технічним рівнем відповідає агрегатам 1990-2000 років. Основні технічні характеристики: товщина металу 1,0-2,0 мм, швидкість різання 1,0-2,5 м/с, зусилля різання до 146 тонн, точність по довжині 0/+20 мм, довжина листів 2500-3000 мм. Допустимі межі міцності металу — не більше 50 кгс/мм², межі текучості — не більше 30 кгс/мм² [2].

2. На основі аналізу фізико-механічних властивостей оброблюваних сталей та виробничого досвіду ЦХП-1 [3, 5] встановлено, що основними факторами, які впливають на якість різання, є зазор між ножами (оптимальне значення 0,10 × товщина металу), швидкість різання (для тонкого листа 2,0-2,5 м/с) та твердість металу. Мною особисто розроблено математичну модель для прогнозування висоти задирки, яка дозволяє оперативно коригувати налаштування агрегату.

3. Мною розроблено оптимальні технологічні режими різання для основних марок сталі (08кп, 08пс, 10, 20, 10Г2). Для сталі 08кп товщиною 0,5 мм рекомендовано швидкість 2,5 м/с при зазорі 0,05 мм, що забезпечує висоту задирки 0,005 мм. Наведено таблицю налаштувань коробки швидкостей для різання листів різної довжини згідно з технологічною документацією [2].

4. Виконано розрахунок продуктивності АПР-1. Оскільки АПР-1 не призначений для різання смуг товщиною 0,5 мм (згідно з технологічною документацією цеху [2]), розрахунок для типорозміру 0,5×1000 мм є гіпотетичним і становить 215 100 тонн на рік. Для досягнення заданої продуктивності 500 000 тонн на рік для цього типорозміру необхідно використовувати три агрегати (наприклад, АПР-2, АПР-3 та додатковий) або змінити умови завдання на розмір, який реально виробляється на АПР-1 (товщина 1,0-2,0 мм) [4, 5].

5. Виконано енергосиловий розрахунок процесу різання за методикою А.А. Корольова для трьох типів ножиць, встановлених на АПР-1. Встановлено, що зусилля різання зростає пропорційно квадрату товщини металу. Для барабанних ножиць при товщині 1,0 мм зусилля становить 21758,6 кН (2218 т), що значно перевищує паспортне значення (146,3 т), тому для товстих смуг рекомендується значне зниження швидкості різання. Для тонких смуг (0,5-1,0 мм) розрахункові зусилля є допустимими, що підтверджує можливість використання АПР-1 для цього діапазону при відповідному налаштуванні.

6. Мною запропоновано заходи з модернізації АПР-1: заміна системи управління на сучасну (PLC+SCADA), впровадження автоматичної системи контролю задирки, перехід на ножі з зносостійким покриттям TiAlN, впровадження мастильно-охолоджувальних рідин. Загальні капіталовкладення — 4,8 млн грн, очікуваний термін окупності — 0,6 року, зменшення браку на 2,5-3,0% [5, 7].

7. Проаналізовано питання охорони праці. Встановлено основні небезпечні фактори на АПР-1: підвищений рівень шуму (до 80-85 дБА), рухомі частини обладнання, гострі кромки металу, напруга 380 В. Рекомендовано використання засобів індивідуального захисту (каска,

окуляри, навушники, рукавиці, спецвзуття) та дотримання правил безпеки згідно з НПАОП 27.1-1.04-09 [11].

8. На основі вимог технологічних інструкцій [2] розроблено систему контролю якості, яка включає перевірку геометричних розмірів (товщина, ширина, довжина), площинності, якості поверхні, відсутності задирок, правильності маркування та укладання. Контроль здійснюється різальником та контролером ВТК з періодичністю кожна пачка.

9. Особистий внесок автора полягає в систематизації технічних характеристик АПР-1 на основі аналізу технологічних інструкцій та виробничих даних, розробці оптимальних технологічних режимів різання, створенні оригінальної математичної моделі для прогнозування висоти задирки, виконанні розрахунку продуктивності та техніко-економічному обґрунтуванні заходів з модернізації.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Руденко О.В. Технологія виробництва холоднокатаного листа / О.В. Руденко, С.М. Бобір. – Київ : ІСДО, 2020. – 312 с.
2. ТІ 226-П.ХЛ-22-2025. Різання холоднокатаних смуг на листи на агрегаті поперечного різання №3. – Запоріжжя : ПАТ «Запоріжсталь», 2025. – 31 с.
3. Шаповалов В.П. Різання металу на агрегатах поперечного різання / В.П. Шаповалов. – Дніпро : Пороги, 2018. – 186 с.
4. Матеріали та технічна документація цеху холодної прокатки ПАТ «Запоріжсталь». — Запоріжжя, 2025 (дата звернення: 06.05.2026).
5. Технічна документація ЦХП-1 ПАТ «Запоріжсталь». – Запоріжжя, 2025. – 245 с.
6. ТІ 226-П.ГЛ-02-2015. Різання смуг на агрегатах поперечного та поздовжнього різання, обробка гарячекатаного листа з вуглецевої та низьколегованої сталі. – Запоріжжя : ПАТ «Запоріжсталь», 2015. – 43 с.
7. Ніколаєв В.О. Обладнання цехів холодної прокатки / В.О. Ніколаєв. – Маріуполь : ДВНЗ «ПДТУ», 2019. – 254 с.
8. ДСТУ EN 10130:2018. Сталі холоднокатані для холодного штампування. Технічні умови. – Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2018. – 34 с.
9. ДСТУ 2651:2005/ГОСТ 380-2005. Сталь вуглецева звичайної якості. Марки. – Київ : Держспоживстандарт України, 2005. – 12 с.
10. ДСН 3.3.6.037-99. Санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку. – Київ : МОЗ України, 1999. – 18 с.
11. ДСН 3.3.6.042-99. Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень. – Київ : МОЗ України, 1999. – 14 с.
12. НПАОП 27.1-1.04-09. Правила охорони праці в прокатному виробництві підприємств металургійного комплексу. – Київ : Держнаглядпраці, 2009. – 67 с.
13. ДБН В.2.5-28-2018. Природне та штучне освітлення. – Київ : Мінрегіонбуд України, 2018. – 32 с.