

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 магістерської роботи

рівень вищої освіти _____ магістерський _____
(другий (магістерський) рівень)

на тему Аналіз теоретичних моделей визначення напруження течії металу
при гарячій прокатці

Виконав: студент 2 курсу, групи 8.1361-омт

Павелко Д.В.

(ПІБ)

(підпис)

спеціальності

136 Металургія

(шифр і назва)

спеціалізація

(шифр і назва)

освітньо-професійна програма

обробка металів тиском

(шифр і назва)

Керівник Бєлоконь Ю.О.

(прізвище та ініціали)

(підпис)

Рецензент Явтушенко А.В.

(прізвище та ініціали)

(підпис)

Запоріжжя - 2022 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 другий магістерський 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 2022 року

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

Павелко Данило Віталійович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема проекту (роботи) Аналіз теоретичних моделей визначення напруження течії металу при гарячій прокатці

керівник роботи (проекту) Бєлоконь Юрій Олександрович д.т.н., доцент
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затвержені наказом вищого навчального закладу від “02” 06 2022 року № 597-с

2. Строк подання студентом роботи (проекта) 14.12.2022

3. Вихідні дані до роботи (проекта) Аналіз теоретичних моделей визначення напруження течії металу при гарячій прокатці

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) Реферат. Вступ. Аналітично-пошукова частина. Дослідницько-розрахункова частина. Визначення напруження течії металу за експериментальними даними., Охорона праці та техногенна безпека, Висновки. Перелік джерел посилання.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)
Креслення, презентаційний матеріал 14 слайдах (на 14 сторінках)

6. Консультанти розділів проекту (роботи)

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата
		завдання прийняв
<i>Розділ 1</i>	<i>Белоконь Ю.О. завідувач кафедри</i>	
<i>Розділ 2</i>	<i>Белоконь Ю.О. завідувач кафедри</i>	
<i>Розділ 3</i>	<i>Белоконь Ю.О. завідувач кафедри</i>	
<i>Розділ 4</i>	<i>Белоконь Ю.О. завідувач кафедри</i>	
<i>Нормоконтроль</i>	<i>Белоконь Ю.О. завідувач кафедри</i>	

7. Дата видачі завдання 03.09.2022

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломного проекту (роботи)	Строк виконання етапів проекту (роботи)	Примітка
1	<i>Вступ</i>	<i>01.10.- 02.10.2022</i>	
2	<i>Реферат</i>	<i>02-04.10.2022</i>	
3	<i>Розділ 1</i>	<i>15.10- 27.10.2022</i>	
4	<i>Розділ 2</i>	<i>02.11- 14.11.2022</i>	
4	<i>Розділ 3</i>	<i>15-28.11.2022</i>	
5	<i>Розділ 4</i>	<i>28-08.12.2022</i>	
6	<i>Висновки</i>	<i>08.12.2022</i>	

Студент _____ Д.В. Павелко _____
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник проекту (роботи) _____ Ю.О. Белоконь _____
(підпис) (прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до випускної кваліфікаційної магістерської роботи: 117 с., 37 рис., 13 табл., 25 літературних джерел.

НАПРУЖЕННЯ ТЕЧІЇ МЕТАЛУ, ГАРЯЧА ПРОКАТКА, СТУПІНЬ ДЕФОРМАЦІЇ, ЕНЕРГОСИЛОВІ ПАРАМЕТРИ, ШВИДКІСТЬ ДЕФОРМАЦІЇ, СИЛА ПРОКАТКИ, МОМЕНТ ПРОКАТКИ, ТЕМПЕРАТУРА ШТАБИ, МОДЕЛЬ, ВИТРАТИ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ.

Об'єкт розробки – напруження течії металу штаби при гарячій прокатці та теоретичні моделі його визначення.

Мета роботи – встановлення закономірностей зміни напруження течії металу від температури, швидкості і ступеня деформації під час прокатки та визначення найбільш раціональних моделей його теоретичного розрахунку.

Проведено аналіз недоліків діючій технології. Визначено, що в діючому технологічному процесі вичерпані можливості підвищення ефективності процесу гарячої прокатки штаб. Математично змодульовано залежність напруження течії металу при гарячій прокатці штаб від швидкісних та температурних режимів.

Показано, що оптимальна теоретична модель розрахунку напруження течії металу, яка би у більшій мірі була наближена до практичних даних, отриманих в результаті експерименту є моделі В.О. Ніколаєва та Л.В. Андреюка – Г.Г. Тюленева, і можуть бути використані для прогнозування середнього контактного тиску і зусилля прокатки при гарячій прокатці штаб.

Результати роботи можуть бути використані при гарячій прокатці штаб на стані „1680”. Застосування ефективних технологічних режимів дозволить зменшити потреби електроенергії та збільшити виробіток стану.

ЗМІСТ

ВСТУП	7
1 АНАЛІТИЧНО-ПОШУКОВА ЧАСТИНА.....	8
1.1 Стан проблеми	8
1.2 Літературний огляд	10
1.2.1 Характеристика методів визначення напруження течії металу при гарячому прокатуванні	10
1.2.2 Аналіз методів визначення величини напруження течії металу	17
1.2.3 Моделі з визначення напруження течії металу при гарячій прокатці	22
1.3 Результати аналізу та постановка задач дослідження	32
1.4 Висновки до розділу 1	34
2 ДОСЛІДНИЦЬКО-РОЗРАХУНКОВА ЧАСТИНА	35
2.1 План проведення теоретичних та експериментальних досліджень	35
2.2 Технологія та обладнання для виробництва гарячекатаних штаб в умовах ПАТ «Запоріжсталь»	38
2.3 Технологічний процес за способом CPS на ШСГП 2000	49
2.4 Методика експерименту та визначення параметрів процесу	54
2.4 Обробка та обговорення результатів	62
3 ВИЗНАЧЕННЯ НАПРУЖЕННЯ ТЕЧІЇ МЕТАЛУ ЗА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИМИ ДАНИМИ	82
3.1 Експериментальне визначення напруження течії металу.....	82
3.2 Визначення витрат електроенергії	95
4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ТЕХНОГЕННА БЕЗПЕКА.....	99
4.1 Аналіз потенційно небезпечних і шкідливих факторів виробничого середовища	99

4.2 Розробка мір захисту від впливу небезпечних і шкідливих виробничих факторів	103
4.3 Технічні рішення по виробничій санітарії	104
4.4 Електробезпека	106
4.5 Заходи щодо пожежної та техногенної безпеки	109
4.6 Інженерна розробка медичного захисту від небезпечних і шкідливих факторів виробничого середовища	110
ВИСНОВКИ	114
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ	115
ДОДАТОК А. Публікації за темою кваліфікаційної роботи	118

ВСТУП

Розвиток технології обробки металів тиском, впровадження і освоєння нового високопродуктивного обладнання, прокатних станів, цілих комплексів обробляючих агрегатів, безперервне розширення сортаменту сталей і сплавів, які піддаються гарячій пластичній обробці, потребують безперервного удосконалення і уточнення методів проектування технологічних процесів. Для вирішення цих питань необхідно вивчення механічних властивостей сталей і сплавів при різних температурно-швидкісних умовах деформації та розробка достовірних методів їх оцінки в конкретних технологічних процесах для забезпечення максимальної продуктивності обладнання та підвищення якості продукції.

Точність розрахунків залежить від достовірності визначення напруження течії метала. Напруження течії метала є основною складовою, яка чинить прямо пропорційний вплив на точність розрахунку енергосилових параметрів прокатки. У дослідженнях встановлено, що напруження течії метала при гарячій пластичній деформації залежить від температури, ступеня і швидкості деформації. Температура метала є найбільш сильним чинником, який визначає величину напруження течії σ_m . З підвищенням температури нагріву всі характеристики метала знижуються. Підвищення ступеня деформації приводить до збільшення напруження течії, і як наслідок - метал ще більше зміцнюється. Напруження течії суттєво зростає зі збільшенням швидкості деформації металу.

Тому розробка моделей визначення напруження течії металу в процесах гарячої прокатки є актуальною задачею в теорії прокатки і потребує детального вивчення цього питання.

Великий внесок у створення методів розрахунку напруження течії металу внесли: Зюзін В.І., Бровман М.Я., Діннік А.А., Андреюк А.В., Ніколаєв В.О. та ін.

1 АНАЛІТИЧНО-ПОШУКОВА ЧАСТИНА

1.1 Стан проблеми

Напруження течії металу є важливою фізичною величиною, що характеризує пластичну деформацію металів і сплавів. Напруження течії металу використовують в розрахунках енергосилових параметрів процесів обробки металів тиском, які необхідно проводити у разі розробки нових і вдосконаленні існуючих технологічних процесів, при використанні нових марок сталей і сплавів, при виборі і розрахунках устаткування та ін.

До теперішнього часу накопичений достатньо великий експериментальний матеріал по напруженню течії сталей при різних температурах, ступенях і швидкостях деформації з використанням різних установок і методик проведення випробувань, включаючи сучасні випробувальні машини типу кулачкових пластометрів.

Відомі експериментальні дослідження наступних авторів: А. Надаї, Л.Д. Соколова, О.О. Дінника, О.П. Чекмарьова, І.Я. Тарновського, С.І. Губкіна, В.І. Зюзіна, М.Я. Бровмана, Л.В. Андреюка і Г.Г. Тюленева, П.І. Полухіна, Г.Я. Гуна, В.О. Ніколаєва, іноземних авторів П.М. Кука, Сузукі та ін. Багато кривих течії металу при деформації приведено в науковій і довідковій літературах [1, 2].

Відзначимо роботи С.І. Губкіна, присвячені пластичній деформації металів. Автор запропонував ряд математичних моделей реологій для опису кривих течії металу при деформації, відповідно різним напрямкам реології: теорії течії, теорії старіння, теорії знеміцнення та ін.

Так, В.В. Вітман і М.А. Златін запропонували формулу, яка враховує вплив температури і швидкості деформації.

О.І. Целіков і В.А. Персіянцев запропонували рівняння для визначення напруження течії металу як результат одночасної дії двох процесів: зміцнення і знеміцнення при постійній швидкості деформації.

Надалі цей метод розвинув В.А. Персіянцев для випадку деформації металу із змінною швидкістю.

Л.Д. Соколовим запропоноване рівняння, що описує зміну опору деформації, що враховує, окрім відпочинку, додатково релаксацію напруження.

Я.С. Шварцбарт вивів рівняння для визначення напруження течії в ізотермічному процесі з використанням послідовної суперпозиції простих функцій зміцнення і знеміцнення (релаксації). Як відзначає Я.С. Шварцбарт «справедливість прийнятого принципу суперпозиції доводиться практично цілком задовільною збіжністю отриманої функції з відомими кривими течії».

Він ввів поняття про характеристичну величину деформації $\varepsilon = u / A$, відповідною максимуму кривою деформаційного знеміцнення.

У монографії, В.І. Тарновського, В.І. Еремєєва, С. Баакашвілі, викладені методи розрахунку опору деформації металу з використанням теорії повзучості.

М.А. Зайков приводить формули для розрахунку напруження течії від температури, ступеня і швидкості деформації, отримані із застосуванням основних положень теорії напруженого стану і термодинаміки необоротних процесів.

Із застосуванням термомеханічних параметрів отримані розрахункові формули напруження течії металу в роботах: В.І. Зюзіна, М.Я. Бровмана, Л.В. Андреюка і Г.Г. Тюленева, В.О. Ніколаєва.

Сучасні роботи направлені на отримання експериментальних кривих течії металу при великих пластичних деформаціях методом крутильної пластометрії. Запропоновані різні аналітичні залежності, що описують всі типи кривих високотемпературного деформаційного зміцнення.

Огляд і аналіз математичних моделей реологій приведений в роботах [1,2,6, 9, 10, 14, 18, 19 та ін.].

Великий об'єм довідкової інформації по напруженню течії різних металів і сплавів приведений в роботах П.Л. Клименко. У своїх роботах П.Л. Клименко при аналізі пластичного опору деформації введено поняття «відносне зміцнення». Безрозмірну криву зміни відносного зміцнення можна описати єдиним рівнянням. Використовуючи це рівняння легко перейти до побудови пластометричних кривих напруження течії у вигляді зміни абсолютних значень напруження.

Для випадку гарячої прокатки введено поняття «відносне напруження течії». Приведено аналітичні рівняння, які описують зміну відносного напруження течії уздовж осередку деформації. Використовуючи це рівняння можна отримати розподіл в осередку деформації напруження течії.

Таким чином напруження течії метала є основною складовою, яка чинить прямо пропорційний вплив на точність розрахунку енергосилових параметрів прокатки. Як видно з огляду стану проблеми, визначення напруження течії металу є складною задачею в теорії обробки металів тиском. Тому розробка моделей визначення напруження течії металу в процесах гарячої прокатки є актуальною задачею в теорії прокатки і потребує детального вивчення цього питання.

1.2 Літературний огляд

1.2.1 Характеристика методів визначення напруження течії металу при гарячому прокатуванні

Напруження течії металу – це напруження текучості металу в статичних умовах пластичної деформації [1].

Напруження текучості характеризує механічні властивості матеріалу штаби в перерізах безпосередньо перед входом і за виходом з осередку

деформації, а також в проміжках між клітями і в паузах між пропусками при прокатці відповідно на неперервних і реверсивних станах. Тому встановлення закономірностей зміни напруження течії металу штаби має важливе значення не тільки для теорії прокатки, але і для технології.

Теоретичне визначення напруження течії металу в даний час неможливе. Тому дані про величину даного параметра отримують тільки експериментальним шляхом. В більшості випадків про напруження течії металу судять за результатами випробування зразків на розтягування.

Напруження течії металу залежить від хімічного складу і параметрів структури, тобто від фізико-хімічних властивостей деформованого металу (сплаву), попереднього і часткового відносного обтиску, температури і дрібності деформації, а також від схеми напруженого стану, технологічного мастила і деяких інших менш істотних факторів. Але основний вплив на напруження течії металу надає хімічний склад (фізико-хімічні властивості) деформованого металу, сумарний відносний обтиск і температура деформації [1].

З хімічних елементів, що входять до складу вуглецевих сталей найбільший вплив на напруження течії металу надає вуглець. Із збільшенням вмісту вуглецю в сталі напруження течії збільшується. Введення легуючих елементів до складу сталі також сприяє збільшенню напруження течії металу. Аналогічний зв'язок між напруженням течії металу і легуючими елементами характерний і для сплавів інших металів.

Для загального виду кривій плинину сталей, наведеної на рис. 1.1 характерний ріст σ_T від границі текучості σ_0 до деякого пікового значення σ_p відповідного до пікової деформації ϵ_p , після чого σ_T плавно зменшується до значення відповідного до сталого напруження σ_y , при якому настає рівновага процесів зміцнення й динамічної рекристалізації. Слід зазначити, що на ділянці відповідному до напруг від σ_0 до σ_p швидкість зміцнення металу зменшується внаслідок превалювання процесу динамічного повернення над зміцненням. Динамічна рекристалізація починається при досягненні

деформації ε_x . Характер кривої плинності також відбиває зміна аустенітного зерна. На ділянці зміцнення до досягнення деформації значення ε_p відбувається здрібнювання зерен, збільшується щільність дислокацій субструктури, після чого інтенсивно розвивається процес динамічної рекристалізації й згідно з роботою [6] розмір зерна аустеніту при напруженні, що встановилася, залежить винятково від σ_y .

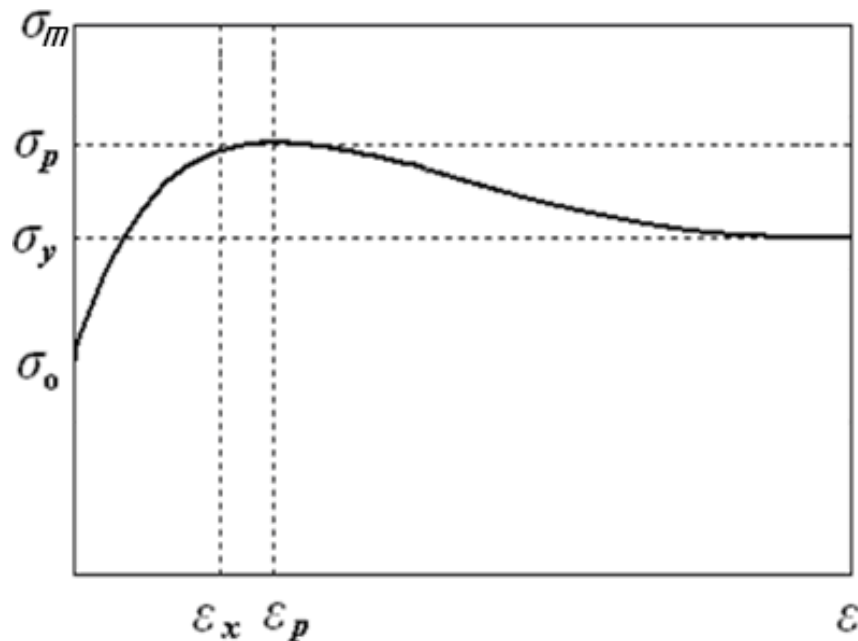


Рисунок 1.1 – Загальний вид кривої плинності сталі при наявності динамічної рекристалізації

Виходячи з передумов, зроблених в роботах [10, 11], з використанням принципу суперпозиції процесів зміцнення й знеміцнення, у роботі [11] отримано вираз для миттєвого опору деформації:

$$\sigma_{\phi} = \sigma_y + (\sigma_0 - \sigma_y + D \cdot \varepsilon) \exp(-\varepsilon/\varepsilon_x), \quad (1.1)$$

де D – параметр, що характеризує швидкість зміцнення металу.

Параметри σ_0 і D важко визначити при обробці експериментальних даних, тому що крива плинності в початковий момент сильно залежить від структури металу. З іншого боку, пластометри, що існують, не дозволяють

зафіксувати початкову стадію плинину металу. Аналіз експериментальних кривих плинину показує, що більш вираженими на кривій є максимальний опір деформації σ_p і логарифмічна деформація ε_p максимуму деформаційного зміцнення відповідно. Тому вираз (1.1) перетворили, виключивши з нього важко ідентифікуючі параметри. Остаточно одержали наступне вираження для σ_ϕ :

$$\sigma_\phi = \sigma_y + (\sigma_p - \sigma_y) \cdot \left(\frac{\varepsilon - \varepsilon_p}{\varepsilon_x} + 1 \right) \exp\left(\frac{\varepsilon_p - \varepsilon}{\varepsilon_x} \right), \quad (1.2)$$

Для розрахунків напруження течії металу по запропонованій моделі необхідно визначити термодинамічні залежності параметрів σ_y , σ_p , ε_p і ε_x з урахуванням хімічного складу сталі.

В результаті пластичної деформації відбувається зміцнення металу, тому із збільшенням часткового і сумарного відносного обтиску при прокатці напруження течії металу збільшується. Гаряча прокатка здійснюється при температурах, що перевищують температуру рекристалізації. З цієї причини металу в процесі гарячої прокатки не тільки зміцнюється, але і знеміцнюється. Проте, в цілому процес гарячої прокатки характеризується зміцненням металу на виході з осередку деформації.

Згідно теорії А. Надаї [13], приріст напруження течії для кожного металу (сплаву) виражається рівнянням:

$$d\sigma = \frac{\partial \sigma_m}{\partial T} dT + \frac{\partial \sigma_m}{\partial \varepsilon} d\varepsilon + \frac{\partial \sigma_m}{\partial u} du + \frac{\partial \sigma_m}{\partial \tau} d\tau, \quad (1.3)$$

де σ_m – напруження течії металу;

T – температура;

ε – відносна деформація;

τ – час деформації;

u – швидкість деформації.

Перші три додатки цього рівняння враховують вплив на напруження течії металу відповідно температури, відносного ступеня і швидкості деформації, останнє – закону розвитку деформації в часі.

Закономірності, необхідні для вирішення рівняння А. Надаї, ще недостатньо вивчені, тому практично величин напруження течії металу визначають, використовуючи результати відповідних експериментів.

Експериментальні дослідження за визначенням напруження течії металу можна розділити на дві групи:

а) Дослідження, засновані на вимірюванні сили, що діє на натискні гвинти стану при прокатці штаби з різними значеннями ступеню (ε), температури (T) і швидкості (u) деформації;

б) Дослідження, засновані на вимірюванні навантажень на випробувальних машинах спеціальної конструкції при розтягуванні або стискуванні зразків з різними значеннями параметрів ε , T і u . Поява кулачкових і торсіонних пластометрів розширило можливості для експериментального дослідження напруження течії металу і в значній мірі полегшило завдання моделювання впливу законів розвитку деформації в часі, стосовно конкретних процесів пластичної деформації.

Параметри ε , T і u мають різний кількісний вплив на напруження течії металу при гарячій і холодній прокатці. Кількісний вплив швидкості деформації на σ_m при гарячій деформації значно більше, чим при холодній. Про це свідчать експериментальні залежності $\sigma_m = f(u)$ (рис. 1.2) О.О. Дінника [8], отримані при осадці зразків із сталі Ст.3сп з температурою 600-1200°C. Приведені на цьому рисунку графіки $\sigma_m = f(u)$ побудовані при $\varepsilon = 30\%$. Для урахування впливу фактичного обтиску на σ_m користуються поправочним коефіцієнтом, значення якого визначаються за допомогою допоміжного графіка:

$$\sigma_m = k \cdot \sigma_{m30},$$

де σ_{m30} - напруження течії металу при обтиску, який дорівнює 30 %.

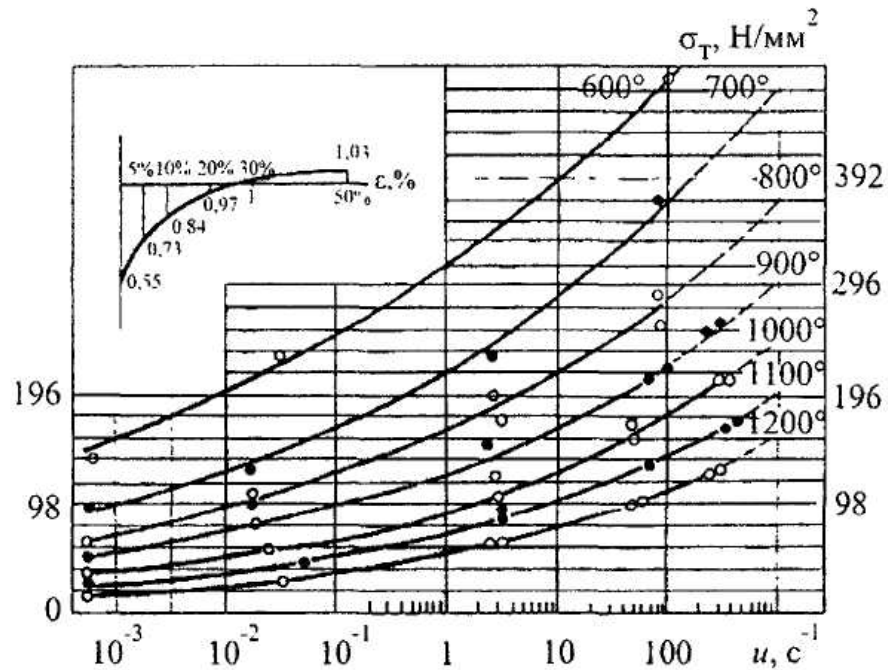


Рисунок 1.2 – Експериментальні залежності $\sigma_m = f(u)$ при гарячій деформації сталі Ст.3сп (дані О.О. Дінника)

На діючих станах гарячої прокатки швидкість деформації знаходиться в діапазоні від 0,5-10 с⁻¹ до 500-1000 с⁻¹. Як витікає з рис. 1.2, збільшення швидкості деформації до вказаних значень приводить до збільшення напруження течії металу в 2-4 рази.

Зупинимося також на експериментальних даних П.М. Кука [7], представлених у виді графіків в координатах $\sigma_m - \ln \frac{h_0}{h_1}$ (рис. 1.3). Ці дані були отримані на пластометрі в умовах, що забезпечують постійність швидкості деформації в міру зменшення висоти і збереження циліндричної форми осаджуваного зразка, тобто в умовах, близьких до лінійного напруженого стану.

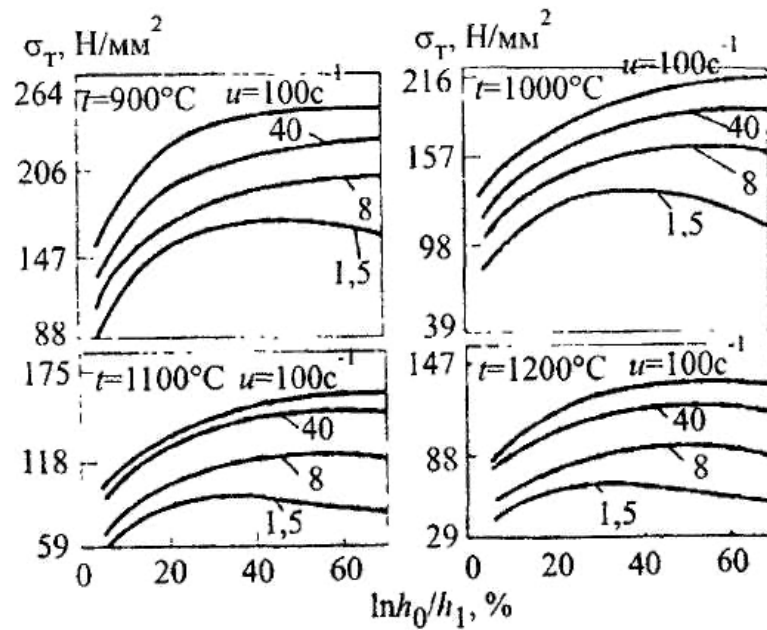


Рисунок 1.3 – Експериментальні залежності $\sigma_m = f\left(\ln \frac{h_0}{h_1}\right)$ при гарячій деформації низьковуглецевої сталі (0,15% С, 0,68% Мп) (дані П. М. Кука)

Графіки $\sigma_m = f\left(\ln \frac{h_0}{h_1}\right)$ (рис. 1.3) відображають кількісний вплив зміцнення металу на σ_m при $t = const$ і $u = const$. Наявність максимуму на цих кривих свідчить про те, що при подальшому збільшенні дійсного відносного обтиску превалюючий вплив на σ_m надає знеміцнення металу.

З представлених на рис. 1.3 графіків видно, що зменшення температури деформації вуглецевих сталей з 1200 до 900°C при $u = const$ і $\varepsilon = const$ приводить до збільшення напруження течії металу в 1,5-2,0 рази, а збільшення відносного обтиску з 5-10% до 30-40% при $t = const$ і $u = const$ викликає зростання σ_m на 40-60%.

Великий комплекс досліджень по встановленню закономірностей зміни σ_m при гарячій деформації виконаний В.І. Зюзіним [12, 15, 16]. Ним отримані кількісні дані про σ_m при гарячій деформації 44 марок сталей і 20 кольорових металів та сплавів. Результати цих досліджень опубліковані в літературі і будуть розглянуті докладніше в наступному розділі.

1.2.2 Аналіз методів визначення величини напруження течії металу

Існує декілька основних способів визначення напруження течії металу експериментальним шляхом - розтягіння, стиснення, кручення, метод базисного тиску [6].

Розтягіння. Зразок на розтягіння найчастіше виготовляють у вигляді тіла обертання з циліндровою робочою частиною. При проведенні випробувань, в робочій частині зразка напруження постійні і рівні незалежно від механічних властивостей матеріалу, з якого він виготовлений. При випробуваннях вимірюють середні значення напруження і деформацій — макроскопічні величини. При цьому нерівномірність деформації приблизно в три рази менша, ніж при стисненні. У дослідях на розтягіння не можна отримати ступінь деформації більш ніж 0,2-0,3. При великих ступенях деформації утворюється шийка, після чого напружений стан вже і неоднорідний і не є одноосним розтягінням. У шийці має місце об'ємний напружений стан. Напряга в шийці зростає при подальшому зростанні деформації, а в решті всього об'єму зразка — убуюють: відбувається розвантаження. Зразок розтягують до руйнування і визначають напруження, відповідну максимальній величині зусилля, тобто знаходять границю міцності, при цьому отримують криві, аналогічні показаним на рис. 1.4.

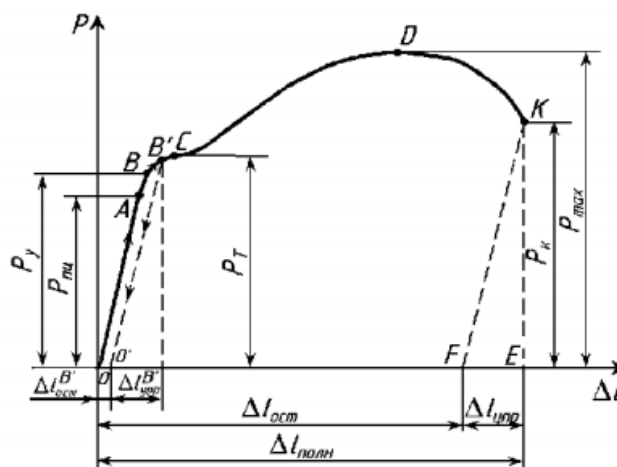


Рисунок 1.4 – Криві, що отримуються при випробуваннях на розтягіння

Стискування. Випробування на стиснення мають той же принцип, що і випробування на розтягіння, при цьому у даного методу є свої недоліки і переваги. Зразок для випробувань також виготовляється у вигляді циліндрів. Стиснення проводять на пресах, при цьому існує тертя між торцями зразка і робочою поверхнею інструменту. Тертя приводить до так званої бочкоподібності зразка і об'ємного напруженого стану, проте виключити вплив тертя при стискуванні дуже важко.

Величини, що отримуються за результатом експерименту, як правило, виявляються завищеними. Перевагою процесу випробування на стиснення є можливість застосування великих ступенів деформацій. При великих величинах деформації, вплив тертя на процес деформації зменшується. Щоб зменшити вплив тертя, застосовують різні мастила. При обробці експериментальних даних по напруженню течії металу, отриманих у разі випробування на стиснення, необхідно вводити поправочний коефіцієнт, визначений при порівнянні результатів випробування зразків однакових розмірів на розтягіння і стиснення; цей коефіцієнт враховує вплив тертя на контактних поверхнях. Вид кривої, що отримується при випробуваннях на стиснення показаний на рис. 1.5.

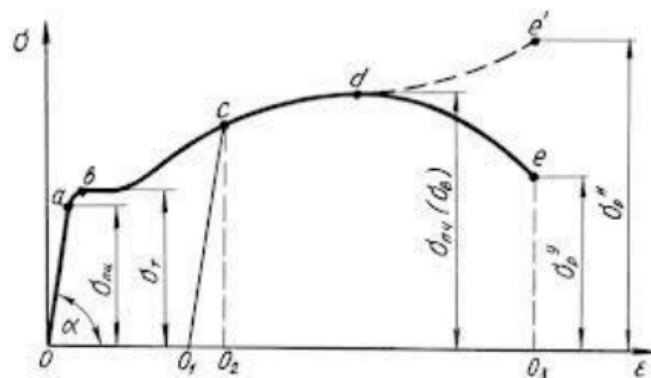


Рисунок 1.5 – Криві, що отримуються при випробуваннях на стиснення

Кручення. Окрім випробувань на стиснення і розтягіння, знаходять також застосування досліди на кручення циліндрових зразків [7]. На зразках є циліндрова робоча частина і два потовщені кінці, які служать для кріплення

зразка в захопленнях машини. До кінців зразка прикладають два однакових по величині крутних моменти, які викликають закручування зразка на деякий кут. Саме ці дві величини необхідно зміряти. У циліндровій частині зразка має місце напружений стан чистого зрушення. Проте напружений стан не є однорідним. Напруження в зразку змінюється по радіусу згідно лінійному закону. В центрі зразка напруження дорівнює нулю. Найбільше значення спостерігається на поверхні зразка. У роботі [11] наголошуються наступні переваги випробування на кручення: постійність швидкості деформації за кожен окремий акт навантаження, відсутність негативного впливу контактних сил тертя, досяжність високих ступенів деформації, близьких до вичерпання ресурсу пластичності досліджуваного матеріалу, відносна простота випробувальної установки.

Вид кривої, що отримується при випробуваннях на кручення, показаний на рис. 1.6.

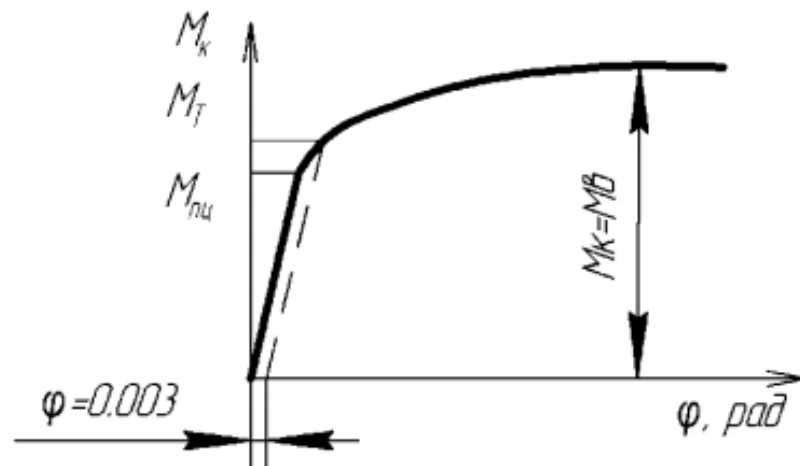


Рисунок 1.6 – Криві, що отримуються при випробуваннях на кручення

Базисний питомий тиск. Метод базисного питомого тиску був запропонований О.І. Целіковим. Суть цього методу полягає в тому, що за характеристику опору деформації прийнятий середній питомий тиск p_0 при прокатці еталонних зразків в еталонних умовах. За еталонні умови були прийняті умови двомірної деформації, що виключають вплив розширення і

що зводять до мінімуму вплив зовнішнього тертя і зовнішніх зон. Ці умови значною мірою дотримуються при прокатці зразків прямокутного перетину, коли $b \gg H$ і $l = H$ тому можна прийняти $\theta = 2k$. Середній питомий тиск, визначений при $b \gg H$, $l = H$ і малому значенні коефіцієнта тертя, назване базисним питомим тиском, характеризує опір деформації металу при пласкодеформуємому стані. Базисний питомий тиск рекомендується застосовувати замість величини 1,15 при підрахунку тиску металу на валки по теоретичних формулах.

Випробування на пластометрі. Для отримання даних по напруженню течії металу найбільш інформативним є метод осадка зразків на пластометрах [12], на яких можна забезпечувати великі ступені деформації в широкому діапазоні зміни температур і швидкостей деформації. З метою підвищення точності відтворення заданих режимів випробувань, розширення діапазону режимів і підвищення достовірності результатів випробувань на базі пластометрів створюється автоматизований пластометрический комплекс, до складу якого входять сучасні системи реєстрації і обробки отримуваних даних (наприклад, установка Gleeble). Застосування спеціально розроблених комп'ютерних програм для обробки експериментальних даних і побудови кривих течії металу значно підвищує надійність і достовірність результатів експериментів, забезпечує можливість їх зберігання в електронному вигляді і накопичення банку даних по механічних властивостях випробовуваних металів і сплавів. Підвищена точність випробувань досягається також завдяки підтримці швидкості на нижньому рівні з погрешністю не більше 3% при будь-якому навантаженні. Дані заходи дозволяють отримувати криві течії сталей і сплавів в широкому діапазоні зміни ступенів ε (5...80 %), швидкостей u (0,01...100 с^{-1}) і температур (20...1300°C) деформації при осадці зразків при зусиллях P в процесі деформації до 500 кН. Для випробувань на осадку використовуються циліндрові зразки, що мають відношення початкової висоти h_0 до діаметру d_0 в межах 1,15-1,35. Найбільш

часто вживаний діаметр зразків 12-15 мм. Висота зразків визначається геометрією (профілем) встановленого в даний момент кулачка.

Зразки, як правило, мають торцеві буртики заввишки 0,5-0,7 мм для утримання мастила. Перед посадкою зразка на нагрівання вони обертаються в заздалегідь розмочений листовий азбест і встановлюються в спеціальний циліндровий контейнер по центру осадних плит – бойків із спеціальних жароміцних сплавів (рис. 1.7).

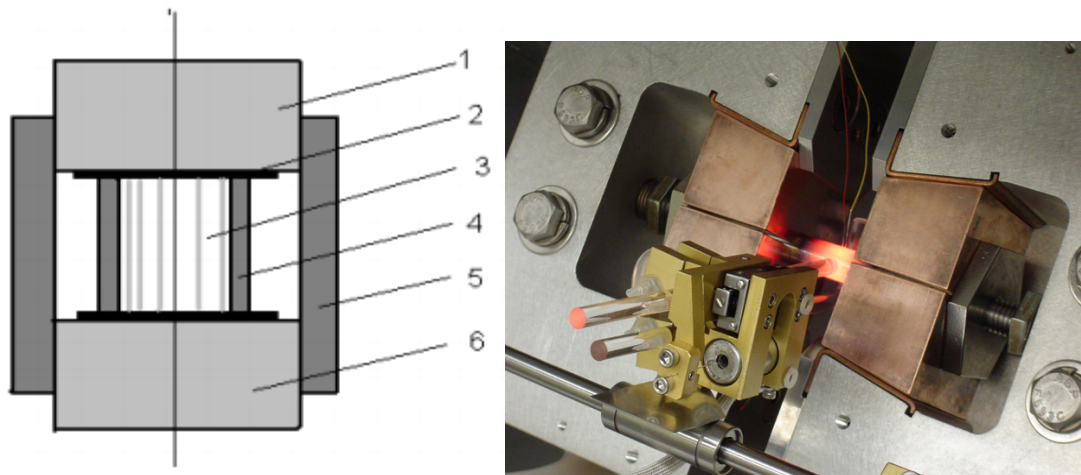


Рисунок 1.7 – Контейнер для осадки зразків на пластометрі [23]: 1 – верхній бойок, 2 – мастило, 3 – випробовуваний зразок, 4 – азбестова ізоляція, 5 – контейнер, 6 – нижній бойок.

Проаналізувавши приведені вище методи визначення величини напруження течії металу, можна зробити наступні висновки: методи розтягнення і стиснення дозволяють визначити напруження течії матеріалу за неізотермічних умов, при цьому точність визначення параметрів по графіках деформація-напруження невелика; метод кручення точніший у зв'язку з однорідністю напруженого стану, проте виготовлення зразків для даного виду випробувань ускладнено; метод базисного питомого тиску є оптимальним для випадку застосування результатів експериментів при розрахунках параметрів прокатки, оскільки за його еталонних умов число 47 факторів, що впливають на напруження течії металу, зводиться до мінімуму, і, отже, зменшується і загальна погрішність при визначенні середнього

значення напруження течії при прокатці. Недоліком методу є неможливість набуття дійсних значень напруження, що робить складним застосування отриманих даних в методі кінцевих елементів; випробування на пластометрі дозволяють отримувати дані в широкому діапазоні впливаючих параметрів з високим ступенем точності, проте перерахунок значень для різних напружених станів знижує точність результату.

Таким чином, з погляду ширини дослідження, раціональним методом є випробування на пластометрі. Крім того, при випробуваннях на даних установках (Gleeble і ін.), існує можливість точного регулювання і підтримки заданих параметрів (швидкості, ступеня, температури деформації) під час випробувань, тому даний метод набув найбільшого поширення при дослідженні різних властивостей металів.

1.2.3 Моделі з визначення напруження течії металу при гарячій прокатці

Використання експериментальних даних про σ_m представлених у виді графіків або таблиць, для обчислення напруження течії при гарячій прокатці незручно і призводить до зниження точності визначення шуканої величини. Для зручності використання наявних експериментальних даних про σ_m В.І. Зюзін запропонував метод термомеханічних коефіцієнтів [12]. Суть цього методу полягає в тому, що напруження текучості при гарячій прокатці представляють як добуток σ_0 і трьох незалежних коефіцієнтів. Математично σ_m по даному методу записується у виді:

$$\sigma_m = \sigma_0 k_t k_\varepsilon k_u, \quad (1.4)$$

де σ_0 - базове значення напруження текучості;
 k_t, k_ε, k_u - коефіцієнти, що враховують вплив температури, ступеня і швидкості деформації.

Як базовий σ_0 прийнято значення напруження течії матеріалу штаби при $\varepsilon = 0,1$; $u = 10 \text{ c}^{-1}$; $t = 1000^\circ\text{C}$.

Значення термомеханічних коефіцієнтів k_t, k_ε, k_u для кожного металу (сплаву) визначають по графіках. На рис. 1.8 представлені графіки $k_t = f(t)$, $k_\varepsilon = f(\varepsilon)$, $k_u = f(u)$ для сталі 45. Базове значення напруження течії даної сталі складає 86 Н/мм^2 .

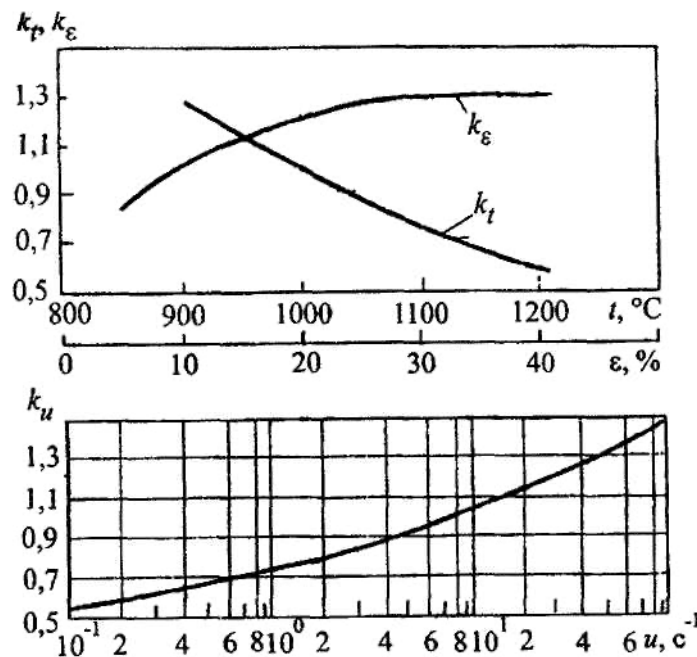


Рисунок 1.8 – Графічні залежності для визначення термомеханічних коефіцієнтів сталі 45 (дані В.І. Зюзіна)

У роботі [12] приведені базові значення напруження текучості σ_0 деяких сталей, а також досліджені В.І. Зюзіним діапазони зміни параметрів ε , t і u , що визначають область застосування моделі (2.1)

Застосування моделі (1.4) спрощує і прискорює процедуру визначення напруження течії за наявними експериментальними даними. Проте вона не виключає необхідності використання графічних залежностей для знаходження значень коефіцієнтів k_t, k_ε, k_u .

Аналіз експериментальних залежностей $k_t = f(t)$, $k_\varepsilon = f(\varepsilon)$, $k_u = f(u)$ В. І. Зюзіна, виконаний П. Л. Кліменко [5], показав, що вони з прийнятною для інженерної практики точністю апроксимуються рівняннями:

при $\varepsilon < 0,15$

$$k_\varepsilon = 4,7\sqrt{\varepsilon} - 4,5\varepsilon; \quad (1.5)$$

при $\varepsilon > 0,15$

$$k_\varepsilon = 0,82(1 + \sqrt{\varepsilon}); \quad (1.6)$$

при $u = 1-100 \text{ c}^{-1}$

$$k_u = 0,8 + 0,065\sqrt{u}; \quad (1.7)$$

при $u > 100 \text{ c}^{-1}$

$$k_u = 0,8 + 0,085\sqrt{u}; \quad (1.8)$$

при $t = 900-1200 \text{ }^\circ\text{C}$

$$k_t = 0,60 + 0,0045(1200 - t)\sqrt{\frac{1200 - t}{t}}; \quad (1.9)$$

Сукупність рівнянь (1.4) - (1.9) є математичною моделлю напруження течії при гарячій деформації сталей, досліджених В.І. Зюзіним.

По рівняннях (1.4) - (1.9) може бути підрахована величина напруження течії при гарячій прокатці в будь-якому перерізі або в будь-якій точці осередку деформації, якщо в кожному з них підставити значення параметрів ε , t , u відповідні даному перерізу або даній точці.

В результаті зміцнення і впливу швидкості деформації при прокатці опір деформації металу в осередку швидко зростає. Після виходу штаби з валків напруження течії металу σ_m , прокатаного в гарячому стані, швидко зменшується в результаті знеміцнення. При тривалому процесі релаксації напруження течії зменшується до величини σ_{m_0} , тобто до величини практично дорівнюючій межі текучості при даній температурі в умовах статистичних випробувань. Сказане підтверджується приведеним на рис. 1.9 графіком зміни опору деформації σ_ϕ і межі текучості σ_m матеріалу штаб в між

клітьовому проміжку двох суміжних клітей неперервного стану гарячої прокатки. З рис. 1.9 видно, що величина межі текучості на вході у осередок деформації другої кліті залежить від температури штаби і опору деформації на виході з осередку деформації першої кліті, а також від тривалості транспортування (релаксації) металу між клітьями.

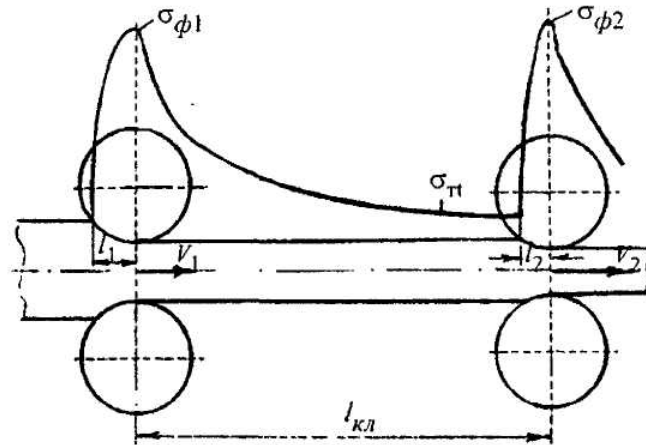


Рисунок 1.9 - Графік зміни опору деформації і напруження течії металу штаби при гарячій прокатці в двох суміжних клітях неперервного стану

Про вплив тривалості релаксації на напруження течії матеріала штаби при гарячій прокатці можна судити по графіку $\sigma_m = f(\tau)$ (рис. 1.10) для сталі Ст.3сп, побудованому за даними О.О. Дінника [8, 9].

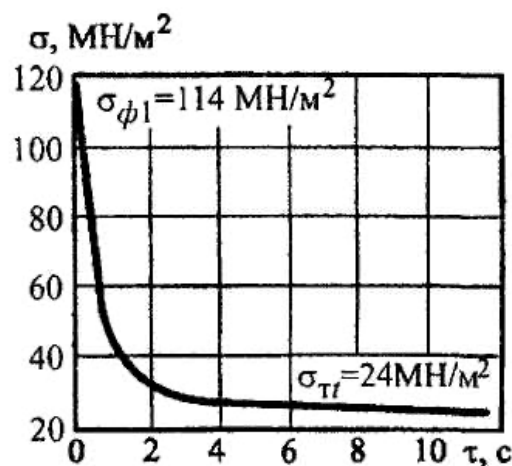


Рисунок 1.10 – Зміна напруження течії сталі Ст.3сп при $t = 1000^\circ\text{C}$ в процесі релаксації: $\sigma_{\phi 1}$ - значення опору деформації на виході з осередку деформації; σ_{mt} - значення напруження течії при $t = 1000^\circ\text{C}$

З цього графіка видно, що найбільш інтенсивне зменшення сталі Ст.3сп відбувається в перше 0,5-1,5 с після пластичної деформації, а приблизно через 3-4 с спостерігається практично повне зменшення металу. Коли прокатка здійснюється на великій швидкості, тривалість транспортування металу між клітками обчислюється десятими і сотими долями секунди. У цих випадках метал зменщується не повністю і входить у осередок деформації наступної клітки з вищим напруженням течії, що приводить до збільшення опору деформації матеріалу штаби при прокатці в даній клітці. Відмічена особливість формування σ_m і σ_ϕ матеріалу штаби повинна враховуватися при визначенні опору деформації на високошвидкісних станах.

Для розрахунку середнього значення опору деформації $\sigma_{\phi_{ср}}$ при прокатці необхідно знати середнє значення напруження текучості $\sigma_{тср}$ матеріалу штаби в осередку. Значення $\sigma_{тср}$ знаходимо методом термомеханічних коефіцієнтів. По аналогії з (1.4) математична модель $\sigma_{тср}$ при гарячій прокатці записується у виді:

$$\sigma_{тср} = \sigma_0 k_{\epsilon_{ср}} k_{v_{ср}} k_{t_{ср}} \quad (1.10)$$

$k_{\epsilon_{ср}}, k_{v_{ср}}, k_{t_{ср}}$ - коефіцієнти, що враховують вплив середнього ступеня, швидкості і температури деформації при гарячій прокатці на напруження текучості.

Середнє значення відносного обтиску по довжині осередку деформації може бути визначене з умови:

$$\epsilon_{ср} = \frac{1}{l} \int_0^l \frac{h_0 - h_x}{h_0} dx, \quad (1.11)$$

$$h_x = h_1 + \frac{\Delta h}{l^2} x^2. \quad (1.12)$$

Після сумісного рішення (1.11) і (1.12) отримуємо:

$$\varepsilon_{cp} = \frac{\Delta h}{lh_0} \int_0^l \left(1 - \frac{x^2}{l^2}\right) dx = \frac{2}{3} \frac{\Delta h}{h_0} = \frac{2}{3} \varepsilon. \quad (1.13)$$

Середня температура штаби в осередку деформації дорівнює:

$$t_{cp} = \frac{1}{3}(t_{0n} + 2t_{1n}), \quad (1.14)$$

де t_{0n}, t_{1n} - температура штаби на вході і виході з осередку деформації.

Для знаходження значень коефіцієнтів $k_{exp}, k_{ucp}, k_{tcp}$ застосовують рівняння (1.5) - (1.9), підставляючи в них замість ε, u і t відповідно k_{exp}, k_{ucp} і k_{tcp} . Далі, знаючи $k_{exp}, k_{ucp}, k_{tcp}$ і σ_0 по моделі (1.10), обчислюємо значення σ_{mcp} .

Відомі також інші, компактніші моделі σ_m . До них належать моделі:

В.І. Зюзіна [12]:

$$\sigma_p = \sigma_0 \cdot A_1 \cdot A_2 \cdot A_3 \cdot \varepsilon^{m_1} \cdot u^{m_2} \cdot \exp(m_3 T) \quad (1.15)$$

де $A_1, A_2, A_3, m_1, m_2, m_3$ - постійні коефіцієнти, які визначаються індивідуально для кожної сталі;

Е. Зібеля і А. Помпа [2]:

$$\sigma = \sigma_0 + b \cdot u^m \quad (1.16)$$

де σ_0 – границя текучості при статичній деформації, кг/мм²;

b і m – постійні коефіцієнти, які залежать від природи матеріалу.

А.Надаі [13]:

$$\sigma = \sigma_0 + m \cdot \ln \frac{u}{u_0} \quad (1.17)$$

де m – постійний коефіцієнт, який залежить від матеріалу.

О.І. Целікова і В.А. Персіянцева [2]:

$$\sigma = \sigma_0 + D \frac{A}{u} \left(1 - e^{-\frac{A \cdot \varepsilon}{u}} \right), \quad (1.18)$$

де D – модуль зміцнення, кг/мм²;

A – коефіцієнт пропорційності, що представляє собою швидкість релаксації, с⁻¹;

σ_0 – границя текучості при статичній деформації, кг/мм²;

u – середня швидкість деформації, с⁻¹.

Л.В. Андреюка, Г.Г. Тюленева [17]:

$$\sigma = s \sigma_0 \cdot (10\varepsilon)^a u^b \left(\frac{t}{1000} \right)^{-c}, \quad (1.19)$$

де σ_0 - базове значення напруження текучості матеріалу штаби, відповідне $\varepsilon = 0,1$; $u = 1$ с⁻¹; $t = 1000^\circ\text{C}$; s, a, b, c - постійні коефіцієнти, визначені індивідуально для кожної сталі.

Моделі типу (1.15)-(1.18) були запропоновані тільки для восьми, переважно складно легованих сталей. У зв'язку з цим, вони мають локальну практичну цінність.

Практичний інтерес представляють моделі Л.В. Андреюка – Г.Г. Тюленєва (1.19). Такі моделі були розроблені для 66 марок вуглецевих і

легованих сталей, зокрема сталей спеціального призначення. Модель (1.19) працездатна в діапазоні температур 800-1300°C.

Діапазон дії залежності (1.19) становить: $t = 800-1300$ °C, $\varepsilon = 5-55\%$, $u = 0,01-150$ с⁻¹, експериментальні дані отримані для широкого діапазону марок сталей і сплавів. За даними авторів формули (1.19), можлива помилка визначення значення напруження течії металу з використанням цієї формули складає 4%. Враховуючи це, при розробці вдосконаленої моделі процесу гарячої прокатки в основу визначення напруження течії металу може бути взята формула Л.В. Андреюк - Г.Г. Тюленєва. Істотний недолік моделі Л.В. Андреюк - Г.Г. Тюленєва полягає в тому, що при випробуваннях більшості марок сталей хімічний склад і відсоток вмісту легуючих елементів були регламентовані стандартами 60х - 80х років ХХ століття (ГОСТ 380-60, ГОСТ 1050-88) по верхній межі. В умовах сучасного виробництва, з метою економії, вітчизняні металурги прагнуть мінімізувати процентний вміст легуючих елементів, крім цього відсутні довідкові дані для зарубіжних стандартів (EN10025-93, EN 10130-98, ASTM A366/A366M-91). Таким чином, уточнення значення напруження течії сталей в процесі гарячої прокатки, з урахуванням фактичного їх хімічного складу - ще один резерв підвищення точності енергосилового розрахунку широкоштабових станів.

Для визначення напруження течії металу при гарячій прокатці використовують формулу В.О. Ніколаєва [3, 4]:

$$\sigma_T = \sigma_{T0} \cdot k_t \cdot k_\varepsilon \cdot k_u, \quad (1.20)$$

де σ_{T0} – базове напруження течії, визначене при фіксованих (базових) значеннях температури (t), відносного обтиснення (ε) і швидкості деформації (u):

$$\varepsilon = \Delta h / H; \quad u = v \cdot \varepsilon / l_d,$$

k_t, k_ε, k_u - коефіцієнти, що враховують вплив температури, відносного обтиску та швидкість деформації.

Математична модель розрахунку базового напруження течії для різних марок сталей має вигляд:

для $N_1 \leq 5$ (вуглецеві, конструкційні, інструментальні, низьколеговані сталі)

$$\sigma_{T\delta} = 80 + 25 \cdot \left\{ 1 - \left[\frac{5 - N_1}{4,5} \right]^{1,8} \right\}; \quad (1.21)$$

для $N_2 > 5$ (леговані, високолеговані сталі)

$$\sigma_{T\delta} = 110 + 38 \cdot \left(\frac{N_2 - 2}{32} \right)^{0,25 \times N_2} \quad (1.22)$$

де N_1 і N_2 - сума хімічних елементів у цій сталі, % (крім заліза, сірки і фосфору).

Таблиця 1.1 – Групи сталей для розрахунку напруження течії металу

Група сталі	Метал
I	Вуглецеві та інструментальні сталі 08кп; 08Ю; 20; Ст.3; 45; Ст.6; У8 та ін.
II	Леговані та низьколеговані сталі 40Х; ШХ15; 15ХСНД; 14ГН; 12ХНЗА
III	20ХНМ; 60ХНГС2М; 35ХНГ2М; 30ХГСА; 18Х2Н4МВА; ХВГ; 60С2
IV	10ХН; 12Х17
V	20Х5НГ2; 15Х5М; 12ХНМФА; 20ХГНМ
VI	18ХГТ; 20ХГНР; 45ХН
VII	4Х13; X16Н5М4; X17Н2; X18Н9Т; X18Н12М2Т; P18

Формула поправочного коефіцієнту k_t в залежності від температури має вид:

$$k_t = 1,66 - 1,1 \cdot \left(\frac{t}{400} - 2 \right)^{0,7}, \quad (1.23)$$

де t – температура металу, $^{\circ}\text{C}$.

Розрахунок коефіцієнтів k_{ε} , k_u виконується по формулах наведених у таблицях 1.2, 1.3

Таблиця 1.2. – Формули для розрахунку коефіцієнта k_{ε}

Група сталі	ε	Вид залежності
I, II	0,025...0,1	$k_{\varepsilon} = 0,8 + 0,2 \cdot [1 - 178 \cdot (0,1 - \varepsilon)^2]$
I, II	>0,1	$k_{\varepsilon} = 1 + 0,43 \cdot [1 - 6,3 \cdot (0,5 - \varepsilon)^2]$
IV	0,025...0,1	$k_{\varepsilon} = 0,7 + 0,3 \cdot [1 - 50 \cdot (0,1 - \varepsilon)^2]$
IV	>0,1	$k_{\varepsilon} = 1 + 0,68 \cdot [1 - 6,6 \cdot (0,5 - \varepsilon)^2]$
III, VI, VII	0,025...0,1	$k_{\varepsilon} = 0,7 + 0,3 \cdot [1 - 50 \cdot (0,1 - \varepsilon)^2]$
III, VI, VII	>0,1	$k_{\varepsilon} = 1 + 0,38 \cdot [1 - 6,3 \cdot (0,5 - \varepsilon)^2]$
V	0,025...0,1	$k_{\varepsilon} = 0,7 + 0,3 \cdot [1 - 50 \cdot (0,1 - \varepsilon)^2]$
V	>0,1	$k_{\varepsilon} = 1,0 + 0,5 \cdot [1 - 9 \cdot (0,5 - \varepsilon)^2]$

Таблиця 1.3. – Формули для розрахунку поправочного коефіцієнта k_u

Границі змінення u, c^{-1}	Формула для k_u	Група сталі
0,4...10	$k_u = 0,38 + 0,065 \cdot (7 + \ell nu)$	I, II
0,001...0,4	$k_u = 0,22 + 0,072 \cdot (7 + \ell nu)$	
0,001...10	$k_u = 0,38 + 0,065 \cdot (7 + \ell nu)$	III – VII
≥ 10	$k_u = 1,03 + 0,1 \cdot ((\ell nu) - 2,3)^{1,5}$ $k_u = 1,03 + 0,11 \cdot ((\ell nu) - 2,3)^{1,05}$ $k_u = 1,03 + 0,13 \cdot ((\ell nu) - 2,3)^{2,2}$	I, II III – V, VII VI

В роботі [20] на базі теорії планованого експерименту виконаний науково-обґрунтований аналіз точності відомих методів розрахунку напруження течії металу. Авторами розробка комп'ютерної програми, яка дозволила виконати оцінку точності методів Ніколаєва В.О. і Андреюка Л.В.-Тюленєва Г.Г. для 27 конструкційних, інструментальних і нержавіючих сталей, експериментальна інформація для яких надана в роботі [11]. Середня відносна похибка за методом Ніколаєва В.О. дорівнює 14,5%, за методом Андреюка Л.В. – Тюленєва Г.Г. - 21,2%.

1.3 Результати аналізу та постановка задач дослідження

В літературному огляді розглянуті відомі методики розрахунку напруження течії металу при прокатці на неперервному широкоштабовому стані гарячої прокатки. Встановлено, що для розрахунку напруження течії найбільш доцільно використовувати методику термомеханічних коефіцієнтів.

Розрахунок визначення напруження течії металу σ_m , залежно від різних значень температури, ступеня і швидкості деформації.

Для експериментального визначення напруження течії металу найбільш раціональним методом є випробування на пластометрі. Випробування на даних установках (Gleeble та ін.) дає можливість точного регулювання і підтримки заданих параметрів деформації (швидкості, ступеня, температури деформації) під час випробувань, тому даний метод набув найбільшого поширення при дослідженні різних властивостей металів.

Для теоретичного визначення напруження течії металу під час прокатки практичний інтерес представляють моделі Л.В. Андреюка – Г.Г. Тюленєва і модель В.О. Ніколаєва. Такі моделі були розроблені для багатьох марок вуглецевих і легованих сталей, зокрема сталей спеціального призначення. Моделі працездатні в широкому діапазоні температур гарячої прокатки від 800 до 1300°C.

Дослідження порівняння в науковій літературі методів Ніколаєва В.О. і Андреюка Л.В. – Тюленєва Г.Г. для 27 конструкційних, інструментальних і нержавіючих сталей показало, що середня відносна похибка за методом Ніколаєва В.О. дорівнює 14,5%, за методом Андреюка Л.В. – Тюленєва Г.Г. складає відповідно 21,2%. Таким чином, оптимальна теоретична модель розрахунку напруження течії металу, яка би у більшій мірі була наближена до практичних даних, отриманих в результаті експерименту є модель В.О. Ніколаєва, і може бути використана для прогнозування середнього контактного тиску і зусилля прокатки при гарячій прокатці штаб.

Мета роботи – встановлення закономірностей зміни напруження течії металу від температури, швидкості і ступеня деформації під час прокатки та визначення найбільш раціональних моделей його теоретичного розрахунку.

Для вирішення поставленої мети необхідно було вирішити наступні наукові та практичні задачі:

- проаналізувати найбільш впливові фактори на змінення напруження течії металу під час прокатки;

– використовуючи експериментальні данні про змін напруження течії металу перевірити отриману модель на точність розрахунку та порівняти з існуючими моделями визначення.

1.4 Висновки до розділу 1

В аналітично-пошуковій частині роботи розглянуті відомі методики розрахунку напруження течії металу при прокатці на неперервному широкоштабовому стані гарячої прокатки. Встановлено, що для розрахунку напруження течії металу при прокатці доцільно використовувати методику термомеханічних коефіцієнтів.

Оптимальна теоретична модель розрахунку напруження течії металу, яка би у більшій мірі була наближена до практичних даних, отриманих в результаті експерименту є моделі В.О. Ніколаєва, Л.В. Андреюка – Г.Г. Тюленєва і В.І. Зюзіна, і можуть бути використані для прогнозування середнього контактного тиску і зусилля прокатки при гарячій прокатці штаб.

2 ДОСЛІДНИЦЬКО-РОЗРАХУНКОВА ЧАСТИНА

2.1 План проведення теоретичних та експериментальних досліджень

Незважаючи на величезну різноманітність теоретичних та експериментальних досліджень, можна скласти загальний план їх підготовки та проведення, які містять у собі такі основні взаємопов'язані етапи:

1) *літературний огляд*, патентний пошук, інтернет-пошук;

В аналітично-пошуковій частині роботи розглянуті відомі методики розрахунку напруження течії металу при прокатці на неперервному широкоштабовому стані гарячої прокатки. Встановлено, що для розрахунку напруження течії металу при прокатці доцільно використовувати методику термомеханічних коефіцієнтів.

2) *визначення мети та завдань експерименту*;

Мета магістерської роботи – оцінка точності методів розрахунку напруження течії металу під час гарячої прокатки штаб з використанням теоретичних та експериментальних моделей В.І. Зюзіна, Л.В. Андреюка – Г.Г. Тюленєва та В.О. Ніколаєва.

Для виконання поставленої мети роботи необхідно вирішити наступні завдання:

а) перевірка передбачення напруження течії металу під час гарячої прокатки в теорії прокатки;

б) перевірка правильності розрахунку напруження течії металу, що характеризує параметр обладнання чи процесу, який відбувається в ньому;

с) дослідження взаємозв'язку температури, швидкості та ступеня деформації та їх вплив на показники напруження течії металу;

д) перевірка точності розрахунку середнього контактного тиску з експериментальними даними отримані М.М. Саф'яном.

3) **вибір об'єкта дослідження**, при якому зумовлюються не тільки вид досліджуваного об'єкта, але й те, в якому вигляді – натуральному чи модельованому – мають подаватися в експерименті його параметри, які з них будуть вхідними, а які – вихідними, які змінюються в процесі експерименту, а які будуть сталими. Ретельність підготовки зразкового або робочого засобів вимірювань;

Об'єкт дослідження – неперервний широкоштабовий стан гарячої прокатки 1680 та методики визначення напруження течії металу.

4) **теоретична підготовка експерименту**. У процесі проведення експериментальних досліджень, щоб перевірити передбачення теорії, необхідно проаналізувати її та виявити “критичні” точки, в яких вона найбільш різко розбігається з існуючими поглядами на явища та процеси, межі досліджень.

Якщо перевіряється правильність розрахунку, то визначаються теоретично можливі способи безпосереднього вимірювання штучної величини з максимальною точністю, або той факт, чи можна її обчислити через інші вимірювані величини (наприклад через середній контактний тиск p_{cp}). При цьому необхідно пам'ятати, що непряме знаходження величини пов'язане з більшою похибкою, ніж пряме її вимірювання, а також про те, що окремі математичні залежності справджуються тільки за певних умов, яких слід суворо дотримуватись в ході експерименту.

При дослідженні взаємозв'язків, змінних на цьому етапі, теоретично встановлюються найпростіші й однозначні залежності, які можна перевірити в процесі експерименту з мінімальними затратами часу і з допомогою мінімальної кількості апаратури, особливо нестандартної.

На цьому етапі з'ясовують, що і яким способом треба вимірювати, якими мають бути чутливість і точність вимірювальних приладів та обладнання, перевіряють можливість використання серійних приладів;

5) **приладне оснащення експерименту**. Цей етап включає в себе проектування або вибір вимірювальної апаратури, в тому числі зразка для

експерименту, спеціальних дослідницьких стендів, вибір конкретних вимірювальних приладів (в разі їх відсутності – проектування спеціальних приладів), розрахунок схем увімкнення, забезпечення обліку зовнішнього впливу на апаратуру і вимірювальний об'єкт (зразок) тощо;

б) виготовлення, монтаж, і **налагодження вимірювальної апаратури**, встановлення, перевірки. Математична теорія планування експериментів базується на використанні положень математичної статистики та кібернетики. Вона застосовується для систем будь-якої складності;

7) **проведення експерименту** за відповідним алгоритмом і методиками, розробленими (спланованими) раніше. Метод визначення величини σ залежно від довільних значень ступеня деформації ϵ , швидкості деформації U і температури T на основі експериментальних кривих зміцнення. Визначаємо напруження течії металу та середній контактний тиск при гарячій прокатці штаби 3,0x1100 мм зі сталі Ст.3кп.

2.2 Технологія та обладнання для виробництва гарячекатаних штаб в умовах ПАТ «Запоріжсталь»

В Україні є два металургійних комбінати, на яких організовано виробництво гарячекатаних штаб: металургійний комбінат ПАТ «Запоріжсталь» (м. Запоріжжя) і металургійний комбінат в м. Маріуполі. На ПАТ «Запоріжсталь» встановлені неперервний широкоштабовий стан гарячої прокатки 1680.

В даний час на НШСГП 1680 прокатують штаби одинарні масою до 8 тонн і подвійні до 16 тонн. Основна маса металу прокатується транзитом. Приблизно 7-10 % металу прокатується після нагріву в методичних печах. Сляби подвійної маси прокатуються лише транзитом.

НШСГ1680 складається з двох груп клітей - чорнової і чистової, проміжного Perezмотуючого пристрою та групи змотувачів (рис. 2.1).

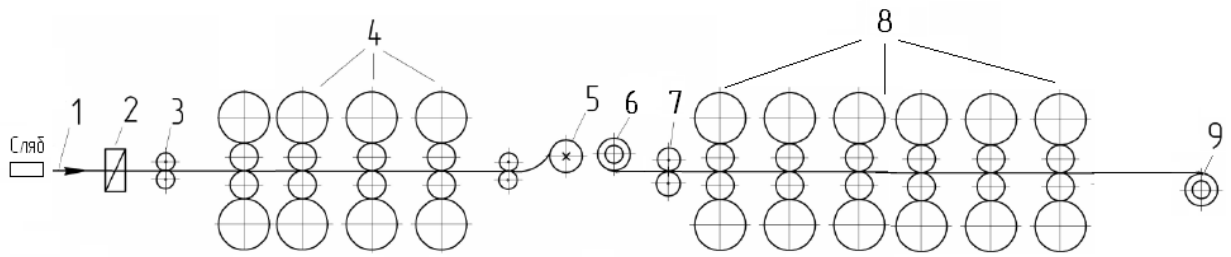


Рисунок 2.1 – Схема НШСГП 1680: 1 – сляб; 2 – ножиці; 3 – чорновий окалино ломач; 4 – чорнова група клітей; 5 – койлбокс; 6 – проміжний розкат; 8 – чистовий окалиноломач; 8 – чистова група клітей; 9 – змотувачі

Сляби зі складу електромостовим краном подаються до нагрівальних печей через прийомні столи верхнього пічного рольганга. Сляби, нагріваються до необхідної температури й видаються з методичної печі в стан. При використанні технології транзитної прокатки - сляби по транспортному рольгангу відразу без підігріву в методичних печах надходять до стана. Сляби після видачі з печей поступають до чорнового окалиноломача. Після обтиснення сляба в чорновому окалиноломачі на 20 - 25 мм окалина зі сляба змивається гідрозбивом. Високий тиск води досягається роботою трьох насосів, так як окалина повинна бути повністю прибрана з поверхні, як слябів, так і розкатів.

Наявність окалини перевіряють на поверхні гарячекатаних штаб шляхом відрізання на всю ширину штаби проби довжиною 300- 350 мм. Проба відрізається на відстані не менш 4 м від заднього кінця рулону, проби відбирають на ножицях, які встановлені біля змотувачів 4-6.

Після збивання окалини сляб поступає до чорнової групи клітей. До складу чорнової групи входять: одна двохвалкова кліть чорновий окалиноломач, чотири 4-хвалкових «кварто» і три вертикальні кліті (табл.2.1).

Таблиця 2.1 - Коротка характеристика вертикальних клітей

№ Кліті	D _в , мм	Потужність мотору приводу, кВт	Тип двигуна	Швидкість обертання вала двигуна, об/хв.	ε, %	Передаточне число редуктора	n, об/хв	v, м/с
1	Від 760 до 810	200	МП-6-275	Від 400 до 800	1,5	37,5	Від 10,7 до 21,4	0,42-0,90
2	Від 760 до 810	200	МП-6-275	Від 400 до 800	1	24,3	Від 16,5 до 33	0,66-1,40
3	Від 570 до 610	200	МП-6-275	Від 400 до 800	Від 0,5 до 0,75	15,3	Від 26,1 до 52,3	0,78-1,67

Обтиск проводиться до товщини 18-25 мм, залежно від кінцевої товщини. Обтиск крайок розкату проводиться у вертикальних валках, встановлених перед клітями №2,3 і 4 на величину від 4 до 23 мм (табл. 2.2). У вертикальних валках виконується вирівнювання ширини штаби. Практично обтиск у вертикальних валках зменшує ширину штаби на величину розширення. При обтиску у вертикальних валках поліпшується якість крайок штаби за рахунок їх деформації, а також поліпшується поверхня прикорайкових ділянок. Максимальна швидкість прокатки у вертикальних клітях становить: в еджері №1 – 0,42-0,90 м/с, в еджері №2 - 0,66-1,40 м/с і в еджері №3 - 0,78-1,67 м/с (залежно від діаметра валків). Для забезпечення одержання необхідної ширини листа і виходячи з міцності еджера, ширина сляба вибирається з урахуванням кінцевої ширини штаби.

Температура розкатів за кліттю №4 повинна бути в межах, зазначених у технологічній карті для забезпечення температури кінця прокатки штаби у заданих межах. Збивання окалини при прокатці штаб 1,2 і 3 груп марок сталей зі слябів, нагрітих у методичних печах, виконується всіма

колекторами води високого тиску при роботі трьох насосів. Тиск води при збиванні окалини з поверхні розкатів, що прокатують, при одночасній роботі всіх колекторів повинне бути не менш 80 атмосфер. Збивання повинне забезпечити повне її видалення з поверхні розкату.

Таблиця 2.2 - Максимальні обтиски, по клітках чорнової групи залежно від ширини сляба

Кліть	Максимальні обтиски при прокатці вуглецевих і низьколегованих сталей, %	
	ширина сляба до 1250 мм	ширина сляба понад 1250 мм
ДУО	25	20
№1	37	35
№2	40	37
№3	40	37
№4	40	37

В процесі прокатки в чорновій групі клітей розкат змотується на Койлбокс. Койлбокс забезпечує більш рівномірний розподіл температур по довжині розкату, який задається в чистову групу клітей. Це дозволяє розширити асортименти продукції і збільшити розмір рулону з одночасним підвищенням якості.

Койлбокс змотує заготовлю після останнього пропуску в чорновій кліті, потім розмотує її, подаючи до групи чистової прокатки, тим самим зберігається температура заготівлі і забезпечується можливість катати заготовлю, довжина якої перевищує довжину проміжного рольганга.

Койлбокс починає змотування, направляючи заготовлю по вхідному жолобу до трьох згинальних роликів, що надають заготівлі кривизну. Вигнута заготівля виходить із згинальних роликів так, щоб головний кінець ударяв по верхньому формуючому настилі. У міру виходу додаткової заготівлі із згинальних роликів передній кінець сковзає вниз по поверхні настилу над формуючим роликом до нижнього формуючого настилу. При цьому русі – заготівля повертається навколо головного кінця, тим самим

збільшуючи кривизну. Коли вигнута заготівля торкнеться ролика колиски 1А, вона негайно направляється нагору для формування круглого очка рулону. Заготівля, що залишилася, намотується на очко рулону.

Спрощена загальна схема розташування вхідного жолобу, роликів колиски, що формує рулон ролика, згинальних і тягнучих роликів показана на рис. 2.2. До складу чистової групи входять: одна двохвалкова кліть (чистовий окаиноламах) і шість клітей, а також летучі ножиці перед чистовою групою 28×1550 мм для обрізання переднього і заднього кінців штаби. Характеристика клітей приведена в (табл. 2.4; 2.1) Температура при різанні повинна бути не менш 900°C . Величина кінців штаби, що відрізають, коливається від 100 до 300 мм. Число обертів барабана становить від 12,2 до 27,4 об/хв. Потужність двигуна 1000 кВт. Максимальна швидкість руху розкату при різанні становить 2,2 м/с.

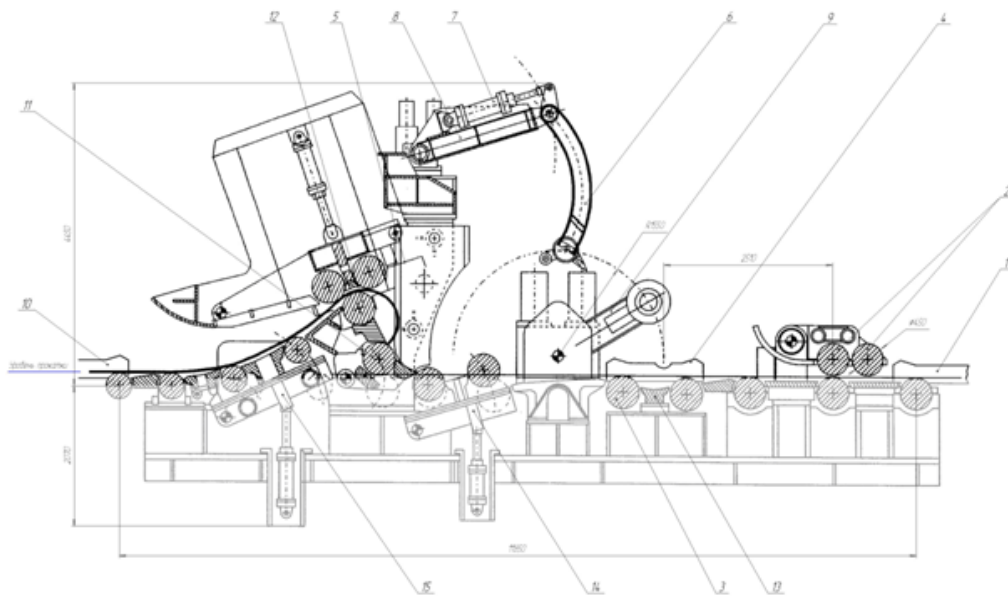


Рисунок 2.2 – Поперечний переріз типового Койлбокса: 1 – вхідні бічні напрямні Койлбокса; 2 – вхідна ринва; 3 – формуючий рулон ролик; 4 – згинальні ролики; 5 – стабілізатори; 6 – важіль відгибача; 7 – циліндр підгинання; 8 – важіль підгинання; 9 – передатний важіль; 10 – бічні направляючі ножиців; 11 – бічні направляючі роликів колиски № 2; 12 – правильно-тягнучий ролик; 13 – ролики колиски № 1; 14 – ролики колиски № 2

У чистовому окалиноламувачі віддаляється вторинна окалина, що утворилася в процесі прокатки в чорновій групі клітей. Чистова група клітей являє собою безперервну групу, яка складається з 6 клітей «кварто». Для забезпечення безперервності процесу прокатки між клітями чистової групи, встановлені петле утримувачі для запобігання нахльосту та розриву штаби. Петле утримувачі також необхідні для постійного на тяжіння штаби між клітями.

При розподілі обтисків у клітях чистової групи старший вальцювальник стежить за тим, щоб навантаження на двигуни не перевищували гранично припустимі (табл. 2.3). Швидкості прокатки в клітях чистової групи повинні забезпечити в умовах заданих величин обтиснень необхідну температуру кінця прокатки для даного профілю й даної групи марок сталі. Максимальна швидкість прокатки досягає 10 м/с.

Контроль товщини й ширини штаб, що прокатують, здійснюється стаціонарним товщиноміром й шириноміром. При виявленні на відібраних пробах різнотовщинності, що перевищує припустимі норми, товщина коректується вальцювальником шляхом зміни тиску масла в системі протизгина робочих валків клітей №8,9 і 10 або шляхом зміни величини обтиснення, а при невідповідності якості штаб вимогам нормативно-технічної документації прокатка припиняється й приймаються міри до усунення причин браку.

Штаба з нержавіючих марок сталей після виходу з 10-останньої кліті поступає в змотуючі машини. Після змотування рулон поступає в конвеєр вуглецеві сталі і після його транспортування, краном передається на склад рулонів ЦГПТЛ для подальшого переділу або упаковки.

Таблиця 2.3 - Максимальні обтиски, по клітях чистової групи залежно від ширини сляба

Кліть	Максимальні обтиски при прокатці вуглецевих і низьколегованих сталей, %	
	ширина до 1200 мм	ширина від 1200 до 1500 мм
№5,6	50	45
№7,8	40	35
№9	25	25
№10	15	15

Розкати, які виходять із чистової групи клітей по транспортному рольгангу направляються до змотувачів №1,2,3,4,5 та 6. При необхідності штаби охолоджуються в душируючому пристрої. Температуру змотування штаб оператор змотувачів регулює шляхом вмикання (вимикання) певної кількості верхніх і нижніх ванн душируючого пристрою. Для вирівнювання температури по довжині штаб, що змотують, оператор змотувачів використовує систему автоматичної підтримки температури.

Таблиця 2.4 - Характеристика валків стана НШСГП 1680

Кліті	Тип валків	Матеріал валків	Діаметр бочки, мм		Довжина бочки, мм	Діаметр шийки, мм	Діаметр тrefа, мм	Вага валка початкова, т
			Поч.	Кін.				
ДУО	Робочі	Сталь 50ХН	900	810	1680	620	380	13,2
№1	Робочі	Сталь 9ХФ	940	880	2440	660	580	19,1
№1	Опорні	Сталь 9ХФ	1320	1245	2440	750	–	38,2

№2	Робочі	Сталь 9ХФ	850	780	1680	480	440	9,63
№2-10	Опорні	Сталь 9ХФ	1240	1170	1680	650	–	22,7
№3-10	Робочі	Чавун вибіле ний	620	580	1680	396	360	5,62
Верт · №1 №2	Робочі	Сталь 50;55	Від 810 до 760	–	–	–	–	1,2
Верт · №3		Сталь 50;55	Від610 до 570	–	–	–	–	0,5

До складу допоміжного устаткування входять: лівий і правий рольганг з шлеперним пристроєм; летучі ножиці з доданим устаткуванням для різання гарячекатаних штаб на листи, ножиці з нижнім різом; згортаючі машини №№ 1, 2 і 3, душуючий пристрій; змотувачі №№ 1-6 з кантувальниками рулонів, приймальними візками, конвеєром і крокуючою балкою до них; приймальний рольганг; підйимально-поворотних столів; вагового рольганга з електронно-тензометрической системи зважування рулонів і приймального рольганга.

Летучі ножиці (рис. 2.3) призначені для різання штаб товщиною від 2 до 6 мм і шириною від 850 до 1500 мм на листи завдовжки від 1500 до 6000 мм.

Складальна кишеня призначена для збирання в пачки листи завдовжки від 1500 до 6000 м і шириною від 850 до 1570 мм. Не допускається укладання в одну пачку листів із штаб різних плавков. Вага пачки листів з однієї плавки має бути не більше 12 тонн.

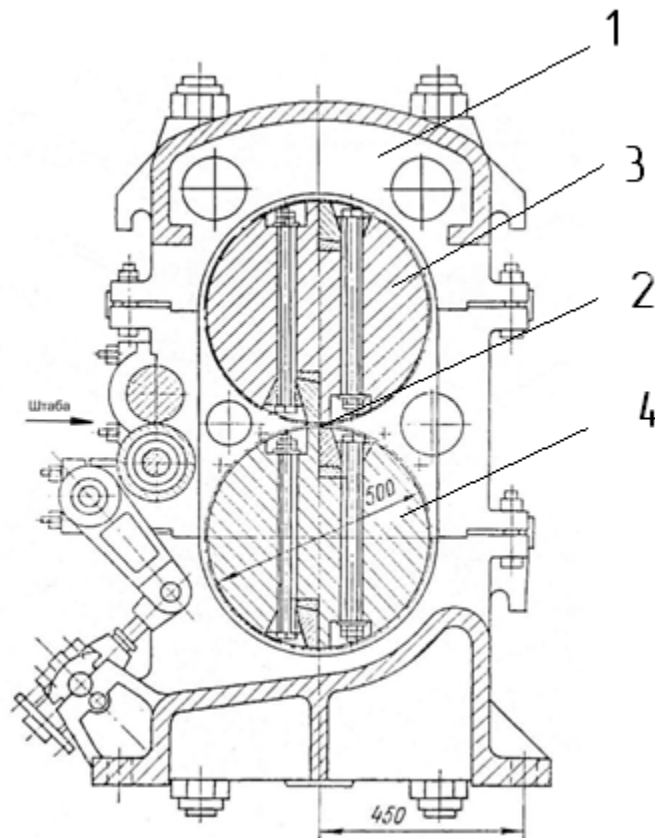


Рисунок 2.3 – Летучі барабані ножиці: 1 – станина; 2 – ніж; 3 – верхній барабан; 4 – нижній барабан.

Душуючий пристрій призначений для прискореного охолодження штаб.

Тип охолодження - камерне. При цьому вода з ванн верхніх секцій подається на штаби за типом «водяної завіси», а з ванн нижніх секцій - за типом «водяного стовпа».

13-ти роликів правильна машина призначена для правки штаб. Швидкості правки від 1 до 2 м/с . Максимальна товщина штаби для правки 3,25 мм.

Змотуючі машини №№ 1-3 (рис. 2.4). Максимальна ширина змотуваної штаби рівна 1524 мм; діаметр рулонів від 752 мм до 1194 мм. Швидкість змотуваної штаби дорівнює швидкості штаби, що виходить з 10-ої кліті. Привід роликів індивідуальний. Приймальна частина змотувачів складається

з двох подаючих роликів діаметром 355 мм і завдовжки 1830 мм.
Зіштовхувач - пневматичний.

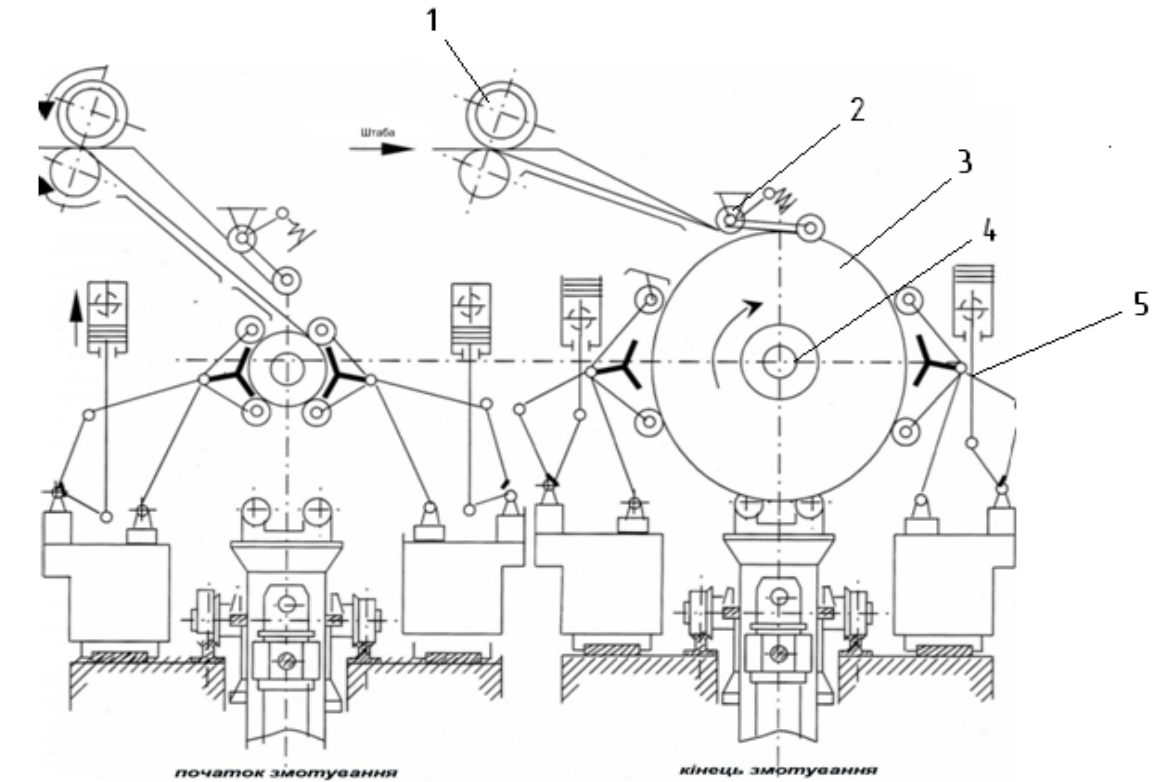


Рисунок 2.4 - Змотувачі для змотування гарячої штаби на НШСП 1680: 1 – тягучі ролики; 2 – формуючі ролики; 3 – рулон; 4 – барабан змотування; 5 – тримачі рулону.

Змотувачі № 1-3 ролико – барабанні (рис. 2.5): товщина змотуючих штаб вуглецевих сталей від 1,8 до 8,0 мм. Товщина на змотуваних штабах легуваних марок сталей від 2,0 до 4,0 мм. Ширина змотуваних штаб від 720 до 1550 мм. Максимальна вага рулону 8т. Зовнішній діаметр рулону 900-1600 мм. Температура змотування штаб 500-800°С. Швидкість змотування штаб 6-15м/с. Діаметр барабана-750мм. Довжина барабана- 2150 мм.

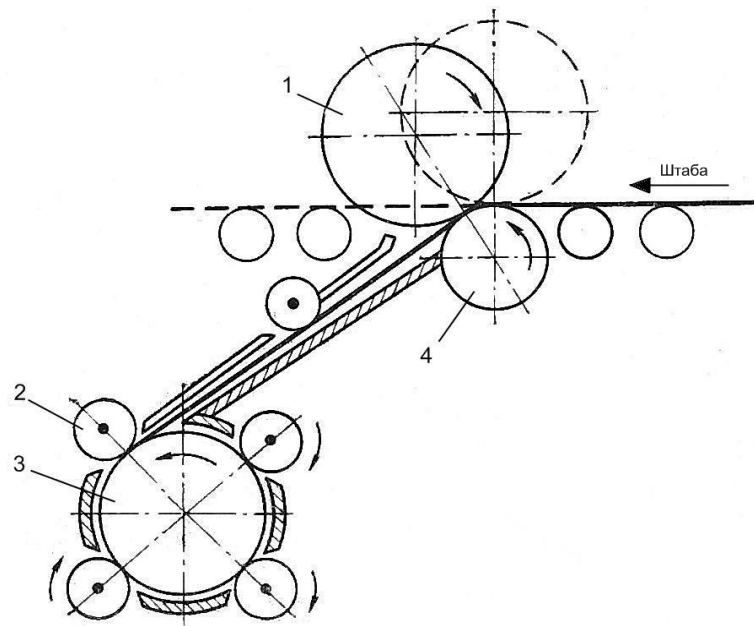


Рисунок 2.5 – Барабанний змотувач з 4-ма роликами: 1 – верхній тягнучий ролик; 2 – формуючий ролик; 3 – барабан змотувача; 4 – нижній тягнучий ролик

Кантувальник рулонів змотувача №№ 1-3: максимальна вага рулону – 8т; висота рулона-1530мм; діаметр-1400 мм. Час кантівки з рулонів 7 секунд.

Приймальний візок змотувачів №№ 1-3: час переміщення від 7 до 10 секунд; кількість візків-2 штуки.

Крокуюча балка: кількість рулонів на балці - 6 штук; максимальні габарити рулону: діаметр зовнішній 1600 мм, висота 1530 мм, крок балки - 1704 мм, швидкість переміщення 0,4 м/с.

Приймач рулонів конвеєра №1: час підйому і опускання по 4 секунди; максимальна вага рулону 18т.

Змотувачі №№ 4-6 ролик - барабанні: товщина змотуваної штаби від 2 до 6 мм, ширина від 600 до 1500 мм, максимальна вага рулону 16т, максимальна температура змотаної штаби 600°C.

Кантувальник рулонів змотувача №№ 4-6 (рис. 2.6): час кантування 2,15 секунд; висота рулонів 720-1500 мм; діаметр рулонів 900-1300 мм.

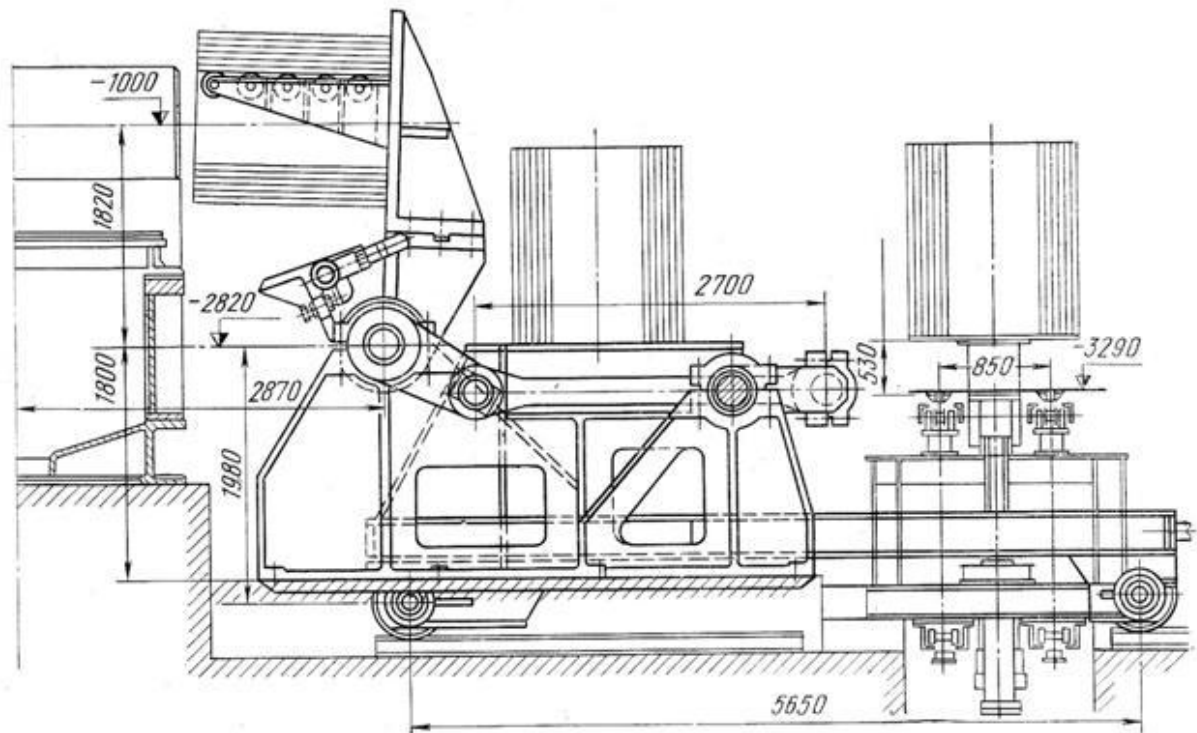


Рисунок 2.6 – Знімач рулонів

Конвеєр від змотувачів до підйомально-поворотного столу: швидкість руху ланцюгів конвеєра від 4,5 до 9,0 м/хв; кількість ланцюгів 2 штуки. Підйомально-поворотний стіл №1: час повороту столу на 900-7,5 секунд; вантажопідйомність столу 25 тонн; хід столу 550 мм; швидкість завдання рулону на стіл від 4,5 до 9,0 м/хв.

Підйомально-поворотний стіл №2: швидкість руху ланцюгів конвеєра від 3 до 6 м/с, число ланцюгів-2 штуки, крок ланцюга -630 мм. Час повороту столу на 900-7 секунд; вантажопідйомність столу 15 тонн; хід столу 570 мм.

Терези призначені для автоматичного зважування рулонів з візуальним відліком ваги за шкалою циферблату і реєстрацією ваги на паперовій стрічці.

Після охолодження штаби змотуються в рулони на змотувачах роликотабаранного типу. Змотування штаб у рулони повинно забезпечити щільне прилягання витків рулону друг до друга з телескопічністю в межах стандартів, технічних умов і стандартів підприємства.

Після змотування рулони зіштовхувачем виштовхуються з барабана змотувача на кантувач. Потім рулони кантуються на конвеєр і направляються

до підйомно-поворотного стола №1 для сортування металу по напрямках, для подальшого переділу. Знімання рулонів, призначених для подальшого переділу в ЦГПТЛ та ЦХП-3 проводиться з 1-ої секції конвеєра на склад 18-ої колії, з 5-ої секції конвеєра на склад 17-ої колії й з 7-ої секції конвеєра на склад 21-ої колії. Інші рулони за допомогою підйомно-поворотного стола №2 по конвеєру направляються в ЦХП-1.

2.3 Технологічний процес за способом CPS на ШСГП 2000

Рідка сталь з двох електропечей піддається позапічної обробці в печі-ковші. Маса плавки - 160 т, цикл випуску плавок - 50 хв. Печі працюють на шихті з 100% брукхту. Виплавляються вуглецеві сталі для подальшої холодної прокатки і рядові конструкційні сталі з максимальним вмістом вуглецю 0,15% і вмістом марганцю 0,6% (рис.2.7).

Вертикальна МБЛЗ 1 характеризується наступними основними параметрами:

Товщина безперервно литої заготовлі мм - 30

Ширина, мм - 1000-1800

Швидкість розливання, м / мм - 6,0-12,0

Довжина кристалізатора МБЛЗ, мм - 1100

Металургійна довжина МБЛЗ, мм - 5800

Радіус вигину, мм - 3000

Річна продуктивність МБЛЗ 2 млн. т. на рік.

На МБЛЗ застосована жорсткий запал, що вводиться в кристалізатор знизу. Після відливання тонкого сляба, у разі послябовій прокатці він розрізається на мірні довжини на механічних ножицях 2. Піч з роликівим подом 3 обладнана газовими пальниками, що працюють на природному газі, довжина печі складає 180 м.

Температура тонких слябів після печі 1100-115 °С, що вище досяжної температури прокату при старих процесах. Через це швидкість прокатки в

чистовій групі, особливо в випадку прокатки тонких штаб, є меншою, ніж на традиційних станах гарячої прокатки штаби. Графік розподілу температури в процесі CPS показаний на рис 2.7.[4]

При виході з печі з роликовим подом температура тонкого сляба по всій його ширині постійна, тому зниження температури на крайках штаби по відношенню до температури кінця прокатки за останньою кліттю набагато менше, ніж на звичайних станах. Завдяки меншому температурному перепаду від середини штаби до її крайках вимоги до аустенітного процесу прокатки за останньою кліттю повністю виконуються, навіть якщо температура кінця прокатки у сталей з низьким вмістом вуглецю становить 850-860°C. Постійність температури по довжині тонкого сляба дає можливість на наступних етапах процесу - при прокатці і охолодженні - застосовувати однакові швидкості. Коректувальні заходи, наприклад додатковий підігрів кромки, температурний розгін або варійоване між кліттьове охолодження, при цьому не вимагається.

Ножиці 4 аварійного різку перед чистовою групою клітей які повинні забезпечувати можливість роботи печі холосту при неполадках на прокатному стані, виконані механічними і по конструкції відповідають ножицям 4 для різання безперервно литих заготовок. Перед станом встановлений окалиноломач високого тиску.

Всі шість чотирьохвалкових клітей чистової безперервної групи розташовані на відстані 6 м одна від одної. Діаметри валків: опорних 1600 мм, робочих 800 (830) мм; опорні валки встановлені в ПРТ, а робочі - на підшипниках кочення. Всі кліті мають безредукторний привід від двух'якірних електродвигунів постійного струму потужністю 12000 кВт через шестеренні кліті. Максимальна сила металу на валки при прокатці 32 МН, максимальні моменти прокатки 0,4-2,3 МН · м. Швидкість переміщення натискних пристроїв 0,5-1мм/с. Литі сталеві станини мають прямокутні стійки, перетин стійки близько 8600 см². Робоча кліть - чотирьохвалкових, при максимальній силі металу на валки при прокатці має підвищену

жорсткість 8,5 МН/мм. З метою підвищення якості поверхні штаби та зменшення її різнотовщинності в останніх трьох клітках застосовується протизгиб робочих валків за допомогою гідравлічних пристроїв. Перед першою чистою чотирьохвалковою кліткою встановлений чистовий окаліноломач [4].

Чистовий окаліноломач роликів типу призначений для руйнування вторинної (повітряної) окалини і подальшого її видалення за допомогою гідрозбиву перед прокаткою смуги в першій чистовій чотирьохвалковій клітці. Дві пари притискних роликів діаметром 500 мм за допомогою пружин і важелів системи притискаються до штаби (сила 0,50 МН), рухається по нижнім транспортним роликів рольганга. Притискні ролики мають привід від електродвигуна потужністю 95 кВт через редуктор ($i = 5,7$).

Всі робочі клітки мають механізовані пристрої для зміни робочих і опорних валків. Операція зміни робочих валків здійснюється за 8-10 хв. Між клетями є направляючі лінійки, проводки і петлетримачі.

По виході з останньої чистої клітки штаба охолоджується і змотується в рулон на роликів-барабанних моталках. Перші три моталки призначені для змотування штаби товщиною 1,2 - 4 мм; дві кінцеві моталки - для змотування в рулон штаби товщиною 4 - 12 мм. Моталки мають чотири формуючі ролики діаметром 380 мм з індивідуальним приводом, центральний приводний барабан діаметром 850 мм, тягнучі ролики різного діаметру (900 і 400 мм), мають індивідуальний привід від електродвигунів.

Відвідний рольганг довжиною близько 100 м і складається з порожнистих водоохолоджуючих роликів, встановлених з прекосом в горизонтальній і вертикальній площинах, завдяки чому забезпечується стійке положення штаби (що набуває коритоподібної форми) при її транспортуванні з великою швидкістю до моталок. По всій довжині рольганга встановлені душируючі пристрої для охолодження штаби перед змотуванням її в рулон (витрата води близько 2 м³/с).

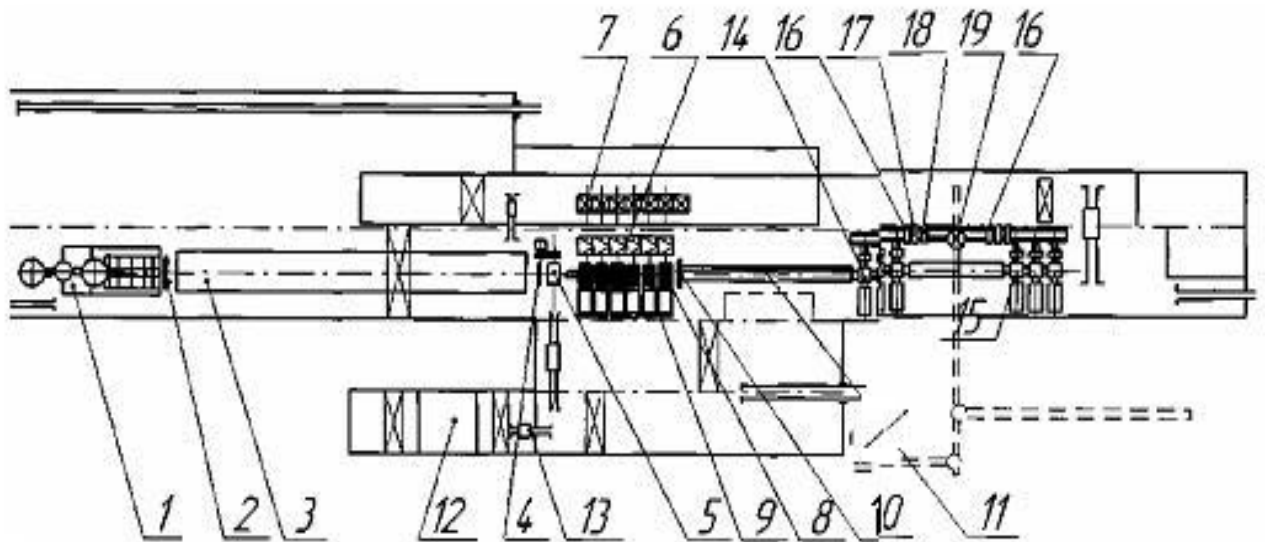


Рисунок 2.7 - Схема розташування устаткування в цеху зі станом 2000:
 1 - МБЛЗ; 2 - аварійні ножиці; 3 - піч з роликівим подом; 4 - летючі ножиці для різання слябів; 5 - чистовий роликівий окалиноломач; 6 - шестеренні кліті (A=900мм); 7 - головні електродвигуни клітей; 8 - робочі кліті; 9 - пристрій для зміни валків; 10 - вимірювачі ширини і товщини штаби; 11 - відвідний рольганг, з ламінарним охолодженням штаби; 12 - насосно-акумуляторна станція гідрозбиву окалини; 13 - передавальні візки; 14 - моталки №1 - 3 для змотування штаби товщиною до 4 мм; 15 - моталка №3 - 6 для змотування штаби 4 - 10 мм; 16 - машина для обв'язки рулонів; 17 - ваги; 18 - машина для маркування рулонів; 19 - поворотний стіл.

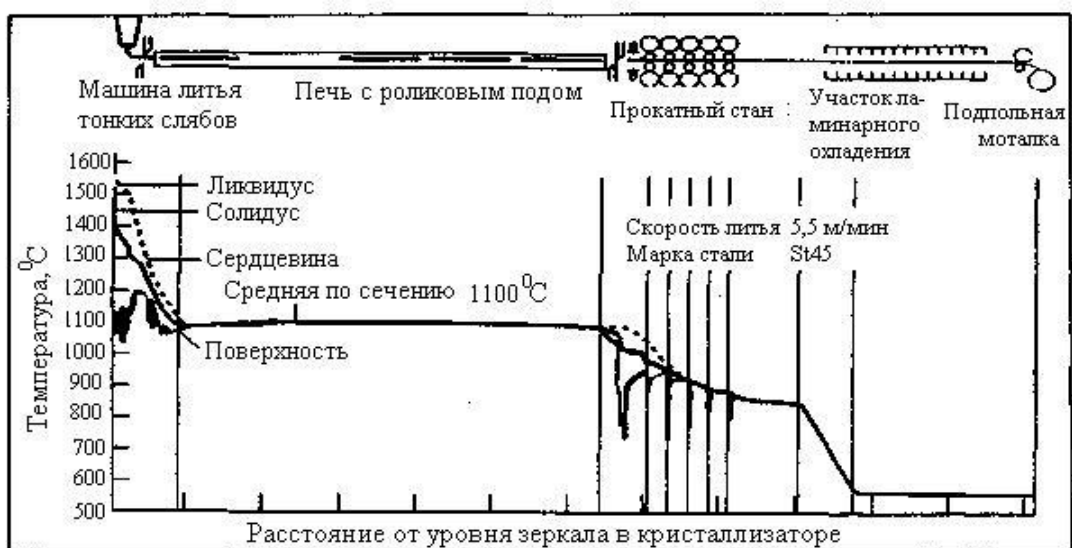


Рисунок 2.8 - Розподіл температури в процесі суміщення лиття і прокатки CSP

Рулон знімається з барабана моталки візком-знімачем і після кантування у вертикальне положення встановлюється на ланцюговий транспортер; рулони обв'язуються по діаметру вузької стрічкою на в'язальній машині, маркуються термостійкої фарбою на спеціальній машині маркування, зважуються на автоматичних вагах і направляються в цех холодної прокатки або у відділення різання на листи.

Для контролю і регулювання технологічного процесу на стані встановлені наступні прилади та пристрої: мес дози для вимірювання зусилля на валки у всіх клітках; безконтактні товщиноміри для вимірювання товщини прокату перед чистовою кліткою і товщини штаби, котра виходить з останньої чистової клітки; безконтактні шириномери для вимірювання ширини підкату на проміжному рольганзі і ширини штаби за останньою чистовою кліткою; пірометри для реєстрації температури: сляба перед чорновим окаліноломачем, підкату на проміжному рольганзі, штаби, котрі виходять з останньої чистової клітки; штаби перед моталкою; прилади для вимірювання натягу полоси між клітками чистової групи.

На стані передбачено широке застосування локальних систем автоматизації, роботи пристроїв для гідрозмиву окалини, режиму обтиснень в чистовій групі клітей, режиму охолодження штаби на відповідному рольганзі, швидкості моталок і транспортерів з рулонами. Для оперативного обліку всіх даних від локальних систем автоматизації в цеху є керуюча електронна обчислювальна машина (КЕОМ). Перші клітки чистової групи обладнані системою технологічного мастила.

Стан характеризується наступними основними параметрами: товщина штаби на виході - 1,0-10,0 мм; ширина штаби - 1000-1800 мм, внутрішній діаметр рулонів - 760 мм, маса рулонів - 36 т, питома маса рулону - 18 кг / мм, діаметр робочих валків - 800 мм, діаметр опорних валків - 1600 мм, максимальна сила прокатки - 30 МН, потужність електродвигуна кожної клітки – 12000 кВт [4].

2.4 Методика експерименту та визначення параметрів процесу

Сила прокатки вимірюється місдозами або тензометрами. Безпосередньо силу прокатки можна виміряти гідравлічними мездозами, але вони мають велике запізнення (інерційність) під час виміру. Окрім того, точність виміру визначається точністю манометрів, яка в більшості випадків недостатня для систем автоматичного регулювання. На промислових станах, з метою автоматичного регулювання, силу прокатки вимірюють прямим методом безперервно. За прямого методу датчик, перетворюючий силу в електричний сигнал, виконаний таким чином, щоб уся вимірювальна система була замкнута тільки на датчик тобто, щоб датчик деформувався половиною сили прокатки тобто силою, діючою на натискні гвинти. Цією силою датчик пружно деформується. Перетворення деформації в електричний сигнал можна здійснити двома шляхами.

По-перше, це методи, що ґрунтуються на вимірюванні деформації на запрограмованій довжині навантажуючого елемента. З цією метою на поверхні пружних елементів закріплюють перетворювачі.

По-друге, це методи, що ґрунтуються на змінюванні тих чи інших властивостей навантажуючого елемента: наприклад, до них відносяться магнітопружні та магнітоанізотропні перетворювачі, а також тензорезистори у випадку безпосередньої дії на них сили. Усі різновиди таких перетворювачів найчастіше розташовують поміж подушками верхнього валка і натискними гвинтами.

Тензометричний датчик являє собою металеву конструкцію, у середині якої поміщені резистори з електричною схемою. Тензодатчик механічно пов'язаний з корпусом ваг (вагового дозатора). При зміні ваги дозатора, корпус тензодатчика зазнає деформації, яка передається на тензорезистори. Електричний сигнал з тензорезисторів передається на вимірник, у ролі якого, як правило, виступає ваговий термінал.

Сучасні досягнення в конструкціях тензометричних датчиків, використані разом зі стандартною перевіреною тензорезисторною технологією, дозволяють створювати компактні й точні датчики з різних матеріалів із широкою сферою застосування й можуть бути використані в різних типах вагових систем і пристроїв, забезпечуючи високу ефективність, точність і економічність.

Тензометричні датчики підрозділяються:

- ✓ по типах (балкові, S-Образні, таблеткові, здвоєна балка й т.п.);
- ✓ по максимальному навантаженню (від декількох грам до десятків і сотень тонн);
- ✓ по чутливості (1..2..3 mV вихідного сигналу на 1 V живлячого напруги);
- ✓ по класу точності (кількість перевірочних інтервалів) і т.д.

Класифікація тензодатчиків по області застосування:

- тензодатчики для С/Х устаткування;
- тензодатчики для прокатних станів;
- тензодатчики для штампувальних пресів;
- тензодатчики для автонавантажувачів;
- тензодатчики для контролю спрацювання устаткування;
- тензодатчики для охоронних систем;
- тензодатчики для виміру навантажень у конструкціях;
- тензодатчики для виміру моментів;
- тензодатчики для зважування ємностей;
- тензодатчики для монорейкових вагових систем.

На рис. 1 представлені зовнішні види різних типів тензодатчиків.

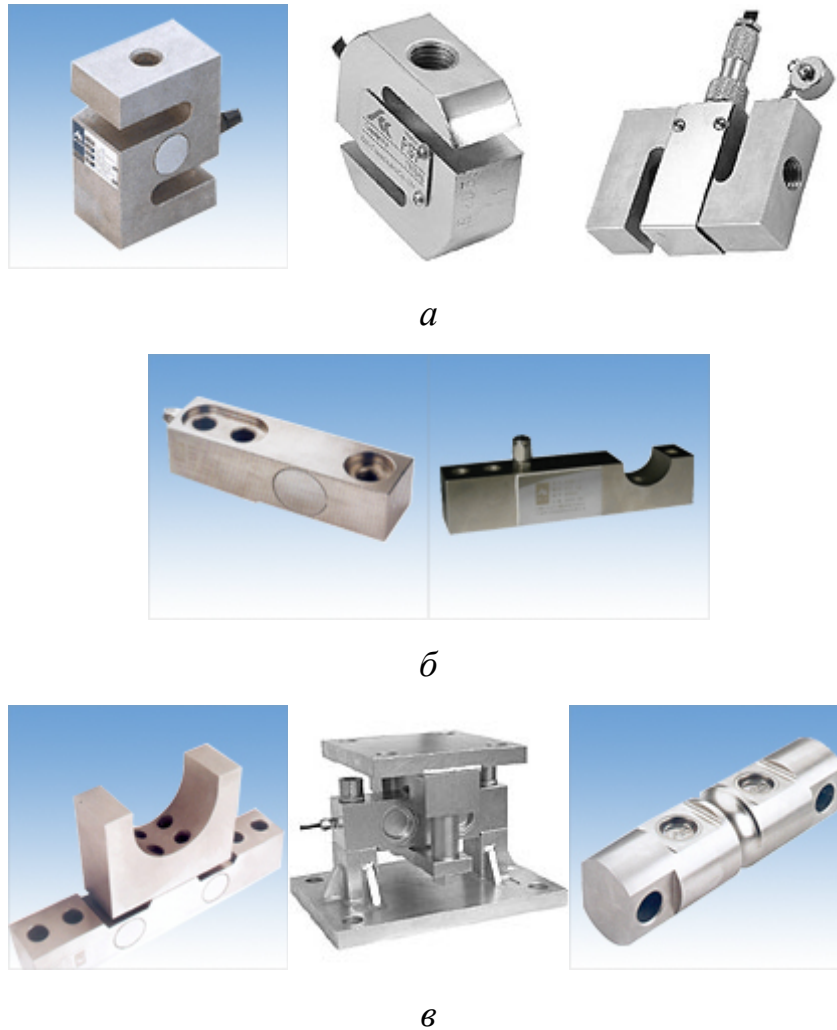


Рисунок 2.9 – Типи тензодатчиків: а - балочні тензодатчики; б - тензодатчики типу "МОСТ"; в - тензодатчики розтяжіння-стискання

Принцип роботи тензодатчику

Робота тензодатчика заснована на простих принципах механіки. Якщо на механічну конструкцію діють зовнішні сили, вона змінює свою форму таким чином, щоб протистояти впливу цих сил. Такі зміни можуть бути значними і явними, як у випадку вигину вудки при витаскуванні пійманої риби або можуть бути мікроскопічними, наприклад – прогин великого моста при проїзді по ньому автомобіля. Якщо в даній металевій конструкції зробити невеликий отвір, воно буде деформуватися в еліпс при деформації самої конструкції, прямо пропорційно прикладеної до конструкції силі. Якщо в цей отвір вклеїти плівковий тензорезистор, можна з великою точністю виміряти цю деформацію або навантаження. Таким чином, тензорезистор

ефективно перетворює всю конструкцію в датчик для виміру сили та навантаження.

Точність тензовимірів

Максимальне навантаження на тензодатчик залежить від конструкції: існуючі системи мають межі зважування від декількох грам до сотень тисяч тонн. При цьому забезпечується мінімальна чутливість до коливань температури за рахунок схемотехнічних розв'язків. У сучасних тензодатчиках використовується подвійний міст (міст Кельвіна), що дозволяє знизити помилки нелінійності, повторюваності й гістерезису. Певний ступінь точності повинний бути забезпечений при виборі місця установки й у процесі самій установці датчиків у конструкцію (пристрій). Необхідно враховувати, що на точність отриманої системи впливають кількість датчиків, навантаження на кожний датчик, матеріал самої конструкції. Відзначимо, що мінімального рівня помилок можна досягти тільки при правильній інсталяції датчиків у конструкцію.

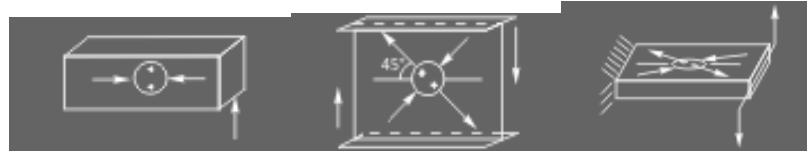
Термін служби тензодатчиків

Тензодатчики для промислового виробництва виготовляються з нержавіючої сталі й повністю герметичні, що забезпечує їхню тривалу експлуатацію практично в будь-яких зовнішніх умовах, включаючи високу температуру, пряме влучення води, сніг, туман, високу вологість і прямі сонячні промені. Діапазон робочих температур – від -40° до 80°C , з мінімальними температурними змінами характеристик. Використовуючи відповідний вторинний прилад, тензовимірювач, за допомогою тензодатчиків можна вимірювати вагу, деформацію, об'єм і інші фізичні параметри.

На рис. 2.10 показані типові методи тензовимірів (стрілками показані лінії прикладеної сили й напрямку деформації).



Розтяжіння Стискання Вигин, розтягання



Вигин, стиск Деформація Кручення

Рисунок 2.10 – Методи тензовимірів

Розрахунки вихідного сигналу тензодатчика

На рівень вихідного сигналу датчика, встановленого в конструкцію впливає безліч факторів. Для одержання надійної оцінки рівня вихідного сигналу необхідно виконати прості обчислення на базі зміни максимального навантаження усередині конструкції й в області поперечного перерізу елемента або балки, у якій встановлений тензодатчик.

Мінімальний вихідний сигнал

Необхідно переконатися, що датчик сприймає достатні навантаження у всім робочому діапазоні для забезпечення достатнього й застосовного рівня сигналу. Практичне правило: тензодатчик повинен зазнати змінам навантаження на одиницю площі поперечного перерізу не менш 15 Н/мм^2 для сталі (5 Н/мм^2 для алюмінію).

Максимальний вихідний сигнал

Як правило, несучі конструкції діючих об'єктів у нормальних робочих умовах не можуть піддаватися з вбудованим датчиком надмірним навантаженням, які приведуть до його ушкодження. При вбудовуванні датчика в металеві елементи конструкції необхідно, щоб зміна навантаження

на одиницю площі поперечного перерізу не перевищувало 75Н/мм^2 для сталі (25 Н/мм^2 для алюмінію).

Вимірювання сили прокатки

Відповідно до закону Гука пружна деформація елемента пропорційна діючій на нього силі. Очевидно, що за величиною деформації можливо визначити силу. Використовуючи цю залежність непрямым методом визначають силу прокатування за допомогою тензometrів, які розміщують на нейтральній лінії стояка станини кліті. Під час прокатування стояк по нейтральній смузі тільки розтягується, збільшує базову відстань l на величину пружної деформації Δl . Відповідно до закону Гука сила розтягування буде визначатися рівнянням:

$$p_c = \frac{p_y}{2} = \frac{\Delta l/l}{EF} \quad (2.1)$$

де p_c – сила, діюча на натискний гвинт;

F – площа перерізу стояка;

E – модуль пружності матеріалу станини (для чавуна $E = (1.2 - 1.6) \times 10^5$ мПа; для литої вуглецевої сталі $E = 2.0 \times 10^5$ мПа; для кованої або штампованої легованої сталі $E = 2.0 \times 10^5$ мПа).

Знаючи, що $p_y = \frac{P}{2}$, сила прокатування P буде дорівнювати:

$$P = 4EF \frac{\Delta l}{l} \quad (2.2)$$

Теоретична сила прокатки за відомого середнього контактного тиску в осередку деформації обчислюється за формулою:

$$P = P_{cp} F_k \quad (2.3)$$

де F_k – площа контакту металу з валками.

Для умов тонколистового прокати $P_{ср}$ визначається за формулою В. О. Ніколаєва:

$$P_{ср} = 1.15\sigma_{Тср} \left[1 + 0.48f_n \frac{l}{h_{ср}} \right] \quad (2.4)$$

де $\sigma_{Тср}$ – середня границя плинності металу в осередку деформації

f_n – показник тертя, який дорівнює:

$$f_n = 1.6f - 0.018 \quad (2.5)$$

f – коефіцієнт тертя який для умов прокати зразків із алюмінію з мастилом можна прийняти рівним 0.08.

За цієї умови $f_n = 0.11$ і формули (2.4) буде мати вигляд:

$$P_{ср} = 1.15\sigma_{Тср} \left[1 + 0.05 \frac{l}{h_{ср}} \right] \quad (2.6)$$

Із формул (2.3), (2.4), (2.5) і (2.6) очевидно, що контактний тиск і сила прокати залежать від границі плинності, умов тертя і параметру $\frac{l}{h_{ср}}$, при збільшенні яких, сила прокати зростає. Взагалі усі фактори прокати, збільшуючи опір повздовжньому і поперечному плину металу в осередку деформації, призводять до зростання сили прокатування.

Середню границю плинності $\sigma_{Тср}$, визначають за формулою:

$$\sigma_{Тср} = (\sigma_{Т0} + \sigma_{Т1})/2 \quad (2.7)$$

де $\sigma_{Т0}$ – границя плинності металу до проходу;

σ_{T1} – границя плинності металу після проходу.

Середній тиск по експерименту із (2.3):

$$P_{\text{ср}} = P / F_k$$

Складають і випробують схеми виміру сили прокатки прямим та непрямим методами. До прокатки вимірюють розміри перерізу трьох листових зразків однакової ширини. Під час прокатки вимірюють силу шляхом запису осцилограм та пружну деформацію Δl за допомогою тензора. Після прокатки вимірюють розміри зразків. Розшифровку осцилограм (рис. 2.11) виконують, користуючись градуювальники лініями місдоз (рис. 2.12). Дані замірів, розмірів і розшифровок заносять до таблиці. Далі, розрахувавши необхідні параметри прокатки Δh , ε , ε_{Σ} , $l/h_{\text{ср}}$, σ_{T1} визначають $P_{\text{ср}}$ по (2.6) і по P (2.3).

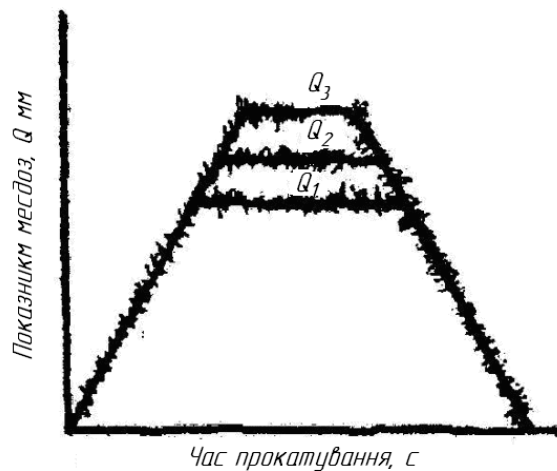


Рисунок 2.11 – Осцилограма сили прокатування

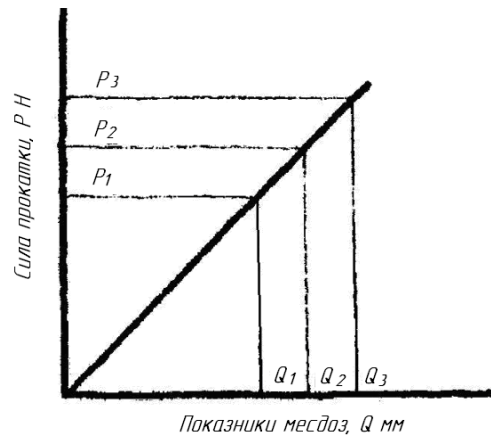


Рисунок 2.12 – Градувальна лінія місдоз

2.4 Обробка та обговорення результатів

У розділі 1 представлені формули для розрахунку напруження течії металу, відповідність яких умовам зміцнення штаби під час гарячої прокатки може бути оцінено за експериментальними даними середнього контактного тиску. При цьому самі експериментальні величини середнього контактного тиску повинні бути достовірними, а набір інформаційних параметрів процесу прокатки повинен бути достатнім для виконання розрахунку. Таким вимогам в основному відповідають експериментальні дані отримані в роботі Саф'яна [21]. Для оцінки формул розрахунку напруження течії металу при гарячій прокатці використані температурно-швидкісні та геометричні параметри прокатки в чистовій групі НШСГП 1680 (табл.2.5).

Таблиця 2.5 – Параметри прокатки в чистовій групі НШСГП 1680

Номер кліті	Швидкість прокатки, м/с	Товщина штаби, мм	Температура прокатки, °С
5	1,21	13,62	980
6	1,98	8,33	935
7	2,94	5,61	905
8	3,85	4,28	865
9	4,89	3,37	845
10	5,5	3	800

Визначаємо напруження течії металу та середній контактний тиск при гарячій прокатці штаби 3,0x1100 мм зі сталі Ст.3кп за умовами представленими у таблиці 2.5.

Спочатку розрахуємо додаткові геометричні параметри прокатки для подальшого порівняльного аналізу:

1) Абсолютний обтиск:

$$\Delta h = h_0 - h_1;$$

$$\Delta h_5 = 27 - 13,62 = 13,38 \text{ мм}; \quad \Delta h_6 = 13,38 - 8,33 = 5,29 \text{ мм};$$

$$\Delta h_7 = 8,33 - 5,61 = 2,72 \text{ мм}; \quad \Delta h_8 = 5,61 - 4,28 = 1,33 \text{ мм};$$

$$\Delta h_9 = 4,28 - 3,37 = 0,91 \text{ мм}; \quad \Delta h_{10} = 3,37 - 3 = 0,37 \text{ мм}.$$

2) Відносний обтиск:

$$\varepsilon = \frac{\Delta h}{h_0};$$

$$\varepsilon_5 = \frac{13,38}{27} = 0,50; \quad \varepsilon_6 = \frac{5,29}{13,38} = 0,39; \quad \varepsilon_7 = \frac{2,72}{8,33} = 0,33;$$

$$\varepsilon_8 = \frac{1,33}{5,61} = 0,24; \quad \varepsilon_9 = \frac{0,91}{4,28} = 0,21; \quad \varepsilon_{10} = \frac{0,37}{3} = 0,11.$$

3) Довжина дуги контакту, фактор форми осередку деформації та швидкість деформації дорівнюють:

$$\ell d = \sqrt{R \times \Delta h};$$

$$\ell d_5 = \sqrt{305 \times 13,38} = 63,9 \text{ мм} = 0,0639 \text{ м}; \quad \ell d_6 = \sqrt{305 \times 5,39} = 40,2 \text{ мм} = 0,0402 \text{ м};$$

$$\ell d_7 = \sqrt{305 \times 2,72} = 28,8 \text{ мм} = 0,0288 \text{ м}; \quad \ell d_8 = \sqrt{305 \times 1,33} = 20,1 \text{ мм} = 0,0201 \text{ м};$$

$$\ell d_9 = \sqrt{305 \times 0,91} = 16,7 \text{ мм} = 0,0167 \text{ м}; \quad \ell d_{10} = \sqrt{305 \times 0,37} = 10,6 \text{ мм} = 0,0106 \text{ м};$$

$$u = \frac{v \times \varepsilon}{\ell d};$$

$$u_5 = \frac{1,21 \times 0,50}{0,0639} = 9,39 \text{ c}^{-1}; \quad u_6 = \frac{1,98 \times 0,39}{0,0402} = 19,15 \text{ c}^{-1};$$

$$u_7 = \frac{2,94 \times 0,33}{0,0288} = 33,33 \text{ c}^{-1}; \quad u_8 = \frac{3,85 \times 0,24}{0,0201} = 45,32 \text{ c}^{-1};$$

$$u_9 = \frac{4,89 \times 0,21}{0,0167} = 62,41 \text{ c}^{-1}; \quad u_{10} = \frac{5,5 \times 0,11}{0,0106} = 56,84 \text{ c}^{-1}.$$

Розрахунок напруження течії металу по формулі Ніколаєва В.О.

Напруження течії металу (сталь марки Ст.3кп) визначимо по величині вуглецевого еквіваленту з роботи Ніколаєва В.О. [1], в залежності від швидкості деформації та групи марки сталі.

Хімічний склад сталі згідно ГОСТ 380-2005, %: 0,14-0,22 С, до 0,03 Si, 0,3-0,6 Mn, до 0,3 Ni, до 0,3 Cr, до 0,05 S, до 0,04 P, до 0,3 Cu, до 0,08 As, до 0,008 N.

Вуглецевий еквівалент дорівнює, %:

$$N = 0,18 + 0,03 + 0,45 + 0,3 + 0,3 + 0,3 = 1,155.$$

Так як $N \leq 5$, базова границя текучості визначається по формулі:

$$\sigma_{T0} = 80 + 25 \cdot \left\{ 1 - \left[\frac{5 - N_1}{4,5} \right]^{1,8} \right\};$$

$$\sigma_{T0} = 80 + 25 \cdot \left\{ 1 - \left[\frac{5 - 1,155}{4,5} \right]^{1,8} \right\} = 91,5 \text{ Н/мм}^2.$$

Використовуючи данні таблиці 1.2 і 1.3 одержуємо:

$$k_t = 1,66 - 1,1(t / 400 - 2)^{0,7};$$

$$k_{t5} = 1,66 - 1,1(980 / 400 - 2)^{0,7} = 1,03;$$

$$k_{t6} = 1,66 - 1,1(935 / 400 - 2)^{0,7} = 1,15;$$

$$k_{t7} = 1,66 - 1,1(905 / 400 - 2)^{0,7} = 1,23;$$

$$k_{t8} = 1,66 - 1,1(865 / 400 - 2)^{0,7} = 1,35;$$

$$k_{t9} = 1,66 - 1,1(845 / 400 - 2)^{0,7} = 1,42;$$

$$k_{t10} = 1,66 - 1,1(800 / 400 - 2)^{0,7} = 1,66.$$

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

$$k_{\varepsilon5} = 1 + 0,43 [1 - 6,3 (0,5 - 0,5)^2] = 1,43;$$

$$k_{\varepsilon6} = 1 + 0,43 [1 - 6,3 (0,5 - 0,39)^2] = 1,40;$$

$$k_{\varepsilon7} = 1 + 0,43 [1 - 6,3 (0,5 - 0,33)^2] = 1,35;$$

$$k_{\varepsilon8} = 1 + 0,43 [1 - 6,3 (0,5 - 0,24)^2] = 1,24;$$

$$k_{\varepsilon9} = 1 + 0,43 [1 - 6,3 (0,5 - 0,21)^2] = 1,21;$$

$$k_{\varepsilon10} = 1 + 0,43 [1 - 6,3 (0,5 - 0,11)^2] = 1,02.$$

$$k_u = 0,38 + 0,065 (7 + \ln u) \text{ та } k_u = 1,03 + 0,1((\ln u) - 2,3)^{1,5};$$

$$k_{u5} = 0,38 + 0,065 (7 + \ln 9,39) = 0,98;$$

$$k_{u6} = 1,03 + 0,1((\ln 19,15) - 2,3)^{1,5} = 1,08;$$

$$k_{u7} = 1,03 + 0,1((\ln 33,33) - 2,3)^{1,5} = 1,16;$$

$$k_{u8} = 1,03 + 0,1((\ln 45,32) - 2,3)^{1,5} = 1,22;$$

$$k_{u9} = 1,03 + 0,1((\ln 62,41) - 2,3)^{1,5} = 1,28;$$

$$k_{u10} = 1,03 + 0,1((\ln 56,84) - 2,3)^{1,5} = 1,26.$$

Визначаємо напруження течії металу:

$$\sigma_T = \sigma_{T6} \cdot k_t \cdot k_{\varepsilon} \cdot k_u;$$

$$\sigma_{T5} = 91,5 \cdot 1,03 \cdot 1,43 \cdot 0,99 = 132 \text{ Н/мм}^2;$$

$$\sigma_{T6} = 91,5 \cdot 1,15 \cdot 1,40 \cdot 1,08 = 158 \text{ Н/мм}^2;$$

$$\sigma_{T7} = 91,5 \cdot 1,23 \cdot 1,35 \cdot 1,16 = 176 \text{ Н/мм}^2;$$

$$\sigma_{T8} = 91,5 \cdot 1,35 \cdot 1,24 \cdot 1,22 = 187 \text{ Н/мм}^2;$$

$$\sigma_{T9} = 91,5 \cdot 1,42 \cdot 1,21 \cdot 1,28 = 201 \text{ Н/мм}^2;$$

$$\sigma_{T10} = 91,5 \cdot 1,66 \cdot 1,02 \cdot 1,26 = 195 \text{ Н/мм}^2.$$

Розрахунок напруження течії металу по формулі

Андреюка Л.В. – Тюленева Г.Г.

Напруження течії металу:

$$\sigma = s \sigma_0 \cdot (10\varepsilon)^a u^b \left(\frac{t}{1000} \right)^{-c},$$

де σ_0 – базове значення напруження течії матеріалу штаби, відповідне $\varepsilon = 0,1$; $u = 1 \text{ с}^{-1}$; $t = 1000^\circ\text{C}$;

s, a, b, c – постійні коефіцієнти, визначені індивідуально для кожної сталі.

В таблиці 2.6 наведено базове значення напруження течії сталі Ст.3кп та коефіцієнти s, a, b, c [15].

Таблиця 2.6 – Коефіцієнти для формули Андреюка Л.В. – Тюленева Г.Г.

Сталь	$\sigma_0, \text{Н/мм}^2$	Значення коефіцієнтів			
		s	a	b	c
Ст.3кп	77,9	0,885	0,164	0,135	2,80

Визначаємо напруження течії металу:

$$\sigma_5 = 0,885 \cdot 77,9 \cdot (10 \cdot 0,50)^{0,164} 9,39^{0,135} \left(\frac{980}{1000} \right)^{-2,80} = 128 \text{ Н/мм}^2;$$

$$\sigma_6 = 0,885 \cdot 77,9 \cdot (10 \cdot 0,39)^{0,164} 19,15^{0,135} \left(\frac{935}{1000} \right)^{-2,80} = 155 \text{ Н/мм}^2;$$

$$\sigma_7 = 0,885 \cdot 77,9 \cdot (10 \cdot 0,33)^{0,164} 33,33^{0,135} \left(\frac{905}{1000} \right)^{-2,80} = 178 \text{ Н/мм}^2;$$

$$\sigma_8 = 0,885 \cdot 77,9 \cdot (10 \cdot 0,24)^{0,164} 45,32^{0,135} \left(\frac{865}{1000} \right)^{-2,80} = 199 \text{ Н/мм}^2;$$

$$\sigma_9 = 0,885 \cdot 77,9 \cdot (10 \cdot 0,21)^{0,164} 62,41^{0,135} \left(\frac{845}{1000} \right)^{-2,80} = 218 \text{ Н/мм}^2;$$

$$\sigma_{10} = 0,885 \cdot 77,9 \cdot (10 \cdot 0,11)^{0,164} 56,84^{0,135} \left(\frac{800}{1000} \right)^{-2,80} = 226 \text{ Н/мм}^2.$$

Розрахунок напруження течії металу по формулі В.І. Зюзіна

Формула В.І. Зюзіна потребує додаткові розрахунки температурних та геометричних параметрів прокатки для визначення напруження течії металу.

Середнє значення температури штаби в осередку деформації:

$$t_{cp} = \frac{1}{3}(t_0 + 2t_k);$$

$$t_{cp5} = \frac{1}{3}(1080 + 2 \cdot 980) = 1013 \text{ } ^\circ\text{C}; \quad t_{cp6} = \frac{1}{3}(980 + 2 \cdot 935) = 950 \text{ } ^\circ\text{C};$$

$$t_{cp7} = \frac{1}{3}(935 + 2 \cdot 905) = 915 \text{ } ^\circ\text{C}; \quad t_{cp8} = \frac{1}{3}(905 + 2 \cdot 865) = 878 \text{ } ^\circ\text{C};$$

$$t_{cp9} = \frac{1}{3}(865 + 2 \cdot 845) = 852 \text{ } ^\circ\text{C}; \quad t_{cp10} = \frac{1}{3}(845 + 2 \cdot 800) = 815 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Середнє значення умовного середнього обтиску:

$$\varepsilon_{cp} = \frac{2}{3} \cdot \frac{\Delta h}{h_0};$$

$$\varepsilon_{cp5} = \frac{2}{3} \cdot \frac{13,38}{27} = 0,33; \quad \varepsilon_{cp6} = \frac{2}{3} \cdot \frac{5,29}{13,62} = 0,26;$$

$$\varepsilon_{cp7} = \frac{2}{3} \cdot \frac{2,72}{8,33} = 0,22; \quad \varepsilon_{cp8} = \frac{2}{3} \cdot \frac{1,33}{5,61} = 0,16;$$

$$\varepsilon_{cp9} = \frac{2}{3} \cdot \frac{0,91}{4,28} = 0,14; \quad \varepsilon_{cp10} = \frac{2}{3} \cdot \frac{0,37}{3,37} = 0,07.$$

Визначаємо значення швидкісного коефіцієнта:

$$k_u = 0,8 + 0,065\sqrt{u};$$

$$k_{u5} = 0,8 + 0,065\sqrt{9,39} = 1,0;$$

$$k_{u5} = 0,8 + 0,065\sqrt{19,15} = 1,08;$$

$$k_{u7} = 0,8 + 0,065\sqrt{33,33} = 1,18;$$

$$k_{u8} = 0,8 + 0,065\sqrt{45,32} = 1,24;$$

$$k_{u9} = 0,8 + 0,065\sqrt{62,41} = 1,31;$$

$$k_{u10} = 0,8 + 0,065\sqrt{56,84} = 1,29;$$

Середнє значення коефіцієнта зміцнення:

$$k_{\varepsilon_{cp}} = 0,82(1 + \sqrt{\varepsilon_{cp}});$$

$$k_{\varepsilon_{cp5}} = 0,82(1 + \sqrt{0,33}) = 1,29;$$

$$k_{\varepsilon_{cp6}} = 0,82(1 + \sqrt{0,26}) = 1,24;$$

$$k_{\varepsilon_{cp7}} = 0,82(1 + \sqrt{0,22}) = 1,20;$$

$$k_{\varepsilon_{cp8}} = 0,82(1 + \sqrt{0,16}) = 1,15;$$

$$k_{\varepsilon_{cp9}} = 0,82(1 + \sqrt{0,14}) = 1,13;$$

$$k_{\varepsilon_{cp10}} = 0,82(1 + \sqrt{0,07}) = 1,04.$$

Середнє значення температурного коефіцієнта:

$$k_{tcp} = 0,6 + 0,0045 \cdot (1200 - t_{cp}) \sqrt{\frac{1200 - t_{cp}}{t_{cp}}};$$

$$k_{tcp5} = 0,6 + 0,0045 \cdot (1200 - 1033) \sqrt{\frac{1200 - 1033}{1033}} = 0,96;$$

$$k_{tcp6} = 0,6 + 0,0045 \cdot (1200 - 950) \sqrt{\frac{1200 - 950}{950}} = 1,18;$$

$$k_{tcp7} = 0,6 + 0,0045 \cdot (1200 - 915) \sqrt{\frac{1200 - 915}{915}} = 1,32;$$

$$k_{tcp8} = 0,6 + 0,0045 \cdot (1200 - 878) \sqrt{\frac{1200 - 878}{878}} = 1,48;$$

$$k_{tcp9} = 0,6 + 0,0045 \cdot (1200 - 852) \sqrt{\frac{1200 - 852}{852}} = 1,60;$$

$$k_{tcp10} = 0,6 + 0,0045 \cdot (1200 - 815) \sqrt{\frac{1200 - 815}{815}} = 1,79.$$

Визначаємо величину напруження течії металу:

$$\sigma_m = \sigma_{T0} \cdot k_u \cdot k_\varepsilon \cdot k_t;$$

Базове значення напруження течії сталі Ст.3кп дорівнює 86 Н/мм² [16].

$$\sigma_{m5} = 86 \cdot 1,0 \cdot 1,29 \cdot 0,96 = 107 \text{ Н/мм}^2;$$

$$\sigma_{m6} = 86 \cdot 1,08 \cdot 1,24 \cdot 1,18 = 136 \text{ Н/мм}^2;$$

$$\sigma_{m7} = 86 \cdot 1,18 \cdot 1,20 \cdot 1,32 = 160 \text{ Н/мм}^2;$$

$$\sigma_{m8} = 86 \cdot 1,24 \cdot 1,15 \cdot 1,48 = 180 \text{ Н/мм}^2;$$

$$\sigma_{m9} = 86 \cdot 1,31 \cdot 1,13 \cdot 1,60 = 204 \text{ Н/мм}^2;$$

$$\sigma_{m10} = 86 \cdot 1,29 \cdot 1,04 \cdot 1,79 = 207 \text{ Н/мм}^2.$$

На рис. 2.13, 2.14, 2.15 представлені графічні залежності величини напруження течії металу визначені за формулами В.О. Ніколаєва, Л.В. Андреюка – Г.Г. Тюленева та В.І. Зюзіна.

Результати аналізу показали, що найбільш близькими формулами розрахунку напруження течії металу на початку прокатки в чистовій групі клітей НШСГП 1680 є формули В.О. Ніколаєва та Л.В. Андреюка – Г.Г. Тюленева. Дані формули добре співпадають при невеликому ступені і

швидкості деформації. В подальшому при прокатці з збільшенням ступеня і швидкості деформації та зменшення температури штаби найбільш близькими формулами є формули В.О. Ніколаєва і В.І. Зюзіна.

Таким чином встановлено, що формула В.О. Ніколаєва добре працює як при низьких температурно-швидкісних показниках прокатки та і при їх збільшеннях під час прокатки і може бути рекомендована для визначення напруження течії металу при гарячій прокатці.

Аналіз отриманих залежностей дозволив отримати наступні положення. При підвищенні температури збільшується амплітуда теплових коливань атомів і відповідно всі характеристики міцності, в тому числі і напруження течії металу, знижуються. Збільшення швидкості і ступеня деформації прямо підвищують напруження течії металу. Майже у всіх металів і сплавів напруження течії металу зростає з збільшенням ступеня деформації ϵ .

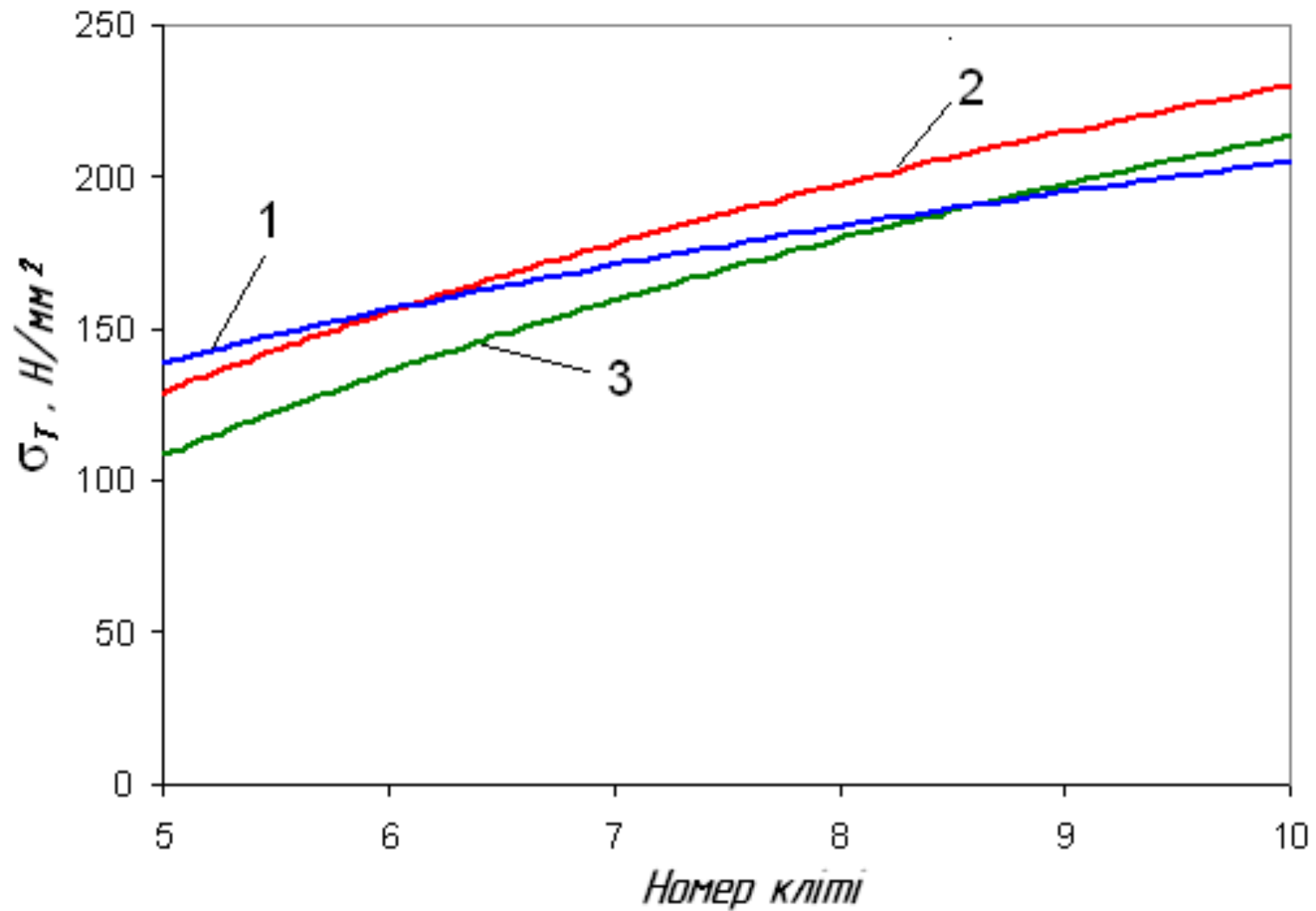


Рисунок 2.13 – Розподіл напруження течії металу по клітям розраховане за теоретичними формулами: 1 – В.О. Ніколаєва; 2 – Л.В. Андреюка – Г.Г. Тюленева; 3 – В.І. Зюзіна.

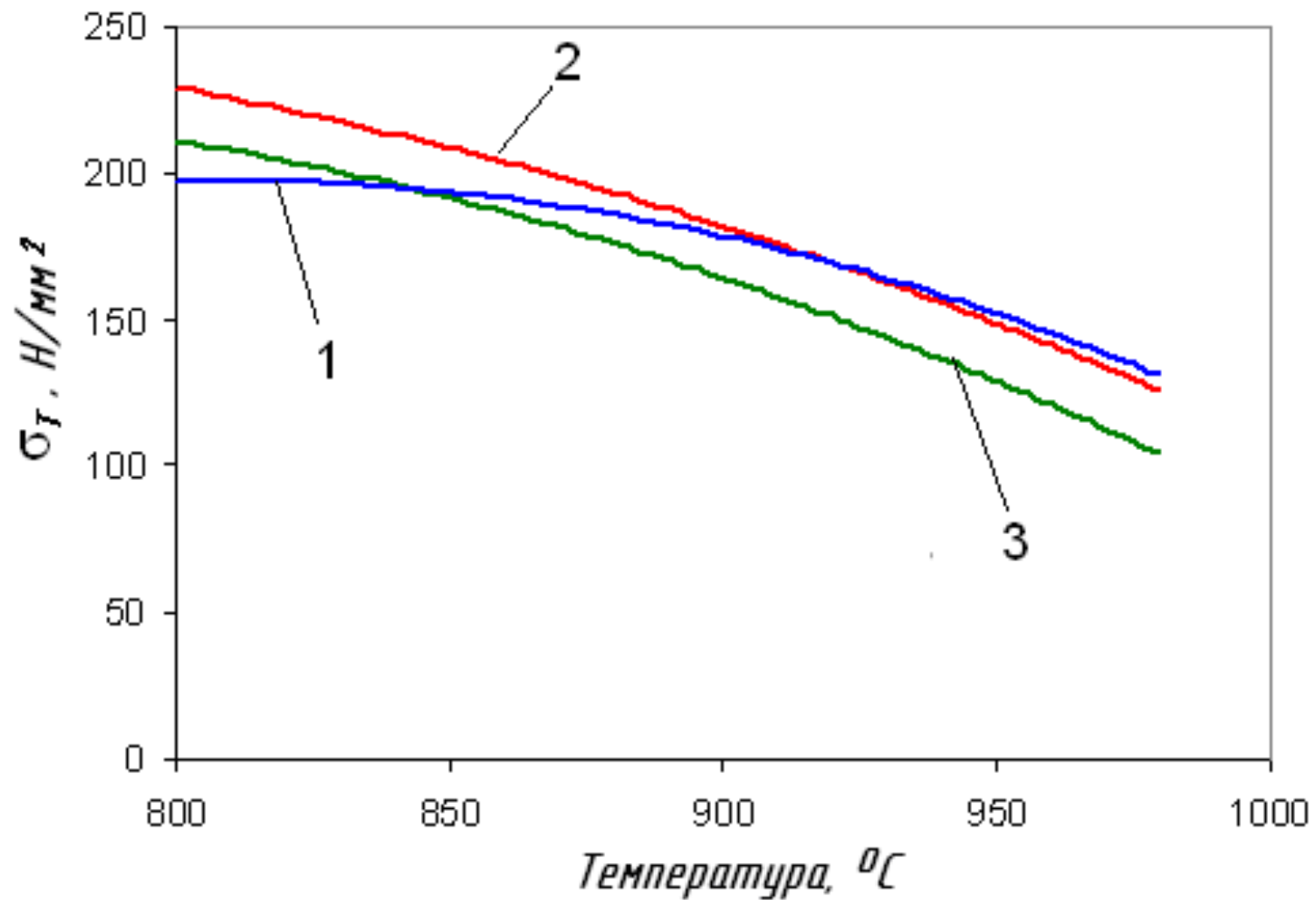


Рисунок 2.14 – Залежність напруження течії металу від температури штаби розрахована за формулами: 1 – В.О. Ніколаєва; 2 – Л.В. Андреюка – Г.Г. Тюленева; 3 – В.І. Зюзіна.

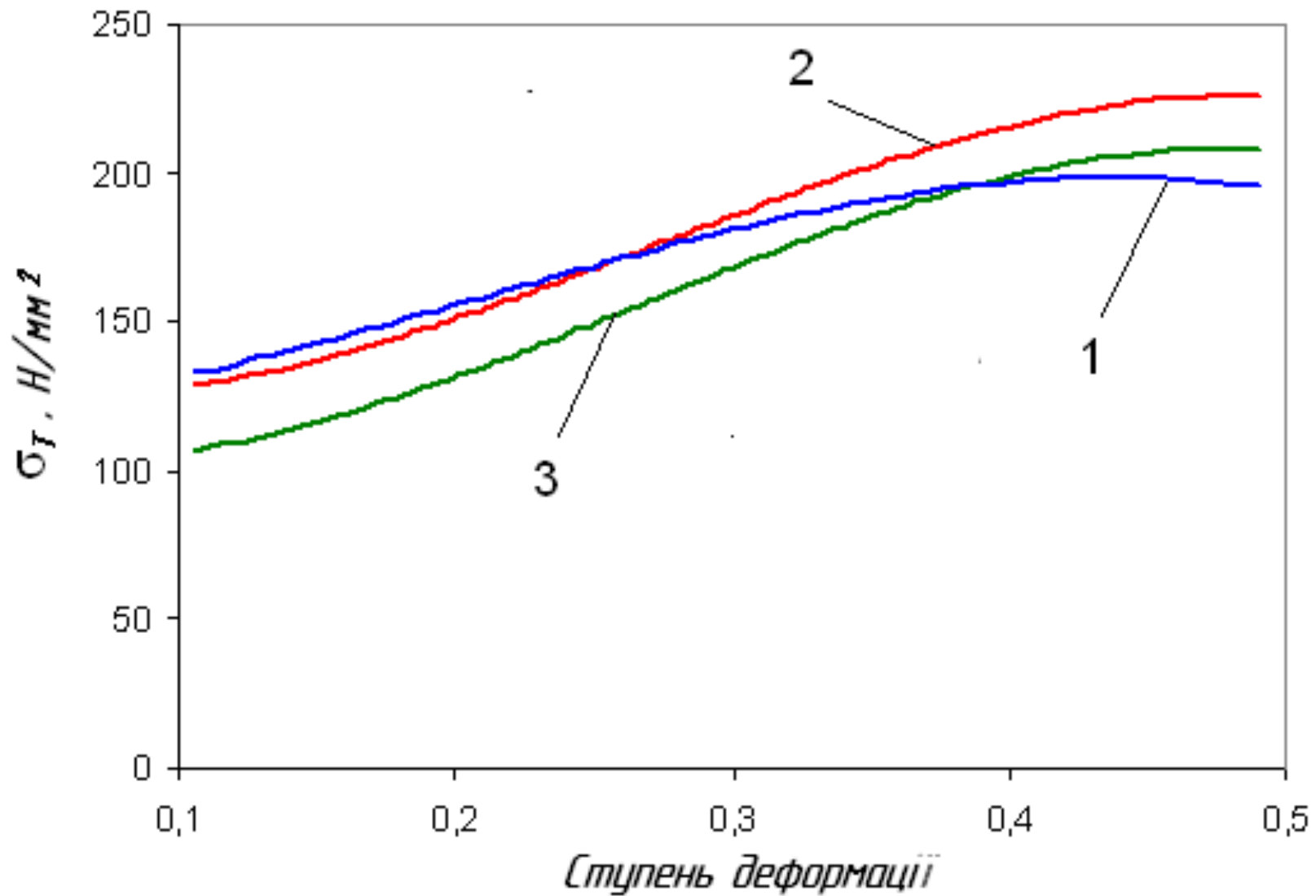


Рисунок 2.15 – Залежність напруження течії металу від ступеня деформації розрахована за теоретичними формулами: 1 – В.О. Ніколаєва; 2 – Л.В. Андреюка – Г.Г. Тюленева; 3 – В.І. Зюзіна.

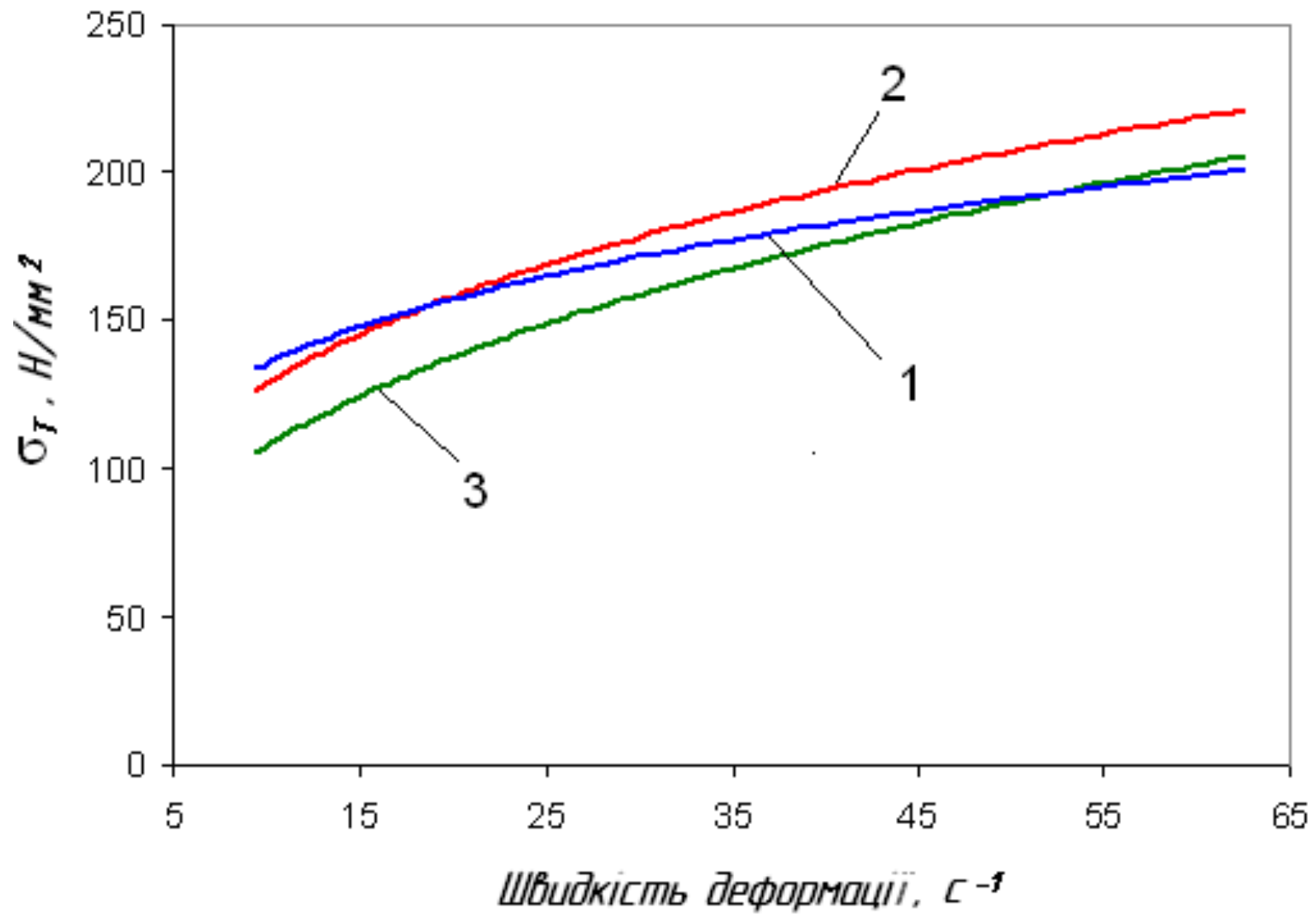


Рисунок 2.16 – Залежність напруження течії металу від швидкості деформації розрахована за теоретичними формулами: 1 – В.О. Ніколаєва; 2 – Л.В. Андреюка – Г.Г. Тюленева; 3 – В.І. Зюзіна.

Визначення середнього контактного тиску

Для порівняння розрахункових значень середнього контактного тиску з врахуванням визначення напруження течії металу за формулою В.О. Ніколаєва з дослідними даними, були використані експериментальні дані дослідження стану НШСГП 1680, виконані М.М. Саф'яном спільно з О.П. Чекмарьовим і В.І. Мелешко в роботі [21]. У зазначеній роботі за допомогою месдоз вимірювали тиск металу на валки клітей чистової групи при прокатці штаб з маловуглецевих і середньовуглецевих сталей. Режим прокатки штаби 3x1400 мм із сталі Ст.3кп представлений в таблиці 1. Для зазначених умов прокатки розраховано середній контактний тиск за формулами О.І. Целікова, С. Екелунда і Ш. Гелеі наведені в таблиці 2.7.

Таблиця 2.7 – Порівняння величини середнього контактного тиску, розрахованого за різними формулами з дослідними даними при дослідженні НШСГП 1680

Номер кліті	Середній контактний тиск, Н/мм ²			
	Формула О.І. Целікова	Формула С. Екелунда	Формула Гелеі	Дослідні дані
5	201	104,8	173,5	139,2
6	263	167,5	255	191
7	323	218,5	296	311,5
8	362,5	262,5	264,5	377
9	412	321,5	229	407,5
10	284	224,5	209	307

В таблиці 2.7 наведені дослідні значення середніх контактних тисків, отриманих діленням повних тисків прокатки на контактну площу з робочими валками. Коефіцієнт зовнішнього тертя визначали за формулою:

$$\mu = 0,55 - 0,00024 \cdot t.$$

Значення напруження течії металу при відповідних температурах і швидкостях взяті за даними Надаї [13]. Середній контактний тиск по всіх формулах розрахований без урахування зплющювання.

Формула О.І. Целікова:

$$p_{cp} = \beta \sigma_{иn''} \sigma(p_{cp}/k),$$

де $\beta = 1 \dots 1,15$ коефіцієнт, що враховує нерівномірність напруженого стану (коефіцієнт Лоде $\beta = 1$ для дуже вузьких штаб; $\beta = 1,15$ для широких штаб);

$\sigma_{и} = \varphi(v, l_0, \varepsilon)$ - істинний опір деформації;

v – швидкість деформації;

n''_{σ} – коефіцієнт, що враховує вплив зовнішніх кінців, визначають по графіку;

$(p_{cp}/k) = \varphi(\delta, \varepsilon)$ – коефіцієнт напруженого стану.

$$\delta = 2f = \sqrt{R/\Delta h} \sim 2f/\alpha;$$

t – температура металу;

$\varepsilon = \Delta h/H \cdot 100\%$ – ступінь деформації.

Формула С. Екелунда:

$$p_{cp} = (1 + m) \cdot (2k + \eta u),$$

$$m = \frac{1,6f \sqrt{R\Delta h} - 1,2\Delta h}{h_0 + h_1};$$

$$2k = 9,81 (14 - 0,2t) \cdot (1,4 + C + Mn + 0,3Cr);$$

$$\eta = 0,098 (14 - 0,01t)c;$$

$$u = \frac{2v \sqrt{\Delta h / R}}{h_0 + h_1}.$$

Формула Ш. Гелі:

$$p_{cp} = k_f \left(1 + Cf \frac{l_d}{h} \sqrt[4]{v} \right),$$

де k_f – опір лінійної деформації;

C – визначається за графіком;

v – окружна швидкість валків, м/с.

Формула В.О. Ніколаєва:

$$p_{cp} = \sigma_{\phi} \left[1 + 0,48 f_{II} \cdot l_d / h_{cp} \right]$$

Формула В.О. Ніколаєва потребує додаткові розрахунки геометричних параметрів осередку деформації для визначення середнього контактного тиску.

Середня товщина штаби:

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

$$h_{cp5} = \frac{27 + 13,62}{2} = 20,31 \text{ мм};$$

$$h_{cp6} = \frac{13,62 + 8,33}{2} = 9,34 \text{ мм};$$

$$h_{cp7} = \frac{8,33 + 5,61}{2} = 6,97 \text{ мм};$$

$$h_{cp8} = \frac{5,61 + 4,28}{2} = 4,95 \text{ мм};$$

$$h_{cp9} = \frac{4,28 + 3,37}{2} = 3,83 \text{ мм};$$

$$h_{cp10} = \frac{3,37 + 3}{2} = 3,19 \text{ мм}.$$

Коефіцієнт тертя:

$$f = 0,55 - 0,00024 \cdot t;$$

$$f_5 = 0,55 - 0,00024 \cdot 980 = 0,31;$$

$$f_6 = 0,55 - 0,00024 \cdot 935 = 0,33;$$

$$f_7 = 0,55 - 0,00024 \cdot 905 = 0,33;$$

$$f_8 = 0,55 - 0,00024 \cdot 865 = 0,34;$$

$$f_9 = 0,55 - 0,00024 \cdot 845 = 0,35;$$

$$f_{10} = 0,55 - 0,00024 \cdot 800 = 0,36;$$

Середній контактний тиск:

$$p_{cp5} = 132 \left[1 + 0,48 \cdot 0,31 \frac{63,9}{20,31} \right] = 224 \text{ Н/мм}^2;$$

$$p_{cp6} = 158 \left[1 + 0,48 \cdot 0,33 \frac{40,2}{9,34} \right] = 305 \text{ Н/мм}^2;$$

$$p_{cp7} = 176 \left[1 + 0,48 \cdot 0,33 \frac{28,8}{6,97} \right] = 336 \text{ Н/мм}^2;$$

$$p_{cp8} = 187 \left[1 + 0,48 \cdot 0,34 \frac{20,1}{4,95} \right] = 359 \text{ Н/мм}^2;$$

$$p_{cp9} = 201 \left[1 + 0,48 \cdot 0,35 \frac{16,7}{3,83} \right] = 398 \text{ Н/мм}^2;$$

$$p_{cp10} = 195 \left[1 + 0,48 \cdot 0,36 \frac{10,6}{3,19} \right] = 352 \text{ Н/мм}^2;$$

Результати порівняльного аналізу представлені на рисунку 2.17.

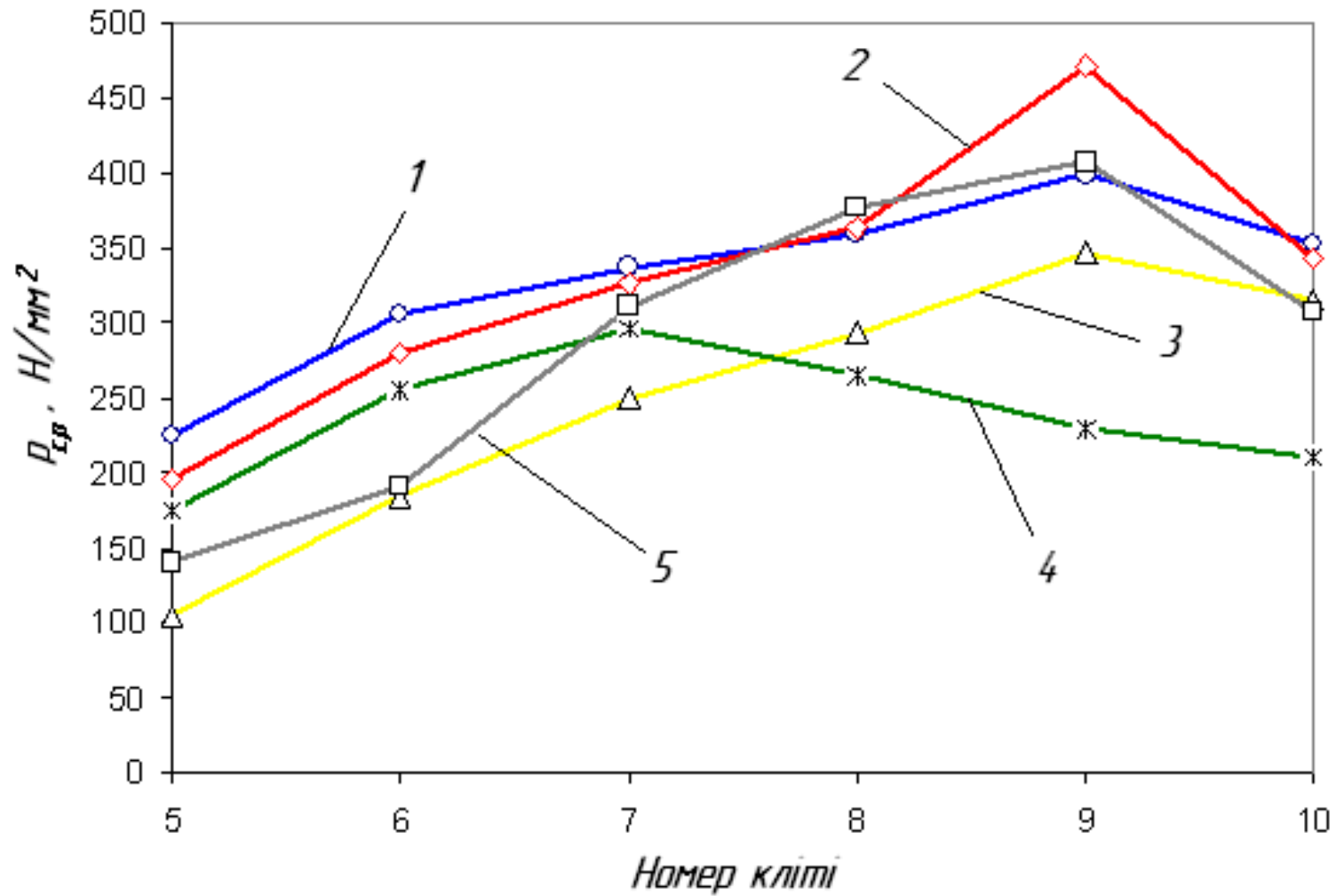


Рисунок 2.17 - Розподіл середнього контактного тиску по клітям розраховане за формулами: 1 – В.О. Ніколаєва; 2 – О.І. Целікова; 3 – С. Екелунда; 4 – Ш. Гелеї; 5 – дослідні дані.

Точність розрахунку середнього контактного тиску по формулах – В.О. Ніколаєва, О.І. Целікова, С. Екелунда та Ш. Гелеї оцінювали відношенням $p_{срi}/p_{срoп}$ ($p_{срi}$ – розрахункове значення середнього контактного тиску по тій або іншій формулі; $p_{срoп}$ – дослідне значення середнього контактного тиску). В результаті аналізу встановлено, що середня величина невідповідності $p_{срi}/p_{срoп}$ (при $p_{срi}/p_{срoп} < > 1$) становить по формулах:

В.О. Ніколаєва – $0,95 \div 1,21$;

О.І. Целікова – $0,96 \div 1,34$;

С. Екелунда – $0,75 \div 1,03$;

Ш. Гелеї – $0,56 \div 1,34$.

На рис. 2.18 представлений порівняльний аналіз відношення $p_{срi}/p_{срoп}$ для різних формул визначення середнього контактного тиску.

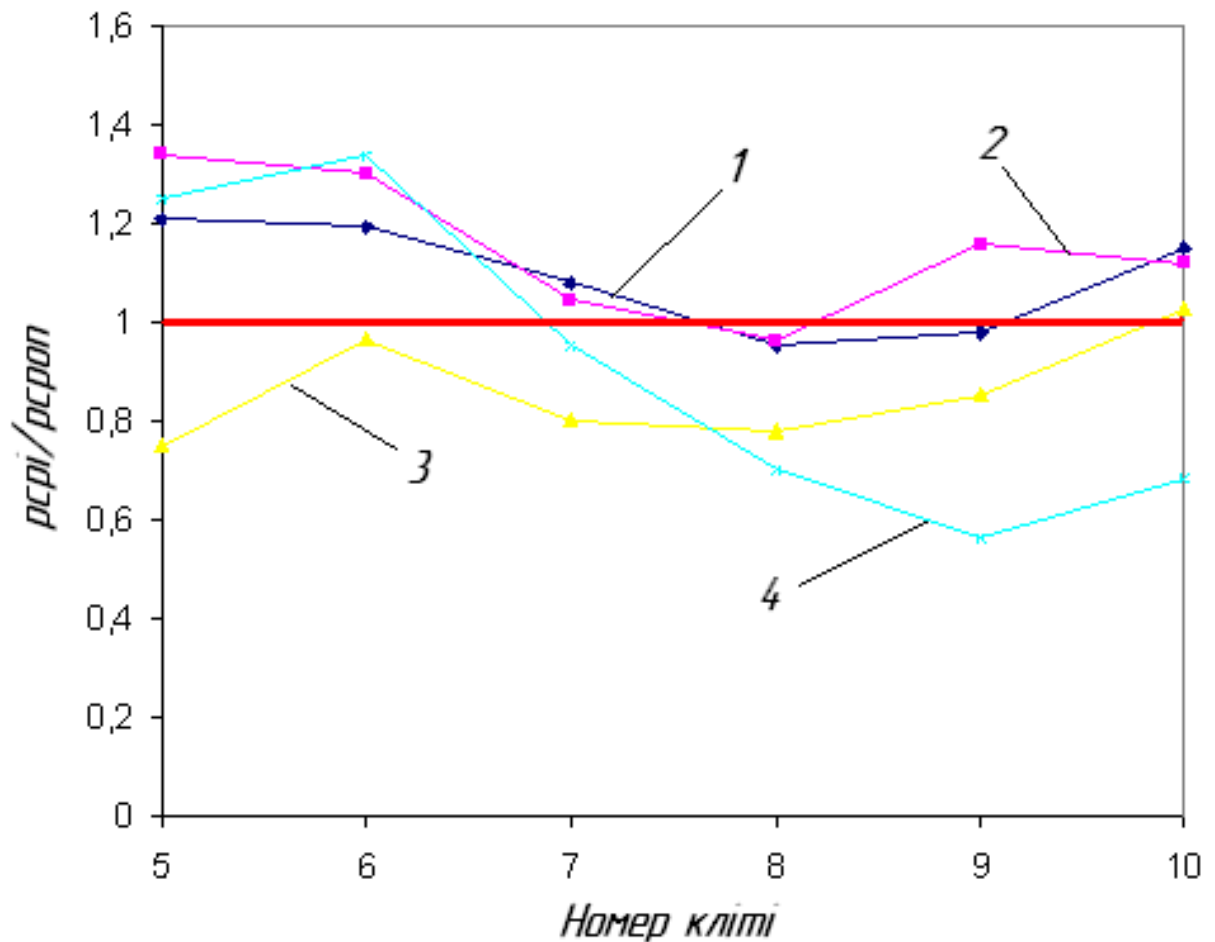


Рисунок 2.18 - Відношення $p_{срi}/p_{срoп}$ для різних формул: 1 – В.О. Ніколаєва; 2 – О.І. Целікова; 3 – С. Екелунда; 4 – Ш. Гелеї;

Менша помилка отримана при розрахунку середнього контактного тиску з використанням розробленої моделі, із застосуванням залежностей визначення напруження течії металу по формулі В.О. Ніколаєва, що забезпечує збіг із дослідними даними в межах 0,95 – 1,21. Це є цілком прийнятним для практичного використання розробленої моделі. Отримана збіжність розрахункових результатів із дослідними пояснюється тим, що дана модель наряду з урахуванням основних факторів, що впливають на напруження течії металу (температури, швидкості та ступеня деформації) ще додатково враховує вплив хімічного складу сталі.

3 ВИЗНАЧЕННЯ НАПРУЖЕННЯ ТЕЧІЇ МЕТАЛУ ЗА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИМИ ДАНИМИ

3.1 Експериментальне визначення напруження течії металу

Проблема моделювання реологічних властивостей ставиться до найбільш важливих і складних завдань теорії обробки металів тиском, тому вивченню закономірностей зміни напруження течії металу завжди приділялася пильна увага. Це відбите у великій кількості робіт (див. наприклад [1-10]). Характерним для сучасного вигляду моделей напруження течії (σ) є розширення набору факторів, що виявляють вплив на цей параметр. Так, до традиційно застосовуваного набору, у який входять хімічний склад сталі, ступінь, швидкість і температура деформації, за останні 10-15 років додалася структура деформованого матеріалу у вигляді середнього діаметра зерна або щільності дислокацій субструктури на початку циклу деформації.

Серед класичних можна виділити ряд робіт спрямованих на визначення середнього значення σ_s у циклі деформації, найбільше часто використовуваних при інженерних розрахунках навантажень на устаткування при гарячій прокатці.

Математична модель, запропонована В.І. Зюзіним [1], відома як метод термомеханічних коефіцієнтів, дозволяє визначити середнє значення напруження течії при базових значеннях термомеханічних параметрів у динамічних випробуваннях, а потім, за допомогою термомеханічних коефіцієнтів результати поширити на всю досліджувану область динамічних випробувань. Значення коефіцієнтів отримані статистичною обробкою результатів випробувань різних марок сталей. Основними недоліками моделі є неможливість моделювання процесів розміцнення, вузьке коло описаних

формально марок сталей, обмеження в діапазонах по швидкості деформації $0,1 \div 100 \text{ c}^{-1}$ і ступеня деформації $0,05 \div 0,3$.

Аналогічної описаної вище є математична модель запропонована Л.В.Андреюком і В.О. Ніколаєвим. [2]. Її відмінною рисою є моделювання середнього опору деформації з урахуванням впливу хімічного складу сталі. Це дозволило використовувати отриману модель у комп'ютерних алгоритмах розрахунків навантажень. Незважаючи на те, що автори [2] розширили розрахунковий діапазон по швидкості до 150 c^{-1} , діапазон по ступеню деформації не змінився. Вузький діапазон ступенів деформації приводить до того, що розрахунки навантажень по запропонованих моделях [1, 2] адекватний лише для перших проходів прокатки, де деформація не перевищує критичної для початку динамічної рекристалізації. Експериментальна перевірка розрахункової величини напруження течії, виконана в роботі [3], по формулі Л.В. Андреюка при деформації $\varepsilon = 0,7$ показала, що відхилення розрахункових даних від дослідних може становити більш 50%.

Я.С. Шварцбарт і ін. запропонували феноменологічні моделі повної кривої плинину, описані в роботах [3,4], у яких виходячи з вистави про двухстадійність процесу деформації (миттєве зміцнення за лінійним законом і одночасне розміцнення в часі) σ_s визначають по рівняннях, що включають від 3 до 11 параметрів, залежно від здатності функції описувати різні криві деформаційного зміцнення. Параметри наведені в табличному виді для ряду марок сталі, швидкостей деформацій і температур, що при використанні моделі приводить до необхідності інтерполяції, ускладнює процес і знижує вірогідність розрахунків.

Математична модель, наведена в роботах [5-7] дозволяє моделювати повну криву плинину вуглецевих сталей і враховує вплив на напруження течії сталі вмісту елементів С, Mn, Si, Mo, Ti, V, Nb. Діапазон хімічних складів охоплений цієї моделлю вже чому реальний діапазон, відповідний до класу вуглецевих сталей у прокатному виробництві. Крім того, у ряді випадків у

сталях утримується фосфор і сіра, які, незважаючи на малий їхній вміст, впливають на величину напруження течії металу.

Метою даного розділу є розробка математичної моделі для розрахунків миттєвих значень напруження течії в широкому діапазоні хімічного складу сталей, що охоплює практично весь сортамент вуглецевих сталей при умовах, характерних для їхньої гарячої прокатки.

Для розробки експериментальної моделі визначення напруження течії металу на рис. 3.1-3.2 наведені криві плинності сталі Ст.3кп, і експериментальні значення (крапки) σ_s при певних значеннях ϵ отримані на сучасному пластометрі Gleeble 3800 [18, 19].

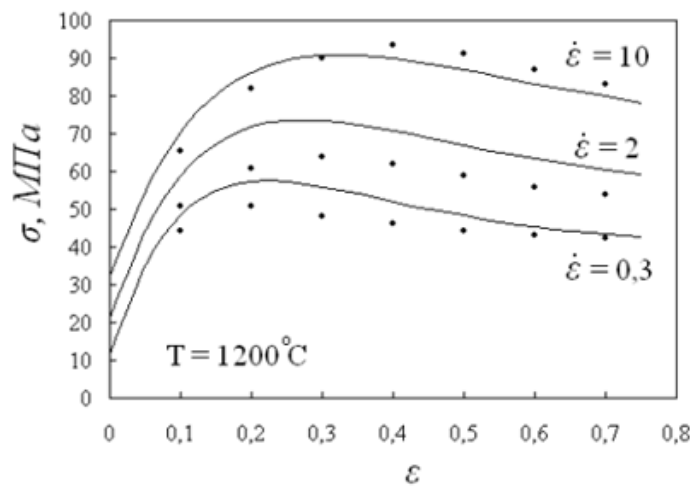


Рисунок 3.1 – Криві плинності сталі Ст.3кп, ($Q=261635$ кДж·моль⁻¹)

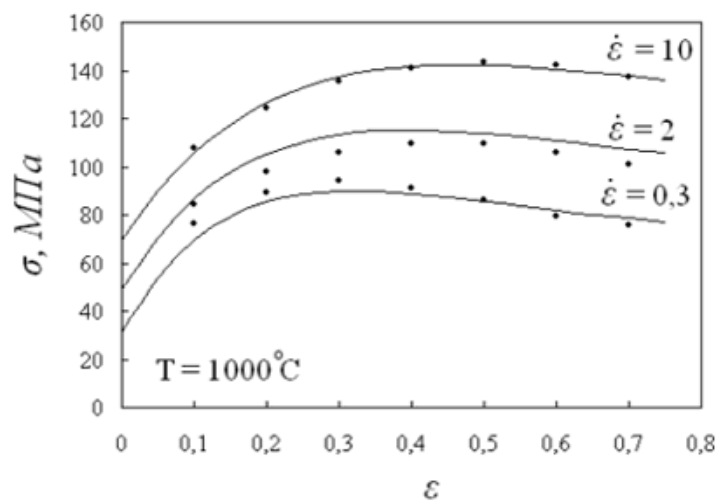


Рисунок 3.2 – Криві плинності сталі Ст.3кп при температурі 1000 °С ($Q=278151$ кДж·моль⁻¹)

Для розрахунків напруження течії металу по запропонованій моделі необхідно визначити термо-кінетичні залежності параметрів σ_y , σ_p , ε_p і ε_x з урахуванням хімічного складу сталі.

Згідно висновків роботи [18] вплив вмісту хімічних елементів на σ_s досить добре відбивається величиною енергії активації деформації Q , що характеризує природу матеріалу й достатньо чутливою до невеликих змін хімічного складу. Крім того, енергія активації входить у параметр Zener-Hollomon (Z), що є комплексним температурно-швидкісним параметром процесу деформації:

$$Z = J \exp [Q / R \cdot T], \quad (3.1)$$

де $R = 8,318 \text{ Дж} \cdot \text{моль}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$ — газова постійна; T — абсолютна температура.

Враховуючи вид зв'язку між σ_s і температурно-швидкісним параметром Z , запропонованим у роботі [10] для процесу гарячої деформації, одержуємо:

$$Z = A \cdot \sinh(a \cdot \sigma_p)^n, \quad (3.2)$$

де A — швидкісна константа деформуємого матеріалу;

a, n — константи математичного узгодження.

Константи a і n визначені за методикою, описаної в роботі [19]. Для певної марки сталі при постійній температурі випробувань із (3.1, 3.2) випливає:

$$\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} = \frac{\sinh(\alpha \cdot \sigma_{p1})^n}{\sinh(\alpha \cdot \sigma_{p2})^n}. \quad (3.3)$$

Виходячи із цього вираження для нев'язання (H) правої й лівої частин рівняння (3.3) для i швидкісних умов випробувань і j досліджуваних марок сталей презентовано у вигляді:

$$H = \sum_{i,j} \left[\left(\frac{\sigma_{pi}}{\sigma_{po}} \right) - \frac{\sinh(\alpha \cdot \sigma_{pi})^n}{\sinh(\alpha \cdot \sigma_{po})^n} \right]^2 \quad (3.4)$$

Результати розрахунків у вигляді графіка залежності H від коефіцієнтів a і n представлені на рис.3.3.

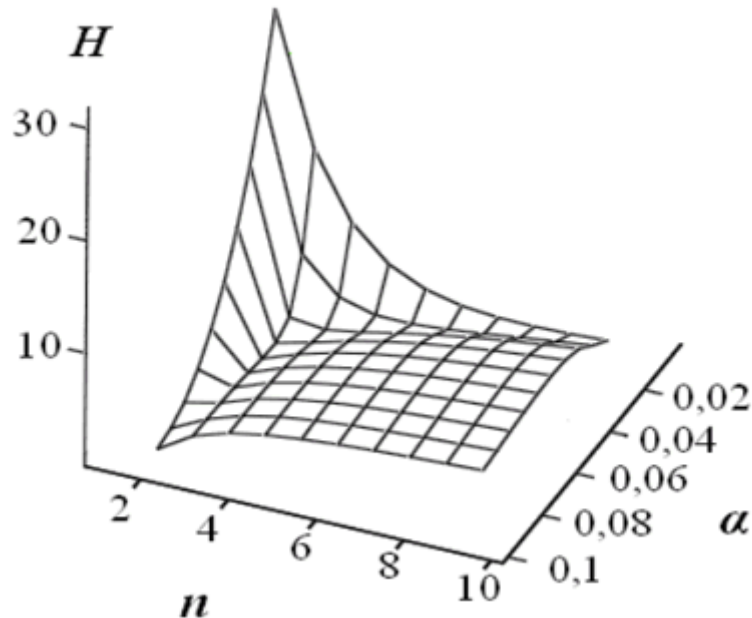


Рисунок 3.3 – Залежність H від коефіцієнтів a і n

З рис. 3.3 видно, що не існує однієї єдиної пари коефіцієнтів, що забезпечує мінімум H , тому коефіцієнт n визначали, прийнявши у вираженні (3.4) $a = 0,01187$, тобто рівним отриманому в роботі [19]. Залежність H від коефіцієнта n у досліджуваній вибірці сталей представлена на рис.3.4.

З рис.3.4 видно, що залежність H від коефіцієнта n має єдиний мінімум, що забезпечує найкраще узгодження параметрів вхідних у рівняння (3.4) при $n = 4,673$. Для визначення Q і A перетворимо вираження (3.2) до виду:

$$\ln[\sinh(\alpha \cdot \sigma_p)] = \frac{Q}{R \cdot n} \cdot \frac{1}{T} - \frac{1}{n} \cdot \ln\left(\frac{A}{\sigma_p^n}\right), \quad (3.5)$$

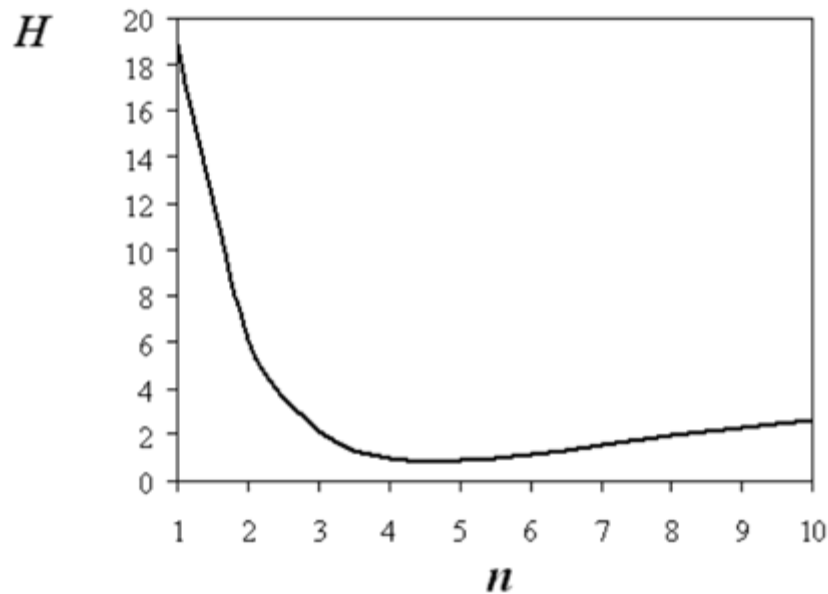


Рисунок 3.4 – Залежність H від коефіцієнта n

Співвідношення (3.5) показує, що відображення залежності $\sigma_s(T)$ у координатах $\ln[\sinh(a \cdot \sigma_p)]$ і $1/T$ дозволяє визначити ступінь адекватності рівняння (3.2) при описі досліджуваної вибірки сталей, а також знайти параметри цього рівняння. Дійсно, якщо параметри Q і A залежать лише від хімічного складу сталі й не залежать від температури й швидкості деформації, то з (3.2) випливають три твердження:

- при постійних значеннях швидкості деформації залежність $\sigma_s(T)$ повинна спрямлятися в координатах $\ln[\sinh(a \cdot \sigma_p)]$ і $1/T$;
- прямі, побудовані для однієї сталі, при різних значеннях J , повинні бути паралельними один одному з кутом нахилу визначальним Q ;
- координата перетинання цих прямих з віссю ординат повинна лінійно залежати від $\ln J$.

При виконанні цих тверджень можна судити про адекватність рівняння (3.2) і по параметрах прямих визначити Q і A для всіх аналізованих сталей.

Зроблений нами аналіз експериментальних даних показав, що рівняння (3.2) адекватно описує досліджувану вибірку сталей. Так, наприклад, на

рис.3.5 представлені експериментальні дані для сталі Ст.3кп, які показують, що ця залежність — лінійна з коефіцієнтом кореляції порядку - 0,98. Нахил прямих практично не залежить від J .

У результаті обробки експерименту отримане регресійне рівняння для енергії активації деформації Q вуглецевих сталей залежно від процентного вмісту хімічних елементів.

$$Q = 308700 + 37100 \cdot \ln(C\%) + 10900 \cdot \ln(C\%)^2 + 27000 \cdot (Si\%) + 8100 \cdot (Mn\%) + 337100 \cdot (Cr\%) + 249900 \cdot (Ni\%) - 119000 \cdot (Cu\%) + 181000 \cdot (V\%) - 288000 \cdot (P\%) - 855000 \cdot (S\%). \quad (3.6)$$

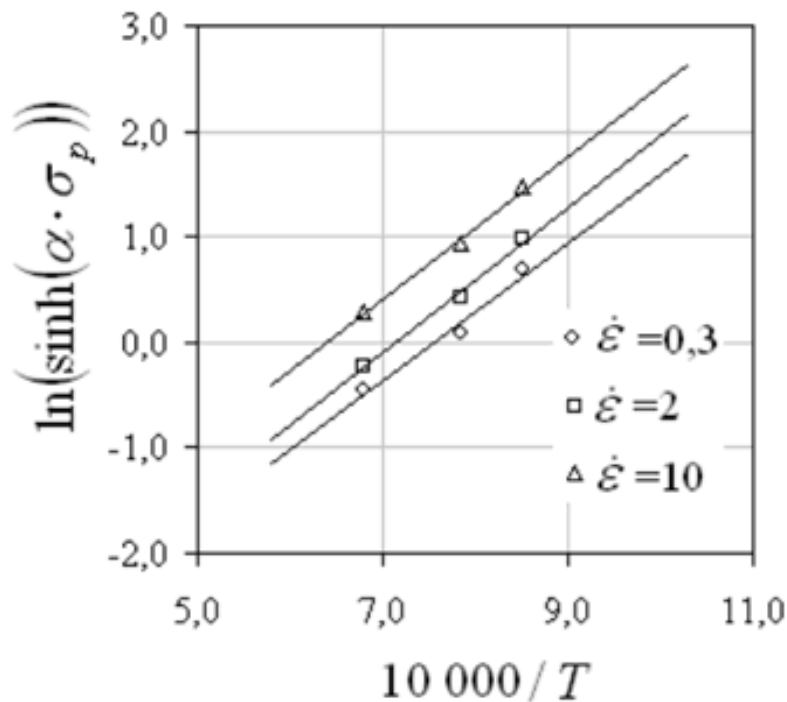


Рисунок 3.5 – Залежність $\sigma_p(T)$ для сталі Ст.3кп за даними роботи [9]

На рис.3.6 представлено порівняння величин Q , отриманих по експериментальним кривим плинину металу й Q розрахованої по рівнянню (3.6), з якого випливає, що запропонована залежність добре описує експериментальні дані, при цьому коефіцієнт кореляції рівний 0,994.

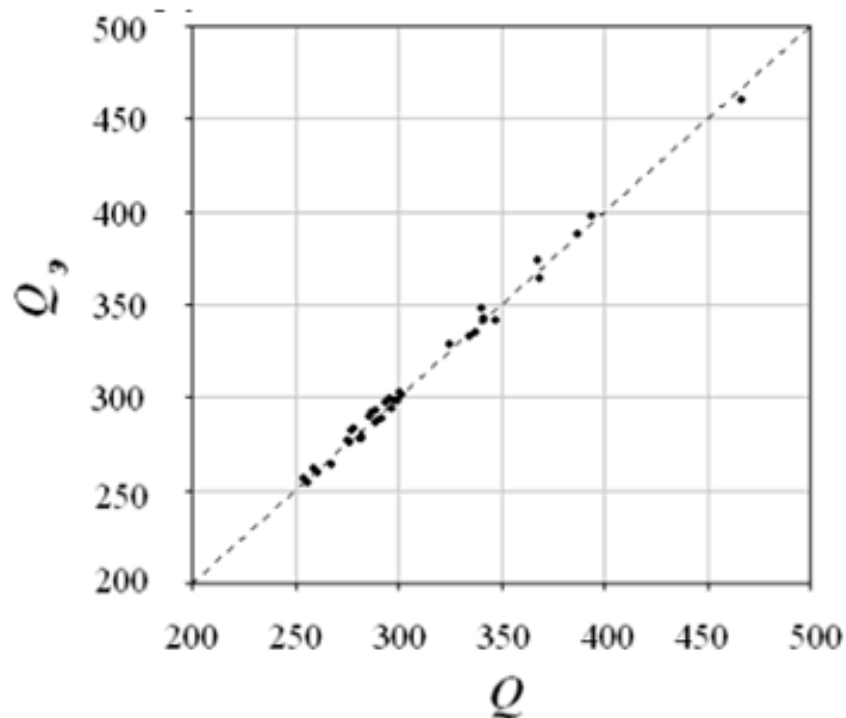


Рисунок 3.6 – Зіставлення експериментальної $Q_{\text{э}}$ й розрахункової Q енергії активації (кдж·моль⁻¹)

У роботі [19] параметр A описаний як функція від Q , а також вмісту $C\%$ і $Nb\%$. Необхідність доповнення додаткового впливу цих елементів, очевидно, обумовлена неточним описом впливу цих елементів на Q . Порівняння значень A і Q показує, що ці величини досить тісно зв'язані простій експонентною залежністю (рис.3.7):

$$A = 0,146 \cdot \exp(9,1 \cdot 10^{-5} \cdot Q). \quad (8)$$

Порівняння розрахованих по запропонованій залежності значень коефіцієнтів A відповідає експериментальним даним з коефіцієнтом кореляції 0,964.

У якості експериментальних даних, використовуваних для одержання залежностей параметрів, що входять у деформаційну модель σ_s , використовували криві плинності, представлені в роботі [18], отримані на пластометре стиску.

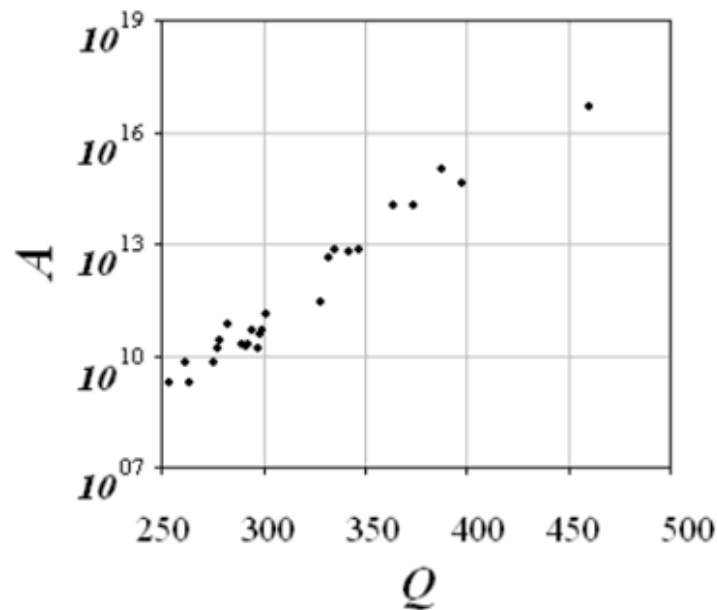


Рисунок 3.7 – Константи A , s^{-1} с Q , (кДж·моль⁻¹)

Згідно з рекомендаціями, наведеними в роботах [18, 19], реакція сталі на умови деформації при гарячій прокатці щонайкраще відбивається безрозмірним параметром Z/A .

Особливий інтерес представляють деформаційні параметри ε_r і ε_x , тому що вони являють собою величини деформації, що характеризують момент початку динамічної рекристалізації й кінця динамічного повернення відповідно. Загальноприйнятий [18, 19] вид залежності даних параметрів містить у собі як Z/A , так і розмір вихідного аустенітного зерна. Однак, внаслідок відсутності даних по розміру зерна в роботі [18], визначити вплив хімічного складу сталі й температури нагрівання на розмір вихідного зерна не представляється можливим. Тому дані деформаційні параметри оброблені також від співвідношення Z/A .

Регресійний аналіз даних роботи [18] дозволив одержати наступні рівняння:

$$\sigma_p = 72,06 \cdot (Z/A)^{0,131},$$

$$\sigma_y = 51,66 \cdot (Z/A)^{0,149},$$

$$\varepsilon_x = 0,193 \cdot (Z/A)^{0,112},$$

$$\varepsilon_p = 0,268 \cdot (Z/A)^{0,107}.$$

3.2 Визначення енергосилових параметрів прокатки

До енергосилових параметрів прокатки відносять силу, крутний момент і потужність прокатки, які визначаються за формулами [1]:

$$P = p_{cp} \cdot B_{cp} \cdot l_d, \text{ МН};$$

$$M = P \cdot \psi \cdot l_d, \text{ МН} \cdot \text{м};$$

$$N = 2 \cdot 960 \cdot M \cdot v / R, \text{ кВт},$$

де P , M , $N_{пр}$ – сила, крутний момент і потужність при пластичної деформації; середнє нормальне контактне напруження (Н/мм^2);

B_{cp} – середня ширина штаби (м);

l_d – довжина дуги контакту (м);

ψ – коефіцієнт положення рівнодіючої сил в осередку деформації;

v – окружна швидкість валків (м/с);

R – радіус валків (м).

Сила прокатки за даними розрахунку p_{cp} по формулі В.О. Ніколаєва:

$$P_5 = 224 \cdot 1100 \cdot 63,9 \cdot 10^{-6} = 15,77 \text{ МН};$$

$$P_6 = 305 \cdot 1100 \cdot 40,2 \cdot 10^{-6} = 13,47 \text{ МН};$$

$$P_7 = 336 \cdot 1100 \cdot 28,8 \cdot 10^{-6} = 10,66 \text{ МН};$$

$$P_8 = 359 \cdot 1100 \cdot 20,1 \cdot 10^{-6} = 7,95 \text{ МН};$$

$$P_9 = 398 \cdot 1100 \cdot 16,7 \cdot 10^{-6} = 7,3 \text{ МН};$$

$$P_9 = 352 \cdot 1100 \cdot 10,6 \cdot 10^{-6} = 4,12 \text{ МН}.$$

Коефіцієнт положення рівнодіючої сил в осередку деформації:

$$\psi = 0,5 \left(l_d / h_{cp} \right)^{-0,092};$$

$$\psi_5 = 0,5(3,14)^{-0,092} = 0,45;$$

$$\psi_6 = 0,5(4,30)^{-0,092} = 0,44;$$

$$\psi_7 = 0,5(4,13)^{-0,092} = 0,44;$$

$$\psi_8 = 0,5(4,07)^{-0,092} = 0,44;$$

$$\psi_9 = 0,5(4,36)^{-0,092} = 0,44;$$

$$\psi_{10} = 0,5(3,34)^{-0,092} = 0,45.$$

Момент прокатки:

$$M_5 = 15,77 \cdot 0,45 \cdot 0,0639 = 0,453 \text{ МН}\cdot\text{м};$$

$$M_6 = 13,47 \cdot 0,44 \cdot 0,0402 = 0,237 \text{ МН}\cdot\text{м};$$

$$M_7 = 10,66 \cdot 0,44 \cdot 0,0288 = 0,135 \text{ МН}\cdot\text{м};$$

$$M_8 = 7,95 \cdot 0,44 \cdot 0,0201 = 0,070 \text{ МН}\cdot\text{м};$$

$$M_9 = 7,3 \cdot 0,44 \cdot 0,0167 = 0,053 \text{ МН}\cdot\text{м};$$

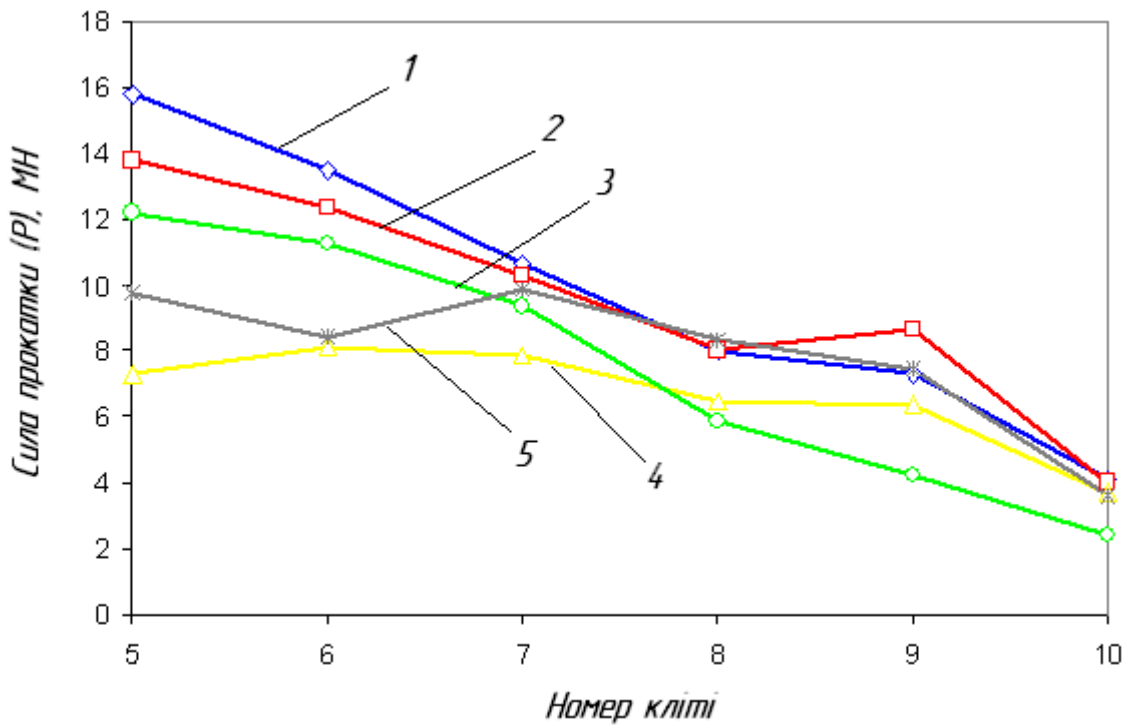
$$M_{10} = 4,12 \cdot 0,45 \cdot 0,0106 = 0,020 \text{ МН}\cdot\text{м}.$$

Аналогічно проводимо розрахунки для визначення енергосилових параметрів прокатки за даними розрахунку p_{cp} по формулам О.І. Целікова, С. Екелунда, Ш. Гелеі та дослідними даними.

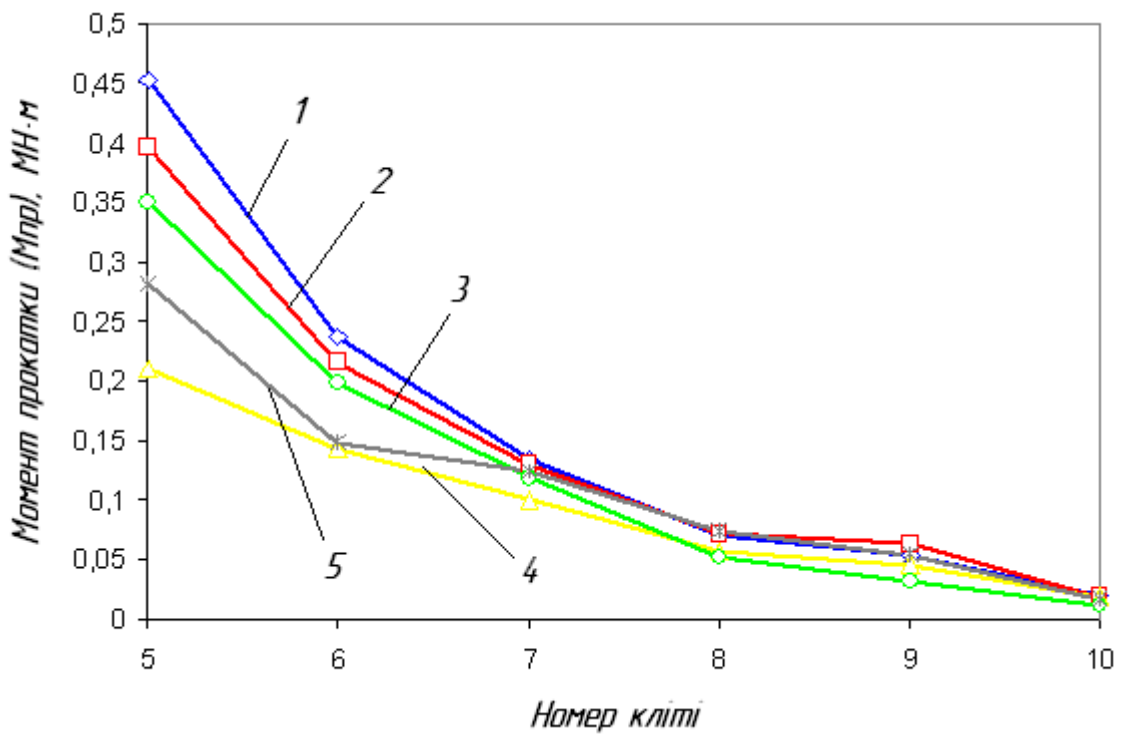
Результати розрахунку заносимо до таблиці 3.1. Результати порівняльного аналізу енергосилових параметрів прокатки (сила прокатки та момент) визначені за різними методами розрахунку середнього контактного тиску представлені на рис. 3.8.

Таблиця 3.1 – Результати розрахунку енергосилових параметрів прокатки за різними формулами визначення середнього контактного тиску

Номер кліті	В.О. Ніколаєв		О.І. Целіков		С. Екелунд		Ш. Гелеї		Дослідні дані	
	Р, МН	М, МН·м	Р, МН	М, МН·м	Р, МН	М, МН·м	Р, МН	М, МН·м	Р, МН	М, МН·м
5	15,77	0,453	13,77	0,396	7,31	0,210	12,19	0,350	9,78	0,281
6	13,47	0,237	12,33	0,216	8,14	0,143	11,27	0,198	8,44	0,148
7	10,66	0,135	10,31	0,130	7,89	0,100	9,38	0,119	9,87	0,125
8	7,95	0,070	8,03	0,071	6,49	0,057	5,86	0,052	8,35	0,074
9	7,3	0,053	8,63	0,063	6,36	0,046	4,20	0,031	7,47	0,054
10	4,12	0,020	4,01	0,019	3,68	0,018	2,44	0,012	3,59	0,017



а



б

Рисунок 3.8 – Сила прокатки (а) і момент прокатки (б) розраховані за формулами визначення p_{cp} : 1 – В.О. Ніколаєва; 2 – О.І. Целікова; 3 – С. Екелунда; 4 – Ш. Гелеі; 5 – дослідні дані.

3.3 Визначення витрат електроенергії

По отриманим даним режиму деформації та енергосилових параметрів розрахуємо розрахунок питомої витрати електроенергії на стані НШСГП 1680 по формулі:

$$W_{\Pi} = \frac{M_{\text{пр}}/h}{3600 \cdot \gamma \cdot R \cdot B}$$

$M_{\text{пр}}$ – момент прокатки, МН·м;

$\gamma=7,85$

R – радіус валків, м;

B – ширина розкату, м.

Визначаємо питому витрату електроенергії за експериментальними даними:

$$W_{\Pi(5)} = \frac{281 / 0,01362}{3600 \cdot 7,85 \cdot 1,1 \cdot 0,305} = 2,177 \text{ кВт} \cdot \text{годин} / \text{т};$$

$$W_{\Pi(6)} = \frac{148 / 0,00833}{3600 \cdot 7,85 \cdot 1,1 \cdot 0,305} = 1,876 \text{ кВт} \cdot \text{годин} / \text{т};$$

$$W_{\Pi(7)} = \frac{125 / 0,00561}{3600 \cdot 7,85 \cdot 1,1 \cdot 0,305} = 2,345 \text{ кВт} \cdot \text{годин} / \text{т};$$

$$W_{\Pi(8)} = \frac{74 / 0,00428}{3600 \cdot 7,85 \cdot 1,1 \cdot 0,305} = 1,822 \text{ кВт} \cdot \text{годин} / \text{т};$$

$$W_{\Pi(9)} = \frac{54 / 0,00337}{3600 \cdot 7,85 \cdot 1,1 \cdot 0,305} = 1,700 \text{ кВт} \cdot \text{годин} / \text{т};$$

$$W_{\Pi(6)} = \frac{17 / 0,003}{3600 \cdot 7,85 \cdot 1,1 \cdot 0,305} = 0,600 \text{ кВт} \cdot \text{годин} / \text{т}.$$

Визначаємо сумарну питому витрату електроенергії на НШСГП 1680 за експериментальними даними:

$$\sum W_{\Pi} = W_{\Pi(1)} + W_{\Pi(2)} + W_{\Pi(3)} + \dots + W_{\Pi(N)}$$

$$\sum W_{\Pi} = 2,177 + 1,876 + 2,345 + 1,822 + 1700 + 0,600 = 10,520 \text{ кВт}\cdot\text{годин/т.}$$

Визначаємо питому витрату електроенергії за даними визначення середнього контактного тиску по формулі В.О. Ніколаєва:

$$W_{\Pi(5)} = \frac{453 / 0,01362}{3600 \cdot 7,85 \cdot 1,1 \cdot 0,305} = 3,510 \text{ кВт}\cdot\text{годин/т.};$$

$$W_{\Pi(6)} = \frac{237 / 0,00833}{3600 \cdot 7,85 \cdot 1,1 \cdot 0,305} = 2,995 \text{ кВт}\cdot\text{годин/т.};$$

$$W_{\Pi(7)} = \frac{135 / 0,00561}{3600 \cdot 7,85 \cdot 1,1 \cdot 0,305} = 2,533 \text{ кВт}\cdot\text{годин/т.};$$

$$W_{\Pi(8)} = \frac{70 / 0,00428}{3600 \cdot 7,85 \cdot 1,1 \cdot 0,305} = 1,734 \text{ кВт}\cdot\text{годин/т.};$$

$$W_{\Pi(9)} = \frac{53 / 0,00337}{3600 \cdot 7,85 \cdot 1,1 \cdot 0,305} = 1,661 \text{ кВт}\cdot\text{годин/т.};$$

$$W_{\Pi(6)} = \frac{20 / 0,003}{3600 \cdot 7,85 \cdot 1,1 \cdot 0,305} = 0,688 \text{ кВт}\cdot\text{годин/т.}$$

Визначемо сумарну питому витрату електроенергії на НШСГП 1680 по даним В.О. Ніколаєва:

$$\sum W_{\Pi} = 3,510 + 2,995 + 2,533 + 1,734 + 1,661 + 0,688 = 13,121 \text{ кВт}\cdot\text{годин/т.}$$

Визначимо різницю між сумарними питомими витратами електроенергії:

$$\sum \Delta W_{\Pi} = \sum W_{\Pi(\text{до})} - \sum W_{\Pi(\text{після})}$$

$$\sum \Delta W_{\Pi} = 13,121 - 10,520 = 2,601 \text{ кВт}\cdot\text{годин/т.}$$

Аналогічно розраховуємо сумарну питому витрату електроенергії на НСХП 1680 за формулами О.І. Целікова, С. Екелунда та Ш. Гелеї.

За даними О.І. Целікова:

$$\sum W_{\Pi} = 3,066 + 2,741 + 2,451 + 1,751 + 1,965 + 0,670 = 12,644 \text{ кВт}\cdot\text{годин/т.}$$

Визначимо різницю між сумарними питомими витратами електроенергії:

$$\sum \Delta W_{\Pi} = 12,644 - 10,520 = 2,124 \text{ кВт}\cdot\text{годин/т.}$$

За даними С. Екелунда:

$$\sum W_{\Pi} = 1,627 + 1,310 + 1,375 + 1,416 + 1,448 + 0,615 = 7,790 \text{ кВт}\cdot\text{годин/т.}$$

Визначимо різницю між сумарними питомими витратами електроенергії:

$$\sum \Delta W_{\Pi} = 10,520 - 7,790 = 2,730 \text{ кВт}\cdot\text{годин/т.}$$

За даними Ш. Гелеї:

$$\sum W_{\Pi} = 8,877 \text{ кВт}\cdot\text{годин/т.}$$

Визначимо різницю між сумарними питомими витратами електроенергії:

$$\sum \Delta W_{\Pi} = 10,520 - 7,633 = 2,887 \text{ кВт}\cdot\text{годин/т.}$$

На рис. 3.9 показана порівняльна діаграма сумарних питомих витрат електроенергії розрахована за різними методами визначення середнього контактного тиску.

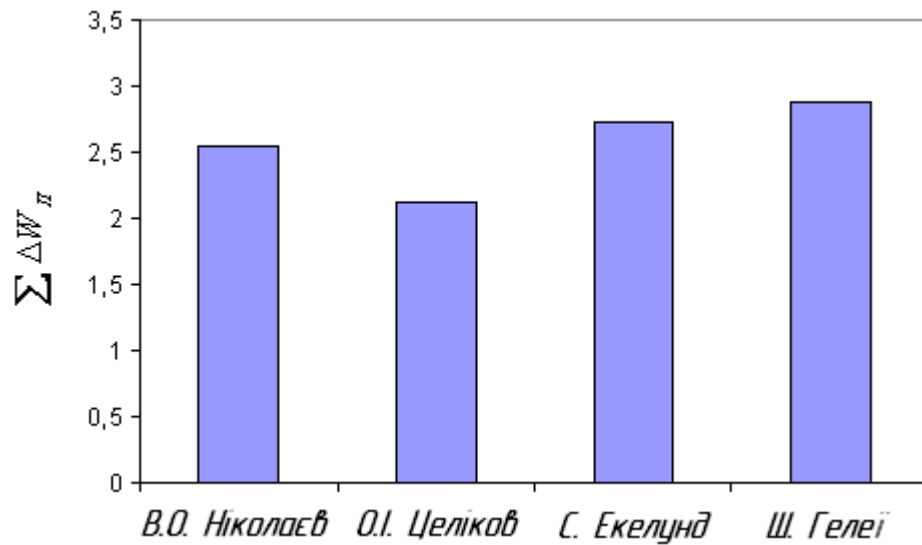


Рисунок 3.9 – Порівняльна діаграма сумарних питомих витрат електроенергії розрахована за різними методами визначення середнього контактної тиску.

Таким чином найбільш наближеними формулами з визначення середнього контактної тиску за порівнянням сумарних питомих витрат електроенергії є формули В.О. Ніколаєва та О.І. Целікова.

4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ТЕХНОГЕННА БЕЗПЕКА

4.1 Аналіз потенційно небезпечних і шкідливих факторів виробничого середовища

Цех гарячої прокатки металу у своєму составі має ділянки з різними шкідливими умовами праці. Одним з основних ділянок цеху є стан гарячої прокатки, на якому роблять гарячу обробку металу тиском. Стан гарячої прокатки також має безліч ділянок: пічна, чорнова і чистова група клітей, хвостова частина.

Технологічний процес на НШСГП 1680 механізований і автоматизований, операції з металом здійснюються без особистої участі обслуговуючого персоналу.

На виробництві застосовуються наступні технічні засоби забезпечення безпеки праці: огорожувальні пристрої, що створюють перешкоду між людиною і небезпечним фактором, що надійно охороняють працюючого незалежно від правильності або не правильності його дій; запобіжні пристрої на випадок аварійних режимів – відключення устаткування при порушенні контрольованого параметра (температури, тиску, переміщення, величини струму або напруги, зусилля); гальмові пристрої для швидкої зупинки частин, що рухаються, машин і устаткування; блокувальні пристрої, що забезпечують фіксацію частин механізму в певному стані; сигналізація перед наступаючою або небезпекою, що наступила (світлова, звукова, кольорова і знакова). Велике значення має правильний розподіл функції між людиною і машиною для зменшення ваги праці.

До основних небезпечних і шкідливих факторів у цеху гарячої прокатки ставляться [22-24]:

- інфрачервоне випромінювання гарячого металу, під впливом якого робітник проводить 83,3% усього робочого часу і яке при даних роботах впливає на органи зору людини (300 - 4000 Вт/м);

- шкідливі хімічні речовини такі як: ангідрид хромовий, оксид марганцю, акролеїн, сірководень, оксид вуглецю і мінеральні масла, які протягом 83,3% робітника часу впливають на внутрішні органи людини;

- пил, що виділяється при вигорянні оксиду металу. Пил є одним з основних шкідливих факторів, які протягом 91,4% робітника часу впливають на слизову оболонку органів подиху, що приводять к захворюванням.

Оцінка факторів виробничого середовища наведена в таблиці 4.1.

Для зменшення впливу інфрачервоного випромінювання на органи зору робітників раціонально використати світлові екрани (фільтри), які безпосередньо встановлюються на постах чорнової і чистової групи, де оператори і вальцювальники візуально контролюють процес прокатки.

З таблиці 4.1 видно, що робота операторів, вальцювальників відноситься до робіт зі шкідливими і небезпечними умовами праці. Відповідно до гігієнічної класифікації умов праці вальцювальник має право на пільгових умовах на: пенсію по старості на пільгових умовах за списком №1; додаткова відпустка 24 дня; надбавка до зарплати 24%, молоко. Ст. 141 КЗОТ містить загальні вказівки про порядок видачі за рахунок підприємства спецодягу і запобіжних пристосувань (окуляри, маски, респіратори, мило і т.п.) всім працюючої на особливо шкідливих роботах з перебуванням у ненормальній температурі.

Таблиця 4.1 – Оцінка факторів виробничого і трудового процесу
вальцювальника

№ п/п	Фактори виробничого середовища і трудового процесу	Нормал. значення	Факт. значення	3 класи шкідливих і небезпечних умов праці			Час дії фактора за зміну,%
				I ст.	II ст.	III ст.	
1	2	3	4	5	6	7	8
1.	Шкідливі хімічні речовини, мг/м ³ : <u>I клас небезпеки</u> Ангідрид хромовий Оксид марганцю <u>II клас небезпеки</u> Акролеїн <u>III-IV клас небезпеки</u> Ангідрид сірчистий Вуглецю оксид	 0,01 0,05 0,2 10 20	 0,06 0,39 0,66 16,83 25	 1,6 1,3	 3,3	 6,0 7,8	 90 90 90 90 90
2.	Масла мінеральні Пил переважно фіброгенної дії, мг/м ³	5 4	6,78 26,3	 1,4		6,6	90 90
3.	Вібрація (загальна й локальна), дБ						
4.	Шум, дБА	80	105			25	100
5.	Інфразвук, дБА						
6.	Ультразвук, дБА						

4.2 Розробка мір захисту від впливу небезпечних і шкідливих виробничих факторів

Перелік технічних і санітарно-гігієнічних мір захисту виробничої сфери і робочих місць наведені в таблиці 4.2.

Таблиця 4.2 – Міри захисту від впливу небезпечних і шкідливих факторів

Небезпечний або шкідливий фактор	Захисний пристрій	Принцип дії і призначення	Місце установки
Підвищений рівень шуму	Звукоізолюючі kabіни і перегородки	Звукопоглинання і відбиття, ізоляція органів слуху	Біля джерел шуму, у приміщенні оператора
Паровиделення	Витяжна вентиляція	Примусовий механічний відсос пари, що утворилася	Над станом
Небезпечний рівень струму	Ізоляція і огороження струмоведучих частин; заземлення й блокування	Захист від дотику до струмоведучих частин, захист від дотику до металевих частин устаткування. Захист від високих рівнів струму	Навколо струмоведучих частин, біля корпусів електродвигуна
Рухливі механізми	Запобіжники плавкі, пускачі дистанційні Кожуха, сітки, запобіжні	Захист від зіткнення із частинами, що рухаються, і механізмами.	На панелях пульта керування

Метал що переміщається	пристрої Огородження і розмітка небезпечної зони. Знаки безпеки	Захист від травм під час руху й переміщення металу	На території небезпечної зони
------------------------	--	--	-------------------------------

4.3 Технічні рішення по виробничій санітарії

Площадка, на якій розташований прокатний цех, обрана з умов прямого влучення сонячних променів, природного провітрювання і відводу стічних і поверхневих вод.

Між житловою зоною і заводом передбачається санітарна зона, розміри якої залежать від потужності технологічного процесу, характеру і кількості шкідливих речовин, що виділяються у навколишнє середовище, шумів і інших шкідливих факторів. Міри, що зменшують їхній несприятливий впливи на навколишнє середовище (описані нижче) і які забезпечують дотримання вимог відносно шкідливих речовин в атмосферному повітрі населених пунктів, і робочій зоні приміщень.

Освітлення у цеху

У прокатному цеху застосовується природне і штучне освітлення. Природне освітлення забезпечується одночасно через світлові прорізи в бічних стінах і ліхтарі.

Згідно ДНБ В. 2.5-28-2006 "Природне і штучне освітлення" роботи, що виконуються персоналом при прокатці слябів, відносяться до 8 розряду зорових робіт. У приміщеннях цеху для освітлення застосовують, як правило, газорозрядні лампи. Типи світильників вибирають залежно від умов їхньої

роботи і вимог до якості освітлення. Для загального освітлення застосовують світильники «Альфа». У місцях підвищеної небезпеки, де освітленість при системі загального висвітлення становить 150 лк і менш, норму освітленості збільшують на 1 розряд [25].

У випадку виходу з ладу робочого освітлення використовують аварійне освітлення, що забезпечує можливість продовження роботи або евакуації персоналу. У прокатному цеху установка аварійного освітлення обов'язкова на пості керування прокатним станом; пунктах керування системами водопостачання, вентиляції і каналізації, у машинному залі і диспетчерському пункті.

Найменша освітленість робочих поверхонь потребуючі обслуговування при аварійних режимах становить 5% освітленості, нормованої для загального робочого освітлення, але не менш 2лк. Аварійне освітлення для евакуації персоналу, проходів і сходів не менш 0,5лк.

Для виробничих приміщень, у яких проводяться точні роботи, установлені три розряди з мінімальними нормами при комбінованому висвітленні лампами накаливання: I розряд – для робіт, що вимагають розрізнення деталей розміром 0,1мм і менш - 400 –1500лк; II розряд – для робіт потребуюче розрізнення деталей розміром більше 0,1 до 0,3мм - 300 – 1000лк; III розряд – для робіт потребуючого розрізнення деталей розміром більше 0,3 до 1мм - 200 – 500лк; IV розряд – для робіт малої точності, що вимагають розрізнення деталей розміром від 1,0 до 10мм - 100 –150лк; V розряд – для грубих робіт потребуючого розрізнення деталей розміром більше 10мм – 100лк [23].

Мікроклімат

Для обігріву цеху в зимову пору року уздовж стін на ділянках, де працюють люди, установлене водяне опалення. Для перемішування повітря встановлені калорифери типу СТД-300. Вони розташовані так, щоб від них струмись примусової подачі повітря сквзала уздовж прольоту.

Для огороження припливу холодного повітря під час в'їзду і виїзду транспорту над воротами встановлені для створення завіси з теплого повітря. Всі обігрівальні установки забезпечують температуру повітря в приміщенні в межах 16-20 °С.

Вентиляція виробничих приміщень забезпечує потрібні гігієнічні якості повітря. У цеху спостерігається зайве теплове виділення від нагрітого металу, виділення пилю – незначне. Ділянка стана НШСГП 1680 ставиться до Іа групи: для забезпечення нормального повітрообміну в стінах цеху передбачені три ряди отворів для природної вентиляції [24]:

1ряд – на рівні 1,5м від підлоги;

2ряд – на рівні 4,5м від підлоги;

3ряд – на рівні 8,5м від підлоги.

Для видалення зайвого тепла і вентиляції, у прольоті стана передбачені витяжні ліхтарі. У літню пору для природної вентиляції використовуються також відкриті ворота. Але оскільки джерел тепла багато (нагрівальна піч, нагрітий метал і т.д.), те передбачена система приточної вентиляції.

4.4 Електробезпека

Вплив електричного струму на організм може викликати небезпечні для здоров'я наслідки і навіть привести до смерті. Небезпека збільшується тим, що наявність електричної напруги не може бути безпечно виявлена за допомогою наших органів почуттів. Імовірність смертельного результату при поразках електричним струмом велика. Великий вплив робить зовнішнє середовище.

Становий проліт відповідно до вимог ПУЕ, ставиться до зони класу В-16 – це зона, розташовані в приміщеннях, у яких при нормальній експлуатації вибухонебезпечні суміші горючих газів або пар ЛВЖ із повітрям не утворюються, а можливі тільки в результаті аварій або несправностей.

Небезпека поразки електричним струмом виникає при експлуатації несправних електроустановок, порушенні ізоляції на силових і контрольних кабелях, електродвигунах, командоапаратах, кінцевих вимикачах .

Фактичне значення струму на ділянці $I = 5,9 \text{ А}$, напруги відповідно $U = 220\text{-}380 \text{ В}$.

Однієї з основних причин поразки електричним струмом є пробій ізоляції.

При ушкодженні ізоляції електроустаткування напруга може випадково з'явитися на металевих частинах (на корпусі, кожусі, станині: на броні кабелю і т.д.), які в нормальному положенні не перебувають. При сполученні з металевими конструкціями, які оказались під напругою, виникає небезпека поразки електричним струмом.

Нещасні випадки можливі також при впливі електричного струму через дугу; безпосереднім зіткненні з відкритими струмоведучими частинами і проводами: випадковому, не викликаному виробничою необхідністю, або вплив при помилковій подачі напруги під час ремонтів і оглядів; при дотику до металевих частин устаткування, які випадково оказались під напругою; при торканні струмоведучих частин за допомогою предметів з низьким опором ізоляції; при зіткненні з будівельними деталями конструкцією, які випадково оказались під напругою; при впливі крокових напруг і др.

Небезпека електричних поразок створює різноманітне устаткування: електричний привод (включаючи пускорегулюючу апаратури), електроустаткування під'їмо-транспортних пристроїв, електрифікований внутрішньозаводський транспорт, зварювальні апарати, високочастотні і освітлювальні установки, переносний інструмент і т.д.

Міри захисту від поразки електричним струмом

У цехах з підвищеною температурою повітря використовують наступні міри захисту від поразки електричним струмом:

а) захист від дотику до струмоведучих частин;

- б) захист від дотику до устаткування, яке випадково оказались під напругою;
- в) захист від струмів надмірної сили (короткого замикання).

У першому випадку застосовують огороження і ізоляцію струмоведучих частин, розміщення їх на недоступній висоті, використання зниженої напруги.

У другому випадку, найпоширенішому, конструктивно простій і дуже ефективним заходом захисту є заземлення. Захисні функції заземлюючого пристрою складаються в зниженні до безпечної величини напруги щодо землі на металевих частинах, які оказались випадково під напругою, що дозволяє усунути небезпека поразки дотику до них людини.

Приєднання корпусів і інших конструктивних металевих частин електроустаткування до заземлюючого нульового проведення; називається захисним зануленням. Ціль захисного занулення перетворити пробій на корпус у коротке замикання між фазним і нульовим проведеннями, викликати тим самим протікання великого струму через захист і швидко відключити ушкоджене встаткування від мережі.

Пристрій, що автоматично відключає електроустановку за час не більше 0,2 с, при виникненні в ній струмів великої сили, у тому числі з появою напруги на корпусі і інших металевих частинах, називається захисним відключенням.

При обслуговуванні електроустановок застосовують основні і допоміжні захисні засоби. До основного відносяться захисні засоби, ізоляція яких надійно витримує робочу напругу установки і при користуванні якими допускається безпосередній дотик до струмоведучих частин, що перебуває під напругою. До додаткового ставляться засоби захисту, що підсилюють дію основних засобів і які забезпечують безпеку при напрузі дотику і кроковій напрузі. До засобів індивідуального захисту відносяться: ізолююча штанга, що ізолюють кліщі, діелектричні боти, діелектричні рукавички, що ізолюють підставки і ін.

Вибір схеми мережі

Прокатний цех відноситься до приміщень із підвищеною небезпекою поразки людей електричним струмом. Тут діють такі шкідливі фактори виробничого середовища: висока температура повітря (перевищує 32⁰ С) запиленість повітря (перевищує в 2,13 рази ГДК), струмопровідний пил, шум, інфрачервоне випромінювання. З огляду на, вищевикладене, зробимо вибір мережі і покажемо на розрахунках, що вона задовольняє умовам безпеки.

Схема мережі, а отже і режим нейтралі джерела струму, що живлять цю мережу, вибираються по технологічних вимогах, а також за умовами безпеки.

По технологічних вимогах і за умовами безпеки самої оптимальної є чотирьохпроводна мережа із глухозаземленою нейтраллю, тому що вона дозволяє використати дві робочі напруги – лінійну і фазну. Від чотирьохпроводної мережі 380 В можна житися як силове навантаження – трьохфазне або однофазну, включаючи її між фазними проводами на лінійну напругу 380 В, так і освітлювальну, включаючи її між фазним і нульовим проведеннями, тобто на фазну напругу 220 В. При цьому досягається значне здешевлення електроустановки в цілому завдяки застосуванню меншого числа трансформаторів і меншого перетину проводів [25].

4.5 Заходи щодо пожежної та техногенної безпеки

Приміщення цеху по ОНТП 24-86 відноситься до категорії «Г» по пожежобезпечності, це викликано тим, що в цеху має місце наявність пожежонебезпечних факторів, пов'язаних із застосуванням газових сумішей IV групи для опалення нагрівальних печей, а також із застосуванням його при порізі металу за допомогою переносних газоріжучих пристроїв, що змазують і гідравлічних рідин, які можуть при більших температурах запалюватися. Для гасіння виниклих пожеж передбачені пожежні щити,

розташовані протипожежні гідранти, поширені засоби індивідуального пожежогасіння, а також розроблені системи блокування поширення пожежі.

Для успішної евакуації людей і цінностей передбачені виходи припустимої довжини і ширини, розміри дверних прорізів, що забезпечують достатню пропускну здатність, необхідна число сходових кліток і пожежних сходів.

Необхідний ступінь вогнестійкості виробничих будинків промислових підприємств визначається СНіП 2.09.02-85 залежно від категорії виробництва, площі і висоти будинку. Стіни будинку зроблені з неспаленого матеріалу. Для забезпечення безпечної евакуації в будинку цеху розташовані евакуаційні виходи. У цеху застосовується пожежне водопостачання в якому витрата води на зовнішнє водопостачання 15 л/с.

Для гасіння пожеж у прокатному цеху застосовують тверді, рідкі і газоподібні речовини: вода, інертний газ, хімічну і повітряно-механічну піни, пісок.

У прокатному цеху, у цей час застосовуються і пінні вогнегасники типу ВХП-10; ВВП-5; ВВП-10, у кількості 10 штук, які розташовані на протипожежних стендах [22].

4.6 Інженерна розробка медичного захисту від небезпечних і шкідливих факторів виробничого середовища

У термічному відділенні прокатного цеху обсягом 5000 м³ для нагрівання стана встановлено нагрівальні колодязі з тепловиділяючою поверхнею площею 104,9 м². Температура усередині печі $t_{вн} = 1270^{\circ}\text{C}$. Стінки печей цегельні із шамоту ізольовані діатановою цеглою товщиною $\delta = 390\text{мм}$. Продуктивність печі 9364 кг/с. Початкова температура металу, $t_{поч} = 1250^{\circ}\text{C}$. До моменту вивезення з відділення метал остигає до $t_{кін} = 1050^{\circ}\text{C}$. Температура зовнішнього повітря $t_{зов} = 26^{\circ}\text{C}$. Температура повітря у відділенні $t_{від} = 25^{\circ}\text{C}$. Температура повітря, що йде, $t_{ух} = 35^{\circ}\text{C}$.

Знайдемо загальне тепловиділення в термічному відділенні за годину. Основні джерела теплоти – нагрівальні печі і метал, що остигає (іншими джерелами зневажаємо).

Рішення

Коефіцієнт тепловіддачі стінки [23]:

$$R = 1/(1/\alpha_1 + \beta/\lambda + 1/\alpha_2), \quad (4.1)$$

де α_1, α_2 – коефіцієнт тепловіддачі на внутрішній і зовнішній поверхнях печі;

λ - коефіцієнт теплопровідності шамотної цегли;

тоді

$$R = 1 / (1/ 397,6 + 0,39/44,4 + 1 / 221) = 66,6 \text{ Дж/с.}$$

Тепловиділення від нагрівальних печей [23]:

$$Q_n = R (t_{\text{вн}} - t_{\text{від}})S, \quad (4.2)$$

де R - коефіцієнт тепловіддачі стінок печі, Дж/с;

S - сумарна площа тепловиділяючих поверхонь колодязя, м²;

$t_{\text{вн}}$ – температура усередині колодязя, °С;

$t_{\text{від}}$ – температура повітря у відділенні, °С;

$$Q_n = 66,6 \cdot (1270 - 25) \cdot 104,9 = 8697993 \text{ Дж/с.}$$

Знаходимо тепловиділення металу, що остигає, Дж/с:

$$Q_m = PC(t_{\text{поч}} - t_{\text{кін}}), \quad (4.4)$$

де P – сумарна продуктивність колодязів, г/годин;
 C - теплоємність металу,
 $t_{\text{поч}}$ - початкова температура металу, що витягається з колодязя, °С;
 $t_{\text{кін}}$ - температура металу до моменту вивозу з відділення, °С;

тоді

$$Q_M = 9364 \cdot 0,14 (1250 - 1050) = 261,9 \text{ кДж.}$$

Далі знаходимо загальну кількість теплоти, що виділяється у відділенні від нагрівальних печей і металу, що остиває.

$$Q_{\text{заг.}} = Q_n - Q_M = 8697993 + 261912 = 8959,9 \text{ кДж}$$

Приймаємо втрати теплоти через огороження відділення рівними 20% від загального надходження теплоти. Тоді надлишкова кількість теплоти буде дорівнює:

$$Q_{\text{над.}} = Q_{\text{заг.}} \cdot 0,8 = 8959905 \cdot 0,8 = 7167924 \text{ Дж.}$$

Кількість повітря, який необхідно ввести для видалення надлишкової теплоти, м³/год [23]:

$$\begin{aligned} V_{\text{пов.}} &= 3550 \cdot Q_{\text{над.}} / C_v(t_{\text{ух}} - t_{\text{зов}}) = \\ &= 3,6 \cdot 7167924 / 1,256(35 - 26) = 2054500 \text{ м}^3/\text{год}, \end{aligned} \quad (4.5)$$

де C_v – об'ємна теплоємність повітря, кдж/(м³К);
 $t_{\text{ух}}$ – температура повітря, що йде, °С;
 $t_{\text{зов}}$ – температура зовнішнього повітря, °С.

Знаходимо кратність повітрообміну [23]:

$$K = V_{\text{пов}} / V_{\text{прим}}, \quad (4.6)$$

де $V_{\text{прим}}$ – обсяг приміщення, м³;

$$K = 2054500 / 397360 = 5,2 ,$$

тобто повітря в приміщенні обмінюється 5 разів.

Висновок: У розділі охорони праці мною були проаналізовані шкідливі і небезпечні фактори, що впливають на людину, і є присутніми у процесі прокатки в даному цеху, а також існуючої міри захисту від перерахованих вище факторів.

ВИСНОВКИ

В роботі розглянуті відомі методики розрахунку напруження течії металу при прокатці на неперервному широкоштабовому стані гарячої прокатки. Встановлено, що для розрахунку напруження течії найбільш доцільно використовувати методику термомеханічних коефіцієнтів. Розрахунок визначення напруження течії металу σ_m , залежно від різних значень температури, ступеня і швидкості деформації.

Практичний інтерес представляють моделі Л.В. Андреюка – Г.Г. Тюленєва і модель В.О. Ніколаєва. Такі моделі були розроблені для багатьох марок вуглецевих і легованих сталей, зокрема сталей спеціального призначення. Моделі працездатні в широкому діапазоні температур гарячої прокатки від 800 до 1300°C.

Результати аналізу показали, що найбільш близькими формулами розрахунку напруження течії металу на початку прокатки в чистовій групі клітей НШСГП 1680 є формули В.О. Ніколаєва та Л.В. Андреюка – Г.Г. Тюленєва. Дані формули добре співпадають при невеликому ступені і швидкості деформації. В подальшому при прокатці з збільшенням ступеня і швидкості деформації та зменшення температури штаби найбільш близькими формулами є формули В.О. Ніколаєва і В.І. Зюзіна.

Розрахунки середнього контактного тиску з використанням розробленої моделі, із застосуванням залежностей визначення напруження течії металу по формулі В.О. Ніколаєва показали, що формула забезпечує збіг із дослідними даними в межах 0,95-1,21.

Таким чином, оптимальна теоретична модель розрахунку напруження течії металу, яка би у більшій мірі була наближена до практичних даних, отриманих в результаті експерименту є модель В.О. Ніколаєва, і може бути використана для прогнозування середнього контактного тиску і зусилля прокатки при гарячій прокатці штаб.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Василев Я. Д., Мінаєв О. А. Теорія поздовжньої прокатки : підручник. Донецьк : УНІТЕХ, 2009. 488 с.
2. Теория прокатки: справочник / А. И. Целиков, А. Д. Томлёнов, В. И. Зюзин [и др.]. Москва : Металлургия, 1982. 335с.
3. Ніколаєв В.О., Мазур В.Л. Виробництво плоского прокату / Запоріжжя, ЗДІА, 2010. 320 с.
4. Николаев В.А. Горячая прокатка листов и полос. Запорожье : ЗГИА, 2013. 169 с.
5. Клименко П.Л. Упрочнение стали и цветных металлов при холодной и горячей деформации. Днепропетровск : Пороги, 2011. 187 с. ISBN 978-617-518-133-1.
6. Третьяков А.В., Зюзин В.И. Механические свойства металлов и сплавов при обработке давлением. Москва : Металлургия, 1973. 224 с.
7. Cook P.M. The real curves, stress rate of deformation for the steels by reduction. The Institution of Mechanion Engineer. 1957. P. 75-77.
8. Динник А.А. Истинные пределы текучести при горячей прокатке стали. Современные достижения прокатного производства: сб. трудов. Т.2. Ленинград: ЛПИ, 1959. С. 64-70.
9. Динник А.А. Истинные пределы текучести стали при горячей прокатке. Теория прокатки: сб. научн. трудов. Москва : Metallurgidat, 1962. С. 157-173.
10. Полухин П.И., Гун Г.Я., Галкин А.М. Сопротивление пластической деформации металлов и сплавов : справочник. Москва : Металлургия, 1983. 350 с.
11. Тарновский И.Я., Поздеев А.А., Меандров Л.В. и др. Механические свойства стали при горячей обработке давлением. Свердловск : Metallurgizdat, 1960. 260 с.

12. Зюзин В.И., Бровман М.Я., Мельников А.Ф. Сопротивление деформации сталей при горячей прокатке. Москва : Металлургия, 1964. 270 с.
13. Надаи А. Пластичность и разрушение твердых тел. Москва : Мир. Т.2. 1969. 864 с.
14. Чекмарев А.П., Риднер З.А. Прокатное производство. Киев : Изд. АН УССР, 1957. Т.2. Вып. 2. С. 18-21.
15. Зюзин В.И. Определение сопротивления деформации сталей при горячей прокатке. Труды ВНИИМЕТМАШ. 1963. № 8. С. 38-73.
16. Зюзин В.И. Определение сопротивления деформации методом термомеханических коэффициентов. Труды ВНИИМЕТМАШ. 1963. № 8. С. 74-89.
17. Андреюк Л.В., Тюленев Г.Г., Прицкер Б.С. Аналитическая зависимость сопротивления деформации сталей и сплавов от химического состава. Сталь. 1972. №6. С. 522-523.
18. Laasraoui A., Jonas J.J. Prediction of steel flow stresses at high temperature and strain rates. Metall. Trans. A. 1991. No. 22. P. 1545-1558.
19. Moreira A., Junior J., Balancin O. Prediction of steel flow stresses under hot working conditions. Materials Research. 2005. Vol. 8, No. 3. P. 309-315.
20. Яковченко А.В., Пугач А.А., Ивлева Н.И. Анализ точности известных методов расчета напряжений течения металла в зависимости от химического состава стали. Вестник Приазовского государственного технического университета. 2011. № 2(23). С. 69-80.
21. Сафьян М.М. Прокатка широкополосной стали. Москва : Металлургия, 1969. 460 с.
22. Юдин Е.Я. Охрана труда в машиностроении : учебное пособие. Москва : Машиностроение, 1983. 432 с.
23. Белов С.Б. Охрана окружающей среды : учебное пособие. Москва : Высшая школа, 1983. 264с.

24. Вышинский В.В., Ленский Ю.Н., Комов И.Г. и др. Охрана труда в черной металлургии. / 2-е изд. перераб. и доп. Киев : Техника, 1986. 192с.

25. Панасейко С.П., Тарасов В.К., Павленко Ю.П. Методические указания к выполнению раздела "Охрана труда" в дипломных проектах для студентов всех специальностей. Запорожье : Изд-во ЗГИА, 2002. 56 с.

ПУБЛІКАЦІЇ ЗА ТЕМОЮ КВАЛІФІКАЦІНОЇ РОБОТИ

«ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ»
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Науково-дослідна частина
Наукове товариство
студентів, аспірантів, докторантів
Рада молодих вчених

ЗБІРНИК
наукових праць студентів,
аспірантів, докторантів і молодих вчених

«МОЛОДА НАУКА-2022»

Том V

*«Секції Інженерного навчально-наукового інституту ім. Ю.М. Потебні
Запорізького національного університету»*

Запоріжжя
2022

Павелко Данил
студент 1-го курсу магістратури каф. ОМТ ІННІ
Шербань Микита
студент 1-го курсу магістратури каф. ОМТ ІННІ
Наук. кер.: д-р техн. наук, доц. Белоконь Ю.О.

РОЗРОБКА МОДЕЛЕЙ ВИЗНАЧЕННЯ НАПРУЖЕННЯ ТЕЧІЇ МЕТАЛУ ПРИ ГАРЯЧІЙ ДЕФОРМАЦІЇ

Розвиток технології обробки металів тиском, впровадження і освоєння нового високопродуктивного обладнання, прокатних станів, цілих комплексів обробляючих агрегатів, безперервне розширення сортаменту сталей і сплавів, які піддаються гарячій пластичній обробці, потребують безперервного удосконалення і уточнення методів проектування технологічних процесів [1, 2]. Для рішення цих питань необхідно вивчення механічних властивостей сталей і сплавів при різних температурно-швидкісних умов деформації та розробка достовірних методів їх оцінки в конкретних технологічних процесах для забезпечення максимальної продуктивності обладнання та підвищення якості продукції.

Точність розрахунків залежить від достовірності визначення напруження течії металу. Напруження течії металу є основною складовою, яка чинить прямо пропорційний вплив на точність розрахунку енергосилових параметрів прокатки. У дослідженнях встановлено, що напруження течії металу при гарячій пластичній деформації залежить від температури, ступеня і швидкості деформації. Температура металу є найбільш сильним чинником, який визначає величину напруження течії σ_m . З підвищенням температури нагріву всі характеристики металу знижуються. Підвищення ступеня деформації приводить до збільшення напруження течії, і як наслідок - метал ще більше зміцнюється. Напруження течії суттєво зростає з збільшенням швидкості деформації металу.

Тому розробка моделей визначення напруження течії металу в процесах гарячої прокатки є актуальною задачею в теорії прокатки і потребує детального вивчення цього питання.

Література

1. Sereda B., Belokon Y., Sheyko S., Sereda D. The research of influence alloying elements on processes structure formation in stamp steel. AIST Steel Properties and Applications Conference Proceedings. 2012. P. 453-456
2. Sereda B., Sheyko S., Belokon Y., Sereda D. The influence of modification on structure and properties of rapid steel. AIST Steel Properties and Applications Conference Proceedings. 2011. P. 457-460.

**СЕКЦІЯ «МЕТАЛУРГІЯ, ОБРОБКА МЕТАЛІВ ТИСКОМ, ГАЛУЗЕВЕ
МАШИНОБУДУВАННЯ, АВТОМАТИЗАЦІЯ ТА КОМП'ЮТЕРНО-
ІНТЕГРОВАНІ ТЕХНОЛОГІЇ»**

Ардаб'єва Валерія <i>АНАЛІЗ ВИРОБНИЦТВА СУЧАСНИХ БРОНЕВИХ СТАЛЕЙ.....</i>	<i>95</i>
Бабак Антон <i>СТРАТЕГІЧНІ НАПРЯМАМИ РОЗВИТКУ МЕТАЛУРГІЙНОЇ ГАЛУЗІ В УКРАЇНІ.....</i>	<i>97</i>
Зануда Тетяна <i>КЛАСИФІКАЦІЯ І ЗАСТОСУВАННЯ ВУГЛЕГРАФІТОВИХ МАТЕРІАЛІВ.....</i>	<i>99</i>
Ісаулова А.С. <i>ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ПІДВИЩЕННЯ ЯКОСТІ РОБОТИ СИСТЕМИ АВТОМАТИЗАЦІЇ ДЕАЕРАТОРА ТУРБІННОГО ВІДДІЛЕННЯ АТОМНОГО ЕНЕРГОБЛОКУ В УМОВАХ ВП «ЗАПОРІЗЬКА АЭС».....</i>	<i>100</i>
Калашник Світлана <i>РОЗРАХУНОК ТА ПРЕСУВАННЯ ВАЖКОТОПКИХ МАТЕРІАЛІВ ДЛЯ ОТРИМАННЯ КЕРМЕТІВ ВИСОКИХ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ХАРАКТЕРИСТИК.....</i>	<i>103</i>
Лисенко Єгор <i>ОГЛЯД СУЧАСНИХ ВИДІВ МОДИФІКАТОРІВ ЧАВУНУ ТА СТАЛІ.....</i>	<i>105</i>
Мазуркевич Ростислав <i>ПРО ГІДРОМЕТАЛУРГІЙНІ МЕТОДИ ПОДІЛУ РІДКІСНОЗЕМЕЛЬНИХ МЕТАЛІВ.....</i>	<i>107</i>
Павелко Данил, Шербань Микита <i>РОЗРОБКА МОДЕЛЕЙ ВИЗНАЧЕННЯ НАПРУЖЕННЯ ТЕЧІЇ МЕТАЛУ ПРИ ГАРЯЧІЙ ДЕФОРМАЦІЇ.....</i>	<i>109</i>
Питайло Євген <i>ОСОБЛИВОСТІ РОЗРАХУНКУ ПРОКАТНИХ ВАЛКІВ У СИСТЕМІ АВТОМАТИЗОВАНОГО ПРОЕКТУВАННЯ SOLIDWORKS.....</i>	<i>110</i>
Поліщук Ірина <i>СПОСІБ ОТРИМАННЯ ГУБЧАСТОГО ТИТАНУ В АПАРАТІ ПІДВИЩЕНОЇ ЦИКЛОВОЇ ПРОДУКТИВНІСТІ.....</i>	<i>112</i>
Сагулякін Олександр <i>МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ФІЗИЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ АНІЗОТРОПНИХ МАТЕРІАЛІВ В ПРОГРАМНОМУ КОМПЛЕКСІ MATHCAD PRIME 7.....</i>	<i>113</i>
Ходунов Андрій, Балабуха Євген <i>ВЗАЄМОЗВ'ЯЗОК ЄДИНОЇ СИСТЕМИ КОНСТРУКТОРСЬКОЇ ДОКУМЕНТАЦІЇ УКРАЇНИ З МІЖНАРОДНИМИ ТА ЄВРОПЕЙСЬКИМИ СТАНДАРТАМИ.....</i>	<i>115</i>
Цинкуш Дарина <i>АНАЛІЗ МОДЕЛЕЙ ВЗАЄМОДІЇ КРИХКИХ МАТЕРІАЛІВ З РОБОЧИМИ ОРГАНАМИ ДРОБАРІВ СТИСНЕННЯ.....</i>	<i>118</i>