Міністерство освіти і науки України

Запорізький національний університет

(повне найменування вищого навчального закладу)

Інженерний навчально-науковий інститут ім Ю.М. Потебні

(назва факультету)

Кафедра металургійних технологій, екології та техногенної безпеки

(повна назва кафедри)

Пояснювальна записка

до кваліфікаційної бакалаврської роботи

рівень вищої освіти ___перший бакалаврський рівень_____

(другий (магістерський) рівень)

на тему Удосконалення методів розрахунку енергосилових параметрів при прокатуванні високих штаб на слябінгу 1150_____

Виконав: студент ___4__курсу, групи 6.*1363 ОМТ-С*

__Копилов О.О._____

(ПІБ) (підпис)

спеціальності

____*136 Металургія*_____

(шифр і назва)

спеціалізація

_____

(шифр і назва)

освітньо-професійна програма

*Обробка металів тиском*_____

(шифр і назва)

Керівник Явтущенко А.В._____

(прізвище та ініціали) (підпис)

Рецензент Воденнікова О.С._____

(прізвище та ініціали) (підпис)

Запоріжжя – 2026 року

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІНЖЕНЕРНИЙ НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ
ім Ю.М. ПОТЕБНІ

Кафедра *металургійних технологій, екології та техногенної безпеки*

Рівень вищої освіти *перший бакалаврський рівень*

другий (магістерський) рівень

Спеціальність *136 металургія*
(шифр і назва)

Освітньо-професійна програма *обробка металів тиском*
(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри *МТЕТБ*
Ю.О. Бєлоконь

"__" 12 2025 року

З А В Д А Н Н Я
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ (ПРОЕКТ) СТУДЕНТУ

Копилов Олекій Олександрович
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема проекту (роботи) Удосконалення методів розрахунку енергосилових параметрів при прокатуванні високих штаб на слябінгу 1150

керівник роботи (проєкту) *Явтушенко Анна Володимирівна* к.т.н. *доцент*
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом вищого навчального закладу від "23" 12 2025року № 1831-с

2. Строк подання студентом роботи (проєкта) 15.*06.2026*

3. Вихідні дані до роботи (проєкта) *Вдосконалення технології порошкової сталі*

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) *Реферат. Вступ. Загальна частина. Дослідницька частина, Охорона праці та техногенна безпека, Висновки. Перелік посилань.*

графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)
Креслення, презентаційний матеріал 11 слайдах (на 11 сторінках)

6. Консультанти розділів проекту (роботи)

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата завдання прийняв
Розділ 1 назва розділу	*Явтушенко А.В., доцент*	
Розділ 2 назва розділу	*Явтушенко А.В., доцент*	
Розділ 3 назва розділу	*Явтушенко А.В., доцент*	
Розділ 4 назва розділу	*Явтушенко А.В., доцент*	
Затвердив	*Бєлоконь Ю.О. завідувач кафедри*	

7. Дата видачі завдання _____

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломного проекту (роботи)	Строк виконання етапів проекту (роботи)	Прим
1	*Вступ*		
2	*Реферат*		
3	*Розділ 1*		
4	*Розділ 2*		
5	*Розділ 3*		
6	*Розділ 4*		
7	*Висновки*		

Студент _____ (підпис) **О.О. Копилов** (прізвище та ініціали)

Керівник проекту (роботи) _____ (підпис) **А.В. Явтушенко** (прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до бакалаврської роботи містить: 113 сторінок, 21 рисунок, 11 таблиць, 42 використаних джерел.

Об’єктом дослідження є точність методів визначення енергосилових параметрів під час прокатування високих розкатів.

Метою роботи є аналіз існуючих методик розрахунку енергосилових параметрів у процесі прокатки високих штаб.

У роботі виконано розрахунок деформаційних, кінематичних, температурних та енергосилових режимів прокатки на слябінгу 1150 ПАТ «Запоріжсталь».

Проведено аналіз розрахункових моделей енергосилових параметрів при прокатуванні великих злитків. Визначено режими обтиснень, розраховано зусилля та моменти прокатки, а також основні енергосилові характеристики процесу. Встановлено найбільш точні методики розрахунку енергосилових параметрів, використання яких дозволяє знизити енерговитрати та розширити сортамент прокатуваних штаб.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: ДЕФОРМАЦІЯ, СЛЯБ, ПРОКАТНИЙ СТАН, ПРОКАТНА КЛІТЬ, ВАЛКИ, ШВИДКІСТЬ, ТЕМПЕРАТУРА, РЕЖИМ ПРОКАТКИ, ЗУСИЛЛЯ, ПОТУЖНІСТЬ.

ABSTRACT

The explanatory note to the bachelor's thesis contains: 113 pages, 21 figures, 11 tables, and 41 references.

The object of the research is the accuracy of methods for determining energy and force parameters during the rolling of high stock pieces.

The purpose of the work is to analyze existing methods for calculating energy and force parameters in the process of rolling high slabs.

The thesis includes calculations of deformation, kinematic, temperature, and energy-force rolling modes at the 1150 slabbing mill of Zaporizhstal.

An analysis of calculation models for energy and force parameters during the rolling of large ingots was carried out. Reduction modes were determined, rolling forces and torques were calculated, and the main energy and force characteristics of the process were established. The most accurate methods for calculating energy and force parameters were identified, the application of which makes it possible to reduce energy consumption and expand the range of rolled slabs.

KEYWORDS: DEFORMATION, SLAB, ROLLING MILL, ROLLING STAND, ROLLS, SPEED, TEMPERATURE, ROLLING MODE, FORCE, POWER

Зміст

Вступ……..7
1.Теоретико-аналітичний розділ…….8
1. Аналіз сучасного стану досліджуваної проблематики…….…….8
1.1.1 Огляд сучасних методів вивчення деформації металу ……..…9
1.1.2. Дослідження глибини розповсюдження пластичних деформацій стиску …….……14
1.1.3. Характеристика геометричного осередку деформації ……...18
1.1.4. Особливості фізичного осередку деформації ……..…..19
1.1.5. Аналіз визначення середніх контактних нормальних напружень при прокатці штаб середньої та значної товщини ……..21
1.2 Огляд науково-технічних джерел …….……24
1.3 Формулювання мети та завдань дослідження ……...38
2. Дослідно-розрахунковий розділ ……..41
2.1 Програма та етапи проведення теоретичних досліджень …….41
2.2 Обладнання, технологічні процеси та методи визначення параметрів….42
2.2.1 Особливості технології виробництва слябів ……42
2.2.2 Процес прокатування зливків ……..…..44
2.2.3 Нагрівання зливків і подальша обробка прокату ……48
2.2.4 Аналіз режимів нагріву злитків …….52
2.2.5 Недосконалості технологічного процесу та обладнання …56
2.2.6 Регулювання горизонтальних валків …….61
2.2.7 Особливості налаштування вертикальних валків ……..…62
2.2.8 Особливості налаштування вертикальних валків …….63
2.3 Методика експериментальних досліджень та визначення параметрів процесу ……68

2.4 Методика експериментальних досліджень та визначення параметрів процесу ……..72
2.5 Методика експериментальних досліджень та визначення параметрів процесу ……75
3. Розрахункова частина ……81
3.1 Розрахунок деформаційних режимів прокатки на слябінгу 1150...81
3.2 Кінематичний аналіз режимів прокатки на слябінгу ……..….86
3.3 Визначення температурних параметрів прокатування злитка...91
3.4 Розрахунок енергосилових характеристик процесу прокатки...93
4. Охорона праці та безпека життєдіяльності ……..…95
4.1 Аналіз потенційно небезпечних і шкідливих виробничих факторів…95
4.2 Заходи щодо покращення умов праці ……...96
4.3 Забезпечення електробезпеки ……103
4.4 Заходи пожежної та техногенної безпеки ……..…104
4.5 Розрахунок системи штучного освітлення методом світлового потоку …105
6. Висновки……..…107
7. Використана література……..108

ВСТУП

Початковою сировиною для виготовлення прокатної продукції є злитки, що надходять зі сталеплавильних цехів або виробляються на машинах безперервного лиття заготовок (МБЛЗ). На першому етапі листопрокатного процесу використовуються слябінги, основним призначенням яких є перетворення злитків у заготовки великого перерізу. Попри активне розширення виробництва заготовок на МБЛЗ, слябінги й надалі займають важливе місце у прокатному виробництві.

Потреба у функціонуванні потужного обтискного стану на металургійному підприємстві зумовлюється як технологічними, так і економічними чинниками. Наявність такого обладнання сприяє зростанню ефективності роботи сталеплавильних агрегатів. У мартенівських цехах, де використовуються печі різних типів, практично неможливо забезпечити рівномірний графік випуску плавок у часі. Саме тому на заводі «Запоріжсталь» приймання та переробка продукції таких цехів з мінімальними витратами можлива завдяки роботі обтискного стану, який характеризується високою оперативністю та здатністю забезпечувати інші стани необхідними заготовками.

Протягом останнього десятиліття на слябінгу підприємства «Запоріжсталь» було реалізовано низку технічних удосконалень, що позитивно вплинули на ефективність його функціонування. Водночас у чинному технологічному процесі все ще залишаються певні недоліки. Для подальшого підвищення продуктивності слябінга, покращення якості прокатної продукції та скорочення енергетичних витрат необхідно здійснити комплекс реконструкційних заходів.

Крім того, для вдосконалення роботи прокатного обладнання важливим є детальне дослідження його енергосилових характеристик, а також

врахування напружено-деформованого стану металу. Це зумовило необхідність проведення спеціалізованих досліджень із використанням сучасної електровимірювальної техніки та електронно-обчислювальних систем. Одночасно зросли вимоги до точності отриманих результатів і обґрунтованості теоретичних рішень, що застосовуються під час виконання технологічних розрахунків.

1. Теоретико-аналітичний розділ

1.1. Аналіз сучасного стану досліджуваної проблематики.

Ще відносно недавно завдання, пов’язані з інтенсифікацією режимів прокатки та збільшенням швидкості процесу, вирішувалися переважно на основі практичного досвіду калібрувальників і технологів обтискних цехів. На сьогодні резерви механічного й електричного обладнання значною мірою вже вичерпані.

У зв’язку з цим подальше підвищення ефективності роботи прокатного стану потребує детального аналізу його енергосилових характеристик, а також визначення напружено-деформованого стану металу. Це спричинило необхідність проведення спеціальних досліджень із використанням сучасної електровимірювальної техніки та електронно-обчислювальних систем. Одночасно зросли вимоги до достовірності отриманих результатів і точності теоретичних рішень, які застосовуються під час технологічних розрахунків. Саме тому в останні десятиліття суттєво підвищився інтерес до теорії прокатки товстих штаб. У цей період було опубліковано низку наукових праць, присвячених особливостям формозміни злитків. Значний внесок у розвиток цього напряму зробили Т. М. Голубєв, П. А. Александров, Ю. М. Чижиков, Є. С. Рокотян, В. А. Тягунов, Ю. В. Воротинцев, В. Л. Павлов, Ф. Е. Долженков, С. В. Макаєв, В. А. Ященко та інші дослідники. У багатьох роботах розглядаються питання динаміки й кінематики процесу прокатки, напружено-

деформованого стану металу, швидкісних режимів, продуктивності та умов функціонування електроприводу [16].

Крім того, було накопичено значний обсяг експериментальних даних щодо визначення середніх питомих тисків, характеристик міцності металу та інших аспектів теорії прокатки товстих штаб. Дослідження напружено-деформованого стану металу, а також показників його міцності й пластичності дали змогу отримати нові аналітичні залежності для визначення середнього нормального контактного напруження. Це дозволило виконувати необхідні інженерні розрахунки з оцінкою похибки за експериментальними результатами. Таким чином, теоретичні моделі та експериментальні дослідження взаємно доповнюють одна одну.

Раніше сумарний момент, що діє на обидва валки, визначали як добуток сили прокатки на довжину горизонтальної проекції дуги захвату та ширину штаби. Однак дослідження Є. С. Рокотяна довели, що коефіцієнт плеча рівнодіючої істотно залежить від параметра ОД, де враховується середня товщина (висота) перерізу штаби. Якщо приймати цей коефіцієнт рівним 0,5, як це часто робилося раніше, то в перших проходах значення моменту буде суттєво заниженим, а в останніх — завищеним.

Отже, нерівномірність розподілу моментів пояснюється не лише різницею діаметрів валків або швидкостей їх обертання. Значний вплив мають також нерівномірність нагріву злитка, відмінності у стані поверхні верхньої та нижньої граней розкату, а також кут його подачі у валки [18]. Тому якісний прогрів злитків, застосування гідрозбиву окалини та забезпечення правильної подачі розкату до валків здатні суттєво зменшити динамічне перевантаження прокатного двигуна.

Таким чином, накопичені експериментальні дані щодо динаміки та кінематики процесів прокатки товстих штаб, а також наявність придатних для інженерних розрахунків теоретичних методів визначення СНКН, сили та моментів прокатки створюють можливість для розроблення раціональних

режимів прокатки злитків з урахуванням якості металу, продуктивності та міцності основних вузлів обтискного стану [16].

1.1.1. Огляд сучасних методів вивчення деформації металу.

Залежно від поставлених цілей дослідження процес деформації металу під час прокатки можна розглядати з двох основних позицій:

1) як процес течії матеріалу, тобто аналіз послідовних переміщень і зміни форми окремих елементарних об’ємів штаби у просторі та часі під час проходження осередку деформації;

2) як результат формозміни матеріалу внаслідок його течії.

У кожному з цих випадків дослідження можуть виконуватись різними методами. До основних способів належать:

- аналіз викривлення форми бічної поверхні прокатуваної штаби. Цей метод переважно застосовується для дослідження течії металу у поперечному напрямку та визначення характеру розподілу потовщення по висоті штаби;

- дослідження зміщення точок по висоті, які до прокатки розташовувалися на одній вертикальній або горизонтальній лінії в площині поперечного перерізу. Такий підхід використовують здебільшого для вивчення розподілу деформації стиснення по висоті та ширині розкату, а також для оцінки глибини її проникнення у товщу металу;

- аналіз зміни форми комірок прямокутної координатної сітки, нанесеної до прокатки на бічну грань або на поздовжню площину роз’єму двох половин зразка. Цей спосіб зазвичай застосовують для визначення величини поздовжніх переміщень різних точок штаби, що до деформації знаходилися на одній вертикалі, під час проходження ними осередку деформації [16].

Кожен із перелічених методів найбільш ефективний для вивчення певної сторони процесу деформації. Дослідження переміщень елементарних об’ємів

уздовж однієї координатної осі водночас дає можливість робити певні висновки і щодо переміщень у напрямку інших координатних осей.

Процес течії металу в осередку деформації являє собою просторове переміщення елементарних об'ємів штаби, яке можна розкласти на складові: деформацію та переміщення вздовж осі прокатки OX (витяжка), осі OY (розширення) та осі OZ (обтиснення). Оскільки під час прокатки об'єм металу залишається сталим, зміна одного з розмірів штаби неминуче пов'язана зі зміною двох інших. Саме тому кожен із зазначених методів, характеризуючи формозміну в одному напрямку, дозволяє також робити наближені висновки щодо переміщення металу в інших напрямках.

На основі наведеної класифікації можна проаналізувати існуючі методи дослідження деформації металу з точки зору їх придатності для вивчення особливостей течії металу під час прокатки товстих штаб. Найбільш доцільною слід вважати методику, що дозволяє оцінити ступінь пропрацювання злитка, закономірності розподілу деформації стиснення в об'ємі розкату, а також характер поперечного і поздовжнього переміщення частинок металу. Основною метою таких досліджень є встановлення механізму деформації товстих штаб та визначення схеми напружено-деформованого стану металу.

Одним із перших дослідників у сфері вивчення деформації металу всередині прокатуваної штаби був А. Холленберг. Ще у 1875 році він намагався пояснити характер течії металу шляхом аналізу викривлення гладких стрижнів-«свідків», які попередньо вставлялися у заготовку [19, с. 58]. Незважаючи на те, що результати цих досліджень не збереглися, вони стали важливим поштовхом для подальшого розвитку методів вивчення течії металу. У подальшому багато науковців використовували підхід А. Холленберга у своїх роботах.

У 1915 році В. Трінкс досліджував течію металу як на бічних гранях, так і всередині штаби, застосувавши координатну сітку, нанесену різцем на

поверхню та внутрішні площини зразків [20, с. 33]. Завдяки цьому вдалося пояснити механізм взаємного зсуву окремих шарів металу та виявити різницю швидкостей частинок, які до деформації перебували в одній вертикальній площині осередку деформації. Однак ні метод координатної сітки, ні викривлення гладких стрижнів не забезпечували повного розкриття закономірностей деформації металу під час прокатки товстих штаб.

Розвиваючи ідеї А. Холленберга, Н. Мец замінив гладкі стрижні спеціальними гвинтами [20]. Метод «гвинта» дозволив отримати як якісні, так і кількісні характеристики деформації у висотному та поперечному напрямках, а також встановити зв’язок між нерівномірністю цих деформацій. Крім того, цей підхід дав можливість визначити схему напруженого стану металу в різних точках поперечного перерізу. Саме завдяки методу Н. Меца було детально досліджено пластичну деформацію металу під час прокатки невеликих зразків. Водночас застосування цього способу для великих злитків є складним через технічні труднощі, пов’язані зі свердлінням глибоких отворів.

Більш простою та зручною вважається методика, заснована на аналізі зміни конфігурації бічних граней під час прокатки. У цьому випадку форму бічної поверхні в кожному проході фіксують безпосередньо у виробничих умовах за допомогою багатоточкового штангенциркуля [17, с. 109–118], припікання фанерних шаблонів [21, с. 76–92], притискання свинцевих прутків [22] або інших способів.

Проте розширення не є єдиним наслідком висотної деформації. За відсутності поздовжньої витяжки зміна форми бічної грані дозволяла б оцінити не лише нерівномірність розподілу розширення по висоті розкату, а й ступінь обтиснення окремих шарів металу. Однак одночасна наявність поздовжньої деформації та змінне співвідношення об’ємів металу, що витрачаються на розширення і витяжку, суттєво ускладнюють оцінку взаємозв’язку поперечної та висотної деформацій. Глибина проникнення деформації по ширині розкату неоднакова і зменшується від осі до периферії.

Тому висоту зони локального розширення не можна ототожнювати з глибиною проникнення деформації стиснення, як це іноді робиться в окремих роботах [21, с. 76–92 та ін.]. Крім того, явище утяжки металу в центральній частині розкату на початкових проходах може створити хибне уявлення про повне пропрацювання перерізу. Отже, зміна форми бічної грані лише приблизно відображає характер розподілу деформації стиснення по висоті та глибину її проникнення у метал.

Прагнучи точніше встановити закономірності деформації великих злитків і врахувати недоліки попередніх методів, Т. М. Голубєв запропонував оригінальну методику визначення меж зони пластичної деформації в обтискуваному злитку [23, с. 57–73]. Для цього на кількох горизонтальних рівнях по висоті злитка висвердлювали отвори, в які вставляли порцелянові трубки з ніхромовими стрічками. Стрічки ізолювалися одна від одної та від стінок трубки так, щоб контакт із металом виникав лише в момент деформації певної ділянки. Під час прокатки отвори сплющувалися, електричне коло замикалося і виникав відповідний сигнал. Однак ця методика не дозволяла достовірно визначити глибину проникнення деформації по ширині розкату. Крім того, замикання контакту на одному рівні ще не означало, що саме там проходить нижня межа пластичної деформації, оскільки деформований шар міг знаходитися між сусідніми контактами. Через значні відстані між отворами похибка вимірювань залишалася досить великою. Також цей спосіб не давав можливості дослідити нерівномірність розподілу деформації залежно від величини обтиснення та інших факторів.

У ряді наукових праць, зокрема в роботах Т. М. Голубєва [24, 25], І. Я. Тарновського [26], П. І. Полухіна [27], [28] та інших авторів, для дослідження закономірностей розподілу деформації всередині прокатуваного матеріалу пропонувалося використовувати моделювання процесу прокатки злитків на блюмінгу. Як модельні зразки застосовували пластилінові, свинцеві та інші

невеликі за розмірами заготовки, які прокатувалися на лабораторних станах з валками діаметром 80–200 мм.

Попри дотримання геометричної подібності, у таких дослідженнях не забезпечувались умови повної фізичної та механічної подібності процесів деформації [29, 30]. С. І. Губкін зазначав, що навіть для геометрично подібних зразків з одного металу зміна їх об’єму впливає на пластичність та опір деформації. Великі зразки характеризуються меншою пластичністю та нижчим опором деформації. При зменшенні об’єму співвідношення поверхні до об’єму зростає, що посилює стискання та підвищує пластичність матеріалу. Це, у свою чергу, суттєво впливає на кількісні характеристики досліджуваних залежностей.

Т. М. Голубєв також надавав великого значення природі матеріалу та його пластичності, вважаючи, що нерівномірність розподілу деформації значною мірою визначається швидкістю поширення меж осередку пластичної деформації, яка залежить від властивостей речовини, коефіцієнта зовнішнього тертя та інших чинників.

Найбільш результативними вважаються досліди С. В. Макаєва, присвячені вивченню деформації контактних шарів. Для цього у верхній та нижній частинах злитка висвердлювали по два ряди отворів, куди вставляли спеціальні штирі. Аналіз зміни кроку між штирями дозволив застосувати методику І. Я. Тарновського [26] для побудови кривих наростаючих витяжок. Проведені експерименти значно розширили уявлення про характер деформації товстих штаб і дали можливість визначити наявність та протяжність зони прилипання залежно від різних технологічних факторів.

1.1.2. Дослідження глибини розповсюдження пластичних деформацій стиску

Особливий інтерес під час дослідження деформації великих злитків становить явище поверхневої пластичної деформації металу. Вперше на нього

звернули увагу Н. П. Гавриленко, А. К. Зайцев та А. Ф. Головін ще у 20-х роках XX століття, а згодом це питання досліджували Є. Зібель, Є. Котель та інші науковці.

Суть цього явища полягає в тому, що на початкових етапах обтиснення товстих штаб глибина проникнення пластичної деформації визначається не стільки висотою перерізу розкату, скільки геометричними та технологічними параметрами процесу прокатки. Така специфіка процесу безпосередньо впливає на напружено-деформований стан металу і, відповідно, на якість отриманої заготовки [16].

Усвідомлюючи важливість цього явища як з теоретичної, так і з практичної точки зору, Т. М. Голубєв, Г. С. Микан та П. А. Александров провели перші виробничі експерименти, спрямовані на експериментальне визначення факторів, що впливають на глибину проникнення деформації стиснення, а також на виявлення закономірностей формозміни великих мас металу [16].

У результаті досліджень пластилінових зразків, прокатаних з різними швидкостями та ступенями обтиснення [23, 24], Т. М. Голубєв дійшов висновку, що при незначних обтисненнях центральні шари металу можуть залишатися недеформованими. У цих зонах виникають додаткові розтягувальні напруження, які за певних умов здатні спричиняти утворення внутрішніх розривів. Із збільшенням обтиснення верхня та нижня деформовані області поступово з’єднуються і починають розширюватися: спочатку у напрямку входу металу в валки, а потім — у бік виходу з них. У поперечному перерізі межі зон пластичної деформації мають криволінійну форму з максимальним розвитком по осі штаби. На основі цих досліджень можна припустити існування оберненої залежності між швидкістю прокатки та глибиною проникнення деформації, хоча автор не формулює однозначного висновку з цього питання.

У процесі стиснення пластична деформація поширюється від контактних поверхонь у глиб металу слідом за пружною деформацією, яка розповсюджується зі швидкістю звуку в даному середовищі. Контактні шари під дією прикладеного навантаження зміщуються та передають тиск на нижні шари металу, викликаючи у них відповідні зрушення. Швидкість поширення пластичної деформації залежить переважно від температури матеріалу та швидкості деформування і, як встановили Т. А. Канторова та Я. І. Френкель [31], не може перевищувати швидкість звуку в даному середовищі.

У міру заглиблення зони пластичної деформації тиск, який спричиняє переміщення частинок металу, поступово втрачає свою інтенсивність. На певній відстані хвилі деформації згасають, і процес припиняється. Частинки металу, що переміщуються у напрямку дії сили, зустрічають опір навколишньої маси, який перевищує їхню інерцію. Для ковзання по кристалічних площинах та подолання сил інерції потрібен певний час, що залежить від величини прикладеного імпульсу. Тому зміна обтиснення або швидкості деформування призводить до зміни швидкості поширення пластичної деформації та, відповідно, до зміни об’єму металу, охопленого деформацією в конкретний момент часу.

Разом із тим не можна повністю погодитися з твердженням про те, що сила тиску, яка викликає пластичну деформацію, змінюється по висоті перерізу розкату, оскільки це суперечило б законам механіки. Насправді згасання пластичної деформації пояснюється тим, що дія сили тиску при поширенні вглиб злитка розподіляється на дедалі більшу площу. У результаті виникаючі напруження зменшуються пропорційно до збільшення площі дії сили і на певній відстані стають нижчими за граничне значення, визначене умовами пластичності. Саме через це пластична деформація стиснення припиняється, хоча пружний вплив на центральні шари металу зберігається.

Питанням деформації злитків на слябінгах і дослідженню напружено-деформованого стану металу в осередку деформації присвячено низку

теоретичних та експериментальних праць П. А. Александрова [21; 32, с. 326–342] та інших дослідників. П. А. Александров поділив процес деформації злитків на два основні періоди, кожному з яких відповідає певна схема напружено-деформованого стану металу. Зовнішнім проявом переходу між цими періодами є зміна форми бічної грані розкату. Для першого періоду характерне інтенсивне розширення поблизу контактних поверхонь, тоді як у центральній частині перерізу розширення або відсутнє, або спостерігається утяжка металу. У результаті поперечний переріз набуває увігнутої форми. У другому періоді найбільше розширення спостерігається вже в центральних шарах металу, через що поперечний переріз стає опуклим.

Як граничну умову переходу від нерівномірної поверхневої деформації до рівномірної П. А. Александров розглядав певну рівність, отриману на основі геометричних співвідношень моделі поширення деформації, запропонованої С. І. Губкіним [29].

Розбіжності у трактуванні явища поверхневої деформації та умов її переходу до рівномірного характеру можуть пояснюватися недосконалістю експериментальних методик, відмінностями фізичного стану металу під час прокатки (температурою, якістю прогріву, маркою сталі), а також різницею геометричних параметрів процесу прокатки.

Крім того, у багатьох роботах часто змішуються два різні поняття. Повне «пропрацювання» перерізу, тобто проникнення деформації стиснення до осьових шарів металу по всій ширині розкату, ще не означає переходу до рівномірного обтиснення всіх шарів металу по висоті. Так, М. Л. Зарощінський [21, с. 93–100], аналізуючи результати П. А. Александрова [21, с. 76–92], зазначав, що увігнута форма бічних граней може зберігатися від першого до останнього проходу під час прокатки блюмів, незважаючи на повне пропрацювання перерізу. Однак П. А. Александров визначав саме умову переходу до рівномірної деформації, а не початок деформування центральних шарів. У такому випадку збереження увігнутої форми пояснюється різним

ступенем деформації поверхневих і центральних шарів металу, який зберігається навіть після повного пропрацювання перерізу, хоча й зменшується зі збільшенням обтиснення.

У більшості наведених досліджень головну увагу при оцінюванні характеру деформації товстих штаб, виборі оптимального діаметра валків блюмінга та визначенні раціональних режимів прокатки приділяли співвідношенню між висотою штаби, діаметром валків і величиною разового обтиснення. Проте суттєвий вплив мають також параметри осередку деформації, фізичні властивості сталі та швидкісні умови прокатки. Наприклад, зі зменшенням вмісту вуглецю в сталі, підвищенням температури прокатки та покращенням рівномірності прогріву металу по перерізу глибина проникнення деформації стиснення збільшується, а розширення центральних шарів металу відбувається інтенсивніше.

1.2. Огляд науково-технічних джерел

Удосконалення технології прокатування злитків на слябінгах є одним із ключових завдань сучасного прокатного виробництва. Саме на цьому етапі можливо істотно скоротити тривалість прокатування, зберегти значну частину теплової енергії злитка та зменшити енерговитрати процесу.

Під час прокатування великих злитків пластична деформація не охоплює весь переріз металу, що спричиняє суттєву нерівномірність деформацій по висоті злитка. Відомо, що зі збільшенням величини разового обтиснення глибина проникнення пластичної деформації підвищується [1, 2]. У зв’язку з цим виникає прагнення збільшувати обтиснення за один прохід. Проте реалізація такого підходу обмежується захоплюючою здатністю валків, яка в початковий момент захоплення та під час усталеного процесу є різною. У стабільному режимі можливість захоплення металу валками значно вища, ніж на початку процесу.

Разом із тим висока пластичність сталі при температурах гарячої прокатки дозволяє застосовувати дуже великі обтиснення без виникнення руйнувань, тріщин або розколювання кромок [4]. Н. Н. Крейдлін зазначав, що вперше це явище було встановлено С. А. Кушакевичем у 1939 році, коли проводилася прокатка трьох марок сталі з обтисненням понад 50 % за прохід. Пізніше результати були підтверджені у працях С. І. Губкіна, П. С. Істоміна та І. А. Перліна, які довели можливість прокатування металів з обтисненням 70–85 % за один прохід, тобто застосування надвисоких обтиснень (понад 75 %).

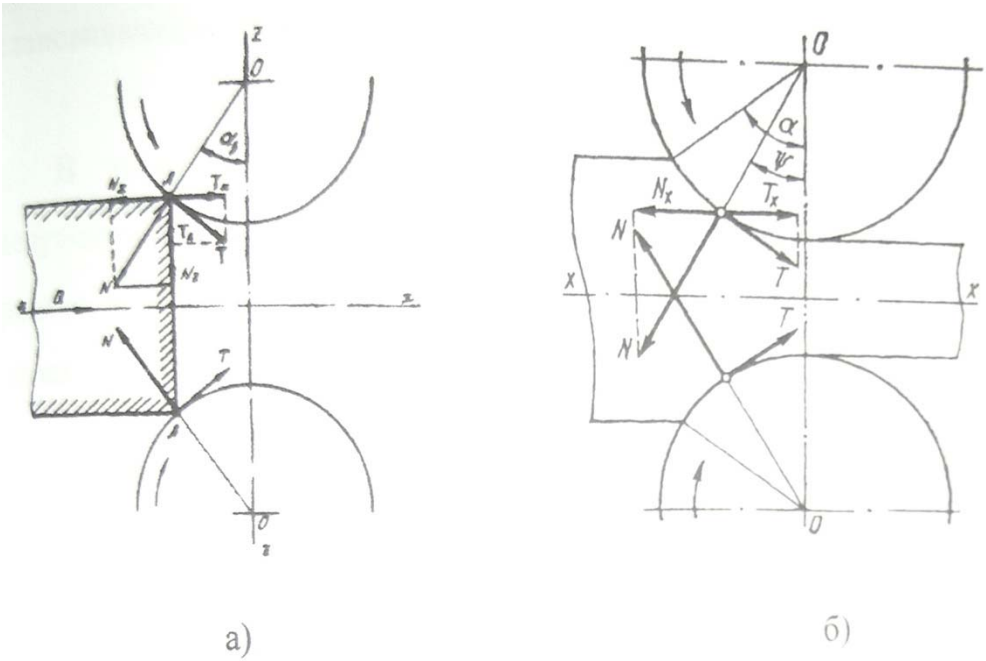
На основі цих досліджень було встановлено:

1. для багатьох металів і сплавів прокатування з обтисненням понад 50 % не обмежується їх пластичними властивостями;

2. збільшення величини обтиснення стримується міцністю валків, вузлів робочої кліті та потужністю головного приводу;

3. величина обтиснення також обмежується умовами стійкого захоплення металу валками.

У початковий момент захоплення контакт штаби з валками відбувається в точці, положення якої визначається кутом α (рисунок 2.1, а).



а) б)

Рисунок 2.1 – Схема сил (а – початковий момент контакту штаби з валками; б – граничний момент усталеного процесу прокатки)

З боку валків на штабу діють дві основні сили:

- виштовхувальна сила N, яка є рівнодіючою нормального тиску;
- втягувальна сила T, що відповідає рівнодіючій сил контактного тертя.

Умова захоплення металу валками має вигляд:

$$N_x < T_x ,$$

Після використання закону Амонтона та відповідних перетворень отримують залежності:

$$f_3 \times N \times \cos\alpha_3 = N \times \sin\alpha_3 , \qquad (1.1)$$

$$f_3 = tg\alpha_3 ,$$

$$f_3 = tg\beta_3 ,$$

$$\alpha_3 = \beta_3 ,$$

Наведені співвідношення характеризують умови захоплення в початковий момент прокатки. В усталеному процесі (рисунок 2.1, б) положення рівнодіючої сили N змінюється і визначається кутом ψ, який менший за кут α. У результаті проекція сили N_x зменшується, а сама рівнодіюча зміщується у напрямку виходу штаби з валків.

Для усталеного процесу умову можна записати у вигляді:

$$F_y \times N \times \cos\Psi = P \times \sin\Psi , \qquad (1.2)$$

Після спрощення та врахування закону Амонтона отримують:

$$\Psi = \beta_y ;$$

Якщо припустити рівномірний розподіл нормальних напружень, тоді:

$$\varphi = \frac{\alpha_y}{2} , \qquad (1.3)$$

Звідси:

$$2f = \alpha_y = 2\beta_y , \qquad (1.4)$$

Порівняння цієї умови з умовою захоплення в початковий момент дозволяє зробити висновок:

$$\alpha_3 = 2\alpha_y , \qquad (1.5)$$

Отже, в усталеному режимі існує певний резерв захоплюючої здатності валків. Виникає можливість використання цього резерву у технологічному процесі. З урахуванням того, що кути тертя при початковому захопленні та під час усталеного процесу відрізняються, реальне співвідношення між ними знаходиться в межах [3]:

$$\alpha_y = (1{,}2 - 1{,}4)\alpha_3 , \qquad (1.6)$$

Практична реалізація такого підходу полягає в тому, що після початкового захоплення металу процес прокатки тимчасово зупиняють, а потім виконують реверс і викидають ступінчасту смугу перед станом (рисунок 2.2).

Після цього потоншений кінець злитка повторно захоплюється валками, і подальша прокатка відбувається вже в усталеному режимі, який забезпечує резерв захоплюючої здатності щонайменше у 1,2 раза більший порівняно з початковим захопленням. Дослідження [3] показали, що збільшення разового обтиснення сприяє:

- підвищенню глибини проникнення пластичної деформації;
- зменшенню нерівномірності деформації по висоті перерізу;
- скороченню кінцевого обрізу.

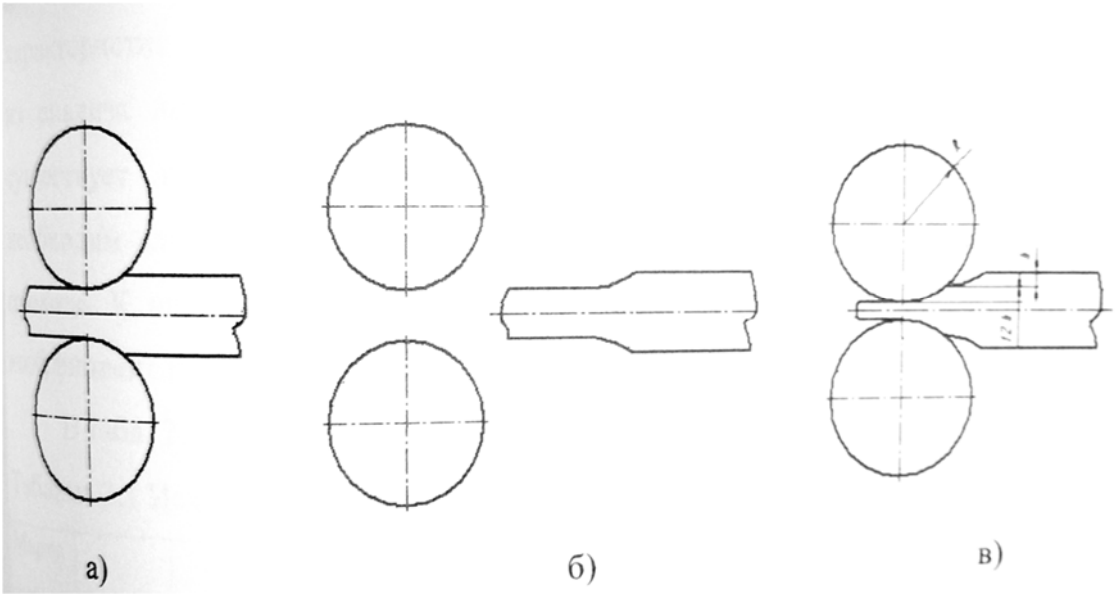


Рисунок 2.2 – Формування (а, б) і прокатка ступінчастого злитка (в).

Ефективність застосування надвисоких обтиснень підтверджується також патентом RU 2269390 B21B1/02 «Способ прокатки толстых

металлических плит», авторами якого є Ю. В. Даниленко, С. В. Родінков, Ю. В. Гесслер, В. К. Орлов та С. Х. Сіушев. Автори запропонували під час прогладжувального обтиснення наприкінці проходу виконувати додаткове локальне обтиснення на ділянці довжиною 300–600 мм, після чого сформований клиноподібний кінець плити подавати у валки для основного обтиснення.

У роботі Б. Н. Колосова та співавторів «Вибір і обґрунтування методики розрахунку енергосилових параметрів прокатки на реверсивному обтискному стані» розглянуто підхід до визначення енергосилових параметрів прокатки на стані 850. Методика базується на використанні аналітичних, емпіричних та напівемпіричних залежностей, які адекватно описують умови прокатки на реверсивних обтискних станах. У роботі наведено розрахунок параметрів прокатки круглої заготовки діаметром 80 мм зі сталі ШХ15 [5].

Для створення ефективних технологічних рішень найбільш перспективним є застосування математичного моделювання процесів прокатки із використанням комп'ютерних програм, здатних адекватно відтворювати фізичні умови деформації металу.

Формули визначення середнього нормального контактного напруження (СНКН), отримані на основі розв'язання диференціальних рівнянь рівноваги поздовжніх сил та умов пластичності (методики Кармана, Екелунда, Орована тощо), недостатньо точно описують процес прокатки товстих смуг при: (l/h_{cp} =0,1…… 1). При l/h_{cp} <1 на значення СНКН значно впливають зовнішні зони. А при l/h_{cp} > 1 домінуючим стає вплив сил тертя на контактних поверхнях металу та валків.

Для визначення СНКН А. І. Целіков [6] запропонував враховувати вплив зовнішніх зон за допомогою емпіричної залежності:

$$n''_\sigma = (l/h_{\text{ср}})^{-0,4} \text{ при } l/h_{\text{ср}} < 1, \qquad (1.7)$$

Є. С. Рокотян запропонував використовувати іншу формулу для визначення середнього значення СНКН:

$$P_{ср} = \beta\sigma_1 n_\sigma \cdot \ddot{n}_\sigma, \qquad (1.8)$$

де коефіцієнт, що враховує вплив зовнішнього тертя, визначається за методикою А. І. Целікова.

Існує також низка інших методик визначення СНКН, серед яких:

- модифікований метод Кармана з урахуванням глибини проникнення пластичної деформації;
- формула В. П. Котельникова;
- залежності В. А. Мастерова, В. М. Луговського, В. М. Клименка;
- методика М. Я. Бровмана та ін.

Аналіз цих підходів наведено у роботі [7]. Більшість авторів використовують співвідношення параметра $l/h_{ср}$, який характеризує вплив зовнішніх зон на коефіцієнт напруженого стану металу $n_\sigma = \frac{P_{ср}}{\sigma_т}$. Дослідження показують, що при: $l/h_{ср} \leq 1{,}0$ - коефіцієнт напруженого стану має мінімальне значення при величині $l/h_{ср}$, близької до 1. При подальшому зростанні параметра коефіцієнт збільшується через посилення впливу тертя між металом і валками (рисунок 2.3).

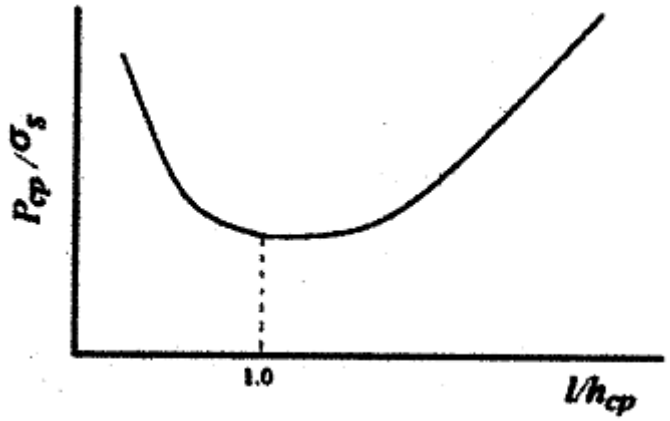


Рисунок 2.3 – Залежність коефіцієнта напруженого стану від параметра m при прокатці.

В основу методики розрахунку енергосилових параметрів для стану 850 [8] покладені аналітичні та емпіричні залежності, які адекватно описують умови прокатки на реверсивних обтискних станах.

Напругу плинності металу під час прокатки в кожному проході стана визначають із застосуванням методу термомеханічних коефіцієнтів, враховуючи ступінь деформації $\varepsilon = \frac{H-h}{H}$, швидкість деформації $u_{ср} = \frac{V \cdot \varepsilon}{l} \cdot A_и$ та температури металу Т, ° С. При цьому H і h характеризують висоту розкату відповідно до та після прокатки. Швидкість прокатування V у сталому режимі процесу знаходиться в межах 2,3…4,5 м/с, а на етапі захоплення металу валками - 0,8…1,3 м/с. Коефіцієнт $A_и$ враховує геометрію осередку деформації для заданої швидкості деформації. Остаточне значення межі текучості обчислюють за формулою: $l = \sqrt{R_к(H-h)}$, де $R_К$ – катаючий радіус валків.

Для обчислення середньої швидкості деформації $u_{ср}$ приймають середнє арифметичне між швидкістю прокатки в момент захоплення металу валками та швидкістю під час усталеного режиму прокатки. У завершальних проходах значення $u_{уст}$ є вищим. Температуру металу, що прокатується, а також характер її зміни за проходами визначають або розрахунковим шляхом як середньоінтегральну величину, або на основі експериментальних даних.

На основі отриманих значень ε, $u_{ср}$ і T встановлюють термомеханічні коефіцієнти, а за маркою сталі - базову напругу плинності. Кінцеве значення напруги текучості металу визначають за формулою:

$$\sigma_в = \sigma_б \cdot k_в \cdot k_и \cdot k_t, \tag{1.9}$$

Подальші розрахунки виконують з урахуванням параметрів осередку деформації для кожного проходу, які визначаються співвідношеннями:

$$\frac{l}{h_{ср}} = \frac{2l}{H+h} \tag{1.10}$$

$$n = \frac{b_{ср}}{h_{ср}} = \frac{B+b}{H+h} \tag{1.11}$$

де B і b - ширина розкату відповідно до та після проходу.

Ступінь деформації та її швидкість визначаються за формулами:

$$\varepsilon_{ср} = A_\varepsilon \frac{H-h}{H} \quad (1.12)$$

$$u_{ср} = A_u \frac{V(H-h)}{H \cdot h} \quad (1.13)$$

де H і h - максимальні висоти профілю до та після прокатки.

Коефіцієнт A_ε, який враховує форму осередку деформації для конкретного ступеня деформації, при прокатці на гладкій бочці, а також у ромбічних і квадратних калібрах приймають рівним $A_\varepsilon = 1{,}0$, тоді як для овальних і круглих калібрів - $A_\varepsilon = 0{,}6$ [9].

Коефіцієнт A_u, що використовується у формулі для визначення середньої швидкості деформації, має такі значення: $A_u = 1{,}0$ — для прокатки на гладкій бочці; $A_u = 1{,}5$ - для ромбічних і квадратних калібрів; $A_u = 1{,}33$ - для овальних і круглих калібрів [9].

У загальному випадку коефіцієнт A_u визначають за формулою:

$$A_u = \frac{2Hl}{F\Delta h} \int_0^{b/2} \frac{\Delta h(x)}{H(x)} dx \quad (1.14)$$

Коефіцієнт напруженого стану металу при деформації у калібрах, який отримано на основі чисельних розрахунків полів ліній ковзання [10], для $m > 2$ визначається залежністю:

$$n_\sigma = 0{,}75+0{,}25 \text{ т}, \quad (1.15)$$

а при $2 > m > 0{,}5$ — за формулою:

$$n_\sigma = \alpha(m + \frac{b}{}) \quad (1.16)$$

де a і b - постійні коефіцієнти. Для прокатки на гладкій бочці $a = 0{,}5$, $b = 1{,}0$; для ромбічних і квадратних калібрів - $a = 0{,}75$, $b = 0{,}5$; для овальних, круглих і шестигранних калібрів відповідно $a = 0{,}6$, $b = 0{,}8$.

Параметр m, що характеризує осередок деформації, змінюється у таких межах: при гарячій прокатці - $7{,}0 \geq m \geq 0{,}5$; для блюмінгів - $0{,}7 \geq m \geq 0{,}2$; на

заготовочних станах - $1{,}0 \geq m \geq 0{,}5$; при прокатці товстих листів - $3{,}0 \geq m \geq 0{,}6$, а тонких листів - $7{,}0 \geq m \geq 2{,}0$.

У підсумку формула для визначення сили прокатки на реверсивних обтискних станах має вигляд:

$$P = \sigma_s \cdot n_\sigma \cdot n_в \cdot F \qquad (1.17)$$

де $n_в$ - коефіцієнт, що враховує вплив ширини штаби на силу прокатки та визначається залежно від параметра m. Цей коефіцієнт характеризує вплив середнього головного напруження і досягає максимального значення $1{,}15$ при прокатці широких тонких смуг, коли процес можна розглядати як плоску задачу [11]. Для обтискних станів рекомендується приймати $n_в = 1{,}0$.

Контактну поверхню під час прокатки в калібрах визначають за формулою, запропонованою В. Г. Дроздом [12]:

$$F = cb_1\sqrt{R_b(H-h)} \qquad (1.18)$$

де $R_в$ - радіус валка у вершині калібру; b_1 - кінцева ширина штаби; c - коефіцієнт, який приймається залежно від типу калібрування: $c = \frac{2}{3}$ - для ромбічних калібрів; $c = 0{,}54$ - при прокатці квадратного профілю в овальному калібрі; $c = 0{,}75$ - під час прокатки овалу в квадратному калібрі.

Для прямокутних перерізів у ящикових калібрах стана 850 контактну поверхню допускається визначати як $F = b_{ср} \cdot l$. Для прокатки овалу з квадратної заготовки В. Т. Дрозд [13] рекомендує застосовувати формулу $F = 0{,}54(b_0 + b_1)\sqrt{R_b \Delta h}$.

Для різних систем калібрування В. І. Зюзін і А. М. Крівенцов запропонували таку формулу для обчислення контактної поверхні [6]:

$$F = K_к(b_0 + b_1)\sqrt{R_b(H-h)} \qquad (1.19)$$

де $R_в$ - радіус валка по дну калібру; $K_К$ - коефіцієнт, який враховує вплив системи калібрування та встановлюється для відповідного типу калібрів.

Момент прокатки для двох валків визначають за формулою:

$$M_{пр} = 2P\psi l_d \quad (1.20)$$

де l - максимальна довжина дуги контакту; - коефіцієнт положення рівнодійної сили прокатки. За рекомендаціями М. Я. Бровмана [14], для ящикових калібрів при $m < 2$ слід приймати ψ= 0,5, а при $m > 2{,}0$ - ψ = 0,45.

Потужність, яка витрачається на пластичну деформацію металу в калібрах [8], визначають за виразом:

$$N_д = p_{ср} \cdot Q_1 \cdot V_1 \cdot \ln \mu \quad (1.21)$$

де Q_1 - площа поперечного перерізу розкату після проходу; V - об'єм металу; μ - коефіцієнт витяжки.

У таблиці 1.1.2.1 наведено результати розрахунку енергосилових параметрів прокатки на стані 850 для отримання круглого профілю діаметром 80 мм із заготовки перерізом 250×300 мм зі сталі ШХ15. Розрахунок було виконано для реверсивного обтискно-заготовочного стана 850 РУП «БМЗ» із використанням описаної вище методики.

Отримані результати показали, що максимальні значення сили прокатки (3395 кН) та моменту прокатки (509,2 кН·м) виникають у перших проходах. При цьому всі параметри залишаються в межах допустимих значень, передбачених технологічним режимом прокатки.

Розрахунки, засновані на емпіричних залежностях, є достатньо простими та зручними для практичного використання. Нижче наведено декілька емпіричних формул, які можуть застосовуватись при визначенні тиску на слябінгах.

Аналіз, виконаний А. І. Целіковим та В. В. Смирновим [34], показав, що величина СНКН залежить від співвідношення довжини осередку деформації до середньої висоти штаби . Крива має чітко виражений мінімум (рис. 2.4, крива 1). Зростання тиску ліворуч від екстремального значення $p_{ср}$ пояснюється впливом зовнішніх зон - жорстких переднього та заднього кінців,

а також центральної «пропрацьованої» частини штаби. Підвищення правої гілки кривої обумовлене збільшенням впливу контактного тертя [16].

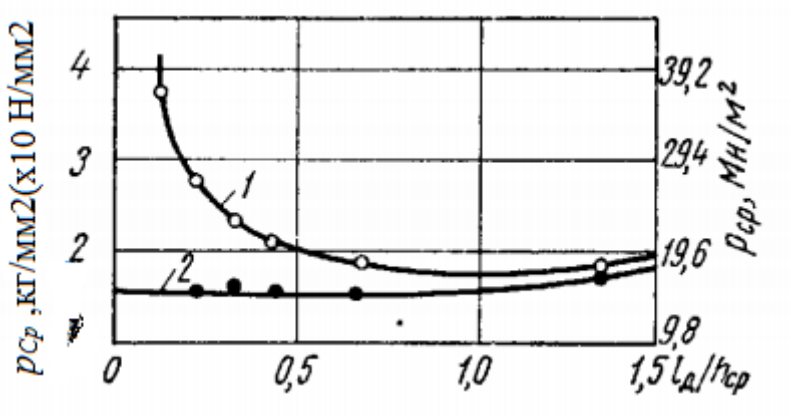


Рисунок 2.4 – Залежність $P_{ср} = F(l_д/h_{ср})$ при осадці свинцевого зразка [34]

Вплив зовнішніх зон на величину СНКН оцінюють за допомогою коефіцієнта напруженого стану:

$$n_\sigma'' = \frac{P}{P'} = f\left(\frac{l_д}{h_{ср}}\right) \quad (1.22)$$

Вплив зовнішнього тертя враховують залежністю:

$$P' = \beta \sigma_т n_\sigma' \quad (1.23)$$

Де $\beta = 1{,}00 \div 1{,}15$ - коефіцієнт Лоде, який враховує вплив середнього головного нормального напруження на межу текучості металу.

Після спільного розв'язання рівнянь (1.22) та (1.23) відносно величини P одержуємо вираз:

$$P = \beta \sigma_т n_\sigma' n_\sigma'' \quad (1.24)$$

На основі експериментів з осадження прямокутних зразків, виготовлених із різних металів, А. І. Целіков і В. В. Смирнов запропонували емпіричну залежність, яка дозволяє оцінити вплив зовнішніх зон на величину тиску:

$$n_\sigma'' = \left(\frac{l_д}{h_{ср}}\right)^{-0{,}4} \quad (1.25)$$

Результати досліджень А. А. Динника [35], виконаних під час прокатки зразків із глибокими надрізами, добре узгоджуються з експериментальними даними А. І. Целікова та В. В. Смирнова [34], отриманими при осадженні, а також із результатами М. Я. Бровмана [36] під час прокатки на гладкій бочці (рис. 2.5).

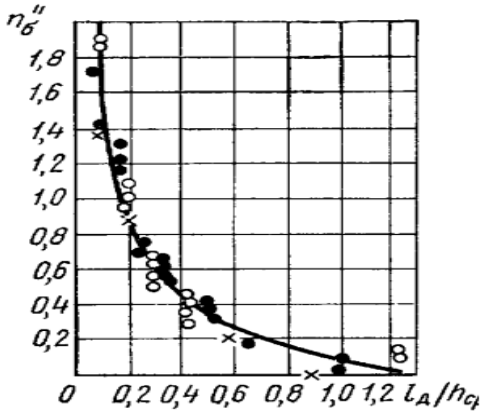


Рисунок 2.5. Вплив зовнішніх зон на тиск: за даними А. І. Целікова і В. В. Смирнова [34]; за результатами А. А. Динника [35]; за даними М. Я. Бровмана [36].

Спираючись на методику попередніх досліджень, М. Я. Бровман визначив коефіцієнт n''_σ для умов гарячої прокатки. Було встановлено, що під час прокатки на гладкій бочці вплив зовнішніх зон на середнє нормальне контактне напруження (СНКН) є суттєвішим, ніж у випадку прокатки в калібрах. Так, при співвідношенні $l_д/h_{ср}$= 0,2 для прокатки на гладкій бочці значення становить n''_σ=1,9, тоді як для аналогічних умов у квадратному калібрі цей показник дорівнює лише 1,12.

Е. С. Рокотян [39, с. 158–178; 90] рекомендував використовувати залежність (1.24) для визначення СНКН під час прокатки на блюмінгах. При цьому межу плинності автор пропонує встановлювати з урахуванням температурно-швидкісних умов процесу, а коефіцієнт п'σ визначати за формулою А. І. Целікова [16].

Значення коефіцієнта обирають залежно від параметра за експериментальною кривою А. І. Целікова та А. В. Смирнова [34] (рис. 2.6,

крива 1) або за графічною залежністю, запропонованою Е. С. Рокотяном [40] (рис. 2.6, крива 2).

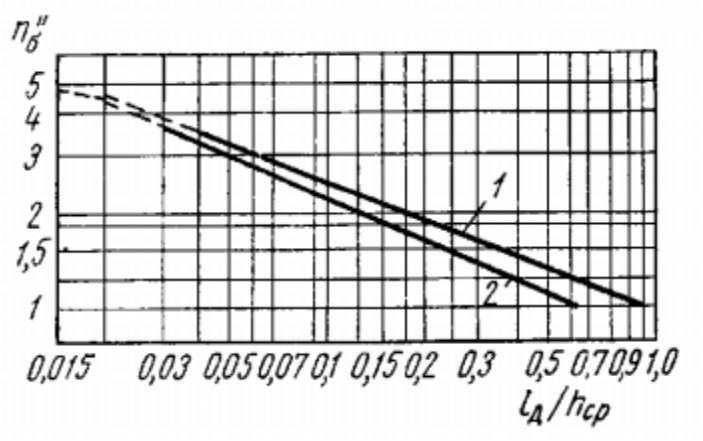


Рисунок 2.6. Залежність коефіцієнта впливу зовнішніх зон від параметра: за А. І. Целіковим і А. В. Смирновим [34]; за Е. С. Рокотяном [40].

Для умов прокатки на слябінгах коефіцієнт n'_σ наближається до одиниці, оскільки визначальний вплив на СНКН мають саме зовнішні зони, а не сили тертя на контакті «гарячий метал - валок». У зв'язку з цим залежність (1.24) фактично набуває емпіричного характеру. Введення зазначеного коефіцієнта стало першою спробою узгодити результати теоретичних розрахунків СНКН з експериментальними даними, отриманими на великих обтискних станах [16].

На думку А. І. Целікова [41], при значенні $l_д/h_{ср} < 0{,}5$ коефіцієнт n, який враховує вплив зовнішнього тертя, приймається рівним одиниці, а коефіцієнт, що характеризує вплив зовнішніх зон, визначається залежністю; при $l_д/h_{ср} =$ 0,5÷2,0 величини $n''_\sigma = 1$ і $n'_\sigma = 1 + l_д/3(H + h)$.

За умови, що $n'_\sigma = 1$, отримуємо:

$$P_{ср} = \beta\sigma_т\left(\frac{l_д}{h_{ср}}\right)^{-0,4} \qquad (1.26)$$

На підставі аналізу результатів власних заводських і лабораторних досліджень, а також роботи [40], присвяченої впливу зовнішніх зон на СНКН, була запропонована емпірична залежність для визначення тиску під час прокатки на блюмінгах [42, с. 260–286]:

$$P_{cp} = \beta\sigma_т \left(\frac{l_д}{h_{cp}}\right)^{-0,3} \qquad (1.27)$$

Для спрощення практичного використання наведених формул при визначенні СНКН був побудований графік, наведений на рис. 2.7.

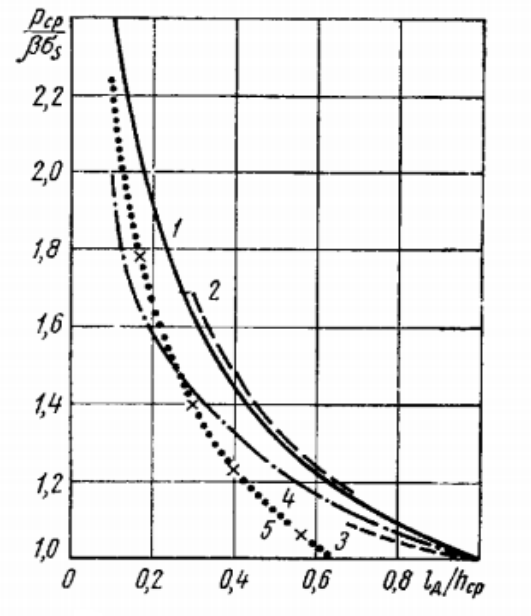


Рисунок 2.7. Залежність коефіцієнта від параметра.

Результати розрахунків, виконаних за формулами (1.26) та (1.27) для трьох злитків, показали, що формула (1.26) забезпечує середню арифметичну похибку +22,4 % при середньоквадратичному відхиленні 25,6 %.

Водночас застосування формули (1.27) дозволяє отримати точніші результати: середня арифметична похибка становить +14,1 %, а середньоквадратичне відхилення - 20,6 %. Такий рівень точності є достатнім для виконання інженерних розрахунків, тому залежність (1.27) рекомендується використовувати для визначення СНКН при прокатці на обтискних станах [16].

1.3. Формулювання мети та завдань дослідження.

Однією з характерних особливостей прокатки на слябінгах є близькість розмірів прокатуваного злитка до габаритів деформуючого інструменту. Для забезпечення стабільного процесу деформації та рівномірного ущільнення металу необхідно дотримуватися оптимального співвідношення між початковими розмірами поперечного перерізу злитка і катаючим діаметром

валків. Важливим фактором також є величина відносного обтиснення за один прохід.

Необхідність узгодження розмірів поперечного перерізу розкату з діаметром валків, а також обмежені можливості природного захоплення металу валками зумовлюють використання порівняно невеликих значень відносних обтиснень.

Малі обтиски під час прокатки великих злитків спричиняють виникнення поверхневої деформації металу, подібної до тієї, що спостерігається при осадженні поковок під молотом. За такого характеру деформації найбільш інтенсивна течія металу в поперечному та поздовжньому напрямках відбувається поблизу контактних поверхонь. Зовнішнім проявом нерівномірності пластичної деформації є неоднакові значення розширення та витяжки по висоті розкату, що впливає на форму поперечного перерізу та конфігурацію кінців штаби.

Значна різниця у ступені деформації окремих шарів металу під час прокатки, зумовлена суцільністю металевого об’єму та впливом зовнішніх частин штаби, призводить до появи додаткових напружень стиску в інтенсивно деформованих шарах і розтягувальних напружень у менш деформованих або недеформованих ділянках. За певних умов ці розтягувальні напруження можуть перевищувати тимчасовий опір металу деформації, що здатне викликати порушення суцільності розкату в центральній частині або на бічних поверхнях.

Процес прокатки на слябінгах характеризується не лише неоднорідністю напружено-деформованого стану металу, а й його зміною в часі впродовж проходів. Наслідком цього є специфічний характер зміни середнього нормального контактного напруження (СНКН) в осередку деформації. Значна кількість експериментальних досліджень підтверджує наявність мінімуму на кривій залежності СНКН від параметра.

Особливістю прокатки великих злитків є також хімічна неоднорідність литого металу, наявність внутрішніх порожнин і неметалевих включень різного походження.

На відміну від прокатки на передільних станах, деформація металу на великих обтискних станах здійснюється у вузькому інтервалі високих температур. Зниження температури металу від першого до останнього проходу зазвичай становить лише 50–70 °С. У таких умовах фазові перетворення, які можуть змінювати властивості металу, практично не відбуваються. Високі температури сприяють інтенсивному проходженню рекристалізації та усуненню зміцнення металу в паузах між проходами.

Отже, дослідження закономірностей формозміни великих злитків, визначення механізму деформації та аналіз супутніх процесів є необхідною передумовою для створення оптимальних режимів і швидкостей прокатки, а також розроблення раціональної технології прокатки штаб великих перетинів.

З огляду на важливість і технологічні переваги прокатки великих злитків, особливого значення набуває аналіз точності методів визначення енергосилових параметрів процесу. Кінцевою метою таких досліджень є розроблення науково обґрунтованих методик, алгоритмів і програмних засобів, що забезпечують достовірне прогнозування деформаційних, температурно-швидкісних та енергосилових параметрів прокатки, а також точності й властивостей готових штаб.

У зв’язку з цим необхідно вирішити такі задачі:

- дослідити умови захоплення штаби валками;
- визначити коефіцієнт тертя, рівень і характер розподілу напружень тертя на контактній поверхні;
- встановити швидкість відносного переміщення точок штаби та валків, положення нейтрального перерізу і швидкість деформації під час прокатки;
- проаналізувати співвідношення між поздовжньою та поперечною деформаціями при заданому висотному обтисненні;

- дослідити розподіл напружень і деформацій у всьому об’ємі деформованого металу;

- визначити напруження текучості та опір деформації;

- розрахувати енергосилові параметри процесу, зокрема силу прокатки, крутні моменти на валках, витрати роботи та потужність;

- визначити температурний стан штаби;

- оцінити вплив параметрів прокатки на точність готових штаб.

2. ДОСЛІДНО-РОЗРАХУНКОВИЙ РОЗДІЛ

2.1. Програма та етапи проведення теоретичних досліджень

На підставі виконаного літературного огляду та сформульованої постановки задачі передбачається виконання таких етапів дослідження:

1. Провести розрахунок режиму деформації злитка розмірами 780 × 1200 × 2000 мм, який прокатується до сляба розмірами 150 × 1000 × 12480 мм, використовуючи методику професора В. О. Ніколаєва.

2. Визначити параметри деформаційного, кінематичного та температурного режимів, а також розрахувати енергосилові характеристики процесу прокатки злитка зі сталі 3 на слябінгу 1150.

3. Виконати дослідно-промислову прокатку штаб на стані з подальшим контролем параметрів процесу та фіксацією отриманих результатів.

4. Провести обробку, систематизацію та аналіз експериментальних і розрахункових даних.

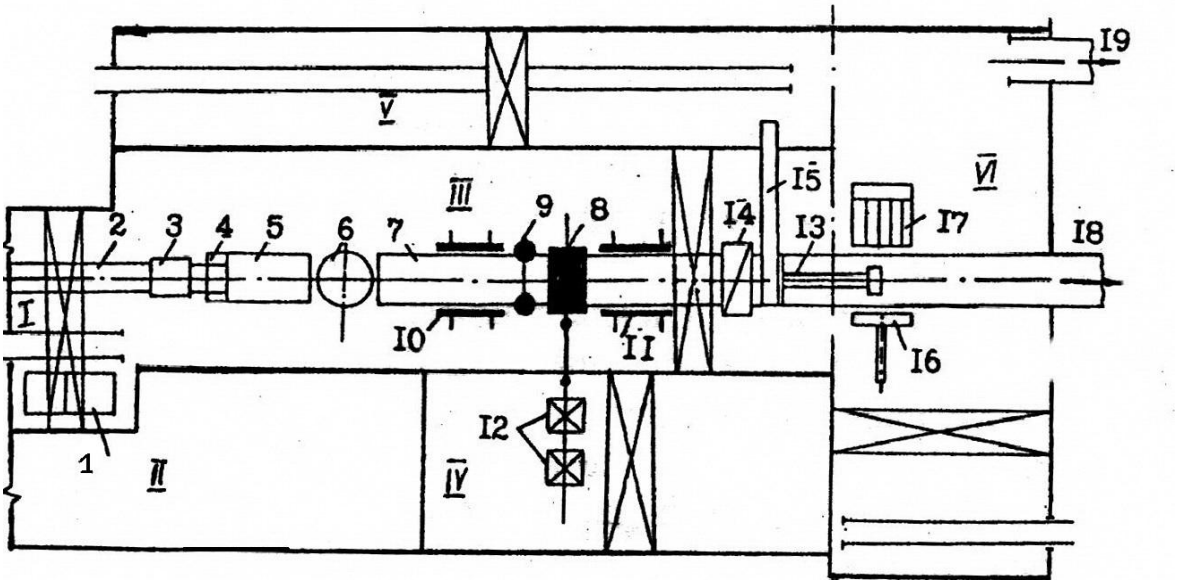
2.2. Обладнання, технологічні процеси та методи визначення параметрів

На обтискному стані слябінг 1150 здійснюється прокатка зливків у сляби товщиною 100-200 мм, шириною 850-1500 мм і довжиною 1800-4800 мм [43].

2.2.1. Особливості технології виробництва слябів

Обтискний цех отримує зливки з мартенівського цеху, після чого вони надходять до стриперного відділення, де виконується їх звільнення від виливниць. Далі зливки в гарячому стані при температурі 1300-1060 °С транспортуються спеціальними візками до нагрівальних колодязів слябінгового цеху (рис. 2.2.1) [3].

Транспортування зливків зі сталеплавильного цеху до нагрівальних колодязів та їх посадка в камери здійснюється мостовими кранами колодязного типу. Після доставки зливки знімають із візків і поміщають у камери для подальшого підігріву.



I - проліт нагрівальних колодязів; II - проліт контрольно-вимірювальної апаратури; III - проліт стану; IV - машинний зал; V - скрапний проліт; 1 - нагрівальні колодязі; 2 - шлях злитковоза; 3 - візок для зливків; 4 - перекидач; 5 - приймальний рольганг; 6 - поворотний стіл; 7 - підвідний і робочий рольганги; 8 - кліть з горизонтальними валками; 9 - кліть з вертикальними валками; 10 - маніпулятор з кантувачем; 11 - маніпулятор; 12 - головний привід; 13 - пересувний упор; 14 - ножиці; 15 - конвеєр обрізків; 16 - зіштовхувач; 17 - штабелювальний пристрій; 18 - рольганг до ШСГП; 19 - рольганг до печей ШСГП.

Рисунок 2.2.1. Схема розташування обладнання слябінга

Продуктивність однієї групи нагрівальних колодязів становить 45-60 т/год. Тривалість нагріву визначається маркою сталі та температурою посадки зливків. Керування процесом нагрівання здійснюється окремо для кожної камери. Подача тепла відбувається автоматично відповідно до заданого температурного графіка до моменту повної готовності металу до прокатки. Це забезпечується використанням автоматизованих систем контролю та регулювання.

Після нагріву до температури 1360 - 1380 °С зливки виймають із колодязів на злитковоз, який транспортує їх до приймального рольганга. У досліджуваному цеху було впроваджено технічне удосконалення: до злитковоза приєднали додатковий візок, що дало змогу одночасно перевозити два зливки.

Зливок, розташований на візку, захоплюється кліщами крана та встановлюється у колиску стаціонарного перекидача. Далі, проходячи приймальний рольганг, він подається у валки робочої кліті для обтиснення до необхідних розмірів. Кількість проходів між горизонтальними та вертикальними валками визначається масою зливка та сортаментом слябів.

Під час прокатки подача та центрування зливка у валках здійснюються за допомогою маніпуляторів, установлених перед станом і за ним над робочими рольгангами.

Як правило, вертикальні валки використовуються для усунення розширення металу та виконання значних обтиснень. Після завершення прокатки сляби по рольгангу подаються до ножиць, де спочатку обрізається передній кінець, а потім штаба розрізається на мірні довжини. Операція різання виконується при температурі 900-1150 °С.

Сляби з легованих сталей підлягають сповільненому охолодженню або відпалу в печах із висувним подом. Сляби з вуглецевих сталей після сортування на складі проходять контроль якості, а виявлені дефекти усуваються вогневим або наждачним зачищенням. Після приймання відділом технічного контролю (ВТК) готові сляби направляються до товстолистового цеху або відвантажуються споживачам.

Останнім часом у зв’язку зі зростанням вартості природного газу набуває поширення технологія транзитної прокатки за схемою:

злиток → сляб подвійної довжини → гарячекатана штаба, змотана в рулон.

2.2.2 Процес прокатування зливків

Сталевий зливок являє собою кристалічне тіло з неоднорідною структурою, що проявляється у відмінностях густини, хімічного складу, наявності неметалевих включень та особливостях будови. Сортамент продукції стану наведено в таблиці 2.2.1.

Неоднорідність зливків поділяють на фізичну, кристалічну та хімічну. Наявність таких дефектів негативно впливає на якість сталі й у ряді випадків стає причиною браку під час прокатування.

На рисунку 2.2.2 показано макроструктуру та схему будови сталевого зливка. Згідно зі схемою, у литому металі виділяють три основні структурні зони. Процес кристалізації починається біля холодніших стінок форми, де утворюється тонкий шар переохолодженого металу. Внаслідок інтенсивного охолодження формується вузька поверхнева зона дрібних рівновісних кристалітів.

Після неї розташовується зона видовжених дендритних кристалів, яку називають зоною транскристалізації. Ріст дендритів відбувається у напрямку тепловідведення, тобто перпендикулярно до поверхні виливниці. Подальше просування дендритів у глиб металу забезпечується розвитком гілок першого порядку та їх розгалуженням.

Таблиця 2.2.1 – Марки сталі, що прокатуються на стані «слябінг 1150» [1]

Группа сталей по нагріву зливків	Марка сталі	Хімічний склад по ДСТ, ТУ, внутрішньо заводським нормам
1	2	3
1	08пс(кп),10пс(кп), 15пс(кп),20пс(кп)	ДСТУ 1050-88
	08пс(кп)	ДСТУ 9045-93
	08пс(кп) г/к, 08пс(кп) х/к, 08пс(кп) для КрКЗ, 08пс(кп) для подката на жесть 08псН, 15псН	По внутрішньо заводським нормам
	08Ю	ДСТУ 9045-93
	08Ю для облицювання	По внутрішньо заводським нормам
	25пс Ст0пс(кп), Ст1пс(кп), Ст2пс(кп), Ст3пс(кп), Ст4пс(кп),	ТУ У 14-4-458-99 ДСТУ 380-94
	Ст3Гпс, Ст5Гпс	ДСТУ 2651-94
2	10, 15, 20, 25, 30	ДСТУ 1050-88
	Ст 0, Ст2сп, Ст3сп, Ст4сп	ДСТУ 2651-94 (ДСТУ 380-94)
	15К, 20К	ДСТУ 5520-79
	Ст15сп медиста	ТУ У 14-2-1241-2000
	12ГС	ДСТУ 19281-89
	17ГС, 17ГІС	ТУ, ДСТУ 19281-89
	Ст5пс	ДСТУ 380-94

3	07ГСЮФ, 08ГСЮТ, 08ГСЮФ	ТУ У 27. 1.4.-516-2002
	08ГЮТ, 08ГЮФ, 08ЮТ	ТУ 14-226-135-93
	09Г2Т	ТУ У 27.3-00190319-1313-2004
4	60С2А, 45, 55	ДСТУ 1050-93
	65Г, 60С2, 60Г, 70Г	ДСТУ 14959-79
	70Х*	ТУ 14-143-250-77
* Тільки для ремонтних цілей		

За умов повільного охолодження, характерного для центральних зон великих зливків, виникають сприятливі умови для зародження кристалів у середині металу. У результаті формується третя структурна зона, що складається з рівновісних дендритних кристалітів різної орієнтації. Їх розміри залежать від ступеня перегріву металу, швидкості охолодження та вмісту домішок.

Зона стовпчастих кристалів характеризується високою щільністю, оскільки містить незначну кількість газових пор і раковин. Однак у місцях стику таких кристалітів метал має знижену міцність, через що в процесі подальшої деформації можуть виникати тріщини. Саме тому надмірний розвиток стовпчастої структури для сталевих зливків є небажаним.

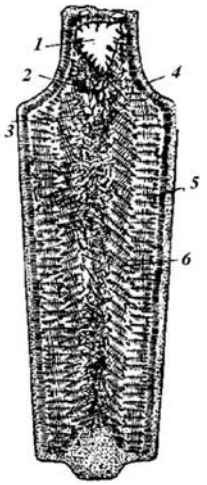
Рідкий метал має більший питомий об’єм, ніж твердий, тому в останній зоні затвердіння формується усадочна раковина. Як правило, ця зона містить найбільшу кількість забруднень, а після кристалізації у ній утворюються мікро- та макропори, а також газові бульбашки.

До фізичних дефектів зливка належать усадочні раковини, газові порожнини та неметалеві включення.

Після завершення прокатки частину штаби, яка відповідає зоні усадочної раковини, відрізають. Відповідно, зі збільшенням раковини та рихлості зростають втрати металу і знижується вихід придатної продукції. Величина обрізі залежить від складу сталі, форми зливка, співвідношення його висоти до сторони поперечного перерізу, режиму розливання та призначення готових слябів. Для якісних вуглецевих і легованих сталей втрати металу можуть перевищувати 20 % маси зливка.

Для зменшення об’єму усадочної раковини застосовують прибуткові надставки. Після прокатування прибуткову частину також видаляють. Зниження об’єму прибутку досягається за рахунок подовження охолодження сталі у футерованих вогнетривким матеріалом надставках, а також шляхом додаткового підігріву прибуткової частини [43].

Усадочна раковина є характерною ознакою спокійної сталі. Окрім неї, широко застосовується кипляча сталь, яка розкислюється неповністю. Особливістю таких зливків є утворення газових бульбашок під час затвердіння металу. Частина газів не встигає вийти на поверхню, тому всередині зливка залишаються порожнини.



1 - усадочна раковина; 2 - усадочні порожнини; 3 - усадочна рихлість; 4 - тонкий шар дрібних кристалів; 5 - зона стовпчастих кристалів; 6 - зона рівновісних кристалів.

Рисунок 2.2.2 - Схема будови сталевого зливка

Під час прокатування внутрішні газові порожнини можуть заварюватися. Найкраще це відбувається для бульбашок, що розташовані в центральній частині зливка та мають неокиснену поверхню. Якщо ж дефекти знаходяться поблизу поверхні («підкіркові» або «стільникові» бульбашки), вони можуть оголюватися при нагріванні або деформації, що призводить до браку. На готовому прокаті це проявляється у вигляді волосовин або поверхневих дефектів, схожих на тріщини. При виробництві штабової сталі такі дефекти

спричиняють появу «поїденої» поверхні. Подібний брак пов’язують із якістю вихідного зливка та роботою сталеплавильного виробництва.

Перевагою киплячої сталі є відсутність значної усадочної раковини, що дозволяє зменшити обрізі до 3-5 %. Водночас такі зливки характеризуються наявністю підкіркових бульбашок і вираженою сегрегацією. Через це киплячу сталь виплавляють переважно низьковуглецевою. Підвищені температури нагріву забезпечують заварювання газових порожнин. При вмісті вуглецю понад 0,3 % утворення газових бульбашок є неприпустимим, тому таку сталь відливають у спокійному стані.

Неметалеві включення, до яких належать шлакові частинки та фрагменти футеровки ковша, значно погіршують механічні властивості сталі. Часто вони стають осередками утворення тріщин, особливо при циклічних навантаженнях. Після прокатування такі включення зберігаються в металі, тому особливу увагу приділяють чистоті зливків, особливо для якісних та високоякісних сталей.

До хімічної неоднорідності зливка належать зональна, об’ємна та дендритна ліквація. Їх виникнення обумовлене вибірковою кристалізацією металу. При затвердінні вуглецевої сталі відбувається дендритна кристалізація, що спричиняє локальні зміни хімічного складу в межах окремих кристалів. Оскільки затвердіння починається біля стінок виливниці та поширюється до центра, збагачений вуглецем розплав зміщується у внутрішню частину зливка, викликаючи об’ємну ліквацію. Такі явища вважаються дефектами сталевого зливка.

2.2.3 Нагрівання зливків і подальша обробка прокату

Перед прокатуванням зливків і заготовок необхідно забезпечити такий режим нагріву, який би сприяв підвищенню пластичності сталі та зниженню опору деформації. Підвищення температури нагрівання позитивно впливає на процес прокатки, оскільки дозволяє зменшити енерговитрати, збільшити величину обтиснення та скоротити кількість випадків руйнування валків і

вузлів прокатного стану. Крім цього, правильно вибраний температурний режим сприяє покращенню механічних характеристик металу.

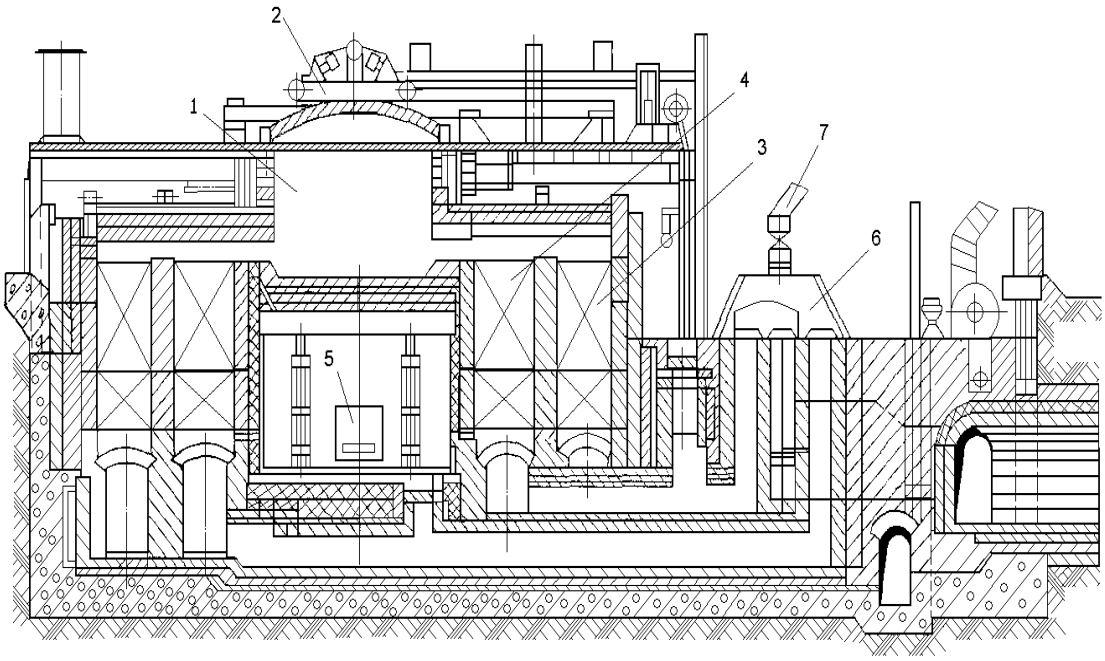
Разом із тим надмірно висока температура або порушення режиму нагріву можуть призвести до небажаних явищ: інтенсивного окалиноутворення, зневуглецювання поверхневих шарів, розкриття підкіркових газових бульбашок, перегріву та перепалу металу. Усе це погіршує якість готової продукції й може стати причиною браку.

Під час нагрівання металу в печах неминуче відбувається його окиснення з утворенням окалини, що є джерелом втрат придатного металу. За нормальної роботи нагрівальних пристроїв втрати становлять приблизно 1-2 % маси металу, а при порушенні режиму можуть досягати 4-5 %. Оскільки при виробництві готового прокату метал нагрівають декілька разів, середній чад металу може складати близько 3-4 %. Крім втрат металу, окалина під час прокатування вдавлюється у поверхню, погіршуючи якість прокату.

Інтенсивність утворення окалини визначається температурою нагрівання, тривалістю перебування металу при високих температурах, швидкістю нагріву та складом пічної атмосфери. Особливо активно процес окиснення проходить при температурах понад 900-1000 °С. Для зменшення чаду необхідно забезпечувати горіння палива з мінімальним надлишком повітря та максимально повним згорянням газів [44].

На ступінь окиснення також впливає співвідношення площі поверхні металу до його об’єму: зі збільшенням цього співвідношення втрати на окиснення зростають. Це особливо важливо при нагріванні зливків, які мають значну площу поверхні.

Для прокатування слябів зливки нагрівають у нагрівальних колодязях (рис. 2.2.3). Відділення нагрівальних колодязів оснащене одним загальним газовим колектором і трьома повітряними колекторами. Подача повітря здійснюється вентиляторами: у перший колектор працюють вентилятори груп 1-6, у другий - груп 7-11, а у третій - груп 12-14.



1 - робоча камера; 2 - візок для відкривання кришок; 3 - повітряний регенератор; 4 - газовий регенератор; 5 - шлаковий коридор; 6 - золотниковий газовий клапан; 7 - підведення газу до колодязя.

Рисунок 2.2.3. Схема розрізу регенеративного колодязя

Основні геометричні параметри робочого простору осередків наведені у таблиці 2.2.2.

Таблиця 2.2.2 - Основні розміри робочого простору осередків

Групи	Довжина, мм	Ширина, мм	Висота, мм
1 - 7, 12 - 14	6900	2150	3320
8 - 11	6600	2150	3320

Опалення колодязів здійснюється доменно-коксовою газовою сумішшю з теплотою згоряння 880-930 ккал/м³. Для підвищення калорійності до 900-950 ккал/м³ додають природний газ. Необхідний рівень калорійності забезпечується вузлом збагачення, встановленим у трубопроводі доменного газу. Регулювання співвідношення коксового та природного газів здійснює бригадир дільниці за вказівками старшого нагрівальника.

Кожна камера фактично є окремою нагрівальною піччю, обладнаною регенераторами для підігрівання газу та повітря. Відведення продуктів

згоряння здійснюється через окремі димові труби: для груп 1-11 висота труб становить 50 м, а для груп 12-14 - 80 м.

Одним із суттєвих недоліків нагрівальних колодязів є нерівномірність нагрівання зливків через їх різне розташування відносно теплового потоку. Зливки, які знаходяться ближче до регенераторів, прогріваються швидше, ніж ті, що розташовані у центральній частині камери. Крім того, механічне обладнання колодязів є досить громіздким, що ускладнює автоматизацію процесу.

Для сучасних прокатних виробництв характерною є гаряча посадка зливків у колодязі. До гарячої посадки належать зливки з температурою 400-1000 °С, а до холодної - нижче 400 °С. Використання гарячої посадки забезпечує значну економію палива та підвищення продуктивності нагрівальних колодязів. Практичні дані показують, що збільшення температури зливків при посадці на кожні 50 °С підвищує продуктивність приблизно на 7 %.

При зниженні температури посадки збільшується тривалість нагріву та витрати палива. Наприклад, для холодних зливків час нагрівання майже вдвічі більший, а витрати палива приблизно утричі перевищують витрати при нагріванні зливків із температурою поверхні близько 800 °С.

В обтискному цеху використовується стан «слябінг 1150» (рис. 1.4). Горизонтальні валки обладнані циліндричними бочками діаметром 1150 мм та довжиною 2000 мм. Їх привід здійснюється від індивідуальних двоякірних електродвигунів постійного струму потужністю по 7200 кВт через шпинделі без застосування шестеренної кліті. Розхил горизонтальних валків становить 80-900 мм, швидкість їх переміщення - 150 мм/с, а частота обертання знаходиться в межах 53-80 об/хв.

Вертикальні валки мають діаметр 700 мм і довжину бочки 1150 мм. Максимальна швидкість переміщення двох валків досягає 64,8 мм/с, а розхил складає 720-1800 мм. Привід вертикальних валків забезпечують два

електродвигуни постійного струму потужністю по 1250 кВт кожний із частотою обертання 66-78 об/хв через довгі універсальні вертикальні шпинделі.

2.2.4 Аналіз режимів нагріву злитків.

Відлік часу нагрівання гарячепосаджених і холоднопосаджених злитків для сталей I, II, III та IV груп починається після завантаження останнього злитка в комірку нагрівального колодязя. Після завершення посадки та закриття кришки визначають тривалість транспортування металу як різницю між моментом завершення посадки останнього злитка і часом завершення розливання сталі.

Нагрівання гарячепосаджених злитків I-III груп сталей, що призначені для транзитної гарячої прокатки за заявкою ЦГПТЛ або для прокатки на склад слябів за замовленням обтискного цеху, виконується за допомогою автоматизованої системи керування нагрівом відповідно до таблиць №№ А3-А6. У разі відмови системи автоматизації процес переводять у режим ручного керування з використанням тих самих таблиць [46].

Для зливків холодного посаду I та II груп сталей, що надходять на транзитну прокатку або на виробництво слябів, нагрів здійснюють у ручному режимі згідно з таблицями №№ А9-А12 [46].

Нагрівання гарячепосаджених злитків IV групи, а також холоднопосаджених злитків III і IV груп проводять лише вручну за графіком обтискного цеху для подальшої прокатки на склад слябів відповідно до режимів, наведених у таблицях №№ А7, А8, А13 та А14 [46].

Заявка на видачу злитків для транзитної прокатки оформлюється старшим змінним майстром ЦГПТЛ або посадчиком гарячого металу не пізніше ніж через 30 хвилин після підтвердження готовності плавки. Остаточне підтвердження або коригування часу видачі здійснюється за 1,5–2

години до початку прокатки. У заявці, крім часу видачі, вказують товщину смуг і необхідність прокатки слябів подвійної довжини.

Для плавок, які не призначені для транзитної прокатки, нагрівальник 7-го розряду вводить у систему час замовлення на видачу плавки не пізніше 30 хвилин після її готовності. Цей час приймають як фактичний для подальшого нагріву та прокатки зливків на склад слябів.

Інформацію про час видачі злитків у прокатку контролер ОТК заносить до системи АСУ «Сталь-Прокат». Дані автоматично передаються бригадиру основного виробництва обтискного цеху, нагрівальнику 7-го розряду, старшому змінному майстру, старшому різальнику ножиць і обліковцям дільниці нагрівальних печей ЦГПТЛ.

Упродовж усього циклу нагрівання нагрівальник контролює температурний стан металу та регулює подачу палива і повітря, тиск у комірках, розподіл продуктів згоряння між сусідніми осередками та реверсування полум’я, запобігаючи нерівномірному нагріву або оплавленню зливків.

Не допускається перевищення температурного перекосу насадок регенератора, який визначають за показаннями потенціометра температури в осередку:

- під час підйому температури - не більше 80 °С;

- у період томління - не більше 60 °С.

Для кожної комірки встановлюють максимальну витрату збагаченого доменного газу з калорійністю суміші 900-950 ккал/м³ у межах 3800-4000 м³/год при нагріванні гарячих і холодних зливків I-IV груп сталей.

Якщо стан димового тракту або недостатня тяга не дозволяють забезпечити максимальну подачу газу, витрату встановлюють за рішенням нагрівальника, але з обов’язковим дотриманням температурних режимів.

Після досягнення мінімальної температури томління холоднопосаджені злитки всіх груп сталей через 1,0-1,5 години обов’язково повертають на 180°.

У випадку надходження доменного газу зі зниженою калорійністю та відсутності можливості доведення її до 900-950 ккал/м³ тривалість нагріву збільшують:

- для гарячого посаду - на 15-30 хв;

- для холодного посаду - до 1 години.

Перед видачею нагрітих злитків у прокатку припиняють подачу газу й повітря, закривають шибери та відкривають кришку колодязя лише настільки, щоб забезпечити захоплення злитка кліщами крана. Якщо видачу металу тимчасово зупиняють, подачу палива та повітря відновлюють у режимі томління, не допускаючи оплавлення металу.

Посадку нових плавок після планових ремонтів виконують таким чином, щоб мінімізувати «пересиджування» металу в колодязях. Нагрів після посадки здійснюють за режимами таблиць А3 та А5, при цьому допускається тимчасове зниження температури нагріву першого періоду до мінус 40 °С від заданого значення.

Для запобігання зниженню температури в осередках нижче 1180 °С нагрівальник відкриває шибер, встановлює температуру 1200 °С та забезпечує подачу газу і повітря з подальшим томлінням металу при цій температурі.

Не пізніше ніж за 4 години до запуску стана відповідальний за ремонт повідомляє старшого змінного майстра для складання графіка нагріву та видачі металу.

Подальший нагрів згідно із замовленням на видачу проводять за таблицями №№ А4, А6, А10, при цьому тривалість нагрівання перед прокаткою збільшують на 15-30 хвилин.

Допускається пересадка в інші осередки:

- гарячих і холодних зливків I та II груп;

- гарячепосаджених злитків III групи.

Обмеження за температурою поверхні при цьому не встановлюють. Подальший нагрів ведуть відповідно до режимів гарячого або холодного

посаду з урахуванням температури, досягнутої у попередній комірці на момент пересадки.

Пересадка холоднопосаджених злитків III групи дозволяється до досягнення температури осередку 900 °С. Подальший нагрів виконують за режимами таблиці № А13 [46].

Видача злитків у прокатку

Злитки, що подаються у прокатку, повинні бути рівномірно прогрітими до заданої температури та не мати ознак оплавлення. Оплавленим вважають злиток із пошкодженим тілом; оплавлення окалини до цього не відноситься.

Примітки:

1. Початком видачі нагрітої плавки вважають момент подачі першого зливка.

2. Якщо одночасно підготовлено кілька плавок, першочергово видають метал більш відповідального призначення.

3. Плавки, що не призначені для транзитної прокатки, можуть перебувати в колодязях до 2 годин понад час готовності.

Видачу нагрітих зливків I-III груп, призначених для подальшої транзитної прокатки на НТЛС 1680, а також зливків IV групи організовують так, щоб наступний зливок надходив до стана відразу після завершення прокатки попереднього. Це дозволяє підтримувати необхідний темп роботи та запобігати охолодженню металу.

Положення злитковоза при транспортуванні коригується машиністом крана через селекторний зв’язок за вказівкою старшого нагрівальника.

Для підтримання необхідного темпу допускається одночасне транспортування двох зливків. У такому випадку перший зливок розміщують безпосередньо на злитковозі, а другий - на причіпному візку.

На приймальному рольганзі перед станом дозволяється одночасне перебування не більше двох зливків. Для зменшення тепловтрат їх розташовують під екрануючим пристроєм.

Час транспортування зливків від нагрівальних колодязів до валків, включаючи очікування на рольганзі, повинен виключати підстуджування зливків.

Черговість та час видачі узгоджують між старшим змінним майстром обтискного цеху та представником ЦГПТЛ.

Видачу нагрітих недоливків і зливків верхнього розливання здійснюють відповідно до вказівок посадчика ЦГПТЛ.

Зливки спокійних вуглецевих, низьколегованих і високовуглецевих сталей захоплюють кліщовим краном за утеплену частину. Для киплячих і напівспокійних сталей захоплення здійснюють не далі ніж за 200 мм від верхньої частини зливка.

Розрив плавок при видачі металу з осередку не допускається. У разі порушення причину фіксує ВТК у журналі посадки та видачі зливків.

Тривалість транспортування нагрітих зливків до валків стана разом із часом очікування перед прокаткою повинна виключати охолодження металу.

2.2.5 Недосконалості технологічного процесу та обладнання

Обтискний стан типу слябінг оснащений горизонтальними і вертикальними валками, які можуть бути встановлені як перед горизонтальною кліттю, так і після неї. Дослідження [45] свідчать, що під час деформації лише горизонтальними валками на кінцевих ділянках плоских розкатів (слябів і товстих штаб) утворюються кінцеві напливи у формі «язика». Це пояснюється тим, що центральна частина розкату за шириною витягується інтенсивніше, ніж його крайові ділянки. Такий характер течії металу обумовлений розширенням, яке переважно концентрується на кромках (рис. 2.5, а).

Під час прокатування тільки у вертикальних валках на кінцях розкату формується накат типу «риб’ячий хвіст» відповідно до термінології [46].

Причиною є переважне видовження металу саме по крайках розкату (рис. 2.5, б).

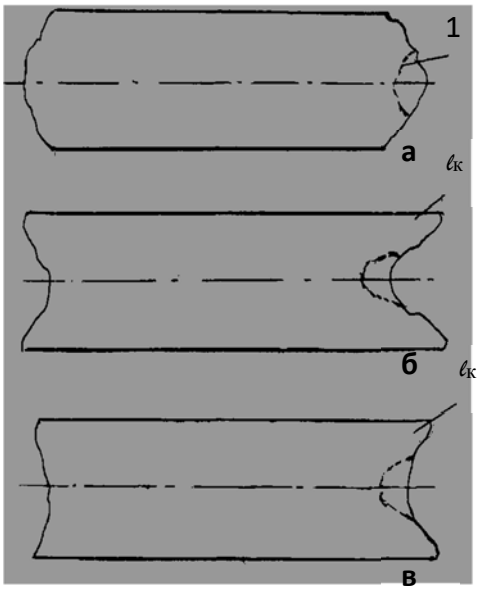
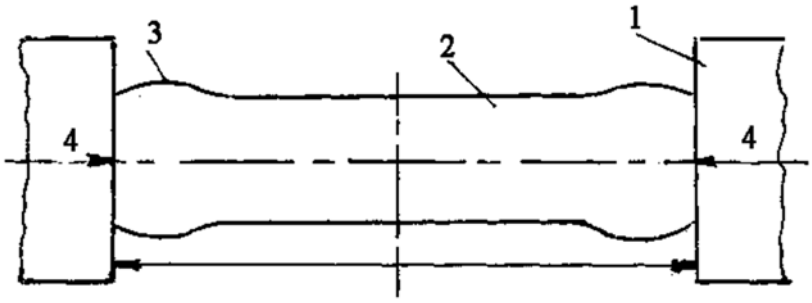


Рисунок 2.5. Форми кінцевих ділянок сляба після прокатки: у горизонтальних валках (а), у вертикальних валках (б) і при спільній прокатуванні в горизонтальних і вертикальних валках (в) (1 – границі усадочної раковини).

Порівняно з рисунком 2.5, а, у цьому випадку усадочна раковина зміщується всередину сляба, що призводить до збільшення втрат металу на обрізь. Почергова деформація плоского розкату в горизонтальних і вертикальних валках, як правило, також сприяє утворенню кінцевого накату типу «риб'ячий хвіст» [45]. У такій ситуації найбільше видовження отримують саме крайові зони розкату. Виникнення цього дефекту пов'язане з тим, що пластичний плин металу локалізується у приконтактних шарах по ширині сляба, головним чином у поздовжньому напрямку, одночасно викликаючи утворення бокових напливів по висоті розкату (рис. 2.6).



1 - вертикальні валки; 2 - розкат (сляб); 3 - крайовий наплив по висоті розкату; 4 - спрямування обтиснення розкату

Рисунок 2.6. Схема обтиснення розкату (сляба) вертикальними валками

Наявність «риб'ячого хвоста» на передньому або задньому кінці сляба спричиняє збільшення довжини обрізі та відповідно підвищує втрати металу. Саме тому було виконано ряд досліджень, спрямованих на пошук технічних рішень для зменшення цього дефекту. У роботі [45] наведено результати експериментів і рекомендації щодо скорочення величини кінцевого накату. Встановлено, що на його розміри суттєво впливають режим обтиснення вертикальними валками, співвідношення між шириною зливка і готового сляба, ступінь опуклості горизонтальних валків та діаметр вертикальних валків.

Під час прокатування слябів із зливків типу 1А (перетин 780×1170 мм), у яких вертикальні валки розміщені перед горизонтальними, а також зливків типу 2А (780×1350 мм) на слябінгу 1150 мм було встановлено, що параметри кінцевого накату і вихід придатного металу залежать від розмірів отриманого сляба. Найбільш ефективним виявилося таке співвідношення ширини зливка і сляба, при якому обтиснення вертикальними валками (без врахування уширення металу) становить 90-100 мм. Для цього випадку виконується співвідношення $B/B_{сл} \approx 0{,}92$, де $B_{сл}$ - максимальна ширина зливка, а B - ширина сляба. За таких умов довжина кінцевого накату на передньому кінці сляба складає лише 35-55 мм. Якщо ж обтиснення вертикальними валками становить Δh_B = 185 - 220 мм, то довжина кінцевого накату досягає l_H = 320 – 350 мм.

При цьому усадочна рихлість зміщується у глибину сляба, а втрати металу на обрізь збільшуються до 8% замість нормативних 5–6% для напівспокійних сталей. Водночас надто мале значення Δh_B (35–50 мм) призводить до утворення на передньому кінці сляба накату у формі «язика». У такому випадку крайові ділянки недостатньо пророблюються вертикальними

валками, через що на кромках готової штаби можуть виникати дефекти типу рванин.

При збільшенні ширини сляба за приблизно однакових обтиснень вертикальними валками довжина переднього кінцевого накату зменшується. Це пояснюється зниженням відносного обтиснення по ширині сляба та зростанням впливу горизонтальних валків на поздовжній плин металу.

Форма задніх кінцевих ділянок також залежить від ширини сляба. Для вузьких слябів (B = 1000 мм) задня частина має форму, близьку до «язика». Для широких слябів (B = 1460 мм) кінцевий накат у плані нагадує синусоїду з витягнутими центральною та крайовими частинами. Це свідчить про те, що при прокатуванні вузьких слябів бічні ділянки, які сильніше деформуються вертикальними валками у парних проходах, переважно видовжуються у напрямку переднього кінця розкату. Для широких слябів спостерігається більш рівномірний розподіл течії металу в обидва боки.

Одним із способів зменшення нерівномірності деформації по ширині є використання горизонтального валка з опуклим профілем бочки. Завдяки опуклості збільшується сумарний коефіцієнт витяжки центральних зон розкату. Подовження середніх шарів штаби зростає зі збільшенням опуклості валків і кількості проходів. Раціональною вважається опуклість у межах 1,5-2,5 мм. Найефективніше застосовувати опуклий валок під час проміжної перевалки одного з горизонтальних валків. Це дозволяє компенсувати нерівномірне зношування другого валка та скоротити втрати металу на 0,5-2%.

Для скорочення довжини накатів і торцевої обрізі запропоновано переривати процес прокатування на середині циклу та змінювати орієнтацію розкату, подаючи його у валки кінцевою частиною вперед. Проте реалізація такого способу знижує продуктивність стана через необхідність реверсування валків або повороту розкату на 180°.

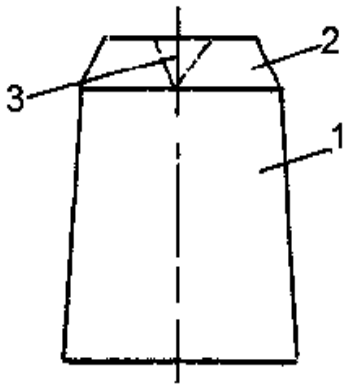
Беручи до уваги, що найбільше збільшення «риб’ячого хвоста» відбувається у другій половині проходів, було запропоновано інший режим

прокатування. У початкових проходах рекомендується використовувати невеликі обтиснення горизонтальними валками та максимально можливе обтиснення у вертикальних валках. У другій половині проходів, навпаки, горизонтальні валки повинні забезпечувати обтиснення у 1,5-2,5 раза більше, ніж на початку, а вертикальні валки мають лише компенсувати уширення металу. Застосування таких режимів дозволяє скоротити масу обрізі на 16,5-18,5%.

Комплексне дослідження особливостей деформації металу під час прокатування слябів наведене у роботі [47], де запропоновано раціональну форму слябінгового зливка, що забезпечує зменшення кінцевого накату та величини обрізі.

Зокрема, для скорочення торцевої обрізі запропоновано використовувати зливок з усіченою торцевою частиною (ВАТ «Запорожсталь», НПО «Доникс»). Конусність може бути виконана як у донній, так і у головній частині зливка (рис. 2.7). Доцільно також формувати конусність на широких гранях зливка. Використання таких зливків сприяє зменшенню довжини «риб'ячого хвоста» та величини кінцевої обрізі.

Різні технічні рішення щодо скорочення кінцевого накату, а також досвід їх впровадження на слябінгах і універсальних станах наведені у роботі [48]. Установлено [49], що в першій половині кампанії горизонтальних валків кількість опуклих слябів становить 20,3%, тоді як у другій половині - вже 67,8%. За результатами вимірювань поперечних перерізів після прокатування 40-83 тис. т металу встановлено, що профіль слябів стає увігнутим, а напливи формуються безпосередньо на крайках.



1 - зливок; 2 - конусність; 3 - усадочна рихлість

Рисунок 2.7. Форма зливка

Після прокатування 96–160 тис. т металу сляби переважно набувають опуклого профілю внаслідок зношування валків. При цьому верхній валок зношується інтенсивніше [47, 50]. Нерівномірність зношування (рис. 2.2.7) збільшується пропорційно зростанню обсягів прокату на слябінгу 1150. Посилене зношування верхнього валка пояснюється абразивною дією грубої окалини, впливом струменів води, що потрапляють у осередок деформації, а також формуванням сітки термічних тріщин у поверхневому шарі валка.

На формування поперечного профілю слябів значний вплив мають ступінь зношування горизонтальних валків та величина обтиснення вертикальними валками. Зношування валків по довжині бочки є нерівномірним і найбільших значень досягає у центральній частині бочки [43].

2.2.6 Регулювання горизонтальних валків.

Після кожної перевалки валків обов’язково виконують налаштування стана, необхідне для забезпечення стабільного процесу прокатки та отримання заданого профілю прокату.

Насамперед контролюють горизонтальність встановлення нижнього валка за допомогою рівня. Якщо виявляється перекіс, під підшипники з

відповідного боку встановлюють стругані підкладки для вирівнювання положення валка.

Старший майстер стана повинен мати необхідний запас підкладок, призначених для корпусів текстолітових підшипників нижнього горизонтального валка.

Також обов’язково перевіряють правильність розташування нижнього валка відносно рівня роликів станини. Нижній горизонтальний валок необхідно встановлювати на 40–50 мм вище рівня роликів.

Після цього верхній валок опускають на таку відстань, яка забезпечує можливість вимірювання зазору між валками за допомогою кронциркуля.

Зазор між валками вимірюють з обох боків бочки валка. При правильному налаштуванні верхній валок повинен розташовуватися паралельно нижньому.

У разі виявлення перекосу його усувають шляхом піднімання або опускання лівого натискного гвинта. Для цього відключають шестерню вмикання та вал, який одночасно виконує функцію плунжера двостороннього гідроциліндра і забезпечує роздільну роботу натискних гвинтів під час його переміщення вгору.

Розхил між горизонтальними валками, який визначає товщину прокатуваної штаби, повинен точно відповідати показанням циферблата.

2.2.7 Особливості налаштування вертикальних валків.

Робочі діаметри вертикальних валків повинні бути однаковими, а бочки валків — не мати конусності. Осі вертикальних валків мають розташовуватися в одній площині, перпендикулярній до напрямку прокатки.

Під час встановлення верхніх траверс необхідно забезпечити, щоб їх верхні напрямні поверхні знаходилися в одній горизонтальній площині. Контроль горизонтальності виконують за допомогою рівня, перевіряючи як кожну траверсу окремо, так і обидві разом.

Монтаж верхніх напрямних траверс здійснюють у такій послідовності: спочатку одну траверсу встановлюють, перевіряють за рівнем і жорстко закріплюють, після чого другу орієнтують відносно першої. Контроль правильності монтажу виконують довгою лінійкою та рівнем, які почергово прикладають по діагоналі до обох траверс.

Точне встановлення напрямних траверс значною мірою забезпечує паралельність осей вертикальних валків у площині розташування осей горизонтальних валків, тобто дозволяє уникнути перекосу валків у напрямку прокатки.

Під час монтажу нижніх напрямних траверс необхідно контролювати, щоб вертикальні напрямні поверхні нижніх траверс по всій довжині були строго паралельними нижнім напрямним щокам несучих рам.

Контроль правильності налаштування горизонтальних і вертикальних валків покладається на старшого оператора поста керування станом та старшого майстра стана.

2.2.8 Технологічні аспекти прокатування злитків

Прокатування злитків здійснюється відповідно до графіка, сформованого ПРБ ЦГПТЛ на основі чинних замовлень. Для плавок, призначених на товарні сляби, графік додатково коригується ПРБ обтискного цеху з урахуванням максимального виходу придатного металу.

Залежно від вимог до готової продукції товщина розкатів повинна становити:

- для вуглецевих сталей – 100-200 мм;
- для низьколегованих сталей – 100-170 мм;
- для високовуглецевих сталей – 100-160 мм.

Допустимі значення ширини слябів, які можуть бути отримані з відповідних типів злитків, наведені в таблиці 1.1.

Примітка - при виготовленні рулонів з подальшим розпуском дозволяється прокатка злитків типу 4А на сляби шириною до 1530 мм.

Після отримання дозволу від старшого змінного майстра старший оператор стана подає команду на ввімкнення обладнання, складання електросхеми та запуск агрегату. Пуск стана дозволяється лише за наявності відповідної бирки у старшого оператора, після виведення персоналу з небезпечних зон та подачі попереджувального сигналу — одного довгого гудка.

Після проведення холостого прокручування механізмів оператор через селекторний зв’язок дає команду на подачу злитків із нагрівальних колодязів. Додатково можуть використовуватись світлові сигнали (зелене світло) та звукове оповіщення у вигляді двох коротких гудків.

Нагріті злитки кліщовим краном встановлюють у люльку злитковоза або на причіпний візок для транспортування до приймального рольганга. Також можливе використання стаціонарного перекидача, який подає злиток безпосередньо на рольганг. Якщо злиток має припливи у нижній частині, його розміщують таким чином, щоб після перекидання приплив був орієнтований догори або убік.

Усі злитки I групи сталей, призначені для транзитної прокатки, подаються донною частиною вперед. Водночас злитки плавок відповідального призначення прокочуються головною частиною вперед для максимального усунення усадочних дефектів. У першому проході величина обтиснення повинна бути на 15-20 мм меншою від передбаченої режимом, а швидкість горизонтальних валків у першому та другому проходах не має перевищувати 25 об/хв, що запобігає пробуксовці та ударним навантаженням.

Під час подачі першого злитка кожної плавки старший нагрівальник через селектор повідомляє номер плавки, марку сталі, тип і кількість злитків. Після цього бригадир дільниці підготовки виробництва вводить на головному посту управління (пост №1) відповідні технологічні дані: номер плавки, марку

сталі, тип злитка, кількість, призначення, переріз слябів, а також інформацію про відокремлені злитки та їх параметри. Дані повинні бути відображені на дисплеї ще до надходження першого злитка до стана.

Оператор поста управління №1 контролює ритмічність подачі та плющення злитків, а також транспортування розкатів до ножиць. Це необхідно для підтримання встановленого темпу прокатки та недопущення затримок металу.

Режими обтиснення горизонтальними й вертикальними валками для кожного проходу визначаються відповідно до типу злитка, марки сталі та необхідних розмірів сляба. Розподіл сталей за групами режимів наведений у таблиці 2.3.

Прокатка злитків, які транзитом направляються на НТЛС «1680», а також злитків IV групи та поставок ДСС, виконується по одному злитку («одиночна прокатка»). Для металу I-III груп, що прокатується на склад або для подальшої посадки у методичні печі, зазвичай застосовується «спарена прокатка».

Примітки:

1. При високому темпі транзитної прокатки злитків I групи сталі (74 с і менше) допускається використання «спареної» прокатки.

2. Якщо сляби I групи не передаються транзитом на НТЛС «1680», подача злитків у прокатку здійснюється головною частиною вперед.

У таблиці 2.3 наведено рекомендовану кількість проходів залежно від марки сталі, товщини та ширини слябів.

При спареній прокатці перше обтиснення також зменшується на 15-20 мм порівняно з базовими режимами.

Примітки:

1. Під час перших двох проходів при спареній прокатці витрата води на охолодження валків зменшується на 50 %.

2. За 5-7 проходів до завершення прокатки спарений режим припиняють, після чого кожен злиток прокочується окремо до кінцевої товщини.

Таблиця 2.3 - Розподіл марок сталі за групами режимів обтиснення

Група стали	Марка стали	Група режимів обтиснень
Напівспокійні і киплячі Нестаріюча	08пс(кп), 10 пс(кп), 15 пс(кп), 15ПСН, 20 пс(кп),25 пс, Ст0, Ст1пс(кп), Ст3пс(кп), Ст4пс(кп), Ст3Гпс, Ст5Гпс 08Ю, 08ПСН	I
Вуглецеві спокійні	10, 15, 20, 25, 30, 15К, 20К, Ст0, Ст2сп, Ст3сп, Ст4сп, Ст15 - медистая	II
Низьколеговані	09Г2Д, 12ГС, 09Г2, 16ГС, 09ГС, 14Г2, 17ГС, 09Г2С, 09Г2Т, 10ХНДП, 17Г1С, Ст5сп 07ГСЮФ, 08ГСЮТ, 08ГСЮФ, 08ЮТ, 08ГЮФ, 08ГЮТ	III
Високовуглецеві	60С2, 60С2А,70Х, 45, 55, 60Г,65Г,70Г	IV

Під час прокатки категорично забороняється:

- здійснювати захоплення злитка у момент гальмування головного приводу;

- вмикати натискні механізми горизонтальних і вертикальних клітей при знаходженні металу у валках;

- переводити стан на реверс до повного виходу розкату з валків.

Гранично допустиме навантаження, при якому спрацьовує захисна система, під час одиночної та спареної прокатки не повинно перевищувати:

- для кожного двигуна горизонтальних валків - 16,5 кА;

- для пари двигунів вертикальних валків - 4,4 кА.

Для забезпечення стабільності процесу навантаження на двигун нижнього горизонтального валка має бути на 2,0-2,5 кА більшим, ніж на двигун верхнього валка.

2.3. Методика експериментальних досліджень та визначення параметрів процесу

Розроблення раціонального режиму деформації та розрахунок енергосилових параметрів при прокатуванні слябів заданих розмірів потребує комплексного вирішення взаємопов'язаних задач. До ключових із них належать: обґрунтування геометричних параметрів розкату, розподіл обтиснень між проходами, а також визначення температурно-швидкісних умов процесу.

На основних проходах величина обтиснення задається з урахуванням умови захоплення металу валками. За граничними кутами захоплення виконується розрахунок силових параметрів деформації, що дозволяє коригувати обтиснення відповідно до допустимих навантажень на привід, крутних моментів і потужності електродвигунів.

Відносне обтиснення за прохід визначається за методикою В.О. Ніколаєва:

$$\varepsilon = \frac{\Delta h}{H} \times 100 , \tag{2.1}$$

де:

H – висота розкату до обтиску, мм.

Випередження металу при прокатуванні розраховується за формулою Головіна–Дрездена:

$$S = \frac{\gamma^2 \times R}{h} , \tag{2.2}$$

де:

R – радіус робочого валка;

h – товщина металу на виході з валків.

Середня швидкість деформації, яка є необхідною для коректного визначення опору деформації матеріалу, обчислюється за залежністю Целікова:

$$u_{cp} = \frac{V \times \alpha}{H} , \tag{2.3}$$

Температура смуги суттєво впливає на межу текучості, коефіцієнт тертя та, відповідно, на зусилля і момент прокатки. Для її врахування використовується вираз:

$$\Delta t = 0{,}021 \times \left(\frac{t_{i-1} + 273}{100} \right)^4 \times \frac{\tau_{i-1}}{h_{i-1}}, \tag{2.4}$$

де:

t – температура перед входом у валки (початкова температура прокатки близько 1200 °С);

h_0 – висота злитка перед входом у валки;

τ – тривалість прокатки разом із паузами.

Тиск металу на валки в кожному проході не повинен перевищувати допустимі значення, які визначаються міцністю валків:

$$P = p_{cp} \times F_k, \tag{2.5}$$

де:

p_{cp} – середній контактний тиск, МПа;

$F_к$ – площа контакту металу з валками, мм².

Середній контактний тиск визначається за формулою:

$$p_{cp} = \sigma_T \times n_\theta \times n'_\theta, \tag{2.6}$$

де:

σ_T – межа текучості;

n_θ – коефіцієнт підпору, що враховує вплив зовнішніх зон;

n'_θ – коефіцієнт підпору, пов’язаний із дією зовнішнього тертя.

Межа текучості в зоні деформації для умов гарячої прокатки визначається виразом:

$$\sigma_T = 1{,}15 \times \sigma_0 \times k_u \times k_t \times k_\varepsilon, \text{ МПа}, \tag{2.7}$$

де k_t, k_u, k_ε – термомеханічні коефіцієнти, що враховують вплив температури, ступеня та швидкості деформації відповідно.

Коефіцієнти визначаються за методикою В.О. Ніколаєва:

$$k_t = 1{,}66 - 1{,}1 \cdot \left(\frac{t}{400} - 2 \right)^{0{,}7}$$

$$k_u = 0{,}38 + 0{,}065 \cdot (7 + \ell nu)$$

$$k_\varepsilon = 0{,}8 + 0{,}2 \cdot \left[1 - 178 \cdot (0{,}1 - \varepsilon)^2 \right]$$

$$k_\varepsilon = 1 + 0{,}43 \cdot \left[1 - 6{,}3 \cdot (0{,}5 - \varepsilon)^2 \right]$$

при $\varepsilon > 0{,}1$

Момент прокатки для кожного проходу розраховується як:

$$M_{пр} = P \times \Psi \times l_d, \tag{2.8}$$

де Ψ – коефіцієнт плеча.

Коефіцієнт плеча визначається:

$$\psi = 0{,}53 + 0{,}19\left(1 - l_d / h_{ср}\right)^2, \tag{2.9}$$

Потужність прокатки по проходах обчислюється за залежністю:

$$N_{дв} = \frac{\pi}{30} \cdot M_{дв} \cdot n_{дв}, \tag{2.10}$$

Процес прокатування на слябінгах характеризується складним напружено-деформованим станом, який змінюється як по об’єму металу, так і в часі. Це зумовлює нестабільний характер зміни середнього питомого тиску під час обтиснення.

Експериментальні дослідження підтверджують наявність мінімуму на кривій залежності середнього питомого тиску від параметрів деформації.

Особливістю прокатки великих злитків є також неоднорідність литого металу, що містить порожнини, усадочні дефекти та неметалеві включення різного походження.

На відміну від передільних станів, деформація на обтискних станах відбувається в обмеженому температурному інтервалі високих значень. Зниження температури між першим і останнім проходами зазвичай не перевищує 50-70 °С, тому фазові перетворення в металі не відбуваються.

Високі температури сприяють інтенсивному перебігу процесів рекристалізації, що призводить до зняття наклепу металу в паузах між проходами.

2.4 Аналіз і узагальнення отриманих результатів

Удосконалення технології прокатування злитків у сляби є важливим завданням сучасного прокатного виробництва, оскільки саме на стадії обтискної прокатки існує можливість скорочення тривалості процесу, збереження теплового потенціалу металу та зниження енергетичних витрат.

У процесі прокатування злитків пластична деформація поширюється по перерізу нерівномірно і не охоплює всю товщину металу. Це призводить до виникнення значної неоднорідності деформацій по висоті злитка.

Відомо [2, 4], що зі збільшенням величини обтиснення за один прохід глибина проникнення пластичної деформації в метал підвищується. Саме тому при прокатуванні виникає прагнення до збільшення разових обтиснень. Однак їх величина обмежується умовами захоплення металу валками, причому захоплююча здатність валків на початковому етапі процесу та в усталеному режимі є різною. В усталених умовах прокатування захоплення металу відбувається більш стабільно, ніж у момент початкового входження злитка у валки.

Разом із цим, завдяки високій пластичності сталі при температурах гарячої прокатки, метал здатний витримувати значні обтиснення без виникнення розривів, руйнувань чи тріщин на крайках.

У результаті проведених досліджень встановлено:

1. Для багатьох металів і сплавів прокатування з обтисненням понад 50 % за один прохід не обмежується їх пластичними властивостями.

2. Граничні величини обтиснення визначаються міцністю валків, робочої кліті та потужністю головного приводу.

3. Збільшення обтиснення також обмежується умовами надійного захоплення металу валками.

При прокатці слябів, коли співвідношення $l_d/h < 1$, процес відноситься до прокатування високих смуг. У цьому випадку пластична деформація не проникає на всю глибину перерізу, що викликає нерівномірний розподіл деформацій по висоті злитка.

Зі збільшенням обтиснення за один прохід глибина проникнення пластичної деформації зростає, однак можливість реалізації великих обтиснень знову ж таки визначається захоплюючою здатністю валків. Необхідно враховувати, що умови захоплення металу у початковий момент прокатки відрізняються від умов стабільного процесу, де захоплення відбувається ефективніше.

У ході досліджень було накопичено значний експериментальний матеріал щодо визначення середніх питомих тисків, характеристик міцності металу та інших параметрів процесу прокатування товстих штаб. Отримані дані про напружено-деформований стан металу, а також показники його міцності й пластичності дали змогу сформувати нові аналітичні залежності для розрахунку середніх нормальних контактних напружень.

Точність таких залежностей оцінювалася шляхом порівняння результатів розрахунків із експериментальними даними. Таким чином, теоретичні та експериментальні методи дослідження взаємно доповнюють один одного.

Основними напрямами експериментальних досліджень були:

- аналіз викривлення форми бічної поверхні прокатуваної штаби. Такий метод застосовується переважно для дослідження течії металу у поперечному напрямку та визначення характеру розподілу розширення по висоті штаби;

- дослідження зміщення точок, які до прокатування знаходилися на одній вертикальній або горизонтальній лінії у поперечному перерізі. Цей спосіб дозволяє оцінити розподіл деформацій стиску по висоті та ширині розкату, а також визначити глибину проникнення деформації у товщу металу;

- вивчення зміни форми осередків прямокутної координатної сітки, нанесеної до прокатування на бокову грань або у площину роз'єму двох половин зразка. Метод використовується для визначення поздовжніх переміщень окремих точок штаби при проходженні осередку деформації.

Розширення металу є лише одним із проявів висотної деформації. За відсутності поздовжнього витягування зміна форми бокової поверхні дозволяла б оцінити не тільки нерівномірність розширення по висоті розкату, але й ступінь деформації окремих шарів металу.

Проте одночасне виникнення поздовжньої деформації та змінне співвідношення між об'ємами металу, які беруть участь у розширенні й витяжці, суттєво ускладнюють взаємозв'язок між поперечною та висотною деформаціями. При цьому глибина поширення деформації по ширині розкату є неоднаковою.

На сьогодні відсутнє повністю коректне аналітичне рішення задачі визначення впливу зовнішніх зон на напружений стан металу при прокатуванні високих штаб. Саме тому при розрахунку середніх контактних напружень для таких умов переважно використовують наближені або емпіричні залежності.

2.5 Напрями вдосконалення технології, обладнання та виробничого процесу

Необхідність використання великого обтискного стана у складі металургійного комбінату обумовлюється як технологічними, так і економічними чинниками. Наявність такого агрегату дозволяє підвищити ефективність роботи сталеплавильних цехів. У мартенівському виробництві, де експлуатуються печі різних типів, практично неможливо забезпечити абсолютно рівномірний графік випуску плавок. За цих умов саме обтискний стан комбінату «Запоріжсталь» здатний оперативно приймати та переробляти метал з мінімальними виробничими витратами, забезпечуючи прокатні стани необхідною заготовкою.

Як правило, вихідним матеріалом для прокатування товстих і особливо товстих штаб є злитки, литі сляби або блюми. Литий метал характеризується грубозернистою структурою, а також наявністю внутрішніх несуцільностей.

Протягом останніх років на слябінгу «Запоріжсталь» було впроваджено низку технічних рішень, спрямованих на покращення виробничих показників. Проте чинна технологія все ще має певні недоліки, тому для підвищення продуктивності агрегату, покращення якості прокату та зниження енерговитрат необхідне подальше вдосконалення обладнання й технологічних режимів.

Основні напрями досліджень включають:

- аналіз зміни форми бічної поверхні штаби під час прокатування. Цей метод застосовують переважно для дослідження течії металу у поперечному напрямку та оцінювання характеру розподілу потовщення по висоті штаби;

- дослідження зміщення точок, які до прокатування знаходилися на одній вертикальній або горизонтальній лінії у площині поперечного перерізу. Такий спосіб дає можливість визначати розподіл деформацій стиску по висоті та ширині розкату, а також глибину проникнення деформації в метал;

- вивчення зміни форми осередків прямокутної координатної сітки, нанесеної на бічну грань або на площину роз'єму двох половин зразка до початку прокатування. Цей метод застосовують для визначення поздовжніх переміщень окремих точок штаби під час проходження осередку деформації.

Усі дефекти слябів і заготовок умовно поділяють на дві основні групи:

1. дефекти ливарного походження, що виникають через недоліки злитків;
2. дефекти прокатного походження, причиною яких є порушення технологічного процесу прокатування напівпродукту.

Дефекти, що виникають під час прокатки, можуть бути спричинені неправильним нагріванням злитків, некоректним налаштуванням стана, низькою якістю валкової арматури, порушенням температурних режимів прокатки чи охолодження металу після деформації.

Заходи щодо усунення недоліків на слябінгу 1150

Для зниження нерівномірності деформації по ширині розкату доцільно застосовувати один із горизонтальних валків з опуклим профілем бочки. Наявність опуклості забезпечує збільшення коефіцієнта витяжки середніх зон розкату по ширині. Подовження центральних шарів штаби зростає зі збільшенням величини опуклості та кількості проходів. Раціональною вважається опуклість у межах 1,5-2,5 мм. Найбільш ефективно встановлювати опуклий валок під час проміжної перевалки одного з горизонтальних валків. Це дозволяє компенсувати нерівномірне спрацювання іншого валка та скоротити втрати металу на 0,5-2 %.

Для скорочення довжини накатів і зменшення торцевої обрізі запропоновано переривати процес прокатування в середині циклу та змінювати орієнтацію розкату, подаючи його у валки кінцевою частиною вперед. Недоліком такого способу є зниження продуктивності через необхідність реверсування валків або розвороту розкату на 180º.

Враховуючи, що інтенсивне формування «риб'ячого хвоста» відбувається переважно у другій половині проходів, запропоновано у початкових проходах застосовувати невеликі обтиснення горизонтальними валками, а деформацію по ширині здійснювати за рахунок максимального обтиснення у вертикальних валках. У завершальних проходах, навпаки, горизонтальні валки повинні забезпечувати обтиснення у 1,5-2,5 раза більше, ніж на початковій стадії, тоді як вертикальні валки мають лише компенсувати розширення металу. Такий режим дозволяє зменшити масу торцевої обрізі слябів на 16,5-18,5 %.

У роботах, присвячених дослідженню деформації металу під час прокатування слябів, запропоновано раціональну форму слябінгового злитка, що забезпечує зменшення кінцевих накатів та обрізі. Зокрема, для зниження втрат металу рекомендується використовувати злитки з усіченою торцевою частиною (ВАТ «Запоріжсталь», НПО «Доникс»). Конусність може бути

виконана як у донній, так і у головній частині злитка. Крім того, доцільно формувати конусність і на широких гранях злитка. Така конструкція дозволяє зменшити довжину «риб'ячого хвоста» та скоротити обсяг кінцевої обрізі.

Дослідження показали, що в першій половині кампанії горизонтальних валків кількість опуклих слябів становить близько 20,3 %, тоді як у другій - вже 67,8 %. Під час прокатування 40-83 тис. т металу поперечний профіль слябів має переважно ввігнуту форму, а напливи формуються на крайках.

Після прокатування 96-160 тис. т металу сляби набувають переважно опуклого профілю через спрацювання валків. Найбільш інтенсивно зношується верхній валок, причому нерівномірність спрацювання збільшується зі зростанням обсягу прокату на слябінгу 1150. Причинами цього є абразивний вплив грубої окалини, дія водяних струменів у зоні деформації та утворення сітки термічних тріщин на поверхні валка.

На поперечний профіль слябів значно впливають як ступінь зношування горизонтальних валків, так і величина обтиснення вертикальними валками. Зношування бочки валка відбувається нерівномірно та досягає максимального значення у її центральній частині.

Із збільшенням обсягу прокату нерівномірність вироблення валків зростає і наприкінці кампанії може досягати 10-15 мм по діаметру.

Підвищення якості поверхні злитків досягається шляхом зменшення загазованості та кількості неметалевих включень у сталі. Загазованість характеризується кількістю газових пухирів, а забруднення - наявністю оксидів, сульфідів та інших шкідливих домішок. Використання вакуумно-дугового, електрошлакового, плазмово-дугового або електронно-променевого переплаву є енергоємним і економічно виправданим переважно для високолегованих сталей. Для маловуглецевих сталей більш ефективними є методи позапічної обробки.

Одним із таких способів є рафінування металу синтетичними шлаками у ковші, що дозволяє знизити вміст сірки до 0,005-0,007 %. При цьому також

зменшується кількість оксидних включень. Сучасні технології передбачають і розливання сталі у виливниці під шаром рідкого шлаку або екзотермічної суміші. Найбільш перспективним напрямом підвищення якості продукції та збільшення виходу придатного прокату є застосування безперервного розливання сталі.

Дефекти слябів можуть виникати також під час різання на ножицях. До них належать косий різ, загин кінця штаби, зминання кромки та задирки на торці. Причинами є неправильне налаштування ножиць, надмірний зазор між ножами або їх затуплення.

При недостатньому обрізанні торців на слябах можуть залишатися сліди усадочної раковини та внутрішньої пухкості.

Під час охолодження металу після прокатування можливе утворення зовнішніх тріщин. Часто вони проявляються лише через декілька годин або навіть днів після охолодження, тому їх називають «холодними» або гартівними тріщинами. Їх виникнення пов’язане з підвищеною твердістю металу після швидкого охолодження.

Такі тріщини можуть бути як поверхневими, так і наскрізними, особливо у малопластичних сталях. Основними причинами їх появи є залишкові напруження, що формуються під час прокатування та подальшого охолодження металу. Чим вища швидкість охолодження, тим більша ймовірність виникнення тріщин.

Низьковуглецеві сталі менш схильні до утворення холодних тріщин і можуть охолоджуватись практично з будь-якою швидкістю. Для легованих і високолегованих сталей швидкість охолодження необхідно регулювати залежно від їх схильності до тріщиноутворення.

Поверхневі дефекти усувають на етапі підготовки злитків і слябів до прокатування. Особливо важливо це при виробництві якісних вуглецевих і легованих сталей, призначених для виготовлення відповідальних деталей

машин. Витрати на підготовку заготовок компенсуються підвищенням виходу придатного металу та покращенням якості готового прокату.

На більшості металургійних підприємств застосовується гаряча посадка злитків у нагрівальні колодязі, тому видалення поверхневих дефектів виконують переважно на заготовках.

До якості поверхні легованих і високолегованих сталей висуваються підвищені вимоги. У зв'язку з цим злитки можуть повністю охолоджуватися, проходити зачистку, а після цього знову направлятися на нагрів. Перед зачисткою інколи застосовують пом'якшувальну термічну обробку. Видаленню підлягають тріщини, плівки, неметалеві включення, подряпини та інші поверхневі дефекти.

Одним із найбільш ефективних і економічних методів очищення поверхні є вогнева зачистка. Під час цього процесу поверхневий шар металу спалюється та видаляється струменем кисню.

Вогневу зачистку виконують як вручну, так і за допомогою спеціалізованих машин. При ручному способі різак підводять до дефектної ділянки та протягом кількох секунд нагрівають метал до температури 950-1000 °С. Спочатку різак розташовують під кутом 75-80˚ до поверхні заготовки. Після досягнення температури займання подачу кисню збільшують, а кут нахилу зменшують до 25-30˚. Зачистку виконують уздовж заготовки. Канавка повинна мати пологі краї, причому її ширина має бути не менше ніж у п'ять разів більшою за глибину, а довжина - не менше ніж утричі більшою за ширину.

3. РОЗРАХУНКОВА ЧАСТИНА

3.1 Розрахунок деформаційного режимів прокатки на слябінгу 1150

Деформаційний режим прокатування у початкових проходах визначають, виходячи із захоплюючої здатності валків. У даному розрахунку не враховуються обмеження, пов'язані з міцністю обладнання чи потужністю

приводу, оскільки аналіз літературних і виробничих даних свідчить про наявність достатнього запасу за цими параметрами. Визначення режиму деформації по проходах необхідне для подальшого розрахунку кінематичних і силових характеристик процесу, до яких належать середня швидкість деформації, межа плинності металу, коефіцієнт підпору, середній контактний тиск, а також момент і сила прокатки.

У таблиці 3.1 наведені вихідні параметри для виконання деформаційного розрахунку.

Таблиця 3.1 – Вихідні дані

Марка стали	H, мм	B, мм	L, мм	h, мм	b, мм	l, мм	α,°	α, рад	D_B, мм	ρ, т/м³
Сталь 3	780	1200	2000	150	1000	12480	20	0,35	1150	7,85

Злиток розміром 780 × 1200 × 2000 мм прокатується у сляб із кінцевими розмірами 150 × 1000 × 12480 мм.

Розрахунок режимів деформації виконується відповідно до методики В. О. Ніколаєва [51]. Для заданих геометричних параметрів спочатку визначають масу злитка (сляба) за формулою:

$$G = h \times b \times L \times \gamma \times k_{ô} \tag{3.1}$$

де:

L – довжина готового розкату після обрізання кінців;

$k_ф$ – фабрикаційний коефіцієнт (коефіцієнт витрат металу на обрізь; для слябів $k_{\text{ф}} = 1{,}1\ldots1{,}25$);

γ – питома маса металу (для сталі $\gamma = 7{,}85$ т/м^3).

$$G = 0{,}78 \times 1{,}2 \times 2 \times 7{,}85 \times 1{,}1 = 14695 \text{ кг} = 14{,}7 \text{ т.}$$

Для низьковуглецевих конструкційних сталей максимально допустиме обтиснення на слябінгу визначається переважно умовами захоплення металу валками.

Допустиме обтиснення визначають за залежністю:

$$\Delta h_H = \alpha^2 \times R_H \tag{3.2}$$

$$\Delta h_B = \alpha^2 \times R_B \tag{3.3}$$

де:

R_H, R_B – радіуси нових та спрацьованих валків відповідно, мм;

α – максимальний кут захоплення металу валками, рад.

Тоді середнє обтиснення за один прохід становить:

$$\Delta h_{HCP} = 0{,}35^2 \times 575 = 70 \text{ мм};$$

Сумарне обтиснення по висоті визначають за формулою:

$$\sum \Delta h_H = H - h_k \tag{3.4}$$

де:

H – початкова висота злитка, мм;

$h_к$ – кінцева товщина готового сляба, мм.

$$\sum \Delta h_H = 780 - 150 = 630 \text{ мм}$$

Сумарне обтиснення по ширині обчислюють за виразом:

$$\sum \Delta h_B = B - b_k \tag{3.5}$$

де:

B – початкова ширина злитка, мм;

$b_к$ – ширина готового сляба.

$$\sum \Delta h_B = 1200 - 1000 = 200 \text{ мм.}$$

Після визначення максимально допустимого обтиснення та сумарного обтиснення по кожній стороні розкату знаходять кількість проходів:

$$n_H = \frac{\sum \Delta h_H}{\Delta h_{HCP}} = \frac{630}{70} = 9$$

Кількість проходів по ширині приймають рівною кількості проходів по висоті. Холості проходи не передбачаються, а загальне число проходів приймається непарним.

Таким чином, загальна кількість проходів: $n_\Sigma = 9$.

Далі визначають величину розширення Δb для кожного проходу:

$$\Delta b = \frac{2 \times b_{cp} \times \Delta h \times k}{(H+h) \times \left[1 + (1+\alpha) \times \left(\frac{b_{cp}}{R \times \alpha}\right)^n\right]} \quad (3.6)$$

де:

$к = 1$ – умова вільного розширення;

H і h – висота розкату до та після деформації;

$\alpha = 0{,}35$;

$R = 757$ мм;

$n = 2$, за умов $R \times \alpha < b$ =201,25 < 1200.

$$b_{cp1} = \frac{1200 + 1158}{2} = 1179 \text{ мм};$$

$$\Delta b_1 = \frac{2 \times 1179 \times 70 \times 1}{(780+710) \times \left[1 + (1+0{,}35) \times \left(\frac{1179}{757 \times 0{,}35}\right)^2\right]} = 3{,}98 \approx 4 \text{ мм};$$

$$b_1 = 1158 + 4 = 1162 \text{ мм}.$$

$$b_{cp2} = \frac{1162 + 1120}{2} = 1141 \text{мм};$$

$$\Delta b_2 = \frac{2 \times 1141 \times 70 \times 1}{(710+640) \times \left[1 + (1+0{,}35) \times \left(\frac{1141}{757 \times 0{,}35}\right)^2\right]} = 4{,}54 \approx 5 \text{ мм};$$

$$b_2 = 1120 + 5 = 1125 \text{ мм}.$$

$$b_{cp3} = \frac{1125 + 1100}{2} = 1112{,}5 \text{ мм};$$

$$\Delta b_3 = \frac{2 \times 1112{,}5 \times 70 \times 1}{(640+570) \times \left[1 + (1+0{,}35) \times \left(\frac{1112{,}5}{757 \times 0{,}35}\right)^2\right]} = 5{,}19 \approx 5 \text{ мм};$$

$$b_3 = 1100 + 5 = 1105 \text{ мм}.$$

$$b_{cp4} = \frac{1105+1080}{2} = 1092{,}5 \text{ мм};$$

$$\Delta b_4 = \frac{2 \times 1092{,}5 \times 70 \times 1}{(570+500) \times \left[1 + (1+0{,}35) \times \left(\frac{1092{,}5}{757 \times 0{,}35}\right)^2\right]} = 5{,}96 \approx 6 \text{ мм};$$

$$b_4 = 1080 + 6 = 1086 \text{ мм}.$$

$$b_{cp5} = \frac{1086+1061}{2} = 1073{,}5 \text{ мм};$$

$$\Delta b_5 = \frac{2 \times 1073{,}5 \times 70 \times 1}{(500+430) \times \left[1 + (1+0{,}35) \times \left(\frac{1073{,}5}{757 \times 0{,}35}\right)^2\right]} = 6{,}98 \approx 7 \text{ мм};$$

$$b_5 = 1061 + 7 = 1068 \text{ мм}.$$

$$b_{cp6} = \frac{1068+1043}{2} = 1055{,}5 \text{ мм};$$

$$\Delta b_6 = \frac{2 \times 1055{,}5 \times 70 \times 1}{(430+360) \times \left[1 + (1+0{,}35) \times \left(\frac{1055{,}5}{757 \times 0{,}35}\right)^2\right]} = 8{,}33 \approx 8 \text{ мм};$$

$$b_6 = 1043 + 8 = 1051 \text{ мм}.$$

$$b_{cp7} = \frac{1051+1026}{2} = 1038{,}5 \text{ мм};$$

$$\Delta b_7 = \frac{2 \times 1038{,}5 \times 70 \times 1}{(360+290) \times \left[1 + (1+0{,}35) \times \left(\frac{1038{,}5}{757 \times 0{,}35}\right)^2\right]} = 10{,}28 \approx 10 \text{ мм};$$

$$b_7 = 1026 + 10 = 1036 \text{ мм}.$$

$$b_{cp8} = \frac{1036+1011}{2} = 1023{,}5 \text{ мм};$$

$$\Delta b_8 = \frac{2 \times 1023{,}5 \times 70 \times 1}{(290+220) \times \left[1 + (1+0{,}35) \times \left(\frac{1023{,}5}{757 \times 0{,}35}\right)^2\right]} = 13{,}28 \approx 13 \text{ мм};$$

$$b_8 = 1011 + 13 = 1024 \text{ мм}.$$

$$b_{ср9} = \frac{1024 + 1000}{2} = 1012 \text{ мм};$$

$$\Delta b_8 = \frac{2 \times 1012 \times 70 \times 1}{(220 + 150) \times \left[1 + (1 + 0{,}35) \times \left(\frac{1012}{757 \times 0{,}35}\right)^2\right]} = 18{,}49 \approx 19 \text{ мм};$$

Отримані результати наведені у таблиці 3.2.

Таблиця 3.2 – Режими обтиснень

№ проходу	H, мм	Δh_H, мм	R, мм	α, рад	Δh_B, мм	Δb, мм	B, мм
-	780	-	575	-	-	-	1200
1	710	70	575	0,35	42	4	1162
2	640	70	575	0,35	42	5	1125
3	570	70	575	0,35	25	5	1105
4	500	70	575	0,35	25	6	1086
5	430	70	575	0,35	25	7	1068
6	360	70	575	0,35	25	8	1051
7	290	70	575	0,35	25	10	1036
8	220	70	575	0,35	25	13	1024
9	150	70	575	0,35	25	19	1000

Відносне обтиснення за кожний прохід визначають у відсотках за формулою:

$$\varepsilon = \frac{\Delta h}{H} \times 100 \tag{3.7}$$

де:

H – висота розкату до обтиснення, мм.

$$\varepsilon_1 = \frac{70}{780} \times 100 = 9\,\%; \qquad \varepsilon_2 = \frac{70}{710} \times 100 = 10\,\%;$$

$$\varepsilon_3 = \frac{70}{640} \times 100 = 11\,\%; \qquad \varepsilon_4 = \frac{70}{570} \times 100 = 12\,\%;$$

$$\varepsilon_5 = \frac{70}{500} \times 100 = 14\,\%; \qquad \varepsilon_6 = \frac{70}{430} \times 100 = 16\,\%;$$

$$\varepsilon_7 = \frac{70}{360} \times 100 = 19\,\%; \qquad \varepsilon_8 = \frac{70}{290} \times 100 = 24\,\%;$$

$$\varepsilon_9 = \frac{70}{220} \times 100 = 31\,\%;$$

3.2 Кінематичний аналіз прокатки на слябінгу

До основних кінематичних характеристик процесу прокатки належать випередження металу та середня швидкість деформації. Для визначення величини випередження необхідно попередньо встановити нейтральний кут, який залежить від коефіцієнта тертя та кута захоплення металу валками.

Кут захоплення металу робочими валками визначається за виразом:

$$\alpha = \sqrt{\frac{\Delta h}{R}}, \tag{3.8}$$

де:

Δh – абсолютне обтиснення в проході;

R – радіус робочого валка;

$$\alpha = \sqrt{\frac{70}{575}} = 0{,}35 = 20\,^{\circ},$$

Оскільки величина Δh у всіх проходах залишається сталою, значення кута захоплення для кожного проходу також не змінюється.

Коефіцієнт тертя під час захоплення металу валками визначається за формулою:

$$f_{\text{òð}} = k_u \times k_t \times k_\varepsilon \times (1{,}05 - 0{,}0005 \times t_i), \tag{3.9}$$

де:

k_u, k_t, k_ε – термомеханічні коефіцієнти, які враховують вплив температури, ступеня та швидкості деформації;

t – температура металу після відповідного проходу.

Значення коефіцієнта тертя за проходами:

$$f_{\text{òð}\,1} = 1 \times 0{,}8 \times 0{,}9 \times (1{,}05 - 0{,}0005 \times 1197) = 0{,}325;$$

$$f_{\text{òð}\,2} = 1 \times 0{,}8 \times 0{,}9 \times (1{,}05 - 0{,}0005 \times 1193) = 0{,}326;$$

$$f_{\text{òð}\,3} = 1 \times 0{,}8 \times 0{,}9 \times (1{,}05 - 0{,}0005 \times 1193) = 0{,}326;$$

$$f_{\text{òð}\,4} = 1 \times 0{,}8 \times 0{,}9 \times (1{,}05 - 0{,}0005 \times 1188) = 0{,}328;$$

$$f_{\text{òð}\,5} = 1 \times 0{,}8 \times 0{,}9 \times (1{,}05 - 0{,}0005 \times 1182) = 0{,}33;$$

$$f_{\text{ð}6} = 1 \times 0{,}8 \times 0{,}9 \times (1{,}05 - 0{,}0005 \times 1175) = 0{,}333;$$

$$f_{\text{ð}7} = 1 \times 0{,}8 \times 0{,}9 \times (1{,}05 - 0{,}0005 \times 1166) = 0{,}336;$$

$$f_{\text{ð}8} = 1 \times 0{,}8 \times 0{,}9 \times (1{,}05 - 0{,}0005 \times 1154) = 0{,}34;$$

$$f_{\text{ð}9} = 1 \times 0{,}8 \times 0{,}9 \times (1{,}05 - 0{,}0005 \times 1136) = 0{,}347.$$

Нейтральний кут для заданих значень коефіцієнта тертя та кута контакту визначається за залежністю Екелунда-Павлова:

$$\gamma = \frac{\alpha}{2}\left(1 - \frac{\alpha}{2 \times f}\right) \tag{3.10}$$

$$\gamma_1 = \frac{0{,}35}{2}\left(1 - \frac{0{,}35}{2 \times 0{,}325}\right) = 0{,}08;$$

$$\gamma_2 = \frac{0{,}35}{2}\left(1 - \frac{0{,}35}{2 \times 0{,}326}\right) = 0{,}081;$$

$$\gamma_3 = \frac{0{,}35}{2}\left(1 - \frac{0{,}35}{2 \times 0{,}326}\right) = 0{,}081;$$

$$\gamma_4 = \frac{0{,}35}{2}\left(1 - \frac{0{,}35}{2 \times 0{,}328}\right) = 0{,}082;$$

$$\gamma_5 = \frac{0{,}35}{2}\left(1 - \frac{0{,}35}{2 \times 0{,}33}\right) = 0{,}082;$$

$$\gamma_6 = \frac{0{,}35}{2}\left(1 - \frac{0{,}35}{2 \times 0{,}333}\right) = 0{,}083;$$

$$\gamma_7 = \frac{0{,}35}{2}\left(1 - \frac{0{,}35}{2 \times 0{,}336}\right) = 0{,}084;$$

$$\gamma_8 = \frac{0{,}35}{2}\left(1 - \frac{0{,}35}{2 \times 0{,}34}\right) = 0{,}085;$$

$$\gamma_9 = \frac{0{,}35}{2}\left(1 - \frac{0{,}35}{2 \times 0{,}347}\right) = 0{,}086;$$

Випередження металу при прокатці розраховується за формулою Головіна–Дрездена:

$$S = \frac{\gamma^2 \times R}{h} \tag{3.11}$$

де:

R – радіус робочого валка;

h – товщина металу після виходу з валків.

$$S_1 = \frac{0{,}08^2 \times 575}{710} = 0{,}005; \qquad S_2 = \frac{0{,}081^2 \times 575}{640} = 0{,}005;$$

$$S_3 = \frac{0{,}081^2 \times 575}{570} = 0{,}006; \qquad S_4 = \frac{0{,}082^2 \times 575}{500} = 0{,}0067;$$

$$S_5 = \frac{0{,}082^2 \times 575}{430} = 0{,}0077; \qquad S_6 = \frac{0{,}083^2 \times 575}{360} = 0{,}009;$$

$$S_7 = \frac{0{,}084^2 \times 575}{290} = 0{,}011; \qquad S_8 = \frac{0{,}085^2 \times 575}{220} = 0{,}014;$$

$$S_9 = \frac{0{,}086^2 \times 575}{150} = 0{,}019;$$

Швидкість прокатки для кожного проходу визначається за формулою:

$$V = V_B(1+S), \tag{3.12}$$

де:

$V_B = \omega \times R$ м/с, швидкість прокатки.

Кутова швидкість валків:

$$\omega = \frac{\pi D \times n}{60},$$

де: n – частота обертання валків (за заводськими даними, приймаємо n = 53 об/с);

$$\omega = \frac{\pi \times 53}{60} = 2{,}77 \text{ с}^{-1};$$

Тоді швидкість валків становить:

$$V_B = 2{,}77 \times 0{,}575 = 1{,}6 \text{ м/с};$$

Отримані значення швидкостей за проходами:

$$V_1 = 1{,}6 \times (1 + 0{,}005) = 1{,}608 \text{ м/с}; \qquad V_2 = 1{,}6 \times (1 + 0{,}005) = 1{,}608 \text{ м/с};$$

$$V_3 = 1{,}6 \times (1 + 0{,}006) = 1{,}61 \text{ м/с}; \qquad V_4 = 3{,}16 \times (1 + 0{,}0067) = 1{,}61 \text{ м/с};$$

$$V_5 = 1{,}6 \times (1 + 0{,}0077) = 1{,}612 \text{ м/с}; \qquad V_6 = 1{,}6 \times (1 + 0{,}009) = 1{,}614 \text{ м/с};$$

$$V_7 = 1{,}6 \times (1 + 0{,}011) = 1{,}618 \text{ м/с}; \qquad V_8 = 3{,}16 \times (1 + 0{,}014) = 1{,}622 \text{ м/с};$$

$$V_9 = 1{,}6 \times (1 + 0{,}019) = 1{,}63 \text{ м/с.}$$

Для правильного визначення опору деформації матеріалу необхідно розрахувати середню швидкість деформації. Її визначають за формулою Целікова:

$$u_{ср} = \frac{V \times \alpha}{H}, \tag{3.13}$$

$$u_{ср1} = \frac{1{,}608 \times 0{,}35}{0{,}78} = 1{,}4 \text{ с}^{-1}; \qquad u_{ср2} = \frac{1{,}608 \times 0{,}35}{0{,}71} = 1{,}5 \text{ с}^{-1};$$

$$u_{ср3} = \frac{1{,}61 \times 0{,}35}{0{,}64} = 1{,}7 \text{ с}^{-1}; \qquad u_{ср4} = \frac{1{,}61 \times 0{,}35}{0{,}57} = 1{,}9 \text{ с}^{-1};$$

$$u_{ср5} = \frac{1{,}612 \times 0{,}35}{0{,}5} = 2{,}2 \text{ с}^{-1}; \qquad u_{ср6} = \frac{1{,}614 \times 0{,}35}{0{,}43} = 2{,}5 \text{ с}^{-1};$$

$$u_{ср7} = \frac{1{,}618 \times 0{,}35}{0{,}36} = 3 \text{ с}^{-1}; \qquad u_{ср8} = \frac{1{,}622 \times 0{,}35}{0{,}29} = 3{,}8 \text{ с}^{-1};$$

$$u_{ср9} = \frac{1{,}63 \times 0{,}35}{0{,}22} = 5 \text{ с}^{-1};$$

Підсумкові результати кінематичних розрахунків наведені у таблиці 3.3.

Таблиця 3.3 – Кінематичні параметри прокатки за проходами

№ проходу	α, рад	$f_{тр}$	γ	S	V, м/с	$u_{ср}$, с$^{-1}$
1	0,35	0.325	0,08	0,005	1,608	1,4
2	0,35	0,326	0,081	0,005	1,608	1,5
3	0,35	0,326	0,081	0,006	1,61	1,7
4	0,35	0,328	0,082	0,0067	1,61	1,9
5	0,35	0,33	0,082	0,0077	1,612	2,2
6	0,35	0,333	0,083	0,009	1,614	2,5
7	0,35	0,336	0,084	0,011	1,618	3
8	0,35	0,34	0,085	0,014	1,622	3,8
9	0,35	0,347	0,086	0.019	1,63	5

3.3 Визначення температурних параметрів прокатування злитка

Температурний стан металу під час прокатки є важливим параметром для визначення межі текучості та коефіцієнта тертя. Значення коефіцієнта тертя, у свою чергу, безпосередньо впливає на величину зусилля та моменту прокатки.

Для розрахунку температурного режиму використовується залежність:

$$\Delta t = 0{,}021 \times \left(\frac{t_{i-1} + 273}{100} \right)^4 \times \frac{\tau_{i-1}}{h_{i-1}}, \qquad (3.14)$$

де:

t – температура металу перед входом у валки (початкова температура прокатки приймається $1200^{\circ}C$);

h_0 – висота злитка перед деформацією;

τ – сумарний час прокатки та пауз між проходами.

Загальний час процесу визначається як:

$$\tau = \tau_{прок} + \tau_{пауз},$$

$$\tau_{ïðîê} = \frac{L}{V},$$

Згідно із заводськими даними, тривалість паузи між проходами приймається: $\tau_{пауз} = 2$ с.

Тривалість прокатки по проходах становить:

$$\tau_{ïðîê\ 1} = \frac{2}{3{,}17} = 0{,}63 \text{ с}; \qquad \tau_{ïðîê\ 2} = \frac{2{,}273}{3{,}17} = 0{,}72 \text{ с};$$

$$\tau_{ïðîê\ 3} = \frac{2{,}609}{3{,}17} = 0{,}82 \text{ с}; \qquad \tau_{ïðîê\ 4} = \frac{2{,}985}{3{,}18} = 0{,}94 \text{ с};$$

$$\tau_{ïðîê\ 5} = \frac{3{,}463}{3{,}18} = 1{,}09 \text{ с}; \qquad \tau_{ïðîê\ 6} = \frac{4{,}095}{3{,}18} = 1{,}29 \text{ с};$$

$$\tau_{ïðîê\ 7} = \frac{4{,}976}{3{,}19} = 1{,}57 \text{ с}; \qquad \tau_{ïðîê\ 8} = \frac{6{,}29}{3{,}2} = 1{,}98 \text{ с};$$

$$\tau_{ïðîê\ 9} = \frac{8{,}399}{3{,}22} = 2{,}65 \text{ с};$$

З урахуванням пауз загальний час по проходах дорівнює:

$\tau_1 = 0{,}63 + 2 = 2{,}63$ с; $\tau_2 = 0{,}72 + 2 = 2{,}72$ с;

$\tau_3 = 0{,}82 + 2 = 2{,}82$ с; $\tau_4 = 0{,}94 + 2 = 2{,}94$ с;

$\tau_5 = 1{,}09 + 2 = 3{,}09$ с; $\tau_6 = 1.29 + 2 = 3{,}29$ с;

$\tau_7 = 1{,}57 + 2 = 3{,}57$ с; $\tau_8 = 1{,}98 + 2 = 3{,}98$ с;

$\tau_9 = 2{,}65 + 2 = 4{,}65$ с;

Отримані результати розрахунку температурного режиму наведені у таблиці 3.4.

Таблиця 3.4 – Температурний режим прокатки по проходах

№ проходу	h_0, мм	τ, с	Δt, °C	t, °C
1	780	2,63	3	1197
2	710	2,72	4	1193
3	640	2,82	1	1192
4	570	2,94	4	1188
5	500	3,09	6	1182
6	430	3,29	7	1175
7	360	3,57	9	1166
8	290	3,98	12	1154
9	220	4,65	18	1136

3.4 Розрахунок енергосилових характеристик процесу прокатки

Попередньо виконані деформаційний, кінематичний та температурний розрахунки є основою для визначення силових параметрів процесу прокатки, а саме зусилля та моменту прокатки в кожному проході. Вихідні дані для розрахунків наведені у відповідних таблицях.

Тиск металу на валки у процесі прокатки не повинен перевищувати допустимі значення, які визначаються міцністю валків. Зусилля прокатки розраховується за формулою:

$$P = p_{cp} \times F_k, \tag{3.15}$$

де:

p_{cp} – середній контактний тиск, МПа;

$F_к$ – площа контакту металу з валками, мм².

Середній контактний тиск визначається за залежністю:

$$p_{cp} = \sigma_T \times n_\theta \times n'_\theta, \tag{3.16}$$

де:

σ_T – межа текучості металу;

n_θ – коефіцієнт підпору, що враховує вплив зовнішніх зон;

n'_θ – коефіцієнт підпору, який враховує дію зовнішнього тертя.

Межу текучості металу в осередку деформації для умов гарячої прокатки визначають за виразом:

$$\sigma_T = 1{,}15 \times \sigma_0 \times k_u \times k_t \times k_\varepsilon \text{, МПа,} \qquad (3.17)$$

де:

σ_0 = 84 МПа, базове значення межі текучості для сталі 3;

k_t, k_u, k_ε – термомеханічні коефіцієнти, що враховують відповідно температуру, ступінь та швидкість деформації.

Термомеханічні коефіцієнти для сталі 3 визначаються за формулами:

$$k_t = 1{,}66 - 1{,}1 \cdot \left(\frac{t}{400} - 2\right)^{0,7}$$

$$k_u = 0{,}38 + 0{,}065 \cdot (7 + \ell nu)$$

$$k_\varepsilon = 0{,}8 + 0{,}2 \cdot \left[1 - 178 \cdot (0{,}1 - \varepsilon)^2\right]$$

при $\varepsilon > 0{,}1$ $$k_\varepsilon = 1 + 0{,}43 \cdot \left[1 - 6{,}3 \cdot (0{,}5 - \varepsilon)^2\right]$$

$$k_{t1} = 1{,}66 - 1{,}1 \cdot \left(\frac{1197}{400} - 2\right)^{0,7} = 0{,}56; \quad k_{t2} = 1{,}66 - 1{,}1 \cdot \left(\frac{1193}{400} - 2\right)^{0,7} = 0{,}57;$$

$$k_{t3} = 1{,}66 - 1{,}1 \cdot \left(\frac{1192}{400} - 2\right)^{0,7} = 0{,}57; \quad k_{t4} = 1{,}66 - 1{,}1 \cdot \left(\frac{1188}{400} - 2\right)^{0,7} = 0{,}58;$$

$$k_{t5} = 1{,}66 - 1{,}1 \cdot \left(\frac{1182}{400} - 2\right)^{0,7} = 0{,}59; \quad k_{t6} = 1{,}66 - 1{,}1 \cdot \left(\frac{1175}{400} - 2\right)^{0,7} = 0{,}61;$$

$$k_{t7} = 1{,}66 - 1{,}1 \cdot \left(\frac{1166}{400} - 2\right)^{0,7} = 0{,}63; \quad k_{t8} = 1{,}66 - 1{,}1 \cdot \left(\frac{1154}{400} - 2\right)^{0,7} = 0{,}65;$$

$$k_{t9} = 1{,}66 - 1{,}1 \cdot \left(\frac{1136}{400} - 2\right)^{0,7} = 0{,}69;$$

$$k_{u1} = 0{,}38 + 0{,}065 \cdot (7 + \ln 1{,}4) = 0{,}86; \quad k_{u2} = 0{,}38 + 0{,}065 \cdot (7 + \ln 1{,}5) = 0{,}86;$$

$$k_{u3} = 0{,}38 + 0{,}065 \cdot (7 + \ln 1{,}7) = 0{,}87; \quad k_{u4} = 0{,}38 + 0{,}065 \cdot (7 + \ln 1{,}9) = 0{,}88;$$

$$k_{u5} = 0{,}38 + 0{,}065 \cdot (7 + \ln 2{,}2) = 0{,}89; \quad k_{u6} = 0{,}38 + 0{,}065 \cdot (7 + \ln 2{,}5) = 0{,}89;$$

$$k_{u7} = 0{,}38 + 0{,}065 \cdot (7 + \ln 3) = 0{,}91; \quad k_{u8} = 0{,}38 + 0{,}065 \cdot (7 + \ln 3{,}8) = 0{,}92;$$

$$k_{u9} = 0{,}38 + 0{,}065 \cdot (7 + \ln 5) = 0{,}94;$$

Розрахунок коефіцієнта:

$$k_{\varepsilon 1} = 0{,}8 + 0{,}2 \cdot (1 - 178 \cdot (0{,}1 - 0{,}099)^2 = 1{,}0;$$

$$k_{\varepsilon 2} = 1 + 0{,}43 \cdot \left(1 - 6{,}3(0{,}5 - 0{,}109)^2\right) = 1{,}02;$$

$$k_{\varepsilon 3} = 1 + 0{,}43 \cdot \left(1 - 6{,}3(0{,}5 - 0{,}123)^2\right) = 1{,}04;$$

$$k_{\varepsilon 4} = 1 + 0{,}43 \cdot \left(1 - 6{,}3(0{,}5 - 0{,}140)^2\right) = 1{,}08;$$

$$k_{\varepsilon 5} = 1 + 0{,}43 \cdot \left(1 - 6{,}3(0{,}5 - 0{,}163)^2\right) = 1{,}12;$$

$$k_{\varepsilon 6} = 1 + 0{,}43 \cdot \left(1 - 6{,}3(0{,}5 - 0{,}194)^2\right) = 1{,}18;$$

$$k_{\varepsilon 7} = 1 + 0{,}43 \cdot \left(1 - 6{,}3(0{,}5 - 0{,}241)^2\right) = 1{,}25;$$

$$k_{\varepsilon 8} = 1 + 0{,}43 \cdot \left(1 - 6{,}3(0{,}5 - 0{,}318)^2\right) = 1{,}34;$$

$$k_{\varepsilon 9} = 1 + 0{,}43 \cdot \left(1 - 6{,}3(0{,}5 - 0{,}467)^2\right) = 1{,}43;$$

Тоді значення межі текучості по проходах становлять:

$$\sigma_{T1} = 1{,}15 \times 84 \times 0{,}57 \times 1{,}0 \times 0{,}86 = 47 \text{ Н/мм}^2;$$

$$\sigma_{T2} = 1{,}15 \times 84 \times 0{,}57 \times 1{,}02 \times 0{,}86 = 49 \text{ Н/мм}^2;$$

$$\sigma_{T3} = 1{,}15 \times 84 \times 0{,}58 \times 1{,}04 \times 0{,}87 = 50 \text{ Н/мм}^2;$$

$$\sigma_{T4} = 1{,}15 \times 84 \times 0{,}58 \times 1{,}08 \times 0{,}88 = 53 \text{ Н/мм}^2;$$

$$\sigma_{T5} = 1{,}15 \times 84 \times 0{,}59 \times 1{,}12 \times 0{,}89 = 57 \text{ Н/мм}^2;$$

$$\sigma_{T6} = 1{,}15 \times 84 \times 0{,}61 \times 1{,}18 \times 0{,}89 = 62 \text{ Н/мм}^2;$$

$$\sigma_{T7} = 1{,}15 \times 84 \times 0{,}63 \times 1{,}25 \times 0{,}91 = 68 \text{ Н/мм}^2;$$

$$\sigma_{T8} = 1{,}15 \times 84 \times 0{,}65 \times 1{,}34 \times 0{,}92 = 78 \text{ Н/мм}^2;$$

$$\sigma_{T9} = 1{,}15 \times 84 \times 0{,}69 \times 1{,}43 \times 0{,}94 = 89 \text{ Н/мм}^2.$$

Коефіцієнт підпору, який враховує вплив зовнішніх зон, визначається за формулою:

$$n_\theta = \left(\frac{l_\partial}{h_{cp}}\right)^{-0{,}4}, \qquad (3.18)$$

де:

l_d – довжина зони деформації, мм;

h_{cp} – середня висота осередку деформації, мм;

Довжина зони деформації розраховується за виразом:

$$l_d = \sqrt{R \times \Delta h}\,, \tag{3.19}$$

$$l_d = \sqrt{575 \times 70} = 200{,}6 \text{ мм.}$$

Середня висота осередку деформації по проходах:

$$h_{cp} = \frac{H + h}{2}, \tag{3.20}$$

$$h_{cp1} = \frac{780 + 710}{2} = 745 \text{ мм;} \qquad h_{cp2} = \frac{710 + 640}{2} = 675 \text{ мм;}$$

$$h_{cp3} = \frac{640 + 570}{2} = 605 \text{ мм;} \qquad h_{cp4} = \frac{570 + 500}{2} = 535 \text{ мм;}$$

$$h_{cp5} = \frac{500 + 430}{2} = 465 \text{ мм;} \qquad h_{cp6} = \frac{430 + 360}{2} = 395 \text{ мм;}$$

$$h_{cp7} = \frac{360 + 290}{2} = 325 \text{ мм;} \qquad h_{cp8} = \frac{290 + 220}{2} = 255 \text{ мм;}$$

$$h_{cp9} = \frac{220 + 150}{2} = 185 \text{ мм;}$$

Коефіцієнти підпору за проходами:

$$n_{\theta 1} = \left(\frac{200{,}6}{745}\right)^{-0{,}4} = 1{,}69; \quad n_{\theta 2} = \left(\frac{200{,}6}{675}\right)^{-0{,}4} = 1{,}62; \quad n_{\theta 3} = \left(\frac{200{,}6}{605}\right)^{-0{,}4} = 1{,}56;$$

$$n_{\theta 4} = \left(\frac{200{,}6}{535}\right)^{-0{,}4} = 1{,}48; \quad n_{\theta 5} = \left(\frac{200{,}6}{465}\right)^{-0{,}4} = 1{,}40; \quad n_{\theta 6} = \left(\frac{200{,}6}{395}\right)^{-0{,}4} = 1{,}31;$$

$$n_{\theta 7} = \left(\frac{200{,}6}{325}\right)^{-0{,}4} = 1{,}21; \quad n_{\theta 8} = \left(\frac{200{,}6}{255}\right)^{-0{,}4} = 1{,}1; \quad n_{\theta 9} = \left(\frac{200{,}6}{185}\right)^{-0{,}4} = 0{,}97;$$

Коефіцієнт підпору, що враховує зовнішнє тертя, визначається з виразу:

$$n'_{\sigma} = 1 + \frac{R \times \alpha}{2 \times h_{cp}} \times \left[f_{\theta} - \alpha \times \left(\frac{1}{3} + \frac{\alpha}{4 \times f_{\theta}} \right) \right], \tag{3.21}$$

де:

f_{θ} – показник тертя;

α – кут захоплення;

h_{cp} – середня висота осередку деформації.

Показник тертя визначається за формулою:

$$f_n = 1{,}6 \times f_{mp} - 0{,}018, \qquad (3.22)$$

де:

f_θ – коефіцієнт тертя при захопленні металу валками;

$$f_{n1} = 1{,}6 \times 0{,}325 - 0{,}018 = 0{,}502;$$

$$f_{n2} = 1{,}6 \times 0{,}326 - 0{,}018 = 0{,}503;$$

$$f_{n3} = 1{,}6 \times 0{,}323 - 0{,}018 = 0{,}503;$$

$$f_{n4} = 1{,}6 \times 0{,}328 - 0{,}018 = 0{,}507;$$

$$f_{n5} = 1{,}6 \times 0{,}33 - 0{,}018 = 0{,}51;$$

$$f_{n6} = 1{,}6 \times 0{,}333 - 0{,}018 = 0{,}515;$$

$$f_{n7} = 1{,}6 \times 0{,}336 - 0{,}018 = 0{,}519;$$

$$f_{n8} = 1{,}6 \times 0{,}334 - 0{,}018 = 0{,}526;$$

$$f_{n9} = 1{,}6 \times 0{,}47 - 0{,}018 = 0{,}537;$$

Отже:

$$n'_{\sigma 1} = 1 + \frac{575 \times 0{,}35}{2 \times 745} \times \left[0{,}502 - 0{,}35 \times \left(\frac{1}{3} + \frac{0{,}35}{4 \times 0{,}502} \right) \right] = 1{,}04;$$

$$n'_{\sigma 2} = 1 + \frac{575 \times 0{,}35}{2 \times 675} \times \left[0{,}503 - 0{,}35 \times \left(\frac{1}{3} + \frac{0{,}35}{4 \times 0{,}503} \right) \right] = 1{,}05;$$

$$n'_{\sigma 3} = 1 + \frac{575 \times 0{,}35}{2 \times 605} \times \left[0{,}503 - 0{,}35 \times \left(\frac{1}{3} + \frac{0{,}35}{4 \times 0{,}503} \right) \right] = 1{,}05;$$

$$n'_{\sigma 4} = 1 + \frac{575 \times 0{,}35}{2 \times 535} \times \left[0{,}507 - 0{,}35 \times \left(\frac{1}{3} + \frac{0{,}35}{4 \times 0{,}507} \right) \right] = 1{,}06;$$

$$n'_{\sigma 5} = 1 + \frac{575 \times 0{,}35}{2 \times 465} \times \left[0{,}51 - 0{,}35 \times \left(\frac{1}{3} + \frac{0{,}35}{4 \times 0{,}51} \right) \right] = 1{,}07;$$

$$n'_{\sigma 6} = 1 + \frac{575 \times 0{,}35}{2 \times 395} \times \left[0{,}515 - 0{,}35 \times \left(\frac{1}{3} + \frac{0{,}35}{4 \times 0{,}515} \right) \right] = 1{,}08;$$

$$n'_{\sigma 7} = 1 + \frac{575 \times 0{,}35}{2 \times 325} \times \left[0{,}519 - 0{,}35 \times \left(\frac{1}{3} + \frac{0{,}35}{4 \times 0{,}519} \right) \right] = 1{,}1;$$

$$n'_{\sigma 8} = 1 + \frac{575 \times 0{,}35}{2 \times 255} \times \left[0{,}526 - 0{,}35 \times \left(\frac{1}{3} + \frac{0{,}35}{4 \times 0{,}526} \right) \right] = 1{,}14;$$

$$n'_{\sigma 9} = 1 + \frac{575 \times 0{,}35}{2 \times 185} \times \left[0{,}537 - 0{,}35 \times \left(\frac{1}{3} + \frac{0{,}35}{4 \times 0{,}537} \right) \right] = 1{,}19;$$

Середній контактний тиск за проходами становить:

$p_{ср1} = 47 \times 1{,}69 \times 1{,}04 = 83$ Н/мм^2; $p_{ср2} = 49 \times 1{,}62 \times 1{,}05 = 84$ Н/мм^2;

$p_{ср3} = 50 \times 1{,}56 \times 1{,}05 = 82$ Н/мм^2; $p_{ср4} = 53 \times 1{,}48 \times 1{,}06 = 83$ Н/мм^2;

$p_{ср5} = 57 \times 1{,}07 \times 1{,}4 = 85$ Н/мм^2; $p_{ср6} = 62 \times 1{,}31 \times 1{,}08 = 88$ Н/мм^2;

$p_{ср7} = 68 \times 1{,}21 \times 1{,}1 = 91$ Н/мм^2; $p_{ср8} = 78 \times 1{,}1 \times 1{,}14 = 98$ Н/мм^2;

$$p_{ср9} = 89 \times 0{,}97 \times 1{,}19 = 103 \text{ Н/мм}^2.$$

Середній контактний тиск за методикою В.О. Ніколаєва визначається за формулою:

$$p_{ср} = 1{,}15 \cdot \sigma_T \left(1 + 0{,}145 \cdot l_d / h_{ср}\right)\left[1 + \left(1{,}1 - l_d / h_{ср}\right)^2\right]; \qquad (3.23)$$

Фактор форми:

$$\left(\frac{l_\partial}{h_{ср}}\right)_1 = \frac{200{,}6}{745} = 0{,}269; \quad \left(\frac{l_\partial}{h_{ср}}\right)_2 = \frac{200{,}6}{675} = 0{,}297;$$

$$\left(\frac{l_\partial}{h_{ср}}\right)_3 = \frac{200{,}6}{605} = 0{,}332; \quad \left(\frac{l_\partial}{h_{ср}}\right)_4 = \frac{200{,}6}{535} = 0{,}375;$$

$$\left(\frac{l_\partial}{h_{ср}}\right)_5 = \frac{200{,}6}{465} = 0{,}431; \quad \left(\frac{l_\partial}{h_{ср}}\right)_6 = \frac{200{,}6}{395} = 0{,}508;$$

$$\left(\frac{l_\partial}{h_{ср}}\right)_7 = \frac{200{,}6}{325} = 0{,}617; \quad \left(\frac{l_\partial}{h_{ср}}\right)_8 = \frac{200{,}6}{255} = 0{,}787;$$

$$\left(\frac{l_\partial}{h_{cp}}\right)_9 = \frac{200,6}{185} = 1,08 .$$

Отримані значення середнього контактного тиску:

$$p_{cp1} = 1,15 \cdot 47(1 + 0,145 \cdot 0,269)\left[1 + (1,1 - 0,269)^2\right] = 97 \text{ Н/мм}^2;$$

$$p_{cp2} = 1,15 \cdot 49(1 + 0,145 \cdot 0,297)\left[1 + (1,1 - 0,297)^2\right] = 95 \text{ Н/мм}^2;$$

$$p_{cp3} = 1,15 \cdot 50(1 + 0,145 \cdot 0,332)\left[1 + (1,1 - 0,332)^2\right] = 96 \text{ Н/мм}^2;$$

$$p_{cp4} = 1,15 \cdot 53(1 + 0,145 \cdot 0,375)\left[1 + (1,1 - 0,375)^2\right] = 98 \text{ Н/мм}^2;$$

$$p_{cp5} = 1,15 \cdot 57(1 + 0,145 \cdot 0,431)\left[1 + (1,1 - 0,431)^2\right] = 101 \text{ Н/мм}^2;$$

$$p_{cp6} = 1,15 \cdot 62(1 + 0,145 \cdot 0,508)\left[1 + (1,1 - 0,508)^2\right] = 103 \text{ Н/мм}^2;$$

$$p_{cp7} = 1,15 \cdot 68(1 + 0,145 \cdot 0,617)\left[1 + (1,1 - 0,617)^2\right] = 105 \text{ Н/мм}^2;$$

$$p_{cp8} = 1,15 \cdot 78(1 + 0,145 \cdot 0,787)\left[1 + (1,1 - 0,787)^2\right] = 110 \text{ Н/мм}^2;$$

$$p_{cp9} = 1,15 \cdot 89(1 + 0,145 \cdot 1,084)\left[1 + (1,1 - 1,084)^2\right] = 118 \text{ Н/мм}^2.$$

Залежність $p_{cp} = f\left(\frac{l_\partial}{h_{cp}}\right)$ середнього контактного тиску від фактора форми наведена на рис. 3.1. Додатково виконані розрахунки для значень фактора форми 0,15; 0,20 та 0,25.

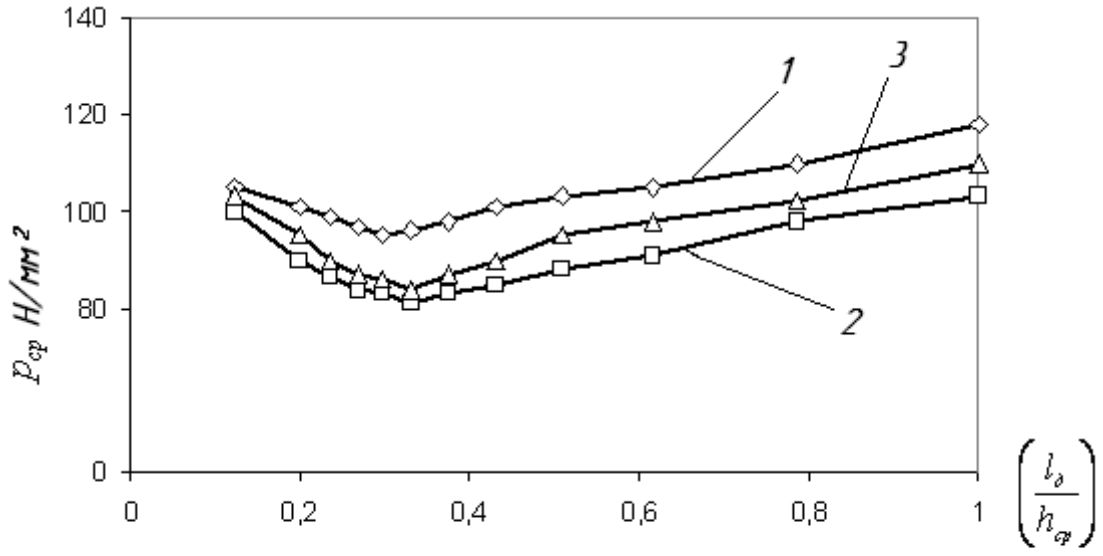


Рисунок 3.1. Залежність середнього контактного тиску від фактора форми: 1 - методика визначення через фактор форми (формула В.О. Ніколаєва); 2 - методика визначення через коефіцієнти підпору О.П. Чекмарьова; 3 - експериментальні дані О.П. Чекмарьова [42].

Площа контакту металу з валком визначається за формулою:

$$F_k = 0{,}5 \times (B + b) \times l_д, \tag{3.23}$$

де:

B, b – ширина штаби до та після проходу.

$$F_{k1} = 0{,}5 \times (1200 + 1160) \times 200{,}6 = 236708 \text{ мм}^2;$$

$$F_{k2} = 0{,}5 \times (1160 + 1121) \times 200{,}6 = 228784 \text{ мм}^2;$$

$$F_{k3} = 0{,}5 \times (1121 + 1100) \times 200{,}6 = 222766 \text{ мм}^2;$$

$$F_{k4} = 0{,}5 \times (1100 + 1081) \times 200{,}6 = 218754 \text{ мм}^2;$$

$$F_{k5} = 0{,}5 \times (1081 + 1063) \times 200{,}6 = 215043 \text{ мм}^2;$$

$$F_{k6} = 0{,}5 \times (1063 + 1045) \times 200{,}6 = 211432 \text{ мм}^2;$$

$$F_{k7} = 0{,}5 \times (1045 + 1028) \times 200{,}6 = 207921 \text{ мм}^2;$$

$$F_{k8} = 0{,}5 \times (1028 + 1013) \times 200{,}6 = 204712 \text{ мм}^2;$$

$$F_{k9} = 0{,}5 \times (11013 + 1000) \times 200{,}6 = 201903 \text{ мм}^2.$$

Зусилля прокатки по проходах:

$$P_1 = 83 \times 236708 \times 10^{-6} = 19{,}6 \text{ МН}; \qquad P_2 = 84 \times 228784 \times 10^{-6} = 19{,}1 \text{ МН};$$

$$P_3 = 82 \times 222766 \times 10^{-6} = 18{,}2 \text{ МН}; \qquad P_4 = 83 \times 218754 \times 10^{-6} = 18{,}2 \text{ МН};$$

$$P_5 = 85 \times 215043 \times 10^{3} = 18{,}4 \text{ МН}; \qquad P_6 = 88 \times 211432 \times 10^{3} = 18{,}6 \text{ МН};$$

$$P_7 = 91 \times 207921 \times 10^{3} = 18{,}9 \text{ МН}; \quad P_8 = 98 \times 204712 \times 10^{3} = 20 \text{ МН};$$

$$P_9 = 103 \times 201903 \times 10^{3} = 20{,}7 \text{ МН};$$

Момент прокатки визначається за формулою:

$$M_{пр} = P \times \Psi \times l_d, \tag{3.24}$$

де:

Ψ - коефіцієнт плеча.

$$\psi = 0{,}53 + 0{,}19\left(1 - l_d / h_{cp}\right)^2$$

$$\psi_1 = 0{,}53 + 0{,}19\left(1 - \frac{200{,}6}{745}\right)^2 = 0{,}63;$$

$$\psi_2 = 0{,}53 + 0{,}19\left(1 - \frac{200{,}6}{675}\right)^2 = 0{,}62;$$

$$\psi_3 = 0{,}53 + 0{,}19\left(1 - \frac{200{,}6}{605}\right)^2 = 0{,}61;$$

$$\psi_4 = 0{,}53 + 0{,}19\left(1 - \frac{200{,}6}{535}\right)^2 = 0{,}60;$$

$$\psi_5 = 0{,}53 + 0{,}19\left(1 - \frac{200{,}6}{465}\right)^2 = 0{,}59;$$

$$\psi_6 = 0{,}53 + 0{,}19\left(1 - \frac{200{,}6}{395}\right)^2 = 0{,}58;$$

$$\psi_7 = 0{,}53 + 0{,}19\left(1 - \frac{200{,}6}{325}\right)^2 = 0{,}56;$$

$$\psi_8 = 0{,}53 + 0{,}19\left(1 - \frac{200{,}6}{255}\right)^2 = 0{,}54;$$

$$\psi_9 = 0{,}53 + 0{,}19\left(1 - \frac{200{,}6}{185}\right)^2 = 0{,}53;$$

Отримані значення моменту прокатки:

$$M_{пр1} = 19{,}6 \times 0{,}63 \times 0{,}2 = 2{,}47 \text{ МН×м};$$

$$M_{пр2} = 19{,}1 \times 0{,}62 \times 0{,}2 = 2{,}385 \text{ МН×м};$$

$$M_{пр3} = 18{,}2 \times 0{,}61 \times 0{,}2 = 2{,}235 \text{ МН×м};$$

$$M_{пр4} = 18{,}2 \times 0{,}60 \times 0{,}2 = 2{,}20 \text{ МН×м};$$

$$M_{пр5} = 18{,}4 \times 0{,}59 \times 0{,}2 = 2{,}17 \text{ МН×м};$$

$$M_{пр6} = 18{,}6 \times 0{,}58 \times 0{,}2 = 2{,}14 \text{ МН×м};$$

$$M_{пр7} = 18{,}9 \times 0{,}56 \times 0{,}2 = 2{,}105 \text{ МН×м};$$

$$M_{пр8} = 20{,}0 \times 0{,}54 \times 0{,}2 = 2{,}16 \text{ МН×м};$$

$$M_{пр9} = 20{,}7 \times 0{,}53 \times 0{,}2 = 2{,}20 \text{ МН×м};$$

Потужність прокатки по проходах визначається за формулою:

$$N_{дв} = 960 \cdot M \cdot \text{v} / R \cdot \eta, \qquad (3.25)$$

$$N_{дв1} = 960 \cdot 2{,}47 \cdot 1{,}608 / 0{,}575 \cdot 0{,}9 = 7368 \text{ кВт};$$

$$N_{дв2} = 960 \cdot 2{,}385 \cdot 1{,}608 / 0{,}575 \cdot 0{,}9 = 7114 \text{ кВт};$$

$$N_{дв3} = 960 \cdot 2{,}235 \cdot 1{,}61 / 0{,}575 \cdot 0{,}9 = 6675 \text{ кВт};$$

$$N_{дв4} = 960 \cdot 2{,}2 \cdot 1{,}61 / 0{,}575 \cdot 0{,}9 = 6571 \text{ кВт};$$

$$N_{дв5} = 960 \cdot 2{,}17 \cdot 1{,}612 / 0{,}575 \cdot 0{,}9 = 6489 \text{ кВт};$$

$$N_{дв6} = 960 \cdot 2{,}14 \cdot 1{,}614 / 0{,}575 \cdot 0{,}9 = 6407 \text{ кВт};$$

$$N_{дв7} = 960 \cdot 2{,}105 \cdot 1{,}618 / 0{,}575 \cdot 0{,}9 = 6318 \text{ кВт};$$

$$N_{дв8} = 960 \cdot 2{,}105 \cdot 1{,}618 / 0{,}575 \cdot 0{,}9 = 6318 \text{ кВт};$$

$$N_{дв8} = 960 \cdot 2{,}16 \cdot 1{,}622 / 0{,}575 \cdot 0{,}9 = 6499 \text{ кВт};$$

$$N_{дв9} = 960 \cdot 2{,}2 \cdot 1{,}63 / 0{,}575 \cdot 0{,}9 = 6652 \text{ кВт}.$$

де:

η - сумарний ККД передачі «двигун–валок», який приймається в межах 0,85 ÷ 0,9. У розрахунках використано: η=0,9.

Результати розрахунку силових параметрів процесу наведені у таблиці 3.5.

Таблиця 3.5 – Результати розрахунку силових параметрів процесу

№ проходу	σ_T, Н/мм^2	f_θ	$p_{ср}$, Н/мм^2	$F_к$, мм^2	P, МН	$M_{пр}$, МН×м	$N_{пр}$, кВт
1	47	0,325	83	236708	19,6	2,47	7368
2	49	0,326	84	228784	19,1	2,385	7114
3	50	0,326	82	222766	18,2	2,235	6675
4	53	0,328	83	218754	18,2	2,2	6571
5	57	0,33	85	215043	18,4	2,17	6489
6	62	0,333	88	211432	18,6	2,14	6407
7	68	0,336	91	207921	18,9	2,105	6318
8	78	0,34	98	204712	20,0	2,16	6499
9	89	0,347	103	201903	20,7	2,2	6652

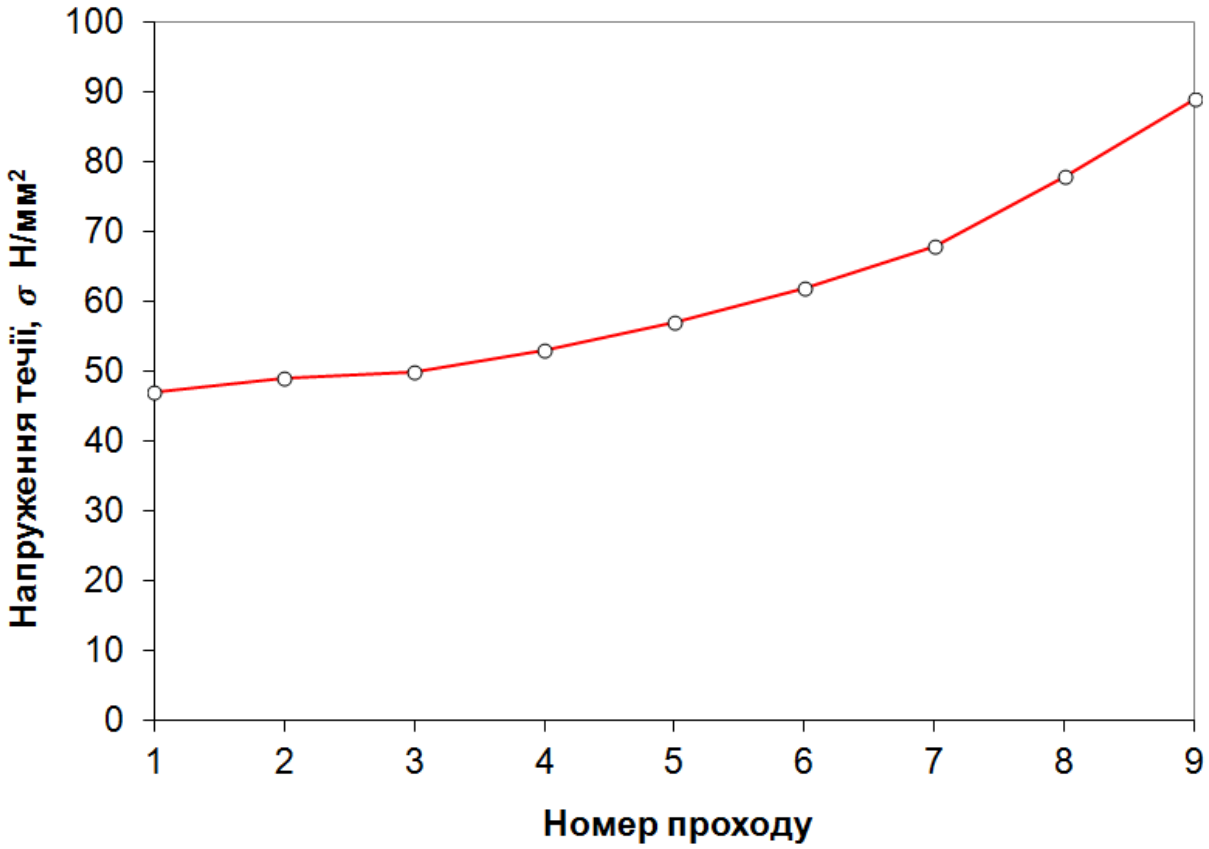


Рисунок 3.1. Графік розподілу напруження прокатування по проходах

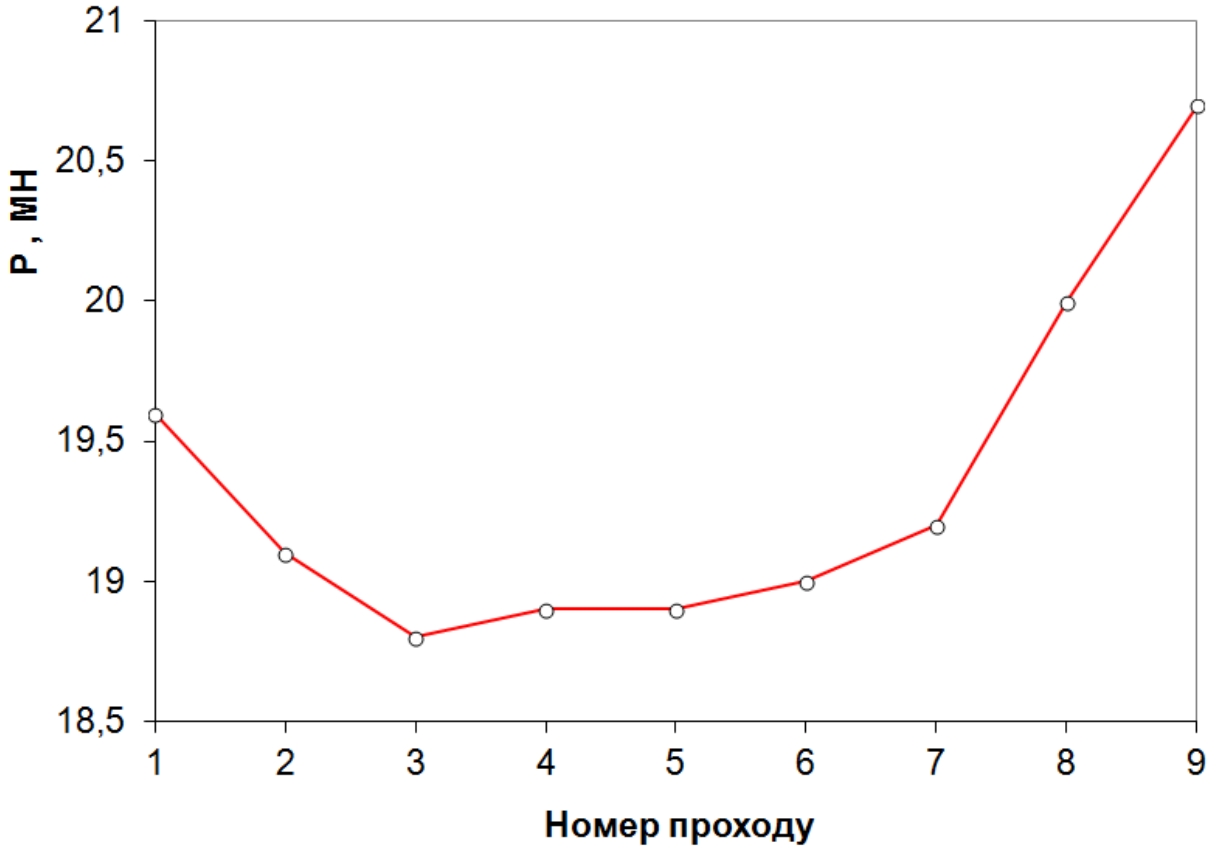


Рисунок 3.2. Графік розподілу зусилля прокатування по прохода

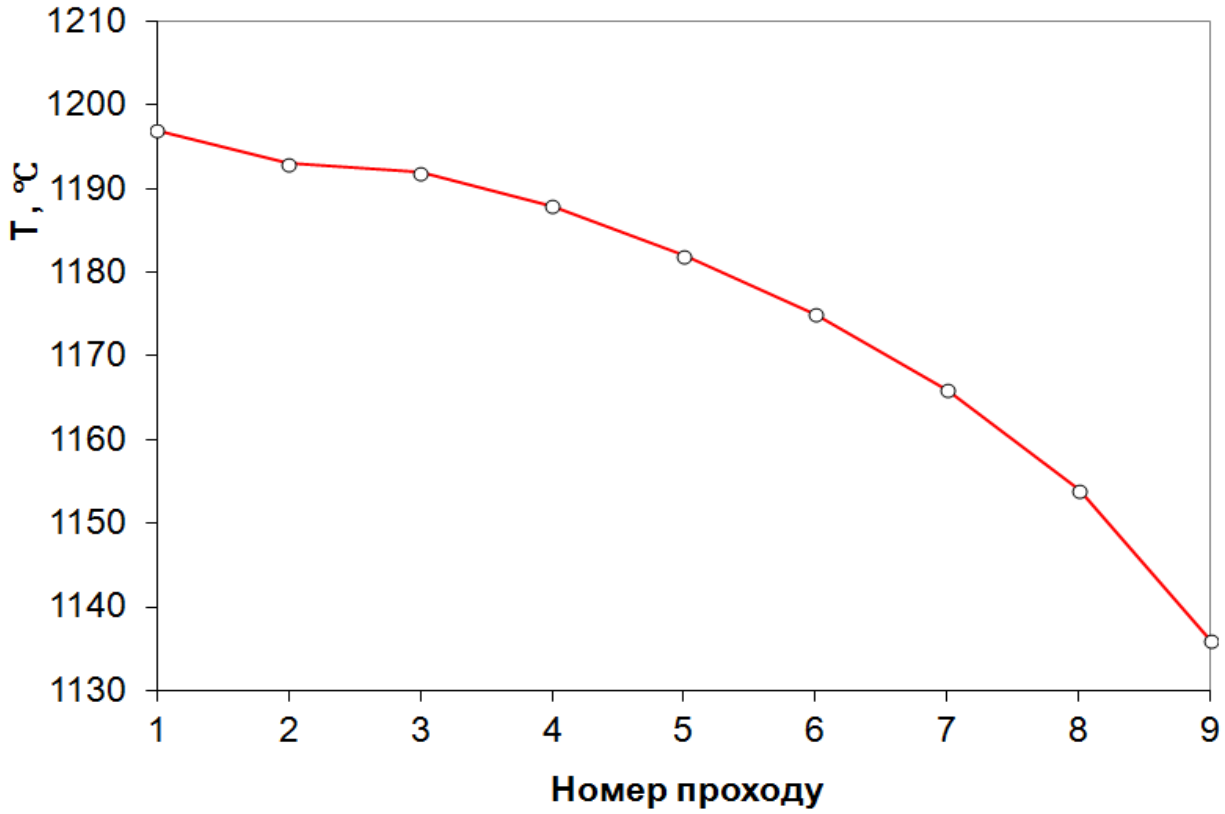


Рисунок 3.3. Графік температури прокатування по проходах

4. ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ

4.1 Аналіз потенційно небезпечних і шкідливих виробничих факторів

У цьому розділі проаналізовано умови праці в навчальному приміщенні під час проведення науково-дослідної роботи для підготовки магістерської роботи. Оскільки основним засобом праці є комп'ютерна техніка, на працівника впливає комплекс несприятливих факторів, пов'язаних з її використанням. Додатково негативний вплив може посилюватися через недостатньо раціональну організацію робочого місця, що здатне спричинити зниження працездатності та ефективності праці.

У приміщенні можливий вплив таких фізичних факторів:

- підвищеної або зниженої температури повітря;
- надлишкової запиленості повітряного середовища;
- надмірної або недостатньої вологості повітря;
- недостатнього рівня освітлення робочої зони;
- шуму, що перевищує допустимі норми;
- підвищеного рівня іонізуючого випромінювання;
- дії електромагнітних полів;
- накопичення статичної електрики;
- небезпеки ураження електричним струмом;
- мерехтіння та недостатньої контрастності екрана монітора.

До психофізіологічних факторів належать:

- перевантаження зорового апарату;
- нервово-емоційне напруження;
- підвищене інтелектуальне навантаження.

Біологічні та хімічні шкідливі чинники в даному приміщенні відсутні.

Результати аналізу небезпечних і шкідливих факторів для робочого місця наведені у таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 – Оцінка факторів виробничого середовища та трудового процесу студента у навчальному приміщенні ЗДІА

№ п/п	Фактори виробничого середовища та трудового процесу	Нормативне значення	Фактичне значення	Відповідність параметра стандарту	Час дії фактора, %
1	Температура, °С	21-25	22	відповідає	100
2	Вологість, %	40-60	55	відповідає	100
3	Швидкість руху повітря, м/с	0,1-0,2	0,1	відповідає	100
4	Запиленість, мг/м^3	4	0,07	відповідає	100
5	Освітлення, лк	300-500	300	відповідає	100
6	Шум, дБА	50-60	45	відповідає	75

Отже, проведений аналіз небезпечних та шкідливих виробничих факторів свідчить про те, що умови праці у приміщенні є допустимими та характеризуються відсутністю шкідливих впливів, які могли б спричинити професійні захворювання, втрату працездатності або розвиток початкових ознак професійної патології.

4.2 Заходи щодо покращення умов праці

Навчальне приміщення належить до приміщень I категорії, оскільки в ньому виконуються легкі фізичні роботи. Відповідно до вимог [52], для таких приміщень необхідно забезпечити наступні параметри мікроклімату: оптимальна температура повітря повинна становити 22 °С (допустимі межі – 21-25 °С), відносна вологість – 40-60 % (допускається не більше 75 %), а швидкість руху повітря не повинна перевищувати 0,1 м/с.

Для підтримання нормативних параметрів температури та вологості в холодний період року використовується система водяного опалення, а в теплий період — кондиціонування повітря. Кондиціонер виконує функції вентиляційної установки та за допомогою автоматичного регулювання

забезпечує стабільне підтримання необхідних параметрів повітряного середовища [52].

Під час виконання зорових робіт високої точності рівень загального освітлення має бути не менше 300 лк, а комбінованого - 750 лк. Для робіт середньої точності ці показники повинні становити відповідно 200 лк та 300 лк. Однією з головних гігієнічних вимог є рівномірний розподіл освітлення по всьому полю зору [53].

Оскільки природне освітлення через віконні прорізи є недостатнім, робочі місця додатково оснащуються системою штучного освітлення. Штучне освітлення формується електричними джерелами світла, інтенсивність та напрямок світлового потоку яких регулюються залежно від потреби.

Додаткове освітлення застосовується не лише у темний час доби, а й за недостатнього природного освітлення вдень. Як джерела світла використовуються люмінесцентні лампи типів ЛБ, ДРЛ, ЛБХ, які встановлюються попарно у світильниках та рівномірно розміщуються над робочими поверхнями [53].

Тривалий вплив шуму високої інтенсивності негативно позначається на стані слухового апарату та нервової системи людини. Крім цього, шум підвищує стомлюваність працівника та може стати причиною виробничих помилок.

Основними джерелами шуму в приміщенні є друкувальні пристрої, копіювальна техніка, системи вентиляції та кондиціонування, а також вентилятори охолодження комп’ютерної техніки.

Допустимий рівень шуму на робочому місці не повинен перевищувати 60 дБА. Для зменшення шумового навантаження рекомендується використовувати звукопоглинальні матеріали для оздоблення стін, а також застосовувати екранування робочих зон.

Основними джерелами електромагнітного випромінювання є дисплеї персональних комп’ютерів. Саме монітори створюють найбільш небезпечні

види випромінювання, що можуть негативно впливати на здоров'я користувача. Електромагнітне поле включає електричну та магнітну складові, причому більш небезпечною вважається магнітна складова.

Персональні комп'ютери можуть бути джерелами таких видів випромінювання:

- м'якого рентгенівського;
- ультрафіолетового в діапазоні 200-400 нм;
- видимого світлового випромінювання 400-700 нм;
- ближнього інфрачервоного випромінювання 700-1050 нм;
- радіочастотного випромінювання в межах 3 кГц-30 МГц;
- електростатичних полів.

Ультрафіолетове випромінювання у невеликих дозах є корисним, однак його надлишок може спричиняти дерматити та головний біль. Інфрачервоне випромінювання викликає перегрів тканин організму, зокрема кришталика ока, а також підвищення температури тіла.

Напруженість електростатичних полів не повинна перевищувати 20 кВ/м, а поверхневий електростатичний потенціал - 500 В. У випадку перевищення допустимих значень необхідно скорочувати тривалість роботи за комп'ютером, робити 15-хвилинні перерви через кожні 1,5 години роботи та використовувати захисні екрани. Такі екрани виготовляються зі спеціального скла або дрібної металевої сітки, що накопичує електростатичний заряд. Для його відведення екран необхідно заземлювати.

Небезпеку також становить підвищена напруженість електромагнітного поля (ЕМП). На відстані 5-10 см від монітора значення електричної складової можуть досягати 140 В/м, що перевищує допустимі норми СанПіН 2.2.2.542-96. Гранично допустимі параметри ЕМП наведені в таблиці 4.2.

Таблиця 4.2 - Гранично допустимі значення характеристик ЕМП

Найменування параметрів	Припустиме значення
Напруженість електромагнітного поля по електричній	10 В/м

складовій на відстані 50 см від поверхні монітора	
Напруженість електромагнітного поля по магнітній складовій на відстані 50 см від поверхні монітора	0,3 А/м
Напруженість електростатичного поля для дорослих користувачів ПК	20 кв/м
Напруженість електромагнітного поля на відстані 50 см по електричній складовій повинна бути не більш: - у діапазоні частот 5 Гц - 2 кгц; - у діапазоні частот 2 - 400 кгц	 25 В/м 2,5 В/м
Щільність магнітного потоку повинна бути не більш: - у діапазоні частот 5 Гц – 2 кгц; - у діапазоні частот 2 – 400 кгц	 250 нТл 25 нТл
Поверхневий електростатичний потенціал	500 В

У разі підвищення рівня електромагнітного випромінювання необхідно обмежити час роботи за ПК, робити регулярні перерви, використовувати захисні екрани, а також уникати скупчення працюючих моніторів у межах однієї робочої зони та вимикати обладнання, яке тимчасово не використовується.

Для безпечної роботи користувач повинен знаходитися на відстані не менше 50 см від екрана монітора. З метою зниження впливу випромінювань рекомендується використовувати сучасні монітори зі зниженим рівнем випромінювання та дотримуватись установлених режимів праці та відпочинку.

Під час роботи на поверхні комп’ютерної техніки накопичується статична електрика. На відстані 5-10 см від екрана напруженість електростатичного поля може становити 60-280 кВ/м, що приблизно у десять разів перевищує допустиму норму. Для зменшення впливу статичної електрики доцільно використовувати нейтралізатори, зволожувачі повітря та антистатичне покриття підлоги.

Важливим чинником забезпечення високої працездатності є правильна організація робочого місця.

Оскільки всі робочі місця оснащені персональними комп’ютерами, необхідно забезпечити оптимальне положення працівника відповідно до ергономічних вимог. Результати оцінки ергономічних характеристик наведені у таблиці 4.3.

Таблиця 4.3 – Виконання умов оптимальної робочої пози за ергономічними характеристиками

Параметри	Нормативна ергономічна характеристика	Виконання нормативу
Ступні ніг	На підлозі або на підставці для ніг	Ступні знаходяться на підлозі
Стегна	В горизонтальній площині	Норматив виконується
Передпліччя	Вертикально	Норматив виконується
Лікті	Під кутом 70-90 до вертикальної площини	Лікті працівників знаходяться пі кутом приблизно 70-80
Зап’ястя	Зігнуті під кутом не більше 20 відносно горизонтальної площини	Норматив виконується
Нахил голови	15-20 відносно вертикальної площини	Нахил голови у різних працівників коливається від 15 до 45 градусів

Персональні комп’ютери розташовані безпосередньо на основних робочих столах працівників. Чотири ПК знаходяться по центру столів, а ще два - з лівого боку. Периферійне обладнання, зокрема принтер та сканер, використовується періодично, тому воно розміщене на окремому приставному столі.

Кут між основним і приставним столами становить 120°. Висота робочої поверхні столу для ПК дорівнює 800 мм, що відповідає нормативним вимогам. Ширина столу забезпечує виконання робочих операцій у межах зони досяжності. Водночас столи не обладнані підставками для ніг.

Робочі місця оснащені кріслами з необхідними конструктивними елементами: сидінням, спинкою та підлокітниками. Крісла є підйомно-поворотними, мають регулювання висоти сидіння, положення спинки та підлокітників. Кожен параметр регулюється окремо й надійно фіксується.

Основні нормативні параметри сидінь та відповідність вимогам наведені у таблиці 4.4. Поверхні сидіння, спинки та підлокітників є напівм’якими, мають неелектризоване покриття та легко очищуються від забруднень.

Таблиця 4.4 – Дотримання нормативів параметрів сидінь працівників

Параметр	Необхідна характеристика	Виконання необхідних

		вимог
Регулювання елементів сидіння для лінійних розмірів	15-20 мм	Виконується: 20 мм
Регулювання елементів сидіння для кутових розмірів	2-5 мм	Виконується: 5 мм
Зусилля під час регулювання	20 Н	Виконується: 20 Н
Ширина та глибина сидіння	не менше 400 мм	Виконується
Висота поверхні сидіння	має регулюватися в межах 400-500 мм	Виконується: регулюється в межах 500 мм
Кут нахилу поверхні сидіння	від 15 вперед до 5 назад	Виконується
Поверхня сидіння	пласка, передній край - закруглений	Виконується
Висота спинки сидіння	300±20мм	Не виконується: висота більше 300 мм
Ширина спинки сидіння	не менше 380 мм	Виконується
Радіус кривизни в горизонтальній площині	400 мм	Виконується
Кут нахилу спинки відносно вертикального положення	0-30 градусів	Виконується
Відстань від спинки до попереднього краю сидіння	260 – 400 мм	Виконується: становить 350 мм

Монітор і клавіатура повинні розташовуватися на оптимальній відстані від очей користувача, яка не повинна перевищувати 600 мм [52]. У досліджуваному приміщенні ця відстань становить приблизно 500-600 мм. Клавіатури розміщені ближче до краю столу, ніж це передбачено нормами (100-300 мм), однак кут нахилу клавіатури близько 5° відповідає нормативним вимогам.

Монітори не перекриваються іншими пристроями введення-виведення інформації, оскільки периферійне обладнання встановлене на окремому приставному столі.

4.3 Забезпечення електробезпеки

Відповідно до вимог ПУЕ навчальне приміщення належить до 1 класу приміщень без підвищеної небезпеки ураження електричним струмом,

оскільки воно характеризується нормальними температурними умовами, відсутністю пилу та вологи, наявністю ізольованого покриття підлоги і незначною кількістю заземленого обладнання [54].

До основних споживачів електричної енергії в аудиторії належать система штучного освітлення, шість персональних комп'ютерів, два кондиціонери, а також периферійне обладнання - принтер і сканер. Електроживлення приладів здійснюється від мережі напругою 220 В.

Найбільш імовірними причинами ураження електричним струмом під час роботи є:

- виникнення напруги на металевих елементах комп'ютерної техніки внаслідок пошкодження ізоляції;
- несправність електричних розеток;
- порушення ізоляції кабелів живлення;
- недотримання правил експлуатації електрообладнання;
- використання в приміщенні заборонених електроприладів, зокрема електрообігрівачів, електроплит або електрочайників.

Для зниження ризику ураження електричним струмом у приміщенні передбачаються такі заходи електробезпеки: недопущення контакту працівників із струмоведучими частинами обладнання, використання захисного заземлення та автоматичного відключення, застосування малих напруг, а також впровадження необхідних організаційних заходів [55].

До організаційних заходів належать проведення інструктажів з охорони праці, навчання персоналу безпечним методам роботи та регулярна перевірка знань вимог безпеки відповідно до посадових обов'язків і характеру виконуваних робіт.

Під час виконання планового або аварійного ремонту комп'ютерної техніки необхідно попередньо відключити обладнання від електромережі та переконатися у відсутності напруги. Лише після цього допускається проведення ремонтних робіт. У випадках, коли обслуговування виконується на

струмоведучих частинах, що перебувають під напругою, роботи повинні здійснюватися щонайменше двома працівниками із застосуванням відповідних електрозахисних засобів.

4.4 Заходи пожежної та техногенної безпеки

Навчальне приміщення, у якому експлуатуються персональні комп'ютери та периферійне обладнання, відповідно до вимог нормативної документації належить до категорії «В» за вибухопожежною небезпекою, а ступінь його вогнестійкості визначається як II [56].

До основних причин виникнення пожеж у приміщенні можна віднести:

- несправність електропроводки, вимикачів та розеток, що може спричинити коротке замикання або пошкодження ізоляції;
- експлуатацію несправних електроприладів;
- використання електронагрівальних пристроїв з відкритими нагрівальними елементами;
- займання внаслідок удару блискавки в будівлю;
- вплив зовнішніх джерел загоряння;
- порушення правил пожежної безпеки та необережне поводження з відкритим вогнем.

Для ліквідації можливих осередків займання в приміщенні передбачено використання вуглекислотного вогнегасника типу ВВ-5. Оперативне виявлення пожежі та передача сигналу здійснюються за допомогою пожежної сигналізації ЛИПНУВ-1, димових сповіщувачів та автоматичної системи пожежогасіння. Для оповіщення відповідних служб використовуються телефонний зв'язок та інші засоби екстреної комунікації.

З метою попередження пожеж необхідно своєчасно проводити ремонт електрообладнання, усувати виявлені несправності, не допускати експлуатації пошкоджених електроприладів, а також регулярно проводити протипожежні

інструктажі. Під час таких інструктажів працівників ознайомлюють із правилами пожежної безпеки та порядком використання первинних засобів пожежогасіння.

У разі виникнення пожежі необхідно виконати такі дії:

- знеструмити приміщення;
- повідомити пожежно-рятувальну службу за телефоном;
- організувати евакуацію людей згідно з планом евакуації;
- розпочати гасіння пожежі за допомогою первинних засобів пожежогасіння.

4.5 Розрахунок системи штучного освітлення методом світлового потоку

Оскільки природне освітлення приміщення, що надходить через віконні прорізи, є недостатнім, для забезпечення нормативних умов праці необхідно застосовувати систему штучного освітлення.

Розрахунок системи освітлення виконується методом світлового потоку [53].

Габаритні розміри приміщення:

- довжина - 8 м;
- ширина - 6 м;
- висота - 3 м.

Розрахункова висота визначається за формулою:

$$h = 3 - 0,8 = 2,2 \text{ м}, \tag{4.1}$$

де 0,8 м - висота робочої поверхні.

Площа приміщення становить:

$$S = 6 \cdot 8 = 48 \text{ м}^2. \tag{4.2}$$

Індекс приміщення визначається за виразом:

$$i = \frac{A \cdot B}{(A + B) \cdot h} \tag{4.3}$$

де:

A и B - відповідно довжина та ширина приміщення, м;

h – висота підвісу світильників над робочою поверхнею, м.

$$i = \frac{6 \cdot 8}{(6+8) \cdot 2{,}2} = 1{,}56$$

Оскільки стеля та стіни приміщення виконані з бетону, коефіцієнти відбиття приймаються: $\rho_п$ = 50 %, $\rho_с$ = 30 % відповідно.

Коефіцієнт використання світлового потоку приймаємо: η = 50 %.

Необхідний світловий потік ламп визначається за формулою:

$$F = \frac{E \cdot k_з \cdot S \cdot z}{N \cdot \eta}, \qquad (4.4)$$

де:

E – 300 лк - нормована освітленість;

$k_з$ – коефіцієнт запасу;

S – площа приміщення, м^2;

z – поправочний коефіцієнт;

N – кількість світильників;

η – коефіцієнт використання світлового потоку.

Після підстановки значень отримуємо:

$$F \cdot N = \frac{300 \cdot 1{,}4 \cdot 48 \cdot 1{,}1}{0{,}5} = 44352 \text{ лм.}$$

Для освітлення приміщення доцільно використовувати люмінесцентні лампи типу ЛХБ80 (2×80 Вт), світловий потік однієї лампи становить 3840 лм.

Необхідна кількість ламп визначається за формулою:

$$N = \frac{44352}{3840} \approx 12 \text{ шт.} \qquad (4.5)$$

Оскільки використовуються дволампові світильники, для забезпечення нормативної освітленості необхідно встановити 6 світильників. Їх розташування приймається таким:

- по довжині приміщення — 2 світильники;

- по ширині — 3 світильники.

Люмінесцентні світильники рекомендується монтувати рядами, паралельно стіні з віконними отворами. У даному випадку використовуються світильники типу ШОД з лампами ЛХБ потужністю 2×80 Вт і світловим потоком 3840 лм.

Відстань між світильниками визначається за формулами:

$$la = \frac{1}{2} \cdot La\,, \tag{4.6}$$

$$l_в = \frac{1}{3} \cdot Lb\,, \tag{4.7}$$

де:

L_a – відстань між світильниками по довжині приміщення.

$L_в$ – відстань між рядами світильників.

l – відстань від крайнього світильника до стіни.

$$la = \frac{1}{2} \cdot 2{,}5 = 1{,}25 \text{ м},$$

$$l_в = \frac{1}{3} \cdot 1{,}8 = 0{,}6 \text{ м}.$$

Схема розташування світильників наведена на рис. 4.1.

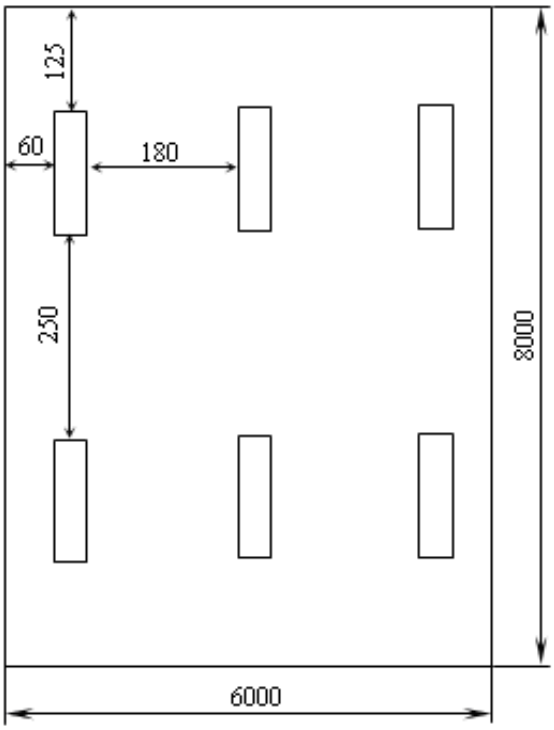


Рисунок 4.1 Схема розташування світильників

У розділі «Охорона праці та техногенна безпека» проведено оцінювання умов праці у навчальному приміщенні, визначено потенційно небезпечні та шкідливі фактори виробничого середовища, а також запропоновано комплекс заходів, спрямованих на забезпечення безпечних умов праці відповідно до чинних нормативів та стандартів з охорони праці.

ВИСНОВКИ

1. В аналітично-пошуковому розділі досліджено сучасний стан проблеми, пов’язаної з визначенням енергосилових параметрів під час прокатування високих розкатів. Проведено аналіз точності існуючих методів

розрахунку, а також узагальнено результати досліджень, наведених у науково-технічних публікаціях і спеціалізованих джерелах.

2. У дослідницько-розрахунковій частині подано характеристику обладнання слябінгу, описано застосовувані технологічні процеси та наведено методики визначення основних параметрів прокатки.

3. Виконано розрахунок деформаційних режимів та визначено енергосилові параметри процесу прокатування відповідно до чинної технології виробництва.

4. Основною метою роботи було дослідження реального характеру деформації великих злитків та вдосконалення підходів до визначення енергосилових параметрів при прокатці високих штаб з урахуванням недоліків існуючих методів. Особливу увагу приділено:

- аналізу деформації як процесу пластичної течії металу;
- вивченню зміни форми та переміщення окремих елементарних об’ємів металу в просторі й часі під час проходження осередку деформації;
- дослідженню формозміни матеріалу як результату його течії в процесі прокатування.

На основі проведених досліджень встановлено, що подальший розвиток теоретичних основ процесу прокатки є актуальним напрямом, який має важливе як наукове, так і практичне значення. Одним із ключових завдань залишається вдосконалення технології прокатування злитків з метою скорочення тривалості циклу прокатки та підвищення температури металу наприкінці процесу.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Середа Б.П. Обробка металів тиском : навч. посіб. для студ. вищ. навч. закл. Запоріжжя : ЗДІА, 2005. 250 с.

2. *Середа Б.П.* Прокатне виробництво : навч. посіб. для студ. вищ. навч. закл. Запоріжжя: ЗДІА, 2008. 312 с.

3. Василёв Я.Д., Сафъян М.М. Производство полосовой и листовой стали : учебник для вузов. Киев : Вища школа, Головное издательство, 1976. 192 с.

4. Клименко В.М., Онищенко А.М., Минаев А.А. Горелик В.С. Технология прокатного производства : учебное пособие для вузов. Киев: Вища школа, Головное издательство, 1989. 311 с.

5. Сафъян М.М., Мазур В.Л., Сафъян А.М., Молчанов А.И. Технология процессов прокатки и волочения. Листопрокатное производство : учебник для вузов. Киев: Вища школа, Головное издательство, 1988. 351 с.

6. Жук А. Я., Малышев Г. П., Желябина Н. К., Клевцов О. М. Техническая диагностика. Контроль и прогнозирование : монография. /– Запорожье ЗГИА, 2008. 224 с.

7. Чащин В. В., В. А. Капитанов, Попов Е. С. Использование температурной математической модели при разработке технологии регулируемого охлаждения горячекатаной полосы в рулоне. *Производство проката.* 2008. № 8. С. 17-23.

8. Василев Я. Д., Мінаєв О. А. Теорія поздовжньої прокатки : підручник. Донецьк : УНІТЕХ, 2009. 488 с.

9. Середа Б.П. Термічна обробка металів : навч. посіб. для студ. вищ. навч. закл. Запоріжжя : ЗДІА, 2003. 270 с.

10. Середа Б.П. Теорія будови рідкого, кристалічного та аморфного стану речовини : навч. посіб. для студ. вищ. навч. закл. Запоріжжя : ЗДІА, 2008. 238 с.

11. Середа Б.П. Металознавство і термічна обробка чорних і кольорових металів : навч. посіб. для студ. вищ. навч. закл. Запоріжжя : ЗДІА, 2008. 302 с.

12. Дубовский Б. А., Никифоров Б. А., Радионова Л. В. Иследование влияния технологических параметров горячей прокатки на структуру низкоуглеродистых и низколигированных марок стали. Производство проката. 2006. №10. С. 15-20.

13. Іващенко О. В. Методичні вказівки до виконання організаційно-економічної частини дипломного проекту. Запоріжжя : Вид. ЗДІА, 2004. 31 с.

14. Жидецкий В. Ц., Джигирей В. С., Мельников А. В. Основы охраны труда. учебник. изд. 2-е, дополненное. Львов : Афиша, 2000. 350 с.

15. Ткачук К. Н., Иванчук Д. Ф., Сабарно Р. В., Степанов А. Г. Справочник по охране труда на промышленном предприятии. Киев : Техника, 1991. 285 с.

16. Панасейко С. П. Гигиена труда и производственная санитария : учебное пособие для студентов ЗГИА. Запорожье : ЗГИА, 2003. 232 с.

17. Панасейко С. П. Методические указания для курсового и дипломного проектирования по дисциплине «Охрана труда» (раздел «Вентиляция и кондиционирование»). Запорожье : ЗГИА, 2002. 45 с.

18. Пеклов А. А., Степанова Т. А. Кондиционирование воздуха. Киев : Высшая шк., 1978. 328 с.

19. Рижков В. Г. Електробезпека. Методичні вказівки до дипломного та курсового проектування, контрольних робіт і практичних занять для студентів ЗДІА спеціальності „Металургія чорних металів" спеціалізації „Охорона праці та екологія металургійного виробництва" денної та заочної форм навчання / Укл.: В. Г. Рижков. Запоріжжя, 2004. 60 с.

20. Welo T., Abtahi S., Skauvik I. An Experimental and Numerical Investigation of the Thermo-Mechanical Conditions on the Bearing Surface of Extrusion Dies. *Proceeding of 6 International Extrusion Technology Siminar*. Chicago: Editors Express, 1996. Vol. 1. P. 101-106.

21. Hamzah H. Weld integrity on a die. Proceeding of the Seventh International Aluminium Extrusion Technology Seminar. Chicago: Editors Express, 2000. Vol. II. P. 273-275.

22. Muller K.B., Wegener J. Direct Extrusion of AA 6060 Through Dies With Coated Bearing Lengths. *Proc. of the Sixth International Aluminum Extrusion Seminar*. Chicago: Editors Express, 1996. Vol. 2. P. 147-153.

23. Devadas C., Celliers O. Metal Flow During the Extrusion Process. *Proc. of Fifth International Extrusion Technology Seminar*. Chicago: Editors Express, 1992. Vol. 1. P. 359-368.

24. Hardouin J-P. Bearing Length Calculation by Control of Metal Flow Pressure. *Proc. of Fifth International Extrusion Technology Siminar*. Chicago: Editors Express, 1992. Vol. 1. P. 291-303.

25. Sereda B., Belokon Y., Kruhliak I., Sereda D., Kruglyak D. The effects of grain size on mechanical properties of Ti-Al intermetallic alloy. *Математичне моделювання*. 2023. 1 (48). С. 88-96. https://doi.org/10.31319/2519-8106.1(48)2023.280148.

26. Belokon Y ., Zholobko B., Sahuliakin O., Kalashnik S. Analysis of the thermodynamic properties of special-purpose alloys for conditions of thermochemical pressing. *Математичне моделювання*. 2024. No 1 (50). С. 146-151. https://doi.org/10.31319/2519-8106.1(50)2024.305581.

27. Sheyko S., Belokon Y., Hrechanyi O., Vasilchenko T. Thermoplastic processing of structural metallic materials. Experiments, theory and modeling. Cham: Springer, 2024. 112 p. ISBN 978-3-031-73895-1. https://doi.org/10.1007/978-3-031-73896-8.

28. Belokon Y., Hrechanyi O., Vasilchenko T., Krugliak D. Thermochemical pressing of special purpose materials : monograph. Riga : Baltija Publishing, 2024. 156 p. ISBN 978-9934-26-508-2. https://doi.org/10.30525/978-9934-26-508-2.

29. Бєлоконь Ю. О., Чейлитко А. О., Ільїн С. В., Воденнікова О. С. Теоретичні засади термохімічного пресування матеріалів спеціального

призначення: монографія. Одеса : Гельветика, 2022. 148 с. ISBN 978-617-554-085-5.

30. Бєлоконь Ю. О., Кругляк Д. О., Калашник С. М., Сагулякін О. Є., Жолобко Б. О. Експериментальні дослідження процесів термохімічного пресування матеріалів спеціального призначення : монографія. Одеса : Гельветика, 2023. 154 с. ISBN 978-617-554-173-9.

31. Sereda B., Belokon Y., Krugliak D. Kinetics modeling in thermochemical pressing of powder intermetallic alloys. *Математичне моделювання*. 2022. 2(47). С. 90–97. https://doi.org/10.31319/2519-8106.2(47)2022.268399.

32. Belokon Y., Sereda D., Zholobko B., Sahuliakin O., Yavtushenko A. Modeling of local plastic deformation processes under extreme operating conditions. *Математичне моделювання*. 2024. No 2 (51). С. 169-176. https://doi.org/10.31319/2519-8106.2(51)2024.317635.

33. Бєлоконь Ю.О., Шапуров О.О., Гречаний О.М., Проценко В.М. Технології синтезу високоентропійних сплавів: сучасний стан і майбутні напрямки. *Металургія*. 2025. № 1(2025). С. 58-70. https://doi.org/10.26661/2071-3789-2025-1-06.

34. Belokon Y., Yavtushenko A., Protsenko V., Bondarenko Y., Cheilytko A. Mathematical modeling of physical properties of anisotropic materials. *METAL 2020 - 29th International Conference on Metallurgy and Materials.* (Brno, May 20 - 22, 2020). Brno, 2020. P. 440-445.

35. Бєлоконь Ю.О. Фізичні процеси при пластичній деформації : навч. посіб. Запоріжжя : ЗНУ, 2023. 179 с.

36. Середа Б. П., Бєлоконь Ю. О., Оніщенко А. М. Теорія обробки металів тиском : навч.-метод. посібник. Запоріжжя : ЗДІА, 2012. 129 с.

37. Обробка металів тиском при нестаціонарних температурних умовах : монографія / Б.П.Середа, І.В.Кругляк, О.А.Жеребцов, Ю.О.Бєлоконь. Запоріжжя : ЗДІА, 2009. 252 с. ISBN 978-966-8462-15-3.

38. Бєлоконь К. В., Куріс Ю. В., Манідіна Є. А. Інформаційні технології в охороні праці : навч.-метод. посіб. Запоріжжя : ЗДІА, 2018. 160 с.

39. Цифрова трансформація безпеки праці у виробництві: ергономіка, виробнича санітарія та вентиляція, електро- та пожежобезпека / К. В. Бєлоконь, Є. А. Манідіна, А. В. Вагін, В. Л. Ситий // Цифрова трансформація промислового менеджменту: теорія і практика : кол. монографія / за ред.: В. Г. Воронкової, Н. Г. Метеленко. Львів ; Торунь : Liha-Pres, 2023. С. 717-799.

40. Основи охорони праці : навч.-метод. посіб. для студентів ЗДІА всіх спец. ден. та заоч. форм навчання / К. В. Бєлоконь, В. Г. Рижков, Ю. В. Куріс, Є. А. Манідіна ; ЗДІА. Запоріжжя : ЗДІА, 2015. 180 с.

41. Манідіна Є. Забезпечення безпеки технологічних процесів та обладнання під час проєктування металургійних цехів. Формування сучасних концепцій менеджменту організацій та адміністрування в умовах цифровізації : матеріали міжнар. н.-практ. конф., присвяч. 25-річчю створення каф. менеджменту орг. та упр. проектами, 23-24 вересня 2021 року / ред.-упоряд. В. Г. Воронкова. Запоріжжя : Гельветика, 2021. С. 675-679.

42. Манідіна Є. А., Грідяєв В. В. Пожежна безпека : курс лекцій для здобувачів ступеня вищ. освіти бакалавра спец. 263 "Цив. безпека" освіт.-проф. програми "Охорона праці". Запоріжжя : ЗНУ, 2024. 313 с.