

Міністерство освіти і науки України
Запорізький національний технічний університет

Кафедра «Обробки металів тиском»

**Методичні вказівки
до практичних занять з дисципліни
«Сучасні напрямки розвитку прокатки»
для студентів спеціальності 131 – Прикладна механіка,
освітньої програми (спеціалізації) «Обладнання та технології
пластичного формування конструкцій машинобудування»
всіх форм навчання**

Запоріжжя 2018

Методичні вказівки до практичних занять з дисципліни «Сучасні напрямки розвитку прокатки» для студентів спеціальності 131 – Прикладна механіка, освітньої програми (спеціалізації) «Обладнання та технології пластичного формування конструкцій машинобудування» всіх форм навчання. /Укл.: Матюхін А.Ю., Обдул В.Д. - Запоріжжя: ЗНТУ, 2018. - 50 с.

Укладачі: Матюхін А.Ю., доц., канд. техн. наук
Обдул В.Д., доц., канд. техн. наук

Рецензент: Широкобоков., доц., канд. техн. наук

Відповідальний за випуск: Матюхін А.Ю., доц., канд. техн. наук.

Затверджено
на засіданні кафедри ОМТ
протокол № 4 від 22.10.2018

Рекомендовано до видання
НМК машинобудівного факультету
Протокол № 2 від 23.10.2018р.

ЗМІСТ

1 РОЗРАХУНОК ЕНЕРГОСИЛОВИХ ПАРАМЕТРІВ ПРИ ПРОКАТЦІ СМУГ	4
1.1. Гаряча прокатка смуг	4
1.2 Холодна прокатка штаб. Розрахунок напруження течії металу	14
2 РОЗРАХУНОК ПРОДУКТИВНОСТІ СТАНУ	35
2.1. Прокатка на реверсивному (обтискному) стані	35
2.2 Прокатка на безперервних і реверсивних станах і на станах з послідовним розташуванням клітей	43
ЛІТЕРАТУРА.....	50

1 РОЗРАХУНОК ЕНЕРГОСИЛОВИХ ПАРАМЕТРІВ ПРИ ПРОКАТЦІ СМУГ

1.1. Гаряча прокатка смуг

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

$$\begin{cases} P = p_{cp} \cdot B_{cp} \cdot l_{\partial}, \text{МН} \\ M = P \cdot \Psi \cdot l_{\partial}, \text{МН} \cdot \text{м} \end{cases} \quad (1.1)$$

$$N_{np} = 960 M \cdot v / R, \text{кВт}$$

де P , M , N_{np} - сила, крутний момент і потужність при пластичній деформації;

p_{cp} - середнє нормальне контактне напруження (Н/мм²);

B_{cp} - середня ширина штаби (м);

l_{∂} - довжина дуги контакту (м);

Ψ - коефіцієнт положення рівнодіючої сил в осередку деформації;

v - окружна швидкість валків (м/с);

R - радіус валків (м).

У формулі (1.1) крутний момент визначається для одного валка.

Для розрахунку зазначених енергосилових параметрів в першу чергу необхідно визначити напруження течії металу σ_T , коефіцієнт тертя f і показник тертя f_n , середнє нормальне контактне напруження, а також коефіцієнт положення рівнодіючої сил в осередку деформації.

Розрахунок напруження течії металу

$$\sigma_{\phi} = \sigma_T \cdot \lambda \quad (1.2)$$

де σ_T - напруження течії металу;

λ - коефіцієнт Лоде ($\lambda = 1,15$ - для прокатки плоских широких штаб;

$\lambda = 1,0$ - для сортової прокатки металу з розвиненим розширенням).

Напруження течії σ_T визначаємо за моделлю [1] з урахуванням

впливу змісту в металі хімічних елементів. У загальному випадку напруження течії при деформації дорівнює

$$\sigma_T = \sigma_{T\bar{\sigma}} \cdot k_t \cdot k_\varepsilon \cdot k_u \quad (1.3)$$

де $\sigma_{T\bar{\sigma}}$ - базове напруження течії, певне при фіксованих (базових) значеннях температури (t), відносного обтиску (ε) відносної швидкості деформації (u):

$$\varepsilon = \frac{\Delta h}{H}; u = v \cdot \varepsilon / l_0 \quad (1.4)$$

k_t, k_ε, k_u - коефіцієнти, що враховують вплив температури, відносної обтиску і швидкості деформації.

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

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

$$\sigma_{T\bar{\sigma}} = 80 + 25 \cdot \left\{ 1 - \left(\frac{5-N_1}{4,5} \right)^{1,8} \right\} \quad (1.5)$$

для $N_2 \geq 5$ (леговані, високолеговані сталі)

$$\sigma_{T\bar{\sigma}} = 110 + 38 \cdot \left\{ \left(\frac{N_2-2}{32} \right)^{0,25 \cdot N_2} \right\} \quad (1.6)$$

де N_1 , та N_2 - сума хімічних елементів в даній сталі, % (крім заліза, сірки і фосфору).

Формула для визначення коефіцієнту k_t , залежно від температури має вигляд

$$k_t = 1,66 - 1,1 \cdot \left(\frac{t}{400} - 2 \right)^{0,7} \quad (1.7)$$

де t - температура металу, °C.

Розрахунок коефіцієнтів k_t, k_ε, k_u виконують за формулами табл. 1.2, 1.3.

Таблиця 1.1. - Групи сталей для розрахунку напруження течії

Група сталі	Метал
I	Вуглецеві і інструментальні сталі 08кп; 08ю; 20; Ст.3; 45; Ст.6; У8 та інші
II	Леговані і 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
	високолеговані
VII	4Х13; ХІ6Н5М4; Х17Н2; Х18Н9Т; Х18Н12М2Т; Р18

Таблиця 1.2 – Формули для розрахунку поправочного коефіцієнта k_ε

Група сталі	ε	вид вираження
I, II	0,025...0,1	$k_\varepsilon = 0.8 + 0.2(1 - 178(0.1 - \varepsilon)^2)$
I, II	>0,1	$k_\varepsilon = 1 + 0.43(1 - 6.3(0.5 - \varepsilon)^2)$
IV	0,025...0,1	$k_\varepsilon = 0.7 + 0.3(1 - 50(0.1 - \varepsilon)^2)$
IV	>0,1	$k_\varepsilon = 1 + 0.68(1 - 6.6(0.5 - \varepsilon)^2)$
III, VI, VII	0,025... 0,1	$k_\varepsilon = 0.7 + 0.3(1 - 50(0.1 - \varepsilon)^2)$
III, VI, VII	>0,1	$k_\varepsilon = 1 + 0.38(1 - 6.3(0.5 - \varepsilon)^2)$
V	0,025...0,1	$k_\varepsilon = 0.7 + 0.3(1 - 50(0.1 - \varepsilon)^2)$
V	>0,1	$k_\varepsilon = 1.0 + 0.5(1 - 9(0.5 - \varepsilon)^2)$

Таблиця 1.3. – Формули для розрахунку коефіцієнта k_u

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

Приклад. Розрахуємо напруження течії для інструментальної сталі У8 (гр.1) (0,8% С; 0,37% Si, 0,40% Mn; 0,028% S; 0,018P; 0,14% Cr; 0,13% Ni) при $\varepsilon=0.3$ та $u=20 c^{-1}$; $t = 1100^\circ C$:

$$N_1 = 0,8 + 0,37 + 0,4 + 0,14 + 0,13 = 1,84\%$$

$$\sigma_{T0} = 80 + 25 \cdot \left\{ 1 - \left(\frac{5 - 1,84}{4,5} \right)^{1,8} \right\} = 91,7 \text{ Н/мм}^2$$

$$k_t = 1,66 - 1,1 \cdot (2,75 - 2)^{0,7} = 0,74$$

$$k_\varepsilon = 1 + 0,43(1 - 6,3(0,5 - 0,3)^2) = 1,322$$

$$k_u = 1,03 + 0,1 \cdot (2,993 - 2,3)^{1,5} = 1,09$$

Напруження течії металу при $\lambda = 1,0$ дорівнює:
дослідне [2]:

$$\sigma_T = 90 \cdot 0,73 \cdot 1,33 \cdot 1,13 = 100 \text{ Н/мм}^2$$

розрахункове [1]:

$$\sigma_T = 91,7 \cdot 0,73 \cdot 1,322 \cdot 1,09 = 98,5 \text{ Н/мм}^2$$

Помилка в розрахунку в порівнянні з дослідними значенням становить всього 1,5%.

Розрахунок коефіцієнта тертя

Коефіцієнт тертя розраховуємо по моделі з робіт [1,3]:

$$f = f_0 \cdot k_B \cdot k_T \cdot k_M \cdot k_V \cdot k_{CM} \cdot k_{OK} \cdot k_e \quad (1.8)$$

$$f_n = f \cdot (0.92 + 1.27 \cdot \varepsilon) \quad (1.9)$$

де f_0 - базовий коефіцієнт тертя;

$k_B \cdot k_T \cdot k_M \cdot k_V \cdot k_{CM} \cdot k_{OK} \cdot k_e$ - поправочні коефіцієнти, що враховують відповідно: матеріал валків, твердість поверхні валків, матеріал штаби, окружну швидкість валків і відносне обтиснення смуги, тип технологічного мастила, вид окалини на поверхні штаби;

f_n - показник тертя.

Коефіцієнти, f_0 , k_T , k_V рівні:

$$\left. \begin{aligned} f_0 &= 0,27 - 0,1 \left[\left(\frac{t}{400} \right) - 2 \right]^2 \\ k_T &= 1 + 0,43(1 - HSD/65)^2 \\ k_V &= 0,76 - 0,82[1,02 - 0,102V]^2 - \text{при } V < 10 \text{ м/с} \\ k_V &= 0,76 < 10 \text{ м/с} \end{aligned} \right\} \quad (1.10)$$

Коефіцієнт k_e дорівнює ($\varepsilon \square 0,1$)

$$k_e = 0,85 + 0,5\varepsilon \quad (1.11)$$

де t - температура металу, °С, HSD - твердість валків по Шору; V - окружна швидкість валків, м/с; ε - відносне обтиснення.

Значення поправочного коефіцієнта k_B , приймаються в залежності від стану поверхні валків.

Таблиця 1.4 - Значення поправочного коефіцієнта

характеристика валків	Значення
Нові сталеві або чавунні вибілені валки	0,75
Чавунні валки після двох годин роботи	1
Зношені чавунні і сталеві валки	1,15-1,2
Сталеві валки з рискою (накаткою)	1,2-1,4

При прокатці з емульсією ($k_{CM}=1,0$) і мінеральним мастилом коефіцієнт $k_{CM} = 0,9$, а з рослинної - $k_{CM} = 0,8$. При прокатці з пічною окалиною $k_{CM} = 0,7$, а з повітряної (вторинної) $k_{CM} = 1,0$.

Розрахунок середнього нормального контактного напруження

Для всіх випадків гарячої прокатки, вираз для розрахунку середнього нормального напруження має вигляд [1].

$$P_{cp} = \sigma_{\phi} [1 + 0,48 f_n \cdot n_{\phi} \cdot (1 - a) l_{\delta} / h_{cp}] [1 + (1 - l_{\delta} / h_{cp})^2] \quad (1.12)$$

де σ_{ϕ} - опір металу деформації ($\sigma_{\phi} = \sigma_T \cdot \lambda$); σ_T - напруження течії металу; λ - коефіцієнт Лоде ($\lambda = 1 - 1,15$); f_n - показник тертя; n_{ϕ} - коефіцієнт, що враховує вплив додаткових сил тертя в калібрах, а - логарифмічний показник розширення.

Для умов прокатки на блюмінгу, заготівельних, великосортних станів, чорнових клітей сортових станів при

$$l_{\delta} / h_{cp} < 1 \text{ и } f_n \sim 0,4 \quad (1.13)$$

Для слябінгів, товстостілових станів, чорнових клітей широкоштабних станів при $n_{\phi} = 1$, $a \cdot 0,1 l_{\delta} / h_{cp} < 1$ отримаємо

$$P_{cp} = \sigma_{\phi} [1 + 0,2 l_{\delta} / h_{cp}] [1 + (1 - l_{\delta} / h_{cp})^2] \quad (1.14)$$

Для сортових станів при $l_{\delta} / h_{cp} < 1$ маємо

$$P_{cp} = \sigma_{\phi} [1 + 0,48 f_n \cdot n_{\phi} \cdot (1 - a) l_{\delta} / h_{cp}] \quad (1.15)$$

Для листових (штабних) станів гарячої прокатки ($a \sim 0$)

$$P_{cp} = \sigma_{\phi} [1 + 0,48 f_n \cdot l_{\delta} / h_{cp}] \quad (1.16)$$

Для штабних станів холодної прокатки

$$P_{cp} = \sigma_{\phi} [1 + C_n \cdot f_n \cdot l_c / h_{cp}] \quad (1.17)$$

де l_c - довжина дуги контакту з урахуванням пружних

деформацій валків і штаби [1].

Коефіцієнт C_n враховує інтенсивність впливу контактного тертя і дорівнює [1]:

$$C_n = 0,17 \cdot (1 + 14,7 \cdot f_n) \text{ при } f_n < 0,125;$$

$$C_n = 0,48 \text{ при } f_n > 0,125.$$

У разі прокатки штаби з натягом середнє нормальне контактне напруження визначають за виразом [2]

$$P_{cp,n} = P_{cp} \left[1 - \frac{\sigma_n + \sigma_3}{2 \cdot P_{cp}} \right] \quad (1.18)$$

де σ_n та σ_3 - напруження переднього і заднього натягу (приймають з досвідчених допустимих даних).

Необхідні для розрахунку P_{cp} геометричні параметри визначаємо наступним чином:

$$a \approx \Delta b \cdot \frac{h_{cp}}{\Delta h} \cdot B_{cp};$$

$$h_{cp} = 0,5 (H + h) \quad (1.19)$$

$B_{cp} = 0,5(B + b)$ для випадку прокатки в гладких валках і ящиківих калібрах. Для випадку прокатки в гладких валках за формулами [1]:

$$\Delta b = 0,53 \cdot C_{II} \cdot \Delta h \cdot B_{cp} / h_{cp} \quad (1.20)$$

$$C_{II} = 0,24 + B_{cp} / l_\delta \text{ при } B_{cp} / l_\delta \leq 0,76$$

$$C_{II} = e^{(0,9 - 1,2 B_{cp} / l_\delta)^{0,9}} \text{ при } B_{cp} / l_\delta \geq 0,76$$

$$b = B + \Delta b$$

$$B_{cp} = 0,5(B + b)$$

Коефіцієнт n_ϕ для калібрів приймають з даних роботи [1]: для калібрів n_ϕ квадратний - 1,41; круглий - 1,55; овал (однорадіусний), шестикутний - 1,1 ... 1,2; ромб - 1,15 ... 1,30; овальний (ребровою) - 1,35; кутовий - 1,41.

Коефіцієнт положення рівнодіючої сил

Для розрахунку крутного моменту за формулою (1.1), крім сили прокатки, необхідно знати коефіцієнт положення рівнодіючої сил [1-3], який залежить в основному від фактора форми осередку деформації. При прокатці штаб в гладких валках маємо [1]:

$$\left. \begin{aligned} \Psi &= 0,5(l_{\delta}/h_{cp})^{-0,1} \text{ при } l_{\delta}/h_{cp} = 1 \dots 3,5 \\ \Psi &= 0,5(l_{\delta}/h_{cp})^{0,092} \text{ при } l_{\delta}/h_{cp} > 3,5 \end{aligned} \right\} \quad (1.21)$$

При прокатці в калібрах отримали [4]: овал - коло (овал - ребровою овал)

$$\Psi = 0,145(5,6 - l_{\delta}/h_{cp}) \quad (1.22)$$

овал - квадрат (шестикутник - квадрат)

$$\Psi = 0,12(6,1 - l_{\delta}/h_{cp}) \quad (1.23)$$

ромб - квадрат (квадрат - ромб)

$$\Psi = 0,068(8,5 - l_{\delta}/h_{cp}) \quad (1.24)$$

При прокатці високих штаб при $l_{\delta}/h_{cp} \leq 1$ маємо [1]

$$\Psi = 0,53 + 0,19(1 - l_{\delta}/h_{cp})^2$$

Приклад розрахунку сили, моменту і потужності прокатки штаби

Вихідні дані до розрахунку: $H = 20$ мм, $B = 40$ мм, $\Delta h = 6$ мм, $D = 400$ мм, $V = 6$ м/с, $t = 1000^{\circ}$ С, валки чавунні вибілені, вироблені, твердість HSD = 70, матеріал штаби - сталь марки ШХ15, прокатка з охолодженням водою (хімічний склад сталі: 0,93%С, 0,26%Si, 0,34%Mn, 1,48%Cr, 0,16%Ni).

Визначаємо геометричні параметри осередку деформації, використовуючи формули [1]:

1. Товщина штаби після прокатки

$$h = H - \Delta h = 20 - 6 = 14 \text{ мм} \quad (1.25)$$

де H та Δh - вихідна товщина штаби до прокатки і абсолютне обтиснення.

Середня товщина штаби в осередку деформації

$$h_{cp} = 0,5(H + h) = 0,5(20 + 14) = 19 \text{ мм}$$

Довжина дуги і кут контакту штаби з валками

$$l_{\delta} = \sqrt{R \cdot \Delta h} = \sqrt{200 \cdot 6} = 34,6 \text{ мм}$$

$$a = \frac{l_{\delta}}{R} = \frac{34,6}{200} = 0,173 \text{ рад}$$

Відносне обтиснення і швидкість деформації

$$\varepsilon = \frac{\Delta h}{H} = \frac{6}{20} = 0,3(30\%); u = v \frac{\varepsilon}{l_{\delta}} = 6000 \cdot \frac{0,3}{34,6} = 52 \text{ с}^{-1}$$

2. Визначаємо напруження течії металу за формулами (1.1) - (1.5) і табл. 1.1 - 1.3. маємо:

$$N_1 = 0,91 + 0,26 + 0,34 + 1,48 + 0,16 = 3,17\%$$

$$\sigma_{TB} = 80 + 25\{1 - ([5 - 3,17]/45)^{1,8}\} = 95,2 \text{ Н/мм}^2$$

$$k_t = 1,66 - 1,1(2,5 - 2)^{0,7} = 1$$

$$k_u = 1,03 + 0,1(2,996 - 2,3)^{1,5} = 0,9$$

$$k_{\varepsilon} = 1 + 0,43[(1 - 6,3)(0,5 - 0,3)^2] = 1,322$$

$$\sigma_T = 95,2 \cdot 1,0 \cdot 1,322 \cdot 1,09 = 138,5 \text{ Н/мм}^2$$

3. Визначаємо коефіцієнт і показник тертя під час гарячої прокатки за формулою (1.8)

$$f = f_0 \cdot k_B \cdot k_T \cdot k_M \cdot k_V \cdot k_{CM} \cdot k_{OK} \cdot k_e$$

де f_0 - базовий коефіцієнт тертя, що залежить від температури металу

$$f_0 = 0,27 - 0,1 \left(\frac{1000}{400} - 2 \right)^2 = 0,245$$

При твердості валків 70 HSD маємо:

$$k_T = 1 + 0.43 \left(1 - \frac{\text{HSD}}{65}\right)^2 = 1.0$$

Коефіцієнт k_V при $V = 6,0$ м/с з формули (1.10) дорівнює:

$$k_V = 0,76 + 0,82(1 - 0,1 \cdot 6)^2 = 0,927$$

Для відносного обтиску $\varepsilon = 0.3$ маємо:

$$k_e = 0,85 + 0,5 \cdot 0,3 = 1,0.$$

Для вироблених (зношених) валків маємо $k_B \approx 1,2$, для штаби зі сталі ШХ15 - $k_M = 1,0$; при прокатці штаби з вторинною окалиною $k_{OK} = 1,0$; при охолодженні валків водою $k_{CM} = 1,0$.

Тоді коефіцієнт тертя з формули (1.8), та показник тертя з формули (1.9) рівні:

$$f = 0.245 \cdot 1.0 \cdot 0.927 \cdot 1.2 \cdot 1.0 \cdot 1.0 \cdot 1.0 \cdot 1.0 = 0.271$$

$$f_n = 0.27 \cdot (0.92 + 1.27 \cdot 0.3) = 0.354$$

4. Розширення знаходимо з виразу (1.20) при

$$\frac{B_{cp}}{l_0} = \frac{40}{34.6} = 1.16 (B \approx B_{cp})$$

$$C_{II} = e^{(0,9-1,2 \cdot 1,16)^{0,9}} = 0,615$$

$$\Delta b = 0.53 \cdot 0.615 \cdot 6.0 \cdot 40 / (20 - 0.5 \cdot 6) \approx 4.6 \text{ мм}$$

$$b = (B + \Delta b) = (40 + 4.6) = 44.6 \text{ мм}$$

$$B_{cp} = 0.5(B + b) = 0.5(40 + 44.6) = 42.3 \text{ мм}$$

Показник розширення з формули (1.19)

$$a = 1,1 \cdot \frac{1,7}{6,0} \cdot 42,3 = 0,308$$

5. Середнє нормальне контактне напруження розраховуємо з виразу (1.15) для $l_0/h_{cp} \geq 1,0$ при $n_\phi = 1.0$, $\lambda \approx 1.0$

$$l_0/h_{cp} = \frac{34,6}{17} = 2,03$$

$$P_{cp} = 138.5[1 + 0,48 \cdot 0.354(1 - 0.308) \cdot 2.03] = 173 \text{ Н/мм}^2$$

У разі, якщо штабу прокатують, наприклад в квадратному калібрі, то коефіцієнт $n_\phi = 1,4[1, \text{с.179}]$ та $a = 0,308$

$$P_{cp} = 138.5[1 + 0,48 \cdot 0.54(1 - 0.308) \cdot 2.03] = 186,1 \text{ Н/мм}^2$$

Крім того, під час прокатки в калібрах істотно зменшується розширення і, отже, показник розширення «а». Приймавши $a = 0,160$ з формули (1.15) отримаємо ($l_0/h_{cp} \approx const$).

$$P_{cp} = 138.5[1 + 0,48 \cdot 0.354 \cdot 1.41(1 - 0.308) \cdot 2.03] = 195,2 \text{ Н/мм}^2$$

Сила прокатки з виразу (1.1) дорівнює (гладкі валки)

$$P = 173 \cdot 0.346 \cdot 0.0423 = 0.254 \text{ МН}$$

6. Момент, що крутить і потужність прокатки визначаємо за формулою (1.1) для умов прокатки в гладких валках з розширенням з використанням формули (1.21) [1, рис.56] (один валок):

$$\Psi = 0.51(2.03)^{-0.1} \approx 0.48$$

$$M = 0.48 \cdot 0.254 \cdot 0.0346 = 0.0041 \text{ МН} \cdot \text{м}$$

$$N_{np} = 960 \cdot 0,0041 \cdot \frac{6}{0,2} = 114,3 \text{ кВт}$$

Для двох валків маємо $N_{np} = 228,6 \text{ кВт}$. При визначенні повної потужності головного приводу необхідно враховувати втрати в деталях головної лінії стана [2].

1.2 Холодна прокатка штаб. Розрахунок напруження течії металу

Деформація металу в холодному стані супроводжується його зміцненням (наклепом), в результаті чого відбувається підвищення напруження течії металу і, отже, опору металу і сили деформації. При

холодній деформації напруження течії металу залежить від сумарного відносного обтиснення, температури і швидкості деформації; метал розігрівається і його температура підвищується до $t = 200 \dots 300 \text{ }^\circ\text{C}$. Розігрів металу відбувається за рахунок пластичної деформації (відносного обтиску) і швидкості деформації. Чим більше температура і швидкість деформації, тим більше їх вплив на напруження течії металу. Наведемо методику розрахунку в залежності від відносного обтиску, яке визначається з виразу

$$\varepsilon_{\Sigma} = \Delta h_{\Sigma} / H_0 \quad (1.26)$$

де Δh_{Σ} - сумарне обтиснення за n -ну кількість проходів; H_0 - вихідна товщина штаби перед першим проходом (першої кліттю).

Напруження течії металу визначають (після обтиску металу) [3] за формулою

$$\sigma_{T1} = \sigma_{T0} + \Delta\sigma_T \cdot k_e \quad (1.27)$$

де σ_{T0} — вихідне (після гарячої прокатки) до деформації напруження течії металу; $\Delta\sigma_T$ - ступінь зміцнення металу при деформації з $e = 40\%$ (0,4); k_e - коефіцієнт, що враховує ступінь деформації.

Величини σ_{T0} и $\Delta\sigma_T$ залежать від хімічного вуглецевого еквівалента даної марки сталі [1]. Для вуглецевих, конструкційних, низьколегованих марок сталей хімічний еквівалент, величини σ_{T0} та $\Delta\sigma_T$ рівні (табл. 1.4):

$$\left. \begin{aligned} C_3 &= C + \frac{Mn}{6} + \frac{Si}{24} + \frac{Ni}{40} + \frac{Cr}{5} + \frac{Mo}{4} + \frac{V}{14} + \frac{W}{4} \\ \sigma_{T0} &= 210 + 263 \cdot C_3 \\ \Delta\sigma_T &= 209 + 460 \cdot C_3 \end{aligned} \right\} \quad (1.28)$$

Інструментальні сталі:

$$\left. \begin{aligned} C_3 &= C + \frac{Mn}{6} + \frac{Si}{24} + \frac{Ni}{40} + \frac{Cr}{5} + \frac{Mo}{4} + \frac{V}{14} + \frac{W}{4} \\ \sigma_{T0} &= 300 + 314 \cdot (C_3 - 0,7) \\ \Delta\sigma_T &= 175 + 275 \cdot C_3 \end{aligned} \right\} \quad (1.29)$$

Таблиця 1.4. - Група марок сталей при холодній деформації

Група сталі	Марки сталей
I	Вуглецеві, конструкційні та низьколеговані сталі 08кп, 08пс, СтО, Ст2, 20, 40, 45, 50, 85, 09Г2, СтЗкп, Юпс, 20сп, 20пс и др.
II	інструментальні сталі У8, У8ГА, У9А, У10, У12, 9ХФ
III	Леговані сталі (хромисті, хромонікелево-марганцевисті, хромо-нікелеві)
	0Х13,1Х21Н5Т, Х14Г14Н3Т, Х14Г14Н,2Х18Н9, Х18Н9Т, 0Х20Н4АГ10

Леговані, високолеговані сталі:

$$\left. \begin{aligned}
 C_3 &= 5 \cdot C + \frac{Mn}{100} + \frac{Si}{24} + \frac{Ni}{40} + \frac{Cr}{5} + \frac{Mo}{4} + \frac{V}{14} + \frac{W}{4} \\
 \sigma_{T0} &= 300 + 314 \cdot (C_3 - 0,7) \\
 &\quad \text{для } C_3 \leq 4,2\% \\
 \Delta\sigma_T &= 300 + 460 \cdot (C_3 - 3,06)^{0,65} \\
 &\quad \text{для } C_3 \geq 4,2\% \\
 \Delta\sigma_T &= 500 + 100 \cdot (5,6 - C_3)^3
 \end{aligned} \right\} \quad (1.30)$$

Коефіцієнт k_e визначають наступним чином:

$$\left. \begin{aligned}
 \varepsilon_\Sigma &= 0 \dots 0,4 \\
 k_e &= 1 - \left(1 - \frac{\varepsilon_\Sigma}{0,4}\right)^{1,5+C} \\
 \varepsilon_\Sigma &= 0,41 \dots 0,7 \\
 k_e &= 1 + 0,87(\varepsilon_\Sigma - 0,4)^{0,5}
 \end{aligned} \right\} \quad (1.31)$$

де C – вміст вуглецю в сталі

Розрахунок напруження течії σ_{T1} виконують за формулою (1.27) (σ_{T1} - напруження течії металу після проходження кліті). Для зручності розрахунків в табл. 1.5 дані значення вуглецевого еквівалента для

деяких марок сталей. Для інших марок сталей вуглецевий еквівалент визначають за довідковими даними для хімічного складу сталей. (Див табл. 1.7).

Опір металу на вході і виході з осередку деформації дорівнює:

$$\sigma_{\phi 0} = 1,15 \cdot \sigma_{T(i-1)} \quad \sigma_{\phi 1} = 1,15 \cdot \sigma_{T1} \quad (1.32)$$

Середній опір металу в осередку деформації:

$$\sigma_{\phi} = 1,15 \cdot (\sigma_{T(i-1)} + 0,67(\sigma_{T1} - \sigma_{T(i-1)})) \quad (1.33)$$

де $\sigma_{T(i-1)}$ - напруження течії металу до кліті (перед проходом).

Таблиця 1.5. - Величини вуглецевого еквівалента для деяких марок сталей

Марка сталі	C _з ,%	Марка сталі	C _з ,%	Марка сталі	C _з ,%
низьколеговані		інструментальні		леговані	
08кп	0,16	У8А	0,841	0Х13	3,07
Ст.0	0,141	У8ГА	1,011	1Х21Н5Т	4,95
Ст.2	0,172	У9А	1,016	Х14Г14Н3	3,55
20	0,432	У10	1,103	Т	4,19
40	0,592	У12	1,399	Х17АГ14	4,78
45	0,642	9ХФ	1,037	2Х18Н9	4,36
50	0,692			Х18Н9Т	
85	1,024				
09Г2	0,451				
10Г2	0,40				
65Г	0,894				

Процес холодної прокатки істотно відрізняється від гарячої прокатки. По-перше, деформація металу відбувається при температурі $t_n=20...300^\circ\text{C}$, що викликає появу значних контактних нормальних і дотичних напружень. По-друге, внаслідок великих нормальних напружень відбувається пружна деформація валків і смуги. Останнє призводить до збільшення довжини дуги контакту за рахунок

збільшення діаметра валків. Порівняно високі значення температури і швидкості деформації смуги роблять помітний вплив на умови тертя і напруження течії металу. Все це необхідно враховувати при розрахунку контактних напружень при холодній прокатці штаб.

Розрахунок енергосилових параметрів виконуємо для умов прокатки штаби 1x1100мм зі сталі марки ст.2кп (табл. 1.6) на стані 2030.

Діаметр робочих валків дорівнює $D_p = 615$ мм, опорних $D_{оп} = 1600$ мм, максимальна швидкість прокатки 31,6 м/с (при прокатці тонких вузьких смуг), потужність головних приводів в клітках по 8400кВт.

Таблиця 1.6. - Режим деформації штаби 3,5-1,0/1100мм зі сталі марки ст.2кп на п'ятиклітьовому стані 2030

Кліть	Геометричні параметри деформації			Силові параметри деформації		V м/с
	H	h	Δh	E	ϵ_{Σ}	
1	3.5	2.67	0.83	23.7	23.7	8.16
2	2.67	1.9	0.77	29.1	45.8	11.56
3	1.9	1.39	0.51	26.5	60.2	15.8
4	1.39	1.12	0.27	19.4	68.0	19.6
5	1.12	1.0	0.12	10.7	71.4	21.9

Приклад. Виконаємо розрахунок енергосилових параметрів при холодній прокатки штаби зі сталі марки ст.2кп з розмірами 1x1100 мм на ШСХП 2030. Відповідно до відомими даними приймаємо шорсткість робочих валків (R_a , мкм)

Таблиця 1.7 - Шорсткість робочих валків

№ кліти	1	2-4	5
R_a , мкм	5-6	1.2-1.5	4-5

Мастильно-охолоджуюча рідина (МОР) - емульсія мінерального масла з концентрацією 4%.

Відносне обтиснення в кожній кліті визначимо за формулою:

$$\varepsilon_i = \frac{\Delta h_i}{H_i} = (H_i - h_i)/H_i \quad (1.34)$$

а сумарне обтиснення у всіх клітях деформуємої штаби визначаємо за формулою

$$\varepsilon_{\Sigma i} = \frac{H_0 - H_i}{H_0} \quad (1.35)$$

де i - номер кліті; H_0 - товщина гарячекатаного підкату; h_i - товщина штаби після i -ої кліті; Δh_i - абсолютне обтиснення в i -ої кліті.

Так, маємо (табл. 1.6) для кліті 1 (індивідуальні та сумарні обтиску):

$$\varepsilon_1 = \frac{3.5 - 2.67}{3.5} = \frac{0.83}{3.5} = 0.273(23.7\%)$$

$$\varepsilon_{\Sigma 1} = \frac{3.5 - 2.67}{3.5} = \frac{0.83}{3.5} = 0.273(23.7\%)$$

Для кліті 2 отримаємо:

$$\varepsilon_2 = \frac{2.67 - 1.9}{2.67} = \frac{0.77}{2.67} = 0.291(29.1\%)$$

$$\varepsilon_{\Sigma 2} = \frac{2.67 - 1.9}{2.67} = \frac{0.77}{2.67} = 0.291(29.1\%)$$

Кліть 1. Визначимо параметри прокатки в кліті 1. Маючи на увазі, що швидкість валків в п'ятій кліті дорівнює $v_5 = 21,9$ м/с, то з умови сталості секундних об'ємів знаходимо (табл. 1.6)

$$v_1 = h_5 \cdot \frac{v_5}{h_1} = 1 \cdot \frac{21.9}{2.68} = 8.16 \text{ м/с}$$

Визначимо коефіцієнт тертя за формулами роботи [1]
при температурі деформації $t > 25^\circ \text{C}$. (див. вище).
Коефіцієнт тертя дорівнює

$$f = f_0 \cdot k_d \cdot k_{\Pi} \cdot k_B \cdot k_{CM} \cdot k_t \quad (1.36)$$

де f_0 - базовий коефіцієнт тертя; $k_d \cdot k_{\Pi} \cdot k_B \cdot k_{CM} \cdot k_t$ - поправочні коефіцієнти, що враховують відповідно величину обтиску, шорсткість поверхні смуги, тип технологічного мастила і температуру смуги.

Базовий коефіцієнт тертя дорівнює:
при $v < 7,5$ м/с

$$f_0 = 0.076 - 0.0019v + 0.0031(R_a - 0.6) \cdot [(1.07 - 0.14v)^3 + 0.054v - 0.26] \quad (1.37)$$

$$f_0 = k_d \cdot k_{\Pi} \cdot k_B \cdot k_{CM} \cdot k_t \quad (1.38)$$

Коефіцієнт $k_V = 1,0$ при $V < 8,0$ м/с, а при $V > 8,0$ м/с:

$$k_V = 0,56 + 0,7(1 - 0,025V)^2 \quad (1.39)$$

Коефіцієнт k_a дорівнює

$$k_a = 0.5 + 1.77 \cdot \varepsilon + 0.165 \cdot R_a(1 - 3.33\varepsilon) \quad (1.40)$$

Коефіцієнт k_{Π} дорівнює

$$k_{\Pi} = 1,09 - 0,05 \cdot R_{ап} \quad (1.41)$$

де $R_{ап}$ - шорсткість поверхні смуги, мкм.

Коефіцієнт k_t , визначаємо за формулою

$$k_t = a + c(1.11 - 0.0044 \cdot t_H)^n \quad (1.42)$$

де t_H - температура металу перед осередком деформації, °С, n - коефіцієнти, що дорівнюють:

для мінеральної емульсії, мастил.: ИС - 20, ПКС - 1:

$$\left. \begin{aligned} a &= 0.31_{+1.7} \cdot \varepsilon \\ c &= 1.2_{-1.8} \cdot \varepsilon \\ n &= 3.84_{-5.7} \cdot \varepsilon \end{aligned} \right\} \quad (1.43)$$

для високов'язкого мастила типу ТЭМП – 1, коефіцієнти рівні:

$$a=1,19; c = 0,31; n = 2,0.$$

Коефіцієнт k_{CM} дорівнює:

емульсія мінерального мастила - $k_{CM} = 1.0$;

бавовняне натуральне мастило - $k_{CM} = 0.94$

соняшникова гідрогенізована олія (ПКС) - $k_{CM} = 0.85$;

пальмова олія - $k_{CM} = 0.83$;

бавовняне полімералізоване мастило - $k_{CM} = 0.56$.

Для наведених вихідних даних за формулами (1.36) - (1.43) ($k_{CM} = 1.0$; $k_V = 1.0$; $R_a = 2,5\text{мкм}$) отримаємо ($k_V = 1,0$):

$$f_0 = 0,062 + 0,005(5 - 0,6) = 0,084;$$

$$k_d = 0,5 + 1,77 - 0,223 + 0,165 \cdot 5(1 - 3,33 - 0,223) = 1,08;$$

$$k_{\Pi} = 1,09 - 0,05 - 2,5 = 0,97$$

Для розрахунку коефіцієнта k_t , в кліті 1 початкову температуру штаби можна приймати в межах 20 ... 30°C. У наступних 23 клітках початкова температура штаби перед кліттю повинна дорівнювати кінцевій температурі t_k в попередньої кліті з урахуванням втрат температури на міжклітьовій ділянці $\Delta t_{\Pi} = 10 \dots 20^\circ\text{C}$. Для нашого прикладу в кліті 1 приймаємо $t_H = 25^\circ\text{C}$ і коефіцієнт k_t , з формули (1.42) дорівнює

$$\left. \begin{aligned} a &= 0.31_{+1.7} \cdot 0,237 \approx 0,7 \\ c &= 1.2_{-1.8} \cdot 0,237 \approx 0,53 \\ n &= 3.84_{-5.7} \cdot 2,46 \approx 2,46 \end{aligned} \right\} \quad (1.44)$$

$$k_t = 0,7 + 0,53(1,22 - 0,0044 \cdot 25)^{2,46} = 1,23 \quad (1.45)$$

Загальна величина коефіцієнта тертя з формули (1.36)

становить, ($k_V = 1,0$)

$$f = 0,084 \cdot 1,08 \cdot 0,97 \cdot 1,23 = 0,108$$

Показник тертя дорівнює

$$f_n = 1.6 \cdot 0.108 - 0.018 = 0,155$$

2. Розрахуємо напруження течії металу використовуючи дані [1].

Сталь марки Ст.2кп (табл. 1.7) містить наступні хімічні елементи (%): (0,09 - 0,15) С; < 0,03 Si; (0,35...0,5) Mn. Вуглецевий еквівалент для вуглецевої сталі в загальному випадку дорівнює

$$C_3 = C \cdot \frac{Si}{24} + \frac{Mn}{6} + \frac{Ni}{40} + \frac{Cr}{5} + \frac{Mo}{4} + \frac{V}{14} + \frac{W}{4}$$

Базове (вихідне після гарячої прокатки) напруження течії і приріст відповідно рівні:

$$\sigma_{T0} = 210 + 263 \cdot C_3$$

$$\Delta\sigma_T = 209 + 460 \cdot C_3$$

Коефіцієнт, що враховує обтиснення дорівнює: для $\varepsilon_Z = 0...0,4$

$$k_e = 1 - \left(1 - \frac{\varepsilon_Z}{0.4}\right)^{1.5+C} \quad (1.46)$$

Для $k_e = 0.87(\varepsilon_Z - 0.4)^{0.5}$

Напруження течії металу після кліті визначають за виразом

$$\sigma_{T1} = \sigma_{T0} + \Delta\sigma_T \cdot k_e \quad (1.47)$$

Напруження течії розраховуємо при максимальному вмісті хімічних елементів (1.44) - (1.47):

$$\left. \begin{aligned}
 C_3 &= 0.15 + 0.001 + 0.083 = 0.234 \\
 \sigma_{T0} &= 210 + 263 \cdot 0.234 \\
 \Delta\sigma_T &= 209 + 460 \cdot 0.234 = 271.6 \text{ Н/мм}^2 \\
 k_e &= 1 - \left(1 - \frac{0.237}{0.4}\right)^{1.65} = 0.77 \\
 \Delta\sigma_{T1} &= 271.6 + 318 \cdot 0.77 = 515.6 \text{ Н/мм}^2
 \end{aligned} \right\}$$

В результаті впливу швидкості і температури деформації напруження течії металу при прокатці змінюється в порівнянні з отриманим за формулами (1.44) - (1.47). У відповідність з дослідженнями Ю.Б. Сигалова і А.П. Грудєва врахувати цей вплив пропонується спеціальними коефіцієнтами [1]. Оскільки досліджувалась зміна напруження течії σ_{T0} , тобто без врахування ступеня деформації, то вираз для визначення σ_T в кінці осередка деформації слід записати таким чином:

$$\sigma_{T1} = n_u \cdot n_t \cdot \sigma_{T0} + \Delta\sigma_T \cdot k_e \quad (1.48)$$

Напруження течії металу на міжклітьовому проміжку (перед наступною кліттю) визначимо за формулою

$$\sigma_{T(i-1)} = n_t \cdot \sigma_{T0} + \Delta\sigma_T \cdot k_{e(i-1)} \quad (1.49)$$

Середній опір металу в осередку деформації:

$$\sigma_\phi = 1,15 \cdot \left(\sigma_{T(i-1)} + 0,67(\sigma_{T1} - \sigma_{T(i-1)}) \right) \quad (1.50)$$

де $\sigma_{T(i-1)}$ - напруження течії металу перед кліттю (проходом); σ_{T1} - напруження течії металу після кліті (проходу); n_t та n_u 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 визначаємо за виразом

$$u = v \cdot \varepsilon / l_c \quad (1.51)$$

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

Оскільки довжина дуги l_c поки невідома визначаємо її за формулою

$$l_c = [1.3 + 4.1(\varepsilon_\Sigma - 0.2)^3] \cdot \sqrt{R \cdot \Delta h} \quad (1.52)$$

Для кліті 1 довжина l_c дорівнює

$$l_c = [1.3 + 4.1(0.237 - 0.2)^3] \cdot \sqrt{300 \cdot 0.83} \approx 22.4 \text{ мм}$$

а швидкість деформації

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

З формул (1.51) отримаємо:

$$n_u = 1 + 0.38 \left(0.5 + \frac{4.46}{13.8} \right)^2 = 1.254$$

$$n_t = 0.8 + 0.23 \left(1 - \frac{25}{300} \right)^2 = 0.993$$

Тоді з формул (1.48) і (1.49) отримаємо ($k, =0$; $n, =1$; $n, =1$):

$$\sigma_{T1} = 1.254 \cdot 0.993 \cdot 271.6 + 318 \cdot 0.37 = 583 \text{ Н/мм}^2$$

$$\sigma_{T(i-1)} = \sigma_{T0} = 271.6 \text{ Н/мм}^2$$

З виразу (1.50) отримаємо

$$\sigma_\Phi = 1.15 \cdot (271.6 + 0.67(583 - 271.6)) = 553 \text{ Н/мм}^2$$

3. Довжина дуги контакту з урахуванням пружних деформацій валків і штаби дорівнює:

$$l_c' = \frac{C + \sqrt{C^2 + 4R\Delta h \left(1 - C \frac{f_n}{2h_{cp}}\right)}}{2 \left(1 - C \frac{f_n}{2h_{cp}}\right)} \quad (1.53)$$

$$C = n_{cp} \cdot \sigma_\phi \frac{R}{47500} \quad (1.54)$$

$$x_2 = n_1 \cdot \sigma_{\phi 1} \cdot \frac{R}{95000}$$

$$l_c = l_c' + x_2 \quad (1.55)$$

де R – радіус валка; n_{cp} и n_1 – коефіцієнти, що враховують вплив середніх напружень натягу і напруження натягу переднього кінця штаби.

$$n_{cp} = 1 - \frac{\sigma_n - \sigma_3}{2 \cdot \sigma_\phi}; n_1 = 1 - \frac{\sigma_n}{\sigma_1} \quad (1.56)$$

де σ_n та σ_3 – напруження переднього і заднього натягу.

Напруження натягу змінюються в широких межах. Для безперервного стану перед кліттю 1 напруження $\sigma_3 = 20 \dots 30 \text{ Н/мм}^2$.

На проміжних (міжклітьових) ділянках:

$$\sigma_n = (0,1 \dots 0,2)\sigma_{T1}; \sigma_3 = (0,1 \dots 0,2)\sigma_{T(i-1)}$$

Так як розрахунок виконуємо для кліті 1, то приймаємо:

$$\sigma_3 = 25 \text{ Н/мм}^2, \sigma_n = 0,15 \cdot \sigma_{T1} = 0,15 \cdot 515,6 = 77,5 \text{ Н/мм}^2$$

З виразу (1.56) знайдемо:

$$n_{cp} = 1 - \frac{25 + 77,5}{2 \cdot 553} = 0,91$$

$$n_1 = 1 - \frac{25 + 77,5}{2 \cdot 553} = 0,91$$

$$n_1 = 1 - \frac{77,5}{1,15 \cdot 515,6} \approx 0,9$$

З виразу (1.54) знаходимо параметри C і x_2 :

$$C = 0,91 \cdot 553 \frac{300}{47500} = 3,2 \text{ мм}$$

$$x_2 = 0,9 \cdot 600 \cdot \frac{300}{95000} = 1,7 \text{ мм}$$

Складова дуги контакту з виразу (1.53) дорівнює

$$l_c' = \frac{3,20 \sqrt{10,3 + 4 \cdot 300 \cdot 0,83 \left(1 - 3,20 \frac{0,155}{2 \cdot 3,07}\right)}}{2 \left(1 - 3,20 \frac{0,155}{2 \cdot 3,07}\right)} = 18,1 \text{ мм}$$

Повна довжина дуги контакту з (1.55) дорівнює

$$l_c = 18,1 + 1,7 = 19,80 \text{ мм}$$

4. Знаходимо енергосилові параметри прокатки.
Середнє нормальне контактне напруження ($f_n > 0,12$)

$$P_{cp}' = \sigma_\phi \left[1 + C_H \cdot f_n \cdot l_c / h_{cp}\right] \quad (1.57)$$

і з урахуванням натягу

$$P_{cp} = P_{cp}' \left[1 - \frac{\sigma_n - \sigma_3}{2 \cdot P_{cp}'}\right] \quad (1.58)$$

при $f_n = 0,155$ ($f_n > 0,12$) коефіцієнт $C_H = 0,48$.
Всі параметри відомі, то отримаємо:

$$P_{cp}' = 553 \left[1 + 0,48 \cdot 0,155 \cdot 19,8 / 3,07\right] = 820 \text{ Н/мм}^2$$

Сила прокатки:

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

$$P = 770 \cdot 0,0198 \cdot 1,1 = 16,9 \text{ МН}$$

Момент прокатки з урахуванням впливу натягу дорівнює (на двох валках):

$$M = 2\Psi \cdot P \cdot l_c + H \cdot B \cdot R \cdot \sigma_3 \cdot 10^6 \cdot \left(1 - \frac{h}{H} \cdot \frac{b}{B} \cdot \frac{\sigma_n}{\sigma_3}\right) \quad (1.59)$$

де Ψ - коефіцієнт положення рівнодіюча сил.

З виразу (1.21) випливає, що $\Psi = 0,48$

$$\Psi_c = \Psi(l_d/l_c)^2; \Psi_c = 0,48(l_d/l_c)^2 \quad (1.60)$$

$$\Psi_c = 0,48 \left(\frac{\sqrt{300 \cdot 0,83}}{19,8} \right)^2 = 0,288$$

Крутний момент з формули (1.59) на двох валках:

$$M = 2 \cdot 0,288 \cdot 16,9 \cdot 0,0198 + 3,5 \cdot 1100 \cdot 0,3 \cdot 25 \cdot 10^6 \cdot (1 - 0,76 \cdot 3,11) = 0,198 - 0,053 = 0,145 \text{ МН} \cdot \text{м}$$

Потужність на бочці валків:

$$N = 960 \cdot 0,145 \cdot \frac{816}{0,3} = 3770 \text{ кВт}$$

що менше потужності встановленого приводу ($N = 8400$ кВт).

5. Визначимо температуру t_k смуги на виході з кліті за формулою [1]

$$t_k = \varphi \cdot t_H + \Delta \quad (1.61)$$

де Δt - приріст температури в осередку деформації за формулою А.П. Чекмарьова та ін. [1]:

$$\Delta t = 0,05 \cdot m(P_{cp} + \sigma_{cp}) \ln H/h \quad (1.62)$$

де m - коефіцієнт, що дорівнює для низьковуглецевої сталі

$$m = 2.2 - 0.65 \left(\frac{t_H}{480} - 0.042 \right)^{1.4} \quad (1.63)$$

$$\Delta t = 0,05 \cdot 2.175(770 + 553) \ln 3.5/2.67 = 38.3 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$t_k = \varphi \cdot 25 + 38.3 = 63.3 \text{ }^\circ\text{C}$$

де φ - коефіцієнт, що враховує охолодження штаби на міжклітьовій ділянці ($\varphi = 0,6 \dots 1,0$).

У кліті 1 коефіцієнт $\varphi = 1$.

Кліть 2. Визначимо швидкість прокатки в кліті 2

$$h_2 = 1.9 \text{ мм}; \Delta h_2 = 0.78 \text{ мм}$$

$$v_2 = h_5 \cdot v_5 / h_2$$

Інші параметри визначимо по наведеним вище алгоритмом розрахунку для кліті 1:

$$f_0 = k_v \cdot [0.062 + 0.005(R_a - 0.6)]$$

$$f_0 = k_v \cdot [0.062 + 0.005(R_a - 0.6)]$$

$$f_0 = 0.91 \cdot [0.062 + 0.005 \cdot 0.9] \approx 0.06$$

$$k_v = 0.56 + 0.7(1 - 0.025v)^2$$

$$k_v = 0.56 + 0.7(1 - 0.025 \cdot 11.56)^2 = 0.91$$

$$k_a = 0.5 + 1.77 \cdot 0.291 + 0.165 \cdot 1.5(1 - 3.32 \cdot 0.291) \approx 1.0$$

$$k_{\Pi} = 1,05 - 0.05R_{am}$$

$$k_{\Pi} = 1,05 - 0.05 \cdot 2.5 = 0.93$$

Шорсткість штаби перед кліттю №2 приймають рівним $R_{am} = 0.5R_{a(i-1)}$, тобто половині висоти шорсткості після попередньої кліті. Коефіцієнт k_{CM} для емульсії мінерального мастила приймаємо $k_{CM} = 1,0$.

Далі маємо (температуру t_H приймаємо з розрахунку кліті 1 - - $t_H = 63 \text{ }^\circ\text{C}$

$$\left. \begin{aligned} a &= 0.31_{+1.7} \cdot 0,291 \approx 0,81 \\ c &= 1.2_{-1.8} \cdot 0,291 \approx 0,38 \\ n &= 3.84_{-5.7} \cdot 2,91 \approx 2,17 \end{aligned} \right\}$$

$$\begin{aligned} k_t &= 0,81 + 0,38(1.11 - 0.0044 \cdot 63)^{2,17} = 1,23 \\ f &= 0,06 \cdot 1,0 \cdot 0,93 \cdot 1,0 \cdot 1,14 = 0,062 \end{aligned}$$

$$f_n = 1.6 \cdot 0.062 - 0.018 = 0,08$$

Сумарне обчислення в двох клітках (кліті 1 і 2) дорівнює за формулою (1.35):

$$\varepsilon_{\Sigma i} = \frac{H_0 - H_i}{H_0} = \frac{3,5 - 1,9}{3,5} = 0,458$$

Початкове напруження течії підкату σ_{T0} розрахований раніше (для кліті 1) і він дорівнює $\sigma_{T0} = 271,6 \text{ Н/мм}^2$. Зміцнення металу при $\varepsilon_{\Sigma i} = 0,4$, також визначено раніше, і воно дорівнює $\sigma_{T0} = 318 \text{ Н/мм}^2$.

Визначимо коефіцієнт зміцнення металу k_ε при $\varepsilon_\Sigma \geq 0,4$ з формули (1.46) кліті 2:

$$k_\varepsilon = 1 + 0,87(0,458 - 0,4)^{0,5} \approx 1,09$$

$$l_d = \sqrt{R \cdot \Delta h} = \sqrt{300 \cdot 0,78} = 15,3 \text{ мм}$$

$$l_c = [1,3 + 4,1(0,48 - 0,2)^3] \sqrt{300 \cdot 0,78} = 20,7 \text{ мм}$$

$$u = v \cdot \frac{\varepsilon}{l_c} = 11560 \cdot \frac{0,291}{20,7} = 163c^{-1}$$

$$\ln u = 5.09$$

$$n_u = 1 + 0.38 \left(0.5 + \frac{\ln u}{13.8} \right)^2 = 1 + 0.38 \left(0.5 + \frac{5.09}{13.8} \right)^2 = 1.33$$

$$n_t = 0.8 + 0.23 \left(1 - \frac{t_H}{300} \right)^2 = 0.8 + 0.23 \left(1 - \frac{63}{300} \right)^2 = 0.98$$

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

$$\sigma_{T1} = 1.33 \cdot 0.98 \cdot 271.6 + 318 \cdot 1.99 = 673 \text{ Н/мм}^2$$

$$\sigma_{T(i-1)} = 0.98 \cdot 271.6 + 318 \cdot 0.77 = 515.6 \text{ Н/мм}^2$$

де $\sigma_{T(i-1)}$ - напруження течії на міжклітьовому проміжку (перед наступною кліттю).

Опір металу деформації σ_{Φ}

$$\sigma_{\Phi} = 1,15[515,6 + 0,67(673 - 515,6)] = 710 \text{ Н/мм}^2$$

Задній і передній натяг штаби в кліті 2 і інші параметри рівні:

$$\sigma_3 = 0,15 \cdot \sigma_{T(i-1)} = 0,15 \cdot 515,6 = 77,5 \text{ Н/мм}^2$$

$$\sigma_{\Pi} = 0,15 \cdot \sigma_{T1} = 0,15 \cdot 582 = 87 \text{ Н/мм}^2$$

$$n_{\text{cp}} = 1 - \frac{\sigma_{\Pi} + \sigma_3}{2 \cdot \sigma_{\Phi}} = 1 - \frac{77,5 - 87}{1420} = 0,88$$

$$n_1 = 1 - \frac{\sigma_{\Pi}}{\sigma_1} = 1 - \frac{87}{775} = 0,88$$

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

$$C = n_{\text{cp}} \cdot \sigma_{\Phi} \cdot \frac{R}{47500} = 0,88 \cdot 710 \cdot \frac{300}{47500} = 3,96 \text{ мм}$$

$$\sigma_{\Phi 1} = 1,15 \cdot \sigma_{T1} = 1,15 \cdot 673 = 775 \text{ Н/мм}^2$$

$$x_2 = n_1 \cdot \sigma_{T1} \cdot \frac{R}{95000} = 0,88 \cdot 775 \cdot \frac{300}{95000} = 2,15 \text{ мм}^2$$

$$l_c' = \frac{C + \sqrt{C^2 + 4R\Delta h \left(1 - C \frac{f_n}{2h_{\text{cp}}}\right)}}{2 \left(1 - C \frac{f_n}{2h_{\text{cp}}}\right)}$$

$$l_c' = \frac{3,96 + \sqrt{15,6 + 4 \cdot 300 \cdot 0,78 \left(1 - 396 \frac{0,08}{4,52}\right)}}{2 \left(1 - 3,96 \frac{0,08}{4,52}\right)} = 18,6 \text{ мм}$$

$$l_c = l_c' + x_2 = 18,6 + 2,16 = 20,75 \text{ мм}$$

Знаходимо енергосилові параметри:

$$P_{cp}' = \sigma_\phi \left[1 + C_H \cdot f_\pi \cdot l_c / h_{cp}\right]$$

$$C_H = 0,17 \cdot (1 + 14,7 \cdot f_\pi) \text{ при } f_\pi < 0,125;$$

$$C_H = 0,48 \text{ при } f_\pi > 0,125.$$

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

$$P_{cp}' = 710 \cdot \left[1 + 14,7 \cdot 0,08 \cdot \frac{20,75}{2,26}\right] = 900 \text{ Н/мм}^2$$

$$P_{cp} = P_{cp}' \left[1 - \frac{\sigma_\pi - \sigma_3}{2 \cdot P_{cp}'}\right] = 900 \cdot \left[1 - \frac{77,5 - 87}{2 \cdot 900}\right] = 810 \text{ Н/мм}^2$$

$$P = P_{cp} \cdot l_c \cdot B = 810 \cdot 0,2075 \cdot 1,1 = 18,5 \text{ МН}$$

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

$$M = 2 \cdot 0,259 \cdot 18,5 \cdot 0,2075 + 2,68 \cdot 1,1 \cdot 0,3 \cdot 77,5^{-3} \cdot \left(1 - \frac{1,9}{2,68} \cdot \frac{87}{77,5}\right) = 0,194 + 0,014 = 0,208 \text{ МН} \cdot \text{м}$$

$$N = 960 \cdot \frac{V}{R} \cdot M = 960 \cdot 0,208 \cdot \frac{11,56}{0,3} = 770 \text{ кВт}$$

$$m = 2,2 - 0,65 \left(\frac{t_H}{480} - 0,042\right)^{1,4} = 2,2 - 0,65 \left(\frac{63}{480} - 0,042\right)^{1,4} = 2,17$$

$$\Delta t = 0,05 \cdot m (P_{cp} + \sigma_{cp}) \ln H/h = 0,5 \cdot 2,17 \cdot (810 + 710) \cdot \ln 2,68/1,9 = 61^\circ\text{C}$$

$$t_k = \varphi \cdot 25 + \Delta t = 0,9 \cdot 63 + 61 = 118 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Аналогічно виконаємо розрахунки і для інших клітей.

Таблиця 1.8 - Середній вміст хімічних елементів в сталях, %

Варіант	Марка сталі	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	V	W
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	08кп	0,08	0,01	0,38	0,02	0,06	-	-	-
2	Ст.0	0,07	0,01	0,25	0,08	0,09	-	-	-
3	Ст.2	0,06	сл	0,26	0,05	0,01	-	-	-
4	20	0,215	0,27	0,65	0,3	0,3	-	-	-
5	40	0,42	0,27	0,65	0,3	0,3	-	-	-
6	45	0,46	0,27	0,65	0,3	0,3	-	-	-
7	50	0,51	0,27	0,65	0,3	0,3	-	-	-
8	85	0,85	0,27	0,60	0,3	0,3	-	-	-
9	09Г2	0,10	0,27	1,6	0,3	0,3	-	-	-
10	10Г2	0,11	0,27	1,4	0,3	0,3	-	-	-
11	65Г	0,65	0,27	1,05	0,3	0,3	-	-	-
12	12ХГСА	0,25	1,05	0,95	0,95	-	-	-	-
13	30ХГСА	0,32	1,05	0,95	0,95	-	-	-	-
14	У8А	0,8	0,22	0,23	-	-	-	-	-
15	У8ГА	0,85	0,22	0,47	0,1	0,12	-	-	-
16	У9А	0,9	0,22	0,23	0,3	0,20	-	-	-
17	У10	1,0	0,25	0,25	0,1	0,12	-	-	-
18	У12	1,2	0,25	0,25	0,2	0,25	-	-	-
19	9ХФ	0,85	0,25	0,45	0,55	-	2,22	-	-
20	0Х13	0,08	0,6	0,60	0,12	-	-	-	-
21	1Х21Н5Т	0,07	0,8	0,80	0,21	5,3	-	-	-
22	Х14Г143Т	0,10	0,8	14,0	14,0	3,0	-	-	-
23	Х14Г14Н	0,12	0,8	14,0	14,0	1,30	-	-	-

Продовження таблиці 1.8

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
24	X17AГ 14 (ЭП21 3)	0,15	0,8	14,5	17,0	0,6	-	-	-
25	2X12H 9	0,17	0,8	1,5	18,0	-	-	-	-
26	X18H9 Т	0,12	0,8	1,5	18,0	9,0	-	-	-
27	12X8 МА	0,11	0,33	0,31	4,8	0,17	0,5	-	-
28	ШХ15	1,02	0,25	0,30	1,5	0,3	-	-	-
29	40Х	0,4	0,27	0,65	0,95	0,4	-	-	-
30	Ст.6	0,43	0,25	0,65	-	-	-	-	-
31	Ст.2кп	0,14	0,07	0,45	-	-	-	-	-
32	Ст.3	0,18	0,21	0,47	-	-	-	-	-
33	10ХН	0,10	0,42	0,42	0,74	0,37	-	-	-
34	15ХС НД	0,13	0,63	0,60	0,95	0,4	-	-	-
35	12ХН3 А	0,13	0,29	0,40	0,98	3,02	-	-	-
36	18ХГТ	0,22	0,25	0,86	1,16	0,22	-	-	-
37	45ХН	0,45	0,32	0,75	0,61	1,22	-	-	-
38	20ХГН Рг	0,18	0,29	0,92	0,91	0,99	-	-	-
39	60С2	0,56	1,8	0,78	0,13	0,30	-	-	-
40	ХНГ2 М	0,35	0,27	1,49	0,03	0,11	0,28	-	-
41	20ХН М	0,26	0,35	0,57	0,03	0,29	0,49	-	-
42	60ХНГ С2М	0,61	1,58	0,94	0,13	0,27	0,06	-	-
43	18ХН ВА	0,16	0,28	0,39	1,46	4,22	0,05	-	0,80

Продовження таблиці 1.8

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
44	ХВГ	0,95	0,22	0,91	0,21	0,21	-	-	1,2
45	12ХН МФА	0,12	0,26	0,78	0,51	0,87	0,44	0,34	-
46	15Х5 М	0,15	0,5	0,45	5,0	-	0,6	-	-
47	4Х12	0,35	0,33	0,30	12,67	0,10	-	-	-
48	12Х17	0,08	0,45	0,43	17,4	0,31	-	-	-
49	Х18Н1 2М2Т	0,09	0,60	1,0	17,2	11,8	2,3	-	-

2 РОЗРАХУНОК ПРОДУКТИВНОСТІ СТАНУ

2.1. Прокатка на реверсивному (обтискному) стані

Починаючи з 1957 р на блюмінгах і слябінгах застосовують двозлиткову (а іноді і тризлиткову) прокатку. Цю технологію виконують наступним чином. До слябінга підводять два злитки, що лежать на рольгангу послідовно, по можливості без зазору. На відміну від однозлиткового при двозлитковій прокатці частота обертання при захопленні першого злитка може бути менше, змінюється і тахограма прокатки розкатів (рис. 2. 1) [5-8].

Тахограми придатна для аналізу любого режиму прокатки на обтискному стані. Для двозлиткової прокатки характерна повна тахограма. В цьому випадку час прокатки двох розкатів дорівнює

$$\tau_M = \tau_2 + \tau_3 + \tau_{\Pi}' + \tau_4 + \tau_5, c \quad (2.1)$$

де τ_2 та τ_5 - машинний час прокатки по ділянках тахограми (τ_2 - розгін двигуна з розкатом; τ_3, τ_4 - час прокатки на постійній швидкості; (τ_5 - сповільнення двигуна з розкатом); τ_{Π}' - час паузи між розкатом ($\tau_{\Pi}' = 0.5 c$).

Якщо другий розкат захоплюється валками при максимальній швидкості n_M , час паузи $t_{\Pi} = 0$. Кутова максимальна частота обертання валків n_M , знаходиться в межах $n_M = 40 - 65 \frac{\text{об}}{\text{мин}}$ і вона максимальна в останньому проході. Якщо прокатують одинарний розкат, то в загальному випадку, для довгого розкату маємо

$$\tau_M = \tau_2 + \tau_3 + \tau_4 + \tau_5, c \quad (2.2)$$

Визначимо складові циклу двозлиткової прокатки

$$\tau_2 = \frac{L_2}{v_2}; v_2 = (v_3 + v_M) \quad (2.3)$$

де L_2 - довжина розкату на ділянці t_2 ; v_2 - середня швидкість прокатки на ділянці t_2 ; v_3 та v_M - швидкості валків при захопленні і максимальна (відповідні величинам оборотів валків $n_M - n_3$

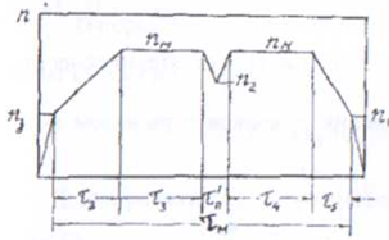


Рисунок 2.1 - Тахограми роботи головного двигуна обтисного стану при дволистовій прокатці

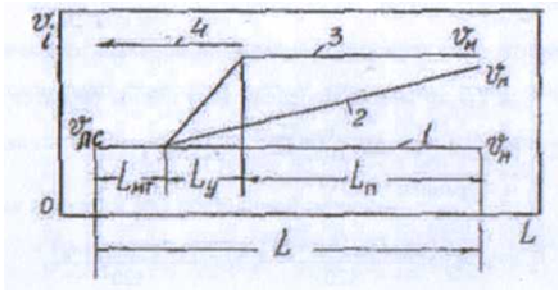


Рисунок 2.2 - Тахограми швидкостей прокатки на ШСГП: 1 - при прокатці без прискорення; 2,3 - при прокатці з прискоренням; 4 - напрямок прокатки

Аналогічно на ділянці

—

(2.4)

де L - довжина розкату на ділянці ; v_n - середня швидкість прокатки на ділянці ; v_{nmax} - швидкість при викиді розкату з валків.

Час прокатки на постійній швидкості дорівнює:

(2.5)

— довжина розкату при максимальній постійної швидкості

Час прискорення і уповільнення валків з розкату можна визначити з виразів:

$$\tau_2 = \frac{n_M - n_3}{a} \quad \tau_5 = \frac{n_M - n_3}{b} \quad (2.6)$$

де n_M - максимальне число оборотів валків; a та b - прискорення і уповільнення валків з розкатом ($a = 30$ об/мин · с, $b = 40$ об/мин · с).

Якщо відомі швидкості v_2 та v_M (вони попередньо задаються), то час τ_2 і τ_5 , то можна визначити з довжини розкату L_2 і L_5 . Середні швидкості прокатки (через задані обороти валків) на ділянках τ_2 та τ_5 дорівнюють:

$$v_2 = \frac{\pi \cdot D_K \cdot (n_M - n_3)}{120}; \quad v_5 = \frac{\pi \cdot D_K \cdot (n_M - n_3)}{120} \quad (2.7)$$

де $n_M - n_3$ - число оборотів валків при захопленні і викиді розкату;

D_K – діаметр валків в калібрі, що катає.

За даними А.П. Чекмарьова та ін. Число оборотів при захопленні дорівнює:

Таблиця 2.1 – Число оборотів

Калібр	n , об/хв
I (гладка бочка)	10-15
II, III	15-30
IV, V	30-40

число оборотів при викиді слід приймати за умови $n_B \approx n_3$. Тепер, використовуючи вирази (2.6) и (2.7) можна визначити довжини L_2 та L_5 з формул (2.3.) и (2.4.)

$$L_2 = \tau_2 \cdot v_2; \quad L_5 = \tau_5 \cdot v_5 \quad (2.8)$$

Довжина розкату L_{3M} що прокатується при постійній швидкості v_M дорівнює:

$$L_{3M} = L_3 + L_4 = 2 \cdot L_{сл} \cdot \mu_\Sigma - L_2 - L_5 \quad (2.9)$$

де $L_{сл}$ - довжина злитка з прибутковою частиною; μ_Σ – сумарний коефіцієнт витяжки до розглянутого проходу включно. Максимальна швидкість валків v_M розраховується з формули:

$$v_M = \frac{\pi \cdot D_k \cdot n_M}{60} \quad (2.10)$$

Час прокатки при постійній швидкості

$$\tau_{3,5} = \tau_3 + \tau_4 = (2 \cdot L_{cл} \cdot \mu_\Sigma - L_5) / v_M \quad (2.11)$$

За формулами (2.1) - (2.9) визначають τ_M в кожному проході, а потім сумарне машинний час у всіх проходах і темп прокатки злитків. Паузи між проходами по дослідним даним складають $\tau_{\Pi} = 1,3 \dots 3,0$ с, паузи між злитками (парами злитків) становить $\tau_{cл} = 1,3 \dots 3,0$ с. Мінімальний час пауз визначається часом пересування натискних витків (валків) на установку заданого зазору, часом реверсування валків, відстанню від заднього кінця розкату до валків при викиді розкату на рольганг в даному проході.

Темп прокатки злитка (пари злитків) визначається з формули

$$T = \sum \tau_M + \sum \tau_{\Pi} + \tau_{cл} \quad (2.12)$$

де T - темп прокатки - час прокатки злитка до готового продукту плюс пауза між кінцем прокатки одного злитка і завданням у валки нового злитка.

За величиною темпу прокатки визначають технічно можливу годинну продуктивність стану за виразом

$$A = 3600 \cdot \frac{G}{T}, \text{ т/ч} \quad (2.13)$$

де G - маса злитка (заготовки, штаби).

Так як протягом календарного року прокатуються злитки (заготовки, штаби) різного перетину і маси, то розраховують годинну продуктивність для всього сортаменту і потім визначають середньозважену продуктивність, т/ч:

$$A_{cp} = \frac{100}{\frac{a_1}{A_1} + \frac{a_2}{A_2} + \dots + \frac{a_n}{A_n}} \quad (2.14)$$

де $a_1, a_2 \dots a_n$ - питома вага різних профілів злитків (заготовок, штаб), прокочуються за рік, %.

Фактичний річний час роботи стану дорівнює:

$$T_{\phi} = n_u \cdot (24 - 1.5) \cdot (k_r \cdot k_{\text{пр}} \cdot k_{\text{кр}}) \quad (2.15)$$

де n_u - коефіцієнт використання устаткування стану ($n_u = 0,9 \dots 0,95$); k_r — кількість календарних днів у році; $k_{\text{пр}}, k_{\text{кр}}$ - кількість днів відповідно на планово-попереджувальні та капітальний ремонт; 24 і 1,5 - число годин в добі і на змінний профілактичний ремонт стану.

Приклад. Визначити час одночасної прокатки двох розкатів на блюмінгу в проміжному проході. Довжина злитка $L_{\text{сл}} = 2,5$ м, маса злитка $G = 10$ т, сумарний коефіцієнт витяжки до даного проходу включно $\mu_{\Sigma} = 3,0$, число оборотів при захопленні і викиді в третьому калібрі без кантування $n_3 = n_B = 30$ об/хв, максимальне число обертів $n_M = 45$ об/хв, діаметр валків, що катає $D_k = 1100$ мм.

За формулами (2.6) знаходимо час розгону і гальмування валків:

$$\tau_2 = \frac{45}{30} = 1.5 \text{ с} \qquad \tau_5 = \frac{45}{40} = 1.12 \text{ с}$$

Знаходимо середні швидкості прокатки на ділянках τ_2 та τ_5 , за виразами (2.7):

$$v_2 = \frac{3.14 \cdot 1.1 \cdot (45 + 30)}{120} = 2.15 \text{ м/с}$$

$$v_5 = \frac{3.14 \cdot 1.1 \cdot (45 + 30)}{120} = 2.15 \text{ м/с}$$

З виразів (2.8) визначимо довжини розкату, що прокатуються в періоди розгону і прискорення:

$$L_2 = 1,5 \cdot 2,15 = 3,15 \text{ м}; L_5 = 1,12 \cdot 2,15 = 2,41 \text{ м}$$

Довжина двох розкатів, що прокатуються при постійній швидкості з формули (2.9) дорівнює:

$$L_{3,4} = 2 \cdot 2.5 \cdot 3.0 - 3.23 - 2.41 = 9.36 \text{ м}$$

Максимальна швидкість v_M з формули (2. 10) дорівнює

$$v_M = \frac{3,14 \cdot 1,1 \cdot 45}{60} = 2,58 \text{ м/с}$$

Час прокатки при швидкості v_M з виразу (2. 11):

$$\tau_{3,4} = \frac{L_{3,4}}{v_M} = \frac{2,95}{2,2} = 1,35 \text{ с}$$

Сумарний машинний час прокатки розкатів в даному проході з формули (2. 1)

$$\tau_M = 1,5 + 3,63 + 1,12 + 0,5 = 6,75 \text{ с}$$

Приклад. Для умов прокатки в попередньому прикладі визначимо час прокатки в другому проході з кантуванням двох розкатів. В цьому випадку $n_3 = 20$ об/хв, а $n_B = n_M = 35$ об/хв. Діаметр, що катає в калібрі I дорівнює $D_k = 1200$ мм, а коефіцієнт витяжки $\mu_\Sigma = 1,2$. На схемі (рис.2.1) цього режиму прокатки відповідає сума ділянок ($\tau_2 + \tau_3$).

При розрахунку, використовуємо формули (2.6) - (2.11):

$$\tau_2 = \frac{35}{20} = 1,75 \text{ с}$$

$$v_2 = \frac{3,14 \cdot 1,2 \cdot (35 + 20)}{120} = 1,74 \text{ м/с}$$

$$L_2 = 1,75 \cdot 1,74 = 3,05 \text{ м}$$

$$L_3 = (L - L_2) = 2 \cdot 2,5 \cdot 1,2 - 3,05 = 2,95 \text{ м}$$

$$v_M = \frac{3,14 \cdot 1,2 \cdot 35}{60} = 2,2 \text{ м/с}$$

$$\tau_3 = \frac{L_3}{v_M} = \frac{2,95}{2,2} = 1,35 \text{ с}$$

$$\tau_M = \tau_2 + \tau_3 = 1,75 + 1,35 = 3,1 \text{ с}$$

Приклад. Для умов прокатки в першому прикладі визначимо час прокатки одного злитка (розкату) в четвертому проході з кантуванням (рис.2.1, ділянку τ_2). Число оборотів при захопленні $n_3 = 20$ об/хв. Максимальна швидкість може бути визначена за формулою ($\mu_\Sigma =$

1,40, $a = 30$ об/хв с).

$$n_M = 60 \sqrt{\frac{L_2}{\pi \cdot D_k} + \frac{n_3^2}{3600}} \quad (2.16)$$

$$n_M = 60 \sqrt{\frac{2,5 \cdot 1,4}{3,14 \cdot 1,2} + \frac{400}{3600}} = 58 \text{ об/мин}$$

Отже, при довжині розкату $L_2 = 3,5$ мм допустима максимальна швидкість дорівнює $n_M = 58$ об/хв. Однак таку швидкість, як правило, в перших проходах не застосовуються внаслідок перевантаження двигуна. Тому приймаємо для розрахунку $n_M = 40$ об/хв. Тоді

$$v_2 = \frac{3,14 \cdot 1,2 \cdot (40 + 20)}{120} = 1,88 \text{ м/с} \quad \tau_2 = \frac{L_2}{v_2} = \frac{3,5}{1,88} = 1,86 \text{ с}$$

Приклад. Визначимо машинний час прокатки одного розкату в проміжному проході в калібрі І при наявності ділянок τ_2 та τ_5 (рис. 2.1) Ділянка з постійною швидкістю відсутня. Такий режим можливий при прокатці розкату невеликої довжини в проходах, де відсутня кантування. В цьому режимі уповільнення валків виконують до моменту досягнення двигуном максимальної допустимої швидкості. Тоді можна прийняти $n_3 = n_B = 20$ об/хв; $L_2 = L_2 \cdot \mu_\Sigma = 2,5 \cdot 1,9 = 4,75$ м. При розрахунку використовуємо дані попередніх прикладів. Визначимо максимально допустиму кількість обертів за формулою ($a = 30$ об /хв·с, $b = 40$ об/хв·с):

$$n_M = 49 \cdot \sqrt{\frac{L_2}{\pi \cdot D_k} + \frac{n_3^3}{3600} + \frac{n_B^2}{7200}} \quad (2.17)$$

$$n_M = 49 \cdot \sqrt{\frac{4,75}{3,14 \cdot 1,2} + \frac{400}{3600} + \frac{400}{7200}} = 58 \text{ об/хв}$$

З урахуванням практичних даних приймаємо $n_M = 45 \frac{\text{об}}{\text{хв}}$ і за формулами (2.3), (2.4) і іншим формулами визначимо τ_M :

$$v_2 = \frac{3,14 \cdot 1,2 \cdot (45 + 20)}{120} = 2,04 \text{ м/с}$$

$$v_2 = \frac{3,14 \cdot 1,2 \cdot (45 + 20)}{120} = 2,04 \text{ м/с}$$

$$\tau_{2,5} = \frac{L_{2,5}}{v_{2,5}} = \frac{4,75}{2,04} = 2,33 \text{ с}$$

Приклад. Для того, щоб визначити годинну продуктивність при прокатуванні на обтискному стані необхідно розрахувати величини машинного часу для кожного проходу і встановити час пауз. Час пауз між проходами без кантування дорівнює.

$$\tau_{\Pi} = 0,345 + 0,78 \cdot v_{\text{ср}} \quad (2.18)$$

де $v_{\text{ср}}$ - середня швидкість прокатки в проході перед паузою м/с ($\tau_{\Pi} = 1,3 \dots 3,0 \text{ с}$).

Час паузи в проходах з кантуванням визначається за формулою ($\tau_{\Pi} = 3,0 \dots 4,0 \text{ с}$).

$$\tau_{\Pi} = 4,24 - 0,611 \cdot v_{\text{ср}} \quad (2.19)$$

Пауза після виходу розкату з останнього проходу перед завданням наступного злитка дорівнює

$$\tau_{\text{сл}} = \frac{\Delta H}{v_{\text{наж}}} + \frac{v_{\text{наж}}}{u} \quad (2.20)$$

де ΔH - висота підйому верхнього валка перед першим проходом в калібрі 1, мм; $v_{\text{наж}}$ - швидкість натискних гвинтів, мм/с; u - прискорення при переміщенні верхнього валка ($u = 100 \dots 150 \text{ мм/с}^2$).

Після розрахунку для всіх проходів за умовами наведених прикладів для двозлиткової прокатки машинного часу і часу пауз отримали $T = 83,5 \text{ с}$. Тоді годинна продуктивність з виразу (2.13) дорівнює

$$A = 3600 \cdot \frac{20}{83,5} = 864 \text{ т/ч}$$

Фактичний час роботи стану з формули (2.15) дорівнюватиме ($k_r = 365 \text{ суток}$, $k_{\text{пр}} = 12 \text{ суток}$, $k_{\text{кр}} = 7 \text{ суток}$)

$$T_{\phi} = 0,95 \cdot 22,5 \cdot (365 - 12 - 7) = 7400 \text{ часов}$$

У разі якщо в даному календарному році капітальний ремонт відсутній, то $T_{\phi} = 7550$ час.

Річне виробництво стану для першого варіанту T_{ϕ} дорівнює

$$A_{\text{Год}} = A_{\text{ср}} \cdot T_{\phi} = 864 \cdot 7,4 \cdot 10^3 = 6,4 \text{ млн. т} \quad (2.21)$$

Фактичне виробництво придатного прокату визначають за формулою

$$A_{\text{Год}} = A_{\text{Год}} / k_{\text{рм}} \quad (2.22)$$

де $k_{\text{рм}}$ - коефіцієнт витрати металу (при прокатці на обтискних станах $k_{\text{рм}} = 1,1 - 1,3$).

2.2 Прокатка на безперервних і реверсивних станах і на станах з послідовним розташуванням клітей

Безперервні стани гарячої прокатки (ШСГП). При прокатці на цих станах в чистовій групі клітей використовується кілька швидкісних режимів (рис. 2.2). На стані старого типу (першого - другого покоління) штабу прокатують в чистовій групі при постійній швидкості, що дорівнює 10-12 м / с (рис. 2.2, крива 1). Для цього режиму час прокатки визначають з виразу (2.9) $\tau = L/v_{\text{м}}$.

На сучасних станах штабу прокатують в перший період зі швидкістю 10 ... 12 м / с (швидкість, при якій моталки здатні захоплювати штабу в безаварійному режимі), а потім прокатка штаби йде з прискоренням в межах $a = 0,03 \dots 0,1$ м/с.

Прокатка з прискоренням забезпечує зменшення поздовжньої різнотовщинності штаб, що виникає внаслідок температурного клину від переднього до заднього кінців штаби. У цьому випадку розрахунок машинного часу дещо ускладнюється. Так, під час прокатки зі швидкісного режиму 2 машинний час наближено можна визначити наступним чином. В першу чергу визначимо час прокатки на постійній швидкості до входу смуги в моталку

$$\tau_{\text{MT}} = \frac{L_{\text{MT}}}{v_{\text{MT}}} \quad (2.23)$$

де L_{MT} - відстань між осями останньої кліті чистової групи і моталки; v_{MT} - прокатка з постійною швидкістю.

Максимальна величина швидкості буде дорівнювати:

$$\left. \begin{aligned} v_M &= v_{\Pi} + a \cdot \tau_y \\ v_M &= L/\tau \end{aligned} \right\} \quad (2.24)$$

де L - довжина штаби, що прокатується з прискоренням; τ_y - машинний час з прискоренням смуги.

Вирішуючи спільно рівняння (2.24) щодо v_M , після перетворень отримаємо

$$v_M = 0,5 \cdot v_{\text{ПС}} + \sqrt{0,25 + v_{\text{ПС}}^2 + L_y \cdot a} \quad (2.25)$$

Тоді час прокатки на змінній швидкості складе:

$$\tau_y = 2 \cdot L_y / (v_{\text{ПС}} + v_M) \quad (2.26)$$

$$L_y = L - L_{\text{МТ}}$$

де L - повна довжина готової штаби

$$L = L_{\text{сл}} \cdot \mu_{\Sigma}$$

де $L_{\text{сл}}$ - довжина вихідного сляба; μ_{Σ} - сумарний коефіцієнт витяжки на безперервному стані (ШСГП) (для чистової групи).

Сумарний машинний час дорівнює

$$\tau_M = \tau_{\text{МТ}} + \tau_y \quad (2.27)$$

При прокатці з великим прискоренням «а» (Крива 3) тільки частина довжини штаби прокатується в режимі прискорення, а велика довжина смуги прокатується на максимальній швидкості. В цьому випадку задають максимальну швидкість прокатки v_M і прискорення «а», а визначають машинний час τ_y за першим виразом формули (2.24)

$$\tau_y = (v_M - v_{\text{ПС}}) \quad (2.28)$$

Потім розраховують довжину L_y з виразу

$$L_y = v_M \cdot \tau_y \quad (2.29)$$

Наступним кроком є визначення L_{Π} - довжини, що прокатується

на постійній швидкості і машинний час прокатки:

$$L_{\Pi} = L - L_{\text{MT}} - L_y \quad (2.30)$$

$$\tau_{\text{МП}} = L_{\Pi}/v_{\text{M}}$$

де L_{Π} - довжини штаби, прокочується на постійній швидкості. Повний машинний час дорівнюватиме:

$$\tau_{\text{M}} = \tau_{\text{MT}} + \tau_y + \tau_{\text{МП}} \quad (2.31)$$

Приклад. Визначимо машинний час прокатки штаби довжиною 600м при $v_{\text{M}} = 12$ м/с.

А. Швидкісний режим по рис. 2.2 (крива 1) [формула (2.23)]:

$$\tau_{\text{M}} = \tau_{\Pi} = \frac{L}{v_{\Pi}} = \frac{600}{12} = 50 \text{ с}$$

Б. Швидкісний режим по рис. 2.2. (Крива 2), $a = 0,05$ м/с², $v_{\text{ПС}} = 12$ м/с, $L_{\text{MT}} = 100$ м (вираз 2.27)

$$L_y = L - L_{\text{MT}} = 600 - 100 = 500 \text{ м}$$

$$v_{\text{M}} = 0,5 \cdot 12 + \sqrt{0,25 + 12^2 + 500 \cdot 0,05} = 13,8 \text{ м/с}$$

$$\tau_y = 2 \cdot L_y / (v_{\text{ПС}} + v_{\text{M}}) = 1000 / 25,8 = 38,7 \text{ с}$$

$$\tau_{\text{МП}} = \frac{L_{\Pi}}{v_{\text{M}}} = \frac{100}{12} = 8,5 \text{ м/с}$$

$$\tau_{\text{M}} = 8,5 + 38,7 = 47,2 \text{ с}$$

В. Швидкісний режим по рис. 2.2. (Крива 2), $v_{\text{M}} = 20$ м/с, $a = 0,25$ м/с², $v_{\text{ПС}} = 20$ м/с, $L = 1000$ м, $L_{\text{MT}} = 100$ м, вираз (2.31):

$$\tau_y = \frac{20 - 12}{0,25} = 32 \text{ с}$$

$$L_y = 20 \cdot 32 = 640 \text{ м}$$

$$L_{\Pi} = 1000 - 100 - 640 = 260 \text{ м}$$

Час паузи між штабами можна приймати

Прокатка на безперервному і реверсивному станах холодної прокатки.

На безперервному і реверсивному станах швидкісні режими прокатки схожі. Після захоплення штаби має місце прискорення валків і штаби до максимальної швидкості, зниження швидкості до при прокатці зварного шва, прокатка на максимальній швидкості другого (наступного рулону) і уповільнення штаби для змотування на моталку. При прокатці на реверсивному і безперервному станах (режим 1, рис. 2.3) початку і закінчення прокатки відповідає . Після закінчення прискорення

На стані безперервної прокатки швидкість після закінчення прокатки рулону знижується до , при якій частина штаби (по шву) розрізають, а другу частину продовжують прокатувати і змотувати на другу моталку (режим 2).

Визначимо час зі швидкісного режиму 1 (суцільна лінія).

Довжина штаби в період прискорення і уповільнення визначимо за виразами:

де a та b - прискорення і уповільнення валків.

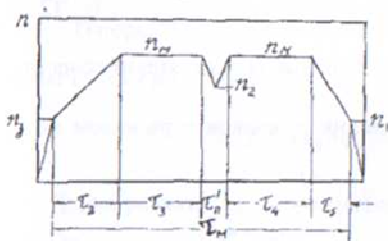


Рисунок 2.3 - Тахограми швидкісного режиму (1, 2) при холодній прокатці штаб на безперервному і реверсивному станах і напрямком прокатки (3)

Довжина ділянки шва, що прокатується на зменшеній швидкості, визначається з виразів:

$$L_{\text{ш}} = 0.5 \cdot (v_{\text{М}} + v_{\text{ш}}) \cdot \left. \begin{array}{l} \tau_{\text{ш}}' = \frac{v_{\text{М}} - v_{\text{ш}}}{a} \\ \tau_{\text{ш}} = \tau_{\text{ш}}' + \tau_{\text{ш}}'' \end{array} \right\} \left. \begin{array}{l} \tau_{\text{ш}}'' = \frac{v_{\text{М}} - v_{\text{ш}}}{b} \\ L_{\text{ш}}'' = 0.5 \cdot (v_{\text{М}} + v_{\text{ш}}) \cdot \tau_{\text{ш}}'' \\ L_{\text{ш}} = L_{\text{ш}}' + L_{\text{ш}}'' \end{array} \right\} \quad (2.33)$$

де $\tau_{\text{ш}}$ та $L_{\text{ш}}$ - час і довжина штаби на ділянках прокатки шва ($v_{\text{ш}} = 2 \dots 5$ м/с).

Довжина штаби, що прокатується при постійній швидкості дорівнює

$$\begin{aligned} L_n &= L - L_y - L_{\text{ш}} \\ L &= G/h \cdot b \cdot y \end{aligned} \quad (2.34)$$

де L - довжина штаби; G - маса зварного рулону; b - кінцева товщина штаби, м; y - питома маса металу т/м ($7,8 \text{ т/м}^3$)

Машинний час при прокатці на постійній швидкості дорівнює

$$\tau_{\text{П}} = \frac{L_{\text{П}}}{v_{\text{М}}} \quad (2.35)$$

Загальна машинний час прокатки з урахуванням виразів (2.32) - (2.35) дорівнює

$$\tau_{\text{М}} = \tau_y + \tau_z + \tau_{\text{ш}} + \tau_{\text{П}} \quad (2.36)$$

Якщо на стані прокатуються рулони без зварних швів, то $\tau_{\text{ш}} = 0$. Аналогічним чином розраховують машинний час і на реверсивних станах. Темп прокатки визначають для безперервного і реверсивного стану за виразами відповідно:

$$\left. \begin{array}{l} T = t_{\text{М}} + t_{\text{р}} \\ T = \sum t_{\text{М}} + t_{\text{р}} \end{array} \right\} \quad (2.37)$$

де $\sum t_{\text{М}}$ - сума машинного часу загальної кількості проходів на реверсивному стані; $t_{\text{р}}$ - пауза між рулонами ($t_{\text{р}} = 30 - 60$ с).

На стані безперервної прокатки машинний час визначають

наступним чином. Машинне час прискорення і уповільнення валків з штабою дорівнює (режим 2 - пунктир):

$$\left. \begin{aligned} \tau_y &= (v_M - v_{MT})/a \\ \tau_3 &= (v_M - v_{MT})/b \end{aligned} \right\} \quad \left. \begin{aligned} L_y &= (v_M - v_{MT}) \cdot 2 \cdot \tau_y \\ L_3 &= (v_M - v_{MT}) \cdot 2 \cdot \tau_3 \end{aligned} \right\}$$

де v_{MT} - швидкість змотування штаби моталкою ($v_{MT} = 2-10$ м/с).

Довжина штаби, що прокочується на постійній швидкості дорівнює

$$L_{\Pi} = L - L_y - L_3$$

$$\tau_{\Pi} = \frac{L_{\Pi}}{v_M} \quad (2.39)$$

Сумарний машинний час і темп прокатки рівні:

$$\left. \begin{aligned} \tau_M &= \tau_y + \tau_3 + \tau_{\Pi} \\ T &= \tau_{\Pi} \end{aligned} \right\} \quad (2.40)$$

Годинну і річну продуктивність визначають за формулами п. 2.1.

Приклад. Визначити темп прокатки для безперервного стану холодної прокатки штаби (швидкісний режим I, рис. 2.3).

Визначимо τ_y , τ_3 , L_y , L_3 за виразами (2.32)

$$\left. \begin{aligned} \tau_y &= \frac{12}{0,55} = 21,8 \text{ с} \\ \tau_3 &= \frac{12}{0,65} = 19,5 \text{ с} \end{aligned} \right\} \quad \left. \begin{aligned} L_y &= \left(\frac{12}{5}\right) \cdot 21,8 = 131 \text{ м} \\ L_3 &= \left(\frac{12}{5}\right) \cdot 19,5 = 118 \text{ м} \end{aligned} \right\}$$

Час і довжина ділянки шва з виразів (2.33), рівні

$$\tau_{ш}' = \frac{12 - 4}{0,55} = 14,5 \text{ с}$$

$$\tau_{ш}' = \frac{12 - 4}{0,65} = 12,3 \text{ с}$$

$$L_{ш}' = 0,5 \cdot (12 + 4) \cdot 14,5 = 116 \text{ м}$$

$$L_{ш}' = 0.5 \cdot (12 + 4) \cdot 12,3 = 98 \text{ м}$$

$$\tau_{ш} = \tau_{ш}' + \tau_{ш}'' = 14,5 + 12,3 = 26,8 \text{ с}$$

$$L_{ш} = 116 + 98 = 214 \text{ м}$$

Довжина штаби з виразу (2.34)

$$L = \frac{20,0}{0,0008} \cdot 1,03 \cdot 7,85 = 3240 \text{ м}$$

$$L_{п} = L_{м} = 3240 - 131 - 118 - 214 = 2777 \text{ м}$$

Час прокатки на максимальній (постійній) швидкості:

$$\tau_{п} = \frac{2777}{12} = 231 \text{ с}$$

Машинний час прокатки

$$\tau_{м} = \tau_{у} + \tau_{з} + \tau_{п} = 21,88 + 19,8 + 26,8 + 231 = 299,1 \text{ с}$$

Розрахунок машинного часу для режиму 2 роблять за аналогією з попереднім прикладом [формули (2.38) - (2,40)]. Розрахунок машинного часу для реверсивних товстолистових станів виконують по режиму 1 при $L_{ш} = 0$ (рис. 2.3. режим 1). Час пауз визначається або роботою холодильника або нагрівальними печами.

Розрахунок машинного часу для сортового стану. На безперервних станах, станах з послідовним розташуванням клітей, станах лінійного типу, де прокатка виконується без прискорення і реверсування, машинний час визначається довжиною штаби і швидкістю в останньому проході (в останній кліті), т. $\tau_{м} = L/v_{м}$.

де L - повна довжина штаби, в чистовому проході (кліті); $v_{м}$ - швидкість прокатки в чистовому проході (кліті).

У реверсивних чорнових клітях сортових станів розкат прокатують в кілька проходів. У цих випадках машинний час в кожному проході розраховують за аналогією з реверсивним станом холодної прокатки (рис. 2.3, крива 1), але при $L_{ш} = 0$. Час пауз визначається або роботою холодильника або нагрівальних печей.

ЛІТЕРАТУРА

1. Николаев В.А. Теория прокатки. - Запорожье, ЗГИА, 2007. - 228 с.
2. Целиков А.И. Теория прокатки. Справочник А.И. Целиков, А.Д. Томленое, В.И. Зюзин и др. - М.: Металлургия, 1989. — 335 с.
3. Николаев В.А., Босхамджиєв Н.Ш., Полухин В.П. Параметры деформации металла в гладких валках и калибрах. - К.: Освіта України, 2010. - 235 с.
4. Николаев В.А. Горячая прокатка листов и полос. - Запорожье, ЗНТУ, 2011.-158с.
5. Николаев В.А. Холодная прокатка полос. - Запорожье, ЗНТУ ,20 И.-126с.
6. Сафьян М.М. Технология процессов прокатки и волочения. Листопркатное производство. - К.: Вища школа, 1988. - 351 с.