

ЗМІСТ

1. Практична робота №1 Визначення напруження текучості за різними моделями при гарячому прокатуванні.....	4
1.1 Загальні відомості. Методи визначення напруження течії металу при гарячому прокатуванні.....	4
1.2 Моделі по визначенню напруження течії металу при гарячому прокатуванні.....	7
1.3 Приклад розрахунку межі текучості та опору металу деформації за різними моделями при гарячому прокатуванні.....	14
1.3.1 Розрахунок напруження течії металу по моделі Ніколаєва В.О..	16
1.3.2 Розрахунок напруження течії металу по формулі Андреюка Л.В. – Тюленева Г.Г.	18
1.3.3 Розрахунок напруження течії металу по формулі В.І. Зюзіна.....	19
2. Практична робота №2.....	22
2.1 Визначення точності різних моделей за результатами отриманих в ПРН№1	22
2.2 Розрахунково - аналітичне завдання №1 та варіанти до контрольних робіт	25
3. Практична роботи №3 Розрахунок межі текучості та опору металу деформації при холодному прокатуванні за декількома моделями.....	34
3.1 Моделі визначення межі текучості та напруження текучості при холодному прокатуванні.....	34
3.2 Алгоритм визначення напруження течії металу та варіанти контрольних робіт.....	40
4. Практична робота №4	42
4.1 Аналіз точності моделей використаних в ПРН№3	42
4.2 Приклад розрахунку енергосилових параметрів на НС ХП 1700.....	42
Використана література.....	56

1. Практична робота №1

Визначення напруження текучості за різними моделями при гарячому прокатуванні.

1.1 Загальні відомості. Методи визначення напруження течії металу при гарячому прокатуванні.

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

Напруження текучості характеризує механічні властивості матеріалу штаби в перерізах безпосередньо перед входом і за виходом з осередку деформації, а також в проміжках між клітьми і в паузах між пропусками при прокатці відповідно на неперервних і реверсивних станах. Тому встановлення закономірностей зміни напруження течії металу штаби має важливе значення не тільки для теорії прокатки, але і для технології.

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

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

З хімічних елементів, що входять до складу вуглецевих сталей найбільший вплив на напруження течії металу надає вуглець. Із збільшенням вмісту вуглецю в сталі напруження течії збільшується. Введення легуючих

елементів до складу сталі також сприяє збільшенню напруження течії металу. Аналогічний зв'язок між напруженням течії металу і легуючими елементами характерний і для сплавів інших металів.

З використанням принципу суперпозиції процесів зміцнення й знеміцнення отримано вираз для миттєвого опору деформації:

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

де D – параметр, що характеризує швидкість зміцнення металу.

Параметри σ_0 і D важко визначити при обробці експериментальних даних, тому що крива плину в початковий момент сильно залежить від структури металу. З іншого боку, пластометри, що існують, не дозволяють зафіксувати початкову стадію плину металу. Аналіз експериментальних кривих плину показує, що більш вираженими на кривій є максимальний опір деформації σ_p і логарифмічна деформація ε_p максимуму деформаційного зміцнення відповідно. Тому вираз (1.1) перетворили, виключивши з нього важко ідентифікуючі параметри. Остаточно одержали наступне вираження для σ_{ϕ} :

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

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

В результаті пластичної деформації відбувається зміцнення металу, тому із збільшенням часткового і сумарного відносного обтиску при прокатці напруження течії металу збільшується. Гаряча прокатка здійснюється при температурах, що перевищують температуру рекристалізації. З цієї причини

метал в процесі гарячої прокатки не тільки зміцнюється, але і знеміцнюється. Проте, в цілому процес гарячої прокатки характеризується зміцненням металу на виході з осередку деформації.

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

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

де σ_T – напруження течії металу; T – температура; ε – відносна деформація; τ – час деформації; u – швидкість деформації.

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

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

Експериментальні дослідження по визначенню напруження течії металу можна розділити на дві групи:

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

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

Великий комплекс досліджень по встановленню закономірностей зміни σ_m при гарячій деформації виконаний В.І. Зюзіним. Ним отримані кількісні дані про σ_m при гарячій деформації 44 марок сталей і 20 кольорових металів та сплавів. Результати цих досліджень опубліковані в літературі [1].

1.2 Моделі по визначенню напруження течії металу при гарячому прокатуванні

Використання експериментальних даних про σ_m представлених у виді графіків або таблиць, для обчислення напруження течії при гарячій прокатці незручно і призводить до зниження точності визначення шуканої величини. Для зручності використання наявних експериментальних даних про σ_T В.І. Зюзін запропонував метод термомеханічних коефіцієнтів. Суть цього методу полягає в тому, що напруження текучості при гарячій прокатці представляють як добуток σ_0 і трьох незалежних коефіцієнтів. Математично σ_m по даному методу записується у виді [2]:

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

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

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

Значення термомеханічних коефіцієнтів k_t, k_ε, k_u для кожного металу (сплаву) визначають по графіках. На рис. 1.1 представлені графіки $k_t = f(t)$, $k_\varepsilon = f(\varepsilon)$, $k_u = f(u)$ для сталі 45. Базове значення напруження течії даної сталі складає 86 Н/мм^2 .

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

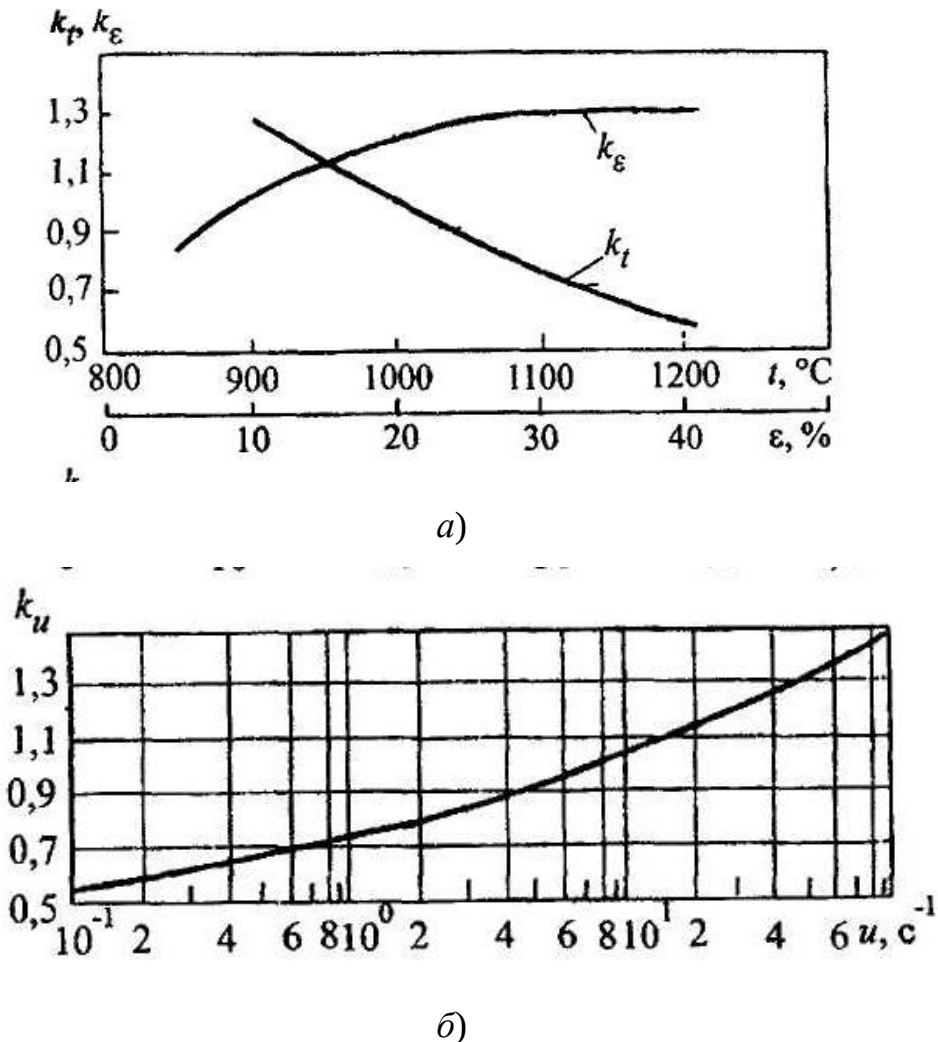


Рисунок 1.1 – Графічні залежності для визначення термомеханічних коефіцієнтів сталі 45 (дані В.І. Зюзіна): а- коефіцієнт впливу температури на коефіцієнт k_t та обтиску на коефіцієнт k_ε ; б – коефіцієнт впливу швидкості деформації на коефіцієнт k_u [1].

Аналіз експериментальних залежностей $k_t = f(t)$, $k_\varepsilon = f(\varepsilon)$, $k_u = f(u)$ В. І. Зюзіна, виконаний П. Л. Кліменко, показав, що вони з прийнятною для інженерної практики точністю апроксимуються рівняннями [3]:

при $\varepsilon < 0,15$

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

при $\varepsilon > 0,15$

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

при $u = 1-100 \text{ с}^{-1}$

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

при $u > 100 \text{ с}^{-1}$

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

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

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

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

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

В результаті зміцнення і впливу швидкості деформації при прокатці опір деформації металу в осередку швидко зростає. Після виходу штаби з валків напруження течії металу σ_T , прокатаного в гарячому стані, швидко зменшується в результаті знеміцнення. При тривалому процесі рекристалізації напруження течії зменшується до величини σ_{mt} , тобто до величини практично дорівнюючій межі текучості при даній температурі в умовах статичних випробувань.

Для розрахунку середнього значення опору деформації $\sigma_{\phi cp}$ при прокатці необхідно знати середнє значення напруження текучості σ_{tcp} матеріалу штаби в осередку. Значення σ_{tcp} знаходимо методом

термомеханічних коефіцієнтів. По аналогії з (1.4) математична модель σ_{mcp} при гарячій прокатці записується у виді:

$$\sigma_{mcp} = \sigma_0 k_{\varepsilon p} k_{ucp} k_{tcp} \quad (1.10)$$

$k_{\varepsilon p}, k_{ucp}, k_{tcp}$ - коефіцієнти, що враховують вплив середнього ступеня, швидкості і температури деформації при гарячій прокатці на напруження текучості.

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

$$\sigma_p = \sigma_0 \cdot A_1 \cdot A_2 \cdot A_3 \cdot \varepsilon^{m_1} \cdot u^{m_2} \cdot \exp(m_3 T) \quad (1.11)$$

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

Е. Зібеля і А. Помпа :

$$\sigma = \sigma_0 + b \cdot u^m \quad (1.12)$$

де σ_0 – границя текучості при статичній деформації, кг/мм²; b і m – постійні коефіцієнти, які залежать від природи матеріалу.

А.Надаї:

$$\sigma = \sigma_0 + m \cdot \ln \frac{u}{u_0} \quad (1.13)$$

де m – постійний коефіцієнт, який залежить від матеріалу.

О.І. Целікова і В.А. Персіянцева:

$$\sigma = \sigma_0 + D \frac{A}{u} \left(1 - e^{-A \frac{\varepsilon}{u}} \right), \quad (1.14)$$

де D – модуль зміцнення, кг/мм²; A – коефіцієнт пропорційності, що представляє собою швидкість релаксації, с⁻¹; σ_0 – границя текучості при статичній деформації, кг/мм²; u – середня швидкість деформації, с⁻¹.

Л.В. Андреюка, Г.Г. Тюленева :

$$\sigma = s \sigma_0 \cdot (10\varepsilon)^a u^b \left(\frac{t}{1000} \right)^{-c}, \quad (1.15)$$

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

Для визначення напруження течії металу при гарячій прокатці використовують формулу В.О. Ніколаєва [2,3]:

$$\sigma_T = \sigma_{T6} \cdot k_t \cdot k_\varepsilon \cdot k_u, \quad (1.16)$$

де σ_{T6} – базове напруження течії, визначене при фіксованих (базових) значеннях температури (t), відносного обтиснення (ε) і швидкості деформації (u):

$$\varepsilon = \Delta h / H;$$

$$u = v \cdot \varepsilon / l_d,$$

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

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

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

$$\sigma_{T6} = 80 + 25 \cdot \left\{ 1 - \left[\frac{5 - N_1}{4,5} \right]^{1,8} \right\}; \quad (1.17)$$

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

$$\sigma_{T6} = 110 + 38 \cdot \left(\frac{N_2 - 2}{32} \right)^{0,25 \times N_2} \quad (1.18)$$

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

Таблиця 1.1 – Групи сталей для розрахунку напруження течії металу

Група сталі	Метал
I	Вуглецеві та інструментальні сталі 08кп; 08Ю; 20; Ст.3; 45; Ст.6; У8 та ін.
II	Леговані та низьколеговані сталі 40Х; ШХ15; 15ХСНД; 14ГН; 12ХН3А
III	20ХНМ; 60ХНГС2М; 35ХНГ2М; 30ХГСА; 18Х2Н4МВА; ХВГ; 60С2
IV	10ХН; 12Х17
V	20Х5НГ2; 15Х5М; 12ХНМФА; 20ХГНМ
VI	18ХГТ; 20ХГНР; 45ХН
VII	4Х13; Х16Н5М4; Х17Н2; Х18Н9Т; Х18Н12М2Т; Р18

Формула поправочного коефіцієнту k_t в залежності від температури має вид:

$$k_t = 1,66 - 1,1 \cdot \left(\frac{t}{400} - 2 \right)^{0,7}, \quad (1.19)$$

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

Формула поправочного коефіцієнту k_t в залежності від температури має вид:

$$k_t = 1,66 - 1,1 \cdot \left(\frac{t}{400} - 2 \right)^{0,7}, \quad (1.19)$$

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

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

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

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

Таблиця 1.3 – Формули для розрахунку поправочного коефіцієнта k_u

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

1.3 Приклад розрахунку межі текучості та опору метала деформації за різними моделями при гарячому прокатуванні

Для розрахунку користуємось практичними даними по параметрам прокатування, які наведенні в таблиці №1.4

Таблиця 1.4 – Параметри прокатки в чистові групі Н С Г П 1680 [4]

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

Визначаємо напруження течії металу та середній контактний тиск при гарячому прокатуванні штаби 3,0x1100 мм зі сталі Ст.3кп за умовами представленими у таблиці 1.4.

Спочатку розрахуємо додаткові геометричні параметри прокатки для подальшого порівняльного аналізу:

1) Абсолютний обтиск:

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

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

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

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

2) Відносний обтиск:

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

$$\varepsilon_5 = \frac{13,38}{27} = 0,50; \quad \varepsilon_6 = \frac{5,29}{13,62} = 0,39; \quad \varepsilon_7 = \frac{2,72}{8,33} = 0,33;$$

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

2) Довжина дуги контакту та швидкість деформації дорівнюють:

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

$$\lambda d_5 = \sqrt{305 \times 13,38} = 63,9 \text{ мм} = 0,0639 \text{ м};$$

$$\lambda d_6 = \sqrt{305 \times 5,39} = 40,2 \text{ мм} = 0,0402 \text{ м};$$

$$\lambda d_7 = \sqrt{305 \times 2,72} = 28,8 \text{ мм} = 0,0288 \text{ м};$$

$$\lambda d_8 = \sqrt{305 \times 1,33} = 20,1 \text{ мм} = 0,0201 \text{ м};$$

$$\lambda d_9 = \sqrt{305 \times 0,91} = 16,7 \text{ мм} = 0,0167 \text{ м};$$

$$\lambda d_{10} = \sqrt{305 \times 0,37} = 10,6 \text{ мм} = 0,0106 \text{ м};$$

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

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

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

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

1.3.1 Розрахунок напруження течії метала по моделі Ніколаєва В.О.

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

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

Вуглецевий еквівалент дорівнює, %:

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

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

$$\sigma_{T6} = 80 + 25 \cdot \left\{ 1 - \left[\frac{5 - N_1}{4,5} \right]^{1,8} \right\};$$

$$\sigma_{T6} = 80 + 25 \cdot \left\{ 1 - \left[\frac{5 - 1,155}{4,5} \right]^{1,8} \right\} = 91,5 \text{ Н/мм}^2.$$

Використовуючи данні таблиці 1.2 і 1.3 одержуємо:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Визначаємо напруження течії металу:

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

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

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

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

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

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

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

1.3.2 Розрахунок напруження течії метала по формулі Андреюка Л.В. – Тюленева Г.Г.

Напруження течії металу:

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

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

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

В таблиці 1.8 наведено базове значення напруження течії сталі Ст.3кп та коефіцієнти s, a, b, c .

Таблиця 1.8 – Коефіцієнти для формули Андреюка Л.В. – Тюленева Г.Г.

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

Визначаємо напруження течії металу:

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

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

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

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

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

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

1.3.3 Розрахунок напруження течії метала по формулі В.І. Зюзіна

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

Середнє значення температури штаби в осередку деформації:

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

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

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

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

Середнє значення умовного середнього обтиску:

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

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

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

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

Визначаємо значення швидкісного коефіцієнта:

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

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

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

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

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

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

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

Середнє значення коефіцієнта зміцнення:

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

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

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

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

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

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

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

Середнє значення температурного коефіцієнта:

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

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

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

$$k_{\text{tcp}7} = 0,6 + 0,0045 \cdot (1200 - 915) \sqrt{\frac{1200 - 915}{915}} = 1,32 ;$$

$$k_{\text{tcp}8} = 0,6 + 0,0045 \cdot (1200 - 878) \sqrt{\frac{1200 - 878}{878}} = 1,48 ;$$

$$k_{\text{tcp}9} = 0,6 + 0,0045 \cdot (1200 - 852) \sqrt{\frac{1200 - 852}{852}} = 1,60 ;$$

$$k_{\text{tcp}10} = 0,6 + 0,0045 \cdot (1200 - 815) \sqrt{\frac{1200 - 815}{815}} = 1,79 .$$

Визначаємо величину напруження течії металу:

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

Базове значення напруження течії сталі Ст.3кп дорівнює 86 Н/мм² [1].

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

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

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

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

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

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

2. Практична робота №2

2.1 Визначення точності різних моделей за результатами отриманих в ПР№1

Дані отримані в ПР№1 занесемо до табл.2.1 та 2.2

Таблиця 2.1 - Деформаційні та швидкісні параметри прокатки

№ кліті	h_0 , мм	h_1 , мм	Δh , мм	ϵ	l_d , мм	u , c^{-1}
5	27	13,62	13,38	0,5	63,9	9,39
6	13,38	8,33	5,29	0,39	40,2	19,15
7	8,33	5,61	2,72	0,33	28,8	33,33
8	5,61	4,28	1,33	0,24	20,1	45,32
9	4,28	3,37	0,91	0,21	16,7	62,41
10	3,37	3,0	0,37	0,11	10,6	56,84

Таблиця 2.2 - Напруження течії металу за різними моделями

№ кліті	σ_T , Н/мм ²		
	За моделлю Ніколаєва В.О.	За моделлю Андреюка Л.В. – Тюленева Г.Г.	За моделлю Зюзіна В.І.
5	132	128	107
6	158	155	136
7	176	178	160
8	187	199	180
9	201	218	204
10	195	226	207

Для наочності отриманих даних основні результати представлені у вигляді графіків на рисунках 2.1-2.4

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

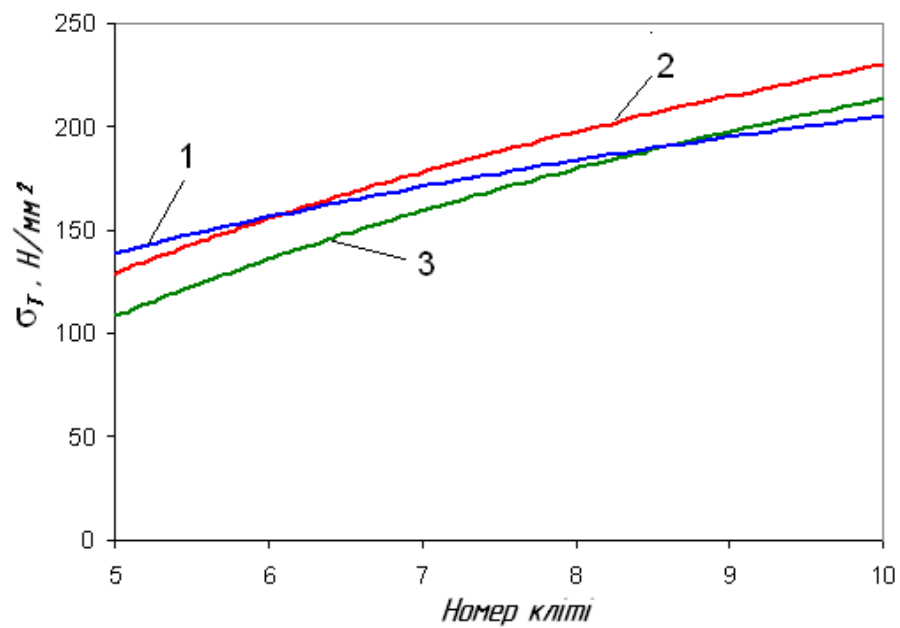


Рисунок 2.1 – Розподіл напруження течії металу по клітям розраховане за теоретичними формулами: 1 – В.О. Ніколаєва; 2 – Л.В. Андреюка – Г.Г. Тюленева; 3 – В.І. Зюзіна.

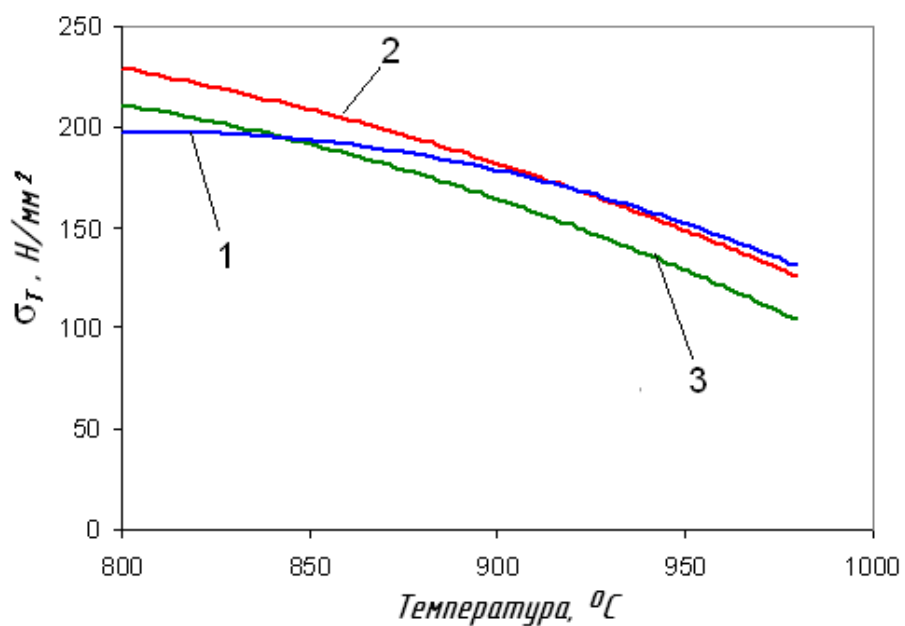


Рисунок 2.2 – Залежність напруження течії металу від температури штаби розрахована за формулами: 1 – В.О. Ніколаєва; 2 – Л.В. Андреюка – Г.Г. Тюленева; 3 – В.І. Зюзіна.

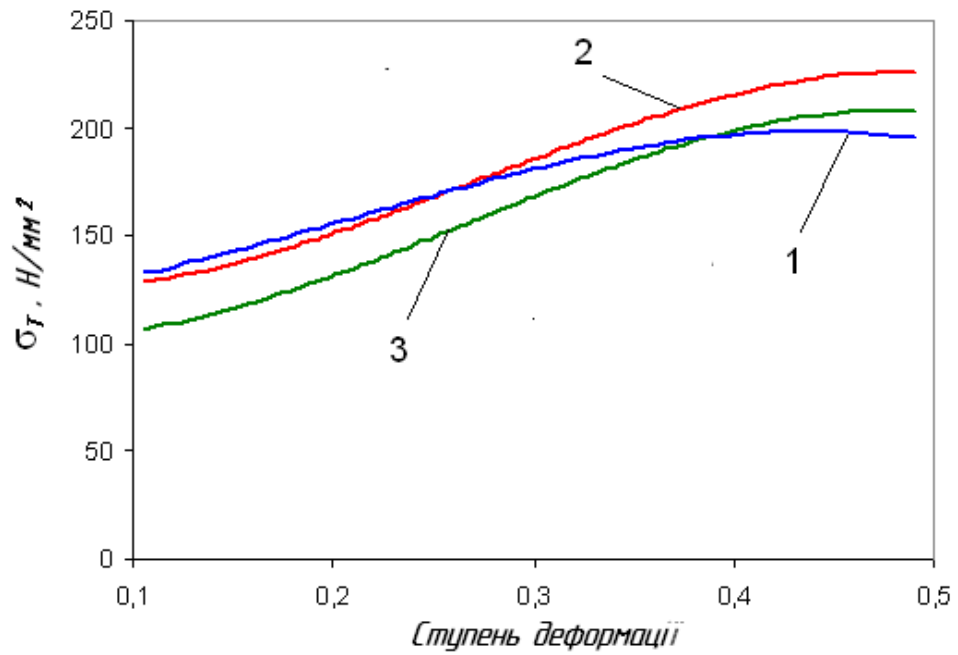


Рисунок 2.3 – Залежність напруження течії металу від ступеня деформації розрахована за теоретичними формулами: 1 – В.О. Ніколаєва; 2 – Л.В. Андреюка – Г.Г. Тюленева; 3 – В.І. Зюзіна.

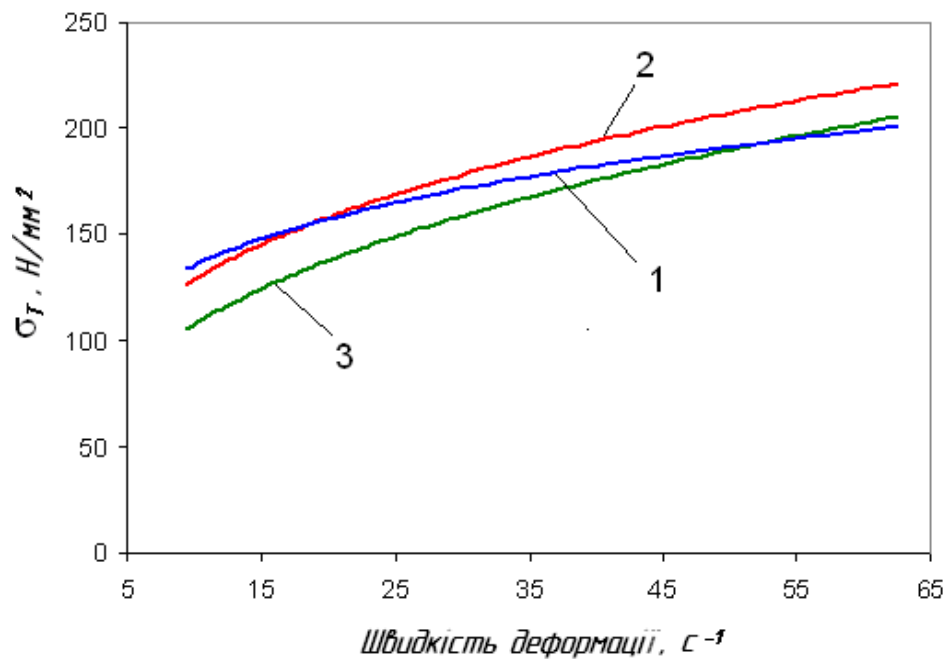


Рисунок 2.4 – Залежність напруження течії металу від швидкості деформації розрахована за теоретичними формулами: 1 – В.О. Ніколаєва; 2 – Л.В. Андреюка – Г.Г. Тюленева; 3 – В.І. Зюзіна.

Таким чином встановлено, що формула В.О. Ніколаєва добре працює як при низьких температурно-швидкісних показниках прокатки та і при їх

збільшеннях під час прокатки і може бути рекомендована для визначення напруження течії металу при гарячій прокатці.

Аналіз отриманих залежностей дозволяє зробити наступні висновки:

1. При підвищенні температури збільшується амплітуда теплових коливань атомів і відповідно всі характеристики міцності, в тому числі і напруження течії металу, знижуються.

2. Збільшення швидкості і ступеня деформації прямо підвищують напруження течії металу. Майже у всіх металів і сплавів напруження течії металу зростає зі збільшенням ступеня деформації ϵ .

2.2 Розрахунково - аналітичне завдання №1 та варіанти до контрольних робіт.

2.2.1 Задача 1.1 Визначити термомеханічні коефіцієнти k_t, k_ϵ, k_u для умов гарячої прокатки в чистовій групі клітей неперервного стану 1680 за моделями В.О. Ніколаєва, В.І. Зюзіна та П.Л. Кліменко

Приклад розрахунку представлено в п.1.3, вихідні дані наведені в таблиці 2.3.

В таблицях прийняті позначення h_0 та h_1 – товщина штаби, мм, відповідно на вході в кліть та після деформації в цій же кліті.

$t_{\text{шп}}$ – температура штаби на вході в кліть 5, тобто початку прокатки, ° С.

$t_{\text{зп}}$ – температура закінчення прокатки, тобто на виході із кліті 10, ° С.

Рекомендації до визначення окремих параметрів прокатки.

Температуру металу по клітям визначити за емпіричною загальноприйнятою формулою:

$$t_i = t_{\text{шп}} - \frac{(t_{\text{шп}} - t_{\text{зп}})}{\frac{h_{0\text{H}}}{h_{\text{K}}} - 1} \left(\frac{h_{0\text{H}}}{h_i} - 1 \right) \quad (2.1)$$

де $t_{\text{пш}}$ – температура металу на вході в кліть 5; $t_{\text{зн}}$ – температура металу на виході із кліті 10; $h_{\text{он}}$ – товщина штаби перед кліттю 5; $h_{\text{к}}$ – товщина штаби після кліті 10; h_i – товщина штаби на виході із i -тої кліті; t_i – температура металу на виході із i -тої кліті.

Швидкість прокатки V_i по клітям визначити за умовою постійності секундних об'ємів металу по клітям в процесі прокатування, тобто

$$h_5 V_5 = h_6 V_6 = h_7 V_7 = h_8 V_8 = h_9 V_9 = h_{10} V_{10} \quad (2.2)$$

звідки:

$$V_5 = (h_{10} \cdot V_{10}) / h_5 \text{ і т.д. для клітей 6, 7, 8 і 9.}$$

Швидкість деформації U визначили по формулі Целікова О.І.:

$$U = V \cdot \varepsilon / l_d$$

де $\varepsilon = \Delta h / h_0$; $l_d = \sqrt{\Delta h \cdot R}$; V - швидкість прокатки, м/с.

Радіус бочок робочих валків прийняти по технічній характеристиці НС ГП 1680 (табл. 2.5).

Результати розрахунків за кожною моделлю звести в таблиці та викреслити графіки зміни по клітям термомеханічних коефіцієнтів k_t, k_ε, k_u .

Збудувати також графіки $k_t = f(t)$, $k_\varepsilon = f(\varepsilon)$, $k_u = f(u)$ та $k_v = f(v)$.

Таблиця 2.3 – Вихідні дані для задачі 1.1

Варіант	Марка сталі	Номер прокатної кліті та товщина штаби, мм												Температура		Швидкість прокатки в кліті 10	Ширина штаби, мм
		5		6		7		8		9		10		t _{пп}	t _{зп}		
		h ₀	h ₁	h ₀	h ₁	h ₀	h ₁	h ₀	h ₁	h ₀	h ₁	h ₀	h ₁				
1	08кп	20,0	10,6	10,6	6,2	6,2	4,0	4,0	2,8	2,8	2,2	2,2	2,0	1050	840	8,0	1000
2	08нс	22,0	11,6	11,6	7,4	7,4	6,5	6,5	4,7	3,4	3,4	2,5	2,5	1050	850	8,2	1100
3	1кп	24,0	15,0	15,0	9,2	9,2	6,8	6,8	4,4	4,4	2,9	2,9	2,5	1060	850	8,5	1200
4	1нс	23,0	16,0	16,0	10,0	10,0	7,0	7,0	4,6	4,6	3,0	3,0	2,7	1040	840	9,0	1250
5	Ст.1	23,0	13,8	13,8	8,9	8,9	6,2	6,2	4,0	4,0	3,5	3,5	3,0	1075	910	9,5	1000
6	2кп	23,0	14,1	14,1	9,2	9,2	6,5	6,5	4,2	4,2	3,6	3,6	3,0	1060	890	9,3	1170
7	2нс	25,0	17,0	17,0	11,0	11,0	7,5	7,5	5,0	5,0	3,5	3,5	3,0	1055	860	9,0	1200
8	Ст.2	25,0	17,5	17,5	11,4	11,4	8,0	8,0	5,7	5,7	3,9	3,9	3,5	1060	880	8,5	1270
9	3нс	25,0	17,8	17,8	12,0	12,0	8,5	8,5	6,2	6,2	4,4	4,4	4,0	1060	880	7,8	1500
10	Ст.3	25,0	18,0	18,0	12,0	12,0	8,5	8,5	6,0	6,0	4,3	4,3	3,8	1060	890	8,8	1350

2.2.2 Задача 1.2 та варіанти контрольних робіт до практичної роботи №2.

За вихідними та розрахунковими даними задачі 1.1 визначити напруження межі текучості σ_T за моделями В.О. Ніколаєва, В.І. Зюзіна та Л.В. Андреюка і Г.Г. Тюленева.

Розрахувати опір метала деформації σ_{cp} і середнє нормальне контактне напруження (СНКН) p_{cp} та силу прокатки P та порівняти з експериментальними даними М.М. Сафьяна [4]:.

Таблиця 2.4 - Допоміжні вихідні дані до задачі 1.2

Варіант	Сила прокатки в кліті чистової групи НС ГП 1680					
	5	6	7	8	9	10
	P, МН					
1	13,2	12,3	10,0	9,1	7,5	3,7
2	14,8	13,5	10,5	10,0	8,1	4,3
3	15,1	13,8	11,0	10,5	8,9	5,2
4	17,1	15,8	13,4	11,2	10,0	8,0
5	12,1	13,0	10,0	9,7	8,9	4,5
6	15,0	14,2	11,0	10,4	10,0	4,7
7	15,6	14,3	11,2	10,6	9,8	5,0
8	14,3	13,8	15,7	17,8	10,2	6,0
9	18,5	14,4	15,1	15,1	10,4	6,8
10	18,9	15,2	15,9	16,9	10,6	6,5

Рекомендації по визначенню окремих параметрів прокатки:

1.Визначення фактора форми осередка деформації l_d/h_{cp} ,

$$\text{де} \quad l_d = \sqrt{\Delta h \cdot R} \quad (2.3)$$

радіус бочок робочих валків , прийняти середнім та визначити по формулі :

$$R = \frac{R_H + R_{II}}{2} \quad (2.4)$$

R_H і R_{II} відповідно радіуси бочок нового і після останньої переточки валків, які приведені в таблиці 2.5.

Таблиця 2.5 - Технічна характеристика та деякі параметри горячої прокатки на БШПС 1680 заводу «Запоріжсталь» [6].

№ клітей і їх тип	$\frac{D_p \times L_p}{D_o \times L_o}$ мм	$\frac{d_p}{d_o}$ мм	$ \varepsilon $	%	Передаюче число редуктора	Номінальна потужність ел. двигунів, Нн, кВт	Швидкість прокатки м/с	Відстань між клітьями, м	Оберти ел. дв. об/хв
			B≤1200 мм	B=1250 ...1500 мм					
1Д*	900×1680	620	25	20	23,99	1840	0,99	-	500
2КВУ	940×2440 1320×244	660 750	37	35	19,26	5400	1,09	6,25	428
3КВУ	850×1680 1240×168	480 650	40	37	19,58	3700	1,13	21,0	500
4КВУ	620×1680 1240×168	395 650	40	37	10,15	3700	1,57	16,1	500
5КВУ	620×1680 1240×168	395 650	40	37	7,36	3700	2,17	25,49	500
6КВ**	620×1680 1240×168	395 650	50	45	7,24	5000	2,2	58,77	500
7КВ	620×1680 1240×168	395 650	50	45	4,67	5000	3,42	5,84	500
8КВ	620×1680 1240×168	395 650	40	35	2,75	5000	5,78	5,84	500
9КВ	620×1680 1240×168	395 650	40	35	2,0	5000	7,93	5,84	500
10КВ	620×1680 1240×168	395 650	25	25	1,56	5000	10,14	5,84	500
11КВ	620×1680 1240×168	395 650	15	15	1,41	5000	11,25	5,84	500

*- 1...5 чорнові кліті;

** - 6...11 кліті чистової групи

Д-дуо, КВ-кварто; Р-реверсивна; У-універсальна;

D, L – діаметр і довжина бочок відповідно робочих (р) і опорних (о) валків; d і l – діаметр і довжина шийок валків відповідно робочих (р) і опорних (о) ; ε - відносний обтиск; В-ширина штаб.

По моделі Ніколаєва В.О. визначаємо напруження течії металу та вуглецевий еквівалент:

$$\sigma_T = \sigma_{T0} \cdot k_t \cdot k_\varepsilon \cdot k_u, \quad (2.5)$$

де σ_{T0} – базове напруження течії при $t = 1000^\circ\text{C}$, $\varepsilon = 10\%$, $u = 10\text{с}^{-1}$, визначене за наведеними нижче формулами в залежності від вмісту хімічних елементів у сталі (крім заліза, сірки і фосфору).

Для вуглецевих, конструкційних, інструментальних і низьколегованих сталей при $N_1 \leq 5\%$:

$$\sigma_{T0} = 80 + 25 \cdot \{1 - [(5 - N_1) / 4,5] 1,8\} \quad (2.6)$$

Для легованих, високолегованих сталей при $N_2 > 5\%$:

$$\sigma_{T0} = 110 + 38 \cdot [(N_2 - 2) / 32]^{0,25 \cdot N_2}, \quad (2.7)$$

де N_1 та N_2 – вміст хімічних елементів в сталі, % (крім заліза, сірки та фосфору).

Термомеханічні коефіцієнти визначені в задачі 1.1.

Хімічний склад вуглецевих сталей наведено в таблиці 2.6.

Таблиця 2.6 Хімічний склад маловуглецевих сталей до задачі 1.2

Марка сталі	Вміст елементів в сталі, %					
	C	Si	Mn	Cr	Ni	Cu
08кп	0,11	0,03	0,50	0,02	0,06	0,07
08нс	0,08	0,03	0,38	0,08	0,09	0,06
10кп	0,08	0,07	0,35	0,09	0,08	0,06
1нс	0,08	0,07	0,35	0,09	0,08	0,06
Ст.1	0,09	0,017	0,50	0,17	0,10	0,20
2кп	0,15	0,08	0,26	0,16	0,10	0,20
2нс	0,15	0,30	0,30	0,25	0,17	0,20
Ст.2	0,15	0,31	0,66	0,30	0,20	0,20
2нс	0,22	0,27	0,70	0,30	0,30	0,20
Ст.3	0,22	0,37	0,80	0,03	0,30	0,20

Визначити середню товщину штаби h_{cp} і фактор форми по клітям:

$$h_{cp} = \frac{h_0 + h_1}{2} \quad (2.8)$$

Середнє нормальне контактне напруження P_{cp} визначити за формулою рекомендованою В.О. Ніколаєвим [2]:

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

Для розрахунків прийняти σ_{ϕ} – опір метала деформації ($\sigma_{\phi} = \sigma_T \cdot \lambda$);
 σ_T – напруження течії металу; λ – коефіцієнт Лодє ($\lambda = 1 - 1,15$); f_{π} –
показник тертя =0,50.

Сила прокатки Р визначається за загальноприйнятою формулою:

$$P = B \cdot P_{cp} \cdot l_d$$

де В-прийняти із таблиці 2.4.

Розрахунки по моделі В.І. Зюзіна провести за алгоритмом:

Термомеханічні коефіцієнти k_b , k_{ε} , k_u , прийняти із задачі 1.1. Базове напруження течії металу прийняти по експериментальним даним [1]– для сталей 08кп, 08пс, 1кп, 1нс $\sigma_0 = 84 \text{ Н/мм}^2$; для Ст.1, 2кп, 2нс $\sigma_0 = 85 \text{ Н/мм}^2$, Ст.2, 3нс $\sigma_0 = 86 \text{ Н/мм}^2$

По наведених раніше формулах (2.7, 2.9, 2.10) визначити σ_T , P_{cp} і Р.

Розрахунки по моделі Л.В. Андреюка і Г.Г. Тюленєва провести за наведеним алгоритмом:

Базове напруження течії металу σ_0 і коефіцієнти s, a, b, c прийняти наступними (табл.2.7) [5].

Таблиця 2.7 Дані до розрахунку σ_T

Марка сталі	σ_{Δ} , Н/мм ²	Коефіцієнти			
		s	a	b	c
08кп, 08нс, 1кп, 1нс	72,7	0,855	0,154	0,128	2,58
Ст.1, 2кп, 2нс	75,8	0,920	0,148	0,126	2,62
Ст.2, 3нс	77,9	0,885	0,164	0,135	2,80
Ст.3	90,7	0,960	0,167	0,124	2,54

Результати розрахунків звести в таблицю, збудувати графіки залежностей $\sigma_T = f(t)$, $\sigma_T = f(\varepsilon)$, та $\sigma_T = f(v)$. $P_{cp} = f(t)$, $P_{cp} = f(\varepsilon)$, $P_{cp} = f(u)$ та $P_{cp} = f(v)$, а також розподіл сили прокатки експериментальної та розрахункової за різними моделями. Побудувати чотири графіки розподілу сили прокатки Р по клітям чистової групи на стані ГП 1680:

- 1- по моделі Ніколаєва В.О.;
- 2- по моделі Зюзіна В.І.;
- 3- по моделі Андреюка Л.В. і Тюленєва Г.Г.
- 4- по експериментальним даним Сафьяна. М.М.

Проаналізувати точність використаних моделей порівняно з даними експериментів.

3. Практична роботи №3

Розрахунок межі текучості та опору метала деформації при холодному прокатуванні за декількома моделями.

3.1 Моделі визначення межі текучості та напруження текучості при холодному прокатуванні

У літературі приведені експериментальні дані про межу текучості при кімнатній температурі для більшості металів і сплавів, що піддаються холодній прокатці. Найбільш масштабні дослідження межі текучості при холодній прокатці виконані А.В. Третьяковим. В результаті цих досліджень було встановлено кількісний вплив ε_{Σ} сумарного відносного обтиску при холодній прокатці на межу текучості, побудовані залежності $\sigma_{T\varepsilon} = \varphi(\varepsilon_{\Sigma})$ при $t_{\text{ст}} = 20^{\circ} \text{C}$ для більш ніж 100 сплавів чорних та кольорових металів та запропоновані математичні моделі для їх описання. Ці моделі, що отримали широке практичне застосування, мають вид:

$$\sigma_{T\varepsilon} = \sigma_{T_{\text{вих}}} + m(100\varepsilon_{\Sigma})^k \quad (3.1)$$

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

Модель (3.1) може бути записана у вигляді добутку початкової межі текучості $\sigma_{\text{вих}}$ на коефіцієнт зміцнення k_{ε} матеріалу штаби:

$$\sigma_{T\varepsilon} = \sigma_{T_{\text{вих}}} k_{\varepsilon} \quad (3.2)$$

$$\text{де} \quad k_{\varepsilon} = 1 + m_1(100\varepsilon_{\Sigma})^k \quad (3.3)$$

$$m_1 = m / \sigma_{\text{вих}} \quad (3.4)$$

Наприклад для сталі марки 08кп модель (3.1) по Третьякову має таке значення $\sigma_{0,2} = 23 + 3,4\varepsilon^{0,6}$ (кгс/мм²) (3.5).

Коефіцієнт зміцнення k_ε чисельно дорівнює відношенню межі текучості, підрахованої з урахуванням впливу сумарного відносного обтиску при холодній прокатці до початкової межі текучості. Він визначає рівень і характер зміцнення матеріалу штаби при холодній прокатці. Як випливає з (3.1) коефіцієнт k_ε завжди більше одиниці (при $\varepsilon_\Sigma = 0$ $k_\varepsilon = 1$).

У таблиці 3.1 приведені значення параметрів $\sigma_{тисх}, m, m_1, k$ для деяких металів і сплавів, отримані А.В. Третьяковим при $t_{ст} = 20^\circ \text{C}$.

Таблиця 3.1 - Значення параметрів $\sigma_{тисх}, m, m_1, k$ для деяких металів і сплавів

Марка сталі (сплавів)	Значення параметрів			
	$\sigma_{тисх}, \text{Н/мм}^2$	$m, \text{Н/мм}^2$	m_1	k
Залізо армко	250	50,0	0,2000	0,56
Ст.2	300	30,6	0,1020	0,62
08кп, Ст.0, 08нс	230	34,6	0,1504	0,60
10,2кп, 2нс	300	29,5	0,0983	0,64
20	375	31,6	0,0843	0,64
Ст.3	350	64,5	0,18	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

Використання моделі (3.4) замість (3.1) представляється більш наочнішим і зручнішим для аналізу впливу сумарного відносного обтиску на межу текучості при холодній прокатці. Це підтверджується графічними залежностями $k_\varepsilon = \varphi(\varepsilon_\Sigma)$ представленими на рис.3.1, які були побудовані по моделі (3.4). Як видно, із рис.3.1 значення k_ε для всіх аналізованих сталей

починаються з 1,0 і відображають повною мірою закономірності і особливості їх зміцнення.

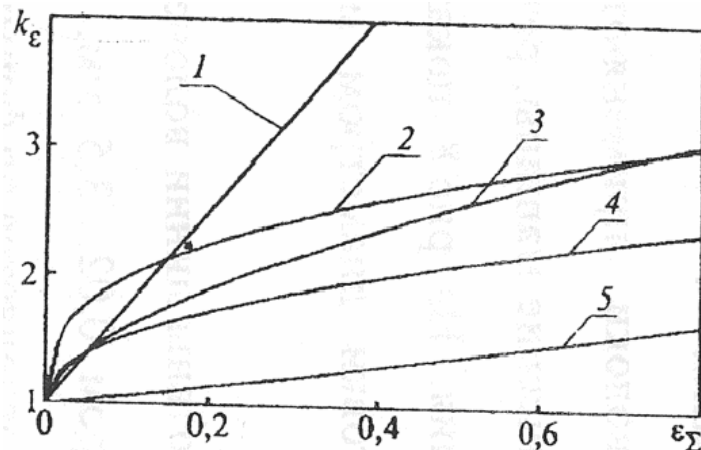


Рис. 3.1 Залежність $k_\epsilon = \varphi(\epsilon_\Sigma)$ для деяких сталей (дані А.В.Третьякова):
1- 12Х18Н9Т; 2-65Г; 3-08кп; 4-09Г2; 5-Е1659.

Для визначення межі текучості матеріалу штаби в діапазоні підвищених, відповідні реальному процесу холодної прокатки, температур (для 250°C і більш), рекомендується модель:

$$\sigma_{Tt} = \sigma_{T\epsilon} k_t = \sigma_{T\text{вих}} k_\epsilon k_t \quad (3.6)$$

де k_t - коефіцієнт, що враховує вплив температури деформації штаби на границю текучості.

Коефіцієнт k_t є відношення межі текучості матеріалу штаби при шуканій температурі t до межі текучості при температурі 20°C .

На рис.3.2 представлені графічні залежності $k_t = \varphi(t)$ для деяких вуглецевих і легированих сталей в діапазоні температур $20-400^\circ \text{C}$. З рис.3.2 видно, що залежності $k_t = \varphi(t)$ мають складний характер зміни. В більшості випадків значення коефіцієнта k_t зменшується з 1,0 (при 20°C) до 0,75-0,90 (при температурі деформації $150-250^\circ \text{C}$).

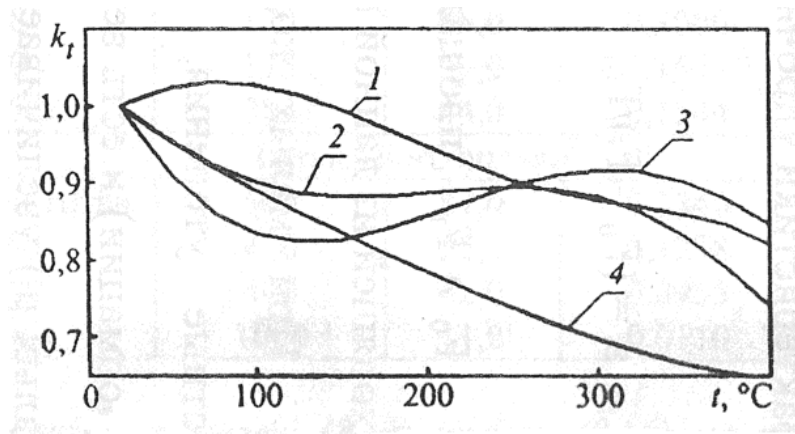


Рис.3.2 Залежність $k_t = \varphi(\varepsilon_t)$ для деяких сталей в діапазоні до рекристалізаційних температур : 1-50ХФА; 2-08кп; 3- 40ХН; 4-12Х18Н9

Температуру штаби на виході із кліті, приріст температури в кліті Δt визначаємо за формулою, запропонованою професором Ніколаєвим В.О.:

$$t_k = \varphi t_n + \Delta t \quad (3.7)$$

де φ -коефіцієнт, яким враховується зниження температури штаби в між клітьовому проміжку ($\varphi=0,7-1,0$);

Δt - приріст температури в осередку деформації;

t_n - температура металу на вході в осередок деформації:

$$\Delta t = 0,05m(p_{cp} + \sigma_{cp})l_d(H/h) \quad (3.8)$$

Для маловуглецевих сталей з вмістом вуглецю $C \leq 0,35\%$

$$m = 2,2 - 0,65(t_n/480 + 0,042)^{1,4} \quad (3.9)$$

Тоді температурний коефіцієнт k_t дорівнює:

$$k_t = 0,8 + 0,23(1 - t_n/300)^2 \quad (3.10)$$

Швидкість деформації u визначаємо по формулі Целікова О.І.:

$$u = v \cdot \varepsilon / l_c \quad (3.11)$$

Оскільки довжина сплющеної дуги l_c невідома, попередньо її рекомендовано визначати по формулі:

$$l_c = \left[(1,3 + 4)(\varepsilon_\Sigma - 0,2)^3 \right] \sqrt{R \Delta h} \quad (3.12)$$

Коефіцієнт впливу швидкості деформації k_u на межу текучості визначається за виразом:

$$k_u = 1 + 0,38(0,5 + \ln u / 13,8)^2 \quad (3.13)$$

Коефіцієнт впливу на напруження течії металу обтиску ε_Σ дорівнює:

для $\varepsilon_\Sigma = 0-0,4$

$$k_\varepsilon = 1 - (1 - \varepsilon_\Sigma / 0,4)^{1,5 + C_\varepsilon}$$

для $\varepsilon_\Sigma = 0,4-0,7$

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

де C_ε - вуглецевий коефіцієнт який для вуглецевої сталі дорівнює:

$$C_\varepsilon = C + \frac{Si}{24} + \frac{Mn}{6} + \frac{Ni}{40} + \frac{Cr}{5} + \frac{Mo}{4} + \frac{V}{14} + \frac{W}{4}. \quad (3.14)$$

Базова (початкове після гарячої прокатки) напруження течії і приріст відповідно дорівнює:

$$\sigma_{T0} = 210 + 263C_{\vartheta}; \Delta\sigma_T = 209 + 460C_{\vartheta}. \quad (3.15)$$

Напругу течії металу на виході із осередку деформації визначають за виразом:

$$\sigma_{T1} = \sigma_{T0} + \Delta\sigma_T \cdot k_{\varepsilon} \quad (3.16)$$

Напругу течії розраховуємо при максимальному вмісті хімічних елементів:

$$\sigma_{T1} = n_u \cdot n_t \cdot \sigma_{T0} + \Delta\sigma_T \cdot k_{\varepsilon} \quad (3.17)$$

Середня величина опору металу в осередку деформації дорівнює:

$$\sigma_{\phi} = 1,15 \left[\sigma_{T(i-1)} + 0,67(\sigma_{T1} - \sigma_{T(i-1)}) \right] \quad (3.18)$$

де $\sigma_{T(i-1)}$ — напруження течії металу перед кліттю (проходом); n_u і n_t визначаються з виразів:

$$\left. \begin{aligned} n_u &= 1 + 0,38 \left(0,5 + \frac{\ln u}{13,8} \right)^2; \\ n_t &= 0,8 + 0,23 \left(1 - \frac{t_H}{300} \right)^2. \end{aligned} \right\} \quad (3.19)$$

3.2 Алгоритм визначення напруження течії метала та варіанти контрольних робіт

Задача 3.1

Визначити напруження течії та опір металу деформації при прокатуванні штаб із мало вуглецевої сталі ... (навести марку сталі відповідно варіанту) на неперервному стані холодної прокатки 1700 Маріупольського металургійного комбінату, технічні характеристики котрого наведено в таблиці 3.2 [6].

Таблиця 3.2 - Технічні характеристики стана холодної прокатки 1700 Маріупольського металургійного комбінату.

№ кліті	Діаметр бочок валків, мм		Передаюче число редуктора	Номін. потужність ел. дв., Нн, кВт	Номін. момент ел. дв., кНм	Допустима сила прокатки, МН	Оберти ел. дв. об/хв
	D _p , мм	D _o , мм					
1	550	1420	1,594	2×2400	244	18	240
2	550	1420	1,594	2×2400	294	18	400
3	550	1420	1,608	2×2400	224	18	500
4	550	1420	1,608	2×2400	176	36	600

Вихідні дані до контрольних робіт поваріантно наведені в таблиці 3.3

Таблиця 3.3 - Вихідні дані до задачі 3.1

Варіант	Розміри штаб, мм H ₀ /h × B	Марка сталі	Швидкість прокатки в кліті 4, V ₄ , м/с	Максимальний вміст елементів, %					
				C	Si	Mn	Cr	Ni	Cu
1	2,0/0,5×1025	08кп	10,0	0,08	0,01	0,30	0,02	0,06	0,07
2	2,0/0,5×1050	08	10,5	0,08	0,02	0,30	0,04	0,06	0,07
3	2,0/0,5×1120	08нс	10,8	0,08	0,01	0,30	0,02	0,06	0,07
4	2,2/0,7×1050	2кп	11,0	0,06	-	0,26	0,05	0,01	-
5	2,2/0,7×1150	2нс	10,5	0,06	-	0,26	0,05	0,01	-
6	2,2/0,7×1250	Ст.2	11,2	0,16	-	0,26	0,05	0,01	-
7	2,5/0,8×1300	Ст.3	10,0	0,25	0,30	0,30	0,10	0,20	0,10
8	2,8/0,9×1300	Ст.10	10,0	0,25	0,32	0,40	0,10	0,25	0,15
9	3,0/1,0×1300	Ст.20	10,5	0,25	0,37	0,90	0,30	0,30	0,20
10	3,0/1,0×1500	Ст.0	11,5	0,07	0,01	0,25	0,08	0,09	0,06

Шерхлість бочок валків $R_{ав,мкм}$: Кліть 1 -4,0; кліті 2 і 3-1,5; кліть 4 4,5.

Температура штаби перед кліттю 1 -25° С.

Технологічне мастило –емульсія мінерального масла з концентрацією 4%.

Шерхлість поверхні гарячекатаної штаби $R_{аш}=4мкм$, в клітях стана $R_{аш} \sim 0,5R_{ав}$.

Швидкість прокатки визначити за умовою постійності секундних об'ємів метала, користуючись величиною V_4 в таблиці 3.3.

Режими обтисків прийняти по заводським даним наведених в табл.3.4.

Таблиця 3.4 - Заводські режими обтисків на НСХП 1700 при прокатуванні штаб із вуглецевих сталей марок Ст.0, 08кп (нс), 08ю, 08, 10, 1кп (нс), 3кп(нс), Ст.1, Ст.2, Ст.10, Ст.20, Ст.3 [6].

H ₀ , мм	Товщини і обтиски штаб по клітям											
	Кліть 1			Кліть 2			Кліть 3			Кліть 4		
	h ₁ , мм	Δh, мм	ε, %	h ₁ , мм	Δh, мм	ε, %	h ₁ , мм	Δh, мм	ε, %	h ₁ , мм	Δh, мм	ε, %
2,0	1,30	0,70	35,0	0,85	0,45	34,6	0,60	0,25	29,4	0,50	0,10	16,7
2,2	1,50	0,80	34,8	1,05	0,45	30,0	0,82	0,23	22,1	0,70	0,12	14,6
2,5	1,95	0,55	22,0	1,30	0,65	3,3	0,95	0,35	26,9	0,80	0,15	15,8
2,8	2,15	0,65	23,0	1,45	0,70	32,6	1,05	0,40	27,0	0,90	0,15	14,3
3,0	2,15	0,85	28,3	1,55	0,60	27,9	1,15	0,40	25,8	1,00	0,15	13,0
3,2	2,30	0,90	28,1	1,75	0,55	23,9	1,35	0,40	22,9	1,20	0,15	11,1
3,5	2,60	0,60	17,1	2,00	0,60	23,1	1,55	0,45	22,5	1,40	0,15	9,7
3,8	2,70	1,10	28,9	2,10	0,60	22,2	1,75	0,35	16,7	1,60	0,15	8,6
4,0	3,00	1,00	25,0	2,30	0,70	23,3	1,95	0,35	15,2	1,80	0,15	7,7

За моделлю А.В. Третьякова межу текучості визначити по формулі 3.1 а середню величину опору деформації по 3.18. Результати розрахунків представити у вигляді підсумкових таблиць та графіків зміни $\sigma_{T\epsilon}$ по клітям стана, t метала по клітям стана та $\sigma_{Tcp}=f(\epsilon)$ за моделями А.В. Третьякова та В.О. Ніколаєва.

4. Практична робота №4

4.1 Аналіз точності моделей використаних в ПР№3

Задача 4.1

Використовуючи вихідні дані та результати розрахунків задачі 3.1, визначити порівняльну точність моделей А.В. Третьякова (без урахування температури, швидкості деформації металу по клітям) та В.О. Ніколаєва з урахуванням вище вказаних факторів.

Експериментальні дані вимірів сили прокатки на НСХП 1700 наведені в табл.4.1.

Таблиця 4.1- Експериментальні дані І.М. Меєровича по вимірам сили прокатки на НСХП 1700 [7].

№ варіанта	Сила прокатки, Р,МН			
	Кліть1	Кліть2	Кліть3	Кліть4
1	10,5	12,3	11,8	9,3
2	12,2	12,5	11,4	8,9
3	10,8	13,2	10,8	10,1
4	9,8	11,9	10,9	10,4
5	10,4	12,4	11,1	9,8
6	12,9	13,6	12,4	9,7
7	13,1	13,9	13,2	11,3
8	14,8	15,7	14,1	11,1
9	17,1	18,9	16,1	11,3
10	10,3	11,9	11,1	9,5

Алгоритм розрахунку енергосилових параметрів наведено в прикладі 4.2.1.

4.2 Приклад розрахунку енергосилових параметрів на НС ХП 1700.

Визначення геометричних параметрів осередку деформації

Сумарне обтиснення штаби в чотирьох клітях дорівнює:

$$\Delta h_{\Sigma} = H - h_4,$$

$$\Delta h_{\Sigma_4} = 2,65 - 0,8 = 1,85 \text{ мм}$$

а обтиски по клітках дорівнюють:

$$\Delta h = \varepsilon \cdot \Delta h_{\Sigma_4}$$

$$\Delta h_1 = 0,38 \cdot 1,85 = 0,7 \text{ мм}$$

$$\Delta h_2 = 0,3 \cdot 1,85 = 0,55 \text{ мм}$$

$$\Delta h_3 = 0,2 \cdot 1,85 = 0,37 \text{ мм}$$

$$\Delta h_4 = 0,12 \cdot 1,85 = 0,22 \text{ мм}$$

Виконаємо перевірку:

$$\Delta h_{\Sigma_4} = 0,7 + 0,55 + 0,37 + 0,22 = 1,85 \text{ мм.}$$

Визначимо товщину штаби після кожної клітки по формулі:

$$h_1 = h_0 - \Delta h_1,$$

$$h_1 = 2,65 - 0,7 = 1,95 \text{ мм}$$

$$h_2 = 1,95 - 0,55 = 1,4 \text{ мм}$$

$$h_3 = 1,4 - 0,37 = 1,03 \text{ мм}$$

$$h_4 = 1,03 - 0,22 = 0,8 \text{ мм}$$

Визначаємо відносне обтиснення по кліткам по формулі :

$$\varepsilon = \Delta h / H,$$

$$\varepsilon_1 = \frac{0,7}{2,65} = 0,264$$

$$\varepsilon_2 = \frac{0,55}{1,95} = 0,282$$

$$\varepsilon_3 = \frac{0,37}{1,4} = 0,264$$

$$\varepsilon_4 = \frac{0,22}{1,03} = 0,213.$$

Перша кліть

Визначимо параметри прокатки в кліті 1. Приймаємо, що швидкість прокатки в першому проході, на виході із другої кліті, дорівнює 14 м/с. швидкість прокатки в четвертому проході, після реверсування, становить 16 м/с, тоді з умови сталості секундних об'ємів $V_1 h_1 = V_4 h_4$

$$\text{Знаходимо : } V_1 = \frac{h_4 \cdot V_4}{h_1} = \frac{0,8 \cdot 10}{1,95} = 4,1 \text{ м/с}$$

Визначення коефіцієнта тертя

При температурі деформації $t > 25^\circ\text{C}$.

Коефіцієнт тертя дорівнює:

$$f = f_0 \cdot k_d \cdot k_{\Pi} \cdot k_B \cdot k_{CM} \cdot k_t,$$

де f_0 - базовий коефіцієнт тертя; k_d , k_{Π} , k_{CM} , k_t - поправочні коефіцієнти, що враховують відповідно величину обтиску, шорсткість поверхні штаби, тип технологічного мастила і температуру штаби.

Базовий коефіцієнт тертя дорівнює [7,8]:

при $v < 7,5 \text{ м/с}$

$$f_0 = 0,076 - 0,0019v + 0,031(R_a - 0,6)[(1,07 - 0,14 \cdot v)^3 + 0,054v - 0,26];$$

при $v > 8,0 \text{ м/с}$

$$f_0 = k_v \cdot [0,062 + 0,005(R_a - 0,6)].$$

Коефіцієнт k_v дорівнює: при $v < 8,0 \text{ м/с}$ - $k_v = 1$, а при $v > 8,0 \text{ м/с}$

$$k_v = 0,56 + 0,7(1 - 0,025v)^2$$

Коефіцієнт k_d дорівнює:

$$k_d = 0,5 + 1,77 \varepsilon + 0,165 R_a (1 - 3,33 \varepsilon).$$

Коефіцієнт k_{Π} дорівнює:

$$k_{\Pi} = 1,09 - 0,05 \cdot R_{an}.$$

де R_{an} — шорсткість поверхні штаби, мкм;

Коефіцієнт k_t визначаємо по формулі:

$$k_t = a + c(1,11 - 0,0044 \cdot t_H)^n$$

де t_H — температура метала перед осередком деформації, °C, а, с, n- коефіцієнти, дорівнюють:

для мінеральної емульсії, олій : ИС – 20, ПКС – 1

$$a = 0,31 + 1,7 \cdot \varepsilon ;$$

$$c = 1,2 - 2,8 \cdot \varepsilon ;$$

$$n = 3,84 - 5,7 \cdot \varepsilon ;$$

Коефіцієнт k_{cm} рівний: емульсія 5% мінеральної олії - $k_{cm} = 1,0$;

$$k_v = 0,56 + 0,7 \cdot (1 - 0,025 \cdot 10)^2 = 0,95$$

$$f_0 = 0,095 [0,062 + 0,005(1,5 - 0,6)] = 0,063;$$

$$k_d = 0,5 + 1,77 \cdot 0,264 + 0,165 \cdot 1,5(1 - 3,33 \cdot 0,264) = 1$$

$$k_{\Pi} = 1,09 - 0,05 \cdot 0,75 = 1,05.$$

Для розрахунку коефіцієнта k_t в кліті 1 початкову температуру штаби можна приймати в межах 20...30°C. У подальших клітках початкову

температуру штаби перед кліттю слід приймати рівній кінцевій температурі t_k в попередній кліті з урахуванням втрат температури на міжклітьовій ділянці $\Delta t_{II} = 10 \dots 20^\circ C$. Для нашого прикладу в кліті 1 приймаємо $t_H = 25^\circ C$ і коефіцієнт k_t дорівнює:

$$a = 0,31 + 1,7 \cdot 0,264 = 0,76;$$

$$c = 1,2 - 2,8 \cdot 0,264 = 0,46;$$

$$n = 3,84 - 5,7 \cdot 0,264 = 2,33;$$

$$k_t = 0,76 + 0,46(1,11 - 0,0044 \cdot 25)^{2,33} = 1,22.$$

Загальна величина коефіцієнта тертя:

$$f = 0,063 \cdot 1,05 \cdot 1 \cdot 1,22 = 0,08.$$

Показник тертя дорівнює:

$$f_n = 1,6 \cdot 0,08 - 0,018 = 0,11.$$

Розрахунок напруги течії металу

Сталь марки 08ПС містить наступні хімічні елементи: 0,08% C; 0,01% Si; 0,4% Mn; 0,02% Cr; 0,06% Ni. Вуглецевий еквівалент для вуглецевої сталі в загальному випадку дорівнює [8]:

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

Базова (початкове після гарячої прокатки) напруга течії і приріст відповідно дорівнює:

$$\sigma_{T0} = 210 + 263C_{\text{э}};$$

$$\Delta\sigma_T = 209 + 460C_\Sigma.$$

Коефіцієнт, враховуючий обтиск дорівнює:

для $\varepsilon_\Sigma = 0 \dots 0,4$

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

для $\varepsilon_\Sigma > 0,41$

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

Напругу течії металу після кліті визначають за виразом:

$$\sigma_{T1} = \sigma_{T0} + \Delta\sigma_T \cdot k_\varepsilon$$

Напругу течії розраховуємо при максимальному змісті хімічних елементів:

$$C_\Sigma = 0,08 + (0,01/24) + (0,4/6) + (0,06/40) + (0,02/5) = 0,153;$$

$$\sigma_{T0} = 210 + 263 \cdot 0,153 = 250,2 \text{ Н/мм}^2;$$

$$\Delta\sigma_T = 209 + 460 \cdot 0,153 = 279,4 \text{ Н/мм}^2;$$

$$k_\varepsilon = 1 - \left(1 - \frac{0,264}{0,4}\right)^{1,653} = 0,83;$$

$$\sigma_{T1} = 250,2 + 279,4 \cdot 0,83 = 482,64 \text{ Н/мм}^2.$$

$$\sigma_{T1} = n_u \cdot n_t \cdot \sigma_{T0} + \Delta\sigma_T \cdot k_\varepsilon$$

Напругу течії металу на міжклітьовому проміжку (перед подальшою кліттю) визначимо по формулі:

$$\sigma_{T(i-1)} = n_t \cdot \sigma_{T0} + \Delta\sigma_T \cdot k_{\varepsilon(i-1)}.$$

Середній опір металу у осередку деформації дорівнює:

$$\sigma_{\phi} = 1,15[\sigma_{T(i-1)} + 0,67(\sigma_{T1} - \sigma_{T(i-1)})]$$

де $\sigma_{T(i-1)}$ — напруга течії металу перед кліттю (проходом); n_u і n_t визначаються з виразів:

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

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

Швидкість деформації визначають за виразом:

$$u = v \cdot \varepsilon / l_c ,$$

де l_c - довжина дуги контакту з урахуванням пружних деформацій валків і штаби.

Оскільки довжина дуги l_c доки не відома визначаємо її по формулі:

$$l_c = 1,4\sqrt{R \cdot \Delta h}$$

Для кліті 1 довжина l_c дорівнює:

$$l_c = 1,4\sqrt{225 \cdot 0,7} = 14,7 \text{ мм},$$

а швидкість деформації

$$U = 10000 \cdot 0,264/14.7 = 179 \text{ c}^{-1}.$$

$$\ln U = 5,19$$

$$n_u = 1 + 0,38 \left(0,5 + \frac{5,19}{13,8} \right)^2 = 1,29;$$

$$n_t = 0,8 + 0,23 \left(1 - \frac{25}{300} \right)^2 = 0,993;$$

$$\sigma_{\tau 1}' = 1,29 \cdot 0,993 \cdot 250,2 + 279,4 \cdot 0,83 = 483,38 \text{ Н/мм}^2;$$

$$\sigma_{\tau(i-1)} = \sigma_{\tau 0} = 250,2 \text{ Н/мм}^2;$$

$$\sigma_{\Phi} = 1,15[250,2 + 0,67(483,38 - 250,2)] = 467,39 \text{ Н/мм}^2;$$

Опір металу деформації на вході у валки й на виході з валків без обліку натягу) :

$$\sigma_{\Phi 0} = 1,15 \cdot n_t \cdot \sigma_{\tau 0}$$

$$\sigma_{\Phi 0} = 1,15 \cdot 0,993 \cdot 250,2 = 286 \text{ Н/мм}^2$$

$$\sigma_{\Phi 0} = 1,15 \cdot \sigma_{\tau 1}' = 1,15 \cdot 483,38 = 555,88 \text{ Н/мм}^2$$

Довжина дуги контакту

$$l_C^I = \frac{C + \sqrt{C^2 + 4R\Delta h \left(1 - C \frac{f_{II}}{2h_{cp}} \right)}}{2 \left(1 - C \frac{f_{II}}{2h_{cp}} \right)}$$

$$\left. \begin{aligned} C &= n_{cp} \cdot \sigma_{\Phi} \frac{R}{47500}; \\ x_2 &= n_1 \cdot \sigma_{\Phi 1} \frac{R}{95000}; \end{aligned} \right\}$$

$$l_C = l_C^I + x_2,$$

де R - радіус жорсткого валка; n_{CP} і n_1 — коефіцієнти, що враховують вплив середньої напруги натягнення і напруги натягнення переднього кінця штаба:

$$n_{CP} = 1 - \frac{\sigma_n + \sigma_3}{2\sigma_\phi}; \quad n_1 = 1 - \frac{\sigma_n}{\sigma_1},$$

де σ_n σ_3 — напруга переднього і заднього.

Напруження натягу змінюються в широких межах. Для неперервного стана перед кліттю 1 напруга $\sigma_3 = 20...30 \text{ Н/мм}^2$. На проміжних (міжклітьових) ділянках: $\sigma_n = (0,1...0,2)\sigma_{T1}$, $\sigma_3 = (0,1...0,2)\sigma_{T(i-1)}$.

$$\sigma_3 = 25 \text{ Н/мм}^2, \quad \sigma_n = 0,15 \cdot \sigma_{T1} = 0,15 \cdot 483,38 = 72,5 \text{ Н/мм}^2;$$

Знайдемо:

$$n_{cp} = 1 - \frac{25+72,5}{2 \cdot 467,39} = 0,90; \quad n_1 = 1 - \frac{72,5}{555,88} = 0,87;$$

Знаходимо параметри C і x_2 :

$$C = 0,9 \cdot 467,39 \frac{225}{47500} = 2 \text{ мм};$$

$$x_2 = 0,87 \cdot 626,75 \frac{225}{9500} = 1,3 \text{ мм};$$

$$l'_c = \frac{2 + \sqrt{4 + 4 \cdot 307 \cdot 0,7 \left(1 - 2 \frac{0,13}{2 \cdot 2,27}\right)}}{2 \cdot \left(1 - 2 \frac{0,13}{2 \cdot 2,27}\right)} = 13,44 \text{ мм};$$

$$l_c = 13,44 + 1,3 = 14,58 \text{ мм}$$

Визначаємо енергосилові параметри прокатки

Середня нормальна контактна напруга дорівнює ($f_n > 0,12$)

$$p'_{cp} = \sigma_{cp} (1 + C_{\Pi} \cdot f_{\Pi} \cdot l_c / h_{cp})$$

З урахуванням напруги натягу метала

$$p_{cp} = p'_{cp} \left(1 - \frac{\sigma_n + \sigma_3}{2 p'_{cp}} \right)$$

Усі параметри відомі, то отримаємо

$$p'_{cp} = 467,39 \left(1 + 0,44 \cdot 0,13 \cdot 14,58 / 2,27 \right) = 612 \text{ Н/мм}^2;$$

$$C_H = 0,17(1 + 14,7 \cdot f_{\Pi}) \text{ при } f_{\Pi} \leq 0,12;$$

$$C_H = 0,48 \text{ при } f_{\Pi} \geq 0,12;$$

$$C_H = 0,17(1 + 14,7 \cdot 0,11) = 0,44,$$

$$p_{cp} = 612 \left(1 - \frac{25 + 72,5}{2 \cdot 612} \right) = 563,25 \text{ Н/мм}^2.$$

Сила прокатки

$$P = p_{cp} \cdot l_c \cdot B;$$

$$P = 563 \cdot 0,0146 \cdot 1,06 = 8,7 \text{ МН.}$$

Момент прокатки з урахуванням впливу натягнення рівний (на двох валках)

$$M = 2\psi \cdot P \cdot l_c + H \cdot B \cdot R \cdot \sigma_3 \cdot 10^{-6} \left(1 - \frac{h}{H} \cdot \frac{b}{B} \cdot \frac{\sigma_n}{\sigma_3} \right)$$

ψ — коефіцієнт положення рівнодійних сил.

$$\psi_C = \psi(l_d / l_c)^2; \quad \psi_c = 0,48(l_d / l_c)^2$$

$$\psi_c = 0,48 \left(\frac{\sqrt{225 \cdot 0,71}}{14,58} \right)^2 = 0,356.$$

$$M = 2 \cdot 0,356 \cdot 8,7 \cdot 0,0155 + 2,65 \cdot 1060 \cdot 0,225 \cdot 25 \cdot 10^{-6} \left(1 - \left(\frac{1,95}{2,65} \right) \cdot \left(\frac{72,5}{25} \right) \right) = 0,072 \text{ МН} \cdot \text{м};$$

Потужність на бочці валків (для двох валків)

$$N = 960 \cdot 0,072 \cdot 10 / 0,225 = 3090 \text{ кВт}$$

Визначимо температуру штаби на виході з кліті:

$$t_K = \varphi t_H + \Delta t,$$

де Δt — приріст температури в осередку деформації :

$$\Delta t = 0,05m \cdot (p_{cp} + \sigma_{cp}) \ln H / h,$$

де m — коефіцієнт, для вуглецевої сталі дорівнює

$$m = 2,2 - 0,65 \left(\frac{t_H}{480} - 0,042 \right)^{1,4}$$

Для наших умов отримаємо:

$$m = 2,2 - 0,65 \left(\frac{25}{480} - 0,042 \right)^{1,4} = 2,198;$$

$$\Delta t = 0,05 \cdot 2,198 (563,25 + 467,39) \ln \left(2,65 / 1,95 \right) = 40^\circ \text{C}$$

$$t_k = 0,9 \cdot 25 + 40 = 57,2^\circ \text{C},$$

де φ – коефіцієнт, що враховує охолодження штаби на міжклітьовій ділянці ($\varphi = 0.6 \dots 1.0$). У кліті 1 коефіцієнт $\varphi = 0,9$.

Друга кліть

Визначимо швидкість прокатки в кліті 2

$$V_2 = \frac{h_4 \cdot V_4}{h_2} = \frac{0,8 \cdot 10}{1,4} = 5,7 \text{ м/с}$$

Інші параметри визначимо по приведеному вище алгоритму розрахунку для кліті 1:

$$f_0 = k_v \cdot [0,062 + 0,005(R_a - 0,6)] = 0,85[0,062 + 0,005(1,5 - 0,6)] = 0,056;$$

$$k_v = 0,56 + 0,7(1 - 0,025v)^2 = 0,56 + 0,7(1 - 0,025 \cdot 14)^2 = 0,85;$$

$$k_d = 0,5 + 1,77 \cdot 0,282 + 0,165 \cdot 0,75 \cdot (1 - 3,33 \cdot 0,282) = 1,0;$$

$$k_{\pi} = 1,09 - 0,05 \cdot R_{an} = 1,09 - 0,05 \cdot 0,75 = 1,05.$$

Коефіцієнт k_{CM} для емульсії мінеральної олії приймаємо $k_{CM} = 1$.

$$a = 0,31 + 1,7 \cdot 0,282 = 0,79;$$

$$c = 1,2 - 2,8 \cdot 0,282 = 0,41;$$

$$n = 3,84 - 5,7 \cdot 0,282 = 2,23;$$

$$k_t = 0,79 + 0,41(1,11 - 0,0044 \cdot 57,2)^{2,23} = 1,08;$$

$$f = 0,056 \cdot 1,006 \cdot 1,05 \cdot 1 \cdot 1,08 = 0,061;$$

$$f_n = 1,6 \cdot 0,061 - 0,018 = 0,08.$$

Сумарний обтиск

$$\varepsilon_{\Sigma 2} = \frac{2,65 - 1,4}{2,65} = 0,47(47\%);$$

$$k_{\varepsilon} = 1 + 0,87(0,47 - 0,4)^{0,5} = 1,23;$$

$$l_d = \sqrt{R \cdot \Delta h} = \sqrt{225 \cdot 0,55} = 11,12 \text{ мм};$$

$$l_c = 2,65 \cdot 11,12 = 29,48 \text{ мм};$$

$$u = v \cdot \varepsilon / l_c = 14000 \cdot 0,282 / 29,48 = 134 \text{ с}^{-1};$$

$$\ln u = 4,9;$$

$$n_u = 1 + 0,38 \left(0,5 + \frac{\ln u}{13,8} \right)^2 = 1 + 0,38 \left(0,5 + \frac{4,9}{13,8} \right)^2 = 1,27;$$

$$n_t = 0,8 + 0,23 \left(1 - \frac{t_H}{300} \right)^2 = 0,8 + 0,23 \left(1 - \frac{57,2}{300} \right)^2 = 0,95;$$

$$\sigma_T = 250,2 + 279,4 \cdot 1,23 = 593,86 \text{ Н/мм}^2$$

$$\sigma'_{T1} = 1,27 \cdot 0,95 \cdot 250,2 + 279,4 \cdot 1,23 = 645,53 \text{ Н/мм}^2;$$

$$\sigma_{T(i-1)} = 0,96 \cdot 240,19 \cdot + 261,8 \cdot 0,623 = 393,68 \text{ Н/мм}^2;$$

Опір метала деформації σ_{Φ}

$$\sigma_{\Phi} = 1,15[475,18 + 0,67(645,53 - 475,18)] = 677,68 \text{ Н/мм}^2.$$

Напруга заднього і переднього натягу штаби:

$$\sigma_3 = 0,15 \cdot \sigma_{T(i-1)} = 0,15 \cdot 475,18 = 71,28 \text{ Н/мм}^2.$$

$$\sigma_{\Pi} = 0,15 \cdot \sigma_{T1} = 0,15 \cdot 593,86 = 89,08 \text{ Н/мм}^2.$$

$$n_{cp} = 1 - \frac{\sigma_3 + \sigma_{\Pi}}{2 \cdot \sigma_{\Phi}} = 1 - \frac{71,28 + 89,08}{2 \cdot 677,68} = 0,88;$$

$$n_1 = 1 - \frac{\sigma_n}{\sigma_{\phi 1}} = 1 - \frac{89,08}{677,6} = 0,87;$$

Допоміжні параметри і довжина контакту з врахуванням пружних деформацій валків і штаби:

$$C = n_{cp} \cdot \sigma_{\phi} \frac{R}{47500} = 0,88 \cdot 677,68 \frac{225}{47500} = 2,82 \text{ мм};$$

$$\sigma_{\phi 1} = 1,15 \cdot \sigma_{\tau 1} = 1,15 \cdot 645,53 = 742,36 \text{ Н/мм}^2;$$

$$x_2 = n_1 \cdot \sigma_{\phi 1} \frac{R}{95000} = 0,87 \cdot 742,36 \frac{225}{95000} = 1,53 \text{ мм}^2;$$

$$h_{cp} = \sqrt{H \cdot h} = \sqrt{1,95 \cdot 1,44} = 1,65 \text{ мм};$$

$$l'_c = \frac{2,82 + \sqrt{7,95 + 4 \cdot 225 \cdot 0,55 \left(1 - 2,82 \frac{0,08}{2 \cdot 1,65}\right)}}{2 \cdot \left(1 - 2,82 \frac{0,08}{2 \cdot 1,65}\right)} = 13,16 \text{ мм};$$

$$l_c = l'_c + x_2 = 13,16 + 1,53 = 14,7 \text{ мм}.$$

Знаходимо енергосилові параметри:

$$C_n = 0,17(1 + 14,7 \cdot 0,08) = 0,37,$$

$$p'_{cp} = 677,68(1 + 0,37 \cdot 0,08 \cdot 14,7/1,65) = 856,39 \text{ Н/мм}^2;$$

$$p_{cp} = p'_{cp} \left(1 - \frac{\sigma_n + \sigma_3}{2p'_{cp}}\right) = 856,39 \left(1 - \frac{71,28 + 89,08}{2 \cdot 856,39}\right) = 776,21 \text{ Н/мм}^2;$$

$$P = p_{cp} \cdot l_c \cdot B = 776,21 \cdot 0,0148 \cdot 1,06 = 12,1 \text{ МН}.$$

$$\psi_c = 0,48 \left(\frac{\sqrt{225 \cdot 0,55}}{14,7} \right)^2 = 0,275.$$

$$M = 2 \cdot 0,275 \cdot 12,1 \cdot 0,0147 + 1,95 \cdot 0,225 \cdot 71,28 \cdot 10^{-3} \left(1 - \frac{1,4}{1,95} \cdot \frac{89,08}{71,28} \right) \\ = 0,101 \text{ МН} \cdot \text{м}.$$

$$N = 960 \cdot 0,101 \cdot \frac{14}{0,225} = 6060 \text{ кВт}.$$

$$m = 2,2 - 0,65 \left(\frac{57,2}{480} - 0,042 \right)^{1,4} = 2,18;$$

$$\Delta t = 0,05 \cdot 2,18 \cdot (776,21 + 677,68) \ln \frac{1,95}{1,4} = 56,3^{\circ}\text{C}.$$

Параметри прокатки в клітках 3 і 4 визначили аналогічно. Результати розрахунку звели в таблицю 3.6.

Таблиця 3.6 - Розрахунок режимів деформації й енергосилових параметрів при холодній прокатці штаби 0,8х1060 мм

№ клеті	H, мм	h, мм	Δh , мм	ε , %	ε_{Σ} , %	v, м/с	$P_{\text{ср}}$, Н/мм ²	P МН	Ψ	M, МНм	N, кВт	t _к , °C	f _п	σ_f , Н/мм ²	λ_c , мм
1	2,65	1,95	0,7	26,4	26,4	4,1	563,25	8,7	0,356	0,072	3090	57,2	0,13	467,39	14,39
2	1,95	1,4	0,55	28,2	47,2	5,7	776,21	12,1	0,275	0,101	6060	92,54	0,08	677,68	14,7
3	1,4	1,03	0,37	26,4	61,6	7,8	913,4	12,72	0,333	0,11	5636	136,8	0,091	712,7	13,14
4	1,03	0,8	0,22	21,3	69,8	10,0	762,3	9,65	0,167	0,023	1618,8	148,6	0,049	709,4	11,94

По результатам розрахунків побудувати графік розподілу сили прокатки по клітям: 1-за експериментальними даними Маєровича; 2- за моделлю В.О. Ніколаєва; 3-за моделлю А.В. Третьякова та порівняти точність моделі 2 і 3 з експериментальними даними

Використана література:

1. Теория прокатки: [справочник] / А. И. Целиков, А. Д. Томлёнов, В. И. Зюзин [и др.]. – М.: Металлургия, 1982. – 335с.
2. *Николаев, В.А.* Горячая прокатка листов и полос / В.А. Николаев. – Запорожье: ЗГИА, 2013. – 169 с.
3. *Клименко, П.Л.* Упрочнение стали и цветных металлов при холодной и горячей деформации / П.Л. Клименко. – Днепропетровск: Пороги, 2011. – 187 с. – ISBN 978-617-518-133-1.
4. *Сафьян, М.М.* Прокатка широкополосной стали / М.М. Сафьян. – М.: Металлургия, 1969. – 460 с.
5. *Василев, Я. Д.* Теорія позовжньої прокатки: [підручник] / Я. Д. Василев, О. А. Мінаєв. – Донецьк: УНІТЕХ, 2009. – 488 с.
6. Прицип М.Г. Методичний посібник для виконання курсових робіт з дисципліни ТЛ і КМЦ та загальної частини дипломних проектів для студентів спеціальності 7.090218 спеціалізації ММО, МО та ОМТ :- Запоріжжя: ЗДІА, 2002. - 74с.
7. *Ніколаєв, В.О.* Виробництво плоского прокату / В.О. Ніколаєв, В.Л. Мазур. – Запоріжжя, ЗДІА, 2010. – 320 с.
8. *Ніколаєв, В.О.* Холодная прокатка листов и полос / В.О. Ніколаєв. – Запоріжжя, ЗДІА