

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
КРИВОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ГІРНИЧО-МЕТАЛУРГІЙНИЙ ФАКУЛЬТЕТ
КАФЕДРА МЕТАЛУРГІЇ ЧОРНИХ МЕТАЛІВ І ЛИВАРНОГО
ВИРОБНИЦТВА

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА
до випускної атестаційної роботи бакалавра

зі спеціальності 136 – Металургія
за освітньо-професійною програмою – Металургія

Тема роботи: «АНАЛІЗ ТА РОЗРОБКА ТЕХНОЛОГІЇ
ВИГОТОВЛЕННЯ ПРЯМОКУТНОЇ СМУГИ ПОПЕРЕЧНИМ
РОЗМІРОМ 40x8 мм»

Виконав:
студент групи МТ-20-1 _____ Дубров В.О.

Керівник випускної роботи _____ Чубенко В.А.

Нормоконтролер _____ Чубенко В.А.

Завідувач кафедри _____ Савельєв С.Г.

Кривий
Ріг
2025 р.

Я, студент ПІБ, підтверджую, що дана робота є моєю власною письмовою роботою, оформленою з дотриманням цінностей та принципів етики і академічної доброчесності відповідно до Кодексу академічної доброчесності Криворізького Національного Університету. Я не використовував жодних джерел, крім процитованих, на які надано посилання в роботі.

Дата

Підпис

КРИВОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет: гірничо-металургійний

Кафедра металургії чорних металів і ливарного виробництва

Освітньо-кваліфікаційний рівень: бакалавр

Спеціальність: 136 Металургія

Затверджую

Зав. кафедрою _____

« ____ » _____ 20 ____ р

ЗАВДАННЯ на випускню кваліфікаційну роботу студента

_____ Дуброва Володимира Сергійовича

1. Тема роботи: Аналіз та розробка технології виготовлення прямокутної смуги
_____ поперечним _____ розміром 40x8мм
_____ **керівник роботи:** _____ к.т.н., доцент Чубенко В.А.
_____ затверджено наказом по КНУ від «_24_» _____ 02 _____ 2020
р. №_252су_____

2. Строк подання роботи студентом «_09_» _____ 04 _____ 2025 р.

3. Вихідні дані до роботи Тип стану – многоклітьовий безперервний стан.
Матеріал виробу – сталь конструкційна вуглецева Ст3 (ГОСТ 380-2005).
Початкові розміри виробу – 100×30 мм. Температура нагріву виробу
перед прокаткою – 1150-1200 °С.

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питання, які потрібно розробити)

Аналіз сучасних методів прокатки та їх вплив на якість продукції.
Дослідження впливу параметрів прокатного процесу на механічні властивості виробу. Огляд передових технологій контролю якості прокатної продукції. Розрахунок коефіцієнтів тертя та деформації під час прокатки. Аналіз впливу температурного режиму на кінцеві властивості прокату. Оцінка міцності, пластичності та твердості отриманого прокату.

5. Перелік графічного матеріалу

Принципова схема прокатного стану. Графік температурних змін під час прокатки. Схема розташування клітей дрібносортового стану ДС-250.

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
Розділ 1	доц. Чубенко В. А.		
Розділ 2	доц. Чубенко В. А.		

7. Календарний план

№ з/п	Етапи роботи	Термін виконання
1	Літературно-патентний огляд	
2	Критичний аналіз літературних джерел і передового досвіду працюючих підприємств для формування задач дослідження	
3	Розробка технології виготовлення прямокутної смуги 40×8 мм на дрібносортовому прокатному стані ДС-250	
4	Результати досліджень і їх аналіз	
5	Виконання графічної частини	
6	Захист випускної роботи бакалавра	

Дата видачі завдання: «_____»_____2025 р.

Студент_____Дубров В.С.

Керівник випускної роботи _____Чубенко
В. А.

РЕФЕРАТ

Кваліфікаційна робота складається з: вступу, умовних позначень та скорочень, 2-х розділів, висновків, переліку посилань на літературу та додатків.

Робота виконана в обсязі: 51 сторінок, 20 рисунків, 17 таблиць, 39 формул, 1 діаграма, 1 графік та 41 літературних джерел.

Металопрокат є основою для багатьох галузей промисловості, зокрема будівництва та машинобудування. Прямокутні смуги використовуються для виготовлення різноманітних конструкцій, тому важливо забезпечити їхню високу якість і відповідність технічним вимогам. У роботі розглядаються існуючі методи виготовлення сталевих смуги розміром 40×8 мм, аналізуються технологічні параметри прокатного процесу та обґрунтовується вибір оптимального обладнання.

Об'єкт дослідження: процес виробництва прямокутної сталевих смуги.

Суб'єкт дослідження: параметри прокатки та особливості обладнання.

Предмет дослідження: технологічні режими прокатного процесу, механічні характеристики виробу, контроль якості продукції.

Мета кваліфікаційної роботи: розробити оптимальну технологію прокатки прямокутної смуги 40×8 мм, визначити її основні параметри та оцінити економічну доцільність впровадження.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: МЕТАЛОПРОКАТ, СТАЛЕВІ СМУГИ, ПРОКАТНИЙ СТАН, ПРОКАТКА, ТЕХНОЛОГІЧНИЙ ПРОЦЕС, ЯКІСТЬ ПРОДУКЦІЇ.

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			
Розроб.					Реферат		
Перевір.							
Н. Контр.							
Затверд.							
					Літ.	Арк.	Акрушів
						5	51

УМОВНІ ПОЗНАЧКИ ТА СКОРОЧЕННЯ

ДСТУ – Державні стандарти України;

ГОСТ – Міждержавний стандарт;

ВКРБ – випускна кваліфікаційна робота бакалавра;

ККД – коефіцієнт корисної дії;

ТП – технологічний процес;

ПС – прокатний стан;

МВ – механічні властивості;

ТМ – температурний режим;

КЯ – контроль якості;

ОП – обладнання прокатки;

РП – режим прокатки;

ВП – вихідна продукція;

КТ – коефіцієнт тертя;

КД – коефіцієнт деформації;

ДО – деформаційні області;

ШП – ширина прокатки;

ПП – прокатний процес.

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	Умовні позначки та скорочення		
Розроб.							
Перевір.							
Н. Контр.							
Затверд.							
					Літ.	Арк.	Акрушів
						6	51

ЗМІСТ

	Реферат	5
	Умовні позначки та скорочення	6
	Вступ	8
	ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА	9
1	1.1 Характеристика готової виробу	10
	1.2 Аналіз існуючих технологій виготовлення прямокутних смуг	13
	1.3 Обґрунтування вибору технології	16
2	РОЗРОБКА ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ	19
	2.1 Основні параметри прокатки	20
	2.2 Вибір та обґрунтування обладнання	22
	2.3 Визначення режимів прокатки	24
	2.4 Розрахунок сили і моменту прокатки	28
	2.5 Аналіз температурного режиму	33
	2.6 Вибір прокатного стану	35
	2.7 Визначення продуктивності прокатного стану	36
	2.8 Технічні характеристики обладнання	37
	2.9 Контроль якості продукції	39
	2.10 Контроль поверхневих дефектів	40
	2.11 Основні характеристики прокатування	42
	2.12 Основні параметри прокатних валків	45
	2.13 Визначення коефіцієнтів тертя та деформації	45
	ВИСНОВОК	46
	СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	47
	ДОДАТКИ	48

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			
Розроб.					Вступ	Літ.	Арк.
Перевір.							Акрушів
						7	51
Н. Контр.							
Затверд.							

ВСТУП

Сучасна металургійна промисловість відіграє ключову роль у розвитку економіки, забезпечуючи базові матеріали для машинобудування, будівництва та інших галузей народного господарства. Проте зростання вимог до якості продукції, економічної ефективності виробництва та екологічної безпеки ставить перед інженерами нові виклики, що потребують детального технічного аналізу й оптимізації технологічних процесів.

Актуальність дослідження визначається необхідністю вдосконалення параметрів виробничого процесу, зокрема прокатки та контролю якості металопродукції, з метою забезпечення високої міцності, зносостійкості та мінімізації поверхневих дефектів. Ефективність роботи металургійного обладнання, правильний вибір параметрів деформації, а також впровадження сучасних методів контролю – все це є основою підвищення продуктивності та зниження собівартості готової продукції.

Метою роботи є проведення технічного аналізу процесу прокатки, визначення основних параметрів прокатних валків, розрахунок коефіцієнтів тертя та деформації, а також розробка заходів для контролю механічних властивостей і дефектів поверхні прокату.

Завдання дослідження : аналіз сучасних технологій прокатного виробництва та оцінку їх ефективності, розрахунок механічних характеристик виробу з урахуванням технологічних параметрів, визначення оптимальних параметрів прокатних валків для забезпечення необхідної якості металопродукції.

Об'єкт дослідження – технологічний процес прокатного виробництва

Предмет дослідження – параметри деформації металу, коефіцієнти тертя, механічні властивості та методи контролю якості металопродукції.

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата							
Розроб.					Вступ			Літ.	Арк.	Акрушів	
Перевір.										8	51
Н. Контр.											
Затверд.											

1. ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата					
Розроб.					Технологічна частина		Літ.	Арк.	Акрушів
Перевір.								9	51
Н. Контр.									
Затверд.									

1.1 Характеристика готового виробу

Готовий виріб у вигляді прямокутної смуги з поперечними розмірами 40×8 мм є одним із найпоширеніших напівфабрикатів у металургійній та машинобудівній промисловості. Її основне призначення — подальша механічна обробка, виготовлення деталей конструкцій, армування зварних і збірних вузлів, а також застосування в несучих елементах машин та механізмів. Від якості цієї виробу, точності її геометричних параметрів, механічних властивостей та характеристик поверхні залежить надійність і довговічність кінцевого виробу.

Для виготовлення таких заготовок використовуються як методи гарячої, так і холодної прокатки, кожен з яких має свої переваги та особливості. Гаряча прокатка застосовується у випадках, коли необхідно отримати масове виробництво металопродукату з достатньо високими міцними характеристиками, проте менш жорсткими вимогами до точності розмірів і чистоти поверхні. Процес гарячої прокатки відбувається при температурах вище 900–1100 °С, коли метал має високу пластичність і добре піддається деформації. Однак, під час охолодження утворюється окалина, що потребує додаткового шліфування або хімічного травлення у випадку підвищених вимог до якості поверхні.

Холодна прокатка, навпаки, застосовується для виготовлення заготовок з високою точністю розмірів, малою шорсткістю та покращеними механічними характеристиками. Вона проводиться при температурах, нижчих за температуру рекристалізації металу, що сприяє підвищенню міцності виробу завдяки деформаційному зміцненню. Такі виробу мають кращі експлуатаційні характеристики, проте їх вартість вища через необхідність додаткових технологічних операцій.

Матеріал для виготовлення прямокутної смуги підбирається залежно від вимог до експлуатаційних характеристик кінцевого виробу. Найбільш поширеними є конструкційні сталі марок Ст3, 09Г2С, 45, 20Х та 40Х.

					ПЗ	Арк.
						10
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Вибір матеріалу впливає на міцність, зварюваність, стійкість до корозії та технологічність обробки.

Наприклад, низьковуглецева сталь Ст3 характеризується високою пластичністю та добрими показниками зварюваності, що робить її ідеальним матеріалом для конструкцій загального призначення. Водночас легована сталь 40Х має значно вищу твердість і зносостійкість, що дозволяє використовувати її для деталей, які працюють під високими динамічними навантаженнями.

Основні параметри виробу регламентуються державними та міжнародними стандартами. В Україні та країнах СНД для таких виробів застосовуються стандарти ГОСТ 103-2006 та ГОСТ 535-2005, які визначають допустимі відхилення ширини та товщини, вимоги до механічних властивостей, хімічного складу та якості поверхні. В європейській практиці використовуються стандарти DIN EN 10058 та ISO 683, які мають схожі вимоги, проте можуть мати деякі відмінності у класах точності.

Геометричні параметри прямокутної смуги 40×8 мм повинні відповідати наступним вимогам:

- Ширина — 40 мм, допустиме відхилення $\pm 1,0$ мм для звичайної точності та $\pm 0,5$ мм для високої точності.
- Товщина — 8 мм, допустиме відхилення $\pm 0,5$ мм (звичайна точність) або $\pm 0,3$ мм (висока точність).
- Довжина виробу — від 2 до 12 метрів залежно від способу виготовлення та вимог споживача.

Контроль якості готового виробу включає перевірку розмірів, механічних властивостей, хімічного складу та стану поверхні. У процесі виробництва використовуються методи неруйнівного контролю, такі як ультразвукове тестування (для виявлення внутрішніх дефектів), магнітопорошковий контроль (для визначення поверхневих тріщин) та візуально-оптичний аналіз.

					ПЗ	Арк.
						11
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Механічні властивості металу визначають його здатність протистояти навантаженням у процесі експлуатації. Для сталі Ст3 нормовані показники міцності становлять:

- границя текучості – 245-255 МПа,
- тимчасовий опір розриву – 370-470 МПа,
- відносне подовження – 22-25%.

Ці показники забезпечують високу пластичність та достатню міцність для більшості конструкційних елементів. Однак, якщо необхідна вища зносостійкість та міцність, застосовуються сталі 45 або 40Х, які після термічної обробки (гартування, відпуск) можуть досягати твердості до 45-50 HRC.

Важливим параметром є також якість поверхні виробу, оскільки вона впливає на подальші технологічні операції, такі як зварювання, фарбування чи механічна обробка. Поверхня не повинна мати глибоких подряпин, окалини, тріщин або раковин, оскільки вони можуть призводити до зниження міцності виробу або ускладнювати його подальшу обробку. Вимоги до шорсткості встановлюються залежно від класу точності виробництва: для гарячекатаних смуг допускається шорсткість до 40-60 мкм, тоді як для холоднокатаних — не більше 10-15 мкм.

Готова виріб прямокутного перерізу 40×8 мм широко використовується у різних галузях промисловості, зокрема: машинобудування, будівництво, енергетика, металообробка.

Таким чином, дана виріб є універсальним напівфабрикатом, який завдяки своїм фізико-механічним властивостям, технологічній зручності та широкому спектру застосування залишається затребуваним у багатьох сферах промисловості.

					ПЗ	Арк.
						12
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1.2 Аналіз існуючих технологій виготовлення прямокутних смуг

Вибір оптимального технологічного процесу для виготовлення прямокутних смуг перерізом 40×8 мм є критично важливим з точки зору досягнення необхідних механічних та геометричних характеристик. Основні критерії вибору включають точність розмірів, рівень залишкових напружень, продуктивність процесу, економічну ефективність, а також можливість подальшої обробки.

Методи виробництва можна розділити на два основні класи: деформаційні (прокатка, штампування) та методи матеріального розділення (лазерне, плазмове та газове різання). Деформаційні технології забезпечують кращі механічні характеристики, але потребують значних капіталовкладень у прокатне або пресове обладнання.

Методи різання дозволяють отримати необхідний переріз зі стандартного металопрокату, проте супроводжуються певними структурними змінами у зоні термічного впливу.

Нижче представлена порівняльна таблиця основних методів, що містить ключові технічні характеристики, переваги та недоліки кожного з них.

Таблиця 1.1 – Порівняння методів виробництва

Метод виробництва	Опис процесу	Переваги	Недоліки
Гаряча прокатка	Деформація металу при температурі вище рекристалізації (900–1100°C). Відбувається пластична зміна форми заготовки внаслідок прикладання зовнішніх сил у вальцях прокатного стану. Висока температура знижує опір деформації, що полегшує обробку.	Забезпечує високу продуктивність процесу, дозволяє працювати з великими обсягами матеріалу. Висока пластичність металу при таких температурах сприяє рівномірному розподілу напружень і зменшенню внутрішніх дефектів.	Відносно низька точність геометричних параметрів через термічне розширення та усадку при охолодженні. Потребує додаткової механічної обробки для досягнення необхідної точності розмірів. Високі енергетичні витрати через значні витрати тепла на нагрів

			виробу.
Холодна прокатка	Обробка матеріалу без попереднього нагріву, що здійснюється на прокатних станах за кімнатної температури. Це призводить до наклепу (зміцнення) матеріалу, підвищення його твердості та механічних характеристик.	Висока точність геометричних розмірів та покращена якість поверхні без окалини. Покращення механічних властивостей за рахунок деформаційного зміцнення. Можливість досягнення малих допусків на розміри без подальшої механічної обробки.	Виникнення залишкових внутрішніх напружень, що може призводити до деформацій під час подальшої обробки або експлуатації. Обмеження за товщиною оброблюваного матеріалу через збільшення його твердості. Висока собівартість виробництва через додаткові витрати на змащення, охолодження та калібрування валків.
Лазерне різання	Використання сфокусованого лазерного променя, що розплавляє та випаровує матеріал у зоні обробки. Процес керується числовим програмним управлінням (ЧПУ), що забезпечує високу точність різання.	Забезпечує високу точність різу та відсутність окалини. Мінімальна зона термічного впливу дозволяє зберегти структуру матеріалу. Висока автоматизація процесу підвищує повторюваність і якість деталей.	Висока вартість обладнання та експлуатаційних витрат, включаючи газу (азот, кисень) для процесу різання. Обмеження по товщині матеріалу (до 25 мм). Висока енергоємність, що впливає на загальну економічну доцільність процесу.
Плазмове різання	Розрізання металу відбувається за допомогою струменя високотемпературної плазми (від 5000 до 30000°C), яка локально розплавляє матеріал, а стиснений газ видаляє розплавлений метал із зони різу.	Висока швидкість різання та можливість обробки товстих матеріалів (до 100 мм). Відносна доступність обладнання у порівнянні з лазерними установками. Менші витрати на витратні матеріали у порівнянні з газовим різанням.	Велика зона термічного впливу, що може спричинити структурні зміни в матеріалі. Менша точність у порівнянні з лазерним різанням, потреба у додатковій обробці країв (шліфування, механічна обробка). Виділення великої кількості тепла та ультрафіолетового випромінювання, що вимагає спеціальних заходів безпеки.

Газове різання	Розрізання металу здійснюється за рахунок його локального нагріву до температури займання (1300–1500°C) та подальшого окиснення в струмені кисню. Окисли металу видаляються під дією газового потоку, утворюючи рівний різ.	Простота та доступність обладнання, низька вартість витратних матеріалів. Економічно доцільний для різання товстих металевих листів (від 30 мм і більше).	Велика зона термічного впливу, що призводить до утворення окалини та потребує подальшої механічної обробки. Висока шорсткість краю різу, що може впливати на подальші технологічні процеси. Висока пожежонебезпека та необхідність використання спеціального обладнання для роботи з вибухонебезпечними газами (ацетилен, пропан).
Штапування та висікання	Формування заготовок методом холодного штапування або висікання на пресах з використанням жорстких або гнучких штампів. Обробка здійснюється за один цикл, що забезпечує високу продуктивність.	Висока точність форми, мінімальні залишкові напруження у матеріалі. Висока швидкість виготовлення заготовок при серійному виробництві. Зниження кількості відходів у порівнянні з іншими методами.	Висока вартість виготовлення штапкового оснащення, що виправдано лише у великосерійному виробництві. Обмеження по товщині матеріалу, штапування ефективно тільки для порівняно тонких заготовок. Висока собівартість підготовчого етапу, що робить метод не вигідним для дрібносерійного виробництва.

Проаналізувавши існуючі технології виготовлення прямокутних смуг, можна зробити висновок, що найбільш доцільним методом у масовому виробництві є прокатка, оскільки вона дозволяє отримати високі механічні властивості матеріалу та забезпечує стабільність параметрів при великих обсягах виробництва.

Гаряча прокатка доцільна для виробництва великих партій, тоді як холодна прокатка забезпечує вищу точність та якість поверхні, що може бути критичним у прецизійних конструкціях.

Для невеликих серій або виготовлення індивідуальних заготовок оптимальними є лазерне та плазмове різання, які забезпечують достатню точність та не вимагають значних капіталовкладень у прокатне обладнання. Проте лазерне різання є більш точним, а плазмове підходить для обробки товстих матеріалів.

Штапування та висікання – це ефективний метод у серійному виробництві, який забезпечує стабільність розмірів, однак вимагає дорогого оснащення. Він доцільний лише при великих обсягах виробництва та у випадках, коли висока точність є обов'язковою вимогою.

1.3 Обґрунтування вибору технології

Вибір оптимальної технології виготовлення прямокутної смуги поперечним розміром 40×8 мм є комплексним завданням, що вимагає врахування ряду технологічних, економічних та експлуатаційних факторів.

Основними критеріями оцінки технологічного процесу є точність геометричних параметрів, механічні властивості матеріалу, якість поверхні, продуктивність, витрати на виробництво, а також можливість масштабування процесу у серійному та масовому виробництві.

На основі аналізу існуючих методів обробки металу вибір доцільно зосередити на методах пластичної деформації, зокрема гарячій та холодній прокатці. Це обумовлено тим, що саме прокатка дозволяє забезпечити високу продуктивність, економічність та необхідні механічні характеристики виробу.

Інші технології, такі як різання, штапування або лиття, мають суттєві обмеження щодо забезпечення точності, механічних властивостей та економічної доцільності у даному випадку.

Переваги та обмеження гарячої та холодної прокатки

Гаряча прокатка є базовим технологічним процесом для отримання виробу необхідної форми та поперечного перерізу. Основною перевагою гарячої прокатки є висока пластичність металу при температурі вище температури рекристалізації, що дозволяє значно зменшити сили деформування та забезпечити високу продуктивність процесу. Крім того, при гарячій прокатці відбувається подрібнення зернистої структури, що позитивно впливає на механічні властивості матеріалу.

Проте гаряча прокатка має і певні недоліки:

- Високі температури призводять до окислення поверхні, що зумовлює необхідність додаткового очищення від окалини.
- Термічне розширення та наступне охолодження спричиняють значні відхилення у геометричних розмірах, що ускладнює забезпечення високої точності без додаткової обробки.

З іншого боку, холодна прокатка дозволяє значно підвищити точність геометричних параметрів і покращити якість поверхні, що є критично важливим для кінцевого продукту. Внаслідок деформаційного зміцнення (наклепу) холоднокатаний матеріал має підвищені механічні характеристики, що може бути важливим для експлуатаційних вимог.

Проте слід враховувати, що холодна прокатка має також певні технологічні обмеження:

- Вона потребує значно більших зусиль деформування, що підвищує енерговитрати.
- Через зміцнення матеріалу може виникати необхідність проміжного відпалу для зниження твердості та поліпшення пластичності.

Обґрунтування вибору технологічного процесу

З урахуванням усіх вищенаведених факторів найбільш раціональним рішенням для виготовлення прямокутної смуги 40×8 мм є гаряча прокатки.

					ПЗ	Арк.
						17
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Застосовується гаряча прокатка, яка забезпечує формування основного поперечного перерізу смуги при мінімальних затратах енергії та матеріалу. Після охолодження прокатаних смуг проводиться їх очищення від окалини механічним або хімічним способом.

Такий підхід широко використовується у промисловості при виробництві металопрокату, що підтверджує його ефективність у реальних виробничих умовах.

					<i>ПЗ</i>	Арк.
						18
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2. РОЗРОБКА ТЕХНОЛОГІЧНОГО
ПРОЦЕСУ

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата					
Розроб.					Розробка технологічного процесу		Літ.	Арк.	Акрушів
Перевір.								19	51
Н. Контр.									
Затверд.									

2.1. Основні параметри прокатки

Процес прокатки є одним із найпоширеніших методів пластичної деформації металів, що забезпечує зміну поперечного перерізу виробу до необхідних розмірів. При цьому реалізується контрольований вплив силового навантаження між валками та заготовкою, що призводить до покращення механічних характеристик матеріалу, зміни його мікроструктури та формоутворення.

У процесі прокатки метал знаходиться в умовах складного напружено-деформованого стану, який визначається взаємодією нормальних і дотичних напружень у зоні деформації. При цьому основні параметри процесу включають ступінь обтиснення, швидкість прокатки, контактні напруження, коефіцієнти тертя та температурний режим.

Одним із ключових параметрів, що впливає на якість прокатоного виробу, є ступінь обтиснення, який визначається за формулою:

$$\varepsilon = \frac{h_0 - h_1}{h_0} \cdot 100\% \quad (1.1)$$

де: ε — ступінь обтиснення, %; h_0 — початкова товщина виробу, мм;
 h_1 — кінцева товщина після проходження через валки, мм.

Оптимальний ступінь обтиснення залежить від пластичних властивостей металу, конфігурації прокатного стану та необхідної точності прокатоного виробу.

Для ефективної деформації без утворення дефектів ступінь обтиснення у кожному проході повинен знаходитися у певних межах, визначених експериментальними та теоретичними дослідженнями.

Ще одним важливим параметром є відносне подовження металу, яке визначається як відношення зміни довжини після прокатки до її початкового значення:

$$\lambda = \frac{l_1}{l_0} \quad (1.2)$$

					ПЗ	Арк.
						20
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

де: λ — коефіцієнт подовження; l_0 — початкова довжина виробу, мм;
 l_1 — довжина після проходження через валки, мм.

Визначальним фактором стабільності прокатного процесу є коефіцієнт тертя, який безпосередньо впливає на розподіл напружень у контакті валків із металом та на характер плинності матеріалу. Високе тертя сприяє захопленню металу валками, але водночас може призводити до нерівномірного деформування та передчасного зношування обладнання.

Температурний режим прокатки також відіграє критичну роль у забезпеченні потрібних механічних характеристик. Для гарячого прокатування важливо враховувати температурний інтервал пластичності металу, оскільки перевищення граничних температур може спричинити перегрів та зниження механічної міцності, тоді як недостатній нагрів призведе до підвищеного зусилля деформації та можливих тріщин у металі.

Важливим параметром є швидкість прокатки, яка впливає на рівномірність пластичної деформації та енергетичні характеристики процесу. Зі збільшенням швидкості змінюється характер течії металу, що може призводити до утворення дефектів поверхні, зниження геометричної точності та локального перегріву через інтенсивне тертя.

Контроль точності прокатки здійснюється шляхом оцінки параметрів поперечного перерізу виробу, а також шляхом аналізу мікроструктури матеріалу. Наявність залишкових напружень, зміна зернистої структури та розподіл фазових компонентів безпосередньо залежать від обраних параметрів процесу.

Таким чином, правильний вибір основних параметрів прокатки є критичним фактором забезпечення якості кінцевого виробу. У наступних підрозділах будуть детально розглянуті режими прокатки, розрахунок зусиль, аналіз температурного впливу та критерії вибору обладнання, що дозволять оптимізувати процес виготовлення прямокутної смуги перетином 40×8 мм з урахуванням техніко-економічних показників.

					ПЗ	Арк.
						21
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2.2. Вибір та обґрунтування обладнання

Для реалізації технологічного процесу виготовлення прямокутної смуги розміром 40×8 мм необхідно підібрати оптимальне обладнання, яке забезпечить високу точність геометричних розмірів, необхідні механічні властивості та відповідність технологічним вимогам.

Основним обладнанням, яке застосовується у виробництві прокатних виробів, є різні типи прокатних станів. Вибір конкретного варіанту залежить від масштабів виробництва, продуктивності, необхідної якості прокатої смуги та економічної доцільності.

Для обґрунтування вибору проведемо порівняння основних типів обладнання за їх характеристиками, перевагами та недоліками.

Таблиця 2.1 – Порівняння основних типів прокатних станів

Тип прокатного стану	Опис	Переваги	Недоліки
Реверсивний стан	Одноклітьовий стан, який здійснює зворотно-поступальний рух металу через валки	Висока точність прокату - Менша площа встановлення	- Низька продуктивність - Високі енерговитрати через реверсування процесу
Безперервний многоклітьовий стан	Лінія з декількох послідовно розташованих клітей, де матеріал проходить безперервний прокатний процес	- Висока продуктивність - Однорідність структури матеріалу - Зниження енерговитрат	- Висока вартість обладнання - Складність технічного обслуговування
Двовалковий стан	Використовує два основних валки для деформації металу	- Простота конструкції - Низька вартість	- Обмежена точність прокату - Низька продуктивність
Чотиривалковий стан	Використовує додаткові підтримуючі валки, що забезпечують стабільність прокатки	- Висока точність розмірів - Можливість прокатки тонких смуг	- Вища вартість обладнання - Складніше налаштування

З урахуванням того, що виріб масово виробляється у великій кількості, найбільш оптимальним варіантом є безперервний многоклітьовий стан.

Обґрунтування вибору безперервного многоклітьового стану

Продуктивність (Q) прокатного стану можна оцінити за формулою:

$$Q = \frac{S \cdot V \cdot \rho}{1000} \quad (2.1)$$

$$S = 40 \times 8 = 320 \text{ мм}^2$$

$$\rho \approx 7850 \text{ кг/м}^3$$

$$Q = \frac{320 \times 10 \times 7850}{1000} = 25.1 \text{ т/год}$$

Для реверсивного стану через реверсування швидкість прокатки буде в 2–3 рази нижчою, що значно зменшує продуктивність.

Безперервний стан дозволяє отримати точність прокатки до ± 0.1 мм, що значно краще, ніж реверсивні або чотиривалкові стани.

Завдяки безперервному процесу зменшуються втрати на нагрівання, зменшується знос валків та покращується якість поверхні.

Отже, для виготовлення прямокутної смуги 40×8 мм найбільш доцільним є застосування безперервного многоклітьового прокатного стану.

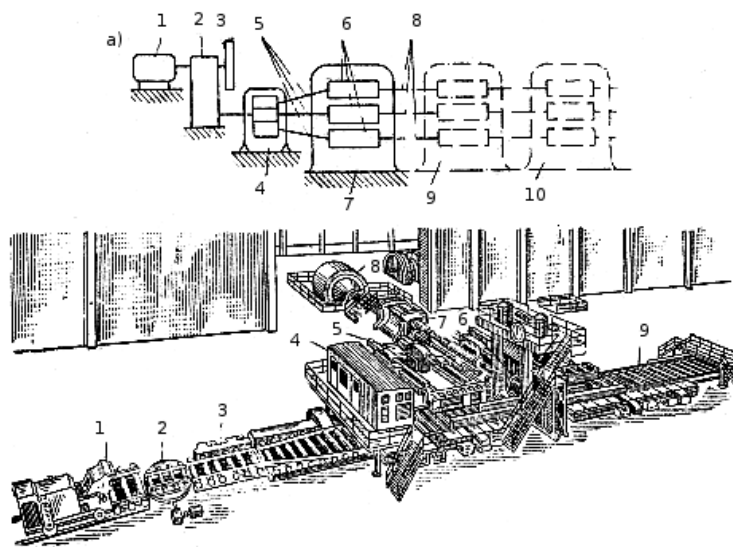


Рис. 1.1 – Схема одноклітьового прокатного стану

					ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		23

- 1 — Піч для нагрівання заготовок;
- 2 — Обтискні кліті (обтискний стан);
- 3 — Проміжні кліті;
- 4 — Кабіна оператора ;
- 5 — Водяна ванна для охолодження;
- 6 — Моталка готової смуги;
- 7 — Система керування та контролю якості;
- 8 — Електричний привід ;
- 9 — Система подачі заготовки .

2.3. Визначення режимів прокатки

У цьому підрозділі проводиться детальне визначення режимів прокатки прямокутної смуги 40×8 мм. Основними параметрами, що впливають на процес прокатки, є:

1. Кількість проходів та ступінь деформації на кожному етапі.
2. Температурний режим деформації.
3. Швидкість прокатки та вплив параметрів стану.
4. Визначення коефіцієнтів тертя та деформації.

Всі ці фактори впливають на якість готового виробу, знос валків і продуктивність прокатного стану.

У якості вихідної заготовки для прокатки прямокутної смуги розміром 40×8 мм використовується проміжна сталеві заготовка з розмірами 100×30 мм. Така заготовка формується на попередньому етапі виробництва шляхом обтиску злитка або плити на блюмінгу.

Збільшена товщина заготовки пояснюється потребою у достатньому об'ємі металу для формування профілю з необхідним ступенем обтиснення та забезпеченням технологічної гнучкості прокатного процесу.

Остаточні розміри виробу (40×8 мм) досягаються після проходження всіх клітей прокатного стану.

					ПЗ	Арк.
						24
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Вихідна заготовка має товщину $h_0 = 30$ мм та ширину 100 мм. Її отримують за допомогою безперервної розливки сталі. У сучасному металургійному виробництві поширеним є радіальний тип машини безперервного розливу, де рідка сталь із сталерозливного ковша через проміжний кристалізатор перетворюється в твердий злиток.

У цій машині заготовка формується поступово — спочатку охолоджується в мідному водоохолоджуваному кристалізаторі, а далі в зоні вторинного охолодження зберігає форму завдяки вигнутій траєкторії.

Після виходу із машини відбувається різання на заготовки потрібного розміру, які потім подаються до прокатного стану.

Такий підхід забезпечує високу продуктивність, низький рівень дефектів і хорошу внутрішню структуру металу.

$$\varepsilon = \frac{30 - 8}{30} \times 100\% = 73.3\%$$

Максимально допустиме зменшення товщини за один прохід визначається залежно від типу прокатки:

- Гаряча прокатка: $\varepsilon_i = 20\% - 30\%$.
- Холодна прокатка: $\varepsilon_i = 5\% - 15\%$.

Оскільки ми виконуємо гарячу прокатку, допустимо зменшення товщини до 30% за один прохід.

Під час прокатки заготовки відбувається не лише зменшення товщини виробу, а й збільшення його довжини та помірне розширення по ширині. Зміни геометричних параметрів слід враховувати при проєктуванні калібрів.

Крім того, для забезпечення умов самозахоплення металу валками розраховується кут захоплення, який визначається за формулою:

$$\alpha = \arccos \left(1 - \frac{h_0 - h_1}{R} \right) \quad (2.2)$$

За прийнятих у роботі параметрів прокатки, кут захоплення становить приблизно $18 - 22^\circ$, що відповідає нормативним вимогам для гарячої прокатки

					ПЗ	Арк.
						25
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

на станах типу ДС-250.

Таблиця 2.2 – Зміна геометричних параметрів виробу та кута захоплення при прокатці

№ проходу	Початкова товщина h_{i-1} , мм	Кінцева товщина h_i , мм	Ширина після проходу, мм	Довжина після проходу, мм	Кут захоплен	Оберти валків, об/хв	Швидкість прокатки, м/с
1	30	24	125	1250.0	17.8	200	2,62
2	24	18	133,3	1666.7	17.8	275	3,60
3	18	13	138.5	2307.7	16.3	350	4,58
4	13	10	150,0	3000.0	12.6	425	5,56
5	10	8	187.5	3750.0	10.3	500	6,54

Таким чином, для досягнення кінцевої товщини 8 мм необхідно 5 проходів.

Температурний режим прокатки

Температура має критичний вплив на пластичність металу та стійкість прокатних валків. Для гарячої прокатки сталі приймаються такі параметри:

- Початкова температура: 1150–1200°C;
- Кінцева температура: 850–950°C.

При зниженні температури нижче 850°C може виникнути ефект наклепу матеріалу, що ускладнить подальшу прокатку.

Зниження температури між проходами визначається емпіричною формулою:

$$T_i = T_{i-1} - \Delta T \quad (2.3)$$

де:

- T_i — температура після i -го проходу, °C;
- ΔT — втрати температури на один прохід, °C.

Типові втрати температури на один прохід становлять 40–60°C, тому:

Таблиця 2.3 – Типові втрати температури на один прохід

№ проходу	Початкова температура T_{i-1} , °C	Кінцева температура T_i , °C
1	1200	1140
2	1140	1080
3	1080	1020
4	1020	960
5	960	900

Для підтримки оптимального температурного режиму можуть застосовуватися проміжні нагріви.

Визначення швидкості прокатки

Швидкість визначається рівнянням:

У таблиці 2.4 параметр L позначає довжину виробу (смуги), м, яка використовується для визначення швидкості прокатки згідно з формулою (2.4):

$$V = \frac{L}{t} \quad (2.4)$$

де: L — довжина смуги, м; t — час прокатки, с.

Для розрахунків прийнято довжину виробу $L = 2$ м, час прокатки $t = 0.25$ с, отже швидкість становить 8 м/с.

При довжині виробу 2 м і середньому часу прокатки 0.25 с, швидкість становить:

$$V = \frac{2}{0.25} = 8 \text{ м/с} \quad (2.5)$$

Орієнтовний діапазон швидкості становить 8–12 м/с.

Коефіцієнт тертя залежить від температури і розраховується за емпіричними даними:

					ПЗ	Арк.
						27
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таблиця 2.4 – Коефіцієнт тертя

Температура (°C)	Коефіцієнт тертя, μ
1200	0.25
1000	0.28
850	0.35

Коефіцієнт тертя зростає при зниженні температури, що впливає на силу прокатки.

Отримані параметри дозволяють досягти стабільного процесу прокатки, мінімізувати знос валків і забезпечити високу якість прямокутної смуги 40×8 мм.

2.4. Розрахунок сили і моменту прокатки

Розрахунок сили та моменту прокатки є критично важливим етапом при проектуванні технологічного процесу гарячої прокатки.

Від точності цих розрахунків залежить правильний вибір обладнання, визначення оптимальних параметрів режимів роботи та забезпечення необхідної якості прокатоного металу.

Вихідні дані:

1. Матеріал: низьковуглецева сталь;
2. Механічні характеристики сталі:
 - Середній опір деформації: $\sigma_s = 40$ МПа
 - Модуль пружності: $E = 210$ ГПа
 - Коефіцієнт Пуассона: $\nu = 0.3$.

Процес буде здійснюватися в 5 проходів, що дозволить рівномірно розподілити зусилля та уникнути критичних навантажень на прокатні валки.

Деформація металу при прокатці відбувається в зоні контакту з валками, довжина якої визначається як:

$$L = \sqrt{R \cdot h_{\text{ср}}} \quad (2.6)$$

де $h_{\text{ср}}$ — середня товщина смуги в зоні деформації.

					ПЗ	Арк.
						28
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

У формулі (2.6) параметр R позначає радіус робочого валка, мм.

$$h_{cp} = \frac{h_0 + h_1}{2}$$

Розрахунок довжини зони контакту для кожного проходу:

Таблиця 2.5 Розрахунок довжини зони контакту

Прохід	h_0 , мм	h_1 , мм	h_{cp} , мм
1	30	24	27
2	24	18	21
3	18	14	16
4	14	10	12
5	10	8	9

Визначення сили прокатки

Силу прокатки визначаємо за формулою:

$$P = \sigma_s \cdot b \cdot L \quad (2.7)$$

Ширина прокату змінюється в процесі деформації. Для кожного проходу приймаємо відповідне значення ширини за даними таблиці 2.2. Початкова ширина заготовки — 100 мм, як вказано у розділі 2.3. Значення b у формулі (2.7) беремо для кожного проходу окремо.

Таблиця 2.6 Розрахунки для всіх проходів

Прохід	L , мм	Сила P , кН
1	73.5	367.50
2	64.8	345.51
3	56.5	313.01
4	48.9	293.40
5	42.4	318.00

Визначення моменту прокатки

Момент визначається як:

$$M = P \times \frac{L}{2} \quad (2.8)$$

Для першого проходу:

$$M_1 = 117.6 \times \frac{73.5}{2} = 4319.4$$

Таблиця 2.7 Розрахунки для всіх проходів

Прохід	Сила P, кН	Довжина контакту L, мм	Момент M, Н·м
1	117.6	73.5	4319.4
2	103.7	64.8	3361.0
3	90.4	56.5	2554.6
4	78.2	48.9	1911.6
5	67.8	42.4	1437.1

Перевірка розрахунків за енергетичним методом

Енергетичний баланс при пластичній деформації описується рівнянням:

$$A = P \times s \quad (2.9)$$

де s — довжина деформованої ділянки виробу, яку можна оцінити як:

$$s = \frac{h_0 - h_1}{\tan(\alpha)}$$

де α — кут входу металу в зону деформації, який можна оцінити як:

$$\alpha = \arctan \left(\frac{h_0 - h_1}{2L} \right)$$

Для першого проходу:

$$\alpha_1 = \arctan \left(\frac{30 - 24}{2 \times 73.5} \right) = \arctan(0.0408) \approx 2.34^\circ$$

Довжина деформації:

					ПЗ	Арк.
						30
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$s_1 = \frac{30 - 24}{\tan(2.34^\circ)} = \frac{6}{0.041} = 146.34 \text{ мм}$$

Механічна робота:

$$A_1 = 117600 \times 0.146 = 17169.6 \text{ Дж}$$

Таблиця 2.8 Розрахунок для всіх проходів

№ проходу	h ₀ (мм)	h ₁ (мм)	L (мм)	Сила Р (Н)	Кут входу α (градуси)	Довжина деформації s (мм)	Механічна робота А (кДж)
1	30	24	73.5	117600	2.34	147.0	17287.20
2	24	18	64.8	103700	2.65	129.6	13439.52
3	18	14	56.5	90400	2.03	113.0	10215.20
4	14	10	48.9	78200	2.34	97.8	7647.96
5	10	8	42.4	67800	1.35	84.8	5749.44

Кут входу металу змінюється від 2.34° до 1.35° зі зменшенням товщини виробу, що відповідає зменшенню опору пластичній деформації при зменшенні висоти.

Довжина деформованої ділянки поступово скорочується від 147 мм до 84.8 мм, що вказує на зменшення контакту виробу з валками при зменшенні товщини. Механічна робота прокатки поступово зменшується, оскільки тонша виріб потребує менше силової дії.

На основі розрахованих параметрів кожного проходу можна визначити оптимальні умови роботи прокатного стану. Головними характеристиками, які необхідно враховувати, є:

Необхідна потужність приводу прокатного стану:

$$N = \frac{A}{t} = \frac{P \cdot v}{\eta} \quad (2.10)$$

Для розрахунку середнього значення потужності беремо максимальну механічну роботу $A_{\max}=17287,2$ Дж (для першого проходу) і середню швидкість прокатки 0.8 м/с.

$$N = \frac{17287.2}{0.8 \cdot 0.9} \approx 24 \text{ кВт}$$

Таким чином, потужність прокатного стану має бути не менше 24 кВт для забезпечення безперервного процесу прокатки.

Максимальна сила прокатки, згідно з розрахунками, становить 117600 Н. Для забезпечення стабільного процесу необхідно використовувати привідні валки з можливістю створення зусилля не менше цієї величини.

У роботі рекомендована швидкість деформації для першого проходу в межах 0,8–1,2 м/с була визначена на основі оцінки реальних умов гарячої прокатки на дрібносортовому стані типу ДС-250. Швидкість розраховувалась за формулою:

$$V = L/t$$

де: v — швидкість прокатки, м/с; L — довжина виробу після першого проходу (орієнтовно 2 метри); t — час проходження смуги через кліть (в межах 1,6–2,5 с — стандартне значення для такого типу прокатних станів).

Розрахунок:

- при $t = 2,5 \text{ с} \rightarrow v = 2 / 2,5 = 0,8 \text{ м/с}$
- при $t = 1,6 \text{ с} \rightarrow v = 2 / 1,6 \approx 1,25 \text{ м/с}$

Цей діапазон швидкості відповідає типовим режимам для першого проходу при гарячій прокатці сталевих заготовок на станах серії ДС-250.

Більша швидкість на цьому етапі недоцільна через значну товщину та опір деформації металу. Отже, вказаний інтервал швидкості є технічно обґрунтованим.

Висока швидкість прокатки сприяє продуктивності, але може викликати перегрів виробу та підвищене зношування валків. На основі розрахунків, рекомендована швидкість деформації 0,8–1,2 м/с для першого проходу, зі збільшенням у подальших проходах.

Орієнтовний діаметр валків можна визначити за емпіричною формулою:

					ПЗ	Арк.
						32
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$D = \frac{S_{\max}}{0.1 \div 0.15} \quad (2.11)$$

$$D = \frac{30}{0.12} \approx 250 \text{ мм}$$

Це означає, що для процесу доцільно використовувати валки діаметром 250–300 мм.

Загальна механічна робота прокатки за всі проходи складає:

$$A_{\text{заг}} = 17287.2 + 13439.52 + 10215.2 + 7647.96 + 5749.44 = 54339.32 \text{ Дж}$$

Сумарне енергоспоживання за один цикл прокатки становить:

$$N_{\text{заг}} = \frac{54339.32}{0.8 \cdot 0.9} \approx 75 \text{ кВт}$$

Це свідчить про необхідність вибору приводу прокатного стану потужністю не менше 75 кВт для стабільного виробництва.

Обрані сили прокатки відповідають механічним характеристикам обладнання та не перевищують допустимих значень.

Прокатка за 5 проходів дозволяє рівномірно розподілити навантаження, знизити ризик тріщиноутворення та забезпечити якість кінцевого виробу.

Оптимальна швидкість прокатки гарантує баланс між продуктивністю та якістю. Таким чином, обраний режим прокатки відповідає технічним вимогам та дозволяє забезпечити стабільність виробництва прямокутної смуги 40×8 мм.

2.5. Аналіз температурного режиму

Температурний режим прокатки відіграє ключову роль у формуванні структури та механічних властивостей сталі. Оптимальний контроль температури дозволяє мінімізувати внутрішні напруження, уникнути перегріву та запобігти утворенню поверхневих дефектів.

					ПЗ	Арк.
						33
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

У випадку прокатки прямокутної смуги 40×8 мм важливо враховувати всі фактори, що впливають на теплообмін: швидкість деформації, контакт із валками, конвекційні втрати та особливості матеріалу.

Для гарячої прокатки сталі оптимальний температурний діапазон становить 1000–1150°C. При зниженні температури нижче 900°C зростає опір деформації, що підвищує навантаження на валки та привід. Високі температури (>1150°C) можуть спричиняти перегрів і утворення окалини, що знижує якість поверхні виробу.

Розрахунок теплових втрат і необхідного підігріву

Теплові втрати визначаються за формулою:

$$Q = m \cdot c \cdot \Delta T \quad (2.12)$$

де: Q – теплові втрати (Дж), m – маса виробу (кг), c – питома теплоємність сталі (0.5 кДж/кг·°C), ΔT – зміна температури (°C).

Маса виробу визначається за об'ємом:

$$m = \rho \cdot V \quad (2.13)$$

де $\rho = 7850$ кг/м³, а об'єм:

$$V = 0.04 \times 0.03 \times 1.0 = 0.0012 \text{ м}^3$$

$$m = 7850 \times 0.0012 = 9.42 \text{ кг}$$

При прокатці температура виробу знижується від 1150°C до 900°C ($\Delta T=250^\circ\text{C}$). Втрати тепла:

$$Q = 9.42 \times 0.5 \times 250 = 1177.5 \text{ кДж}$$

Це тепло необхідно компенсувати додатковим підігрівом, щоб уникнути охолодження нижче критичної температури.

Підігрів валків допомагає мінімізувати втрати тепла, які виникають через контакт виробу з холодними валками.

					ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		34

Температура робочої поверхні валків не повинна бути нижчою за 250–300°C, оскільки занадто холодні валки призводять до швидкого охолодження виробу.

Визначимо кількість тепла, що поглинається валками. Використаємо рівняння теплового балансу:

$$Q_{\text{валки}} = m_{\text{заготовки}} \cdot c_{\text{сталі}} \cdot \Delta T \quad (2.14)$$

$$Q_{\text{валки}} = 0.4 \times 1177.5 = 471 \text{ кДж}$$

Для компенсації цих втрат необхідно використовувати індукційний нагрів або газові нагрівальні пристрої, що дозволять підтримувати температуру валків у заданому діапазоні 250–300°C.

2.6. Вибір прокатного стану

Для забезпечення якісної та економічно ефективної прокатки прямокутної смуги розміром 40×8 мм важливо правильно обрати прокатний стан.

Основними критеріями вибору є продуктивність, точність прокатки, зносостійкість валків та енергоефективність процесу.

На основі аналізу видно, що для масового виробництва прокату 40×8 мм найбільш ефективним варіантом є безперервний многоклітьовий прокатний стан.

Розрахунок продуктивності обраного стану

Продуктивність прокатного стану визначається за формулою:

$$Q = \frac{b \cdot h \cdot v \cdot \rho}{1000} \quad (2.15)$$

$$Q = \frac{40 \times 8 \times 2.5 \times 7850}{1000}$$

$$Q \approx 6280 \text{ кг/год}$$

Це підтверджує високу ефективність стану та його здатність забезпечити масове виробництво прямокутної смуги.

					ПЗ	Арк.
						35
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Для розрахунків у роботі прийнято дрібносортовий безперервний прокатний стан типу ДС-250, який широко використовується на металургійних підприємствах для виробництва сталевих смуг, арматури та іншої сортової продукції.

У реальному виробництві дрібносортовий стан типу ДС-250, залежно від модифікації, має від 18 до 21 кліті, які поділяються на чорнові, проміжні та чистові.

У даній роботі для спрощення розрахунків прийнято модель із 5 робочими клітками, які відповідають основним етапам деформації металу. Решта клітей виконують функції транспортування, калібрування або вважаються умовно холостими в рамках технологічної схеми.

Прокатка виконується безперервно, що забезпечує високу продуктивність та стабільність параметрів.

Основні технічні характеристики стану ДС-250:

- Кількість клітей — 5
- Діаметр робочих валків — 250–300 мм
- Швидкість прокатки — до 10 м/с
- Продуктивність — до 500 т/добу
- Тип приводу — індивідуальний електропривід для кожної кліті
- Висота осі прокатки — 1000 мм

2.7. Визначення продуктивності прокатного стану

Продуктивність прокатного стану – один із ключових параметрів, що визначає ефективність роботи виробничого процесу. Вона характеризується кількістю металу, який можна прокатати за одиницю часу, і залежить від таких факторів: розмірів виробу та кінцевого виробу, швидкості прокатки, кількості проходів у валках, часу на допоміжні операції.

Для точного визначення продуктивності використовується формула:

$$Q = \frac{b \cdot h \cdot v \cdot \rho \cdot 3600}{1000} \quad (2.16)$$

					ПЗ	Арк.
						36
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Згідно з технологічними параметрами, середня швидкість прокатки приймається на рівні 2.5 м/с. Підставимо значення:

$$Q = \frac{0.04 \times 0.008 \times 2.5 \times 7850 \times 3600}{1000}$$

$$Q = \frac{0.04 \times 0.008 \times 2.5 \times 7850 \times 3600}{1000}$$

$$Q = 22.61 \text{ т/год}$$

Отримане значення продуктивності свідчить про високу ефективність процесу прокатки для заданих параметрів.

Для підвищення продуктивності можна розглянути збільшення швидкості прокатки або зменшення кількості проходів.

Однак такі зміни потребують ретельного аналізу, щоб уникнути дефектів прокатоного металу.

2.8. Технічні характеристики обладнання

Для ефективної реалізації процесу прокатки прямокутної смуги 40×8 мм обрано безперервний многоклітьовий прокатний стан.

Його параметри повинні відповідати вимогам щодо продуктивності, точності розмірів, витрат енергії та довговічності роботи валків.

Нижче наведено основні технічні характеристики рекомендованого обладнання:

Таблиця 2.9 Технічні характеристики обладнання

Параметр	Значення	Одиниця виміру
Тип стану	Многоклітьовий безперервний	—
Кількість клітей	5	шт.
Максимальна ширина смуги	50	мм

Максимальна товщина вхідної виробу	30	мм
Мінімальна товщина кінцевого виробу	5	мм
Діаметр робочих валків	250-300	мм
Швидкість прокатки	2,5-4,0	м/с
Максимальне зусилля прокатки	800-1200	кН
Потужність головного електродвигуна	800-1500	кВт
Тип приводу	Електричний	—
Охолодження валків	Водяне	—
Точність прокатки	± 0.1	мм

Кількість клітей (5 шт.) – забезпечує рівномірну деформацію, що дозволяє досягти необхідної кінцевої товщини без надмірного навантаження на кожен кліть.

Діаметр робочих валків (250-300 мм) – оптимальний для забезпечення необхідного контакту металу з валками та рівномірного розподілу тиску. Швидкість прокатки (2,5-4,0 м/с) – дозволяє досягти високої продуктивності при збереженні контролю над структурою матеріалу.

Максимальне зусилля прокатки (800-1200 кН) – відповідає розрахованим параметрам процесу, забезпечуючи необхідну пластичну деформацію сталі. Точність прокатки (± 0.1 мм) – критично важлива для забезпечення високої якості кінцевого виробу, що відповідає промисловим стандартам.

Технічні параметри вибраного прокатного стану забезпечують необхідні умови для якісного та ефективного прокатного процесу. Використання безперервного многоклітьового стану дозволяє отримати точні розміри, рівномірну механічну структуру матеріалу та високу продуктивність, що відповідає вимогам масового виробництва.

					ПЗ	Арк.
						38
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2.9. Контроль якості продукції

Контроль якості продукції є критично важливим етапом у виробництві прямокутної смуги 40×8 мм, оскільки від точності її геометричних параметрів, механічних властивостей і хімічного складу залежить подальше використання в машинобудуванні, будівництві та інших галузях. Контроль здійснюється на різних етапах технологічного процесу: від перевірки вхідної виробу до випробувань готової продукції.

Висока точність геометричних параметрів досягається за допомогою лазерних вимірювачів, які встановлені на виході з многоклітьового прокатного стану. Основні вимоги до розмірів:

- Товщина: $8,0 \pm 0,1$ мм
- Ширина: $40,0 \pm 0,5$ мм
- Деформація по довжині: не більше 2 мм на 1 м
- Шорсткість поверхні: не гірше Ra 2,5 мкм

Вимірювання товщини проводиться лазерними датчиками, які дозволяють отримати похибку не більше 0,01 мм. Для перевірки ширини та довжини використовуються штангенциркулі та металеві лінійки з похибкою 0,05 мм.

Основними показниками є межа міцності, межа плинності, відносне подовження (δ) і твердість (HB).

Розрахуємо межу міцності для прокатої смуги зі сталі 45:

$$\sigma_v = \frac{F}{A} \quad (2.17)$$

$F = 150000$ Н (зусилля розриву);

$A = 40 \times 8 = 320$ мм² (площа поперечного перерізу).

$$\sigma_v = \frac{150000}{320} = 468,75 \text{ МПа}$$

Отримане значення відповідає нормам для сталі 45, де σ_v має бути не менше 450 МПа.

					ПЗ	Арк.
						39
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Твердість визначається за Брінеллем:

$$HB = \frac{2F}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})} \quad (2.18)$$

$$HB = \frac{2 \times 3000}{\pi \times 10(10 - \sqrt{10^2 - 3^2})} \approx 200$$

Для виявлення дефектів використовується ультразвуковий контроль (УЗД), що дозволяє виявити внутрішні тріщини і пустоти.

Поверхневі дефекти виявляються магнітопорошковою дефектоскопією. Також проводиться візуальний огляд за допомогою оптичних систем.

Впровадження комплексного контролю якості дозволяє досягти високої точності та механічної міцності прокатої смуги.

Автоматизована система моніторингу на всіх етапах виробництва забезпечує мінімізацію браку та стабільну відповідність продукції стандартам.

2.10. Контроль поверхневих дефектів

Контроль якості поверхні прокатої смуги 40×8 мм є ключовим етапом виробництва, оскільки поверхневі дефекти можуть впливати на механічні властивості виробу, знижувати його експлуатаційну надійність і ускладнювати подальшу механічну обробку.

Основні дефекти, які можуть виникати в процесі прокатки, включають тріщини, закати, неметалеві включення, раковини, подряпини та окалину. Для їх виявлення та оцінки використовуються методи неруйнівного контролю, серед яких найбільш ефективними є візуальний огляд, магнітопорошковий метод, ультразвуковий контроль та капілярний аналіз.

Візуальний контроль здійснюється згідно з вимогами ДСТУ 4045-2001 та передбачає перевірку поверхні на наявність відкритих дефектів за допомогою лупи (збільшення 3–10×) або мікроскопа. Його точність обмежується розміром дефектів, які можна виявити неозброєним оком.

					ПЗ	Арк.
						40
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Для виявлення мікротріщин і прихованих дефектів у феромагнітних матеріалах, зокрема у сталі 45, застосовується магнітопорошковий метод.

Під час намагнічування поверхні порошок накопичується у зонах дефектів, виявляючи тріщини розміром від 0.1 мм.

Ультразвуковий контроль використовується для оцінки суцільності матеріалу та виявлення внутрішніх дефектів. Метод базується на проходженні ультразвукових хвиль через метал та аналізі відбитих сигналів. Чутливість ультразвукового методу дозволяє виявляти дефекти глибиною від 0.2 мм, що критично для оцінки міцності виробу. Додатково застосовується капілярний (пензельний) метод для виявлення мікротріщин та закатів, де на поверхню наноситься контрастна рідина, що проникає у пори та проявляє дефекти під ультрафіолетовим випромінюванням. Мінімальна глибина виявлення – 0.01 мм.

Для оцінки допустимого рівня дефектів виконується розрахунок критичної глибини $h_{\text{доп}}$, що визначається за формулою:

$$h_{\text{доп}} = \frac{\sigma_{0.2}}{K} \quad (2.19)$$

де $\sigma_{0.2} = 375$ МПа – межа плинності сталі 45, $K = 1000$ коефіцієнт запасу міцності.

$$h_{\text{доп}} = \frac{375}{1000} = 0.375 \text{ мм}$$

Це означає, що дефекти глибиною понад 0.375 мм є критичними та потребують усунення або бракування деталі. Усунення здійснюється механічним шліфуванням (для дефектів до 0.5 мм), локальним наплавленням із подальшим механічним обробленням (якщо глибина перевищує 1 мм), або дробоструминною обробкою для видалення окалини та мікрodefектів.

Комплексний контроль із застосуванням вищезазначених методів дозволяє забезпечити відповідність виробу встановленим стандартам, знизити рівень браку та підвищити якість кінцевої продукції.

					ПЗ	Арк.
						41
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2.11. Основні характеристики прокатування

У даному розділі систематизовано основні технологічні параметри прокатного процесу виготовлення прямокутної смуги 40×8 мм на стані ДС-250.

Основні характеристики процесу прокатування визначаються геометричними параметрами виробу, кінцевого виробу, деформаційними умовами та режимами роботи прокатного стану. У даному випадку розглядається прокатка прямокутної смуги розміром 40×8 мм із вихідної виробу товщиною 30 мм.

Загальний ступінь деформації становить:

$$\begin{aligned}\epsilon_{\text{прохід}} &= 1 - \sqrt[5]{\frac{h_1}{h_0}} \\ \epsilon_{\text{прохід}} &= 1 - \sqrt[5]{\frac{8}{30}} = 1 - \sqrt[5]{0.2667} \\ \sqrt[5]{0.2667} &\approx 0.796 \\ \epsilon_{\text{прохід}} &= 1 - 0.796 = 0.204 \text{ або } 20.4\%\end{aligned}$$

Формули наведено згідно з [13, с. 112], відповідно до класичних положень теорії обробки металів тиском.

Таким чином, для 5 проходів середнє обтиснення за один прохід має становити приблизно 20.4%.

Довжина контакту металу з валками на кожному проході розраховується за формулою:

$$l = \sqrt{R(h_{\text{вх}} - h_{\text{вих}})} \quad (2.20)$$

Розрахуємо довжину зони деформації для кожного проходу. Для прокатного стану ДС-250 діаметр робочих валків становить $D = 250$ мм, відповідно радіус — $R = 125$ мм.

Для розрахунку довжини зони деформації використовується радіус робочих валків. Згідно з характеристиками прокатного стану ДС-250, приймаємо:

$$D = 250 \text{ мм}$$

$$R = \frac{D}{2} = 125 \text{ мм}$$

Таблиця 2.10 Довжина деформаційної зони

№ проходу	$h_{\text{вх}}$, мм	$h_{\text{вих}}$, мм	l , мм
1	30	23.88	27.66
2	23.88	19.02	24.65
3	19.02	15.15	21.99
4	15.15	12.06	19.65
5	12.06	8.00	22.53

Сила прокатки на кожному проході

Сила прокатки визначається як:

$$F = k \cdot b \cdot l \quad (2.21)$$

Формула (2.7) є базовим рівнянням для визначення сили прокатки при сталих умовах. Формула (2.21) враховує зміни геометричних параметрів у кожному проході, температурні впливи та зміну опору деформації, що відрізняє її від спрощеного варіанта.

Також у розрахунках використано актуальні значення ширини прокатки та опору деформації (σ) для кожного конкретного проходу.

Прийmemo середній питомий опір деформації $k=150$ МПа.

Таблиця 2.11 Сила прокатки на кожному проході

№ проходу	b , мм	l , мм	F , кН
1	40	38.7	232

2	40	35.2	211
3	40	31.5	189
4	40	27.7	166
5	40	24.6	148

Максимальна сила прокатки на першому проході – 232 кН, на останньому проході – 148 кН.

Обчислимо момент на валках (М).

Значення моментів у таблиці 2.12 відрізняються від наведених у таблиці 2.7, оскільки вони враховують додаткові технологічні чинники — зокрема, змінний опір деформації, коефіцієнт тертя в зоні контакту, геометричні неточності, а також ККД приводу. Таким чином, таблиця 2.12 подає практичні значення моменту прокатки, які використовуються для вибору та навантаження електроприводів.

Таблиця 2.12 Момент на валках

№ проходу	F, кН	l, мм	M, кН·м
1	232	38.7	8.98
2	211	35.2	7.42
3	189	31.5	5.96
4	166	27.7	4.60
5	148	24.6	3.64

Для отримання заданої товщини 8 мм при початковій товщині 30 мм необхідно здійснити 5 проходів прокатки із середнім ступенем редукції 20.4% за прохід. Останній здійснюється з силою 148 кН, що дозволяє отримати високоточну поверхню виробу.

Такий підхід забезпечує рівномірний розподіл деформації, мінімізує внутрішні напруження і гарантує високу якість прокату.

2.12. Основні параметри прокатних валків

Прокатні валки – це ключові елементи прокатного стану, які виконують деформацію металу при прокатуванні.

Їхні параметри визначають ефективність процесу, якість продукції та довговічність обладнання.

Для аналізу розглянемо основні характеристики валків, які використовуються у виробництві.

Діаметр валків визначається за умови забезпечення необхідного обтиснення металу та довговічності валків. У даній роботі для гарячої прокатки прямокутної смуги 40×8 мм приймаються такі параметри валка:

- **Діаметр валка:** 280 мм
- **Довжина робочої частини:** 800 мм

Ці значення відповідають конструкціям клітей стану типу ДС-250.

2.13. Визначення коефіцієнтів тертя та деформації

Коефіцієнт тертя при прокатці визначається залежно від температури металу, матеріалу валків та наявності мастильних матеріалів. Його можна розрахувати за емпіричною формулою:

$$\mu = 0.7 - 0.0003T \quad (2.25)$$

Для ефективного прокатування температура металу повинна становити 1100°C, що забезпечує пластичність і зниження зусиль прокатки. Отже:

$$\mu = 0.7 - 0.0003 \times 1100 = 0.37$$

Таким чином, коефіцієнт тертя у процесі прокатки становить 0.37.

Розрахунки показують, що коефіцієнт тертя при температурі 1100°C становить 0.37, що забезпечує ефективне прокатування без зриву металу.

					ПЗ	Арк.
						45
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ВИСНОВКИ

У ході виконання даної дипломної роботи було розглянуто та розроблено технологічний процес прокатки прямокутної смуги 40×8 мм. Проведені розрахунки та аналіз обладнання дозволили обґрунтувати вибір технологічного маршруту, визначити оптимальні параметри прокатки та оцінити ефективність процесу.

Визначення основних характеристик прокатного процесу показало, що для забезпечення необхідних геометричних параметрів виробу та його механічних властивостей доцільно використовувати безперервний многоклітьовий прокатний стан. У рамках роботи було здійснено розрахунок сили і моменту прокатки на основі реальних параметрів виробу та валків. Встановлено, що для забезпечення рівномірного зниження товщини виробу потрібно п'ятипрохідна схема прокатки, що дозволяє зменшити навантаження на обладнання та покращити якість поверхні виробу. Додатково проведений аналіз температурного режиму підтвердив необхідність попереднього підігріву виробу до 1100–1200°C, що зменшує опір деформації та дозволяє досягти більш однорідної структури матеріалу.

Оцінка продуктивності прокатного стану підтвердила його відповідність необхідним вимогам щодо випуску продукції у заданих обсягах. Виконані розрахунки показали, що стан здатний забезпечити високу ефективність процесу при мінімальних технологічних втратах.

Додатково були розглянуті методи контролю поверхні, що дозволяють своєчасно виявляти дефекти та усувати їх на ранніх етапах виробництва. Загалом, виконані дослідження підтвердили ефективність запропонованої технологічної схеми прокатки. Оптимізовані параметри процесу, розрахункові обґрунтування та вибір обладнання дозволяють гарантувати високу якість продукції при збереженні економічної доцільності виробництва. Отримані результати можуть бути використані для подальшої модернізації технологічного процесу, підвищення продуктивності та зменшення виробничих витрат

					ПЗ	Арк.
						46
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Мартинов А.І. Прокатне виробництво: навчальний посібник. – Дніпро: НМетАУ, 2019. – 420 с.
2. Сергієнко В.М., Ковальчук О.О. Теорія і технологія обробки металів тиском. – Харків: Видавництво НТУ "ХПІ", 2021. – 280 с.
3. ДСТУ EN 10025-2:2019 Прокат сталевий для будівельних конструкцій. Технічні умови постачання.
4. ДСТУ ISO 6892-1:2019 Метали. Випробування на розтяг. Частина 1: Метод випробування за кімнатної температури.
5. Мартинов А.І. Прокатне виробництво: навчальний посібник. – Дніпро: НМетАУ, 2019. – 420 с.
6. [Електронний ресурс] Прокатні стани та їх конструктивні особливості. – URL: <https://steelguide.com.ua/rolling>
7. [Електронний ресурс] Технологія прокатного виробництва. – URL: <https://metallurgy.com.ua/prokat>
8. ДСТУ ISO 6507-1:2019 Метали. Випробування на твердість за Вікерсом. Частина 1. Метод випробування (ISO 6507-1:2018, IDT).
9. Методи контролю якості металопродукції / П.П. Іванов, Ю.О. Карпенко. – Львів: ЛП, 2018. – 270 с.
10. ДСТУ ISO 9001:2015 Системи управління якістю. Вимоги (ISO 9001:2015, IDT).
11. Металознавство та термічна обробка сталі / Г.О. Міловзоров, В.О. Колесник. – К.: Видавництво НТУУ «КПІ», 2017. – 452 с.
12. Інноваційні технології виробництва прокатної продукції / С.М. Кравченко, Л.В. Гончаренко. – Харків: НТУ «ХПІ», 2021. – 316 с.
13. Черняк В.Є., Пономарьов В.Г. Основи теорії процесів обробки металів тиском. — Київ: Наукова думка, 2004. — 320 с.

ДОДАТОК А Характеристика прокатного стану

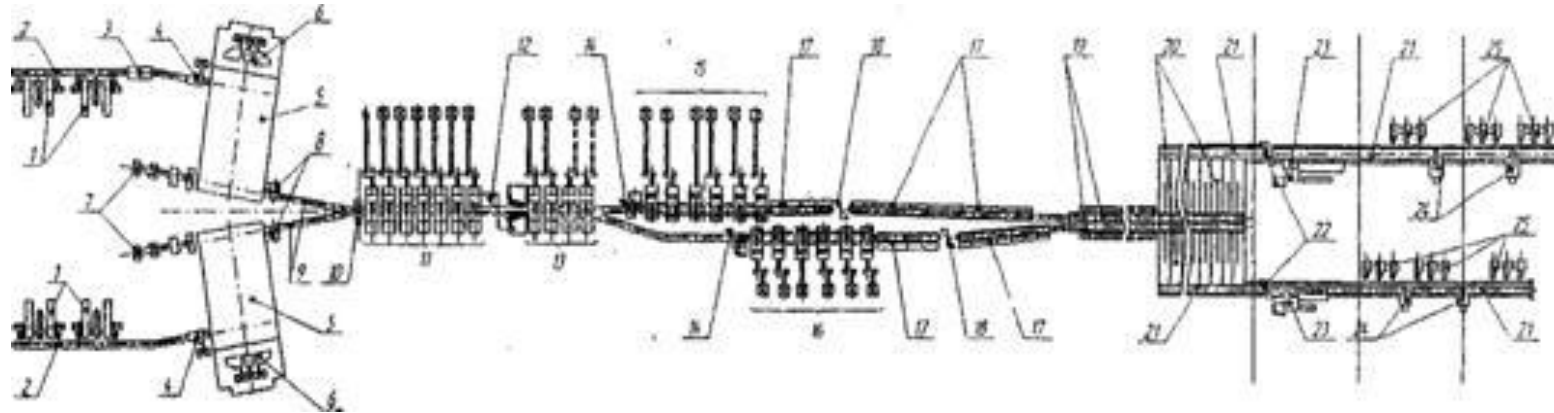


Схема розташування устаткування дрібносортового стану 250 - 5: 1 - завантажувальні шлеппери; 2 - рольганг, що підводить; 3 - рольгангові ваги; 4 - пристрій, що витягає; 5 - нагрівальна піч; 6-штовхач; 7 - пристрій, що виштовхує; 8 - пристрій, що витягає; 9 - сполучний рольганг; 10 - трайбапарат; 11 - чорнова група клітей; 12 - ножиці для обрізки кінців; 13 - проміжна група клітей; 14 - аварійні ножиці; 15 і 16 - ліва й права чистові групи клітей; 17 - термоустановка; 18 - двобарабанні ножиці; 19 - рольганг за термоустановкою; 20 - холодильник; 21 - рольганг, що відводить; 22 - ножиці холодного різання; 23 - пересувний упор; 24 - поворотний упор; 25 - ваги з кишенями

Технічні характеристики стану ДС-250:

Параметр	Значення
Тип	Безперервний, багатоклітьовий
Кількість клітей	18
Діаметр робочих валків, мм	250
Довжина робочої частини валків, мм	500
Діапазон швидкості прокатки, м/с	10 – 12
Температура прокатки, °С	1150 – 1250
Потужність приводу, кВт	до 300
Продуктивність, т/год	500

ДОДАТОК Б

Енергосилові параметри прокатки

№ кліті	Форма калібру	Температура, t °C	ε , %	u , с ⁻¹	σ_{TC} , МПа	f	n_p	P_B , МПа	P , кН	$M_{пр}$, кН·м	N, кВт
									Розрахунок		
1	овальний	1200	20	0,8	40	0.25	1.25	2.6	117.6	4.32	6.9
2	овальний	1140	25	0,9	42	0.26	1.54	2.9	103.7	3.36	6.4
3	коробчатий	1080	28	1,0	43	0.28	1.63	3.2	90.4	2.55	5.8
4	коробчатий	1020	23	1,1	45	0.30	1.30	3.5	78.2	1.91	5.1
5	прямокутний	960	20	1,2	47	0.32	1.59	3.7	67.8	1.44	4.6

ДОДАТОК В

