

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 роботи магістра

рівень вищої освіти другий (магістерський) рівень

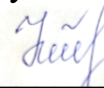
(другий (магістерський) рівень)

на тему «Аналіз моделей зміцнення низьколегованих сталей при холодній деформації»

Виконав: студент 2 курсу, групи 8.1362-омт-з

Немикіна І. Г.

(ПІБ)



(підпис)

спеціальності

136 Металургія

(шифр і назва)

спеціалізація

(шифр і назва)

освітньо-професійна програма

обробка металів тиском

(шифр і назва)

Керівник Белоконь Ю.О.

(прізвище та ініціали)

(підпис)

Рецензент Кругляк Д. О.

(прізвище та ініціали)

(підпис)

Запоріжжя - 2023 року

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІНЖЕНЕРНИЙ НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ
і.м. 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. Белоконь

“ 01 ” 05 2023 року

**З А В Д А Н Н Я
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ**

Немикіна Ірина Григорівна

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи (проекта) «Аналіз моделей зміцнення низьколегованих сталей при холодній деформації»

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

затверджені наказом вищого навчального закладу від “01” 05 2023 року № 634-с

2. Строк подання студентом роботи (проекта) 01.12.2023

3. Вихідні дані до роботи (проекта) низьколеговані сталі марки 09Г2, 12ГС та 30ХГСА, холодна прокатка штаби 1,4x1250 мм на реверсивному стані 1680 ПАТ «Запоріжсталь».

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) Реферат. Вступ. Літературний огляд. Розрахунково-дослідницька частина, Індивідуальне завдання, Охорона праці та техногенна безпека, Висновки. Перелік джерел посилання.

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

Креслення, презентаційний матеріал до 15 слайдів (на 15 сторінках)

6. Консультанти розділів роботи

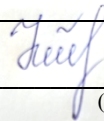
Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата
		завдання прийняв
<i>Літературний огляд</i>	<i>Белоконь Ю.О., д.т.н., проф.</i>	
<i>Розрахунково-дослідницька частина</i>	<i>Белоконь Ю.О., д.т.н., проф.</i>	
<i>Індивідуальне завдання</i>	<i>Белоконь Ю.О., д.т.н., проф.</i>	
<i>Охорона праці та техногенна безпека</i>	<i>Белоконь Ю.О., д.т.н., проф.</i>	
<i>Нормоконтроль</i>	<i>Белоконь Ю.О. завідувач кафедри</i>	

7. Дата видачі завдання 01.05.2023

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	<i>Вступ</i>		
2	<i>Реферат</i>		
3	<i>Літературний огляд</i>		
4	<i>Розрахунково-дослідницька частина</i>		
4	<i>Індивідуальне завдання</i>		
5	<i>Охорона праці та техногенна безпека</i>		
6	<i>Висновки</i>		

Студент


(підпис)

І. Г. Немикіна

(прізвище та ініціали)

Керівник роботи

(підпис)

Ю. О. Белоконь

(прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

Кваліфікаційна робота магістра: 130 с., 35 рис., 18 табл., 27 джерел.

ХОЛОДНА ПРОКАТКА, НАПРУЖЕННЯ ТЕКУЧОСТІ, РЕЖИМ ДЕФОРМАЦІЇ, НИЗЬКОЛЕГОВАНА СТАЛЬ, КЛІТЬ, ЗМІЦНЕННЯ, ЕНЕРГОСИЛОВІ ПАРАМЕТРИ, ОПІР ДЕФОРМАЦІЇ, ДЕФОРМАЦІЯ, МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ.

Об'єкт дослідження – напруження текучості низьколегованих сталей.

Мета роботи – розробка моделі зміцнення низьколегованих сталей при холодній прокатці.

Предмет дослідження – процеси зміцнення низьколегованих сталей 09Г2, 12ГС та 30ХГСА при холодній деформації.

Метод дослідження – теоретичний, аналітичний розрахунок, експериментальний.

Були проведені теоретичні та експериментальні дослідження, а також розроблена модель зміцнення для сталі низької марки. Вони вказують на те, що питання збільшення напруження текучості та вплив відповідних факторів при холодній прокатці ретельно досліджені і описані в науковій літературі, але не завжди дозволяють точно визначити це напруження. Вивчення та розробка моделей зміцнення для низьколегованих сталей дозволяють прогнозувати напруження текучості і оптимізувати режими деформації.

ЗМІСТ

ВСТУП	7
1 СУЧАСНИЙ СТАН ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ПРОБЛЕМ ПРОГНОЗУВАННЯ НАПРУЖЕННЯ ТЕКУЧОСТІ МЕТАЛУ ПРИ ХОЛОДНІЙ ПРОКАТЦІ	9
1.1 Характеристика процесу зміцнення низьколегованих сталей	9
1.2 Моделі розрахунку межі текучості металу при холодній деформації.....	16
1.3 Особливості формування напруження течії в низьколегованих сталях	23
1.4 Вибір об'єкту дослідження.....	27
1.5 Висновок до розділу 1.....	36
2 ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ З ВИЗНАЧЕННЯ НАПРУЖЕННЯ ТЕКУЧОСТІ МЕТАЛУ ПРИ ХОЛОДНІЙ ПРОКАТЦІ	38
2.1 Розрахунок режиму деформації.....	38
2.2 Розрахунок напруження текучості для сталей 09Г2, 12ГС, 30ХГСА за моделлю Третьякова А.В.....	43
2.3 Розрахунок напруження текучості при холодній прокатці марок сталей (09Г2, 12ГС,) за методом Ніколаєва В.А.....	75
2.4 Висновок до розділу 2.....	84
3 ЕКСПЕРЕМЕНТАЛЬНА ЧАСТИНА	85
3.1 Метод визначення напруження течії.....	85
3.2 Проведення експерименту та дослідження кривої, деформації зразка.....	90
3.3 Оптимізація моделі напруження текучості.....	95
3.4 Висновок до розділу 3.....	108

4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ТЕХНОГЕНА БЕЗПЕКА.....	109
4.1 Аналіз потенційно небезпечних і шкідливих факторів виробничого середовища.....	109
4.2 Заходи з поліпшення умов праці, пожежної та техногенної безпеки тощо.....	112
4.3 Пожежна та техногенна безпека.....	117
4.4 Електробезпека.....	121
4.5 Висновок до розділу.....	125
ВИСНОВКИ.....	126
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ.....	128

ВСТУП

Холоднокатаний листовий прокат відноситься до категорії високоякісної металопродукції. Використання його в різних галузях промисловості надзвичайно ефективно. Це є стимулом інтенсивного науково-технічного прогресу в області виробництва холоднокатаних листів. Йде безперервне вдосконалення існуючих технологій, пропонуються принципово нові технічні рішення.

Одним із напрямків дослідження процесу холодної прокатки металів є вивчення опору деформації при холодній прокатці та процесу зміцнення при деформації. При прокатці різних металів і сплавів спостерігається різна інтенсивність їх зміцнення тому при прогнозуванні процесів зміцнення при прокатці треба володіти різними моделями зміцнення та знати як ведуть себе сплави при різних величинах обтиснення. Це в свою чергу впливає на величину зусилля при холодній прокатці та навантаження на прокатне обладнання.

Знання моделей зміцнення сталі та сплавів при холодній прокатці, дає змогу інженерам правильно розраховувати та проектувати прокатне обладнання, яке буде витримувати те навантаження яке утворюється в процесі прокатки.

В останні роки низьколеговані високоміцні сталі знаходять широке застосування в машинобудуванні і автомобілебудуванні. Область їх застосування обумовлена високими механічними властивостями (умовний межа текучості до 520 МПа), що дозволяє знижувати вагу металоконструкцій при збереженні їх міцності (економія металу в порівнянні з конструкціями з низьковуглецевих сталей становить 25 ... 30%).

Кінцева геометрія (товщина, ширина, площинність) і якість поверхні смуг з низьколегованих сталей, необхідні для автомобілебудування, досягаються в результаті холодної прокатки. Продуктивність і стабільність

процесу холодної деформації визначаються складом устаткування стану і механічними властивостями сталі. Зміцнення в результаті наклепу низьколегованих сталей в процесі холодної тонколистової прокатки може досягати 1000 МПа і більше. Закономірності та інтенсивність зміцнення цих сталей в процесі холодної деформації недостатньо вивчені і слабо висвітлені в науковій літературі. Тому при холодній прокатці низьколегованих сталей виникають аварійні ситуації, що призводять до простоїв, втрати продуктивності стану і зниження якості прокату. Наявність інформації про опір деформації гарячекатаного підкату низьколегованих сталей і знання моделей та параметрів кривої зміцнення в процесі холодної прокатки сприяє зниженню витрат при виконанні замовлень споживачів за рахунок попереднього вибору режимів обробки.

1 СУЧАСНИЙ СТАН ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ПРОБЛЕМ ПРОГНОЗУВАННЯ НАПРУЖЕННЯ ТЕКУЧОСТІ МЕТАЛУ ПРИ ХОЛОДНІЙ ПРОКАТЦІ

1.1 Характеристика процесу зміцнення низьколегованих сталей

У процесі холодної деформації сталі за допомогою прокатки відбувається зміни розмірів смуги, а також зміни механічних і фізичних властивостей сталі, які складають явище наклепу або зміцнення: збільшення напруження текучості і міцності, збільшення твердості, зменшення пластичності і т.д., і є результатом взаємодії високою щільності дислокацій, що виникла в процесі деформації.

Наклеп – це зміцнення металу під дією пластичної деформації. Зміцнення характеризується деформацією і витяжкою зерен в напрямку деформації, упорядкуванням орієнтування зерен і утворенням текстури, в результаті чого з'являється анізотропія механічних і фізичних властивостей, з'являються додаткові напруги, які збільшуються в міру розвитку деформації, розвиваються внутрикristалічні і межкristалічні порушення.

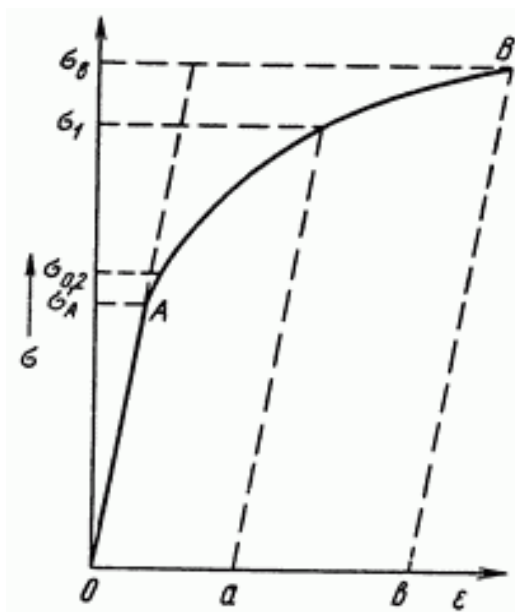


Рисунок 1.1 – Діаграма зміни деформації в залежності від напруги.

Процес зміцнення сталі можна розглянути на прикладі рисунка 1, де з ростом напруги зростає деформація в металі. Якщо навантаження не перевищило точки А (умовне напруження течії), то після його усунення змін в металі не відбудеться, але якщо навантаження перевищило напруження течії і напруга наприклад дорівнювала σ_1 , то після зняття навантаження залишиться деформація, яка дорівнює a . Якщо потім знову навантажувати метал, то здатність його до пластичної деформації зменшиться межа текучості підвищиться до σ_1 ; тобто щоб викликати пластичну деформацію, слід докласти більше напруження. Це означає що метал став міцніше.

Зміни механічних властивостей металу, пов'язане з його зміцненням при холодній деформації, відбувається в значній мірі. У процесі холодної деформації підвищується напруження міцності σ_b , умовне напруження течії $\sigma_{0,2}$, і твердість НВ, а відносне подовження δ , і відносне звуження ψ зменшуються. Аналіз даних цих характеристик показує, що найбільш інтенсивне зміна їх відбувається в інтервалі обтиснень до 30%. При подальшому збільшенні обтиску інтенсивність зміни зазначених характеристик зменшується.

Характер кривих зростання межі міцності і твердості приблизно однаковий, а напруження течії, як правило, збільшується швидше ніж напруження міцності. Таким чином, різниця між напруженням течії і напруженням міцності зі збільшенням ступеня деформації зменшується, а при великих деформаціях 70 - 90% напруження течії майже збігається з напруженням міцності.

На процес зміцнення сталі при холодній прокатці має великий вплив такі чинники як ступінь деформації, дробність деформації, хімічний склад, швидкість деформації та ін.

З хімічних елементів, що входять до складу сталі, найбільш сильний вплив на їх властивості надає зміст вуглецю. Чим більше зміст вуглецю в вуглецевої сталі тим нижче її пластичні властивості і вище характеристики міцності.

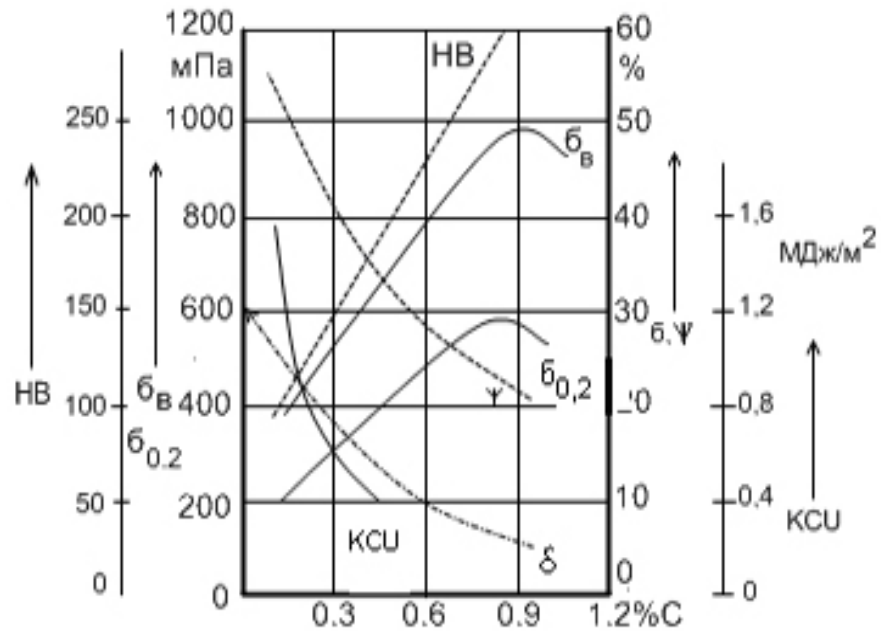


Рисунок 1.2 – Діаграма зміни властивостей сталі в залежності від вмісту вуглецю

Введення легуючих елементів до складу сталей дозволяє значно змінювати їх механічні властивості. Основними легуючими елементами є: марганець, кремній, нікель, молібден, вольфрам, хром. На рисунку 1.3 представлена діаграма зміни твердості в залежності від процентного вмісту цих елементів.

В основному всі легуючі елементи які вводяться в метал підвищують міцність сталі, і знижують її пластичні властивості, тому ускладнюється процес холодної деформації легованих сталей. У легованих сталях більш інтенсивно відбувається процес зміцнення сталі при холодної деформації. Зі збільшенням ступеня деформації метал стає менш пластичним що збільшує зусилля прокатки, і як наслідок навантаження на валки та інші механізми.

Останнім часом більш доцільним стало застосування низьколегованих сталей в заміні вуглецевих конструкційних, так як ці сталі володіють більш високими механічними властивостями, що дає можливість знизити вагу конструкцій не знижуючи її міцності.

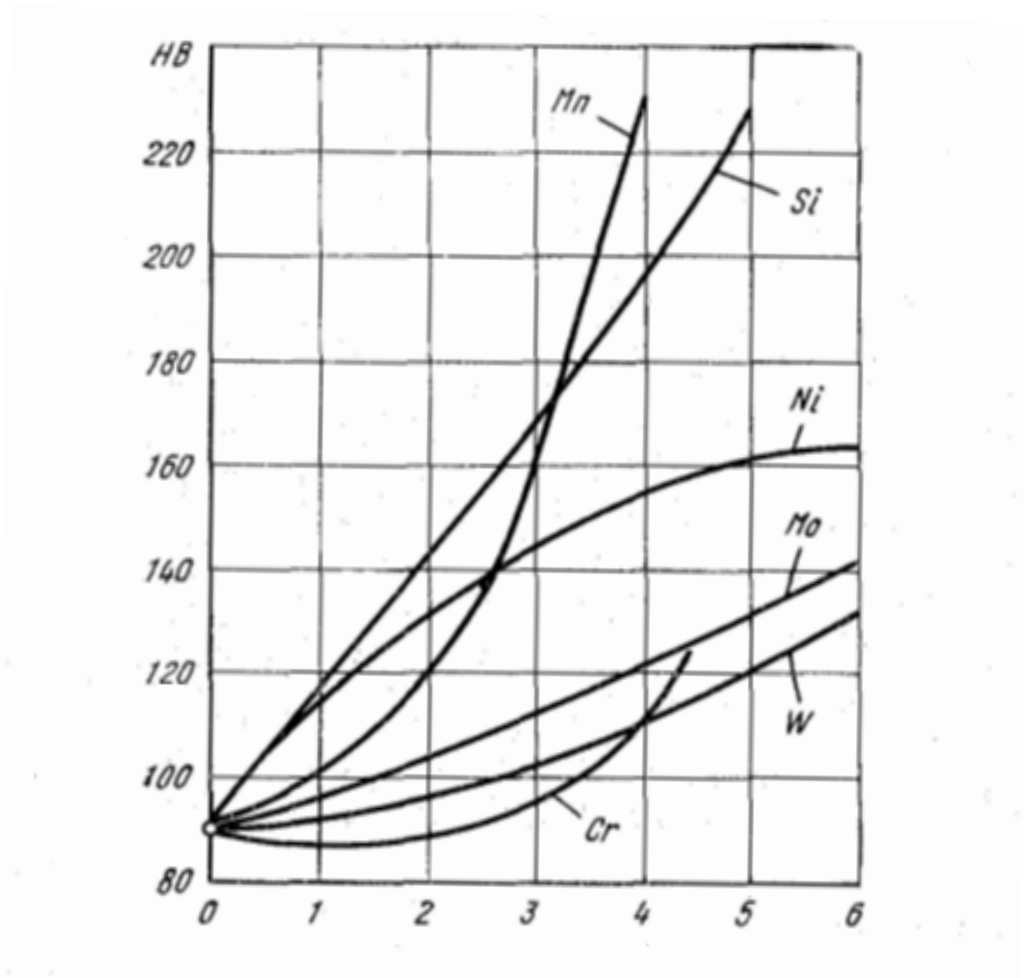


Рисунок 1.3 – Діаграма зміни твердості в залежності від вмісту легуючих елементів

Масштабні дослідження напруження течії сталі та інших сплавів при холодній прокатці провів А.В. Третьяков, на основі цих даних були побудовані залежності механічних властивостей від ступеня деформації. На цих кривих, які взято з роботи [1], можна побачити інтенсивність зміцнення низьколегованих сталей по відношенню до вуглецевих конструкційних сталей.

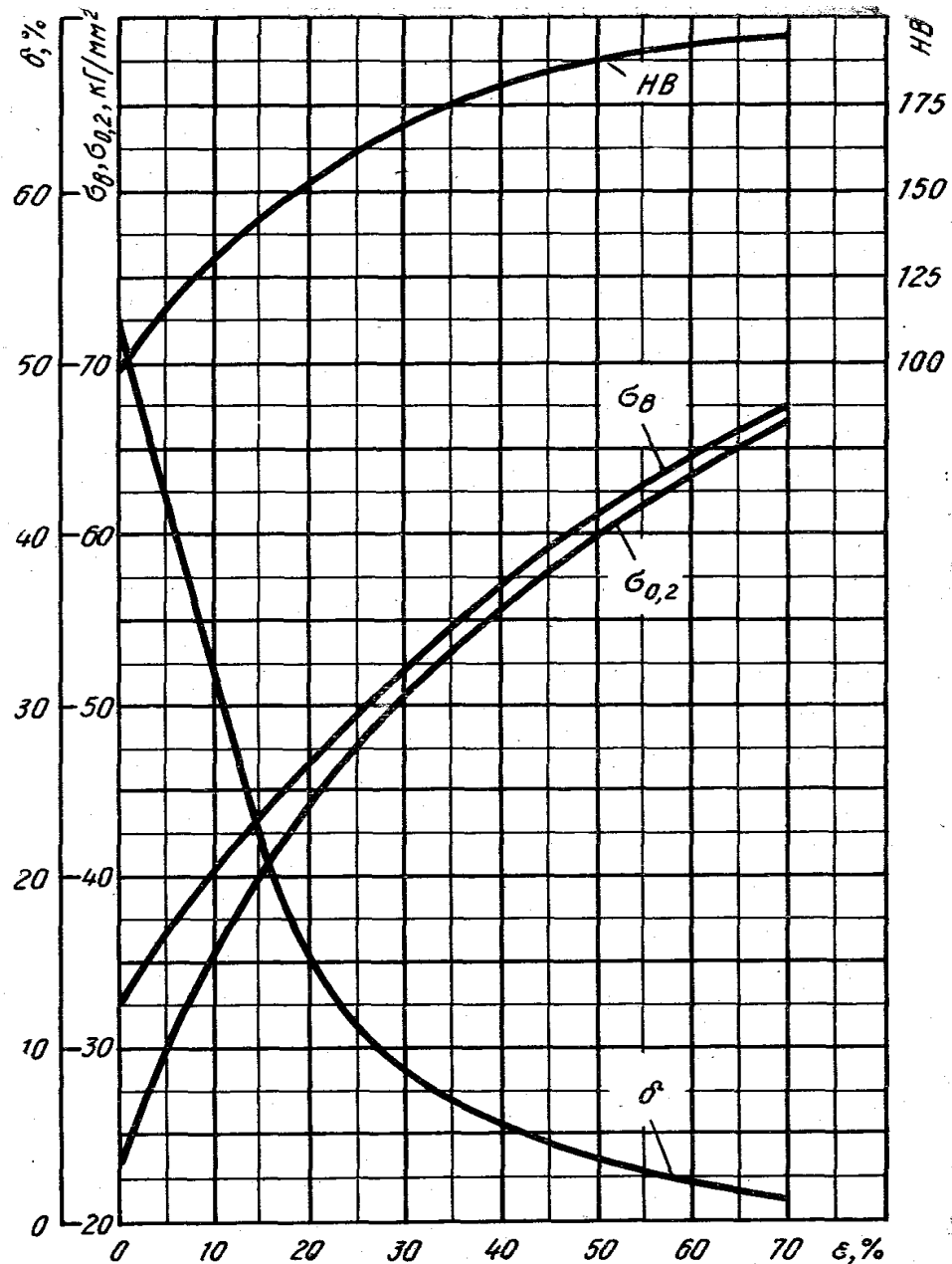


Рисунок 1.4 – Діаграма зміни механічних властивостей сталі 08кп

Сталь 08кп вуглецева конструкційна якісна. Невеликий вміст вуглецю 0,05 - 0,11% робить цю сталь дуже пластичною при гарячій та холодній деформації. Крім вуглецю сталь містить такі елементи як : Si – до 0,03%; Mn- 0,25- 0,5% ; Ni – до 0,25% ; та шкідливі домішки S - 0,04 %; P - 0,035% ; та ін.

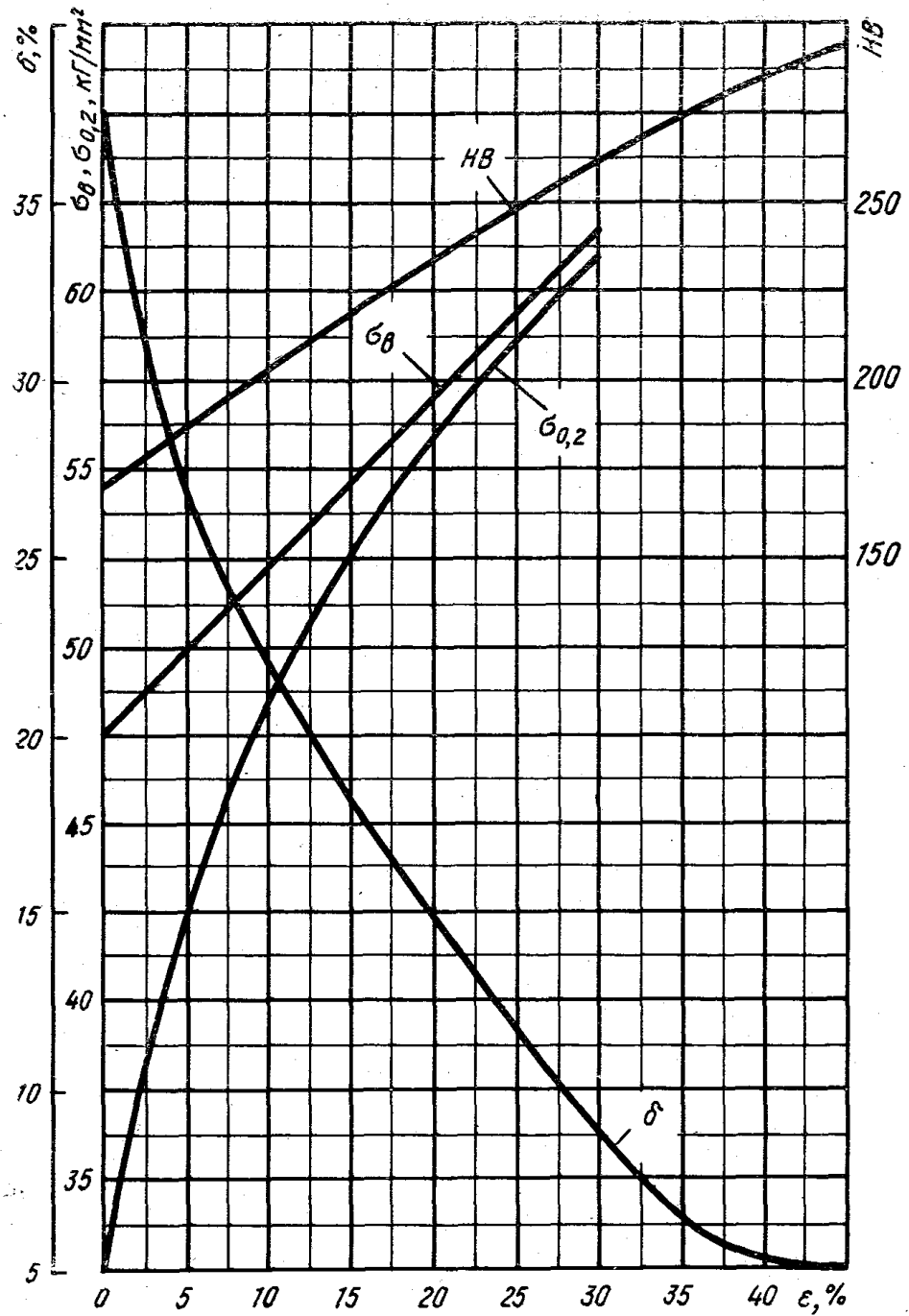


Рисунок 1.5 – Діаграма зміни механічних властивостей сталі 09Г2.

Сталь 09Г2 низьколегована конструкційна, вміст вуглецю невеликий, як і в сталі 08кп, але підвищений вміст марганцю в цій сталі, збільшує її твердість і зміцнення в процесі холодної деформації.

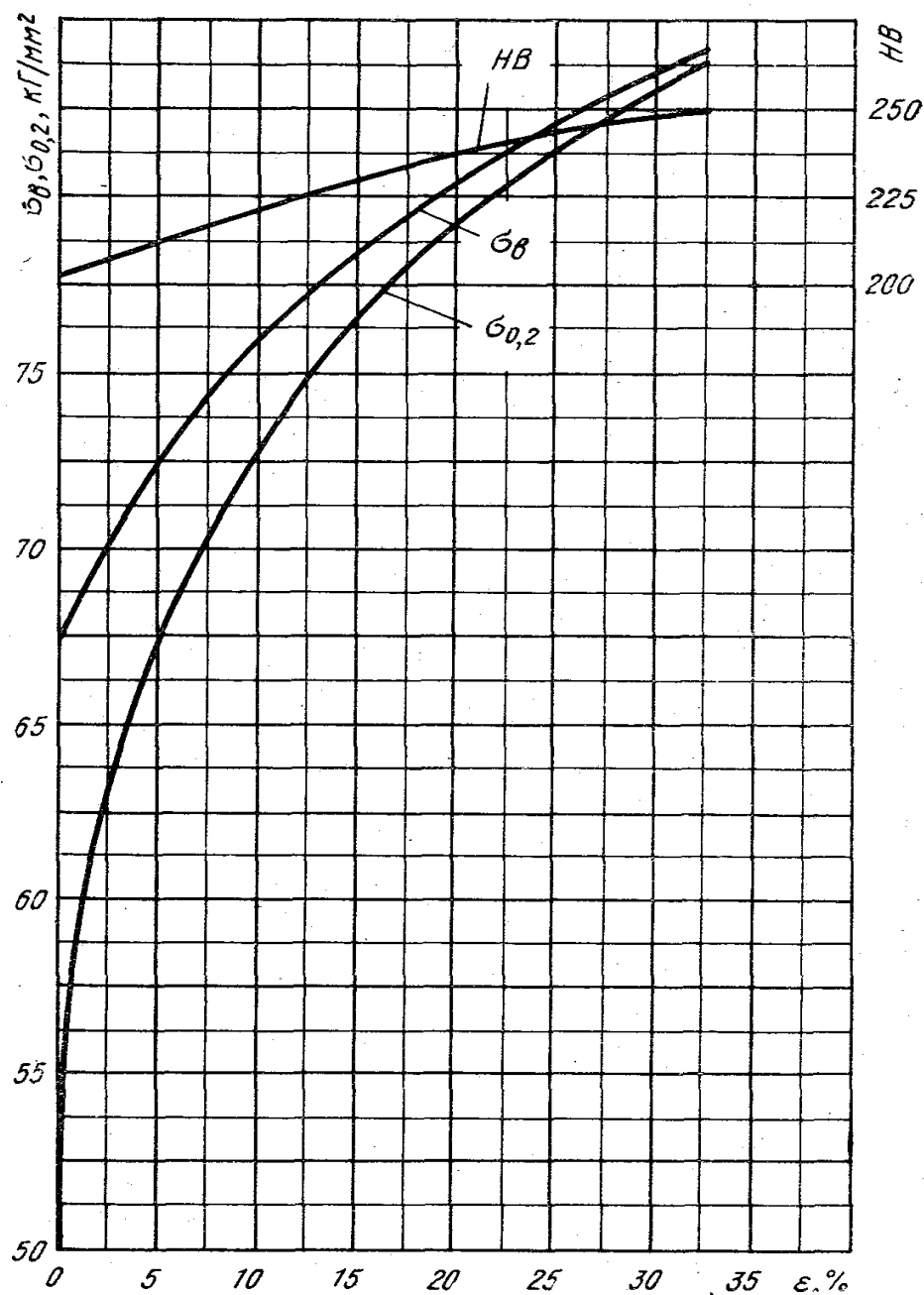


Рисунок 1.6 – Діаграма зміни механічних властивостей сталі 12ГС

Сталь 12ГС низьколегована конструкційна, підвищений вміст кремнію та марганцю збільшує характеристики міцності цієї сталі та збільшує інтенсивність процесу зміцнення при холодній прокатці. Вміст вуглецю С – 0,09- 0,15% ; Mn – 0,8 – 1,2% ; Si – 0,5 - 0,8% та ін.

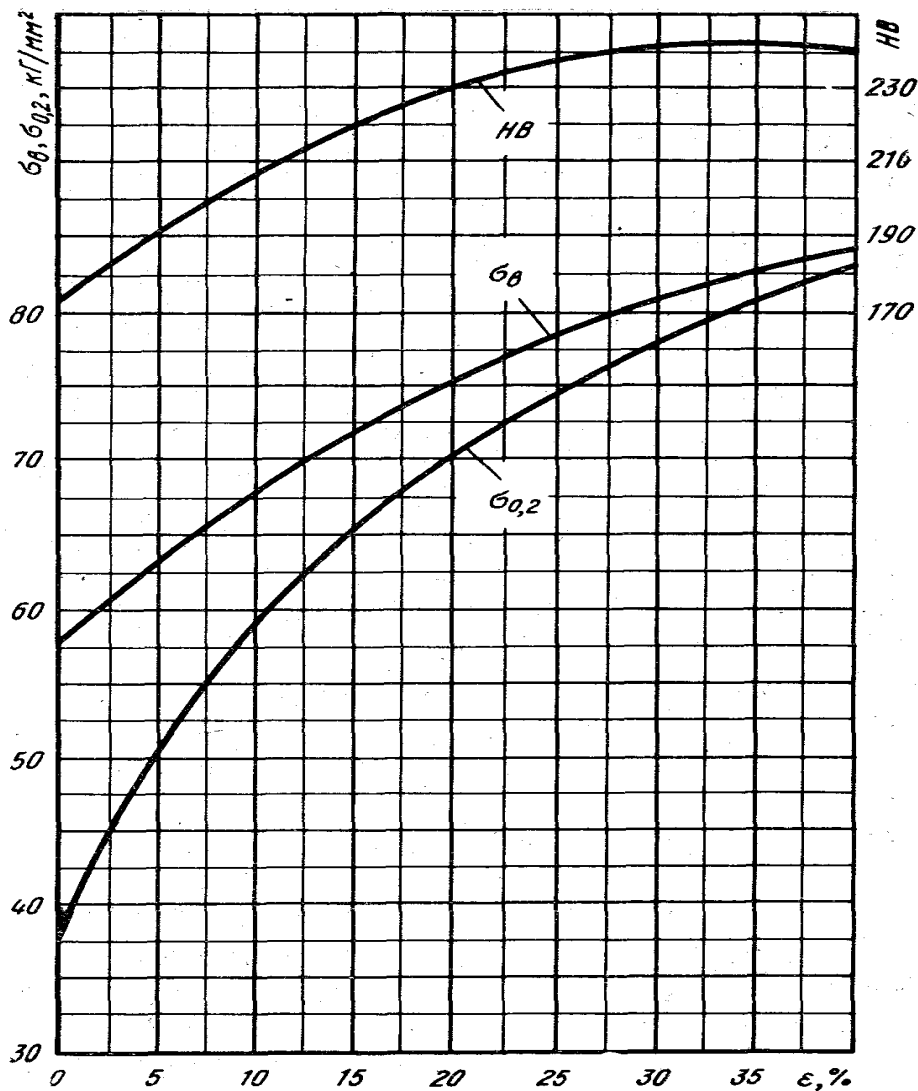


Рисунок 1.7 – Діаграма зміни механічних властивостей сталі 25ХГСА

Вивчаючи криві зміцнення можна побачити, що при відносній деформації яка дорівнює приблизно 30% сталі 08кп напруження течії $\sigma_{0,2} = 50$ кг/мм². Тоді як деформація низьколегованих марок сталей до 30% збільшує межу плинності 09Г2 $\sigma_{0,2} = 60$ кг/мм², 12ГС $\sigma_{0,2} = 82$ кг/мм², 25ХГСА $\sigma_{0,2} = 78$ кг / мм².

1.2 Моделі розрахунку межі текучості металу при холодній деформації

У процесі пластичної деформації металів і сплавів відбувається їх деформаційне зміцнення або підвищення опору деформації, яке

спостерігається внаслідок ускладнення руху дислокацій, їх взаємодії, і продовження деформації можливо лише при збільшенні прикладеного зусилля.

Дислокація в кристалічній решітці - це лінійний дефект або порушення кристалічної решітки твердого тіла. Наявність дислокацій істотно впливає на механічні та інші фізичні властивості твердого тіла.

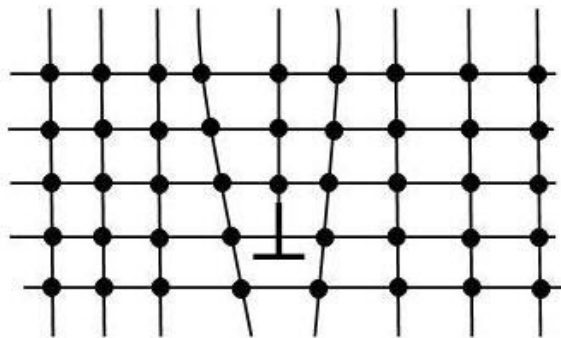


Рисунок 1.8 – Загальний вигляд дислокації в кристалічній решітці.

Як зазначено в роботі [4] існують гіпотези і моделі деформаційного зміцнення в значній мірі засновані на теорії Тейлора, по якій основний вид деформації при пластичному перебігу металів визначається дислокаційний механізмом. За теорією Тейлора величина миттєвої напруженія течії (опору деформації) визначається внутрішнім напруженням, які заважають руху дислокацій. Дислокації затримуючись в кристалах, поступово створюють внутрішні напруження, утворюються дислокаційні стінки і скупчення, підвищується величина опору деформації даного матеріалу. Моделі деформаційного зміцнення пов'язують зміни напруження течії металів через зміну щільності дислокацій:

$$\sigma = A \cdot G \cdot b \sqrt{\rho} \quad (1.1)$$

де G - модуль зсуву, b - вектор Брюгерсса рухомих дислокацій, A - розмірний фактор вимірює ефективність дислокаційного зміцнення, ρ - щільність дислокацій.

Характер впливу щільності дислокацій ρ на міцність металу можна оцінити за формулою Келлі - Наттінга:

$$\sigma_T = \sigma_0 + \alpha \cdot G \cdot b \sqrt{\rho} \quad (1.2)$$

де σ_T - межа текучості сплаву; σ_0 - межа текучості відпаленого металу; α – коефіцієнт який залежить від виду дислокацій, b - вектор Брюгерсса, G - модуль зсуву, ρ - щільність дислокацій.

Знання дислокаційної природи і особливостей механізму пластичної деформації металу дозволяє усвідомити важливе питання про причини більш високої міцності дрібнозернистого металу в порівнянні з грубозернистим.

Витягування зерен в процесі деформації пов'язано з виходом на їх межі дислокацій, а також з переміщенням пачок ковзання. Воно супроводжується поворотом самих релаксуючих зерен під дією зовнішніх сил. Однак цим елементарним процесам перешкоджають границі сусідніх зерен. Чим дрібніше зерна, тим більше сумарна площа їх границь і тим більше опір пластичної деформації. Вплив розміру зерна d на одну з характеристик міцності металу – напруження течії σ_T - відображено у формулі Холла – Петча яку взято з роботи [5].

$$\sigma_T = \sigma_m + \frac{k_y}{\sqrt{d}} \quad (1.3)$$

де σ_m - міцність монокристалу, k_y - коефіцієнт зернограничного зміцнення.

Найбільш масштабні дослідження межі текучості, при холодній прокатці виконані А.В. Трет'яковим. В результаті цих досліджень було встановлено кількісний вплив сумарного відносного обтиску ε_Σ при холодній прокатці на напруження текучості, та розроблена модель, яку взято з роботи [2], побудовані залежності.

$$\sigma_{T\varepsilon} = \sigma_{TВИХ} + m(\varepsilon_{\Sigma} \cdot 100)^k \quad (1.4)$$

де $\sigma_{TВИХ}$ –напруження текучості матеріалу штаби після гарячої прокатки або термічної обробки; m, k – коефіцієнти, які визначають інтенсивність і характер зміцнення матеріалу штаби при холодній прокатці; ε_{Σ} - сумарний відносний обтиск при холодній прокатці, долі одиниці.

Модель (1.4) може бути записана у вигляді добутку початкового напруження текучості $\sigma_{TВИХ}$ на коефіцієнт зміцнення k_{ε} матеріалу штаби :

$$\sigma_{T\varepsilon} = \sigma_{TВИХ} k_{\varepsilon} ; \quad (1.5)$$

$$\text{де} \quad k_{\varepsilon} = 1 + m_1(\varepsilon_{\Sigma} \cdot 100)^k ; \quad (1.6)$$

$$m_1 = \frac{m}{\sigma_{TВИХ}} . \quad (1.7)$$

Коефіцієнт зміцнення k_{ε} чисельно дорівнює відношенню напруження текучості, підрахованого з урахуванням впливу сумарного відносного обтиску при холодній прокатці до початкового напруження текучості. Він визначає рівень і характер змінцнення матеріалу штаби при холодній прокатці. Як випливає з (1.6) , коефіцієнт k_{ε} завжди більший одиниці (при $\varepsilon_{\Sigma} = 1 \quad k_{\varepsilon} = 1$)

У таблиці 1.1 приведені значення параметрів $\sigma_{TВИХ}$, m , m_1 , k для деяких металів і сплавів, отримані А.В. Трет`яковим при $t_{CT} = 20$ °С .

Таблиця 1.1 – Значення параметрів $\sigma_{TВИХ}$, m , m_1 , k для деяких металів і сплавів.

Марка сталі(сплавів)	Значення параметрів			
	$\sigma_{TВИХ}$, Н/мм ²	m , Н/мм ²	m_1	k
1	2	3	4	5

Залізо і його сплави				
Залізо Армко	250	50,0	0,20	0,56
Ст 2	300	30,6	0,1020	0,62
08кп	230	34,6	0,1504	0,60
10	300	29,5	0,0983	0,64
20	375	31,6	0,0843	0,64
20А	350	64,5	0,1843	0,50
40	350	83,6	0,2389	0,48
50	400	100,0	0,2500	0,47
85	500	147,0	0,2940	0,43
09Г2	320	59,0	0,1844	0,46
12ГС	500	100,0	0,2000	0,34
65Г	400	176,0	0,4400	0,35
30ХГСА	475	86,0	0,1811	0,45
У8А	390	18,0	0,0462	0,84
У12А	620	7,6	0,0123	1,025
50ХФА	450	32,0	0,0711	0,66
12Х5МА	480	23,0	0,0479	0,72
08Х13	325	72,0	0,2215	0,45
11Х11Н2В2МФ	600	40,0	0,0667	0,64

12X21H5T	670	27,0	0,0403	0,68
12X18H9	250	19,0	0,0760	1,00
12X18H9T	410	24,0	0,0585	0,91
10X14Г14Н4Т	340	33,0	0,0971	0,78
36X18H25C2	600	36,0	0,0600	0,76
ЕИ659	700	3,8	0,00543	1,10
ЕИ852	330	194,0	0,5879	0,26

Використання моделі (1.6) замість (1.4) представляється більш наочнішим і зручнішим для аналізу впливу сумарного відносного обтиску на напруження текучості при холодній прокатці.

Для визначення напруження текучості матеріалу штаби в діапазоні підвищених, відповідно реальному процесу прокатки, температур (до 150-250°C і більш), рекомендується модель:

$$\sigma_{tt} = \sigma_{t\varepsilon} k_t = \sigma_{ТВИХ} k_\varepsilon k_t \quad (1.8)$$

де k_t – коефіцієнт, що враховує вплив температури деформації штаби на напруження текучості.

Коефіцієнт k_t є відношення напруження текучості матеріалу штаби при шуканій температурі t до напруження текучості при температурі 20°C. Статистична обробка експериментальних даних показала, що залежності $k_t = \varphi(t)$ із задовільною точністю описуються поліномом:

$$k_t = a_0 + a_1 \left(\frac{t - t_{CT}}{t_{ПЛ}} \right) + a_2 \left(\frac{t - t_{CT}}{t_{ПЛ}} \right)^2 + \dots + a_n \left(\frac{t - t_{CT}}{t_{ПЛ}} \right)^n \quad (1.9)$$

Де $t_{ст}$, t , $t_{пл}$ – відповідно температура статичних випробувань зразків на розтягування ($t_{ст} = 20^{\circ}\text{C}$), температура деформації штаби і температура плавлення матеріалу штаби. $a_0 \div a_n$ коефіцієнти полінома.

У таблиці приведені значення коефіцієнтів $a_0 \div a_n$ полінома (1.9) і температури плавлення для ряду сталей , прокатка яких здійснюється в холодному стані.

Для визначення напруження текучості в будь - якому перерізі осередку деформації при холодній прокатці може бути використана модель:

$$\sigma_{ТТ} = \sigma_{ТВИХ} k_{\varepsilon} k_t k_u \quad (1.10)$$

де

$$k_u = 1 + \frac{0,0075(1-0,3\sqrt{\varepsilon_{\Sigma x}}}{1+1,75\sqrt{\varepsilon_{\Sigma x}}} \sqrt{\frac{t_{ст}}{t_x}} \cdot \left[1 - \frac{3(t_x - t_{ст})}{t_{пл}}\right]^4 \left(\ln \frac{u_x + u_{ст}}{u_{ст}}\right)^{c_1} \quad (1.11)$$

$$\varepsilon_{\Sigma x} = 1 - (1 - \varepsilon_{пр})(1 - \varepsilon_x); \quad (1.12)$$

$$c_1 = 1,8 + 0,125 \sqrt{\frac{t_x}{t_{ст}}} - 1; \quad (1.13)$$

$\varepsilon_{пр}$ - попередній (на вході в осередок деформації) відносний обтиск, долі одиниці; ε_x , $\varepsilon_{\Sigma x}$ – частковий і сумарний відносний обтиск в даному перерізі осередку деформації, долі одиниці; t_x – температура штаби в даному перерізі осередку, $^{\circ}\text{C}$; $t_{ст}$, $u_{ст}$ – температура і швидкість деформації при проведенні статичних випробувань зразків на розтягування ($t_{ст} = 20^{\circ}\text{C}$; $u_{ст} = 10^{-3}\text{c}^{-1}$); u – швидкість деформації в даному перерізі осередку, c^{-1} .

1.3 Особливості формування напруження течії в низьколегованих сталях

Легована сталь – сталь, яка, крім звичайних домішок, містить елементи, спеціально вводяться в певних кількостях для забезпечення необхідних фізичних або механічних властивостей. Ці елементи називаються легуючими.

Низьколегована сталь – це сталь, яка має хімічний склад з невеликим (до 2,5%) вмістом легуючих елементів, крім вуглецю і заліза, в них може бути присутнім марганець, ванадій, азот, титан, хром, вольфрам, ніобій, мідь, кремній, кобальт, молібден, і ін.

Розчинення легуючих елементів в фериті відбувається в результаті заміщення атомів заліза атомами цих елементів. Атоми легуючих елементів, відрізняючись від атомів заліза розмірами і будовою, створюють в решітці напруження, які викликають зміни її періоду. Елементи розчиняються в фериті, змінюють параметри решітки фериту в тим більшою мірою, чим більше розрізняються атомні розміри заліза і легуючого елемента. Елементи з атомним радіусом, меншим, ніж у заліза зменшують параметри решітки, а з великим – збільшують.

Природно, що зміни розмірів решітки фериту викликає і зміни властивостей фериту - міцність і опір деформації підвищується, а пластичність зменшується.

В роботі [6] зазначено, ефект зміцнення при легуванні заліза елементами впровадження (азот, вуглець) значно сильніше, ніж елементами заміщення наприклад (нікель, марганець) .Так додавання в залізо кожної черговій сотій частки відсотка вуглецю або азоту підвищує межа плинності сплаву на 40-30 МПа, в той час як введення аналогічної кількості нікелю всього на 0,3МПа.

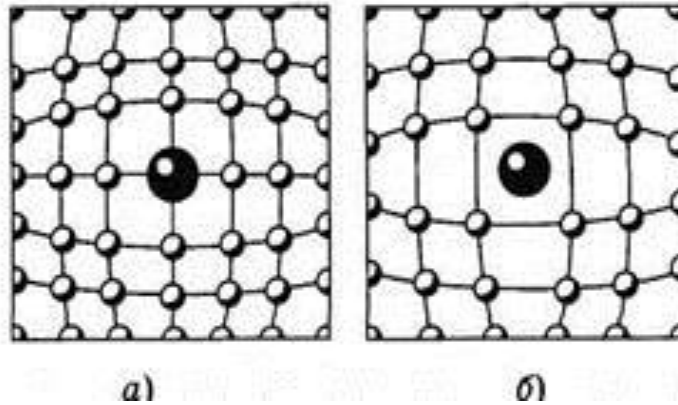


Рисунок 1.9 – а) Заміщення атома заліза атомом легуючого елемента;
б) впровадження легуючого елемента в кристалічну решітку заліза

Легуванням (тобто впровадження в решітку чужорідних атомів), створюються всякого роду недосконалості та викривлення кристалічної решітки, які є перешкодами для вільного руху дислокацій. При деформації відбувається різке скупчення дислокацій у перешкод тому при холодній деформації низьколегованих сталей процес зміцнення протікає більш інтенсивно. Від легування залежить характер і величина міжатомної взаємодії в металі, що впливає на рухливість дислокацій. Так само легування приводить до утворення більш дрібного зерна ферито - перлітної структури що в свою чергу підвищує опір деформації.

Механічні властивості сталей залежать від розміру зерна. Межі зерен можуть бути бар'єрами для дислокацій, джерелами вакансій і дислокацій, а так само стоками вакансій. Як показали дослідження заліза і маловуглецевої сталі міцність фериту істотно залежить від діаметра зерна. Так напруження текучості фериту (в відпаленого сталі) може зростати при зменшенні зерна в три рази. У загальному випадку діаметр зерна – це відстань, яку здатна пройти дислокація без перешкод.

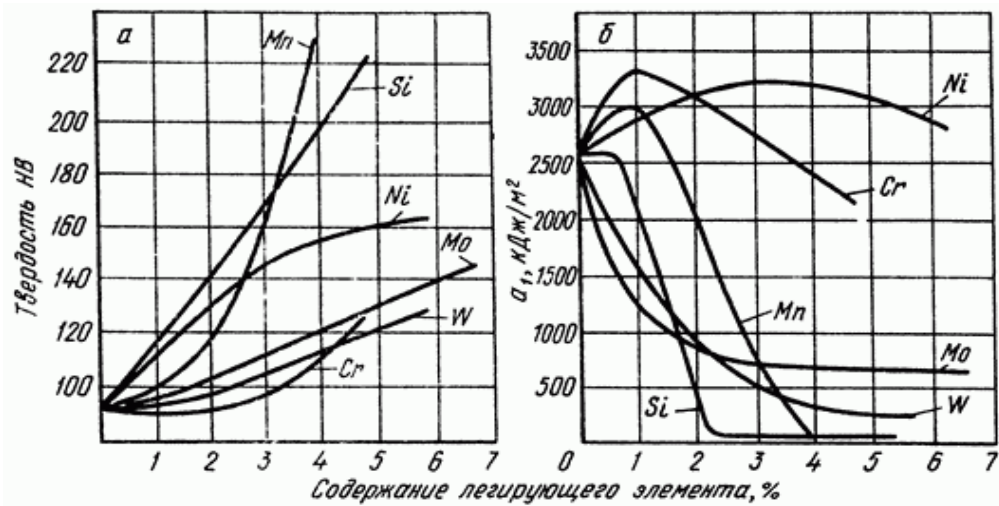


Рисунок 1.10 – Зміни твердості і ударної в'язкості заліза в залежності від вмісту легуючого елемента

На рисунку 1.10 видно, як легуючі елементи при різній концентрації впливають на механічні властивості сталі.

Хром вводять до 2%. Розчиняючись в фериті і цементиті, він сприятливо впливає на механічні властивості сталі. Незначно збільшує твердість. При вмісті хрому до 1% збільшує ударну в'язкість.

Нікель - додають від 1 до 5%, найбільш цінний і в той же час найбільш дефіцитний некарбідоутворюючі легуючий елемент. Нікель незначно підвищує твердість сталі при цьому збільшує ударну в'язкість

Марганець вводять в кількості до 1,5% і використовують нерідко як замітник нікелю. Він помітно підвищує межу плинності сталі, проте робить її чутливою до перегріву, тому для подрібнення зерна разом з марганцем вводять карбідоутворюючі елементи.

Кремній - некарбідоутворюючий елемент, кількість якого обмежують до 2%. Кремній сильно підвищує межу текучості, ускладнює разупрочнення сталі при відпуску; знижує в'язкість і підвищує поріг хладноломкості.

Молібден і вольфрам - дорогі і гостродефіцитні карбідоутворюючі елементи, які здебільшого знаходяться в карбідах. Основна ціль введення 0,2 ... 0,4% Мо або 0,8 ... 1,2% W - зменшення схильності до відпускну крихкості II роду, поліпшення властивостей комплексно легованих сталей в

результаті подрібнення зерна, підвищення стійкості до відпустки, збільшення прогартованості.

Ванадій і титан - сильні карбідотворювачі. Їх додають в невеликій кількості (до 0,3% V і 0,1% Ti) для подрібнення зерна. Підвищений вміст цих елементів (так само, як Mo і W) неприпустимо через утворення спеціальних важкорозчинних при нагріванні карбідів. Надлишкові карбіди знижують прогартованість і, розташовуючись по межах зерен, сприяють крихкому руйнуванню.

Бор додають в мікродозах (0,002 ... 0,005%).

Твердо-розчине зміцнення це - зміцнення твердого розчину, розчиненими в ньому легуючими елементами і домішками в α - залізі, в основному пов'язана з блокуванням дислокацій атмосферами з атомів впровадження.

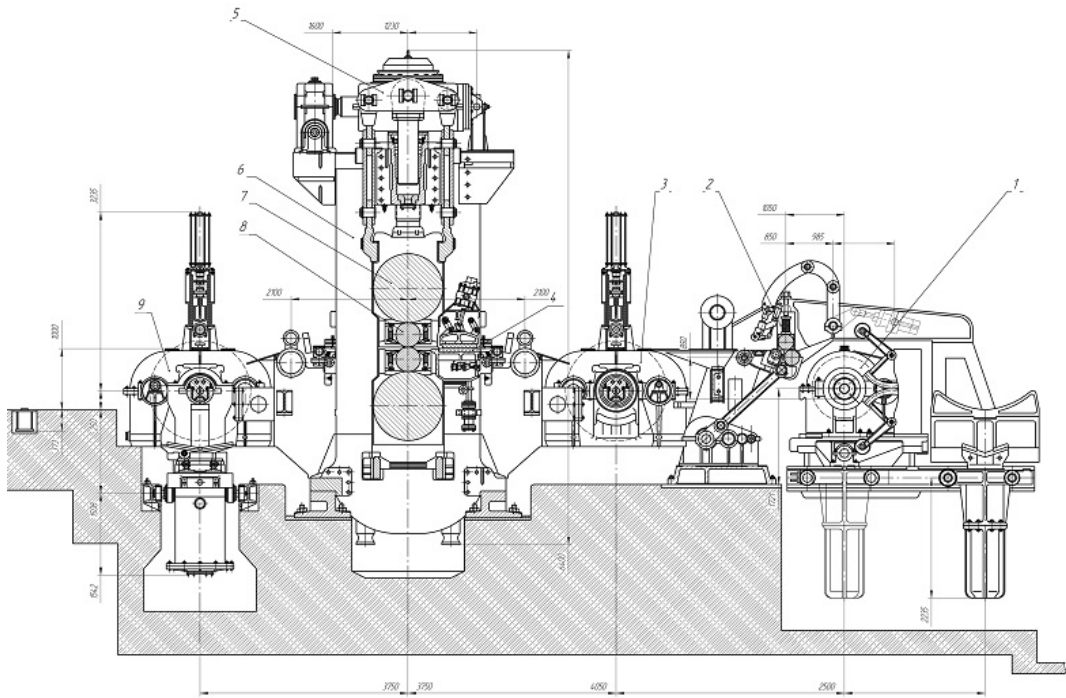
Утворення твердого розчину можливо за принципом заміщення і впровадження. Залежно від виду твердого розчину величина зміцнення буде різною так як ступінь спотворення кристалічної решітки різна. Тверді розчини впровадження утворюють елементи з малим атомним радіусом (зазвичай такими елементами є неметали). Тоді як, в легованих феррите і аустените зміцнення відбувається за рахунок створення локальних внутрішніх напружень при заміщенні атомів заліза атомами легуючого елемента з іншими розмірами і властивостями. Тверді розчини впровадження – це завжди обмежені тверді розчини, а розчинність в них залежить від кристалічної решітки розчинника і розмірів елемента впровадження. Обмеженість твердих розчинів пояснюється тим, що при утворенні твердого розчину зберігається решітка розчинника, а атоми впровадження займають лише вакантні міжвузля - октаедричні і тетраедричних порожнечі в решітці металу розчинника. Елементи, що утворюють тверді розчини впровадження, на два порядки сильніше зміцнюють твердий розчин, ніж елементи, що утворюють тверді розчини заміщення, і це необхідно враховувати при легуванні.

Деформаційне зміцнення в одних сталях в основному може бути обумовлено утворенням дислокацій лісу, а в інших - дефектами упаковки, бар'єрами Ломер-Коттрелла і ін. Дисперсійне зміцнення викликається як когерентними, так і некогерентного виділеннями, і ефективність зміцнення в цих випадках істотно відрізняється. Зернограничне зміцнення залежить від величини протяжності межзеренних границь, різного їх будови, тобто через бар'єрного впливу на гальмування дислокацій; в ряді сплавів можливе утворення полігональних кордонів і поява ефекту субструктурного зміцнення. Таким чином, при аналізі зазначених механізмів стосовно до конкретної групи сталей необхідно уточнити, які з механізмів відіграють основну роль, в чому вона полягає і які чинники роблять на них найбільший вплив.

1.4 Вибір об'єкту дослідження

При підборі оптимального режиму деформації низьколегованих марок сталей слід враховувати дрібність деформації (кількість проходів) при однаковому сумарному обтисненні. Низьколеговані марки сталі володіють більш високим опором деформації в порівнянні з низьковуглецевими конструкційними сталями, це обмежує величину обтиску за один прохід на стані холодної прокатки. Так само збільшення числа проходів на стані холодної прокатки зменшує різнотовщинність листа і покращує якість поверхні, покращується рівномірність деформації по перетину. З вище сказаного виходить, що доцільніше і оптимальніше буде застосування реверсивного стану, так як на реверсивному стані можна робити необмежену кількість проходів в порівнянні з безперервним станом холодної прокатки.

У даній роботі буде розглянуто реверсивний стан 1680 ПАТ «Запоріжсталь».



1 – розмотувач, 2 – відгинач, 3 – змотувач передній, 4 – прес-проводка,
5 – кліть робоча, 6 – змотувач задній

Рисунок 1.11 – Загальний вид реверсивного стану 1680

Реверсивний стан 1680 ПАТ «Запоріжсталь», що знаходиться в ЦХП-1 складається з кліті «кварти» і обслуговуючого його устаткування, роликового похилого конвеєра, поворотного столу, скидача рулонів, розмотувача конусного типу, правильно-тягнучої машини с відгибачем смуги в рулоні, роликової прес-проводки, двох змотувачів барабанного типу та знімача рулонів.

Привід робочих валків здійснюється від електродвигуна потужністю 1650 кВт з регульованим числом обертів 300 – 600 на хвилину, через комбінований з шестеренною кліттю редуктор з передаточним числом 3,21 та шпиндельний пристрій. Число обертів робочих валків 93,5-187 в хвилину. Номінальне навантаження на двигун головного приводу при прокатці 3000А.

Швидкість прокатки: заправна - до 0,5 м / с, Максимальна робоча - до 4,74 м / с.

Привід натискних гвинтів здійснюється від двох електродвигунів потужністю 81,5 кВт через два редуктора з передаточним числом 1100:1. Швидкість переміщення натискних гвинтів 9,96 мм/хв. Електродвигуни з'єднані електромагнітною муфтою для забезпечення спільної чи роздільної роботи натискних гвинтів. Величина переміщення натискних гвинтів вказується продуктиметрами, розташованими на посту управління.

Таблиця 1.2 – Матеріал валків

Робочі валки	Опорні валків	
	бандаж	Вісь
9X2МФ 60X2СМФ	9ХФ	40ХН2МА

Робочі валки – ковані з загартованою поверхнею бочки, опорні валки - з насадним бандажем. Твердість поверхні валків по Шору (ГОСТ 24.013.20-98): робочих (бочка) - від 90 до 98 од., опорних (бочка) - від 70 до 85 од.

Таблиця 1.3 – Розміри валків.

Найменування валків	Розміри , мм						Вага, т
	бочка		шийка		трефа		
	діаметр	довжина	діаметр	довжина	діаметр	довжина	
Робочій	510/470	1680	260	250	250	260	3,32
Опорний (ПРТ)	1420/ 1340	1760	890/734 (конусний)	780	—	—	31,65

Вихідний профіль бочок валків:

- Опорні валки: верхній - опуклість 0,8 мм, нижній циліндричний;

- Робочі валки: нижній - циліндричний, верхній - опуклість від -0,20 до 0,50 мм залежно від виробітку опорних валків.

Діаметри парних опорних валків можуть мати розходження в межах максимальної та мінімальної величини діаметра. Розбіжність в діаметрах робочих валків допускається не більше 0,1мм.

Бочки робочих валків для прокатки смуг з вуглецевої і легованих сталей після шліфування піддаються насічці на дробеструйній машині.

Норма прокату на робочих валках з насіченими поверхнею без перевалки – не більше 300 т, при прокатці експортного металу товщиною 0,5 - 0,6 мм - не більше 100т.

Температура емульсії яка подається на валки 35-50⁰С. Емульсія подається зі сторони входу смуги в валки.

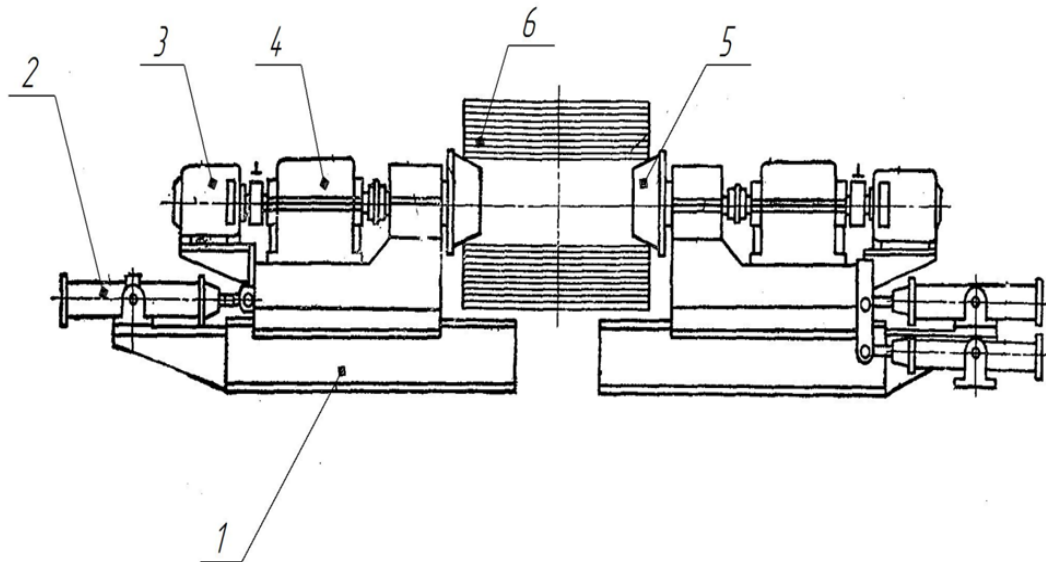
Підвідний роликовий похилий конвеєр призначений для прийому, накопичення і транспортування рулонів к поворотному пристрою.

Для прийому рулонів з роликового похилого конвеєра, переміщення їх навколо вертикальної осі на 90 ° і подачі на скидач рулонів, встановлено поворотний пристрій.

Кут повороту, град. – 90;

Привід від електродвигуна потужністю 5 кВт ;

Скидач рулонів і пересувний упор призначені для прийому рулонів з поворотного пристрою, правильної установки їх відносно поздовжньої осі розмотувача і скидання рулонів в люльку розмотувача за допомогою пересувного упору.



1 – фундаментна плита, 2 – гідроциліндр, 3 – електродвигун, 4 – редуктор, 5 – конус розмотувача, 6 – рулон

Рисунок 1.12 – Розмотувач конусний

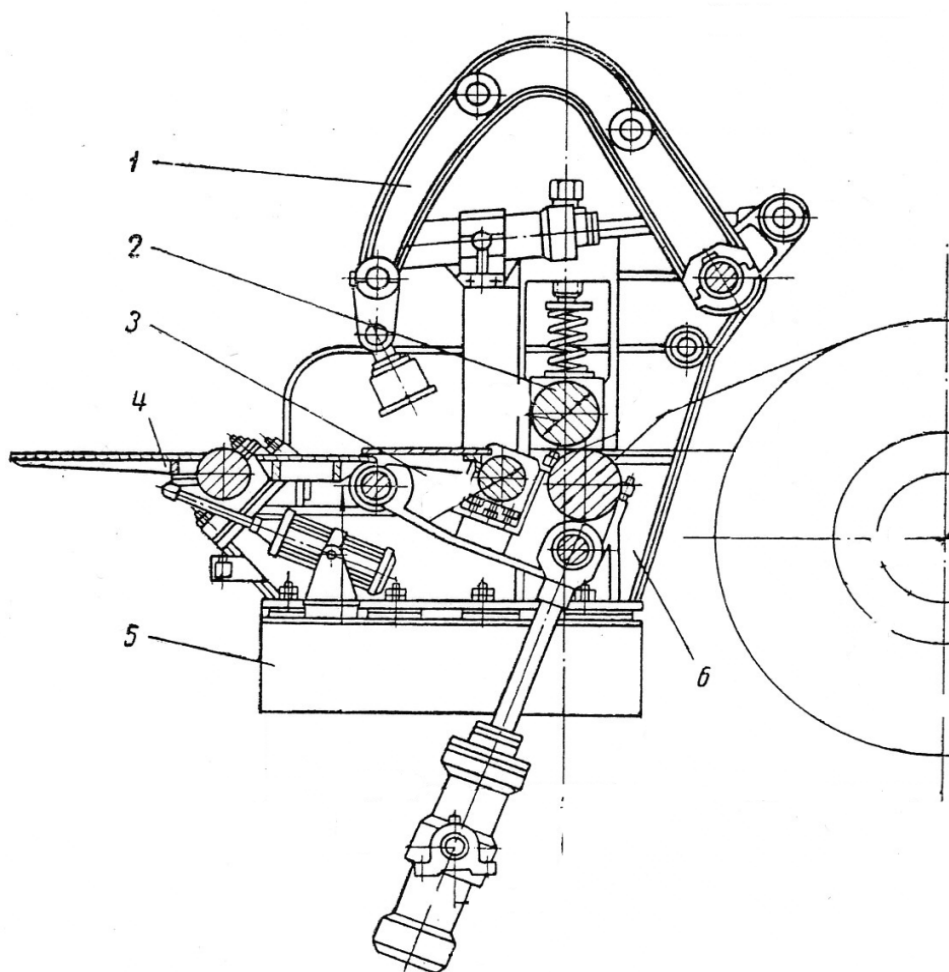
Розмотувач призначений для розмотування смуги та правильної установки рулону що до поздовжньої осі стану, повороту рулону в положення, що забезпечує можливість захоплення зовнішнього кінця смуги відгибачем, відгинання кінця смуги і завдання його в прес-проводку.

Правильно-тягнуча машина призначена для відгинання, правки переднього кінця рулону і подання його в робочі валки стану. Правильно-тягнуча машина з відгибачем встановлена між розмотувачем і змотувачем перед станом і складається з відгибача кінця рулону, гойдаючих непривідних роликів, встановлених в загальній рамі, притисного ролика, відкидної проводки із пневмоциліндром, фундаментної плити і двох стійок.

Максимальний кут повороту відгибача, град 90

Робоча швидкість відгибача, м / с 0,25

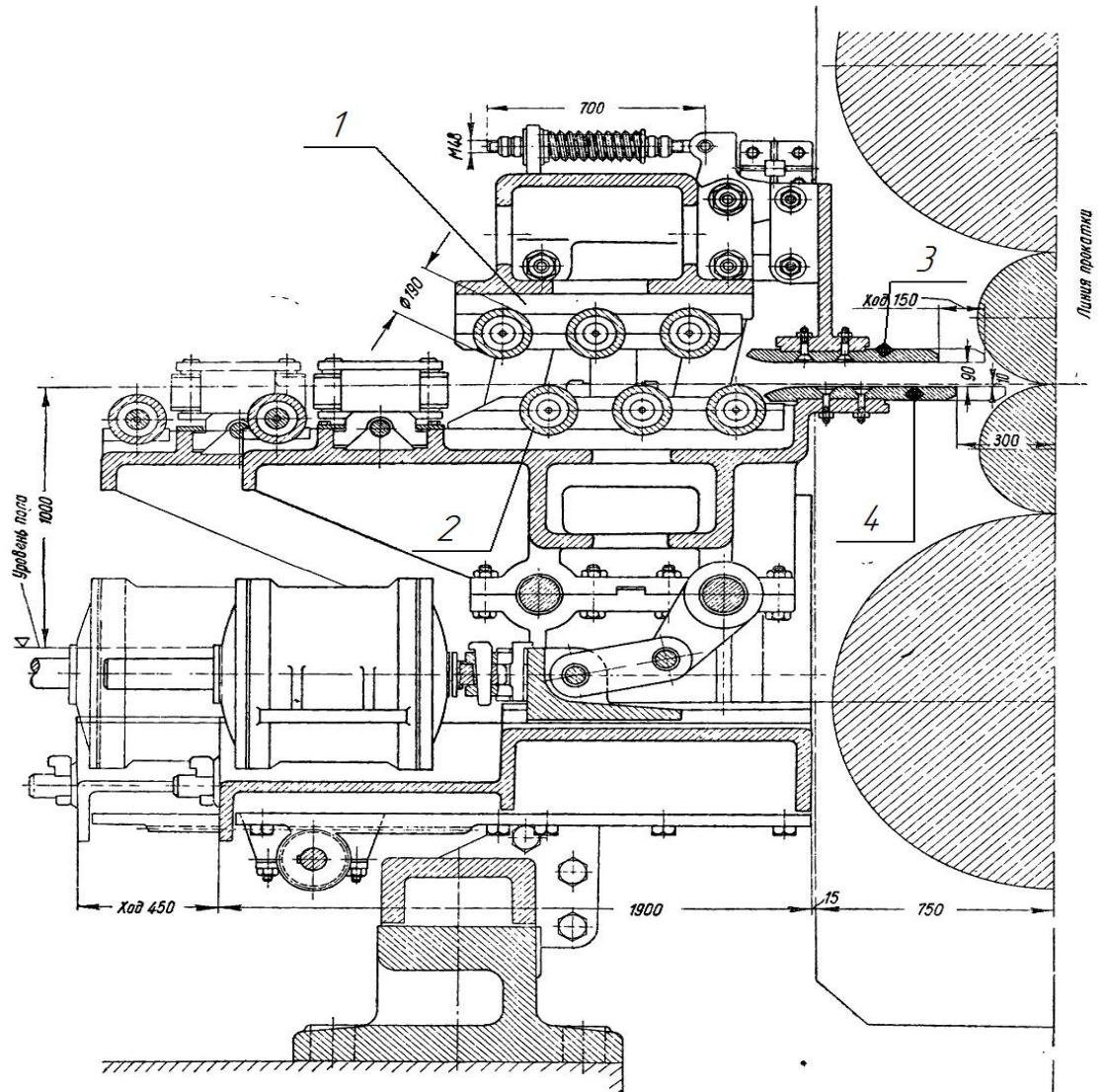
Швидкість задання смуги в валки стана м/сек. 0,5



1 – відгинач, 2 – притискний ролик, 3 – загальна рама, 4 – відкидна проводка, 5 – фундаментна плита, 6 – стійки

Рисунок 1.13 – Правильно-тягнуча машина с відгибачем кінця рулону

Роликова прес – проводка призначена для задачі смуги в валки та створення натягу смуги в першому проході або при перемотуванні смуги з розмотувача на змотувач. Роликова прес – проводка встановлена перед кліттю складається з верхньої і нижньої рам, вузла роликів діаметром 140 мм і направляючого пристрою. Ролики змонтовані у верхній і нижній рамах. У верхній рамі встановлено три ряди роликів, в нижній - чотири ряди. Переміщення верхнього столу прес-проводки у вертикальній площині проводиться від пневмоциліндра діаметром 400 мм. Вертикальні ролики призначені для центрування смуги по осі стану.

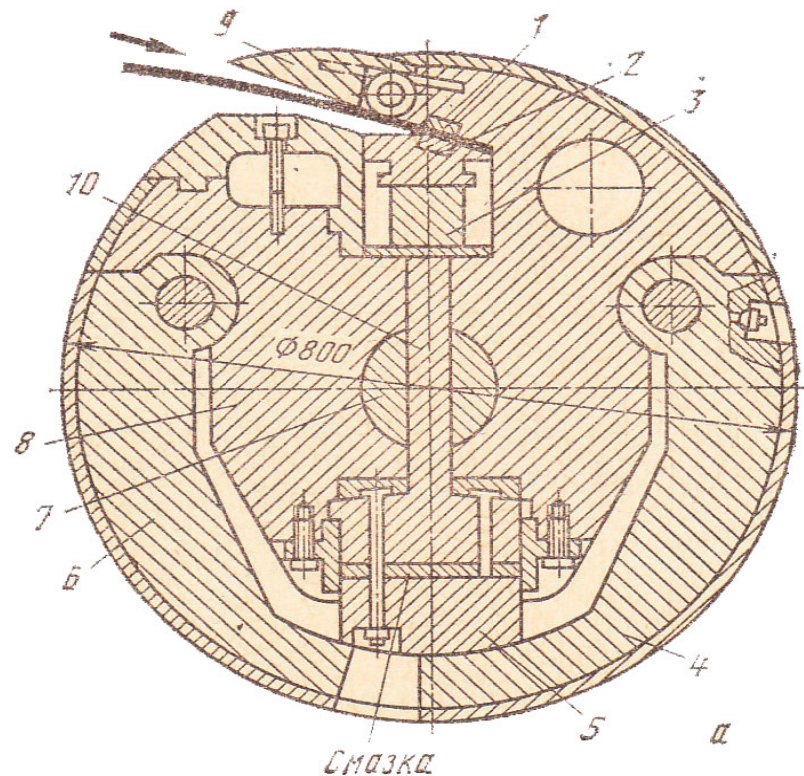


1- роликовий стіл; 2 – холості ролики; 3,4 – направляючі проводки;

Рисунок 1.14 – Роликова прес – проводка

Змотовачі барабанного типу встановлені з передньої і задньої сторін кліті. Призначені для змотування прокатуваної смуги в рулон та створення переднього і заднього натягу смуги в процесі прокатки . Діаметр барабана в розтиснутому стані 760 мм

Привід від електродвигуна потужністю 2000 кВт, 200/500 об/хв., Через редуктор з передавальним відношенням рівним 2 .



1,2 – губки, 3 – верхній клин, 4,6 – сегменти, 7 – шток, 8 – барабан змотувача, 10 – повзунок

Рисунок 1.15 – Розріз барабану змотувача

Знімач рулонів, встановлений біля лівого змотувача. Він призначений для зняття рулонів з барабана змотувача за станом. Знімач рулонів складається з візка з підйомним столом, напрямних балок, горизонтального гідравлічного гідроциліндра для пересування візка уздовж осі барабана моталки і рухомого настилу.

Реверсивний стан 1680 обладнаний двома радіоізотопними товщиномірами, встановленими з лівої і правої сторін за робочою кліті.

Прокатні валки – змінний робочий, технологічний інструмент прокатних станів, який в значній мірі визначає продуктивність станів, якість прокату, сталість технології, енергоємність та безаварійність процесу прокатки.

За призначенням і формою бочки розрізняють валки з комбінованою, гладкою, каліброваною бочкою відповідно для прокатки напівпродуктів, штаб, листів і сортових профілів. По сприйняттю сили і моменту прокатки валки поділяються на опорні та робочі. У клітей дуо і кварто робочі валки приводні і сприймають крутні моменти. Робочі валки клітей дуо сприймають і сила прокатки, тобто одночасно працюють на згин і кручення [1].

В клітей кварто робочі валки працюють на кручення, а опорні – розвантажують їх від сили прокатки, тобто працюють тільки на згин, маючи в 2-3 рази більший діаметр бочок у порівнянні з бочками робочих валків.

Валки виготовляють литвом і куванням. Відливають валки із чавуна та вуглецевих сталей. Відковують валки із легованих сталей. Валкові чавуни і сталі в тій, чи іншій мірі легують хромом, нікелем, кремнієм, марганцем, молібденом, ванадієм і вольфрамом. Завдяки куванню валки мають достатню міцність, твердість та високу якість поверхні. Термічною обробкою досягають необхідного поєднання та зв'язку поверхневого загартованого прошарку та внутрішньої в'язкої серцевинної частини валків.

Найважливішими показниками якості валків є твердість поверхні бочки та загальна міцність валків.

По твердості валки використовують трьох класів:

Клас валків	Твердість, одиниць	
	(по Брінелю) HB	(по Шору) HS
Напівтверді	250...400	35...60
Тверді	400...600	60...85
Особливо тверді	600...800	85...100

При визначенні міцності валок розглядають як двоопорну балку навантажену силою прокатування та крутним моментом, що спричиняє появу в тілі валка крутих і згинаючих напружень. Сумісна дія цих напружень, себто еквівалентне напруження σ_e , не повинно перевищувати за величиною допустиме напруження $[\sigma]$, яке дорівнює

$$[\sigma] = \frac{\sigma_B}{[n]} \quad (1.1)$$

де σ_B - межа міцності матеріалу валків; $[n]$ - коефіцієнт запасу міцності, мінімальна величина якого для валка дорівнює 5.

В існуючих пристроях протизгину плунжери встановлюють по осі шийок валка [3], [4], що, на наш погляд, є не обов'язковим, тому сила, що діє від плунжера на шийку робочого валка, не загрожує поломки. Цілком раціональним є зміщення гідроциліндрів і плунжерів від осі шийок до торця шийки валка .

Гідроциліндри з плунжерами розміщують в нижніх подушках на відстані в $1C = (1,10 \dots 1,20) d / 2$ (де d - зовнішній діаметр гідроциліндра, який визначається конструктивно виходячи з міцності подушки; b - відстань від осі отвору для гідроциліндра до бічної поверхні подушки). Радіус торцевої сферичної (параболічної) поверхні накладки також визначається конструктивно і може дорівнювати $r = (2,5 \dots 5,0) d$. Пристрій працює наступним чином. При прокатуванні штаби10 відбувається прогин валка з більшою величиною по осі валків. При цьому крайові ділянки бочок отримують меншу вертикальне переміщення, що викликає більшу обтиснення кромки штаби на ділянках «п» і появи дефекту «хвилястості» для зменшення обтиску штаби на ділянках «п» на шийки робочих валків діють силою Q протизгину валка . Під дією сили Q збільшується прогин кінцевих ділянок валків відносно точки «m» у контактні робочих і опорних валків.

1.5 Висновок до розділу 1

В розділі розглянуто процес зміцнення низьколегованих сталей, та основні фактори які впливають на зміцнення сталей при холодній деформації за допомогою прокатки. За результатами аналізу визначено, що основним

фактором який впливає на процес зміцнення при холодній прокатці - це величина відносного обтиску, хімічний склад низьколегованих сталей та менш впливові фактори такі як швидкість деформації, дрібність деформації, та деформаційний розігрів. Було визначено що найбільш інтенсивне зміцнення сталі проходить при обтисненні до 30%, при подальшому обтисненню інтенсивність зміцнення знижується.

Розглянуто існуючі моделі розрахунку напруження течії металу при холодній прокатці та визначено, опір деформації при холодній прокатці залежить від наявності в кристалічній структурі металу різних недоліків таких як дислокації, та їх щільність у кристалічній структурі також опір деформації при холодній прокатці залежить від розміру зерна та дисперсності фаз в структурі металу. Всі ці фактори враховуються в моделях визначення межі текучості.

Розглянуто особливості формування напруження текучості в низьколегованих сталях. Визначено, що в низьколегованих сталях атоми легуючих елементів заміщення та впровадження в кристалічній структурі фериту створюють більше дислокацій та перешкод для руху цих дислокацій, подрібнюють величину зерна. Тому процес зміцнення при холодній прокатці низьколегованих сталей протікає більш активно ніж при прокатці низьковуглецевих сталей.

Розглянуто реверсивний стан 1680, який знаходиться на ПАТ «Запоріжсталь» і використовується для прокатки низьковуглецевих та низьколегованих конструкційних сталей.

2 ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ З ВИЗНАЧЕННЯ НАПРУЖЕННЯ ТЕЧІЇ МЕТАЛУ ПРИ ХОЛОДНІЙ ПРОКАТЦІ

В даному розділі проводиться розрахунок режиму деформації та напруження текучості для трьох марок сталей (09Г2, 12ГС, 30ХГСА). Напруження текучості буде розрахована за моделлю запропонованою Трет'яковим А.В., та моделлю Ніколаєва В.О.

2.1. Розрахунок режиму деформації

Початкові та кінцеві розміри штаби для трьох марок сталей однакові, тому розрахунок режиму деформації для трьох марок сталей аналогічний.

Вихідні дані:

$$h_0 \times b_0 = 3 \times 1250 \text{ мм};$$

$$h_k \times b_k = 1,4 \times 1250 \text{ мм};$$

Визначаємо загальний коефіцієнт обтиску

$$\eta_{\text{общ}} = \frac{h_k}{h_0} = \frac{1,4}{3} = 0,47; \quad (2.1)$$

Визначаємо середній коефіцієнт обтиску

$$\eta_{\text{ср}} = \sqrt[n]{\eta_{\text{общ}}}, \text{ звідки } n - \text{кількість проходів.}$$

Кількість обтисків для приведених марок сталей та для даних розмірів штаби приймаємо $n = 4$, згідно з умов пластичності. Так як рулон після

прокатки знімається з правої моталки, кількість проходів повинна бути непарна, тому в першому проході виконуємо перемотку.

$$\eta_{\text{cp}} = \sqrt[4]{0,47} = 0,83. \quad (2.2)$$

Розподіляємо обтиски по проходах

Коефіцієнти обтиску розподіляємо беручи до уваги пластичність металу, найбільше обтиснення приймаємо в першому проході, далі обтиснення буде зменшуватися, тому що в процесі деформації метал набуває наклепану структуру, що зменшує здатність металу до деформації.

$$\eta_{\text{общ}} = 0,730 \times 0,822 \times 0,890 \times 0,875 = 0,47. \quad (2.3)$$

Визначаємо товщину штаби по проходах

$$h_1 = h_0 \times \eta_1 = 3 \times 0,73 = 2,19 \text{ мм}; \quad (2.4)$$

$$h_2 = h_1 \times \eta_2 = 2,19 \times 0,822 = 1,8 \text{ мм};$$

$$h_3 = h_2 \times \eta_3 = 1,8 \times 0,890 = 1,6 \text{ мм};$$

$$h_4 = h_3 \times \eta_4 = 1,6 \times 0,875 = 1,4 \text{ мм};$$

Визначаємо величину абсолютного обтиску по проходах

$$\Delta h_1 = h_0 - h_1 = 3 - 2,19 = 0,81 \text{ мм}; \quad (2.5)$$

$$\Delta h_2 = h_1 - h_2 = 2,19 - 1,8 = 0,39 \text{ мм};$$

$$\Delta h_3 = h_2 - h_3 = 1,8 - 1,6 = 0,20 \text{ мм};$$

$$\Delta h_4 = h_3 - h_4 = 1,6 - 1,4 = 0,20 \text{ мм};$$

Визначаємо відносний обтиск по проходах

$$\begin{aligned}\varepsilon_{\Delta h_1} &= \frac{\Delta h_1}{h_0} \times 100\% = \frac{0,81}{3} \times 100\% = 27,0\%; \\ \varepsilon_{\Delta h_2} &= \frac{\Delta h_2}{h_1} \times 100\% = \frac{0,39}{2,19} \times 100\% = 17,8\%; \\ \varepsilon_{\Delta h_3} &= \frac{\Delta h_3}{h_2} \times 100\% = \frac{0,20}{1,8} \times 100\% = 11,1\%; \\ \varepsilon_{\Delta h_4} &= \frac{\Delta h_4}{h_3} \times 100\% = \frac{0,20}{1,6} \times 100\% = 12,5\%;\end{aligned}\tag{2.6}$$

Визначаємо сумарний відносний обтиск по проходах

$$\begin{aligned}\Sigma \varepsilon_1 &= \frac{h_0 - h_1}{h_0} \times 100\% = \frac{3 - 2,19}{3} \times 100\% = 27,0\%; \\ \Sigma \varepsilon_2 &= \frac{h_0 - h_2}{h_0} \times 100\% = \frac{3 - 1,8}{3} \times 100\% = 40,0\%; \\ \Sigma \varepsilon_3 &= \frac{h_0 - h_3}{h_0} \times 100\% = \frac{3 - 1,6}{3} \times 100\% = 46,7\%; \\ \Sigma \varepsilon_4 &= \frac{h_0 - h_4}{h_0} \times 100\% = \frac{3 - 1,4}{3} \times 100\% = 53,3\%;\end{aligned}\tag{2.7}$$

Визначаємо кути захоплення по проходах

$$\begin{aligned}\alpha_1 &= \sqrt{\frac{\Delta h_1}{R}} \times 57,3 = \sqrt{\frac{0,81}{255}} \times 57,3 = 3,23^\circ; \\ \alpha_2 &= \sqrt{\frac{\Delta h_2}{R}} \times 57,3 = \sqrt{\frac{0,39}{255}} \times 57,3 = 2,24^\circ;\end{aligned}\tag{2.8}$$

$$\alpha_3 = \sqrt{\frac{\Delta h_3}{R}} \times 57,3 = \sqrt{\frac{0,20}{255}} \times 57,3 = 1,60^\circ ;$$

$$\alpha_4 = \sqrt{\frac{\Delta h_4}{R}} \times 57,3 = \sqrt{\frac{0,20}{255}} \times 57,3 = 1,60^\circ ;$$

Визначаємо площі поперечного перерізу штаби по проходах

$$F_0 = h_0 \times b_0 = 3 \times 1250 = 3750 \text{ мм}^2 ; \quad (2.9)$$

$$F_1 = h_1 \times b_1 = 2,19 \times 1250 = 2737,5 \text{ мм}^2 ;$$

$$F_2 = h_2 \times b_2 = 1,8 \times 1250 = 2250 \text{ мм}^2 ;$$

$$F_3 = h_3 \times b_3 = 1,6 \times 1250 = 2000 \text{ мм}^2 ;$$

$$F_4 = h_4 \times b_4 = 1,4 \times 1250 = 1750 \text{ мм}^2 ;$$

Визначаємо коефіцієнт витяжки по проходах

$$\mu_1 = \frac{F_0}{F_1} = \frac{3750}{2737,5} = 1,370 ; \quad (2.10)$$

$$\mu_2 = \frac{F_1}{F_2} = \frac{2737,5}{2250} = 1,217 ;$$

$$\mu_3 = \frac{F_2}{F_3} = \frac{2250}{2000} = 1,125 ;$$

$$\mu_4 = \frac{F_3}{F_4} = \frac{2000}{1750} = 1,143 ;$$

Визначаємо довжину осередку деформації

$$l_1 = \sqrt{R \times \Delta h_1} = \sqrt{255 \times 0,81} = 14,37 \text{ мм} = 0,01437 \text{ м} ; \quad (2.11)$$

$$l_2 = \sqrt{R \times \Delta h_2} = \sqrt{255 \times 0,39} = 9,97 \text{ мм} = 0,0099 \text{ м} ;$$

$$l_3 = \sqrt{R \times \Delta h_3} = \sqrt{255 \times 0,2} = 7,14 \text{ мм} = 0,00714 \text{ м} ;$$

$$l_4 = \sqrt{R \times \Delta h_4} = \sqrt{255 \times 0,2} = 7,14 \text{ мм} = 0,00714 \text{ м.}$$

Визначаємо середню висоту осередку деформації

$$h_{\text{cp1}} = \frac{h_0 + h_1}{2} = \frac{3 + 2,19}{2} = 2,595 \text{ мм}; \quad (2.12)$$

$$h_{\text{cp2}} = \frac{h_1 + h_2}{2} = \frac{2,19 + 1,8}{2} = 1,995 \text{ мм};$$

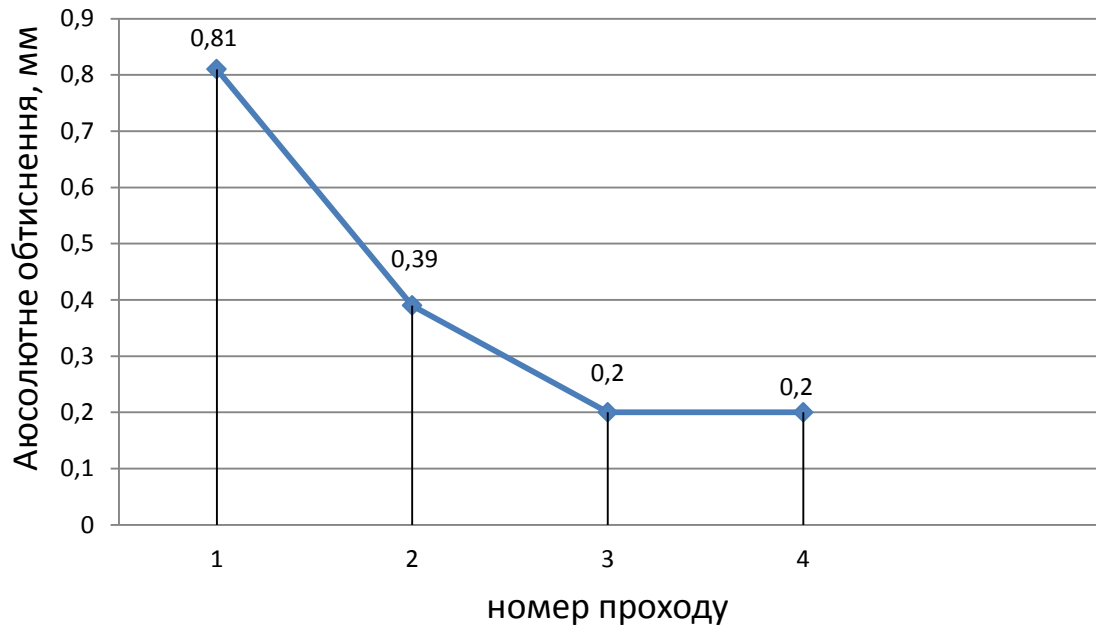
$$h_{\text{cp3}} = \frac{h_2 + h_3}{2} = \frac{1,8 + 1,6}{2} = 1,7 \text{ мм};$$

$$h_{\text{cp4}} = \frac{h_3 + h_4}{2} = \frac{1,6 + 1,4}{2} = 1,5 \text{ мм}.$$

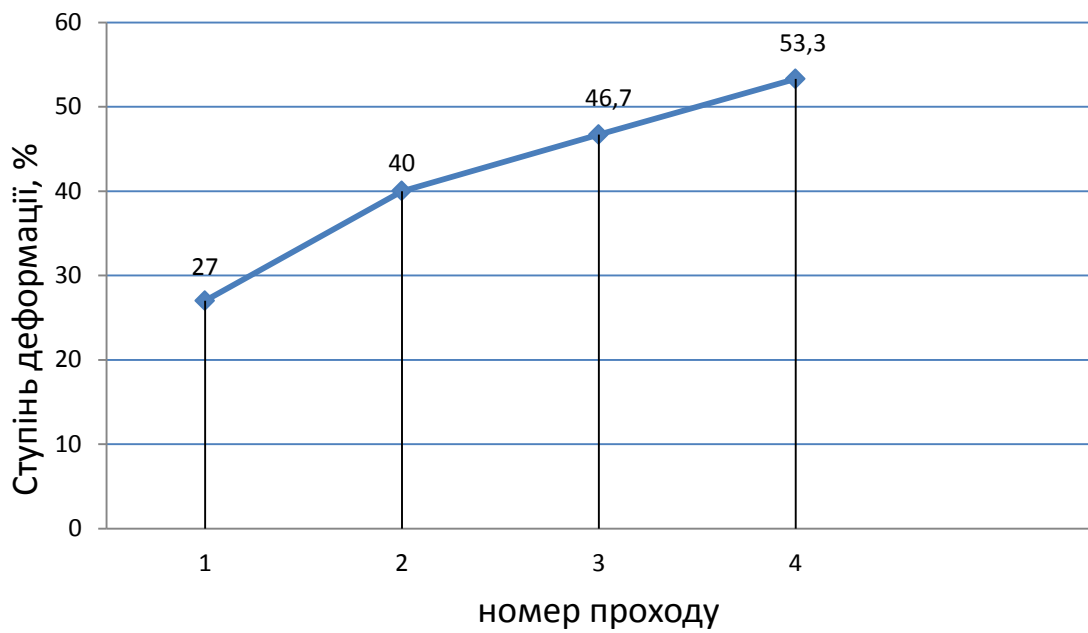
Результат розрахунку режиму деформації заносимо до таблиці 2.1

Таблиця 2.1- Режим деформації штаби 1,4 × 1250 мм

№ прох.	h_0 , мм	h_k , мм	Δh , мм	ε , %	ε_{Σ} , %	α , °	F , мм ²	μ	v , м/с
1	3,0	2,19	0,81	27	27	3,23	2737,5	1,37	4,5
2	2,19	1,8	0,39	17,8	40	2,24	2250	1,217	4,5
3	1,8	1,6	0,2	11,1	46,7	1,6	2000	1,125	4,5
4	1,6	1,4	0,2	12,5	53,3	1,6	1750	1,143	4,5



Графік 2.1- Залежність абсолютного обтиснення від проходу



Графік 2.2 – Залежність ступеня деформації від проходу

2.2. Розрахунок напруження текучості для сталей 09Г2, 12ГС, 30ХГСА за моделлю Третьякова А.В.

Спочатку розрахунок напруження текучості проводимо за моделлю Третьякова А.В., без урахування впливу температури і швидкості деформації. Після визначення опору деформації та середнього контактного тиску, визначаємо температуру штаби після кожного проходу. Температуру визначаємо за формулою О.П. Чекмарьова яку взято з роботи .

Розрахунок середнього контактного тиску виконуємо за методом М. Стоуна. Визначаємо коефіцієнт тертя при встановленому процесі прокатки. Коефіцієнт тертя визначаємо за формулою О.П. Грудєва.

$$f = k_m \times \left(0,07 - \frac{0,1 \times v^2}{3 \times v^2 + 2 \times v + 2} \right); \quad (2.13)$$

k_m – коефіцієнт, який враховує вплив змащення;

$k_m = 1$, для емульсії;

$$f_1 = 1 \times \left(0,07 - \frac{0,1 \times 4,5^2}{3 \times 4,5^2 + 2 \times 4,5 + 2} \right) = 0,042 ;$$

$$f_2 = 1 \times \left(0,07 - \frac{0,1 \times 4,5^2}{3 \times 4,5^2 + 2 \times 4,5 + 2} \right) = 0,042 ;$$

$$f_3 = 1 \times \left(0,07 - \frac{0,1 \times 4,5^2}{3 \times 4,5^2 + 2 \times 4,5 + 2} \right) = 0,042 ;$$

$$f_4 = 1 \times \left(0,07 - \frac{0,1 \times 4,5^2}{3 \times 4,5^2 + 2 \times 4,5 + 2} \right) = 0,042 ;$$

$$f_5 = 1 \times \left(0,07 - \frac{0,1 \times 4,5^2}{3 \times 4,5^2 + 2 \times 4,5 + 2} \right) = 0,042 .$$

Визначасмо першу номографічну величину

$$\begin{aligned} \left(\frac{f_1 \times l_1}{h_{cp1}}\right)^2 &= \left(\frac{0,042 \times 0,01437}{2,595 \times 10^{-3}}\right)^2 = 0,054; \\ \left(\frac{f_2 \times l_2}{h_{cp2}}\right)^2 &= \left(\frac{0,042 \times 0,0099}{1,995 \times 10^{-3}}\right)^2 = 0,047; \\ \left(\frac{f_3 \times l_3}{h_{cp3}}\right)^2 &= \left(\frac{0,042 \times 0,00714}{1,7 \times 10^{-3}}\right)^2 = 0,031; \\ \left(\frac{f_4 \times l_4}{h_{cp4}}\right)^2 &= \left(\frac{0,042 \times 0,00714}{1,5 \times 10^{-3}}\right)^2 = 0,04. \end{aligned} \quad (2.14)$$

Визначаємо межу текучості сталі 09Г2 з урахуванням впливу сумарного обтиску. Межа текучості після гарячої прокатки (в відпаленому стані) складає

$$\sigma_{T_0} = 320 \text{ МН/М}^2.$$

$\sigma_{T_1} = \sigma_{T_0} + m(\varepsilon_{\Sigma} \cdot 100)^k$ коефіцієнти m та k для відповідної марки сталі знаходимо за таблицею 1.1.

$$\sigma_{T_1} = \sigma_{T_0} + m(\sum \varepsilon_1 \cdot 100)^k = 320 + 59(0,27 \cdot 100)^{0,46} = 588,7 \text{ МН/М}^2; \quad (2.15)$$

$$\sigma_{T_2} = \sigma_{T_0} + m(\sum \varepsilon_2 \cdot 100)^k = 320 + 59(0,40 \cdot 100)^{0,46} = 642 \text{ МН/М}^2;$$

$$\sigma_{T_3} = \sigma_{T_0} + m(\sum \varepsilon_3 \cdot 100)^k = 320 + 59(0,467 \cdot 100)^{0,46} = 665,73 \text{ МН/М}^2;$$

$$\sigma_{T_4} = \sigma_{T_0} + m(\sum \varepsilon_4 \cdot 100)^k = 320 + 59(0,533 \cdot 100)^{0,46} = 687,4 \text{ МН/М}^2.$$

Визначасмо натяг переднього і заднього кінця штаби

$$\delta_0 = (0,3 \div 0,35)\sigma_{T_0} = 0,3 \times 320 = 96 \text{ МН/М}^2 ; \quad (2.16)$$

$$\delta_1 = 0,3 \times \sigma_{T_1} = 0,3 \times 588,7 = 176,61 \text{ МН/М}^2 ;$$

$$\delta_2 = 0,3 \times \sigma_{T_2} = 0,3 \times 642 = 192,6 \text{ МН/М}^2 ;$$

$$\delta_3 = 0,3 \times \sigma_{T_3} = 0,3 \times 665,73 = 199,72 \text{ МН/М}^2 ;$$

$$\delta_4 = 0,3 \times \sigma_{T_4} = 0,3 \times 687,4 = 206,28 \text{ МН/М}^2 .$$

Визначасмо середній натяг штаби

$$\delta_{cp} = \frac{\delta_0 + \delta_1}{2} ; \quad (2.17)$$

$$\delta_{cp1} = \frac{\delta_0 + \delta_1}{2} = \frac{96 + 176,61}{2} = 136,3 \text{ МН/М}^2 ;$$

$$\delta_{cp2} = \frac{\delta_1 + \delta_2}{2} = \frac{176,61 + 192,6}{2} = 184,6 \text{ МН/М}^2 ;$$

$$\delta_{cp3} = \frac{\delta_2 + \delta_3}{2} = \frac{192,6 + 199,72}{2} = 196,16 \text{ МН/М}^2 ;$$

$$\delta_{cp4} = \frac{\delta_3 + \delta_4}{2} = \frac{199,72 + 206,28}{2} = 203 \text{ МН/М}^2 ;$$

Визначасмо другу номографічну величину

$$\begin{aligned} 2 \times \frac{R}{93000} \times \frac{f}{h_{cp1}} \times (1,15 \times \sigma_{T_1} - \delta_{cp1}) \\ = 2 \times \frac{255}{93000} \times \frac{0,042}{2,595} \times (1,15 \times 588,7 - 136,3) = 0,048 ; \quad (2.18) \end{aligned}$$

$$2 \times \frac{R}{93000} \times \frac{f}{h_{cp2}} \times (1,15 \times \sigma_{T2} - \delta_{cp2})$$

$$= 2 \times \frac{255}{93000} \times \frac{0,042}{1,995} \times (1,15 \times 642 - 184,6) = 0,064 ;$$

$$2 \times \frac{R}{93000} \times \frac{f}{h_{cp3}} \times (1,15 \times \sigma_{T3} - \delta_{cp3})$$

$$= 2 \times \frac{255}{93000} \times \frac{0,042}{1,7} \times (1,15 \times 665,73 - 196,16) = 0,077 ;$$

$$2 \times \frac{R}{93000} \times \frac{f}{h_{cp4}} \times (1,15 \times \sigma_{T4} - \delta_{cp4})$$

$$= 2 \times \frac{255}{93000} \times \frac{0,042}{1,5} \times (1,15 \times 687,4 - 203) = 0,09 ;$$

За номограмою Стоуна визначаємо значення величини x

$$x_1 = 0,248 ; \quad (2.19)$$

$$x_2 = 0,242 ;$$

$$x_3 = 0,21 ;$$

$$x_4 = 0,243 .$$

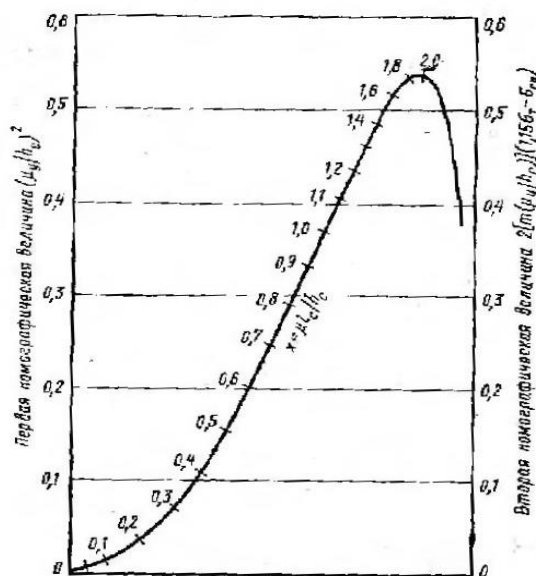


Рисунок 2.1 – Номограма М. Стоуна

Згідно отриманих значень x знаходимо за таблицею коефіцієнт, який враховує вплив тертя

$$\begin{aligned} n'_{\delta_1} &= 1,137 ; \\ n'_{\delta_2} &= 1,131 ; \\ n'_{\delta_3} &= 1,112 ; \\ n'_{\delta_4} &= 1,131 . \end{aligned} \quad (2.20)$$

Із величини $x \times h_{cp} = l_c \times f$ знаходимо довжину осередку деформації з урахуванням сплюснення валків

$$\begin{aligned} l_{c_1} &= \frac{x_1 \times h_{cp1}}{f_1} = \frac{0,248 \times 2,595 \times 10^{-3}}{0,042} = 1,532 \times 10^{-2} \text{ м} ; \\ l_{c_2} &= \frac{x_2 \times h_{cp2}}{f_2} = \frac{0,242 \times 1,995 \times 10^{-3}}{0,042} = 1,1495 \times 10^{-2} \text{ м} ; \\ l_{c_3} &= \frac{x_3 \times h_{cp3}}{f_3} = \frac{0,21 \times 1,7 \times 10^{-3}}{0,042} = 0,85 \times 10^{-2} \text{ м} ; \\ l_{c_4} &= \frac{x_4 \times h_{cp4}}{f_4} = \frac{0,243 \times 1,5 \times 10^{-3}}{0,042} = 0,868 \times 10^{-2} \text{ м} . \end{aligned} \quad (2.21)$$

Так як $\frac{l}{h_{cp}} > 1$, то приймаємо коефіцієнт, який враховує вплив зовнішніх зон $n''_{\delta} = 1$.

Визначаємо опір деформації

$$k_1 = \frac{\sigma_{T_0} + \sigma_{T_1}}{2} = \frac{320 + 588,7}{2} = 454,35 \text{ МН/м}^2 ; \quad (2.22)$$

$$k_2 = \frac{\sigma_{T_1} + \sigma_{T_2}}{2} = \frac{588,7 + 642}{2} = 615,35 \text{ МН/м}^2;$$

$$k_3 = \frac{\sigma_{T_2} + \sigma_{T_3}}{2} = \frac{642 + 665,73}{2} = 653,87 \text{ МН/м}^2;$$

$$k_4 = \frac{\sigma_{T_3} + \sigma_{T_4}}{2} = \frac{665,73 + 687,4}{2} = 676,59 \text{ МН/м}^2.$$

Визначаємо коефіцієнт, який враховує натяг смуги

n_b – коефіцієнт який враховує вплив ширини смуги;

Приймаємо

$$n_b = 1,15 \text{ так як } \frac{b}{l_{cp}} > 5$$

$$n_{\delta_1}''' = 1 - \frac{\delta_0 + \delta_1}{2 \times k \times n_b};$$

$$n_{\delta_1}''' = 1 - \frac{\delta_0 + \delta_1}{2 \times k_1 \times n_b} = 1 - \frac{96 + 176,61}{2 \times 454,35 \times 1,15} = 0,74; \quad (2.23)$$

$$n_{\delta_2}''' = 1 - \frac{\delta_1 + \delta_2}{2 \times k_2 \times n_b} = 1 - \frac{176,61 + 192,6}{2 \times 615,35 \times 1,15} = 0,74;$$

$$n_{\delta_3}''' = 1 - \frac{\delta_2 + \delta_3}{2 \times k_3 \times n_b} = 1 - \frac{192,6 + 199,72}{2 \times 653,87 \times 1,15} = 0,74;$$

$$n_{\delta_4}''' = 1 - \frac{\delta_3 + \delta_4}{2 \times k_4 \times n_b} = 1 - \frac{199,72 + 206,28}{2 \times 676,59 \times 1,15} = 0,74.$$

Визначаємо середній контактний тиск

$$p_{cp1} = k_1 \times n_b \times n_{\delta_1}' \times n_{\delta_1}'' \times n_{\delta_1}''' = 454,35 \times 1,15 \times 1,137 \times 1 \times 0,74 = 439,627 \text{ МН/м}^2; \quad (2.24)$$

$$p_{cp2} = k_2 \times n_b \times n_{\delta_2}' \times n_{\delta_2}'' \times n_{\delta_2}''' = 615,35 \times 1,15 \times 1,131 \times 1 \times 0,74 = 592,246 \text{ МН/м}^2;$$

$$p_{cp3} = k_3 \times n_b \times n_{\delta_3}' \times n_{\delta_3}'' \times n_{\delta_3}''' = 653,87 \times 1,15 \times 1,112 \times 1 \times 0,74 = 618,74 \text{ МН/м}^2;$$

$$p_{cp4} = k_4 \times n_b \times n_{\delta_4}' \times n_{\delta_4}'' \times n_{\delta_4}''' = 676,59 \times 1,15 \times 1,131 \times 1 \times 0,74 = 651,184 \text{ MN}/\text{M}^2.$$

Визначаємо межу текучості за моделлю А.В. Третьякова з урахуванням деформаційного розігріву смуги та швидкості деформації.

Температуру смуги визначаємо за формулою О.П. Чекмарева, А.П. Грудєва,

$t_1 = t_0 + \Delta t_1$, звідки t_0 – початкова температура смуги, Δt_1 – приріст температури в осередку деформації.

$$\Delta t_1 = 0,05 \times m(k_1 + p_{cp1}) \ln \frac{h_0}{h_1}, \quad (2.25)$$

звідки m -коефіцієнт для легуючої сталі:

$$m = 2,08 - 0,35 \left(\frac{t_0}{480} - 0,042 \right)^{1,6}. \quad (2.26)$$

Початкова температура смуги дорівнює 40°C.

Приріст температури в першому проході:

$$\begin{aligned} m &= 2,08 - 0,35 \left(\frac{t_0}{480} - 0,042 \right)^{1,6} = 2,08 - 0,35 \left(\frac{40}{480} - 0,042 \right)^{1,6} \\ &= 2,078; \end{aligned} \quad (2.27)$$

$$\Delta t_1 = 0,05 \times 2,078 \times (454,35 + 439,627) \times \ln \frac{3}{2,19} = 29,232^\circ\text{C}; \quad (2.28)$$

$$t_1 = t_0 + \Delta t_1 = 40 + 29,232 = 69,232^\circ\text{C}. \quad (2.29)$$

Визначаємо температуру смуги в другому проході:

$$\begin{aligned} m &= 2,08 - 0,35 \left(\frac{t_1}{480} - 0,042 \right)^{1,6} = 2,08 - 0,35 \left(\frac{69,232}{480} - 0,042 \right)^{1,6} \\ &= 2,071; \end{aligned} \quad (2.30)$$

$$\Delta t_2 = 0,05 \times 2,071 \times (615,35 + 592,246) \times \ln \frac{2,19}{1,8} = 24,522^\circ\text{C}; \quad (2.31)$$

$$t_2 = t_1 + \Delta t_2 = 69,232 + 24,522 = 93,754^\circ\text{C}. \quad (2.32)$$

Визначаємо температуру смуги в третьому проході:

$$\begin{aligned} m &= 2,08 - 0,35 \left(\frac{t_2}{480} - 0,042 \right)^{1,6} = 2,08 - 0,35 \left(\frac{93,754}{480} - 0,042 \right)^{1,6} \\ &= 2,063; \end{aligned} \quad (2.33)$$

$$\Delta t_3 = 0,05 \times 2,063 \times (653,87 + 618,74) \times \ln \frac{1,8}{1,6} = 15,46^\circ\text{C}; \quad (2.34)$$

$$t_3 = t_2 + \Delta t_3 = 93,754 + 15,46 = 107,711^\circ\text{C}. \quad (2.35)$$

Визначаємо температуру смуги в четвертому проході:

$$\begin{aligned} m &= 2,08 - 0,35 \left(\frac{t_3}{480} - 0,042 \right)^{1,6} = 2,08 - 0,35 \left(\frac{107,711}{480} - 0,042 \right)^{1,6} \\ &= 2,0564; \end{aligned} \quad (2.36)$$

$$\Delta t_4 = 0,05 \times 2,064 \times (676,59 + 651,184) \times \ln \frac{1,6}{1,4} = 18,23^\circ\text{C}; \quad (2.37)$$

$$t_4 = t_3 + \Delta t_4 = 107,711 + 18,23 = 127,44^\circ\text{C}. \quad (2.38)$$

Визначаємо межу текучості після кожного проходу з урахуванням ступеня деформації та температури штаби

$$\sigma_{\text{TK}_\varepsilon k_t k_u} = \sigma_{\text{T0}} k_\varepsilon k_t. \quad (2.39)$$

Визначаємо коефіцієнти зміцнення штаби в кожному проході

$$k_{\varepsilon 1} = 1 + m_1 (\varepsilon_\Sigma \cdot 100)^k, \text{ звідки } m_1 \text{ та } k \text{ знаходимо з таблиці 1.1.}$$

$$k_{\varepsilon 1} = 1 + m_1 (\sum \varepsilon_1 \cdot 100)^k = 1 + 0,1844 (0,27 \cdot 100)^{0,46} = 1,84; \quad (2.40)$$

$$k_{\varepsilon 2} = 1 + 0,1844 (0,40 \cdot 100)^{0,46} = 2,006;$$

$$k_{\varepsilon 3} = 1 + 0,1844(0,467 \cdot 100)^{0,46} = 2,080;$$

$$k_{\varepsilon 4} = 1 + 0,1844(0,533 \cdot 100)^{0,46} = 2,148;$$

Визначаємо коефіцієнт, що враховує вплив температури штаби на межу текучості у кожному проході

$$k_{t0} = a_0 + a_1 \left(\frac{t - t_{\text{CT}}}{t_{\text{ПЛ}}} \right) + a_2 \left(\frac{t - t_{\text{CT}}}{t_{\text{ПЛ}}} \right)^2 + \dots + a_n \left(\frac{t - t_{\text{CT}}}{t_{\text{ПЛ}}} \right)^n; \quad (2.41)$$

$$\begin{aligned} k_0 &= 1 - 6,155 \left(\frac{40 - 20}{1509} \right) + 142,49 \left(\frac{40 - 20}{1509} \right)^2 \\ &\quad - 1300,02 \left(\frac{40 - 20}{1509} \right)^3 + 4712,70 \left(\frac{40 - 20}{1509} \right)^4 \\ &\quad - 5902,70 \left(\frac{40 - 20}{1509} \right)^5 = 0,941; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} k_1 &= 1 - 6,155 \left(\frac{69,232 - 20}{1509} \right) + 142,49 \left(\frac{69,232 - 20}{1509} \right)^2 \\ &\quad - 1300,02 \left(\frac{69,232 - 20}{1509} \right)^3 + 4712,70 \left(\frac{69,232 - 20}{1509} \right)^4 \\ &\quad - 5902,70 \left(\frac{69,232 - 20}{1509} \right)^5 = 0,911; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} k_2 &= 1 - 6,155 \left(\frac{93,754 - 20}{1509} \right) + 142,49 \left(\frac{93,754 - 20}{1509} \right)^2 \\ &\quad - 1300,02 \left(\frac{93,754 - 20}{1509} \right)^3 + 4712,70 \left(\frac{93,754 - 20}{1509} \right)^4 \\ &\quad - 5902,70 \left(\frac{93,754 - 20}{1509} \right)^5 = 0,913; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
k_3 = 1 - 6,155 \left(\frac{107,711 - 20}{1509} \right) + 142,49 \left(\frac{107,711 - 20}{1509} \right)^2 \\
- 1300,02 \left(\frac{107,711 - 20}{1509} \right)^3 + 4712,70 \left(\frac{107,711 - 20}{1509} \right)^4 \\
- 5902,70 \left(\frac{107,711 - 20}{1509} \right)^5 = 0,9188;
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
k_4 = 1 - 6,155 \left(\frac{127,44 - 20}{1509} \right) + 142,49 \left(\frac{127,44 - 20}{1509} \right)^2 \\
- 1300,02 \left(\frac{127,44 - 20}{1509} \right)^3 + 4712,70 \left(\frac{127,44 - 20}{1509} \right)^4 \\
- 5902,70 \left(\frac{127,44 - 20}{1509} \right)^5 = 0,9252.
\end{aligned}$$

Визначаємо напруження текучості в кожному проході з урахуванням впливу температури та ступеня деформації

$$\sigma_{T0k_\varepsilon k_t} = \sigma_{T0} k_\varepsilon k_t = 320 \times 1 \times 0,941 = 300,98 \text{ МН/М}^2; \quad (2.42)$$

$$\sigma_{T1k_\varepsilon k_t} = \sigma_{T0} k_\varepsilon k_t = 320 \times 1,84 \times 0,911 = 536,248 \text{ МН/М}^2;$$

$$\sigma_{T2k_\varepsilon k_t} = \sigma_{T0} k_\varepsilon k_t = 320 \times 2,006 \times 0,913 = 586,159 \text{ МН/М}^2;$$

$$\sigma_{T3k_\varepsilon k_t} = \sigma_{T0} k_\varepsilon k_t = 320 \times 2,08 \times 0,9188 = 611,73 \text{ МН/М}^2;$$

$$\sigma_{T4k_\varepsilon k_t} = \sigma_{T0} k_\varepsilon k_t = 320 \times 2,148 \times 0,9252 = 636,025 \text{ МН/М}^2.$$

Визначаємо коефіцієнт який враховує вплив швидкості деформації на межу текучості

$$k_u = 1 + \frac{0,0075(1 - 0,3\sqrt{\varepsilon_{\Sigma x}})}{1 + 1,75\sqrt{\varepsilon_{\Sigma x}}} \sqrt{\frac{t_{CT}}{t_x}} \left[1 - \frac{3(t_x - t_{CT})}{t_{пл}} \right]^4 \left(\ln \frac{u_x + u_{CT}}{u_{CT}} \right)^{c_1}; \quad (2.43)$$

$$\varepsilon_{\Sigma x} = 1 - (1 - \varepsilon_{\text{пр}})(1 - \varepsilon_x); \quad (2.44)$$

$$c_1 = 1,8 + 0,125 \sqrt{\frac{t_x}{t_{\text{ст}}} - 1}. \quad (2.45)$$

$\varepsilon_{\text{пр}}$ - попередній (на вході в осередок деформації) відносний обтиск, долі одиниць; $\varepsilon_x, \varepsilon_{\Sigma x}$ - частковий і сумарний відносний обтиск в даному перерізі осередку деформації, долі одиниці; t_x - температура штаби в даному перерізі, °C; $t_{\text{ст}}, u_{\text{ст}}$ - температура і швидкість деформації при проведенні статичних випробувань зразків на розтягування ($t_{\text{ст}}=20^\circ\text{C}$; $u_{\text{ст}} = 10^{-3}\text{c}^{-1}$); u - швидкість деформації в даному перерізі, c^{-1} .

Визначаємо середню температуру штаби в осередку деформації у кожному проході

$$t_{\text{ср1}} = \frac{1}{3}(t_{0\text{п}} + 2t_{1\text{п}}) = \frac{1}{3}(40 + 2 \times 68,4) = 59,5^\circ\text{C}; \quad (2.46)$$

$$t_{\text{ср2}} = \frac{1}{3}(68,4 + 2 \times 92,25) = 85,6^\circ\text{C};$$

$$t_{\text{ср3}} = \frac{1}{3}(92,25 + 2 \times 107,7) = 104,1^\circ\text{C};$$

$$t_{\text{ср4}} = \frac{1}{3}(107,7 + 2 \times 125,9) = 121,4^\circ\text{C}.$$

Визначаємо показник ступеня в моделі

$$c_1 = 1,8 + 0,125 \sqrt{\frac{t_x}{t_{\text{ст}}} - 1} = 1,8 + 0,125 \sqrt{\frac{59,5}{20} - 1} = 1,976; \quad (2.47)$$

$$c_2 = 1,8 + 0,125 \sqrt{\frac{85,6}{20} - 1} = 2,03;$$

$$c_3 = 1,8 + 0,125 \sqrt{\frac{104,1}{20} - 1} = 2,056;$$

$$c_4 = 1,8 + 0,125 \sqrt{\frac{121,4}{20}} - 1 = 2,0814.$$

Визначаємо коефіцієнт що враховує вплив швидкості деформації

$$k_{u1} = 1 + \frac{0,0075(1 - 0,3\sqrt{0,27})}{1 + 1,75\sqrt{0,27}} \sqrt{\frac{20}{58,9}} \left[1 - \frac{3(58,9 - 20)}{1509} \right]^4 \left(\ln \frac{140,46 + 0,001}{0,001} \right)^{1,92} = 1,1663; \quad (2.48)$$

$$k_{u2} = 1 + \frac{0,0075(1 - 0,3\sqrt{0,40})}{1 + 1,75\sqrt{0,40}} \sqrt{\frac{20}{84,3}} \left[1 - \frac{3(84,3 - 20)}{1509} \right]^4 \left(\ln \frac{291,5 + 0,001}{0,001} \right)^2 = 1,14;$$

$$k_{u3} = 1 + \frac{0,0075(1 - 0,3\sqrt{0,467})}{1 + 1,75\sqrt{0,467}} \sqrt{\frac{20}{102,55}} \left[1 - \frac{3(102,55 - 20)}{1509} \right]^4 \left(\ln \frac{259,6 + 0,001}{0,001} \right)^2 = 1,1243;$$

$$k_{u4} = 1 + \frac{0,0075(1 - 0,3\sqrt{0,533})}{1 + 1,75\sqrt{0,533}} \sqrt{\frac{20}{119,8}} \left[1 - \frac{3(119,8 - 20)}{1509} \right]^4 \left(\ln \frac{292 + 0,001}{0,001} \right)^{2,11} = 1,1055.$$

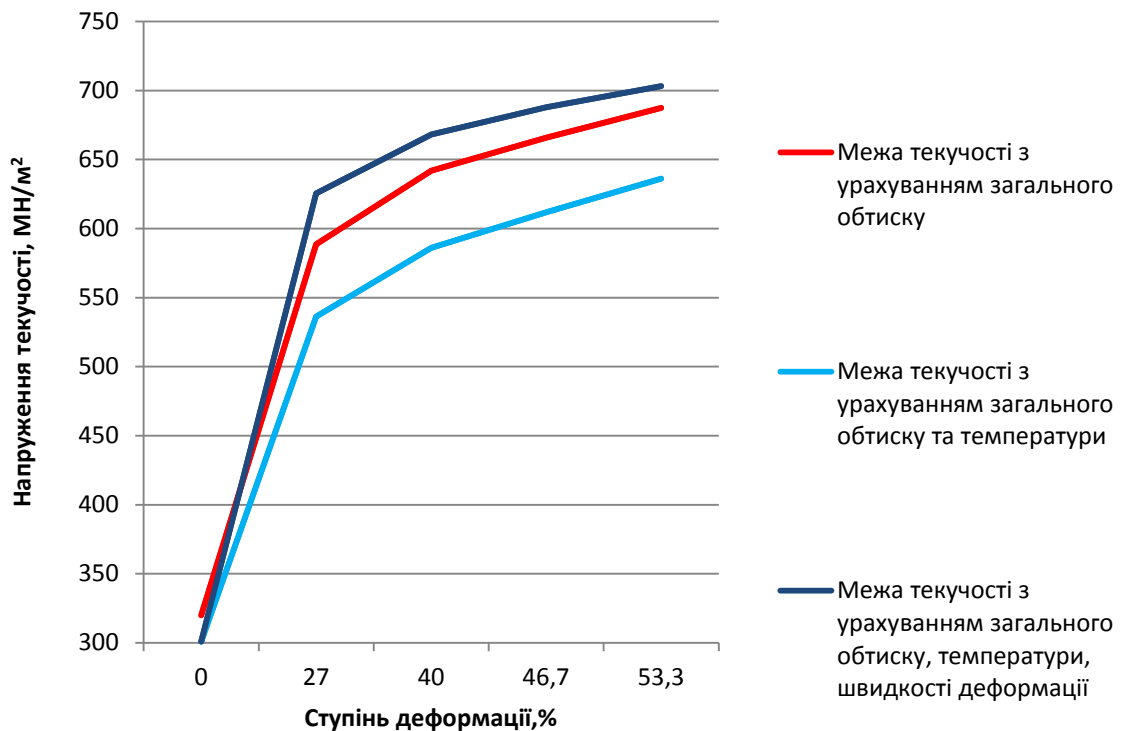
Визначаємо межу текучості в осередку деформації у кожному проході з урахуванням ступеня деформації, температури та швидкості деформації

$$\sigma_{T1k_{\varepsilon}k_t} = \sigma_{T0}k_{\varepsilon}k_tk_u = 320 \times 1,84 \times 0,911 \times 1,16 = 625,43 \text{ МН/М}^2; \quad (2.49)$$

$$\sigma_{T2k_{\varepsilon}k_t} = \sigma_{T0}k_{\varepsilon}k_tk_u = 320 \times 2,006 \times 0,9125 \times 1,128 = 668,234 \text{ МН/М}^2;$$

$$\sigma_{T3k_{\varepsilon}k_t} = \sigma_{T0}k_{\varepsilon}k_t = 320 \times 2,08 \times 0,9182 \times 1,106 = 687,7684 \text{ МН/М}^2;$$

$$\sigma_{T4k_{\varepsilon}k_t} = \sigma_{T0}k_{\varepsilon}k_t = 320 \times 2,148 \times 0,9248 \times 1,09 = 703,1416 \text{ МН/М}^2.$$



Графік 2.3 – Межа текучості з урахуванням коефіцієнтів: зміцнення, температури та швидкості деформації.

Аналогічно визначаємо межу текучості сталі 12ГС з урахуванням впливу сумарного обтиску. Межа текучості після гарячої прокатки (в відпаленому стані) дорівнює:

$$\sigma_{T0} = 500 \text{ МН/М}^2$$

$$\begin{aligned}\sigma_{T_1} &= \sigma_{T_0} + m(\sum \varepsilon_1 \cdot 100)^k = 500 + 100(0,27 \cdot 100)^{0,34} \\ &= 806,66 \text{ МН/М}^2;\end{aligned}\quad (2.50)$$

$$\sigma_{T_2} = \sigma_{T_0} + m(\sum \varepsilon_2 \cdot 100)^k = 500 + 100(0,40 \cdot 100)^{0,34} = 850,5 \text{ МН/М}^2;$$

$$\sigma_{T_3} = \sigma_{T_0} + m(\sum \varepsilon_3 \cdot 100)^k = 500 + 100(0,467 \cdot 100)^{0,34} = 869,46 \text{ МН/М}^2;$$

$$\sigma_{T_4} = \sigma_{T_0} + m(\sum \varepsilon_4 \cdot 100)^k = 500 + 100(0,533 \cdot 100)^{0,34} = 886,44 \text{ МН/М}^2.$$

Визначаємо натяг переднього і заднього кінця штаби

$$\delta_0 = (0,3 \div 0,35)\sigma_{T_0} = 0,3 \times 500 = 150 \text{ МН/М}^2 ; \quad (2.51)$$

$$\delta_1 = 0,3 \times \sigma_{T_1} = 0,3 \times 806,66 = 242 \text{ МН/М}^2 ;$$

$$\delta_2 = 0,3 \times \sigma_{T_2} = 0,3 \times 850,5 = 255,15 \text{ МН/М}^2 ;$$

$$\delta_3 = 0,3 \times \sigma_{T_3} = 0,3 \times 869,46 = 260,84 ;$$

$$\delta_4 = 0,3 \times \sigma_{T_4} = 0,3 \times 886,44 = 265,93 \text{ МН/М}^2 .$$

Визначаємо середній натяг штаби

$$\delta_{cp} = \frac{\delta_0 + \delta_1}{2} ; \quad (2.52)$$

$$\delta_{cp1} = \frac{\delta_0 + \delta_1}{2} = \frac{150 + 242}{2} = 196 \text{ МН/М}^2 ;$$

$$\delta_{cp2} = \frac{\delta_1 + \delta_2}{2} = \frac{242 + 255,15}{2} = 248,6 \text{ МН/М}^2 ;$$

$$\delta_{cp3} = \frac{\delta_2 + \delta_3}{2} = \frac{255,15 + 260,84}{2} = 258 \text{ МН/М}^2 ;$$

$$\delta_{cp4} = \frac{\delta_3 + \delta_4}{2} = \frac{260,84 + 265,93}{2} = 263,4 \text{ МН/м}^2.$$

Визначаємо другу номографічну величину

$$\begin{aligned} 2 \times \frac{R}{93000} \times \frac{f}{h_{cp1}} \times (1,15 \times \sigma_{T1} - \delta_{cp1}) \\ = 2 \times \frac{255}{93000} \times \frac{0,042}{2,595} \times (1,15 \times 806,66 - 196) = 0,065; \end{aligned} \quad (2.53)$$

$$\begin{aligned} 2 \times \frac{R}{93000} \times \frac{f}{h_{cp2}} \times (1,15 \times \sigma_{T2} - \delta_{cp2}) \\ = 2 \times \frac{255}{93000} \times \frac{0,042}{1,995} \times (1,15 \times 850,5 - 248,6) = 0,084; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} 2 \times \frac{R}{93000} \times \frac{f}{h_{cp3}} \times (1,15 \times \sigma_{T3} - \delta_{cp3}) \\ = 2 \times \frac{255}{93000} \times \frac{0,042}{1,7} \times (1,15 \times 869,46 - 258) = 0,1; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} 2 \times \frac{R}{93000} \times \frac{f}{h_{cp4}} \times (1,15 \times \sigma_{T4} - \delta_{cp4}) \\ = 2 \times \frac{255}{93000} \times \frac{0,042}{1,5} \times (1,15 \times 886,44 - 263,4) = 0,116. \end{aligned}$$

За номограмою Стоуна визначаємо значення величини x

$$\begin{aligned} x_1 &= 0,26; \\ x_2 &= 0,256; \\ x_3 &= 0,222; \\ x_4 &= 0,258. \end{aligned} \quad (2.54)$$

Згідно отриманих значень x знаходимо за таблицею коефіцієнт, який враховує вплив тертя

$$\begin{aligned}
 n'_{\delta_1} &= 1,143; \\
 n'_{\delta_2} &= 1,137; \\
 n'_{\delta_3} &= 1,118; \\
 n'_{\delta_4} &= 1,143.
 \end{aligned}
 \tag{2.55}$$

Із величини $x \times h_{\text{cp}} = l_c \times f$ знаходимо довжину осередку деформації з урахуванням сплюснення валків

$$\begin{aligned}
 l_{c_1} &= \frac{x_1 \times h_{\text{cp}_1}}{f_1} = \frac{0,26 \times 2,595 \times 10^{-3}}{0,042} = 1,606 \times 10^{-2} \text{ м}; \\
 l_{c_2} &= \frac{x_2 \times h_{\text{cp}_2}}{f_2} = \frac{0,256 \times 1,995 \times 10^{-3}}{0,042} = 1,216 \times 10^{-2} \text{ м}; \\
 l_{c_3} &= \frac{x_3 \times h_{\text{cp}_3}}{f_3} = \frac{0,222 \times 1,7 \times 10^{-3}}{0,042} = 0,899 \times 10^{-2} \text{ м}; \\
 l_{c_4} &= \frac{x_4 \times h_{\text{cp}_4}}{f_4} = \frac{0,258 \times 1,5 \times 10^{-3}}{0,042} = 0,921 \times 10^{-2} \text{ м}.
 \end{aligned}
 \tag{2.56}$$

Так як $\frac{l}{h_{\text{cp}}} > 1$, то приймаємо коефіцієнт, який враховує вплив зовнішніх зон $n''_{\delta} = 1$.

Визначаємо опір деформації

$$\begin{aligned}
 k_1 &= \frac{\sigma_{T_0} + \sigma_{T_1}}{2} = \frac{500 + 806,66}{2} = 653,33 \text{ МН/м}^2; \\
 k_2 &= \frac{\sigma_{T_1} + \sigma_{T_2}}{2} = \frac{806,66 + 850,5}{2} = 828,59 \text{ МН/м}^2; \\
 k_3 &= \frac{\sigma_{T_2} + \sigma_{T_3}}{2} = \frac{850,5 + 869,46}{2} = 860 \text{ МН/м}^2;
 \end{aligned}
 \tag{2.57}$$

$$k_4 = \frac{\sigma_{T_3} + \sigma_{T_4}}{2} = \frac{869,46 + 886,44}{2} = 878 \text{ МН/М}^2;$$

Визначаємо коефіцієнт, який враховує натяг смуги

n_b – коефіцієнт який враховує вплив ширини смуги;

Приймаємо

$$n_b = 1,15 \text{ так як } \frac{b}{l_{cp}} > 5$$

$$n_{\delta_1}''' = 1 - \frac{\delta_0 + \delta_1}{2 \times k \times n_b};$$

$$n_{\delta_1}''' = 1 - \frac{\delta_0 + \delta_1}{2 \times k_1 \times n_b} = 1 - \frac{150 + 242}{2 \times 653,33 \times 1,15} = 0,74; \quad (2.58)$$

$$n_{\delta_2}''' = 1 - \frac{\delta_1 + \delta_2}{2 \times k_2 \times n_b} = 1 - \frac{242 + 255,15}{2 \times 828,59 \times 1,15} = 0,74;$$

$$n_{\delta_3}''' = 1 - \frac{\delta_2 + \delta_3}{2 \times k_3 \times n_b} = 1 - \frac{255,15 + 260,84}{2 \times 860 \times 1,15} = 0,74;$$

$$n_{\delta_4}''' = 1 - \frac{\delta_3 + \delta_4}{2 \times k_4 \times n_b} = 1 - \frac{260,84 + 265,9}{2 \times 878 \times 1,15} = 0,74.$$

Визначаємо середній контактний тиск

$$p_{cp1} = k_1 \times n_b \times n_{\delta_1}' \times n_{\delta_1}'' \times n_{\delta_1}''' = 653,33 \times 1,15 \times 1,143 \times 1 \times 0,74 = 635,49 \text{ МН/М}^2; \quad (2.59)$$

$$p_{cp2} = k_2 \times n_b \times n_{\delta_2}' \times n_{\delta_2}'' \times n_{\delta_2}''' = 828,59 \times 1,15 \times 1,137 \times 1 \times 0,74 = 801,73 \text{ МН/М}^2;$$

$$p_{cp3} = k_3 \times n_b \times n_{\delta_3}' \times n_{\delta_3}'' \times n_{\delta_3}''' = 860 \times 1,15 \times 1,118 \times 1 \times 0,74 = 818,2 \text{ МН/М}^2;$$

$$p_{cp4} = k_4 \times n_b \times n_{\delta_4}' \times n_{\delta_4}'' \times n_{\delta_4}''' = 878 \times 1,15 \times 1,143 \times 1 \times 0,74 = 853,98 \text{ МН/М}^2.$$

Аналогічно попередньому розрахунку визначаємо температуру смуги по проходах.

$$\begin{aligned}
 t_0 &= 40^\circ\text{C}; \\
 t_1 &= t_0 + \Delta t_1 = 40 + 42,14 = 82,14^\circ\text{C}; \\
 t_2 &= t_1 + \Delta t_2 = 82,14 + 33 = 115,14^\circ\text{C}; \\
 t_3 &= t_2 + \Delta t_3 = 115,14 + 20,3 = 135,17^\circ\text{C}; \\
 t_4 &= t_3 + \Delta t_4 = 135,17 + 23,64 = 158,8^\circ\text{C}.
 \end{aligned}
 \tag{2.60}$$

Визначаємо межу текучості після кожного проходу з урахуванням впливу температури та швидкості деформації

$$\sigma_{\tau k_\varepsilon k_t k_u} = \sigma_{\tau 0} k_\varepsilon k_t k_u.
 \tag{2.61}$$

Визначаємо коефіцієнти зміцнення штаби в кожному проході

$$k_{\varepsilon 1} = 1 + m_1 (\varepsilon_\Sigma \cdot 100)^k, \text{ звідки } m_1 \text{ та } k \text{ знаходимо з таблиці 1.1.}$$

$$k_{\varepsilon 1} = 1 + m_1 (\sum \varepsilon_1 \cdot 100)^k = 1 + 0,2(0,27 \cdot 100)^{0,34} = 1,61;
 \tag{2.62}$$

$$k_{\varepsilon 2} = 1 + 0,2(0,40 \cdot 100)^{0,34} = 1,7;$$

$$k_{\varepsilon 3} = 1 + 0,2(0,467 \cdot 100)^{0,34} = 1,739;$$

$$k_{\varepsilon 4} = 1 + 0,2(0,533 \cdot 100)^{0,34} = 1,77.$$

Визначаємо коефіцієнти що враховують вплив температури штаби на межу текучості у кожному проході

$$k_{t0} = a_0 + a_1 \left(\frac{t - t_{\text{CT}}}{t_{\text{ПЛ}}} \right) + a_2 \left(\frac{t - t_{\text{CT}}}{t_{\text{ПЛ}}} \right)^2 + \dots + a_n \left(\frac{t - t_{\text{CT}}}{t_{\text{ПЛ}}} \right)^n;
 \tag{2.63}$$

$$\begin{aligned}
k_0 &= 1,005 - 2,734 \left(\frac{40 - 20}{1506} \right) - 8,212 \left(\frac{40 - 20}{1506} \right)^2 \\
&\quad + 195,20 \left(\frac{40 - 20}{1506} \right)^3 - 751,36 \left(\frac{40 - 20}{1506} \right)^4 + 837,5 \left(\frac{40 - 20}{1506} \right)^5 \\
&= 0,96768;
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
k_1 &= 1,005 - 2,734 \left(\frac{82,14 - 20}{1506} \right) - 8,212 \left(\frac{82,14 - 20}{1506} \right)^2 \\
&\quad + 195,20 \left(\frac{82,14 - 20}{1506} \right)^3 - 751,36 \left(\frac{82,14 - 20}{1506} \right)^4 \\
&\quad + 837,5 \left(\frac{82,14 - 20}{1506} \right)^5 = 0,88988;
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
k_2 &= 1,005 - 2,734 \left(\frac{115,14 - 20}{1506} \right) - 8,212 \left(\frac{115,14 - 20}{1506} \right)^2 \\
&\quad + 195,20 \left(\frac{115,14 - 20}{1506} \right)^3 - 751,36 \left(\frac{115,14 - 20}{1506} \right)^4 \\
&\quad + 837,5 \left(\frac{115,14 - 20}{1506} \right)^5 = 0,8376;
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
k_3 &= 1,005 - 2,734 \left(\frac{135,17 - 20}{1506} \right) - 8,212 \left(\frac{135,17 - 20}{1506} \right)^2 \\
&\quad + 195,20 \left(\frac{135,17 - 20}{1506} \right)^3 - 751,36 \left(\frac{135,17 - 20}{1506} \right)^4 \\
&\quad + 837,5 \left(\frac{135,17 - 20}{1506} \right)^5 = 0,812;
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
k_4 &= 1,005 - 2,734 \left(\frac{158,8 - 20}{1506} \right) - 8,212 \left(\frac{158,8 - 20}{1506} \right)^2 \\
&\quad + 195,20 \left(\frac{158,8 - 20}{1506} \right)^3 - 751,36 \left(\frac{158,8 - 20}{1506} \right)^4 \\
&\quad + 837,5 \left(\frac{158,8 - 20}{1506} \right)^5 = 0,78744.
\end{aligned}$$

Визначаємо напруження текучості в кожному проході з урахуванням впливу температури та ступеня деформації

$$\sigma_{T0k_{\varepsilon}k_t} = \sigma_{T0}k_{\varepsilon}k_t = 500 \times 1 \times 0,96768 = 483,84 \text{ МН/М}^2; \quad (2.64)$$

$$\sigma_{T1k_{\varepsilon}k_t} = \sigma_{T0}k_{\varepsilon}k_t = 500 \times 1,61 \times 0,8899 = 717,834 \text{ МН/М}^2;$$

$$\sigma_{T2k_{\varepsilon}k_t} = \sigma_{T0}k_{\varepsilon}k_t = 500 \times 1,7 \times 0,8376 = 712,386 \text{ МН/М}^2;$$

$$\sigma_{T3k_{\varepsilon}k_t} = \sigma_{T0}k_{\varepsilon}k_t = 500 \times 1,739 \times 0,8117 = 705,73 \text{ МН/М}^2;$$

$$\sigma_{T4k_{\varepsilon}k_t} = \sigma_{T0}k_{\varepsilon}k_t = 500 \times 1,773 \times 0,7874 = 698,022 \text{ МН/М}^2.$$

Визначаємо коефіцієнт який враховує вплив швидкості деформації на межу текучості

$$k_u = 1 + \frac{0,0075(1 - 0,3\sqrt{\varepsilon_{\Sigma x}})}{1 + 1,75\sqrt{\varepsilon_{\Sigma x}}} \sqrt{\frac{t_{CT}}{t_x}} \left[1 - \frac{3(t_x - t_{CT})}{t_{пл}} \right]^4 \left(\ln \frac{u_x + u_{CT}}{u_{CT}} \right)^{c_1}; \quad (2.65)$$

$$\varepsilon_{\Sigma x} = 1 - (1 - \varepsilon_{пр})(1 - \varepsilon_x);$$

$$c_1 = 1,8 + 0,125 \sqrt{\frac{t_x}{t_{CT}} - 1}.$$

$\varepsilon_{пр}$ - попередній (на вході в осередок деформації) відносний обтиск, долі одиниць; $\varepsilon_x, \varepsilon_{\Sigma x}$ – частковий і сумарний відносний обтиск в даному перерізі осередку деформації, долі одиниці; t_x - температура штаби в даному перерізі, °С; t_{CT}, u_{CT} – температура і швидкість деформації при проведенні статичних випробувань зразків на розтягування ($t_{CT}=20^\circ\text{C}$; $u_{CT} = 10^{-3}\text{c}^{-1}$); u - швидкість деформації в даному перерізі, c^{-1} .

Визначаємо середню температуру штаби в осередку деформації у кожному проході

$$t_{cp1} = \frac{1}{3}(t_{0п} + 2t_{1п}) = \frac{1}{3}(40 + 2 \times 82,12) = 68,08^{\circ}\text{C}; \quad (2.66)$$

$$t_{cp2} = \frac{1}{3}(82,12 + 2 \times 115,14) = 104,13^{\circ}\text{C};$$

$$t_{cp3} = \frac{1}{3}(115,14 + 2 \times 135,17) = 128,5^{\circ}\text{C};$$

$$t_{cp4} = \frac{1}{3}(135,17 + 2 \times 158,8) = 150,9^{\circ}\text{C}.$$

Визначаємо показник ступеня в моделі

$$c_1 = 1,8 + 0,125 \sqrt{\frac{t_x}{t_{cr}} - 1} = 1,8 + 0,125 \sqrt{\frac{68,08}{20} - 1} = 1,994; \quad (2.67)$$

$$c_2 = 1,8 + 0,125 \sqrt{\frac{104,13}{20} - 1} = 2,0564;$$

$$c_3 = 1,8 + 0,125 \sqrt{\frac{128,5}{20} - 1} = 2,09;$$

$$c_4 = 1,8 + 0,125 \sqrt{\frac{150,9}{20} - 1} = 2,12.$$

Визначаємо коефіцієнт що враховує вплив швидкості деформації

$$k_{u1} = 1 + \frac{0,0075(1 - 0,3\sqrt{0,27})}{1 + 1,75\sqrt{0,27}} \sqrt{\frac{20}{68,08}} \left[1 - \frac{3(68,08 - 20)}{1509} \right]^4 \left(\ln \frac{75,635 + 0,001}{0,001} \right)^{1,9938} = 1,149; \quad (2.68)$$

$$k_{u2} = 1 + \frac{0,0075(1 - 0,3\sqrt{0,40})}{1 + 1,75\sqrt{0,40}} \sqrt{\frac{20}{104,13}} \left[1 - \frac{3(104,13 - 20)}{1509} \right]^4 \left(\ln \frac{148,03 + 0,001}{0,001} \right)^{2,06} = 1,113;$$

$$k_{u3} = 1 + \frac{0,0075(1 - 0,3\sqrt{0,467})}{1 + 1,75\sqrt{0,467}} \sqrt{\frac{20}{128,5}} \left[1 - \frac{3(128,5 - 20)}{1509} \right]^4 \left(\ln \frac{233,8 + 0,001}{0,001} \right)^{2,09} = 1,095;$$

$$k_{u4} = 1 + \frac{0,0075(1 - 0,3\sqrt{0,533})}{1 + 1,75\sqrt{0,533}} \sqrt{\frac{20}{150,9}} \left[1 - \frac{3(150,9 - 20)}{1509} \right]^4 \left(\ln \frac{260,42 + 0,001}{0,001} \right)^{2,12} = 1,076.$$

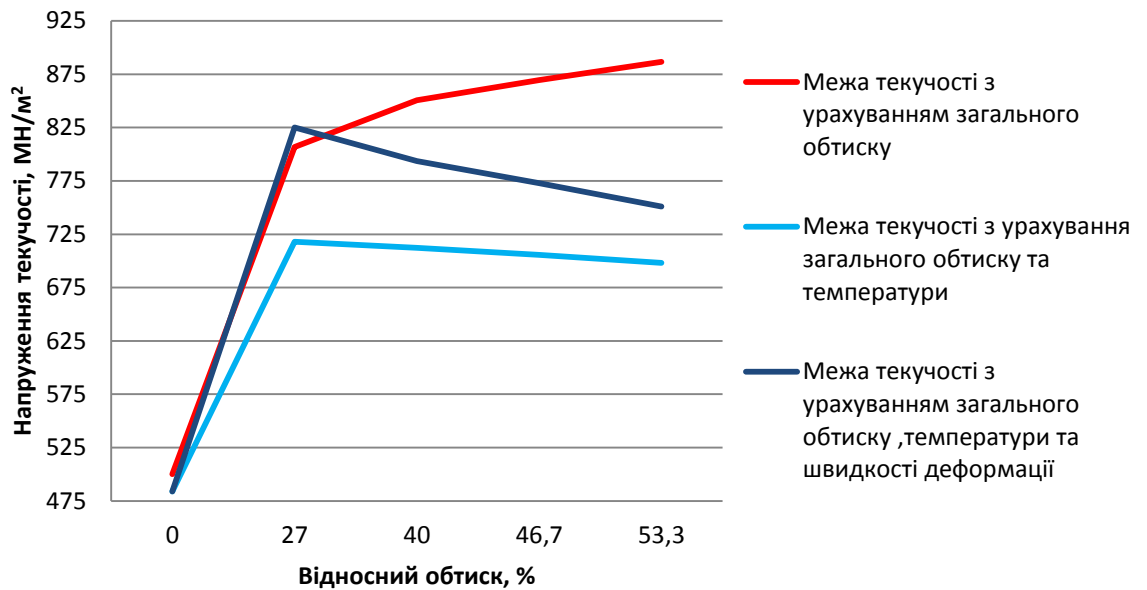
Визначаємо напруження текучості в осередку деформації у кожному проході з урахуванням ступеня деформації, температури та швидкості деформації

$$\sigma_{T1k_{\varepsilon}k_t} = \sigma_{T0}k_{\varepsilon}k_tk_u = 500 \times 1,613 \times 0,8899 \times 1,15 = 825,1 \text{ МН/М}^2; (2.69)$$

$$\sigma_{T2k_{\varepsilon}k_t} = \sigma_{T0}k_{\varepsilon}k_tk_u = 500 \times 1,70 \times 0,8376 \times 1,114 = 793,5 \text{ МН/М}^2;$$

$$\sigma_{T3k_{\varepsilon}k_t} = \sigma_{T0}k_{\varepsilon}k_t = 500 \times 1,739 \times 0,8117 \times 1,095 = 772,866 \text{ МН/М}^2;$$

$$\sigma_{T4k_{\varepsilon}k_t} = \sigma_{T0}k_{\varepsilon}k_t = 500 \times 1,773 \times 0,7874 \times 1,076 = 751,097 \text{ МН/М}^2.$$



Графік 2.4 – Межа текучості з урахуванням коефіцієнтів: зміцнення, температури та швидкості деформації.

Аналогічно визначаємо межу текучості сталі 30ХГСА з урахуванням впливу сумарного обтиску. Межа текучості після гарячої прокатки дорівнює $\sigma_{T_0} = 475 \text{ МН/М}^2$.

$$\begin{aligned} \sigma_{T_1} &= \sigma_{T_0} + m(\sum \varepsilon_1 \cdot 100)^k = 475 + 86(0,27 \cdot 100)^{0,45} \\ &= 853,98 \text{ МН/М}^2; \end{aligned} \quad (2.70)$$

$$\sigma_{T_2} = \sigma_{T_0} + m(\sum \varepsilon_2 \cdot 100)^k = 475 + 86(0,40 \cdot 100)^{0,45} = 927,299 \text{ МН/М}^2;$$

$$\sigma_{T_3} = \sigma_{T_0} + m(\sum \varepsilon_3 \cdot 100)^k = 475 + 86(0,467 \cdot 100)^{0,45} = 959,9434 \text{ МН/М}^2;$$

$$\sigma_{T_4} = \sigma_{T_0} + m(\sum \varepsilon_4 \cdot 100)^k = 475 + 86(0,533 \cdot 100)^{0,45} = 989,666 \text{ МН/М}^2.$$

Визначаємо натяг переднього і заднього кінця штаби

$$\delta_0 = (0,3 \div 0,35)\sigma_{\tau_0} = 0,3 \times 475 = 142,5 \text{ МН/М}^2 ; \quad (2.71)$$

$$\delta_1 = 0,3 \times \sigma_{\tau_1} = 0,3 \times 853,98 = 256,193 \text{ МН/М}^2 ;$$

$$\delta_2 = 0,3 \times \sigma_{\tau_2} = 0,3 \times 927,299 = 278,19 \text{ МН/М}^2 ;$$

$$\delta_3 = 0,3 \times \sigma_{\tau_3} = 0,3 \times 959,9434 = 287,983 \text{ МН/М}^2 ;$$

$$\delta_4 = 0,3 \times \sigma_{\tau_4} = 0,3 \times 989,666 = 296,9 \text{ МН/М}^2 .$$

Визначаємо середній натяг штаби

$$\delta_{\text{ср}} = \frac{\delta_0 + \delta_1}{2} ; \quad (2.72)$$

$$\delta_{\text{ср1}} = \frac{\delta_0 + \delta_1}{2} = \frac{114 + 225,9}{2} = 199,35 \text{ МН/М}^2 ;$$

$$\delta_{\text{ср2}} = \frac{\delta_1 + \delta_2}{2} = \frac{225,9 + 254,014}{2} = 267,19 \text{ МН/М}^2 ;$$

$$\delta_{\text{ср3}} = \frac{\delta_2 + \delta_3}{2} = \frac{254,014 + 266,935}{2} = 283,086 \text{ МН/М}^2 ;$$

$$\delta_{\text{ср4}} = \frac{\delta_3 + \delta_4}{2} = \frac{266,935 + 278,9}{2} = 292,44 \text{ МН/М}^2 .$$

Визначаємо другу номографічну величину

$$\begin{aligned} 2 \times \frac{R}{93000} \times \frac{f}{h_{\text{ср1}}} \times (1,15 \times \sigma_{\tau_1} - \delta_{\text{ср1}}) \\ = 2 \times \frac{255}{93000} \times \frac{0,042}{2,595} \times (1,15 \times 853,98 - 199,35) \\ = 0,0695 \end{aligned} \quad (2.73)$$

$$2 \times \frac{R}{93000} \times \frac{f}{h_{cp2}} \times (1,15 \times \sigma_{T2} - \delta_{cp2})$$

$$= 2 \times \frac{255}{93000} \times \frac{0,042}{1,995} \times (1,15 \times 927,299 - 267,19) = 0,0923 ;$$

$$2 \times \frac{R}{93000} \times \frac{f}{h_{cp3}} \times (1,15 \times \sigma_{T3} - \delta_{cp3})$$

$$= 2 \times \frac{255}{93000} \times \frac{0,042}{1,7} \times (1,15 \times 959,9434 - 283,086) = 0,1112$$

$$2 \times \frac{R}{93000} \times \frac{f}{h_{cp4}} \times (1,15 \times \sigma_{T4} - \delta_{cp4})$$

$$= 2 \times \frac{255}{93000} \times \frac{0,042}{1,5} \times (1,15 \times 989,666 - 292,44) = 0,1299;$$

За номограмою Стоуна визначаємо значення величини x

$$x_1 = 0,26 ; \quad (2.74)$$

$$x_2 = 0,26 ;$$

$$x_3 = 0,23 ;$$

$$x_4 = 0,274 ;$$

Згідно з отриманих значень x знаходимо за таблицею коефіцієнт, який враховує вплив тертя

$$n'_{\delta_1} = 1,143 ; \quad (2.75)$$

$$n'_{\delta_2} = 1,143 ;$$

$$n'_{\delta_3} = 1,125 ;$$

$$n'_{\delta_4} = 1,149 ;$$

Із величини $x \times h_{cp} = l_c \times f$ знаходимо довжину осередку деформації з урахуванням сплюснення валків

$$\begin{aligned}
 l_{c_1} &= \frac{x_1 \times h_{cp1}}{f_1} = \frac{0,26 \times 2,595 \times 10^{-3}}{0,042} = 1,606 \times 10^{-2} \text{ м}; \\
 l_{c_2} &= \frac{x_2 \times h_{cp2}}{f_2} = \frac{0,26 \times 1,995 \times 10^{-3}}{0,042} = 1,235 \times 10^{-2} \text{ м}; \\
 l_{c_3} &= \frac{x_3 \times h_{cp3}}{f_3} = \frac{0,23 \times 1,7 \times 10^{-3}}{0,042} = 0,931 \times 10^{-2} \text{ м}; \\
 l_{c_4} &= \frac{x_4 \times h_{cp4}}{f_4} = \frac{0,274 \times 1,5 \times 10^{-3}}{0,042} = 0,979 \times 10^{-2} \text{ м}.
 \end{aligned} \tag{2.76}$$

Так як $\frac{l}{h_{cp}} > 1$, то приймаємо коефіцієнт, який враховує вплив зовнішніх зон $n''_{\delta} = 1$.

Визначаємо опір деформації

$$\begin{aligned}
 k_1 &= \frac{\sigma_{T_0} + \sigma_{T_1}}{2} = \frac{475 + 853,98}{2} = 664,488 \text{ МН/м}^2; \\
 k_2 &= \frac{\sigma_{T_1} + \sigma_{T_2}}{2} = \frac{853,98 + 927,299}{2} = 890,638 \text{ МН/м}^2; \\
 k_3 &= \frac{\sigma_{T_2} + \sigma_{T_3}}{2} = \frac{927,299 + 959,943}{2} = 943,62 \text{ МН/м}^2; \\
 k_4 &= \frac{\sigma_{T_3} + \sigma_{T_4}}{2} = \frac{959,943 + 989,666}{2} = 974,81 \text{ МН/м}^2.
 \end{aligned} \tag{2.77}$$

Визначаємо коефіцієнт, який враховує натяг смуги

n_b – коефіцієнт який враховує вплив ширини смуги;

Приймаємо

$$n_b = 1,15 \text{ так як } \frac{b}{l_{cp}} > 5$$

$$\begin{aligned}
n_{\delta_1}''' &= 1 - \frac{\delta_0 + \delta_1}{2 \times k \times n_b}; \\
n_{\delta_1}''' &= 1 - \frac{\delta_0 + \delta_1}{2 \times k_1 \times n_b} = 1 - \frac{142,5 + 256,193}{2 \times 664,488 \times 1,15} = 0,74; \\
n_{\delta_2}''' &= 1 - \frac{\delta_1 + \delta_2}{2 \times k_2 \times n_b} = 1 - \frac{256,193 + 278,19}{2 \times 890,638 \times 1,15} = 0,74; \\
n_{\delta_3}''' &= 1 - \frac{\delta_2 + \delta_3}{2 \times k_3 \times n_b} = 1 - \frac{278,19 + 287,983}{2 \times 943,62 \times 1,15} = 0,74; \\
n_{\delta_4}''' &= 1 - \frac{\delta_3 + \delta_4}{2 \times k_4 \times n_b} = 1 - \frac{287,983 + 296,899877}{2 \times 974,81 \times 1,15} = 0,74.
\end{aligned} \tag{2.78}$$

Визначаємо середній контактний тиск

$$\begin{aligned}
p_{cp_1} &= k_1 \times n_b \times n_{\delta_1}' \times n_{\delta_1}'' \times n_{\delta_1}''' = 664,488 \times 1,15 \times 1,143 \times 1 \times 0,74 = 646,34 \text{ МН/М}^2; \\
p_{cp_2} &= k_2 \times n_b \times n_{\delta_2}' \times n_{\delta_2}'' \times n_{\delta_2}''' = 890,638 \times 1,15 \times 1,143 \times 1 \times 0,74 = 866,32 \text{ МН/М}^2; \\
p_{cp_3} &= k_3 \times n_b \times n_{\delta_3}' \times n_{\delta_3}'' \times n_{\delta_3}''' = 943,62 \times 1,15 \times 1,125 \times 1 \times 0,74 = 903,4 \text{ МН/М}^2; \\
p_{cp_4} &= k_4 \times n_b \times n_{\delta_4}' \times n_{\delta_4}'' \times n_{\delta_4}''' = 974,81 \times 1,15 \times 1,149 \times 1 \times 0,74 = 953,163 \text{ МН/М}^2.
\end{aligned} \tag{2.79}$$

Визначаємо межу текучості за моделлю Третьякова з урахуванням деформаційного розігріву смуги та швидкості деформації.

Аналогічно попередньому розрахунку визначаємо температуру смуги по проходах.

$$\begin{aligned}
t_0 &= 40^\circ\text{C}; \\
t_1 &= t_0 + \Delta t_1 = 40 + 42,86 = 82,86^\circ\text{C}; \\
t_2 &= t_1 + \Delta t_2 = 82,862 + 35,6 = 118,46^\circ\text{C}; \\
t_3 &= t_2 + \Delta t_3 = 118,46 + 22,324 = 140,784^\circ\text{C}; \\
t_4 &= t_3 + \Delta t_4 = 140,784 + 26,28 = 167,064^\circ\text{C}.
\end{aligned} \tag{2.80}$$

Визначаємо межу текучості після кожного проходу з урахуванням впливу температури та швидкості деформації

$$\sigma_{\tau k_{\varepsilon} k_t k_u} = \sigma_{\tau 0} k_{\varepsilon} k_t k_u.$$

Визначаємо коефіцієнти що враховують вплив температури штаби на межу текучості у кожному проході

$$k_{t0} = a_0 + a_1 \left(\frac{t - t_{\text{CT}}}{t_{\text{ПЛ}}} \right) + a_2 \left(\frac{t - t_{\text{CT}}}{t_{\text{ПЛ}}} \right)^2 + \dots + a_n \left(\frac{t - t_{\text{CT}}}{t_{\text{ПЛ}}} \right)^n; \quad (2.81)$$

$$\begin{aligned} k_0 &= 1,0 + 3,575 \left(\frac{40 - 20}{1490} \right) - 82,468 \left(\frac{40 - 20}{1490} \right)^2 \\ &\quad + 511,53 \left(\frac{40 - 20}{1490} \right)^3 - 1025,13 \left(\frac{40 - 20}{1490} \right)^4 + 315,60 \left(\frac{40 - 20}{1490} \right)^5 \\ &= 1,03433; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} k_1 &= 1,0 + 3,575 \left(\frac{82,862 - 20}{1490} \right) - 82,468 \left(\frac{82,862 - 20}{1490} \right)^2 \\ &\quad + 511,53 \left(\frac{82,862 - 20}{1490} \right)^3 - 1025,13 \left(\frac{82,862 - 20}{1490} \right)^4 \\ &\quad + 315,60 \left(\frac{82,862 - 20}{1490} \right)^5 = 1,03925; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} k_2 &= 1,0 + 3,575 \left(\frac{118,46 - 20}{1490} \right) - 82,468 \left(\frac{118,46 - 20}{1490} \right)^2 \\ &\quad + 511,53 \left(\frac{118,46 - 20}{1490} \right)^3 - 1025,13 \left(\frac{118,46 - 20}{1490} \right)^4 \\ &\quad + 315,60 \left(\frac{118,46 - 20}{1490} \right)^5 = 1,0046; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
k_3 = & 1,0 + 3,575 \left(\frac{140,784 - 20}{1490} \right) - 82,468 \left(\frac{140,784 - 20}{1490} \right)^2 \\
& + 511,53 \left(\frac{140,784 - 20}{1490} \right)^3 - 1025,13 \left(\frac{140,784 - 20}{1490} \right)^4 \\
& + 315,60 \left(\frac{140,784 - 20}{1490} \right)^5 = 0,9772;
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
k_4 = & 1,0 + 3,575 \left(\frac{167,064 - 20}{1490} \right) - 82,468 \left(\frac{167,064 - 20}{1490} \right)^2 \\
& + 511,53 \left(\frac{167,064 - 20}{1490} \right)^3 - 1025,13 \left(\frac{167,064 - 20}{1490} \right)^4 \\
& + 315,60 \left(\frac{167,064 - 20}{1490} \right)^5 = 0,947.
\end{aligned}$$

Визначаємо напруження текучості в кожному проході з урахуванням впливу температури та ступеня деформації

$$\sigma_{T0k_\varepsilon k_t} = \sigma_{T0} k_\varepsilon k_t = 475 \times 1 \times 1,03433 = 491,31 \text{ МН/М}^2; \quad (2.82)$$

$$\sigma_{T1k_\varepsilon k_t} = \sigma_{T0} k_\varepsilon k_t = 475 \times 1,798 \times 1,03925 = 887,599 \text{ МН/М}^2;$$

$$\sigma_{T2k_\varepsilon k_t} = \sigma_{T0} k_\varepsilon k_t = 475 \times 1,9525 \times 1,0046 = 931,667 \text{ МН/М}^2;$$

$$\sigma_{T3k_\varepsilon k_t} = \sigma_{T0} k_\varepsilon k_t = 475 \times 2,0212 \times 0,9772 = 938,188 \text{ МН/М}^2;$$

$$\sigma_{T4k_\varepsilon k_t} = \sigma_{T0} k_\varepsilon k_t = 475 \times 2,0838 \times 0,947 = 937,325 \text{ МН/М}^2.$$

Визначасмо коефіцієнт який враховує вплив швидкості деформації на межу текучості

$$k_u = 1 + \frac{0,0075(1 - 0,3\sqrt{\varepsilon_{\Sigma x}})}{1 + 1,75\sqrt{\varepsilon_{\Sigma x}}} \sqrt{\frac{t_{CT}}{t_x}} \left[1 - \frac{3(t_x - t_{CT})}{t_{пл}} \right]^4 \left(\ln \frac{u_x + u_{CT}}{u_{CT}} \right)^{c_1}; \quad (2.83)$$

$$\varepsilon_{\Sigma x} = 1 - (1 - \varepsilon_{пр})(1 - \varepsilon_x); \quad (2.84)$$

$$c_1 = 1,8 + 0,125 \sqrt{\frac{t_x}{t_{CT}} - 1}; \quad (2.85)$$

$\varepsilon_{пр}$ - попередній (на вході в осередок деформації) відносний обтиск, долі одиниць; $\varepsilon_x, \varepsilon_{\Sigma x}$ – частковий і сумарний відносний обтиск в даному перерізі осередку деформації, долі одиниці; t_x - температура штаби в даному перерізі, °C; t_{CT}, u_{CT} – температура і швидкість деформації при проведенні статичних випробувань зразків на розтягування ($t_{CT}=20^\circ\text{C}$; $u_{CT} = 10^{-3}\text{c}^{-1}$); u - швидкість деформації в даному перерізі, c^{-1} .

Визначаємо середню температуру штаби в осередку деформації у кожному проході

$$t_{cp1} = \frac{1}{3}(t_{0п} + 2t_{1п}) = \frac{1}{3}(40 + 2 \times 82,862) = 68,575^\circ\text{C}; \quad (2.86)$$

$$t_{cp2} = \frac{1}{3}(82,862 + 2 \times 118,46) = 106,594^\circ\text{C};$$

$$t_{cp3} = \frac{1}{3}(118,46 + 2 \times 140,784) = 133,343^\circ\text{C};$$

$$t_{cp4} = \frac{1}{3}(140,784 + 2 \times 167,064) = 158,304^\circ\text{C}.$$

Визначасмо показник ступеня в моделі

$$c_1 = 1,8 + 0,125 \sqrt{\frac{t_x}{t_{cr}} - 1} = 1,8 + 0,125 \sqrt{\frac{68,575}{20} - 1} = 1,9948; \quad (2.87)$$

$$c_2 = 1,8 + 0,125 \sqrt{\frac{106,594}{20} - 1} = 2,06;$$

$$c_3 = 1,8 + 0,125 \sqrt{\frac{133,343}{20} - 1} = 2,0976;$$

$$c_4 = 1,8 + 0,125 \sqrt{\frac{158,304}{20} - 1} = 2,1287.$$

Визначасмо коефіцієнт що враховує вплив швидкості деформації

$$k_{u1} = 1 + \frac{0,0075(1 - 0,3\sqrt{0,27})}{1 + 1,75\sqrt{0,27}} \sqrt{\frac{20}{68,575}} \left[1 - \frac{3(68,575 - 20)}{1490} \right]^4 \left(\ln \frac{75,635 + 0,001}{0,001} \right)^{1,9948} = 1,149; \quad (2.88)$$

$$k_{u2} = 1 + \frac{0,0075(1 - 0,3\sqrt{0,40})}{1 + 1,75\sqrt{0,40}} \sqrt{\frac{20}{106,594}} \left[1 - \frac{3(106,594 - 20)}{1490} \right]^4 \left(\ln \frac{145,75 + 0,001}{0,001} \right)^{2,06} = 1,11066;$$

$$k_{u3} = 1 + \frac{0,0075(1 - 0,3\sqrt{0,467})}{1 + 1,75\sqrt{0,467}} \sqrt{\frac{20}{133,343}} \left[1 - \frac{3(133,343 - 20)}{1490} \right]^4 \left(\ln \frac{225,73 + 0,001}{0,001} \right)^{2,0976} = 1,0898;$$

$$k_{u4} = 1 + \frac{0,0075(1 - 0,3\sqrt{0,533})}{1 + 1,75\sqrt{0,533}} \sqrt{\frac{20}{158,304}} \left[1 - \frac{3(158,304 - 20)}{1490} \right]^4 \left(\ln \frac{245,095 + 0,001}{0,001} \right)^{2,1287} = 1,0694.$$

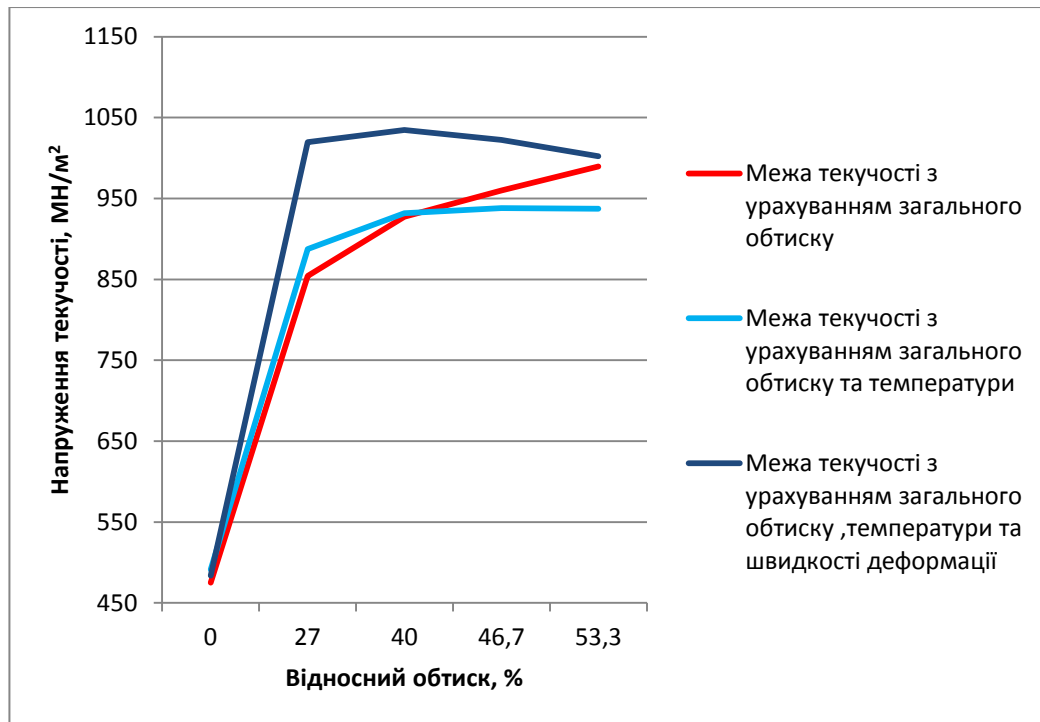
Визначаємо межу текучості в осередку деформації у кожному проході з урахуванням ступеня деформації, температури та швидкості деформації

$$\begin{aligned} \sigma_{T1k_{\varepsilon}k_t} &= \sigma_{T0}k_{\varepsilon}k_tk_u = 475 \times 1,798 \times 1,03925 \times 1,149 \\ &= 1019,54 \text{ МН/М}^2; \end{aligned} \quad (2.89)$$

$$\sigma_{T2k_{\varepsilon}k_t} = \sigma_{T0}k_{\varepsilon}k_tk_u = 475 \times 1,9525 \times 1,0046 \times 1,11066 = 1034,8 \text{ МН/М}^2;$$

$$\sigma_{T3k_{\varepsilon}k_t} = \sigma_{T0}k_{\varepsilon}k_t = 475 \times 2,0212 \times 0,9772 \times 1,0898 = 1022,43 \text{ МН/М}^2;$$

$$\sigma_{T4k_{\varepsilon}k_t} = \sigma_{T0}k_{\varepsilon}k_t = 475 \times 2,0838 \times 0,947 \times 1,0694 = 1002,3 \text{ МН/М}^2.$$



Графік 2.4 – Межа текучості з урахуванням коефіцієнтів: зміцнення, температури та швидкості деформації.

2.3. Розрахунок напруження текучості при холодній прокатці марок сталей (09Г2, 12ГС,) за методом Ніколаєва В.А.

Розраховуємо межу текучості для сталі марки 09Г2

Межа текучості за формулою Ніколаєва складає :

$$\sigma_{T1} = \sigma_{T0} + \Delta\sigma_T \times k_\varepsilon; \quad (2.90)$$

$\Delta\sigma_T$ – ступінь зміцнення металу при обтисненні ; k_ε – коефіцієнт враховуючий вплив відносного обтиснення.

Формула для розрахунку межі текучості для конструкційних вуглецевих та низьколегованих груп марок сталей має вигляд:

$$\sigma_{T0} = 336 + 160 \times C_e; \quad (2.91)$$

$$\Delta\sigma_T = 580 - 115 \times C_e.$$

В загальному випадку вуглецевий еквівалент для сталі 12ГС буде дорівнюватиме

$$\begin{aligned} C_e &= C + \frac{Mn}{6} + \frac{Si}{24} + \frac{Ni}{40} + \frac{Cr}{5} + \frac{Mo}{4} + \frac{V}{14} + \frac{W}{4} \\ &= 0,12 + \frac{1,8}{6} + \frac{0,37}{24} + \frac{0,3}{40} + \frac{0,3}{5} + \frac{0,12}{14} = 0,5029. \end{aligned} \quad (2.92)$$

Початкова межа текучості(в відпаленому стані) для сталі 09Г2 складає

$$\sigma_{T1} = 210 + 263 \times 0,5029 = 210 + 263 \times 0,5029 = 342,263 \text{ МН/М}^2. \quad (2.93)$$

Ступінь зміцнення металу при обтисненні

$$\Delta\sigma_T = 209 + 460 \times C_e = 209 + 460 \times 0,5029 = 440,334 \text{ МН/М}^2. \quad (2.94)$$

Розраховуємо коефіцієнт k_ε , враховуючий вплив відносного обтиснення

$$k_{\varepsilon 1} = 1 - \left(1 - \frac{\varepsilon_\Sigma}{0,4}\right)^{1,5+C} = 1 - \left(1 - \frac{0,27}{0,4}\right)^{1,5+0,12} = 0,8381; \quad (2.95)$$

$$k_{\varepsilon 2} = 1 - \left(1 - \frac{\varepsilon_\Sigma}{0,4}\right)^{1,5+C} = 1 - \left(1 - \frac{0,4}{0,4}\right)^{1,5+0,12} = 1$$

$$k_{\varepsilon 3} = 1 + 0,87 \times (\varepsilon_\Sigma - 0,4)^{0,5} = 1 + 0,87 \times (0,467 - 0,4)^{0,5} = 1,2252;$$

$$k_{\varepsilon 4} = 1 + 0,87 \times (\varepsilon_\Sigma - 0,4)^{0,5} = 1 + 0,87 \times (0,533 - 0,4)^{0,5} = 1,3173.$$

Визначаємо межу текучості у кожному проході

$$\sigma_{T1} = \sigma_{T0} + \Delta\sigma_T \times k_{\varepsilon 1} = 342,263 + 440,334 \times 0,8381 = 711,3 \text{ МН/М}^2; \quad (2.96)$$

$$\sigma_{T2} = \sigma_{T0} + \Delta\sigma_T \times k_{\varepsilon 2} = 342,263 + 440,334 \times 1 = 782,6 \text{ МН/М}^2;$$

$$\sigma_{T3} = \sigma_{T0} + \Delta\sigma_T \times k_{\varepsilon 3} = 342,263 + 440,334 \times 1,2252 = 881,76 \text{ МН/М}^2;$$

$$\sigma_{T4} = \sigma_{T0} + \Delta\sigma_T \times k_{\varepsilon 4} = 342,263 + 440,334 \times 1,3173 = 922,3 \text{ МН/М}^2.$$

Визначаємо межу текучості для сталі марки 09Г2, з урахуванням температури і швидкості деформації.

Коефіцієнти враховуючі швидкість і температуру деформації будуть дорівнювати:

$$n_u = 1 + 0,38 \left(0,5 + \frac{\ln u}{13,8} \right)^2; \quad (2.97)$$

$$n_t = 0,8 + 0,23 \left(1 - \frac{t_H}{300} \right)^2. \quad (2.98)$$

Звідки u – швидкість деформації, t_H – температура штаби перед кліттю.

Коефіцієнт враховуючий швидкість деформації

$$n_{u1} = 1 + 0,38 \left(0,5 + \frac{\ln u}{13,8} \right)^2 = 1 + 0,38 \left(0,5 + \frac{\ln 79,29}{13,8} \right)^2 = 1,254; \quad (2.99)$$

$$n_{u2} = 1 + 0,38 \left(0,5 + \frac{\ln 156,59}{13,8} \right)^2 = 1,285$$

$$n_{u3} = 1 + 0,38 \left(0,5 + \frac{\ln 247,235}{13,8} \right)^2 = 1,307;$$

$$n_{u4} = 1 + 0,38 \left(0,5 + \frac{\ln 276,37}{13,8} \right)^2 = 1,313.$$

Коефіцієнт враховуючий вплив температури деформації

$$n_{t1} = 0,8 + 0,23 \left(1 - \frac{t_H}{300} \right)^2 = 0,8 + 0,23 \left(1 - \frac{40}{300} \right)^2 = 0,973; \quad (2.100)$$

$$n_{t2} = 0,8 + 0,23 \left(1 - \frac{68,4}{300} \right)^2 = 0,937;$$

$$n_{t3} = 0,8 + 0,23 \left(1 - \frac{92,25}{300} \right)^2 = 0,9103;$$

$$n_{t4} = 0,8 + 0,23 \left(1 - \frac{107,7}{300} \right)^2 = 0,8945.$$

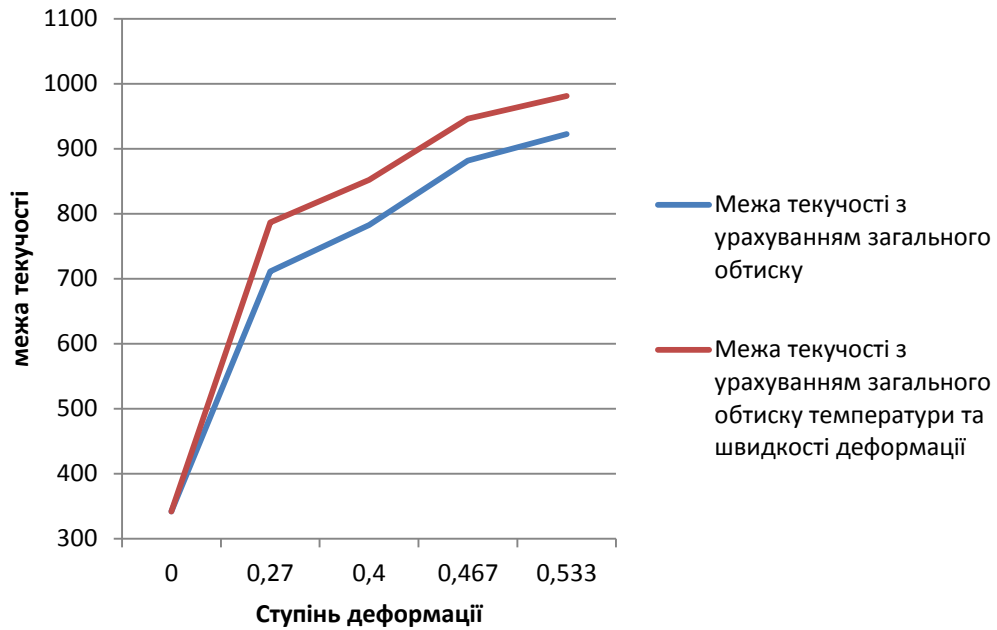
Межа текучості з урахуванням коефіцієнтів складає:

$$\begin{aligned} \sigma_{T1} &= n_{u1} \times n_{t1} \times \sigma_{T0} + \Delta\sigma_T \times k_{\varepsilon 1} \\ &= 1,254 \times 0,973 \times 342,263 + 440,334 \times 0,838 \\ &= 786,4 \text{ МН/М}^2; \end{aligned} \quad (2.101)$$

$$\sigma_{T2} = 1,285 \times 0,937 \times 342,263 + 440,334 \times 1 = 852,073 \text{ МН/М}^2;$$

$$\sigma_{T2} = 1,307 \times 0,9103 \times 342,263 + 440,334 \times 1,225 = 946,093 \text{ МН/М}^2;$$

$$\sigma_{T2} = 1,313 \times 0,8945 \times 342,263 + 440,334 \times 1,3173 = 981,32 \text{ МН/М}^2.$$



Графік 2.6 – Межа текучості з урахуванням коефіцієнтів: зміцнення, температури та швидкості деформації.

Розраховуємо межу текучості для сталі марки 12ГС.

Межа текучості за формуло Ніколаєва складає :

Формула для розрахунку межі текучості для низьколегованої групи марок сталей має вигляд:

$$\sigma_{T0} = 336 + 160 \times C_e; \quad (2.102)$$

$$\Delta\sigma_T = 580 - 115 \times C_e.$$

В загальному випадку вуглецевий еквівалент для сталі 12ГС буде дорівнюватиме

$$C_e = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Si}{24} + \frac{Ni}{40} + \frac{Cr}{5} + \frac{Mo}{4} + \frac{V}{14} + \frac{W}{4}$$

$$= 0,15 + \frac{1,2}{6} + \frac{0,8}{24} + \frac{0,3}{40} + \frac{0,3}{5} + \frac{0,12}{14} = 0,4594. \quad (2.103)$$

Початкова межа текучості для сталі 12ГС

$$\sigma_{T0} = 336 + 160 \times C_e = 336 + 160 \times 0,4594 = 409,5 \text{ МН/М}^2. \quad (2.104)$$

Ступінь зміцнення металу при обтисненні

$$\Delta\sigma_T = 3 = 580 - 115 \times C_e = 580 - 115 \times 0,4594 = 527,17 \text{ МН/М}^2. \quad (2.105)$$

Розраховуємо коефіцієнт k_ε , враховуючий вплив відносного обтиснення

$$k_{\varepsilon 1} = 1 - \left(1 - \frac{\varepsilon_\Sigma}{0,4}\right)^{1,5+C} = 1 - \left(1 - \frac{0,27}{0,4}\right)^{1,5+0,12} = 0,8435; \quad (2.106)$$

$$k_{\varepsilon 2} = 1 - \left(1 - \frac{\varepsilon_\Sigma}{0,4}\right)^{1,5+C} = 1 - \left(1 - \frac{0,4}{0,4}\right)^{1,5+0,12} = 1;$$

$$k_{\varepsilon 3} = 1 + 0,87 \times (\varepsilon_\Sigma - 0,4)^{0,5} = 1 + 0,87 \times (0,467 - 0,4)^{0,5} = 1,2252;$$

$$k_{\varepsilon 4} = 1 + 0,87 \times (\varepsilon_\Sigma - 0,4)^{0,5} = 1 + 0,87 \times (0,533 - 0,4)^{0,5} = 1,3173.$$

Визначаємо межу текучості у кожному проході

$$\sigma_{T1} = \sigma_{T0} + \Delta\sigma_T \times k_{\varepsilon 1} = 409,5 + 527,17 \times 0,8381 = 851,324 \text{ МН/М}^2; \quad (2.107)$$

$$\sigma_{T2} = \sigma_{T0} + \Delta\sigma_T \times k_{\varepsilon 2} = 409,5 + 527,17 \times 1 = 936,673 \text{ МН/М}^2;$$

$$\sigma_{T3} = \sigma_{T0} + \Delta\sigma_T \times k_{\varepsilon 3} = 409,5 + 527,17 \times 1,2252 = 1055,39 \text{ МН/М}^2;$$

$$\sigma_{T4} = \sigma_{T0} + \Delta\sigma_T \times k_{\varepsilon 4} = 409,5 + 527,17 \times 1,3173 = 1103,934 \text{ МН/М}^2.$$

Визначаємо межу текучості для сталі марки 12ГС , з урахуванням температури і швидкості деформації.

Коефіцієнти враховуючі швидкість і температуру деформації будуть дорівнювати:

$$n_u = 1 + 0,38 \left(0,5 + \frac{\ln u}{13,8} \right)^2; \quad (2.108)$$

$$n_t = 0,8 + 0,23 \left(1 - \frac{t_H}{300} \right)^2.$$

Звідки u – швидкість деформації, t_H – температура штаби перед кліттю.

$$n_{u1} = 1 + 0,38 \left(0,5 + \frac{\ln u}{13,8} \right)^2 = 1 + 0,38 \left(0,5 + \frac{\ln 75,635}{13,8} \right)^2 = 1,252; \quad (2.109)$$

$$n_{u2} = 1 + 0,38 \left(0,5 + \frac{\ln 148,03}{13,8} \right)^2 = 1,2824;$$

$$n_{u3} = 1 + 0,38 \left(0,5 + \frac{\ln 233,8}{13,8} \right)^2 = 1,305;$$

$$n_{u4} = 1 + 0,38 \left(0,5 + \frac{\ln 260,42}{13,8} \right)^2 = 1,31.$$

Коефіцієнт враховуючий вплив температури деформації

$$n_{t1} = 0,8 + 0,23 \left(1 - \frac{t_H}{300} \right)^2 = 0,8 + 0,23 \left(1 - \frac{40}{300} \right)^2 = 0,973; \quad (2.110)$$

$$n_{t2} = 0,8 + 0,23 \left(1 - \frac{82,14}{300} \right)^2 = 0,9213;$$

$$n_{t3} = 0,8 + 0,23 \left(1 - \frac{115,14}{300}\right)^2 = 0,887;$$

$$n_{t4} = 0,8 + 0,23 \left(1 - \frac{135,17}{300}\right)^2 = 0,8694.$$

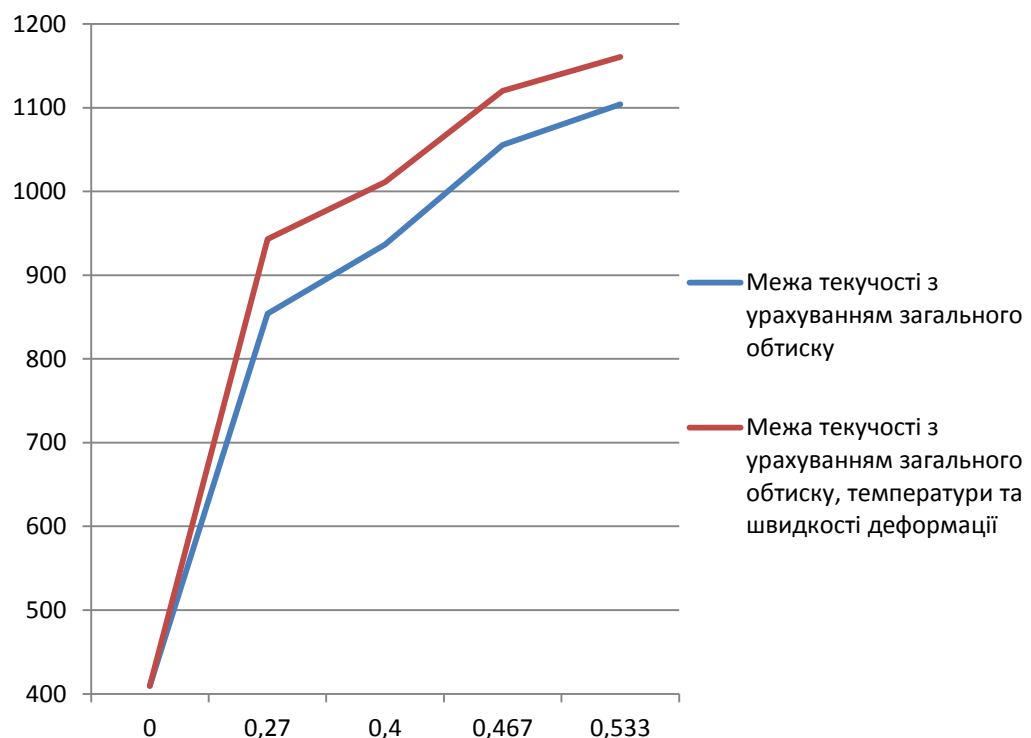
Межа текучості з урахуванням коефіцієнтів складає

$$\sigma_{T1} = n_{u1} \times n_{t1} \times \sigma_{T0} + \Delta\sigma_T \times k_{\varepsilon1} = 1,252 \times 0,973 \times 409,5 + 527,17 \times 0,8381 = 940,34 \text{ МН/М}^2; \quad (2.111)$$

$$\sigma_{T2} = 1,2824 \times 0,9213 \times 409,5 + 527,17 \times 1 = 1011 \text{ МН/М}^2;$$

$$\sigma_{T2} = 1,305 \times 0,887 \times 409,5 + 527,17 \times 1,2252 = 1119,92 \text{ МН/М}^2 \text{ МН/М}^2;$$

$$\sigma_{T2} = 1,31 \times 0,8694 \times 409,5 + 527,17 \times 1,3173 = 1160,8 \text{ МН/М}^2.$$



Графік 2.7 – Межа текучості з урахуванням коефіцієнтів: зміцнення, температури та швидкості деформації.

2.4. Висновок до розділу 2

В результаті проведення теоретичних досліджень та аналізу існуючих моделей напруження текучості, а саме моделей Третьякова А.В., та Ніколаєва В.А., визначено фактори які найбільш активно впливають на показник напруження текучості при холодній прокатці, також в результаті розрахунку напруження текучості для трьох різних марок сталей при різних температурах та швидкостях деформації визначено, що для всіх низьколегованих сталей при однаковому режимі деформації показник напруження текучості зростає по різному. Наприклад при деформуванні сталі 12ГС температура більш активно впливає на зменшення напруження текучості ніж при прокатці 09Г2.

Теоретичні дослідження показали, що при розрахунку напруження текучості по двом різним моделям, при однаковому режимі деформації, значення напруження текучості має дуже велику розбіжність. Це підтверджує відсутність єдиної точної моделі напруження текучості.

3 ЕКСПЕРЕМЕНТАЛЬНА ЧАСТИНА

3.1 Метод визначення напруження течії

Для визначення механічних властивостей металу (тимчасовий опір, умовне напруження текучості, відносне подовження, звуження) проводяться випробування на розтягнення для зразків чорного та кольорового металів і сплавів відповідно з ГОСТ 1497-61.

Напруження течії (фізична) σ_T – найменше напруження, при якому зразок деформується без помітного збільшення навантаження:

$$\sigma_T = \frac{P_m}{F_0}, \frac{\text{кг}}{\text{мм}^2};$$

звідки P_m – навантаження, відповідне цьому напруженню, кг;

F_0 – початкова площа поперечного перерізу зразка, мм^2 .

Напруження течії (умовна) $\sigma_{0,2}$ - напруження, при якому розтягнений зразок отримує остаточне подовження 0,2% від початкової розрахункової довжини:

$$\sigma_{0,2} = \frac{P_{0,2}}{F_0}, \frac{\text{кг}}{\text{мм}^2};$$

$P_{0,2}$ – навантаження, відповідне цьому напруженню, кг.

Тимчасовий опір σ_B – напруження, відповідне найбільшому навантаженню P_{max} . попереднього руйнування зразка:

$$\sigma_B = \frac{P_{max}}{F_0}, \frac{кг}{мм^2} .$$

Відносне подовження після розриву $\delta_{п}$ – відношення приросту розрахункової довжини зразка після розриву к її первісній величині l_0 , виражене в відсотках:

$$\delta_{п} = \frac{l_k - l_0}{l_0} \times 100\%,$$

звідки l_k – довжина зразка на розрахунковій ділянці після розриву, мм;

l_0 – розрахункова(початкова) довжина зразка, мм.

Згідно з ГОСТ 1497-61 початкова довжина l_0 зразка в залежності від відношення $\frac{l_0}{F_0}$ приймається десятикратною ($\frac{l_0}{\sqrt{F_0}} = 11,33$) і п`ятикратною ($\frac{l_0}{\sqrt{F_0}} = 5,65$), причому використання п`ятикратного зразку краще. Відповідно з цим індекс δ при δ замінюється цифрою 5 або 10. В окремих випадках для випробування на розтягнення застосовують зразки іншої кратності.

В якості випробувальних машин застосовують розривні і універсальні випробувальні машини всіх систем за умови відповідності їх вимогам ГОСТ 1497-61 і ГОСТ 7855-74.

1.Обладнання для випробувань.

Машини повинні забезпечувати вибір і підтримку швидкостей деформування і навантаження зразка відповідно до розд. 2

При проведенні випробувань необхідно дотримуватися таких основних умов:

- а) надійне центрування зразка в захопленнях випробувальної машини;
- б) плавність навантаження;
- в) відповідність швидкості навантаження або деформування зразка вимогам розд. 2.

Якщо за умовами випробувань напруження течії визначати не потрібно, то швидкість переміщення рухомого захвату може бути найбільшою із зазначених, за умови плавного її досягнення.

При наявності вказівок у стандартах або технічних умовах на металопродукцію визначення напруження течії допускається проводити з урахуванням «жорсткості» випробувальної машини. У цьому випадку швидкість навантаження зразка в області пружної деформації призначається відповідно до жорсткості системи «машина - зразок», але не більше $3 \text{ кг} / \text{мм}^2$ в секунду;

г) можливість припинити навантаження з точністю до одного найменшої поділки шкали силовимірювання;

д) плавність розвантаження;

При визначенні межі пропорційності, межі пружності і напруження текучості за допомогою тензометрів ціна ділення шкали останніх не повинна перевищувати:

при визначенні $\sigma_{\text{пц}}$ і $\sigma_{0,05}$ - 0,002 мм;

при визначенні $\sigma_{0,2}$ - 0,02 мм.

Напруження текучості (фізичну) $\sigma_{\text{Т}}$, $\sigma_{\text{ТВ}}$ і $\sigma_{\text{ТН}}$ визначають:

а) по діаграмі розтягування, отриманої на випробувальній машині, якщо 1 мм ординати відповідає не більше $1 \text{ кгс} / \text{мм}^2$ напруги зразка.

б) при масових випробуваннях навантаження $R_{\text{Т}}$ може бути визначена по явно вираженій зупинці стрілки силовимірювального пристрою випробувальної машини, обумовленої деформацією зразка без помітного збільшення навантаження.

в) при визначенні $\sigma_{\text{Т}}$, $\sigma_{\text{ТВ}}$, $\sigma_{\text{ТН}}$, швидкість відносної деформації встановлюється з урахуванням характеристики пружної піддатливості системи «машина-зразок» K в межах $0,00025-0,0025 \text{ с}^{-1}$, якщо в стандартах на металопродукцію немає інших вказівок. Якщо зазначена швидкість відносної деформації в області текучості не може бути досягнута

безпосередньо регулюванням випробувальної машини, то її можна встановити регулюванням швидкості навантаження до початку області текучості зразка, яка повинна бути від 0,3 до 3 кг / мм² ·с.

2.Проведення випробування і підрахунок результатів.

Напруження течії (умовна) $\sigma_{0,2}$ и σ_T (або при іншому допуску на величину залишкової деформації) визначають:

- а) за допомогою тензометрів;
- б) графічним методом при масштабі діаграм по осі деформації не менше 50:1.

Для визначення навантаження $P_{0,2}$ по діаграмі випробувань обчислюють величину залишкового подовження, виходячи з робочої довжини зразка. Знайдену величину збільшують пропорційно масштабу діаграми і відрізок отриманої довжини ОЕ відкладають по осі абсцис вправо від точки О (рис. 3.1).

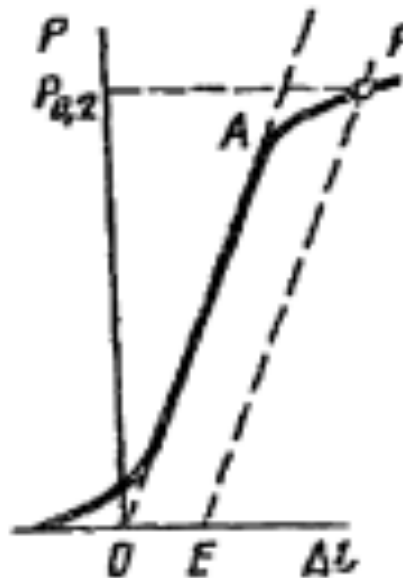


Рисунок 3.1 - Визначення навантаження $P_{0,2}$ по діаграмі

Початкова криволінійна частина діаграми виключається. З точки Е проводять пряму EF паралельно прямій ОА. Точка перетину Р з кривою розтягування визначає висоту ординати, т. е. навантаження P_0 , що відповідає напруженню течії і при заданому допуску на величину залишкового подовження.

При визначенні графічним методом обчислюється величина повної деформації, виходячи з довжини робочої частини зразка.

Знайдене значення збільшують пропорційно масштабу діаграми і з відповідною точки абсцис проводять пряму, паралельну осі ординат. Точка перетину цієї лінії з кривою розтягування відповідає навантаженню P_T при напруженню течії σ_T із заданим допуском на величину загальної деформації швидкість навантаження при цьому повинна бути від 0,3 до 3,0 кгс / мм²·с , якщо в стандартах на металопродукцію немає інших вказівок.

Якщо немає вказівок в стандартах або технічних умовах на продукцію, умовне напруження течії визначають тільки при відсутності площадки плинності.

Напруження течії для матеріалів з ярко вираженою площадкою плинності визначається за допомогою діаграми розтягнення. При визначенні умовного напруження течії по виміру деформації використовують тензометри: механічні, електронні, оптичні, оптико – механічні. Найбільше розповсюдження в заводських умовах отримали механічні тензометри і електронні тензометри , які цілком придатні для проведення випробувань на зразках з холоднокатаних смуг.

Механічний тензометр, встановлюють на зразок двома призмами. Одна з призм нерухома і з'єднана з корпусом приладу, інша (рухома) є продовженням головного важеля передаточного механізму. Відлік деформації проводиться візуально по дзеркальній шкалі.

Механічний тензометр конструкції Веткіна рис. 3.2. б, відрізняється від описаного тим, що в ньому важільна система і шкала замінені

індикатором. Конструкція тензOMETра дозволяє фіксувати величину подовження зразка в масштабі 2:1.

Індикаторний тензOMETр типу ИТ-3 рис.3.2 в кріпиться на зразку за допомогою одного рухомого і одного нерухомого затисків. За допомогою рухомого затиску і індикаційної головки вимірюється величина лінійної деформації в масштабі 1:1.

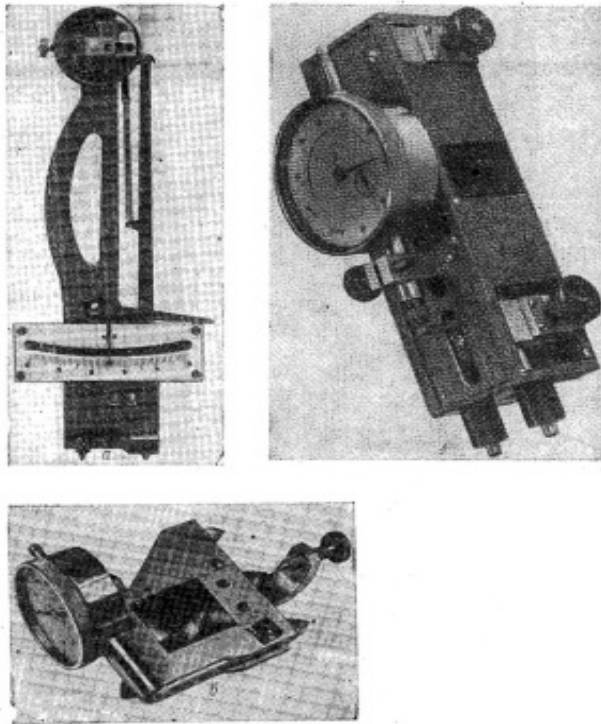


Рисунок 3.2 – Механічні тензOMETри: а) типа ТР1958, б) конструкції Веткина, в) типа ИТ-3

Останнім часом широке розповсюдження отримали електронні тензOMETри типу МКе. Принцип дії такого тензOMETра заснований на перетворенні лінійного переміщення рухомого леза, закріпленого на зразку, через індукційний датчик і посилювач в сигнал для реверсивного електродвигуна, обертаючий реєструючий барабан. Кут оберту барабана залежить від величини подовження зразку. Барабан з'єднаний з динамометром, який дає другу компоненту – величину зусилля. В результаті на барабані реєструється діаграма подовження та навантаження.

3.2 Проведення експерименту та дослідження кривої, деформації зразка

В ході експериментальних досліджень проведено експеримент з розриву металевого зразка, на лабораторній установці для визначення механічних властивостей матеріалу та встановлення закономірностей зміни напруження течії при деформуванні зразків.

Загальний вигляд розривної машини УГ-20 представлено на рисунку 3.3



Рисунок 3.3 – Загальний вид розривної машини УГ-20

Розривна машина складається з самої установки для проведення розриву зразка, та циферблату для встановлення навантаження яке прикладається до зразка.



Рисунок 3.4 - Зразок для визначення механічних властивостей

Для розтягнення використано металевий зразок, який має круглу форму поперечного перерізу діаметром 9,2 мм. Довжина зразка дорівнювала 15,1 мм.

Зразок закріплено в затискачі розривної машини та прикладено навантаження. Зростання навантаження фіксується на циферблаті розривної машини. Також навантаження та подовження фіксується на кривій деформації.



Рисунок 3.5 – Встановлення зразка в розривну машину

Максимальне навантаження яке зафіксувала реєструюча машина склало $P_{max} = 3,9 \text{ т} = 0,038246 \text{ МН}$.

$$F_0 = \frac{\pi D^2}{4} = \frac{3,14 \times 0,0092^2}{4} = 0,664424 \times 10^{-5} \text{ м}^2;$$

Тимчасовий опір металу складає

$$\sigma_B = \frac{P_{max}}{F_0} = \frac{0,038246}{0,664424 \times 10^{-5}} = 576 \text{ МН/м}^2;$$

Графічним методом, по графіку кривої деформації визначено найменше навантаження при якому зразок деформується без помітної зміни навантаження. Воно склало $P_m = 3,1 \text{ т} = 0,0304 \text{ МН}$.

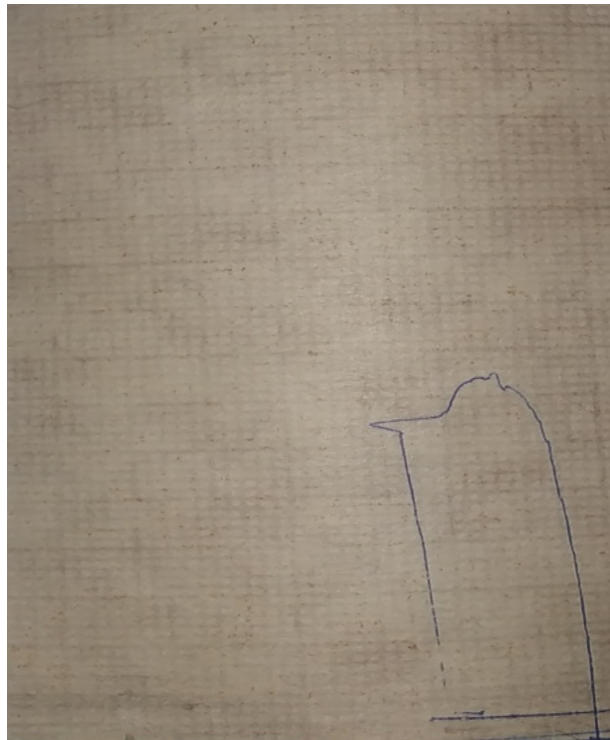


Рисунок 3.6 – Крива деформації металевого зразка

Умовна межа текучості складає

$$\sigma_T = \frac{P_m}{F_0} = \frac{0,0304}{0,664424 \times 10^{-5}} = 458 \text{ МН/м}^2.$$

Після розриву зразка проведено замір довжини зразка та діаметр шийки, яка з'явилась при дії деформуючих сил



Рисунок 3.7 – Розірваний металевий зразок

Знаючи довжину зразка після розриву та діаметр шийки яка з'явилась в місці розриву знаходимо подовження та звуження зразка.

Подовження зразка склало:

$$\delta_n = \frac{l_k - l_0}{l_0} \times 100\% = \frac{15,85 - 15,1}{15,1} \times 100\% = 5\%.$$

Розраховуємо площу поперечного перерізу зразка в місці розриву

$$F_1 = \frac{\pi d^2}{4} = \frac{3,14 \times 0,007^2}{4} = 3,8465 \times 10^{-5} \text{ м}^2;$$

Звуження зразка складає:

$$\psi = \frac{F_0 - F_1}{F_0} \times 100\% = 42\%.$$

3.3 Оптимізація моделі напруження течії

За допомогою методу повного факторного експерименту, та статистичних даних напруження течії при різних ступенях деформації, які взято на ПАТ «Запоріжсталь» дослідити вплив на напруження течії наступних факторів (матеріал – сталь 09Г2, 12ГС) :

X_1 – сумарне обтиснення, ε_Σ , %;

X_2 – температура деформації, T , °C;

X_3 – швидкість деформації, u, c^{-1} .

Таблиця 3.1 - Досліджувані фактори

Характеристика	Фактори		
	сумарне обтиснення, (ε_Σ , %)	температура деформації (T , °C)	швидкість деформації, (u, c^{-1})
Код	X_1	X_2	X_3
Основний рівень	40	85	170
Інтервал варіації	20	45	100
Верхній рівень (закодоване значення +1)	60	130	270
Нижній рівень (закодоване значення -1)	20	40	70

Складання плану експерименту

При складанні плану повного факторного експерименту треба стежити, щоб не було повторів.

Таблиця 3.2 - Матриця повного факторного експерименту 2^3

План	Номер дослід	x_0	x_1	x_2	x_3
2^2	1	1	1	1	1
	2	1	1	1	-1
	3	1	1	-1	1
	4	1	1	-1	-1
2^3	5	1	-1	1	1
	6	1	-1	1	-1
	7	1	-1	-1	1
	8	1	-1	-1	-1

Фактор, що по значеній « x_0 » - так називаємо фіктивну зміну – уводимо для розрахунку вільного члена шуканої моделі – коефіцієнта – « b_0 ». Після складання таблиці перевіряємо правильність її заповнення. Умова симетричності репліки вимагає, щоб у кожному стовпці знаходилося рівне число мінусів та плюсів. Умова виконується.

Реалізація плану експерименту. Для визначення помилки експерименту досліді слід дублювати. Частіше дублюють не всі досліді, а тільки досліді на основному рівні. В цьому випадку розрахунок дисперсії досліді S_y проводимо по формулі:

$$S_y^2 = \sum_{i=1}^n \frac{(Y_{0i} - Y_0)^2}{f_1},$$

де n – кількість дублів на основному рівні;

i – номер дубля

Y_{0i} – значення параметра оптимізації в i -ом дублі;

Y_0 – середнє арифметичне результатів всіх дублів;

f_1 – число мір свободи ($f_1 = n-1$)

Для визначення дисперсії досліду було організовано досліди 9 -11 на основному рівні. При цьому набуто наступні значення параметра оптимізації:

Визначаємо S_y^2 . Складаємо таблицю 3.3.

Таблиця 3.3 - Розрахункова таблиця дисперсії досліду

Дослід	Y_{0i}	$ Y_{0i}-Y_0 $	ΔY_{0i}^2
9	575	1	1
10	580	4	16
11	572	4	16
	$Y_0 = 576$		$\Sigma = 33$

Тоді

$$S_y^2 = \sum_{i=1}^n \frac{(Y_{0i} - Y_0)^2}{f_1} = \frac{33}{3 - 1} = 16,5.$$

Побудова математичної моделі. Після реалізації всіх дослідів матриці планування по їх результатах будують математичну модель процесу, що вивчається. Для цього при використанні повного факторного експерименту розраховуємо коефіцієнти регресії рівняння по формулі:

$$b_j = \sum_{j=1}^n \frac{x_{jn} \cdot Y_n}{N},$$

де b_j – значення j -го коефіцієнта регресії;

x_{jn} – значення j -го чинника в n -ом досліді в кодованому вигляді;

Y_n – значення параметра оптимізації в n-ом досліді;

N – число дослідів в матриці планування.

В результаті одержують модель, яка має наступний вигляд:

$$Y = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3$$

У матриці планування, що реалізовується, отримані наступні результати.

Таблиця 3.4 - Результати дослідів, σ_T , (МН/М²)

Дослід	1	2	3	4	5	6	7	8
Результат	765	725	780	738	600	560	610	580

По формулі розраховуємо коефіцієнти регресії шуканих моделей.

$$b_0 = \frac{1}{8}(765 + 725 + 780 + 738 + 600 + 560 + 610 + 580) = 669,75;$$

$$b_1 = \frac{1}{8}(765 + 725 + 780 + 738 - 600 - 560 - 610 - 580) = 82,25;$$

$$b_2 = \frac{1}{8}(765 + 725 - 780 - 738 + 600 + 560 - 610 - 580) = -7,25;$$

$$b_3 = \frac{1}{8}(765 - 725 + 780 - 738 + 600 - 560 + 610 - 580) = 19.$$

Таким чином, одержана лінійна модель має задалегідь наступний вигляд:

$$Y = 669,75 + 82,25 \times x_1 - 7,25 \times x_2 + 19 \times x_3.$$

Статистичний аналіз моделі. Метою аналізу є перевірка придатності моделі для її використання при описі досліджування.

Аналіз складається з двох етапів. На першому етапі перевіряємо статистичну значущість коефіцієнтів регресії. У статистиці прийнято здійснювати перевірку значущості коефіцієнтів регресії за допомогою критерію Стьюдента. Для цього розрахуємо довірчий інтервал коефіцієнтів:

$$\Delta b_i = t_{\alpha, f_1} \cdot S_{bi}$$

Де S_{bi} – середньоквадратична помилка у визначенні коефіцієнтів регресії;

$$S_{bi} = \sqrt{\frac{S_y^2}{N}};$$

t_{α, f_1} – значення критерію Стьюдента, яке вибирається залежно від рівня значущості α і числа мір свободи при визначенні дисперсії досліджуваного фактора f_1 .

Значення коефіцієнтів регресії порівнюємо з довірчим інтервалом, і ті що виявляються по абсолютній величині менше довірчого інтервалу, виключаємо з рівняння.

На другому етапі остаточно одержане рівняння перевіряємо на адекватність, тобто його придатність для опису сили прокатування.

Розраховуємо довірчий інтервал коефіцієнтів регресії Δb_i . Для цього спочатку визначимо S_{bi} .

$$S_{bi} = \sqrt{\frac{16,5}{8}} = 1,44.$$

Вибираємо для $\alpha = 0,05$ і $f_1 = 2$ значення критерію Стьюдента, яке рівне 4,3027. Визначаємо довірчий інтервал для нашого рівняння:

$$\Delta b_i = 4,3027 \times 1,44 = 6,2.$$

Таким чином всі коефіцієнти виявилися статистично значущими, і рівняння набуває остаточно наступного вигляду:

$$Y = 669,75 + 82,25 \times x_1 - 7,25 \times x_2 + 19 \times x_3.$$

Тепер перевіряємо адекватність одержаних моделей в цілому. Для цього підставляємо в одержане рівняння послідовно для всіх дослідів значення « x_i » в кодованому вигляді. Для визначення дисперсності неадекватності складаємо розрахункову таблицю 3.5. Таблиця 3.5 складається виходячи з алгоритму перевірки одержаного рівняння на адекватність, тобто його придатність для опису об'єкту дослідження. Послідовність перевірки така:

1. По одержаній моделі визначаються по черзі для всіх дослідів матриці планування розрахункові значення параметра оптимізації ($Y_{\text{розр}}$). Для цього в рівняння підставляємо значення чинників в кодованому вигляді.

Таблиця 3.5 – Розрахунок дисперсії неадекватності

Y		ΔY	ΔY^2
Експеримент	Розрахунок		
765	763,75	1,25	1,5625
725	725,75	-0,75	0,5625
780	778,25	1,75	3,0625
738	740,25	-2,25	5,0625
600	599,25	0,75	0,5625
560	561,25	-1,25	1,5625
610	613,75	-3,75	14,0625
580	575,75	4,25	18,0625
			\sum 44,5

2. По формулі одержуємо оцінку дисперсії неадекватності:

$$S_{\text{неад}}^2 = \sum_{i=1}^n \frac{(Y_n^{\text{експ}} - Y_{\text{розн}}^n)^2}{f_2} = \frac{44,5}{8 - 4} = 11,125.$$

де $f_2 = N - K$; K – число коефіцієнтів моделі, включаючи b_0 .

3. Визначають розрахункові значення критерію Фішера, порівнюють з табличним.

$$F_{f_1, f_2}^{\text{розн}} = \frac{S_{\text{неад}}^2}{S_y^2} = \frac{11,125}{16,5} = 0,674.$$

Модель адекватна, оскільки $F^{\text{табл.}} = 19,24$.

Отримане рівняння регресії графічно інтерпретуємо у вигляді поверхонь відгуку .

Для цього необхідно перевести наше рівняння від кодованого значення до натурального.

$$X_i = \frac{X_j - X_i^0}{\Delta X_i},$$

де

X_i – кодоване значення фактора;

X_j – натуральне значення фактора;

X_i^0 – показник фактору на основному рівні;

ΔX_i – інтервал варіювання фактора.

$$\begin{aligned} y &= 669,75 + 82,25 \left(\frac{X_1 - 40}{20} \right) + 7,25 \left(\frac{X_2 - 85}{45} \right) + 19 \left(\frac{X_3 - 170}{100} \right) = \\ &= 303 + 0,675 x_1 + 0,2 x_2 + 0,165 x_3. \end{aligned}$$

Отже рівняння у натуральному виді матиме вигляд:

$$y = 485,65 + 4,11 x_1 + 0,16 x_2 + 0,19 x_3.$$

Інтерпретація результатів

Отримана адекватна модель дозволяє розрахувати значення параметра оптимізації для будь якої крапки вивченого факторного простору.

Крім того, отриману залежність можна представити графічно у вигляді впливу окремих факторів на параметр оптимізації. При цьому звичайно будують залежність за умови, що всі інші фактори фіксують на постійному рівні. Тоді підставляємо в дане рівняння значення фактора X_2 і X_3 у кодованому виді (зі знаком «-»). Потім у перетворене (спрощене) рівняння підставляємо послідовно значення фактора X_1 на нижньому, основному й верхньому рівнях, тобто -1; 0; +1 і одержуємо графік.

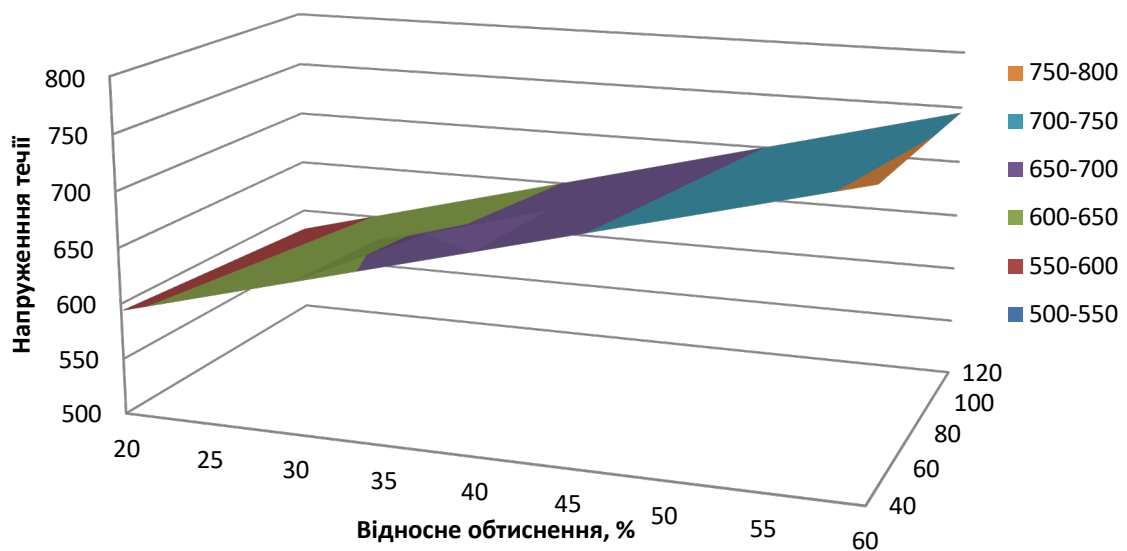


Рисунок 3.8 – Залежність напруження течії від відносного обтиснення та температури (сталь 09Г2)

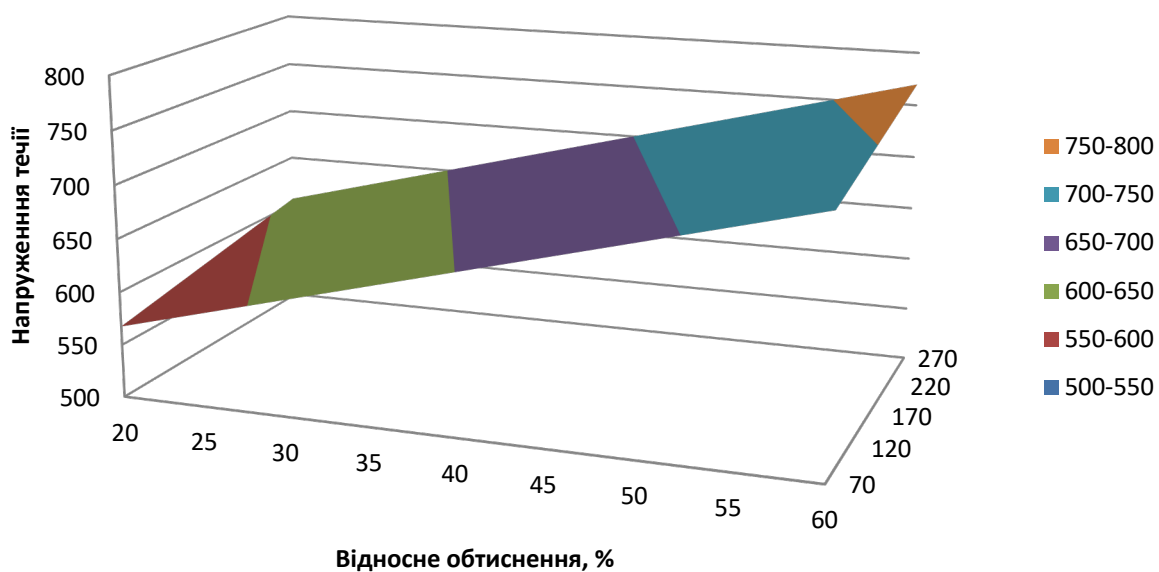


Рисунок 3.9 – Залежність напруження течії від відносного обтиснення та швидкості деформації (сталь 09Г2)

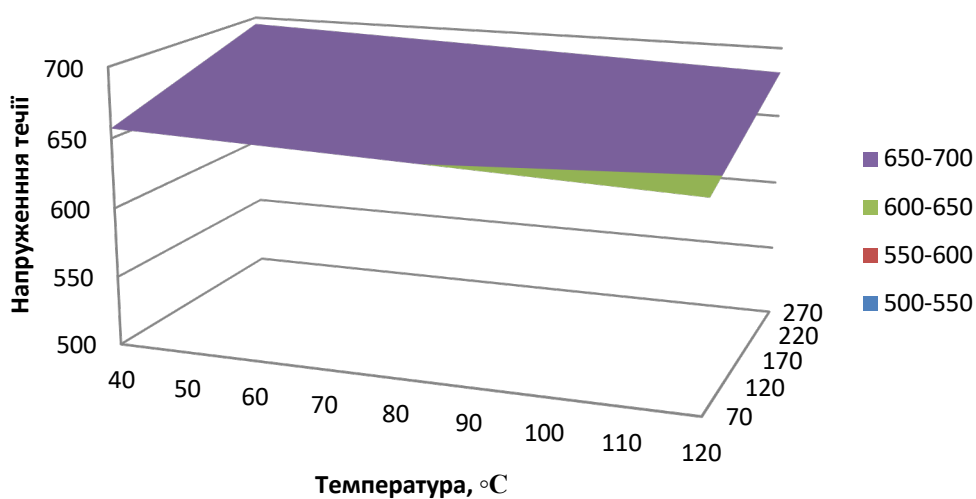


Рисунок 3.10 – Залежність напруження течії від температури та швидкості деформації (сталь 09Г2)

Таким же чином, за допомогою методу повного факторного аналізу, досліджуємо вплив відносного обтиснення, температури деформації та швидкості деформації на напруження течії для низьколегованої сталі 12ГС.

У матриці планування, що реалізовується, отримані наступні результати.

Таблиця 3.6 - Результати дослідів, σ_T , (МН/М²)

Дослід	1	2	3	4	5	6	7	8
Результат	803	750	986	925	730	685	897	840

По формулі розраховуємо коефіцієнти регресії шуканих моделей.

$$b_0 = \frac{1}{8}(803 + 750 + 986 + 925 + 730 + 685 + 897 + 840) = 827;$$

$$b_1 = \frac{1}{8}(803 + 750 + 986 + 925 - 730 - 685 - 897 - 840) = 39;$$

$$b_2 = \frac{1}{8}(803 + 750 - 986 - 925 + 730 + 685 - 897 - 840) = -85;$$

$$b_3 = \frac{1}{8}(803 - 750 + 986 - 925 + 730 - 685 + 897 - 840) = 27.$$

Таким чином, одержана лінійна модель має заздалегідь наступний вигляд:

$$Y = 827 + 39 \times x_1 - 85 \times x_2 + 27 \times x_3.$$

Розраховуємо довірчий інтервал коефіцієнтів регресії Δb_i . Для цього спочатку визначимо S_{b_i} .

$$S_{bi} = \sqrt{\frac{16,5}{8}} = 1,44.$$

Вибираємо для $\alpha = 0,05$ і $f_1 = 2$ значення критерію Стьюдента, яке рівне 4,3027. Визначаємо довірчий інтервал для нашого рівняння:

$$\Delta b_i = 4,3027 \times 1,44 = 6,2.$$

Таким чином всі коефіцієнти виявилися статистично значущими, і рівняння набуває остаточно наступного вигляду:

$$Y = 827 + 39 \times x_1 - 85 \times x_2 + 27 \times x_3.$$

По одержаній моделі визначаються по черзі для всіх дослідів матриці планування розрахункові значення параметра оптимізації ($Y_{\text{розн}}$). Для цього в рівняння підставляємо значення чинників в кодованому вигляді.

Таблиця 3.7 – Розрахунок дисперсії неадекватності

Y		ΔY	ΔY^2
Експеримент	Розрахунок		
803	808	-5	25
750	754	-4	16
986	978	8	64
925	924	1	1
730	730	0	0
685	676	9	81
897	900	-3	9
840	846	-6	36
			$\sum 262$

По формулі одержуємо оцінку дисперсії неадекватності:

$$S_{\text{неад}}^2 = \sum_{i=1}^n \frac{(Y_n^{\text{експ}} - Y_{\text{розн}})_n}{f_2} = \frac{262}{8 - 4} = 65,5.$$

де $f_2 = N - K$; K – число коефіцієнтів моделі, включаючи b_0 .

Визначають розрахункове значення критерію Фішера, порівнюють з табличним.

$$F_{f_1, f_2}^{\text{розрах}} = \frac{S_{\text{неад}}^2}{S_y^2} = \frac{65,5}{36,5} = 1,795.$$

Модель адекватна, оскільки $F^{\text{табл.}} = 19,24$.

Приводимо рівняння від кодованого значення до натурального.

$$\begin{aligned} y &= 827 + 39 \left(\frac{X_1 - 40}{20} \right) - 85 \left(\frac{X_2 - 85}{45} \right) + 27 \left(\frac{X_3 - 170}{100} \right) = \\ &= 863,7 + 1,95 x_1 - 1,9 x_2 + 0,27 x_3 \end{aligned}$$

Інтерпретація результатів

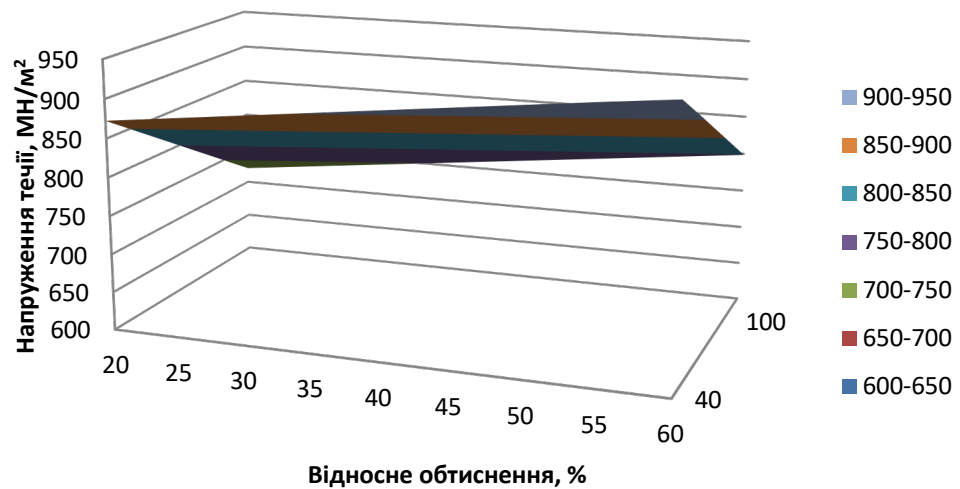


Рисунок 3.11 – Залежність напруження течії від відносного обтиснення та температури (сталь 12ГС)

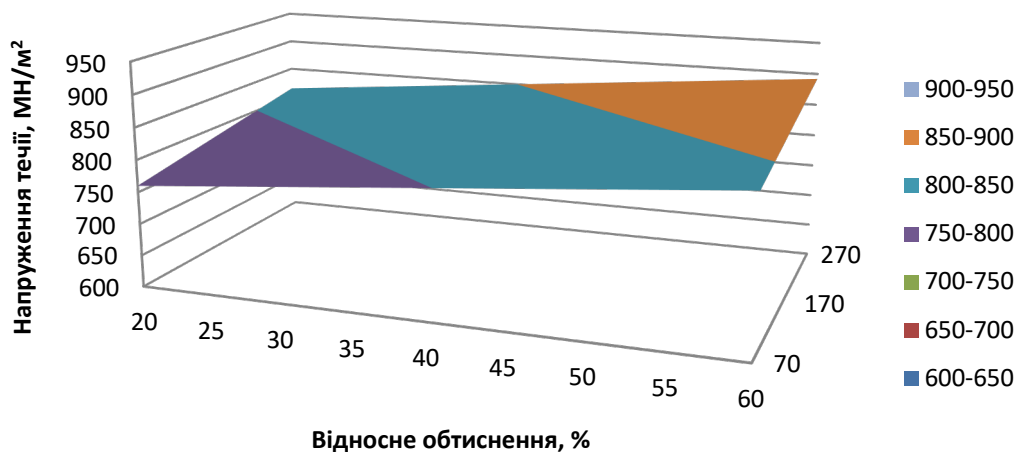


Рисунок 3.12 – Залежність напруження течії від відносного обтиснення та швидкості деформації (сталь 12ГС)

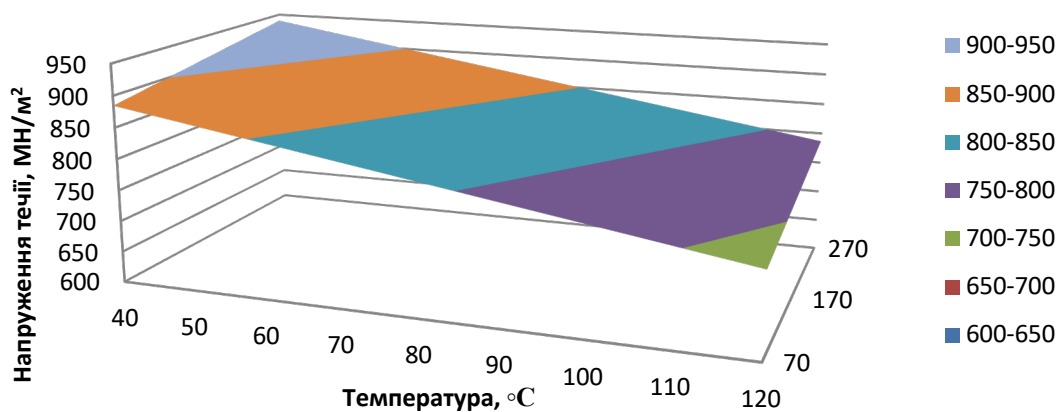


Рисунок 3.13 – Залежність напруження течії від температури та швидкості деформації (сталь 12ГС)

3.3 Висновок до розділу 3

В даному розділі розглянуто методи визначення напруження текучості, та порядок проведення експерименту по визначенню напруження текучості на розривних машинах.

Проведено експеримент по розриву металевого зразка та визначені механічні властивості зразка : напруження текучості, напруження міцності, відносне подовження та відносне звуження. Побудовано криву деформації зразка та вивчено закономірності деформації металевого зразка.

За допомогою методу повного факторного експерименту та статистичних даних по дослідженню напруження течії, які взято на ПАТ «Запоріжсталь», досліджено вплив на напруження течії таких основних факторів: відносне обтиснення, температура, швидкість деформації. В результаті отримано оптимізовану модель напруження текучості для двох марок сталей: 09Г2, 12ГС. Ці моделі показали, що для цих двох низьколегованих марок сталей фактори по різному впливають на напруження текучості. Для сталі 09Г2 більш впливовішим фактором є швидкість деформації, тоді як для сталі 12ГС температура більше впливає на напруження текучості.

4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ТЕХНОГЕННА БЕЗПЕКА

4.1 Аналіз потенційно небезпечних і шкідливих факторів виробничого середовища

Згідно із статтею 44 Закону України "Про охорону праці" [27], працівники та роботодавці несуть відповідальність за порушення законів та інших нормативно-правових актів, пов'язаних із охороною праці. Ця відповідальність може бути виражена у формі дисциплінарної, адміністративної чи кримінальної відповідальності згідно із чинним законодавством, а також у виплаті штрафу у судовому порядку.

У даному розділі бакалаврської роботи розглянуті та проаналізовані основні шкідливі та небезпечні фактори, що існують в умовах ЦХП-1 ВАТ «Запоріжсталь». Також подано інформацію про чинні нормативно-правові акти з охорони праці та узагальнені аспекти пожежної профілактики.

ЦХП-1 віднесений до II б категорії за ДСН 3.3.6.042-99, оскільки витрата енергії працівника становить приблизно 178 ккал/год [14]. На безперервному стані холодної прокатки "1680" використовується безперервний процес прокатки, що зменшує час процесу та кількість допоміжних операцій, а також ризик травматизму.

Важливо відзначити, що умови роботи на реверсивному стані 1680 ускладнюються тим, що робоча зона розташована в непримиренній близькості до стану і не обладнана закритою кабіною. У повітрі може присутність високомолекулярних жирних кислот, окису вуглецю та хлору. Тому реверсивний стан 1680 повинен бути оснащений місцевою витяжкою.

Наразі приблизно 80% працівників цього цеху працюють у умовах, які наведені в таблиці 4.1. Їх робота відповідає III групі важкості (важкі фізичні роботи). Фактори ризику та шкідливі виробничі умови на стані включають в

себе: рухомі та обертові частини машин та механізмів, розпечений метал, підвищену запиленість повітря, небезпеку електротравм, шум та вібрацію.

Таблиця 4.1 - Характеристика мікроклімату виробничого приміщення

Параметри мікроклімату	Фактичні		Нормативні значення мікроклімату по ДСН 3.3.6 042-99	
	в холодну пору року	в теплу пору року	в холодну пору року	в теплу пору року
Температура, °С	10-20	до 35	18-19	20-22
Відносна вологість, %	56-65	58-66	не більше 75	не більше 75 (при 24°С)
Швидкість руху повітря, м/с	до 0,6	до 0,8	Не більше 0,4	0,2-0,6

Основні шкідливі компоненти, що забруднюють повітря - пил, оксид вуглецю, діоксид кремнію, сірчана кислота [15]. Порівняльна характеристика вмісту цих речовин і їх гранично допустима концентрація у повітрі робочої зони наведені в таблиці 4.2.

Таблиця 4.2 – Фактичні і нормативні концентрації шкідливих речовин

Показник	Запиленість, мг/м ³		Загазованість, мг/м ³		
	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	CO	NO ₂	H ₂ S
В умовах цеху	12,2	0,22	2	0,03	0,001
ГДК	4,0	1,0	20,0	0,04	0,008
Клас небезпеки за ГОСТ 12.1.005-88	III	III	IV	II	II

Для створення сприятливих умов праці важливе значення має раціональне освітлення [17]. Незадовільне освітлення обтяжує проведення робіт, веде до зниження продуктивності праці і гостроти зору, що може бути причиною травматизму і захворювань очей.

Таблиця 4.3 – Оцінка факторів виробничого і трудового процесу. Робоче місце – вальцювальник

№ п/п	Фактори виробничого середовища й трудового процесу	Норм. знач. (ГДК, ГДУ)	Фактичне значення	III клас: шкідливі й небезпечні умови й характер праці			Час дії фактора за зміну, %
				I	II	III	
1	Шкідливі хімічні речовини, мг/м ³ <u>I клас безпеки</u>						
						
	<u>II клас безпеки</u>						
	Формальдегід	0,5	0,2				90,6
	<u>III клас безпеки</u>						
	Ангідрид сірчистий	10	5,272				90,6
	Азота діоксид	2	0,5889	1,13			90,6
	Триетаноламін Вуглецю оксид	5 20	0,5 6,1				90,6 90,6
2	Пил переважно фіброгенної дії мг/м ³						
	Кремнія діоксид кристалічний при утриманні в пилу від 2 до 10 %	4	4,6037	1,15			90,6
3	Вібрація (загальна й локальна) дБ.						
4	Шум, дБА	80	97,1			17,1	100
5	Інфразвук дБ						
6	Ультразвук дБ						
7	Іонізуюче випромінювання: - радіочастотний діапазон, В/м; - діапазон промислової частоти, кв/м; - оптичний діапазон (лазерне випромінювання), Вт/м ²						
	Мікроклімат у приміщенні: - температура повітря ⁰ С; - швидкість руху повітря, м/с; - відносна вологість повітря, %; - інфрачервоне випромінювання, Вт/м ²	15-21 0,4 75	4,7 1,1 52			10,3	90,6 90,6 90,6
8	Температура навколишнього повітря(під час роботи на відкритому повітрі), ⁰ С: - улітку - узимку						
	Атмосферний тиск						
9	Вага й напруженість праці.						
10	Кількість факторів:			3	-	2	

У виробничих умовах виникає шум внаслідок роботи різних механізмів, таких як прокатні стани, крани, ручні механізовані інструменти, електричні машини, компресори, а також підйомно-транспортне та допоміжне обладнання, таке як вентиляційні установки та кондиціонери. На ділянці безперервного стану холодної прокатки 1680 виникає підвищений рівень шуму, який досягає 92 дБА, що перевищує норму у 80 дБА [18].

У прокатному цеху вібрація характеризується неоднорідністю по спектру частот та непостійністю в часі. Локальна вібрація залежить від контакту оператора з тілом, що коливається. Ручні механізовані машини ударної та обертальної дії пневматичним або електричним приводом є джерелами локальної вібрації, так само як і інструменти ударної дії, наприклад, молотки та пневмотрамбовки. До ручних механізованих машин обертальної дії відносяться шліфувальні, свердлувальні машини та пили електромоторів.

Узагальнюючи, в таблиці 4.1 приведено перелік небезпечних та шкідливих факторів, і можна визначити наявність двох чинників 1-2 ступеня впливу.

4.2 Заходи з поліпшення умов праці.

Роботи на стані пов'язані з низкою шкідливих і виробничих факторів. На ділянці прокатного стану – це, такі як шум при роботі клітей, а також при змотуванні смуг на моталках. Для захисту від шумових навантажень на організм людини застосовуються спеціальні вставки у вуха, беруші і шумові навушники. В таблиці 4.4 приведені технічні рішення по виробничій санітарії.

Таблиця 4.4 - Перелік технічних і санітарно-гігієнічних заходів захисту виробничого середовища і робочих місць

№ з/п	Небезпечні або шкідливі чинники	Захисний пристрій	Принцип дії і призначення	Місце установки
1.	Підвищений рівень шуму	Звукоізолюючі кабінки і перегородки, засоби ЗІЗ	Звукопоглинання і обгороджування, ізоляція органів слуху	Біля джерел шуму в приміщенні оператора на робочому місці
2.	Випаровування токсичної дії	Витяжна вентиляція	Примусове механічне відсмоктування пари масел, що утворилася	Над станом
4.	Рухомі частки механізмів	Запобіжні пристрої, сітки, кожухи	Відключення і розрив ланцюга при перевантаженнях. Захист від зіткнення з рухомими частинами.	Навколо устаткування
5.	Метал, що переміщається		Захист від травм при падінні металу і його переміщенні	

Таблиця 4.5 - Технічні рішення по виробничій санітарії

№ з/п	Вид технологічної операції	Обладнання	Небезпечні і шкідливі фактори	Можливі дії
1.	Прокатка	Стан	Валки, що обертаються, рухома штаба, рольганги, моталки, привод. Небезпечний рівень струму і напруги: $I=30A$, $U= 380V$.	Травмування обслуговуючого персоналу при необачному контакті. Ураження електричним струмом при однофазному і двофазному дотику до струмоведучих частин.
2.	Транспортування металу	Мостовий Електромостовий кран	1.)Рухомі механізми міст і візок крана 2.)Метал, що транспортується, з масою до 5 тонн.	Механічні ушкодження. Травми від падіння металу.
3.	Допоміжні операції	Газоутворення (маслонапорні станції)	Горючі речовини, пари емульсолу.	Пожна небезпека.

Характер роботи в цеху холодної прокатки не пов'язаний з надмірними тепловиділеннями. Тому основні труднощі підтримки необхідного мікроклімату пов'язані: взимку і в перехідній період року з необхідністю

опалювання в приміщенні цеху, створення повітряних завіс на залізничних і автомобільних в'їздах до виробничої будівлі, скління ліхтарів і світлових отворів. У літній період, особливо в спекотних місяцях року, необхідно забезпечувати приплив охолодженого повітря природною або механічною вентиляцією.

У будівлі прокатного цеху передбачено природне і штучне освітлення. Природне освітлення забезпечується одночасно через світлові отвори в бокових стінах і ліхтарі (комбіноване освітлення).

У виробничих приміщеннях прокатного цеху для загального штучного освітлення застосовують, як правило, газорозрядні лампи (люмінесцентні ЛУБ - 80, ртутні високого тиску із виправленою кольоровістю ДРІ-400). Їх вибирають залежно від умов їх роботи і вимог до якості освітлення.

У прокатному цеху для загального освітлення застосовують світильники прямого світла типу «Універсаль» для місцевого - світильники типу «Альфа». У місцях підвищеної небезпеки, де освітленість при системі загального освітлення складає 150 лк і менш, норму освітленості збільшують на один розряд.

В разі виходу з ладу робочого освітлення використовують аварійне освітлення, яке забезпечує можливість продовження роботи або евакуацію персоналу. У прокатному цеху установка аварійного освітлення обов'язкова на посту управління прокатним станом, пунктах управління систем водопостачання, вентиляції і каналізації, в машинному залі і диспетчерському пункті.

Найменша освітленість робочих поверхонь що вимагають обслуговування при аварійних режимах складає 5% освітленості, що нормується для загального робочого освітлення, але не менше 2 лк. Аварійне освітлення для евакуації персоналу проходів і сходинок сходів не менше 0,5 лк. Прийняті значення освітленості вказані в таблиці 4.7.

На ділянці стану основними потенційно небезпечними виробничими факторами є:

Таблиця 4.6 - Прийняті значення освітленості.

Найменування ділянки	Розряд зорової роботи	Освітленість, (лк) і коефіцієнт запасу			Аварійне освітлення	
		Система комбінованого освітлення	Система спільного освітлення	Коефіцієнт запасу	Для робіт	Для евакуації
Ковпакові печі	IV	400	200	1,3	10	4
Прокатний стан	III	750	300	1,5	15	5

- пересування електромостових кранів;
- транспортерного візка з вантажем або без нього;
- частини механізмів кліті, що обертаються;
- рух штаби і листів по лінії стану;
- пересування рулонів по конвеєрах.

Пересування по території стану дозволяється лише по встановлених переходах, перехідних містках. При пересуванні або виконанні робіт працюючі мають бути уважні до сигналів електромостових кранів, до роботи світлової сигналізації, не перебувати під піднятим вантажем і на шляху руху передавальних візків.

Працівникові стану необхідно: прийняти і здати зміну на робочому місці і доповісти старшому майстрові, працювати в чистому, виправленому і правильно одягненому спецодягу і спец. взутті, належному по нормах для кожної професії. Користуватися відповідними засобами захисту і запобіжними пристосуваннями, виконувати доручену роботу з дотриманням

всіх вимог інструкцій по техніці безпеки і промислової санітарії, виконувати вказівки бригадира і майстра, виконувати вимоги попереджувальних написів і плакатів ТБ. Не приступати до роботи, якщо умови її виконання суперечать інструкції по техніці безпеки або іншому документу, що регламентує безпечне ведення робіт, а також без інструктажу по техніці безпеки при тимчасовому переведенні на інші роботи. Під час роботи бути уважним, не відволікатися і не відволікати інших, не допускати на робоче місце осіб що не мають відношення до роботи, виконувати правила пожежної безпеки, промислової санітарії і особистої гігієни, не залишатися байдужим до порушень інструкцій іншими робітниками - цим кожен вбереже себе і інших від нещасних випадків.

При отриманні навіть незначної травми негайно звернутися в медпункт і повідомити про це майстрові, а при його відсутності – бригадирові, старшому робітникові або товаришеві по роботі, надати першу допомогу постраждалому.

При виявленні порушень, які можуть привести до аварій або нещасних випадків, негайно зупинити роботу і повідомити про це майстрові або бригадирові.

Працювати на стані забороняється:

- на механізмах, що не мають огорожі частин, що обертаються;
- обслуговувати на ходу і доторкатися до частин механізмів, що обертаються, заходити за огорожі рухомих частин механізмів;
- торкатися до електропроводів, рубильників і моторів щоб уникнути ураження електричним струмом;
- виконувати роботу в місцях, де немає габариту.

4.3 Пожежна та техногенна безпеки

Прокатний цех відноситься до категорій В і Г, пожежонебезпеки (ГОСТ12.1004-81), оскільки в ньому обробляють речовини (метал), що не згорають, але є горючі масла. По вогнестійкості прокатний цех відносять до І

і II ступеням. Необхідний ступінь вогнестійкості виробничих будівель промислових підприємств визначається СНіП 2.09.02-85 залежно від категорії вибухонебезпечності виробництва, площі і висоти будівлі. Необхідний ступінь вогнестійкості громадських будівель визначається СНіП 2.08.01-85 залежно від площі і числа поверхів будівлі.

Будівельні матеріали і конструкції по займистості ділять на три групи: що не згорають, важкозаймисті і такі, що згорають. Протипожежні стіни в цеху є такими, що не згорають.

Для забезпечення безпечної евакуації в будівлі цеху розташовані евакуаційні виходи, ведучі з першого поверху назовні, в коридор, вестибюль. Їх число має бути не менше два і розташовані в протилежних місцях будівлі.

Найбільша відстань, що допускається, від найбільш віддаленого робочого місця до евакуаційного виходу для виробництва з категорією пожежонебезпеки Г, I і II ступенем вогнестійкості не нормується. Ширина шляхів евакуації визначається з розрахунку 0,6м на 100 чоловік. Ширина проходів дорівнює 1 м, ширина коридорів не менше 1,4м. Ширина дверей складає від 0,8 до 2,4 м. Марші і майданчики сходів відповідно рівні 1,75 і 2,4м. Для гасіння пожеж в прокатному цеху застосовують тверді, рідкі і газоподібні речовини: воду, інертні гази, хімічну, легко-механічну піни, тверду вуглекислоту, пісок (вогнегасники типу ВХП-5, ВВ-10).

Протипожежне водопостачання включає комплекс пристроїв, призначених для отримання, зберігання і подачі води для гасіння пожеж (водопровід, природні і штучні водоймища). Витрата води на зовнішнє пожежогасіння через гідрант для прокатного цеху категорії Г при об'ємі будівлі 2000- 4000 м² складає 10 л/с. У виробничих будівлях I і II ступенів вогнестійкості категорії Г внутрішнє протипожежне водопостачання не передбачають.

Виробничий процес в цеху по вибуховій, вибухопожежній і пожежній небезпеці, згідно НАПБ Б.07.005-86 відноситься до категорії «Г», тому що обробці піддаються непальні матеріали в розпеченому стані .

Будівля цеху побудована з непальних матеріалів (металоконструкцій, залізобетону, скла) і згідно ДБН В.1.1-7-2002 має II ступінь вогнестійкості. Вибухонебезпечна зона в цеху відсутня.

До заходів по запобіганню пожежам і обмеженню поширення вогню відносять:

1. Правильний вибір ступеня вогнестійкості будівель і межі вогнестійкості, окремих його елементів;
2. Ухвалення відповідно до норм величин площі між протипожежними перешкодами;
3. Дотримання протипожежних розривів між будівлями.

Для успішної евакуації людей і цінностей передбачені шляхи евакуації і евакуаційні виходи допустимої протяжності і ширини, розміри дверних отворів, що забезпечують достатню пропускну спроможність, необхідне число сходових кліток і зовнішніх пожежних сходів.

Швидка локалізація і гасіння пожеж досягається пристроєм відповідних засобів зв'язку з пожежною сигналізацією, наявністю надійних джерел протипожежної дії, під'їздів і доріг до будівель.

Пожежі в цеху можуть виникнути в результаті: запалення електроустаткування при перевантаженнях, перегрівах і коротких замиканнях; запалення мастил при влученні в них іскор електричного або механічного походження, впливу тепла від нагрітих предметів, під дією відкритого вогню; на нагрівальній ділянці можливі запалення і вибух газоповітряних сумішей; самозаймання промасленого ганчір'я; дія статичного або грозового розряду .

Небезпека виникнення пожежі в цеху зменшена в проекті наступними заходами: оснащенням систем керування електроустаткуванням автоматами

максимального струмового захисту та плавкими запобіжниками; обмеженням кількості мастил добовою потребою; головні електродвигуни приводів оснащені системою замкнутої примусової вентиляції з очищенням повітря від щіткового пилу та охолодженням його; трансформаторні кіоски винесені за межі виробничого приміщення; олійні льохи обладнані системою припливно-витяжної вентиляції, що видаляє пари олії і зменшуючи їх концентрацію в повітрі, електроустаткування і освітлення олійних льохів виконане іскро-вибухобезпечним; промаслене ганчір'я після використання збирається в металеві ящики з герметичними кришками, а наприкінці зміни вивозиться із цеху і спалюється в спеціально відведеному місці; статичний заряд направлений в землю по мережі заземлення.

Будівля цеху побудована з непальних матеріалів (металоконструкцій, залізобетону, скла) і згідно СНіП 2.01.02-85 має II ступінь вогнестійкості. Ймовірність поразки споруд блискавкою зменшена застосуванням системи блискозахисту II категорії, виконаної відповідно до СН 205-77.

Для гасіння можливих пожеж в цеху передбачені первинні засоби пожежогасіння, які перелічені в таблиці 4.7.

Таблиця 4.7 - Перелік необхідних первинних засобів пожежогасіння

Назва приміщень	Площа приміщення	Пінні вогнегасники ОВП	Вуглекислотні вогнегасники			Ящики з піском та лопатами
			У-2	ВВ-5	ВП-1	
Виробниче приміщення	78750 м ²	1	-	1	-	1
Машинний зал	6000 м ²	1	2	-	3	1
Пости керування		1	-	1	-	1
Електромостовий кран (на кабінку)		-	1	-	-	1
Вентиляційні установки	3 шт.	-	1	-	-	-

4.4 Електробезпека

Широке використання електричного струму для найрізноманітніших цілей додає питанням захисту від його дії на людський організм важливе значення.

Електробезпека – це комплекс заходів, спрямованих на запобігання ураженню людини електричним струмом.

Дія електричного струму на організм може викликати небезпечні для здоров'я наслідки і навіть привести до смерті. Небезпека посилюється тим, що наявність електричної напруги не може бути безпечно виявлена за допомогою наших органів чуття. Ймовірність смертельного результату при ураженнях електричним струмом велика. Вагомий вплив робить зовнішнє середовище.

У металургійних цехах ймовірність ураження збільшується, оскільки, спостерігається середовище з підвищеною температурою, що веде до перегріву організму і зниження його опору. Пониження атмосферного тиску збільшує небезпеку дії електричного струму. При збільшенні вмісту вуглекислого газу в повітрі чутливість організму до дії струму збільшується.

Велика кількість повітря навколишнього середовища, а також навколишнє оточення можуть посилювати або послаблювати небезпеку ураження струмом. Так струмопровідний пил, що утворюється в цеху, руйнуючи діє на ізоляцію електроустановок, різко знижуючи її опір і створюючи загрозу переходу напруги на корпуси, станини, і тому не потрібні струмопровідні і металеві частки електроустаткування, до яких може торкатися людина.

Становий проліт відповідно до вимог ПУЕ БНіП 111-33-76 відноситься до зони класу В – 16 – це зони, розташовані в приміщеннях, в яких при нормальній експлуатації вибухонебезпечні суміші горючих газів або пари

ЛЗР (легкозаймисті речовини) з повітрям не утворюються, а можливі тільки в наслідок аварій або несправностей.

Небезпека ураження електричним струмом виникає при експлуатації несправних електроустановок, порушенні ізоляції на силових і контрольних кабелях, електродвигунах, командо-апаратах, кінцевих вимикачах.

Для захисту від небезпечного рівня напруги використовують такі захисні пристрої як: ізоляція і обгороджування струмоведучих частин, заземлення, занулення, блокування, запобіжники плавкі або дистанційні, магнітні пускачі. Принцип їх дії та призначення полягає в захисті від дотику до струмоведучих та металевих частин обладнання, від високих рівнів струму та управління двигунами на відстані. Встановлюються ці пристрої довкола струмоведучих частин, біля корпусів електродвигунів, на пультах управління, у електросхемах та лініях приводу.

Фактичне значення струму на ділянці $I = 5.9\text{A}$, напруга відповідно $U = 220, 380\text{В}$.

Вибір роду струму, величини напруги і струму електроприводів проводяться по основних техніко-економічних показниках.

При цьому враховуються будівельні витрати, первинна вартість устаткування, витрати на експлуатацію і ремонт, ступінь виконання необхідних умов пуску, гальмування реверсу, глибини і плавності регулювання швидкості обертання або інших параметрів надійності системи і простоти обслуговування, ККД, а також вимог пов'язаних з виконанням технологічного процесу.

Однією з основних причин ураження 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 під напругою.

При сполученні з металевими конструкціями, що опинилися під напругою, виникає небезпека ураження електричним струмом.

Нещасні випадки можливі також при дії електричного струму через дугу; безпосередньому зіткненні з відкритими струмопровідними частинами і приводами: випадковому, не викликаному виробничою необхідністю, або дії при помилковій подачі напруги під час ремонтів і оглядів; при дотику до металевих частин устаткування, що випадково опинилися під напругою; при тому, що стосується струмопровідних частин за допомогою предметів з низьким опором ізоляції; при зіткненні з будівельними деталями конструкцією, що випадково опинилися під напругою; при дії крокової напруги і ін.

Небезпеку електричних уражень створює різноманітне обладнання: електричний привід (включаючи пускорегулюючу апаратуру), електрообладнання підйимально-транспортних пристроїв, електрифікований внутрішньозаводський транспорт, зварювальні апарати, високочастотні і освітлювальні установки, переносний інструмент і так далі

Існують наступні заходи захисту від ураження електричним струмом:

- а) захист від дотику до струмоведучих частин;
- б) захист від дотику до обладнання, що випадково опинилося під напругою;
- в) захист від струмів надмірної сили (короткого замикання).

У першому випадку, найбільш поширеному, конструктивно простою і дуже ефективною мірою захисту є захисне заземлення. Захисні функції заземлюючого пристрою полягають в зниженні до безпечної величини напруги щодо землі на металевих частинах, що опинилися випадково під напругою, що дозволяє усунути небезпеку ураження людини, що доторкнулася до них.

Приєднання корпусів і інших конструктивних металевих частин електроустаткування до заземлюючого нульового дроту; називається

захисним зануленням. Мета захисного занулення – перетворити пробій на корпус в коротке замикання між фазним і нульовим дротами, викликати тим самим протікання більшого струму через захист і швидко відключити пошкоджене обладнання від мережі.

Пристрій, що автоматично відключає електроустановку за час не більш 0,2сек. при виникненні в ній струмів великої сили, у тому числі при появі напруги на корпусі і інших металевих частках, називається захисним відключенням.

При обслуговуванні електроустановок застосовують основні і додаткові захисні засоби. До основних відносяться захисні засоби, ізоляція яких надійно витримує робочу напругу установки і при користуванні якими допускається безпосередній дотик до струмоведучих частин, що перебувають під напругою. До додаткових відносяться засоби захисту, що підсилюють дію основних засобів і що забезпечують безпеку при напрузі дотику і кроковій напрузі. До засобів індивідуального захисту відносяться: ізолююча штанга, ізолюючі кліщі, діелектричні боти, діелектричні рукавички, ізолюючі підставки і ін. Для забезпечення безпечної, безаварійної і високопродуктивної роботи електроустановок необхідно поряд з досконалим їх оснащенням засобами захисту так організувати їх експлуатацію, щоб була виключена будь-яка можливість помилок з боку обслуговуючого персоналу.

Систематично повинні проводитися огляди електроустановок. В деяких випадках (у випадках необхідності) проводяться перемикання в електроустановках.

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

По технологічних вимогах і за умовами безпеки найоптимальнішою є чотиридротова мережа з глухозаземленою нейтраллю, оскільки вона дозволяє використовувати дві робочі напруги – лінійну і фазну. Від чотиридротової мережі 380В можна жити як силове навантаження – трифазну або

однофазну, включаючи її між фазними дротами на лінійну напругу 380В, струм і освітлювальну, включаючи її між фазним і нульовим дротами, тобто на фазну напругу 220 В.

4.5 Висновки до розділу 4

У розділі охорона праці розглянуто потенційно небезпечні та шкідливі фактори виробництва встановлено, що небезпечними і шкідливими виробничими факторами на стані є: рухомі і обертові частини машин і механізмів; підвищена запиленість повітря; небезпека електротравм; шум; вібрація. Робота в такому середовищі відповідає роботі в умовах III групи важкості (важкі фізичні роботи).

ВИСНОВКИ

В останні роки низьколеговані високоміцні сталі знаходять широке застосування в машинобудуванні і автомобілебудуванні. Область їх застосування обумовлена високими механічними властивостями (умовна межа текучості до 520 МПа), що дозволяє знижувати вагу металоконструкцій при збереженні їх міцності (економія металу в порівнянні з конструкціями з низьковуглецевих сталей становить 25 ... 30%). Кінцева геометрія (товщина, ширина, площинність) і якість поверхні смуг з низьколегованих сталей, необхідні для автомобілебудування, досягаються в результаті холодної прокатки. Продуктивність і стабільність процесу холодної деформації визначаються складом устаткування стану і механічними властивостями сталі. Зміцнення в результаті наклепу низьколегованих сталей в процесі холодної тонколистової прокатки може досягати 1000 МПа і більше. Закономірності та інтенсивність зміцнення цих сталей в процесі холодної деформації недостатньо вивчені і слабо висвітлені в науковій літературі. Тому при холодній прокатці низьколегованих сталей виникають аварійні ситуації, що призводять до простоїв, втрати продуктивності стану і зниження якості прокату. За результатами аналізу в першому розділі визначено, що основним фактором який впливає на процес зміцнення при холодній прокатці – це величина відносного обтиску, хімічний склад низьколегованих сталей та менш впливові фактори такі як швидкість деформації, дрібність деформації, та деформаційний розігрів. Було визначено що найбільш інтенсивне зміцнення сталі проходить при обтисненні до 30%, при подальшому обтисненню інтенсивність зміцнення знижується. Розглянуто існуючі моделі розрахунку напруження течії металу при холодній прокатці та визначено, опір деформації при холодній прокатці залежить від наявності в кристалічній структурі металу різних недоліків таких як дислокації, та їх щільність у кристалічній структурі також опір деформації при холодній прокатці

залежить від розміру зерна та дисперсності фаз в структурі металу. Всі ці фактори враховуються в моделях визначення межі текучості.

В другому розділі за результатом проведення теоретичних досліджень та аналізу існуючих моделей напруження текучості, а саме моделей Третьякова А.В., та Ніколаєва В.А., визначено фактори які найбільш активно впливають на показник напруження текучості при холодній прокатці, також в результаті розрахунку напруження текучості для трьох різних марок сталей при різних температурах та швидкостях деформації визначено, що для всіх низьколегованих сталей при однаковому режимі деформації показник напруження текучості зростає по різному. Наприклад при деформуванні сталі 12ГС температура більш активно впливає на зменшення напруження текучості ніж при прокатці 09Г2. Моделі напруження текучості Третьякова А.В. та Ніколаєва В.А. за результатом розрахунку дають різні показники напруження текучості при однакових режимах обтиску.

В третьому розділі за допомогою методу повного факторного експерименту та статистичних даних по дослідженню напруження текучості, які взято на ПАТ «Запоріжсталь», досліджено вплив на напруження текучості таких основних факторів: відносне обтиснення, температура, швидкість деформації. В результаті отримано оптимізовану модель напруження текучості для двох марок сталей: 09Г2, 12ГС. Ці моделі показали, що для цих двох низьколегованих марок сталей фактори по різному впливають на напруження текучості. Для сталі 09Г2 більш впливовішим фактором є швидкість деформації, тоді як для сталі 12ГС температура більше впливає на напруження текучості.

У розділі охорона праці розглянуто потенційно небезпечні та шкідливі фактори виробництва встановлено, що небезпечними і шкідливими виробничими факторами на стані є: рухомі і обертові частини машин і механізмів; підвищена запиленість повітря; небезпека електротравм; шум; вібрація. Робота в такому середовищі відповідає роботі в умовах III групи важкості (важкі фізичні роботи).

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Серода Б.П. Обробка металів тиском : навч. посіб. для студ. вищ. навч. закл. Запоріжжя : ЗДІА, 2005. 250 с.
2. Серода Б.П. Прокатне виробництво : навч. посіб. для студ. вищ. навч. закл. Запоріжжя: ЗДІА, 2008. 312 с.
3. Василёв Я.Д., Сафьян М.М. Производство полосовой и листовой стали : учебник для вузов. Киев : Вища школа, Главное издательство, 1976. 192 с.
4. Клименко В.М., Онищенко А.М., Минаев А.А. Горелик В.С. Технология прокатного производства : учебное пособие для вузов. Киев: Вища школа, Главное издательство, 1989. 311 с.
5. Сафьян М.М., Мазур В.Л., Сафьян А.М., Молчанов А.И. Технология процессов прокатки и волочения. Листопрокатное производство : учебник для вузов. Киев: Вища школа, Главное издательство, 1988. 351 с.
6. Жук А. Я., Малышев Г. П., Желябина Н. К., Клевцов О. М. Техническая диагностика. Контроль и прогнозирование : монография. Запорожье : ЗГИА, 2008. 224 с.
7. Копцев В.В., Борисова М.П., Казаков О.В., Горбулин В.Н. Двухпроводная горелка с центральным телом для газовых одностопных колпаковых печей. *Металлург*. 2006. №10. С. 76 - 77 с.
8. Василев Я. Д., Мінаєв О. А. Теорія поздовжньої прокатки : підручник. Донецьк : УНІТЕХ, 2009. 488 с.
9. Серода Б.П. Термічна обробка металів : навч. посіб. для студ. вищ. навч. закл. Запоріжжя : ЗДІА, 2003. 270 с.
10. Серода Б.П. Теорія будови рідкого, кристалічного та аморфного стану речовини : навч. посіб. для студ. вищ. навч. закл. Запоріжжя : ЗДІА, 2008. 238 с.

11. Серода Б.П. Металознавство і термічна обробка чорних і кольорових металів : навч. посіб. для студ. вищ. навч. закл. Запоріжжя : ЗДІА, 2008. 302 с.
12. Пшеницын А.В. Система управления печами отжига. *Металловедение и термическая обработка металлов*. 2006. №10. С. 38 - 42.
13. Несторенко А.М. Исследование структуры, текстуры и механических свойств листовых сталей после рекристаллизационного отжига. *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2000. №2. С. 50 - 53.
14. Глинер Р.Е. Сравнительная оценка свойств тонколистовых упрочняемых сталей. *Металловедение и термическая обработка металлов*. 2005. №7. С. 26 - 29.
15. Штехно О.Н., Яценко В.А., Фогель Б.М., Добровольский С.Э., Братусь С.А. Модернизация технологического оборудования термическом отделении ЦХП-1 комбината «Запорожсталь». *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2001. №4. С. 46 - 49.
16. Кузьминов И.И., Винокуров О.В., Сабельников Ю.А., Зубков С.В., Довженко А.В., Лужин Ю.А., Корнилин С.В. Снижение отсортировки жести по дефекту «рваная кромка» при колпаковом отжиге. *Металлург*. 2005. №8. С. 63-64.
17. Богущ М.В., Кузьминов И.И. Система управления процессом отжига в колпаковых печах на основе микроконтроллеров. *Металлург*. 2006. №3. С. 58-60.
18. Науменко В.Д., Мишин М.П., Паршиков С.Ф. Совершенствование режимов отжига ленты из углеродистых и легированных сталей. *Сталь*. 2002. №1. С. 68 - 70 с.
19. Іващенко О. В. Методичні вказівки до виконання організаційно-економічної частини дипломного проекту. Запоріжжя : Вид. ЗДІА, 2004. 31 с.
20. Бойчик И. М. Экономика предприятия : учебное издание. Киев : Атика. 2002. 480 с.

21. Покропивного С. Ф. Экономика предприятий : учебник. За об. ред. С.Ф. Покропивного. изд.2-е, переред. и доп. Киев : КНЕУ, 2001. 528 с.
22. Жидецкий В. Ц., Джигирей В. С., Мельников А. В. Основы охраны труда. учебник. изд. 2-е, дополненное. Львов : Афиша, 2000. 350 с.
23. Ткачук К. Н., Иванчук Д. Ф., Сабарно Р. В., Степанов А. Г. Справочник по охране труда на промышленном предприятии. Киев : Техника, 1991. 285 с.
24. Панасейко С. П. Гигиена труда и производственная санитария : учебное пособие для студентов ЗГИА. Запорожье : ЗГИА, 2003. 232 с.
25. Панасейко С. П. Методические указания для курсового и дипломного проектирования по дисциплине «Охрана труда» (раздел «Вентиляция и кондиционирование»). Запорожье : ЗГИА, 2002. 45 с.
26. Пеклов А. А., Степанова Т. А. Кондиционирование воздуха. Киев : Высшая шк., 1978. 328 с.
27. Рижков В. Г. Електробезпека. Методичні вказівки до дипломного та курсового проектування, контрольних робіт і практичних занять для студентів ЗДІА спеціальності „Металургія чорних металів” спеціалізації „Охорона праці та екологія металургійного виробництва” денної та заочної форм навчання / Укл.: В. Г. Рижков. Запоріжжя, 2004. 60 с.