

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**

**ФАКУЛЬТЕТ МЕТАЛУРГІЇ**

обробки металів тиском

(повна назва кафедри)

**Кваліфікаційна робота**

другий магістерський

(рівень вищої освіти)

на тему: «Розробка моделі зміцнення низьколегованих сталей при холодній прокатці»

Виконав: студент 2 курсу, групи МЕТ-18-3мд  
спеціальності 136 Металургія

(код і назва спеціальності)

освітньої програми обробка металів тиском

(код і назва освітньої програми)

спеціалізації \_\_\_\_\_

(код і назва спеціалізації)

А. А. Пенкін

(ініціали та прізвище)

Керівник доцент, к.т.н., Ю.О. Белоконь

(посада, вчене звання, науковий ступінь, підпис, ініціали та прізвище)

Рецензент доцент, к.т.н., В.М. Проценко

(посада, вчене звання, науковий ступінь, підпис, ініціали та прізвище)

Запоріжжя  
2020

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**  
**ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**

Факультет металургії  
Кафедра обробки металів тиском  
Рівень вищої освіти другий магістерський  
Спеціальність 136 Металургія  
(код та назва)  
Освітня програма Обробка металів тиском  
(код та назва)  
Спеціалізація \_\_\_\_\_  
(код та назва)

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

Завідувач кафедри ОМТ  
« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2019 року

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

Пенкіну Артуру Андрійовичу  
(ПРИЗВИЩЕ, ІМ'Я, ПО БАТЬКОВІ)

1 Тема роботи (проекту): «Розробка моделі зміцнення низьколегованих сталей при холодній прокатці»

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

затверджені наказом ЗНУ від «10» вересня 2019 року № 1540-с

2 Строк подання студентом роботи до 27 грудня 2019 року

3 Вихідні дані до роботи: 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) Вступ; 1. Сучасний стан досліджень та проблем прогнозування напруження текучості металу при холодній прокатці; 2. Теоретичні дослідження з визначення напруження текучості металу при холодній прокатці; 3. Експериментальна частина; 4. Охорона праці та техногенна безпека; Загальні висновки; Список використаної літератури; Додатки

5 Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень) Презентація до 15 слайдів (обов'язкові слайди з метою та задачами дослідження, методикою дослідження, результатами дослідження, охорони праці та висновки

## 6 Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
1	Белоконь Ю.О., доцент		
2	Белоконь Ю.О., доцент		
3	Белоконь Ю.О., доцент		
4	Белоконь Ю.О., доцент		

7 Дата видачі завдання \_\_\_\_\_

## КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Сучасний стан досліджень та проблем прогнозування напруження текучості металу при холодній прокатці		
2	Теоретичні дослідження з визначення напруження текучості металу при холодній прокатці		
3	Експериментальна частина		
4	Охорона праці та техногенна безпека		
5	Вступ, Загальні висновки, Реферат,		
6	Оформлення пояснювальної записки роботи		
7	Підготовки графічного матеріалу		

Студент \_\_\_\_\_ А. А. Пенкін  
(підпис) (ініціали та прізвище)

Керівник роботи \_\_\_\_\_ Ю. О. Белоконь  
(підпис) (ініціали та прізвище)

## Нормоконтроль пройдено

Нормоконтролер \_\_\_\_\_ О. В. Явтушенко  
(підпис) (ініціали та прізвище)

## РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до випускної кваліфікаційної роботи: 136 с., 33 рисунків, 12 таблиць, 1 додаток, 30 використаних джерел.

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

Об'єкт роботи – напруження текучості низьколегованих сталей.

Предмет дослідження – процеси зміцнення низьколегованих сталей при холодній деформації

Метод дослідження – теоретичний, аналітичний розрахунок, експериментальний.

Проведені теоретичні та експериментальні дослідження та побудована модель зміцнення для низьколегованої марки сталі, висвітлюють той факт, що тема зростання напруження текучості та фактори які впливають на його зростання при холодній прокатці вивчені та висвітлені в науковій літературі не до кінця і не дають змогу точно визначати напруження текучості при холодній прокатці, вивчення та розробка моделей зміцнення низьколегованих сталей дають змогу прогнозувати напруження текучості та оптимізувати режими деформації.

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

## **ABSTRACT**

Explanatory note to the final qualification work: 135 p., 33 figures, 12 tables, 1 appendix, 30 sources used.

The purpose of the work is to develop a model for strengthening low-alloy steels during cold rolling.

The object of development is the yield strength of low alloy steels.

Subject of research - processes strengthening of low-alloy steels at cold deformation

The research method is – theoretical, analytical calculation, experimental.

Conducted theoretical and experimental studies and built a model of strengthening for low-alloy steel grade, highlight the fact that the theme of increasing the yield stress and the factors that influence its growth during cold rolling have not been fully studied and covered in the scientific literature and do not accurately determine the yield during cold rolling, the study and development of models for the strengthening of low-alloy steels make it possible to predict the yield stress and to optimize the deformation modes.

**COLD ROLLING, LIQUID TENSION, DEFORMATION MODE, LOW-ALLOY STEEL, CLAIM, STRENGTH, ENERGY POWER PARAMETERS, MECHANISM RESISTANCE, DEFORMATION SYSTEM**

# ЗМІСТ

<b>ВСТУП</b> .....	8
<b>1. СУЧАСНИЙ СТАН ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ПРОБЛЕМ ПРОГНОЗУВАННЯ НАПРУЖЕННЯ ТЕКУЧОСТІ МЕТАЛУ ПРИ ХОЛОДНІЙ ПРОКАТЦІ</b> .....	12
1.1. Характеристика процесу зміцнення низьколегованих сталей .....	12
1.2. Моделі розрахунку межі текучості металу при холодній деформації.....	19
1.3. Особливості формування напруження течії в низьколегованих сталях .....	25
1.4. Вибір об'єкту дослідження.....	30
1.5. Висновок до розділу 1 .....	37
<b>2. ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ З ВИЗНАЧЕННЯ НАПРУЖЕННЯ ТЕКУЧОСТІ МЕТАЛУ ПРИ ХОЛОДНІЙ ПРОКАТЦІ</b> .....	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
<b>3. ЕКСПЕРЕМЕНТАЛЬНА ЧАСТИНА</b> .....	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

<b>4. ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ТЕХНОГЕНА БЕЗПЕКА</b> .....	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
<b>ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ</b> .....	126
<b>СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ</b> .....	129
<b>ДОДАТОК А. ПУБЛІКАЦІЇ ЗА ТЕМОЮ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ</b> .....	132

## ВСТУП

**Актуальність теми.** 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.

Таким чином, **метою випускної кваліфікаційної роботи** є розробка моделі зміцнення низьколегованих сталей при холодній прокатці.

У відповідності до поставленої мети, дослідження було спрямовано на вирішення наступних **завдань**:

- провести аналіз сучасного стану досліджень та проблем прогнозування напруження текучості металу при холодній прокатці;
- провести теоретичні дослідження та розглянути існуючі моделі по визначенню напруження текучості;
- розглянути експериментальні методи визначення напруження текучості;
- провести експеримент з визначення напруження текучості та побудуванням кривої деформації металевого зразка;
- провести оптимізацію моделі напруження текучості за допомогою методу повного факторного експерименту.

**Об'єкт дослідження** – напруження текучості низьколегованих сталей .

**Предмет дослідження** – процеси зміцнення низьколегованих сталей при холодній деформації.

**Методи дослідження** – теоретичний метод, аналітичний розрахунок за моделлю А. П. Третякова та моделлю О.В. Ніколаєва, експериментальний метод випробування зразка на розрив, статистичний метод повного факторного експерименту.

**Наукова новизна одержаних результатів:**

- 1) Встановлено, що для кожної низьколегованої марки сталі зростання напруження текучості при холодній прокатці носить різний характер, основним фактором який впливає на напруження текучості є відносний обтиск при холодній прокатці, швидкість деформації та температура для кожної низьколегованої марки сталі грають різну роль в формуванні напруження текучості, для одної марки сталі більш впливовим фактором є швидкість для іншої температура деформації;
- 2) за допомогою методу повного факторного аналізу та статистичних даних напруження текучості, отримано моделі зміцнення низьколегованих сталей 09Г2, 12ГС.

**Практичне значення одержаних результатів.** У результаті проведеної роботи розроблена регресійна модель зміцнення низьколегованих сталей 09Г2, 12ГС, при холодній деформації. Регресійні моделі враховують такі фактори як, відносне обтиснення, температура деформації та швидкість деформації. Ці моделі можуть бути використані при розробці та розрахунку режиму деформації для прокатки цих марок сталей на ПАТ «Запоріжсталь»

**Особистий внесок автора.** Магістрант особисто планував та виконував наукові дослідження в рамках зазначеної теми: самостійно й у повному обсязі зібрано і оброблено первинний матеріал; проведено аналіз моделей напруження текучості при холодній прокатці; проаналізовано фактори, які впливають на напруження текучості; провів комп'ютерне моделювання та обробку отриманих даних; здійснив теоретичне узагальнення результатів дослідження, підготовку матеріалів досліджень до публікації, сформулював основні наукові положення й висновки роботи.

**Відомості про апробацію результатів роботи.** Основні положення магістерської роботи представлені та обговорені на XII науково-практичній конференції студентів, аспірантів і молодих вчених ЗНУ «Молода наука 2019» (м. Запоріжжя, 15-17.04.2019 р.).

**Відомості про публікації здобувача.** За матеріалами магістерської роботи опубліковано 1 наукову працю, з них 1 тези доповіді у матеріалах наукових конференцій:

*Пенкін, А.А.* Дослідження процесів зміцнення низьколегованих сталей при холодній прокатці штаб/ А.А.Пенкін, Ю.О. Белоконь // Молода наука - 2019. Запоріжжя: ЗДІА, 2019. – С. 102. (Додаток А).

**Структура та обсяг магістерської роботи.**

Кваліфікаційна робота включає 136 с., 33 рисунків, 12 таблиць, 1 додаток, 30 використаних джерел.

# 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.

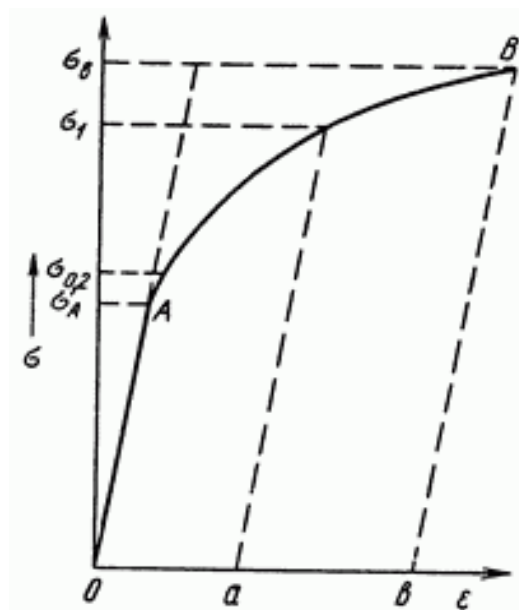


Рисунок 1.1 – Діаграма зміни деформації в залежності від напруги.

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  $\sigma_1$ , 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  $\sigma_1$ ; 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  $\sigma_B$ , умовне напруження течії  $\sigma_{0,2}$ , і твердість НВ, а відносне подовження  $\delta$ , і відносне звуження  $\psi$  зменшуються. Аналіз даних цих характеристик показує, що найбільш інтенсивне зміна їх відбувається в інтервалі обтисень 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.

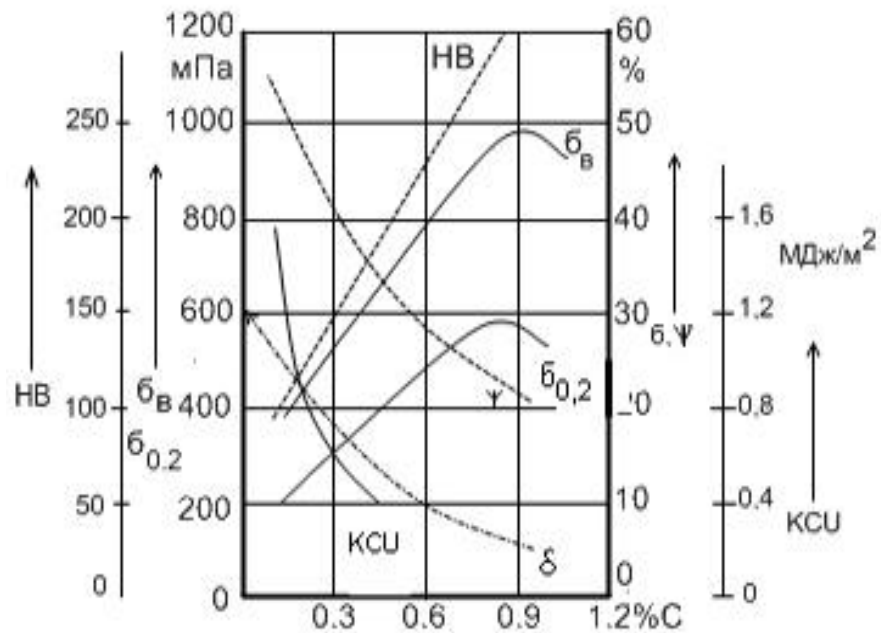


Рисунок 1.2 – Діаграма зміни властивостей сталі в залежності від вмісту вуглецю

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.

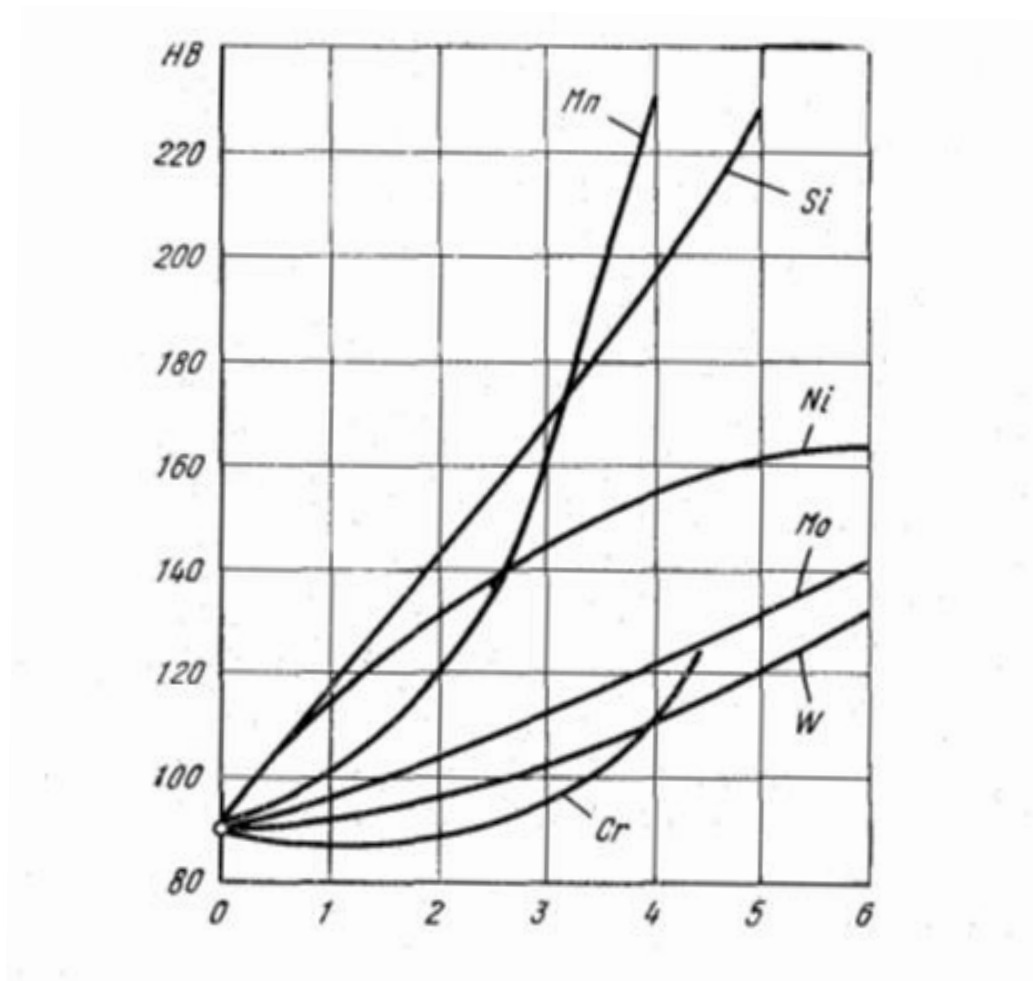


Рисунок 1.3 – Діаграма зміни твердості в залежності від вмісту легуючих елементів

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.

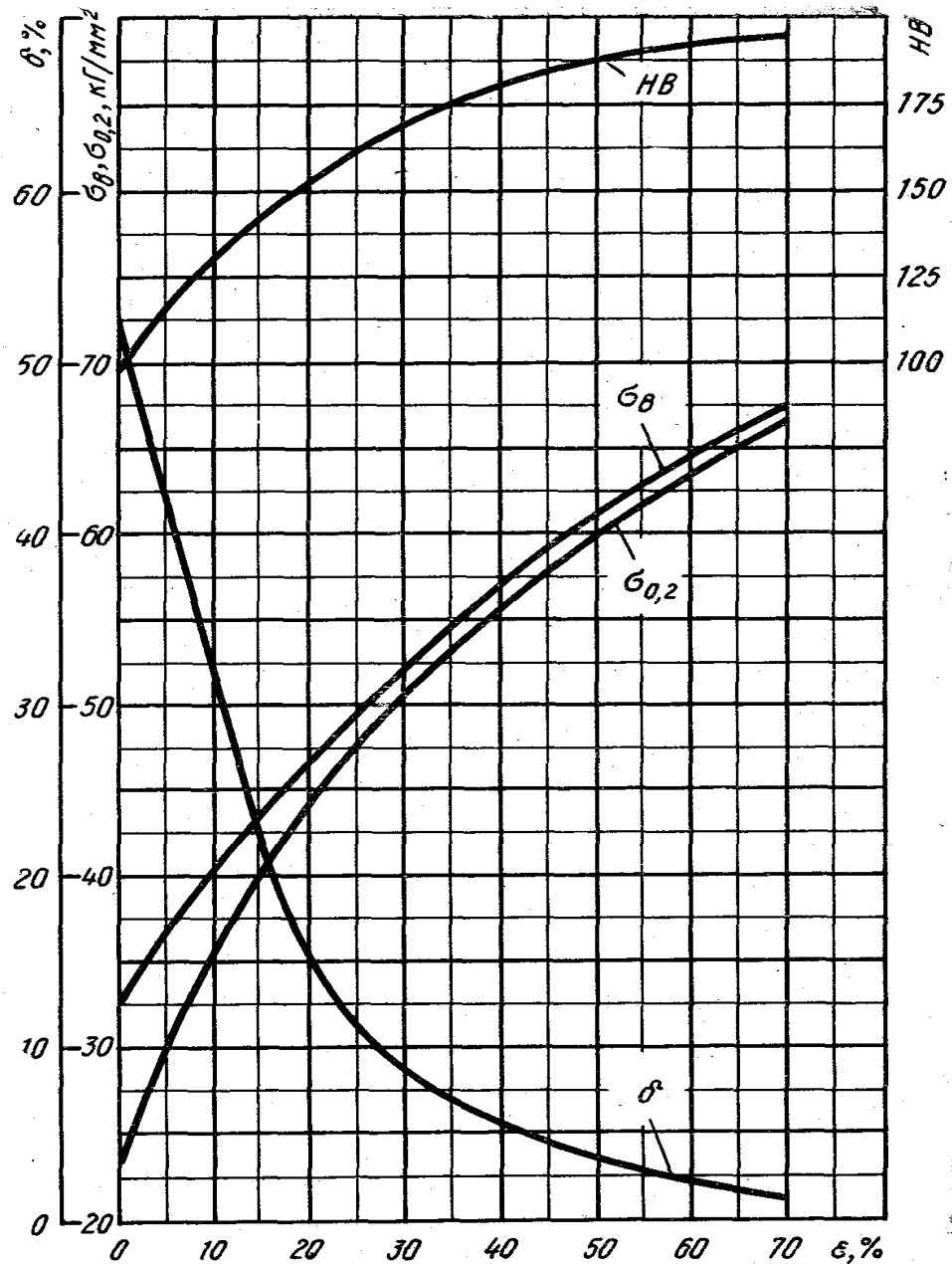


Рисунок 1.4 – Діаграма зміни механічних властивостей сталі 08КП.

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.



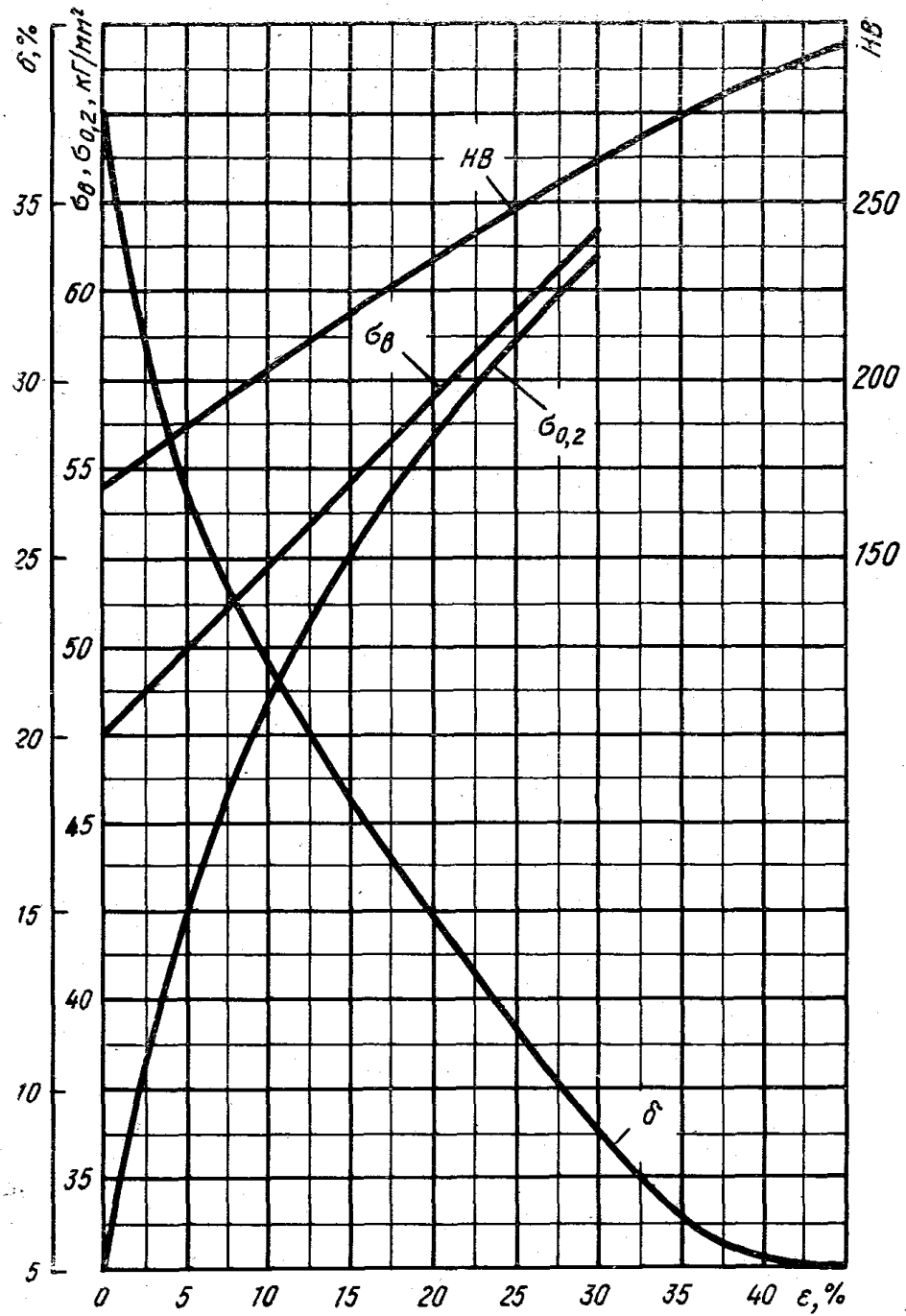


Рисунок 1.5 – Діаграма зміни механічних властивостей сталі 09Г2.

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.

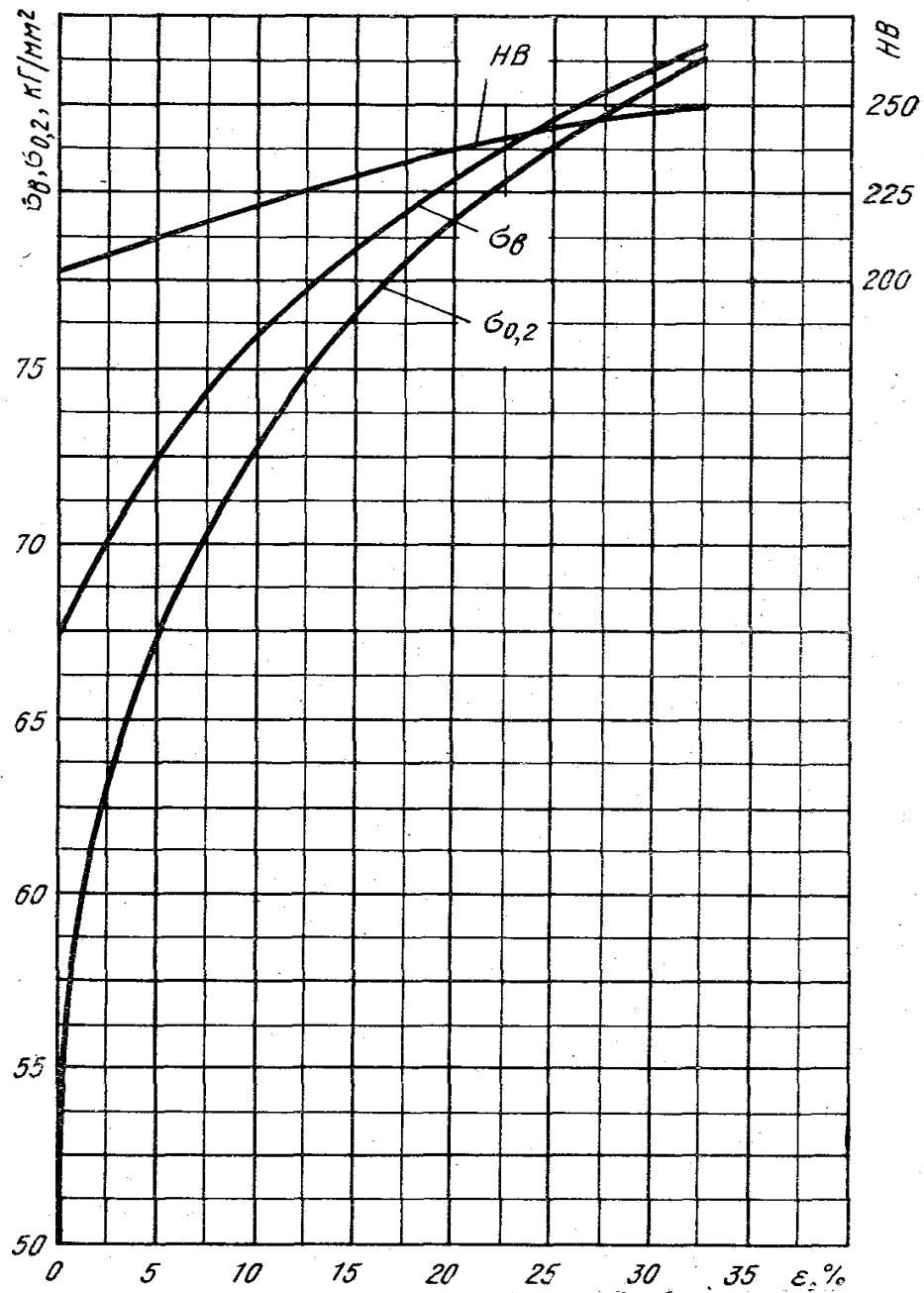


Рисунок 1.6 – Діаграма зміни механічних властивостей сталі 12ГС.

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.

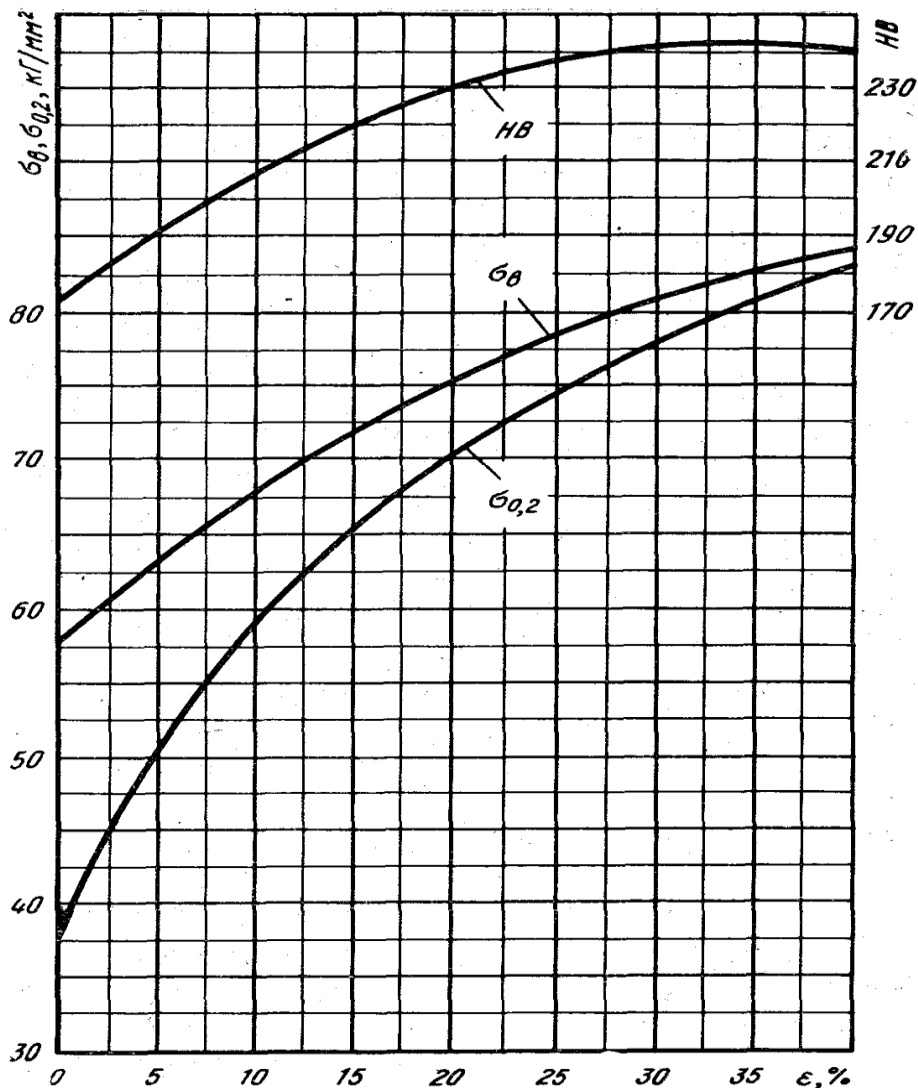


Рисунок 1.7 – Діаграма зміни механічних властивостей сталі 25ХГСА

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

## 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.

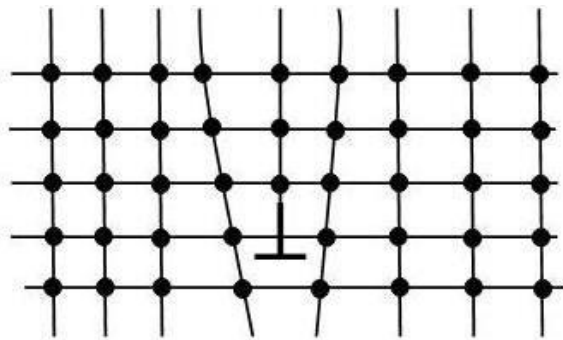


Рисунок 1.8 – Загальний вигляд дислокації в кристалічній решітці.

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,  $\rho$  - щільність дислокацій.

Характер впливу щільності дислокацій  $\rho$  на міцність металу можна оцінити за формулою Келлі - Наттінга:

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

де  $\sigma_T$  - межа текучості сплаву;  $\sigma_0$  - межа текучості відпаленого металу;  $\alpha$  – коефіцієнт який залежить від виду дислокацій,  $b$  - вектор Брюгерсса,  $G$  - модуль зсуву,  $\rho$  - 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 раслаивающихся 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  $\sigma_T$  - відображено у формулі Холла – Петча яку взято з роботи [5].

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

де  $\sigma_m$ - міцність монокристала,  $k_y$  - 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  $\varepsilon_\Sigma$  при холодній

прокатці на напруження текучості, та розроблена модель, яку взято з роботи [2], побудовані залежності.

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

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

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

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

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

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

Коефіцієнт зміцнення  $k_{\varepsilon}$  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  $k_{\varepsilon}$  завжди більший одиниці ( при  $\varepsilon_{\Sigma} = 1$   $k_{\varepsilon} = 1$  )

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

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

Марка сталі(сплавів)	Значення параметрів			
	$\sigma_{ТВИХ}$ , Н/мм <sup>2</sup>	$m$ , Н/мм <sup>2</sup>	$m_1$	$k$

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

11X11H2B2MФ	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
10X14Г14H4T	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:



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

Де  $t_{\text{CT}}, t, t_{\text{ПЛ}}$  – відповідно температура статичних випробувань зразків на розтягування ( $t_{\text{CT}} = 20^\circ\text{C}$ ), 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:

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

де

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

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

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

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

### **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.

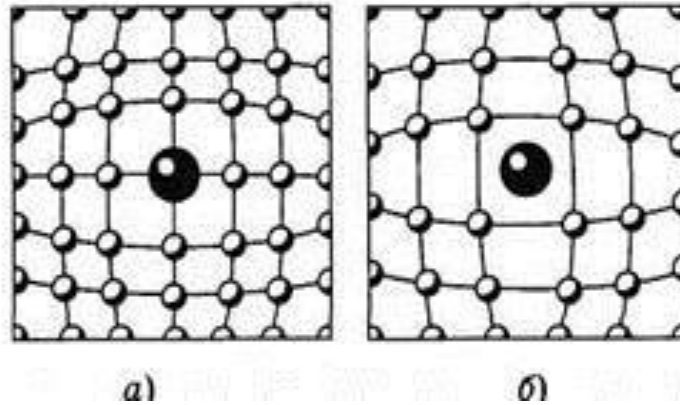


Рисунок 1.9 – а) Заміщення атома заліза атомом легуючого елемента;  
б) впровадження легуючого елемента в кристалічну решітку заліза.

Легуванням (тобто впровадження в решітку чужорідних атомів), створюються всякого роду недосконалість 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.

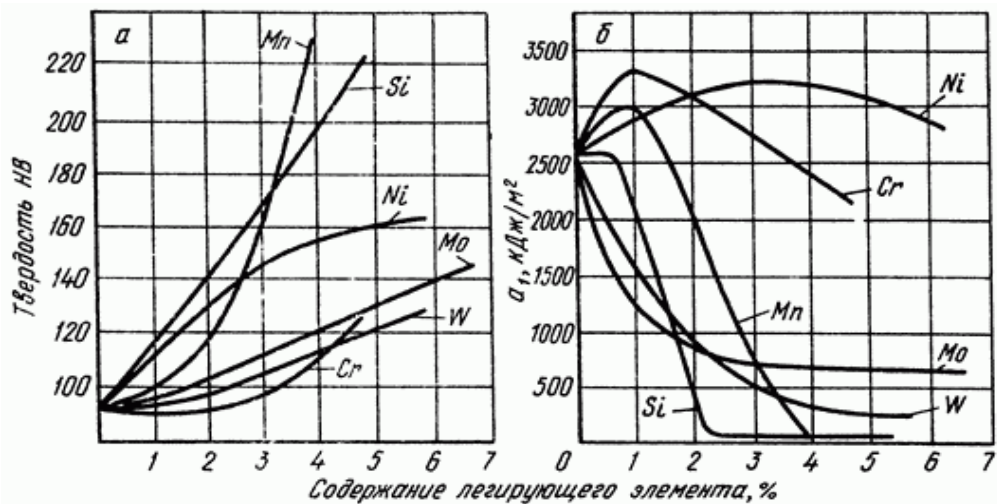


Рисунок 1.10 – Зміни твердості і ударної в'язкості заліза в залежності від вмісту легуючого елемента.

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 карбідоутворювачі. 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  $\alpha$  - залізі, в основному пов'язана з блокуванням дислокацій атмосферами з атомів впровадження.

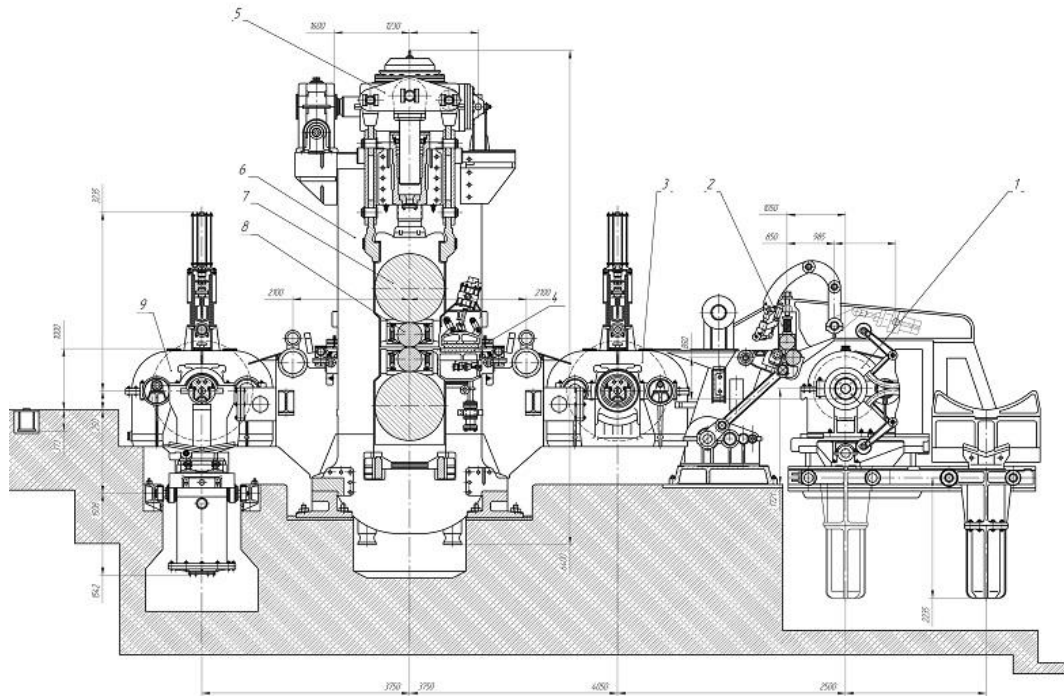
Утворення твердого розчину можливо за принципом заміщення і впровадження. Залежно від виду твердого розчину величина зміцнення буде різною так як ступінь спотворення кристалічної решітки різна. Тверді розчини впровадження утворюють елементи з малим атомним радіусом (зазвичай такими елементами є неметали). 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 шпindelний 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 на	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 35-50<sup>0</sup>С. Емульсія подається зі сторони входу смуги в валки.

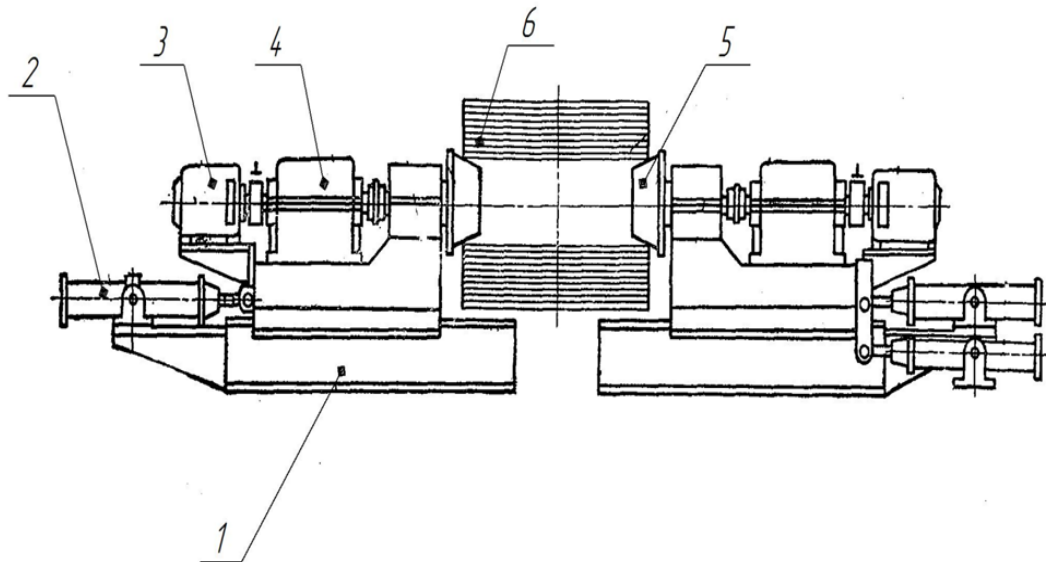
Підвідний роликовий похилий конвеєр призначений для прийому, накопичення і транспортування рулонів к поворотному пристрою.

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

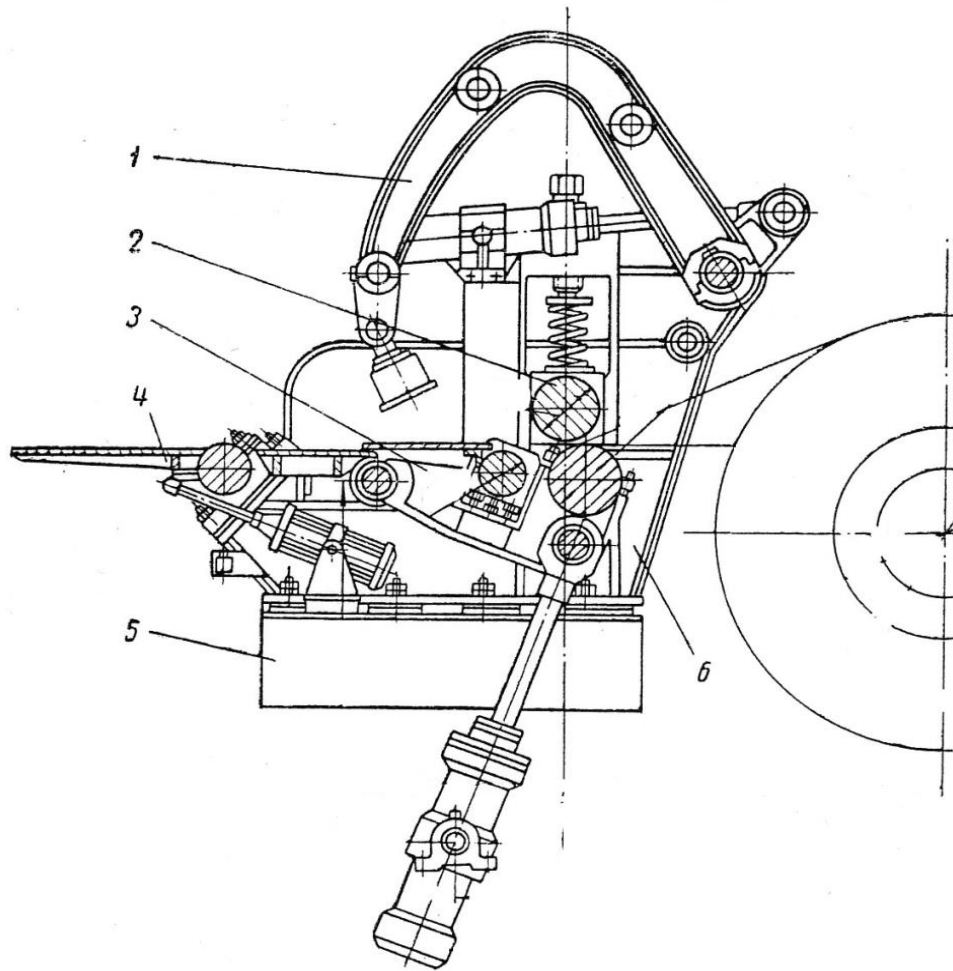
Розмотувач призначений для розмотування смуги та правильної установки рулону що до поздовжньої осі стану, повороту рулону в положення, що забезпечує можливість захоплення зовнішнього кінця смуги відгибачем, відгинання кінця смуги і завдання його в прес-проводку.

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, притискного ролика, відкидної проводки із пневмоциліндром, фундаментної плити і двох стійок.

Максимальний кут повороту відгибача, град 90

Робоча швидкість відгибача, м / с 0,25

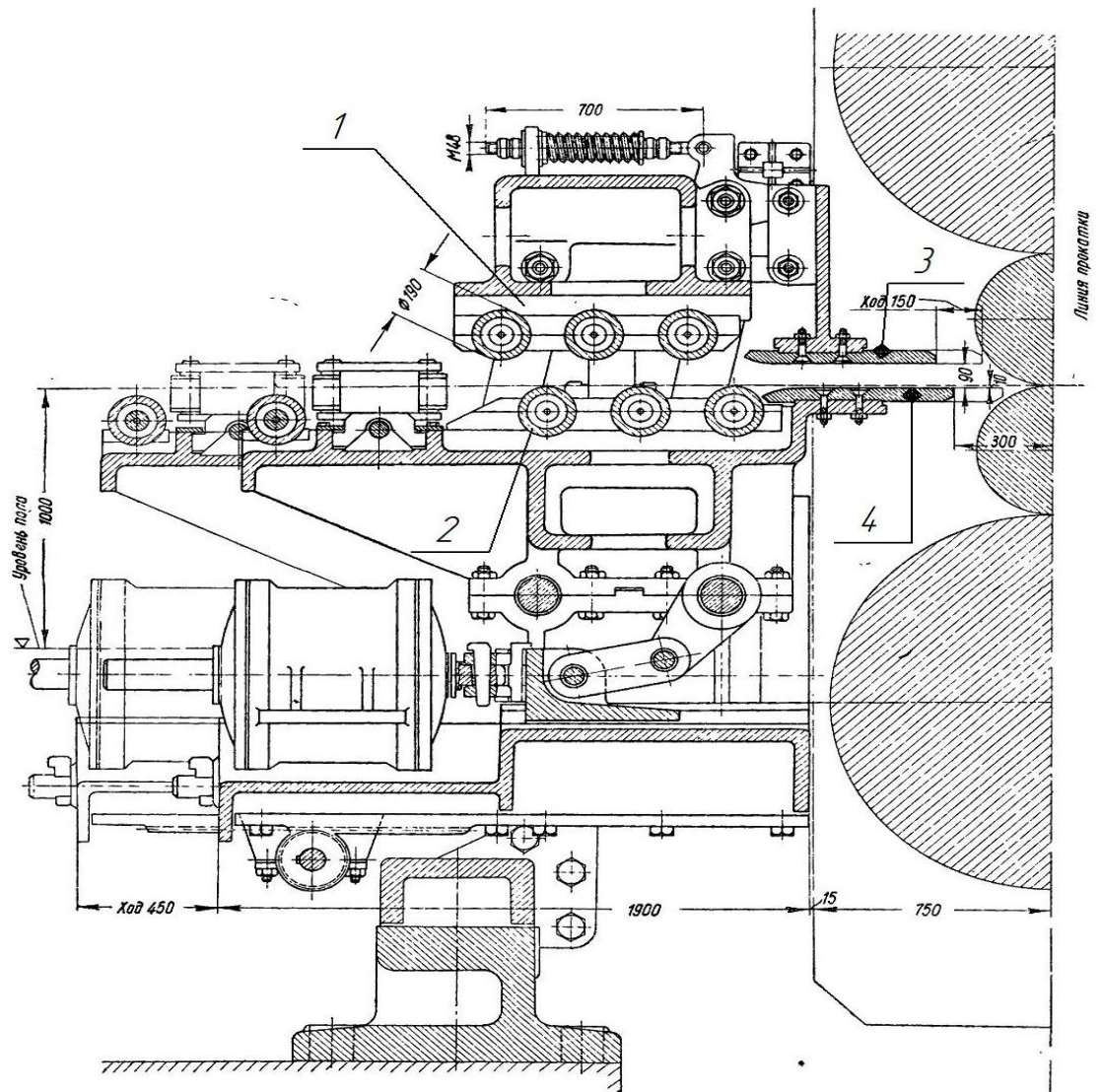
Швидкість задання смуги в валки стана м/сек. 0,5



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.

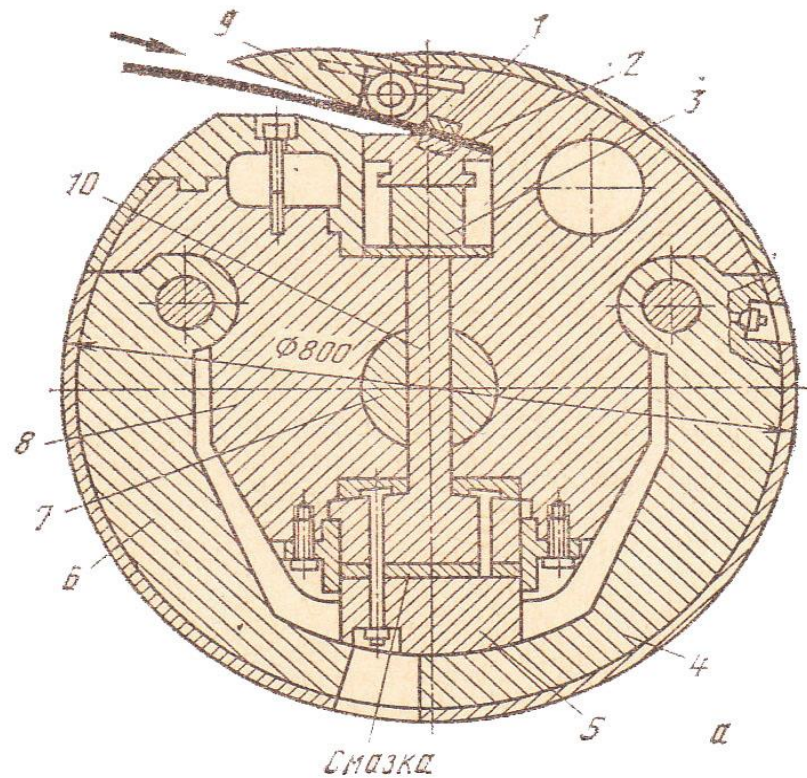


1- роликовий стіл; 2 – холості ролики; 3,4 – направляючі проводки;

Рисунок 1.14 – Роликова прес – проводка

Змотувачі 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 барабану змотувача за станом. Знімач рулонів складається з візка з підйомним столом, напрямних балок, горизонтального гідравлічного гідроциліндра для пересування візка уздовж осі барабану моталки і рухомого настилу.

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

## 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

$$\begin{aligned} h_1 &= h_0 \times \eta_1 = 3 \times 0,73 = 2,19 \text{ мм}; \\ h_2 &= h_1 \times \eta_2 = 2,19 \times 0,822 = 1,8 \text{ мм}; \\ h_3 &= h_2 \times \eta_3 = 1,8 \times 0,890 = 1,6 \text{ мм}; \\ h_4 &= h_3 \times \eta_4 = 1,6 \times 0,875 = 1,4 \text{ мм}; \end{aligned} \quad (2.4)$$

Визначаємо величину абсолютного обтиску по проходах

$$\begin{aligned} \Delta h_1 &= h_0 - h_1 = 3 - 2,19 = 0,81 \text{ мм}; \\ \Delta h_2 &= h_1 - h_2 = 2,19 - 1,8 = 0,39 \text{ мм}; \\ \Delta h_3 &= h_2 - h_3 = 1,8 - 1,6 = 0,20 \text{ мм}; \\ \Delta h_4 &= h_3 - h_4 = 1,6 - 1,4 = 0,20 \text{ мм}; \end{aligned} \quad (2.5)$$



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

$$h_{\text{ср1}} = \frac{h_0 + h_1}{2} = \frac{3 + 2,19}{2} = 2,595 \text{ мм}; \quad (2.12)$$

$$h_{\text{ср2}} = \frac{h_1 + h_2}{2} = \frac{2,19 + 1,8}{2} = 1,995 \text{ мм};$$

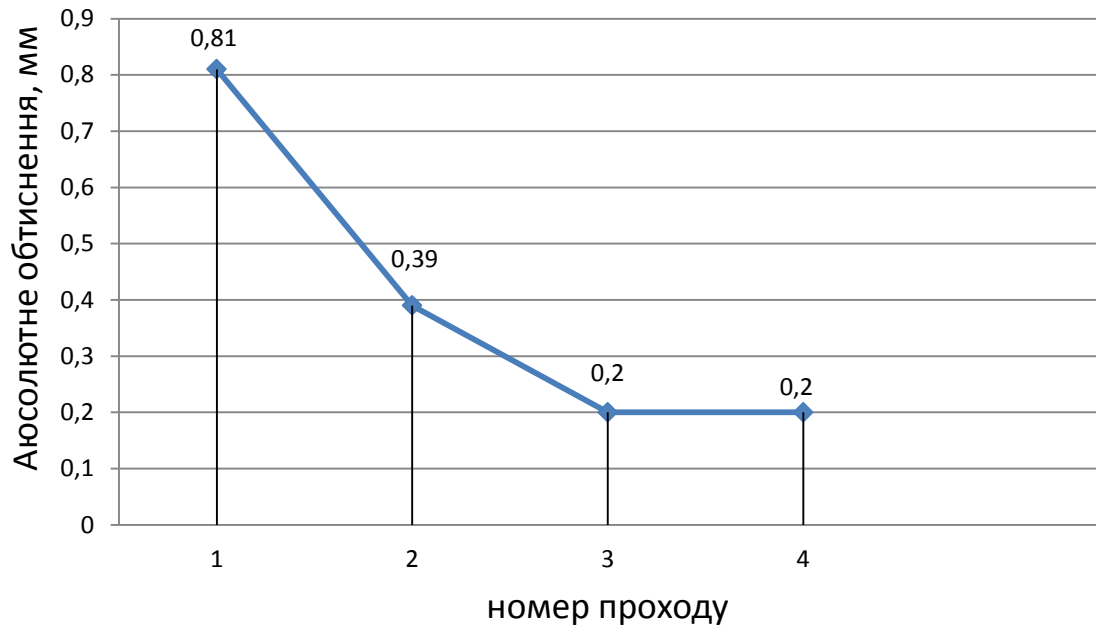
$$h_{\text{ср3}} = \frac{h_2 + h_3}{2} = \frac{1,8 + 1,6}{2} = 1,7 \text{ мм};$$

$$h_{\text{ср4}} = \frac{h_3 + h_4}{2} = \frac{1,6 + 1,4}{2} = 1,5 \text{ мм}.$$

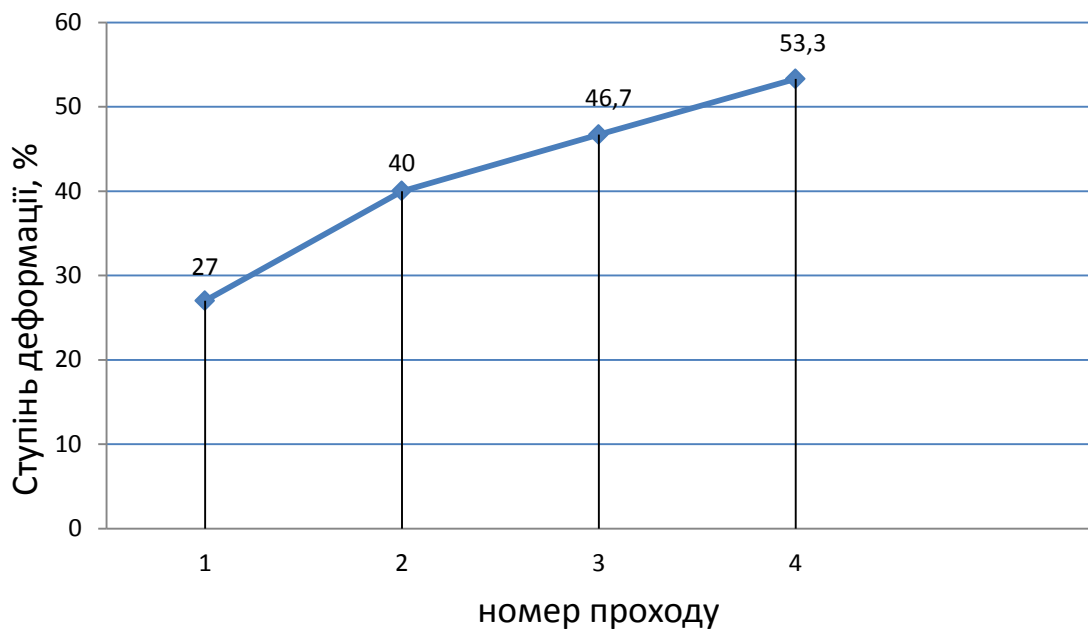
Результат розрахунку режиму деформації заносимо до таблиці 2.1

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

№ прох.	$h_0$ , мм	$h_k$ , мм	$\Delta h$ , мм	$\varepsilon$ , %	$\varepsilon_{\Sigma}$ , %	$\alpha$ , °	$F$ , мм <sup>2</sup>	$\mu$	$v$ , 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  $x$

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

$$x_2 = 0,242 ;$$

$$x_3 = 0,21 ;$$

$$x_4 = 0,243 .$$

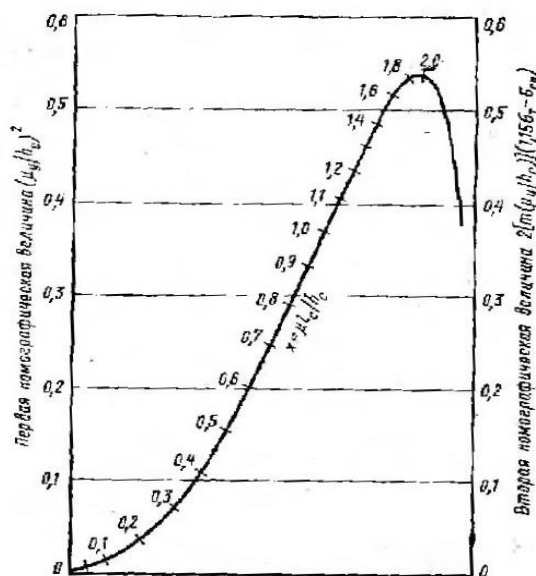


Рисунок 2.1 – Номограма М. Стоуна



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,  $\Delta t_1$  – 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,  $\text{c}^{-1}$ .

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

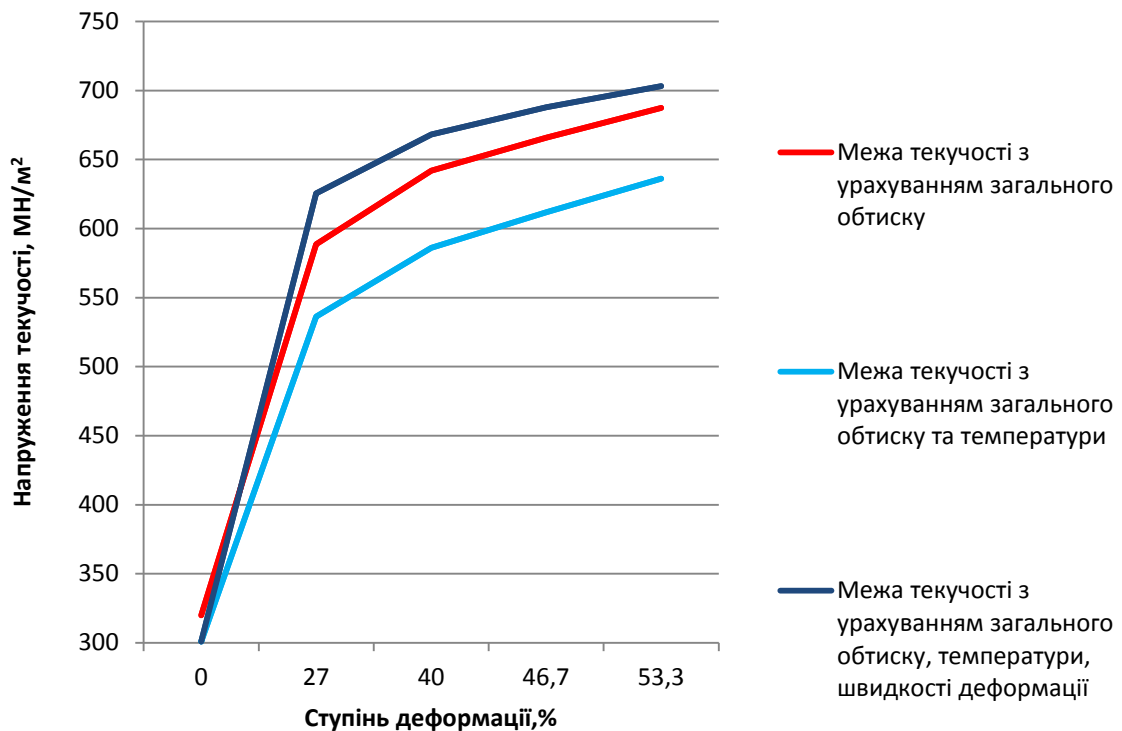


$$\sigma_{T1k_{\varepsilon}k_t} = \sigma_{T0}k_{\varepsilon}k_tk_u = 320 \times 1,84 \times 0,911 \times 1,16 = 625,43 \text{ МН/М}^2; \quad (2.49)$$

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

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

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



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

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

$$k_4 = \frac{\sigma_{\tau_3} + \sigma_{\tau_4}}{2} = \frac{869,46 + 886,44}{2} = 878 \text{ МН/М}^2;$$

Визначаємо коефіцієнт, який враховує натяг смуги

$n_b$  – коефіцієнт який враховує вплив ширини смуги;

Приймаємо

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

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

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

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

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

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

Визначаємо середній контактний тиск

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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,  $\text{c}^{-1}$ .



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

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

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

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

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

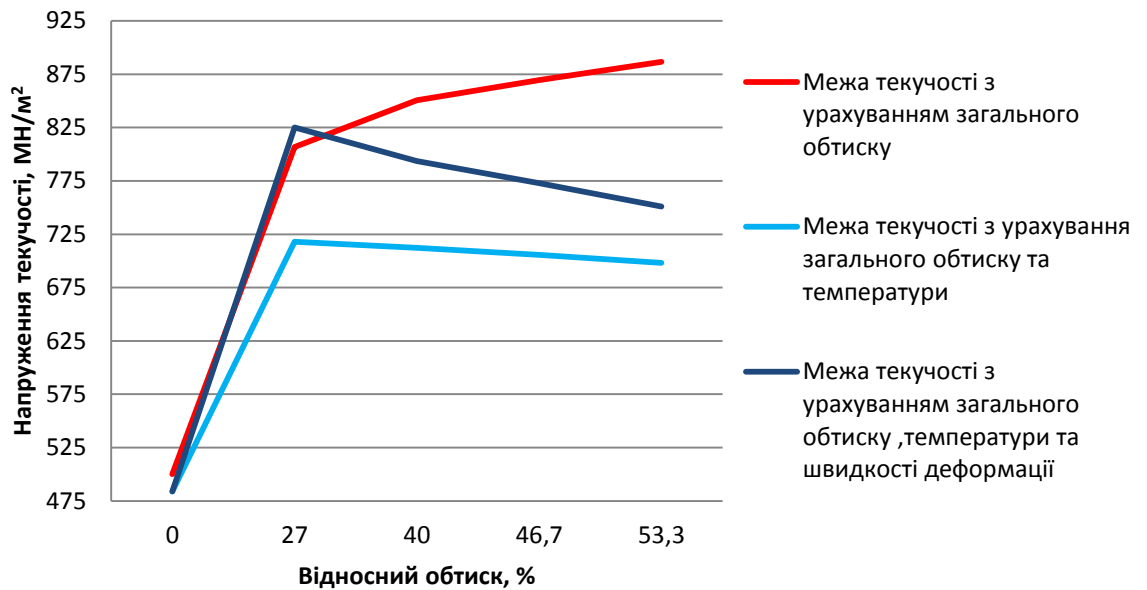
Визначаємо напруження текучості в осередку деформації у кожному проході з урахуванням ступеня деформації, температури та швидкості деформації

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

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

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

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



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 сплющення 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

$$\sigma_{Тк_{\varepsilon}k_t k_u} = \sigma_{Т0} k_{\varepsilon} k_t k_u.$$

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

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

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

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

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



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

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

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,  $\text{c}^{-1}$ .

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

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

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

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

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

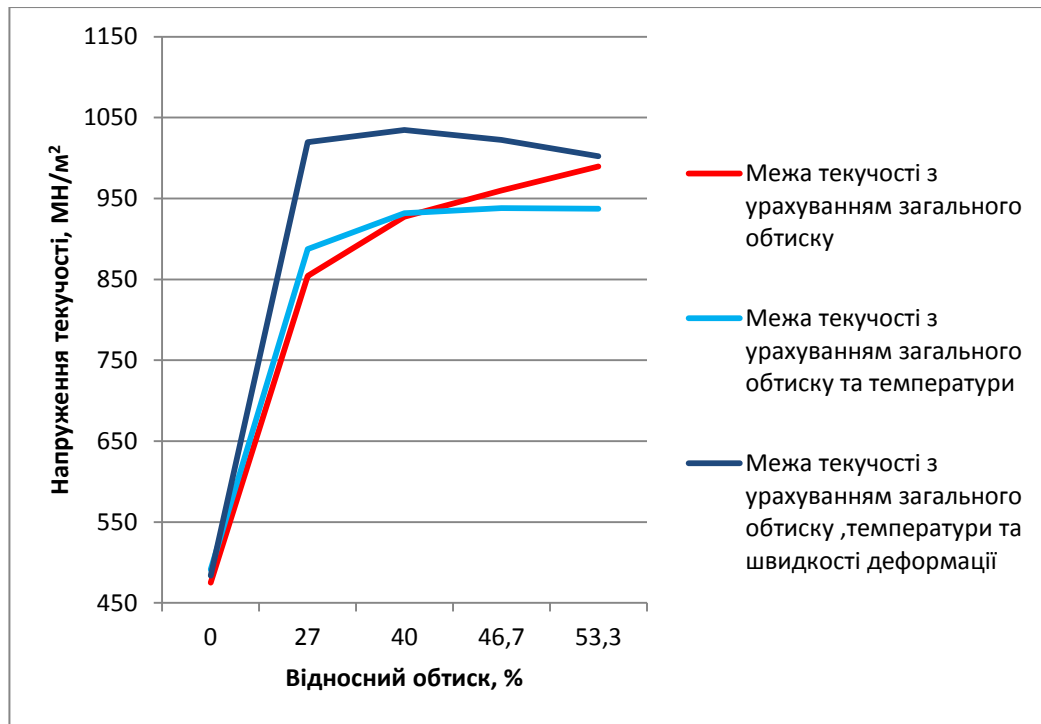
Визначаємо межу текучості в осередку деформації у кожному проході з урахуванням ступеня деформації, температури та швидкості деформації

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

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

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

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



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 ;  $k_\varepsilon$  – 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  $k_\varepsilon$ , 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:

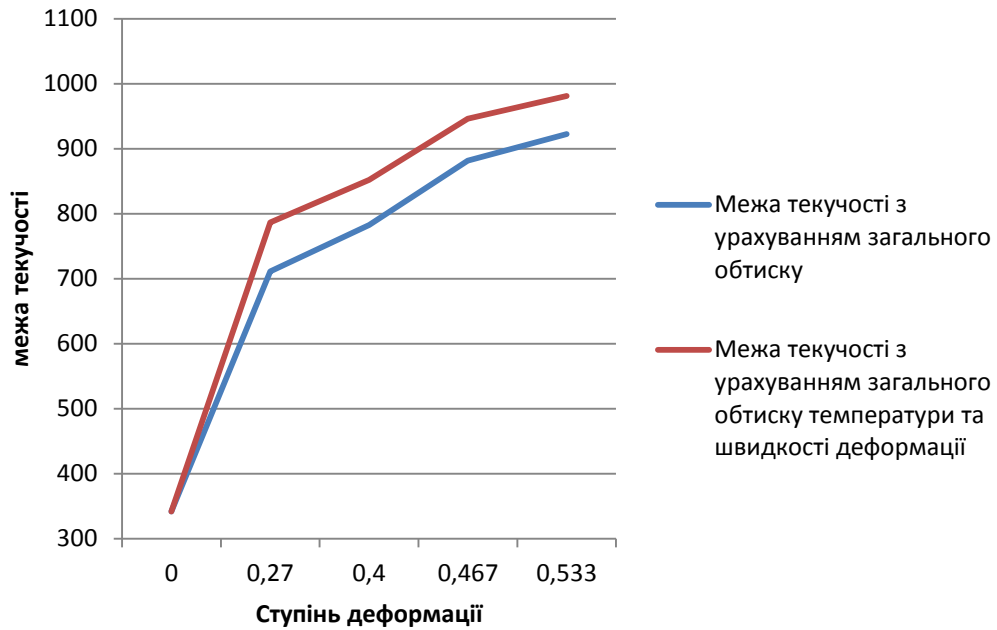
$$\begin{aligned} \sigma_{T1} &= n_{u1} \times n_{t1} \times \sigma_{T0} + \Delta\sigma_T \times k_{\varepsilon 1} \\ &= 1,254 \times 0,973 \times 342,263 + 440,334 \times 0,838 \\ &= 786,4 \text{ МН/М}^2; \end{aligned} \quad (2.101)$$

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

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

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





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

$$\begin{aligned}
 C_e &= C + \frac{Mn}{6} + \frac{Si}{24} + \frac{Ni}{40} + \frac{Cr}{5} + \frac{Mo}{4} + \frac{V}{14} + \frac{W}{4} \\
 &= 0,15 + \frac{1,2}{6} + \frac{0,8}{24} + \frac{0,3}{40} + \frac{0,3}{5} + \frac{0,12}{14} = 0,4594. \quad (2.103)
 \end{aligned}$$

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  $k_\varepsilon$ , 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

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

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

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

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

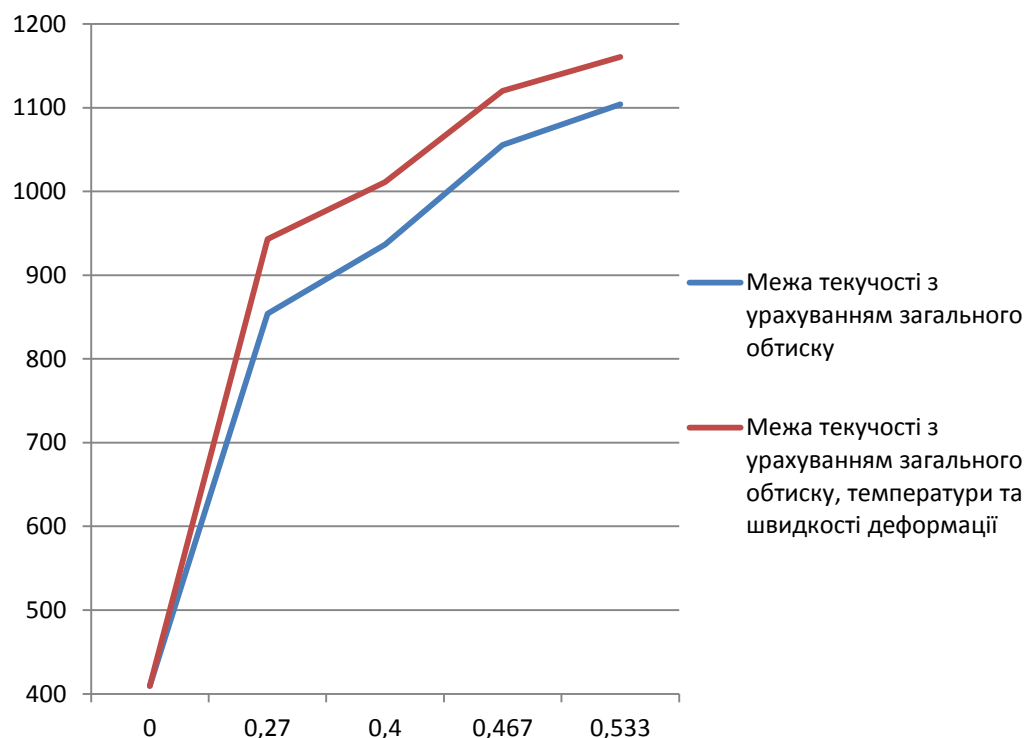
Межа текучості з урахуванням коефіцієнтів складає

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

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

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

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



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)  $\sigma_T$  – 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,  $\text{мм}^2$ .

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  $\sigma_B$  – 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  $\delta$  при  $\delta$  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 тензometrів 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)  $\sigma_{\text{T}}$ ,  $\sigma_{\text{ТВ}}$  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  $P_{\text{T}}$  може бути визначена по явно вираженій зупинці стрілки силовимірювального пристрою випробувальної машини, обумовленої деформацією зразка без помітного збільшення навантаження.

в) при визначенні  $\sigma_{\text{T}}$ ,  $\sigma_{\text{ТВ}}$ ,  $\sigma_{\text{ТН}}$ , 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 / мм<sup>2</sup> ·с.

2.Проведення випробування і підрахунок результатів.

Напруження течії (умовна)  $\sigma_{0,2}$  и  $\sigma_T$  (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  $OE$  відкладають по осі абсцис вправо від точки  $O$  (рис. 3.1).

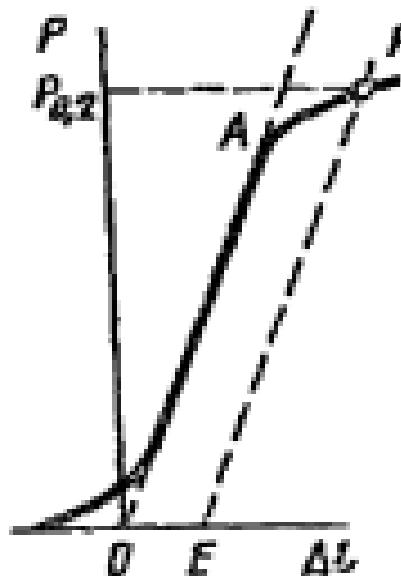


Рисунок 3.1 - Визначення навантаження  $P_{0,2}$  по діаграмі

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  $\sigma_T$  із заданим допуском на величину загальної деформації швидкість навантаження при цьому повинна бути від 0,3 до 3,0 кгс / мм<sup>2</sup>·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 тензометра дозволяє фіксувати величину подовження зразка в масштабі 2:1.

Індикаторний тензометр 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.

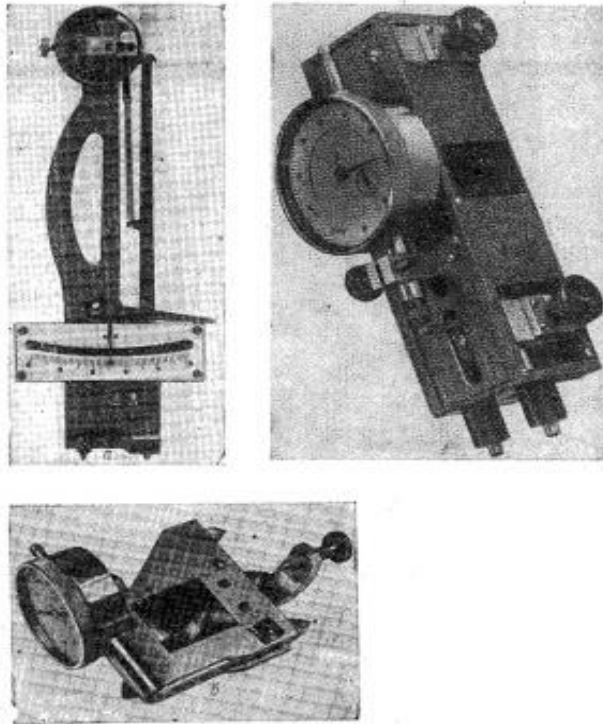


Рисунок 3.2 – Механічні тензометри: а) типа ТР1958, б) конструкції Веткина, в) типа ИТ-3.

Останнім часом широке розповсюдження отримали електронні тензометри типу МКе. Принцип дії такого тензометра 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  $P_m = 3,1 \text{ т} = 0,0304 \text{ МН}$ .

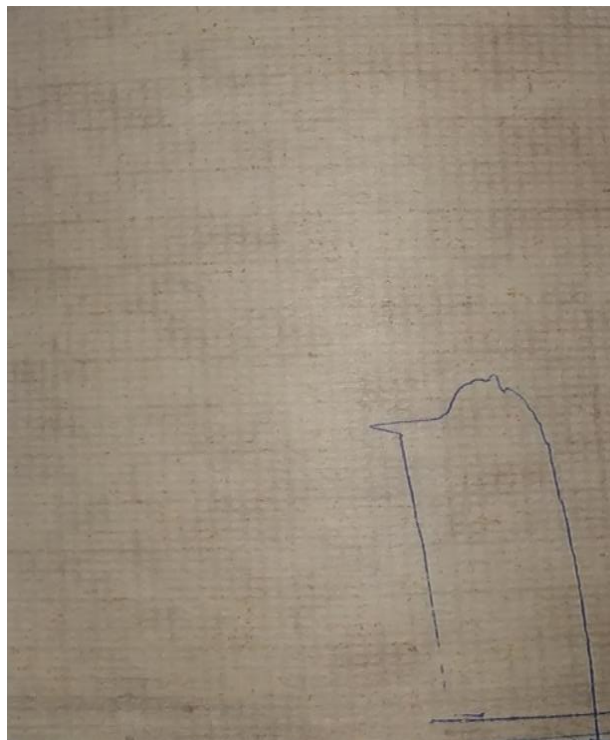


Рисунок 3.6 – Крива деформації металевого зразка

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:

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

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,  $\varepsilon_{\Sigma}$ , %;

$X_2$  – температура деформації,  $T$ , °C;

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

Таблиця 3.1 - Досліджувані фактори

Характеристика	Фактори		
	сумарне обтиснення, ( $\varepsilon_{\Sigma}$ , %)	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 досліду	$x_0$	$x_1$	$x_2$	$x_3$
$2^2$	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 досліди слід дублювати. Частіше дублюють не всі досліди, а тільки досліди на основному рівні. В цьому випадку розрахунок дисперсії досліду  $S_y$  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 $	$\Delta Y_{0i}^2$
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,  $\sigma_T$ , (МН/М<sup>2</sup>)

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 заздалегідь 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 Стюдента. 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;

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

$t_{\alpha, f_1}$  – значення критерію Стюдента, яке вибирається залежно від рівня значущості  $\alpha$  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  $\Delta b_i$ . 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 Стюдента, 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		$\Delta Y$	$\Delta Y^2$
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 розрахункове 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;

$\Delta X_i$  – 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.

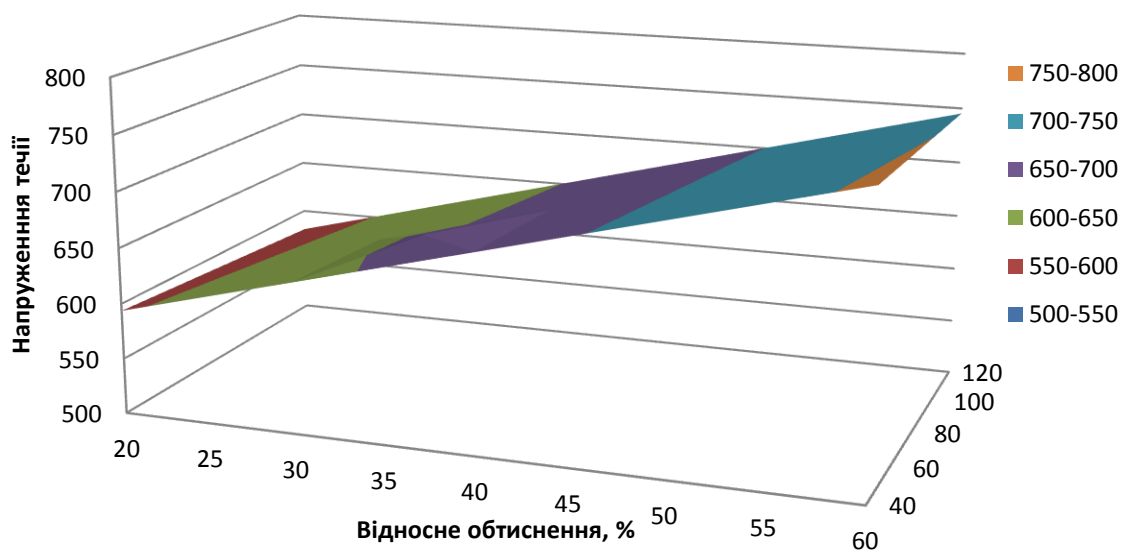


Рисунок 3.8 – Залежність напруження течії від відносного обтиснення та температури ( сталь 09Г2)

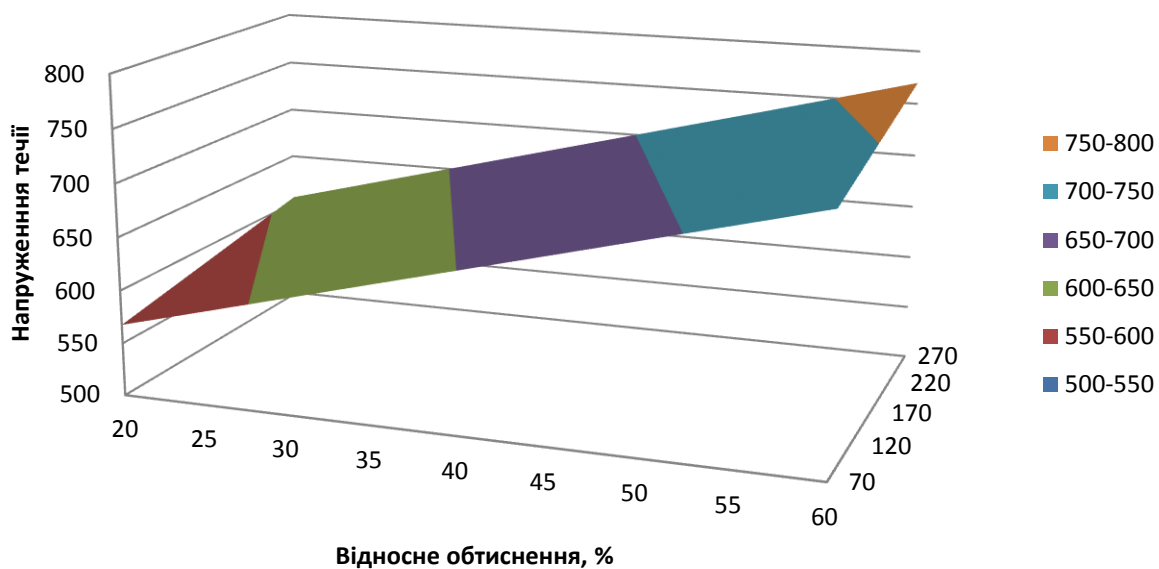


Рисунок 3.9 – Залежність напруження течії від відносного обтиснення та швидкості деформації (сталь 09Г2)

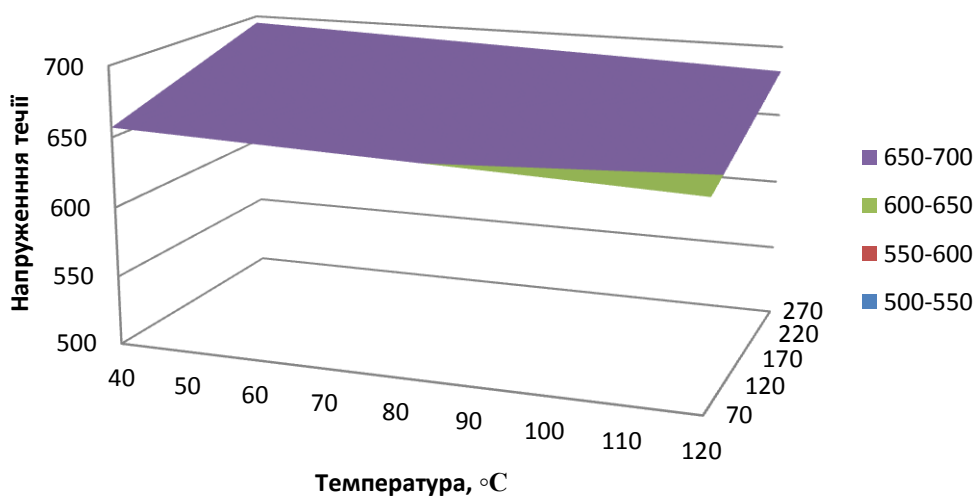


Рисунок 3.10 – Залежність напруження течії від температури та швидкості деформації (сталь 09Г2)



Таким же чином, за допомогою методу повного факторного аналізу, досліджуємо вплив відносного обтіснення, 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,  $\sigma_T$ , (МН/М<sup>2</sup>)

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  $\Delta b_i$ . 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:

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

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		$\Delta Y$	$\Delta Y^2$
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:

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

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

Визначають розрахункове значення критерію Фішера, порівнюють з табличним.

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

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

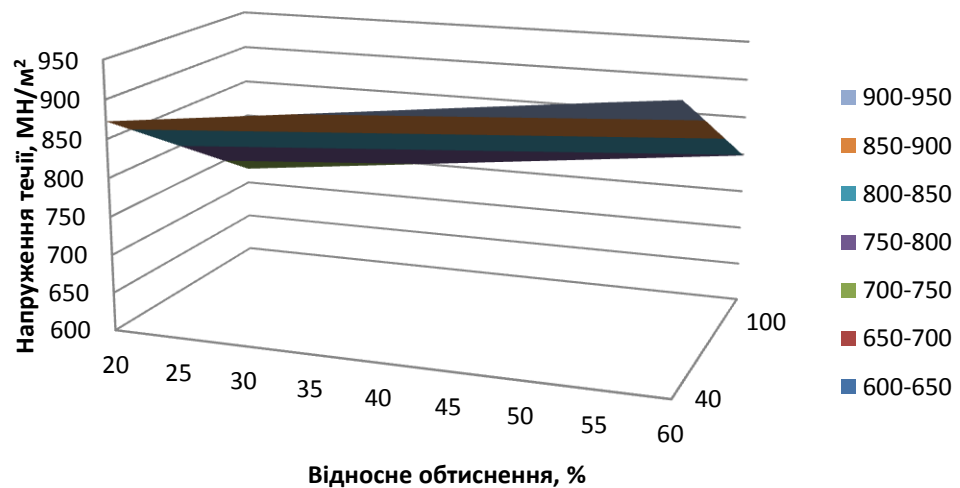


Рисунок 3.11 – Залежність напруження течії від відносного обтиснення та температури ( сталь 12ГС)

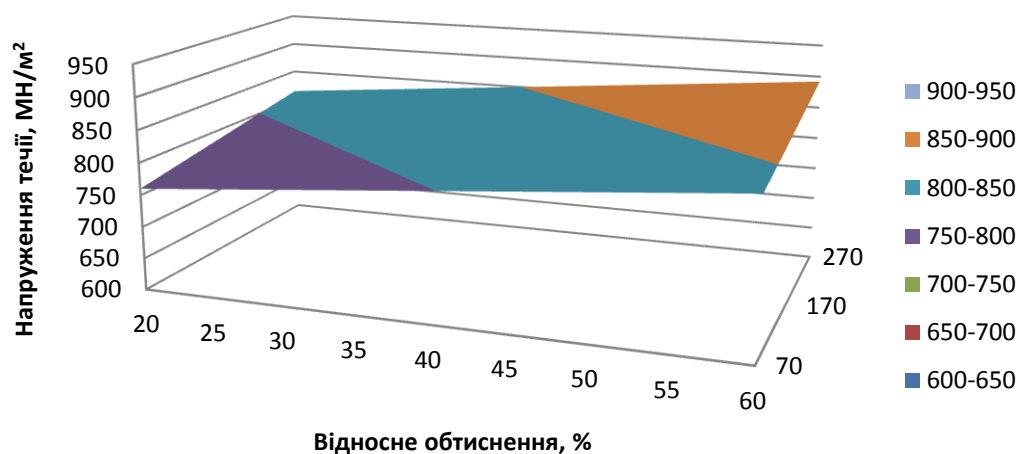


Рисунок 3.12 – Залежність напруження течії від відносного обтиснення та швидкості деформації (сталь 12ГС)

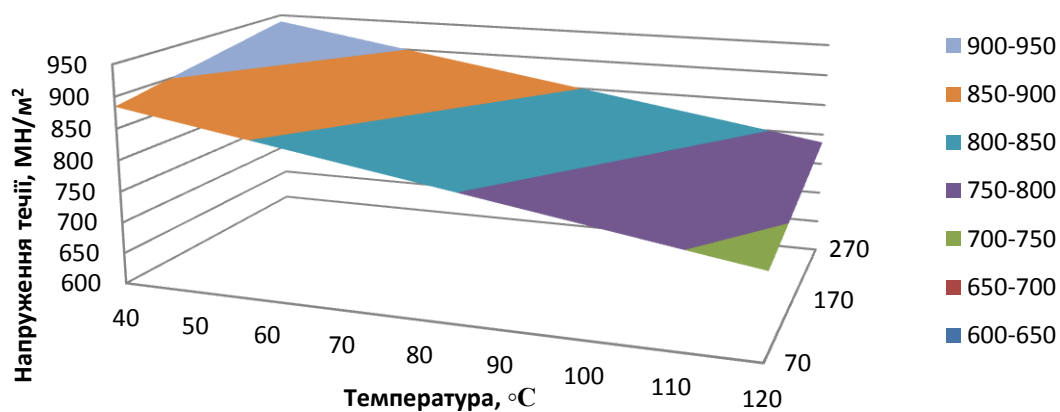


Рисунок 3.10 – Залежність напруження течії від температури та швидкості деформації (сталь 12ГС)

### 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 статті 44 Закону України «Про охорону праці» [27] передбачається відповідальність робітників та роботодавця за порушення законів та інших нормативно-правових актів про охорону праці у вигляді: дисциплінарної, адміністративної, кримінальної відповідальності відповідно до чинного законодавства, а також до сплати штрафу в судовому порядку.

У даному розділі бакалаврської роботи розглянуті і проаналізовані основні шкідливі і небезпечні чинники, які діють в умовах ЦХП-1 ВАТ «Запоріжсталь», наведено інформацію про діючі нормативно-правові акти з охорони праці, узагальнені питання пожежної профілактики.

ЦХП-1 відноситься до II б категорії за ДСН 3.3.6.042-99, так як витрата енергії працівника становить приблизно 178 ккал/год [14]. На безперервному стані холодної прокатки "1680" застосовується безперервний процес прокатки, тобто метал знаходиться відразу у всіх клітках, це зменшує час процесу прокатки і кількість допоміжних операцій, також знижує можливі випадки травматизму.

Слід зазначити, що умови роботи на реверсивному стані 1680 ускладнено тим, що робоча зона розташована в безпосередній близькості до стану і не захищена закритою кабіною. В повітрі можлива наявність високомолекулярних жирних кислот, окису вуглецю, хлору. Тому реверсивний стан 1680 повинен бути обладнаний місцевою витяжкою.

На даний момент близько 80 % працівників цеху працюють в умовах, які наведені в таблиці 4.1. Їх робота відповідає III групі важкості (важкі фізичні роботи). Небезпечними і шкідливими виробничими факторами на

стані є: рухомі і обертові частини машин і механізмів; розпечений метал; підвищена запиленість повітря; небезпека електротравм; шум; вібрація.

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 <sup>3</sup>		Загазованість, мг/м <sup>3</sup>		
	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	CO	NO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> 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 - Характеристика приміщень по характеру зорової роботи і необхідної освітленості згідно ДБН В.2.5-28-2006 [18]

Таблиця 4.4 – 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 <sup>3</sup> <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 <sup>3</sup>						
	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 <sup>2</sup>						
8	Мікроклімат у приміщенні: - температура повітря <sup>0</sup> С;	15-21	4,7			10,3	90,6
	- швидкість руху повітря, м/с;	0,4	1,1	2,75			90,6
	- відносна вологість повітря, %;	75	52				90,6
	- інфрачервоне випромінювання, Вт/м <sup>2</sup>						
9	Температура навколишнього повітря(під час роботи на відкритому повітрі), <sup>0</sup> С: - улітку - узимку						
10	Атмосферний тиск						
11	Вага й напруженість праці.						
	Кількість факторів:			3	-	2	



У виробничих умовах джерелами шуму є: механізми прокатних станів, механізми кранів, ручні механізовані інструменти, електричні машини, компресори, підйомно-транспортне, допоміжне устаткування (вентиляційні установки, кондиціонери).

На ділянці безперервного стану холодної прокатки «1680», внаслідок роботи обладнання, виникає підвищений шум 92 дБА при нормі 80 дБА [18].

У прокатному цеху вібрація володіє неоднорідністю по спектру частот і непостійністю в часі. Локальна вібрація залежить від контакту оператора з тілом, що коливається. Виробничими джерелами локальної вібрації є ручні механізовані машини ударної та обертальної дії пневматичним або електричним приводом. Інструменти ударної дії засновані на принципі вібрації. До них відносяться молотки, пневмотрамбовки. До ручних механізованих машин обертальної дії відносяться шліфувальні, свердлувальні машини, пили електромоторів.

Висновок: в таблиці 4.1 приведений перелік небезпечних та шкідливих факторів, таким чином є в наявності 2 чинники 1-2 ступеня.

#### **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 4.5 приведені технічні рішення по виробничій санітарії.

Таблиця 4.5 - 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 4.6 - 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 4.7 - 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 м<sup>2</sup> 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 4.8

Таблиця 4.8 - 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 <sup>2</sup>	1	-	1	-	1
Машинний зал	6000 м <sup>2</sup>	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 підіймально-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.

#### **4.3. 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).

## ЗАГАЛЬНИЙ ВИСНОВОК

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).

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Третьяков А.В., Зюзин В.И. Механические свойства металлов и сплавов при обработке давлением : справочник. Москва : Металлургия, 1973. 223 с.
2. Василев Я.Д., Мінаєв О.А. Теорія поздовжньої прокатки : підручник. Донецьк : УНІТЕХ, 2009. 488 с.
3. Робертс В.Л. Холодная прокатка стали: підручник. Москва : Металлургия, 1982. 544 с.
4. Полухин П.И., Гун Г.Я., Галкин А.М. Сопротивление пластической деформации металлов и сплавов: справочник. Москва : Металлургия, 1983. 352 с.
5. Трефилов В.И., Моисеев В.Ф., Печковский Э.П., Горная И.Д., Васильев А.Д. Деформационное упрочнение и разрушение поликристаллических металлов : учебник. Киев : Наук. думка, 1989. 256с.
6. Калачев М.И. Деформационное упрочнение металлов. Москва : Наука и техника, 1980. 256с.
7. Фетисов Г.П., Карпман М.Г., Матюнин В.М., и др. Материаловедение и технология металлов: учебное издание. Москва : Высшая школа, 2001. 625с.
8. Ніколаєв В.А. Виробництво плоского прокату: підручник . Запоріжжя : ЗДІА, 2010. 320 с.
9. Николаев В.А. Холодная прокатка полос : учебное пособие. Запорожье : ЗНТУ, 2011. 126 с.
10. Ніколаєв В.А. Технологія виробництва сортового та листового прокату: підручник. Запоріжжя : видавництво ЗДІА, 2000. 220 с.
11. Николаев В.А. Прокатка широкополосной стали: підручник. Київ : Освіта України, 2009. 268 с.

12. Железнов, Ю.Д. Прокатка ровных полос и листов : підручник. Москва : Металлургия, 1971. 200 с.
13. Васильев, Я.Д. Производство полосовой и листовой стали : підручник. Київ : Вища школа, 1976. 192 с.
14. Управлением качеством тонколистового проката : підручник Київ : Техника, 1997. 384 с..
15. Николаев, В.А. Коэффициент трения при холодной прокатке. *Изв. вузов. Черная металлургия*. 1989. №7. С. 63 – 67.
16. Николаев В.А., Путники А.Ю. Особенности прокатки полос в неприводных рабочих валках. *Металургическая и горнорудная промышленность*. 2008. №1. С.71-74.
17. Грудев, А.П. Технология прокатного производства: учебник. Москва : Арт-Бизнес-Центр, 1994. 651 с.
18. Рокотян С. Е. Теория прокатки и качество металла. Москва : Металлургия, 1981. 224 с.
19. Полухин, П.И. Тонколистовая прокатка и служба валков. Москва: Металлургия, 1967. 388 с.
20. Э. Гарбер, И. Кожевникова, А. Трайно, В. Кузнецов, С. Павлов. Новые методы моделирования процессов холодной прокатки, обеспечивающие улучшение качества холоднокатаных листов, экономию энергии и увеличение скорости непрерывных станов. *Вестник Череповецкого государственного университета*. №3, 2009. С. 108-111.
21. Комановский, А. З. Листопрокатное производство: справочник. Москва : Металлургия, 1979. 280 с.
22. Коновалов Ю. В., Остапенко А. Л. и др. Расчет параметров листовой прокатки: справочник. Москва : Металлургия, 1986. 430 с.
23. Королев А.А. Конструкция и расчет машин и механизмов прокатных станов: учебник для студ. высш. учеб. зав. Москва : Металлургия, 1985. 376 с.
24. Гуляев, А.П. Металловедение: учебник для студ. высш. учеб. зав.

Москва : Металлургия, 1977. 664 с.

25. Чекмарев А.П., Грудев А.П., Сигалов Ю.Б., Экспериментальное и аналитическое определения разогрева металла при холодной прокатке. *Обработка металлов давлением* : сборник научных трудов. ДМетИ. Москва : Металлургия, 1970. Вып. 55. С.92-98.

26. Николаев В.А., Определения предела текучести при холодной прокатке *Металургическая и горнорудная промышленность*, 2000. №8,9. С.152 – 154.

27. Жидецкий, В.Ц. Основы охраны труда. Львов : Афиша, 2000. 351 с.

28. Бринза, В.Н. Охрана труда. Охрана труда в черной металлургии Москва: Металлургия, 1982. 336 с.

29. Грудев А.П. Внешние трения при прокатке. Москва : Металлургия, 1973. 228 с.

30. Сорокин В.Г., Гервасьева М. А. Стали и сплавы. Марочник : справочник. Москва : Интернет инжиниринг, 2001. 608 с.

## **ДОДАТОК А**

**Публікації за темою кваліфікаційної роботи**

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

ЗБІРНИК  
наукових праць студентів,  
аспірантів і молодих вчених

«МОЛОДА НАУКА-2019»

Том V

«Секції Криворізького факультету ЗНУ»  
«Секції Інженерного інституту ЗНУ»

Запоріжжя  
2019

---

з відносним радіусом  $\rho = 0,05 \dots 0,08$  для малих перепадів;  $\rho = 0,1 \dots 0,15$  для великих (де  $\rho = R/d$ ).

### Література

1. Основы конструирования: Справочно-методическое пособие. В 2-х кн./Под ред. П.Н. Усачева. - М.: Машиностроение, 1988.-560с.
2. Напрями творчого проектування та його техніко-економічне обґрунтування. Книга 1. Навчальний посібник. / Жук А.Я., Желябіна Н.К., Таратута К.В., Коваль М.В.- К.: Видавництво-Кондор, 2012.-540с.

**Пенкін Артур**

магістрант 1 курсу факультету металургії  
Наук. кер.: к.т.н., доц. Белоконь Ю.О.

### ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ ЗМІЦНЕННЯ НИЗЬКОЛЕГОВАНИХ СТАЛЕЙ ПРИ ХОЛОДНІЙ ПРОКАТЦІ ШТАБ

Міцність матеріалу штаби визначають опір деформації і через нього впливають на рівень енергосилових параметрів. Пластичні властивості матеріалу штаби визначають граничні величини сумарного і приватних відносних обтисків. Урахування впливу механічних властивостей матеріалу штаби при розробці режимів обтискань на будь-якому стані зводиться до знаходження найбільш відповідних величин сумарного і приватних відносних обтисків. При прокатці штаб з матеріалів, що інтенсивно зміцнюються, з високою початковою межею текучості і з невисокою пластичністю вживані на практиці величини сумарного і приватних відносних обтискань значно нижче, ніж при прокатці штаб із пластичних матеріалів, що слабо зміцнюються, з низькою початковою межею текучості.

При розробці технології і дослідженні процесів листового прокатування необхідно враховувати зміцнення листа, обумовлене пластичною деформацією. Пластичність низьколегованих сталей нижче ніж у вуглецевих, цим спричинено зменшення сумарного обтиску.

При виконанні інженерних розрахунків при зміні деформації використовуються як криві зміцнення, так і значення межі текучості  $\sigma_T$  і тимчасової межі опору  $\sigma_B$ . Для опису зростання показників міцності зручно використовувати залежність вигляду:

$$\sigma = \sigma_0 + A\varepsilon^n$$

$\sigma$  – поточне значення межі  $\sigma_T$  або  $\sigma_B$

$\sigma_0$  – початкове значення межі  $\sigma_T$  або  $\sigma_B$ ;

$A, n$  – постійні коефіцієнти.

Наприклад:

для низьколегованої сталі 08ГСЮФ завтовшки 1,0 мм

$$\sigma_T = 405 + 67,6\varepsilon^{0,462};$$

$$\sigma_B = 553 + 20,8\varepsilon^{0,668};$$

для низьколегованої сталі 08ГСЮТ завтовшки 1,0 мм

$$\sigma_T = 300 + 74,8\varepsilon^{0,435};$$

$$\sigma_B = 455 + 11,1\varepsilon^{0,845}$$

Тому розробка моделей визначення параметрів зміцнення металу в процесах холодної прокатки низьколегованих сталей є актуальною задачею в теорії прокатки і потребує детального вивчення цього питання.

**Прохорова Анастасія**

студентка 1 курсу магістратури Машинобудівного фак-ту

Карагандинського державного технічного університету,

Республіка Казахстан

Наук. кер.: PhD, доцент КарГТУ Щербакова О.В.,

канд. техн. наук Карпенко Г.В.

## **ОСОБЛИВОСТІ ВИРОБНИЦТВА ПОРИСТИХ КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ НА ОСНОВІ ВУГЛЕЦЮ ДЛЯ ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНОЇ ТЕХНІКИ**

Виробництво вуглецевих композиційних матеріалів є одним з найпріоритетніших напрямів в техніці. Їх виробництво і споживання в розвинених країнах зіставно з виробництвом всіх металів разом узятих (за об'ємом, а не по вазі, враховуючи їх низьку щільність в порівнянні з більшістю металів).

Основними споживачами цього класу матеріалів є металургія, хімічна промисловість і атомна енергетика. В даний час світові ціни графітових матеріалів знаходяться в межах від 3 доларів за кілограм (електродна продукція), до 40-200 доларів за кілограм для спеціального конструкційного і особливо чистого графіту. У світовому об'ємі виробництва графітових матеріалів, яке складає декілька мільйонів тонн в рік, об'єм виробництва вуглецевих композиційних матеріалів складає лише 230-450 тонн на рік [1].

Пористі високотемпературні матеріали мають особливе значення в сучасній техніці, оскільки характеризуються високим рівнем експлуатаційних параметрів, зокрема низькою щільністю і теплопровідністю, забезпечуючи можливість їх використання при високих температурах.

Створення пористих структур в вуглецевих матеріалах можливо декількома способами: спікання дисперсних систем в заданих умовах, застосування неорганічних і органічних піноутворювачів, використання процесів газоутворення в процесі хімічних перетворень. Недоліками цих технологій є недостатня міцність одержаних матеріалів, а також нерівномірність розподілу пір за об'ємом виробів [2].

При створенні композиційних вуглецевих матеріалів з регульованою пористістю в матрицю іноді вводять порожнисті мікросфери з оксидів,



Лукошніков Андрій <i>ПРО ПІДГОТОВКУ ТИТАНОВОЇ СТРУЖКИ ДЛЯ ОТРИМАННЯ ЕЛЕКТРОЛІТИЧНИХ ПОРОШКІВ ТИТАНУ</i> .....	98
Олефіренко Владислав <i>АНАЛІЗ КОНЦЕНТРАЦІЇ НАПРУЖЕНЬ СТУПІНЧАСТИХ ЦИЛІНДРИЧНИХ ДЕТАЛЕЙ МЕТАЛУРГІЙНОГО ОБЛАДНАННЯ</i> .....	100
Пенкін Артур <i>ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ ЗМІЦНЕННЯ НИЗЬКОЛЕГОВАНИХ СТАЛЕЙ ПРИ ХОЛОДНІЙ ПРОКАТЦІ ШТАБ</i> .....	102
Прохорова Анастасія <i>ОСОБЛИВОСТІ ВИРОБНИЦТВА ПОРИСТИХ КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ НА ОСНОВІ ВУЛЕЦЮ ДЛЯ ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНОЇ ТЕХНІКИ</i> .....	103
Пушич Юлія <i>ПІДВИЩЕННЯ ПРОДУКТИВНОСТІ РОБОТО ТЕХНІЧНИХ КОМПЛЕКСІВ ЛИСТОВОГО ШТАМПУВАННЯ</i> .....	105
Сабіров Віктор <i>НАПРУЖЕННЯ ТЕЧІЇ МЕТАЛУ ПРИ ГАРЯЧІЙ ПРОКАТЦІ НИЗЬКОЛЕГОВАНИХ СТАЛЕЙ</i>	106
Сердюк Д.М., Заїченко В.О. <i>ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАСВОСННЯ ЕЛЕМЕНТІВ В ПРОЦЕСІ ВЕЛР</i> .....	107
Сільчук Ольга <i>ДОСЛІДЖЕННЯ ОСОБЛИВОСТЕЙ ГАРЯЧОЇ ПРОКАТКИ ВИСОКОЛЕГОВАНИХ СТАЛЕЙ</i>	108
Солов'йова Дар'я <i>ОСОБЛИВОСТІ ДЕФОРМАЦІЇ НИЗЬКОВУЛЕЦЕВИХ МАРОК СТАЛЕЙ НА СТАНАХ ХОЛОДНОЇ ПРОКАТКИ</i> .....	109
Сумін Микита <i>ОСОБЛИВОСТІ МЕХАНІКИ РУЙНУВАННЯ ТВЕРДИХ МАТЕРІАЛІВ</i> .....	110
Сьобко Андрій <i>АНАЛІЗ КОНСТРУКЦІЙ ГАЙОК ГВИНТОВОЇ ПАРИ НАТИСКНОГО МЕХАНІЗМУ ОБТИСКНОГО СТАНУ ТА ОБРУНТУВАННЯ ЇХНІХ ОПТИМАЛЬНИХ ГЕОМЕТРИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ</i> .....	112
Цибенко Наталія <i>ВИРОБНИЦТВО ПЕРИКЛАЗОВУЛЕЦЕВИХ ВОГНЕТРИВІВ ДЛЯ ФУТЕРОВКИ КИСНЕВИХ КОНВЕРТЕРІВ</i> .....	114
Черняк Сергій <i>ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ ГАРЯЧОЇ ПРОКАТКИ ШТАБ З ПРИСКОРЕННЯМ В ЧИСТОВІЙ ГРУПІ КЛІТЕЙ НІШТІ 1680</i> .....	116
Черняк Сергій <i>ВЛАСТИВОСТІ САМООБПІЛЮВАЛЬНИХ ЕЛЕКТРОДІВ ДЛЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ ПЕЧЕЙ</i> .....	117
Шайтанов І.В. <i>ДОСЛІДЖЕННЯ ВИКОРИСТАННЯ ПОПЕРЕДНЬОГО НАГРІВАННЯ ШИХТОВИХ МАТЕРІАЛІВ ПРИ ВИПЛАВЦІ ФЕРОСПЛАВІВ</i> .....	118
Щербина Тетяна <i>ПРО ПРОБЛЕМУ ДЕФІЦИТУ БРУХТУ ЧОРНИХ МЕТАЛІВ НА ВНУТРІШНЬОМУ РИНКУ УКРАЇНИ</i> .....	120
Юрченко Євгенія <i>ІНТЕНСИФІКАЦІЯ КИСНЕВО-КОНВЕРТЕРНОЇ ПЛАВКИ З ВИКОРИСТАННЯМ ТЕХНОЛОГІЇ ВЕЛР</i> .....	123