

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ДОНБАСЬКА ДЕРЖАВНА МАШИНОБУДІВНА АКАДЕМІЯ

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ  
до практичних занять з дисципліни  
«Технологічні лінії та комплекси металургійних цехів»

Розглянуто і схвалено  
на засіданні кафедри автоматизованих  
металургійних машин та обладнання  
Протокол № 16 от 09.10.2019

Краматорськ 2019

УДК 621.771

Технологічні лінії та комплекси металургійних цехів: методичні вказівки до практичних занять для бакалаврів спеціальності 133 «Галузеве машинобудування», професійне спрямування «Інжиніринг автоматизованих машин і агрегатів» / уклад. : В. А. Федорінов, Ю. К. Доброносів. – Краматорськ : ДДМА, 2019. - 44 с.

Викладено короткі теоретичні відомості та порядок проведення практичних занять дослідницького характеру, а також методика обробки отриманих результатів та вимоги до звіту. Наведено контрольні запитання для самостійної перевірки рівня підготовки до виконання практичних занять.

Укладачі

В. А. Федорінов, проф.

Ю. К. Доброносів, доц.

Відп. за випуск В. І. Чередниченко, лаб.

## 1. Загальні вказівки

Практичні заняття з дисципліни "Технологічні лінії та комплекси металургійних цехів" проводяться у відповідності з робочим планом після теоретичного пропрацювання матеріалу на лекціях або самостійного пропрацювання студентами окремих розділів дисципліни.

При рішенні конкретних технологічних задач, крім використовуваних методик, необхідно знайомити студентів з іншими можливими методами рішення, розглядати можливі варіанти побудови технологічних ліній (агрегатів), нові технологічні й конструктивні рішення.

При пропрацюванні розділів дисципліни необхідно самостійно вивчати основні положення, методики розрахунку, технологічні й конструктивні особливості машин, устаткування, ліній і агрегатів на додаток до матеріалу, що розглядається під час аудиторних занять.

## 2. Визначення енергосилових параметрів процесу гарячої прокатки широких листів і смуг (практичне заняття 1)

Мета заняття: закріплення теоретичного матеріалу, придбання практичних навичок із розрахунку енергосилових параметрів процесу гарячої прокатки листів і смуг.

### 2.1 Теоретичні відомості

До основних енергосилових параметрів процесу прокатки листів і смуг відносять: силу прокатки  $P$ , момент прокатки  $M_{\text{ПР}}$ , потужність прокатки  $N$ , а також величини переднього й заднього натяжінь  $T_1$  і  $T_0$ .

Вихідними параметрами для розрахунків є матеріал прокату, радіус робочих валків  $R$ , вихідна товщина прокату  $h_0$ , кінцева товщина  $h_1$ , ширина  $b$  (при прокатці широких смуг  $b/l > 5$ , уширенням зневажаємо), швидкість прокатки  $V_{\text{ПР}}$ , температура прокатки  $t$ , коефіцієнт тертя  $\mu$ , коефіцієнти, що характеризують рівень переднього й заднього натяжінь  $\sigma_0/2K_C$ ,  $\sigma_1/2K_C$ .

Величину сили прокатки визначають по формулі:

$$P = p_{\text{CP}} \cdot b \cdot l, \quad (2.1)$$

де  $p_{\text{CP}}$  – середнє нормальне контактне напруження в осередку деформації;

$l$  – довжина дуги контакту.

Величину  $p_{\text{CP}}$  визначають по формулі:

$$p_{\text{CP}} = n_{\sigma} \cdot 2K_C, \quad (2.2)$$

де  $n_{\sigma}$  – коефіцієнт напруженого стану;

$2K_C$  – подвоєний середньоінтегральний по довжині осередку деформації опір чистому зсуву, що характеризує фактичну величину порогу текучості матеріалу з урахуванням схеми напружено-деформованого стану:

$$2K_c = 1.15 \sigma_{TC} \quad (2.3)$$

У загальному випадку величина  $\sigma_{TC}$  визначається механічними властивостями (порогом текучості  $\sigma_T$ ) матеріалу й залежить від ступеня й швидкості деформації й від температури:

$$\sigma_\Phi = n \cdot n_\varepsilon \cdot n_v \cdot \sigma_T, \quad (2.4)$$

де  $n$ ,  $n_\varepsilon$ ,  $n_v$  – коефіцієнти, що враховують вплив температури, ступеня й швидкості деформації.

При гарячій деформації важливою умовою реалізації процесу є те, щоб швидкість рекристалізації була вище швидкості деформаційного зміцнення. У цьому випадку зміцнення не встигає відбутися, і метал зберігає пластичні властивості. Таким чином, при гарячій деформації основний вплив на величину  $\sigma_\Phi$  мають температура й швидкість деформації.

Серед ряду формул для визначення середньоінтегрального значення фактичного порогу текучості при гарячій деформації [1] найбільш придатною до умов гарячої прокатки є формула Андреюка:

$$\sigma_{\square} = \sigma_{\square 0} \cdot U^{a_1} \cdot \left(\frac{20}{3} \varepsilon\right)^{a_2} \cdot \left(\frac{t}{1000}\right)^{a_3}, \quad (2.5)$$

де  $U$  - швидкість деформації;

$\sigma_{T0}$  – значення порогу текучості матеріалу при  $U = 10^{-2} \text{ c}^{-1}$ ;  $\varepsilon = 0.2$ ;  $t = 1000^\circ\text{C}$  (табл.2.1);

$\varepsilon$  - відносне обтиснення;

$a_1$ ,  $a_2$ ,  $a_3$  – емпіричні коефіцієнти, що характеризують механічні властивості матеріалу (див.табл.2.1).

Швидкість деформації:

$$U = \frac{V_{\text{пр}} \cdot \varepsilon}{l}, \quad (2.6)$$

де  $l$  - довжина дуги контакту,

$$l = \sqrt{R \cdot \Delta h}, \quad (2.7)$$

Абсолютне обтиснення:

$$\Delta h = h_0 - h_1, \quad (2.8)$$

Відносне обтиснення:

$$\varepsilon = \frac{\Delta h}{h_0}, \quad (2.9)$$

Величина коефіцієнта напруженого стану залежить від величини  $l/h_{\text{cp}}$ , де  $h_{\text{cp}}$  – середня товщина прокату у осередку деформації:

$$h_{\text{cp}} = \frac{h_0 + h_1}{2}, \quad (2.10)$$

При  $l/h_{\text{cp}} < 1$

$$n_\sigma = 1 + 1.5 \left( -l/h_{\text{cp}} \right)^3$$

$$\begin{aligned}
&\text{При } 1 < l/h_{\text{cp}} < 2.5 \\
&n_{\sigma} = 1 + 0.2 \left( \frac{l}{h_{\text{cp}}} - 1 \right) \\
&\text{При } l/h_{\text{cp}} > 2.5 \\
&n_{\sigma} = 1 + 0.5 \mu \left( \frac{l}{h_{\text{cp}}} - 1 \right)
\end{aligned}
\tag{2.11}$$

При наявності натяжінь:

$$n_{\sigma_2} = 1 - 0.5 \frac{\sigma_0 + \sigma_1}{2K_c} \tag{2.12}$$

Величину моменту прокатки визначають по формулі:

$$M_{\text{np}} = 2P \cdot \psi \cdot l, \tag{2.13}$$

де  $\psi$  - коефіцієнт плеча рівнодіючої сили прокатки.

При  $l/h_{\text{cp}} < 0.7$

$$\psi = 0.6 - 0.3 \left( 0.5 - \frac{l}{h_{\text{cp}}} \right)^2$$

При  $0.7 < l/h_{\text{cp}} < 2.5$

$$\psi = 0.6 - 0.15 \sqrt{\frac{l}{h_{\text{cp}}} - 0.7} \tag{2.14}$$

При  $l/h_{\text{cp}} > 2.5$

$$\psi = 4.4 \cdot 10^{-1} - 2.2 \cdot 10^{-2} \cdot \sqrt{\frac{l}{h_{\text{cp}}} - 2.5} + 4.4 \cdot 10^{-3} (0 - \alpha)$$

де  $\alpha$  - кут захвату (радіан.).

$$\alpha = \arccos \left( 1 - \frac{\Delta h}{2R} \right) \tag{2.15}$$

При наявності переднього й заднього натяжінь:

$$M_{\text{np}} = b \cdot l^2 \left[ 2p_{\text{cp}} \left( \psi + 0.1 \frac{\Delta \sigma}{2K_c} \right) + \Delta \sigma \left( 0.5 - \frac{1}{l/h_{\text{cp}} \cdot x} \right) \right]$$

(2.16)

де  $\Delta \sigma = \sigma_1 - \sigma_0$ ;

$\sigma_1, \sigma_0$  - напруження переднього й заднього натяжінь.

Потужність прокатки:

$$N_{\text{np}} = M_{\text{np}} \cdot \omega = M_{\text{np}} \cdot \frac{V_{\text{np}}}{R} \tag{2.17}$$

Таблиця 2.1 - Коефіцієнти регресії аналітичного опису фактичного опору текучості при гарячій деформації

Матеріал	$\sigma_{0D}$	$a_1$	$a_2$	$a_3$
Ст 3кп	68.9	0.135	0.164	-2.8
Ст 3сп	87.1	0.124	0.167	-2.54
Сталь				
10	81.8	0.125	0.266	-2.46
15Г	89.6	0.126	0.188	-2.74

45	87.4	0.143	0.173	-3.05
40X	85.6	0.130	0.170	-3.62
65Г	78.2	0.166	0.222	-3.02
У7А	74.2	0.163	0.197	-2.87
У10А	80.1	0.163	0.194	-3.57

Таким чином, алгоритм розрахунку за відсутності на тяжінь, які рідко використовуються при гарячій прокатці, складається з послідовності формул: (2.8), (2.9), (2.7), (2.10),  $1/h_{cp}$ , (2.6), (2.5), (2.3),(2.11), (2.2), (2.1), (2.14), при  $1/h_{cp}>2,5$  (2.15), (2.13), (2.17).

## 2.2 Задачі

Задача 2.2.1. Визначити силу прокатки  $P$  при прокатці смуги зі сталі 10 розмірами  $h_0 \times b_0 = 10 \times 1200$  мм до товщини  $h_1 = 8$  мм у валках радіусом  $R = 400$  мм. Температура прокатки –  $980^\circ\text{C}$ , швидкість прокатки –  $5$  м/с, коефіцієнт тертя  $\mu = 0.2$ , натяжіння відсутні.

Завдання 2.2.2. Визначити потужність прокатки  $N$  при прокатці смуги зі сталі У8А розмірами  $h_0 \times b_0 = 12 \times 1500$  мм до товщини  $h_1 = 10$  мм у валках радіусом  $R = 400$  мм. Температура прокатки –  $1030^\circ\text{C}$ , швидкість прокатки –  $3$  м/с, коефіцієнт тертя  $\mu = 0.2$ , натяжіння відсутні.

Завдання 2.2.3. Визначити силу й момент при гарячій прокатці листа на товстолистовому стані 3600. Вихідна товщина листа –  $40$  мм. Вихідна ширина листа –  $3200$  мм. Товщина листа після пропуску –  $28$  мм. Діаметр робочих валків –  $1200$  мм. Матеріал листа – сталь 45. Швидкість прокатки –  $3.0$  м/с. Температура прокатки –  $1050^\circ\text{C}$ .

## 2.3 Домашнє завдання

Визначити силу й момент при гарячій прокатці листа (смуги).

Таблиця 2.2. Вихідні дані.

Варіант	Вихідна товщина смуги (листа), мм	Вихідна ширина смуги (листа), мм	Товщина смуги (листа) після пропуску, мм	Діаметр робочих валків, мм	Матеріал смуги (листа)	Швидкість прокатки, м/с	Температура прокатки, $^\circ\text{C}$
1	200	1200	120	1250	Ст 3кп	5,0	1000
2	180	1200	110	1200	Ст 3сп	4,0	1100
3	100	1000	60	1200	Сталь 10	2,0	900
4	110	1100	80	1100	Сталь 15Г	3,0	950
5	80	700	60	850	Сталь 45	2,0	900
6	60	800	40	900	Сталь 40X	3,0	950

7	50	950	30	900	Став 65Г	2,5	1000
8	55	1000	40	1000	Сталь В7А	3,0	950
9	70	1100	45	950	Сталь В10А	2,5	900
10	85	1250	55	1100	Ст 3кп	3,0	800
11	100	1200	70	1000	Ст 3сп	2,0	850
12	35	900	25	1000	Сталь 10	4,0	1000
13	150	850	120	1100	Сталь 15Г	5,0	1100
14	80	800	60	950	Сталь 45	4,0	1050
15	60	1250	50	1000	Сталь 40Х	4,5	1100
16	55	1500	40	1100	Сталь 65Г	3,5	1050
17	70	1400	50	950	Сталь В7А	4,0	1100
18	90	1350	55	1000	Сталь В10А	3,0	1000
19	120	750	90	900	Ст 3кп	3,5	1050
20	160	850	130	1200	Ст 3сп	3,5	900
21	140	900	110	1250	Сталь 10	4,5	950
22	150	950	120	900	Сталь 15Г	4,5	1200
23	150	1050	110	1000	Сталь 45	3,5	1150
24	160	1000	110	1200	Сталь 40Х	4,5	1150
25	30	1200	20	1150	Сталь 45	4,5	1200
26	40	1300	30	1100	Сталь 65Г	2,5	1200

## 2.4. Контрольні питання

1. Які основні фактори визначають величину енергосилових параметрів при гарячій прокатці?
2. Яким чином зовнішні зони впливають на енергосилові параметри при гарячій прокатці широких смуг?
3. Опишіть характер неоднорідності напружено-деформованого стану при гарячій прокатці широких смуг.
4. Як визначити величину моменту й потужності при гарячій прокатці широких смуг?
5. Що називається коефіцієнтом плеча? Як він змінюється з наявністю переднього й заднього натяжінь?

Література [ 1-2]

## 3. Розрахунок енергосилових параметрів процесу холодної прокатки тонких смуг (практичне заняття 2)

Ціль заняття: закріплення теоретичного матеріалу, придбання практичних навичок з розрахунку основних енергосилових параметрів процесу холодної прокатки тонких смуг.

### 3.1 Теоретичні відомості

До основних енергосилових параметрів процесу холодної прокатки відносяться: сила прокатки  $P$ , момент прокатки  $M$ , потужність прокатки  $N$ .

Характерною рисою розрахунку енергосилових параметрів при холодній прокатці є необхідність урахування деформаційного зміцнення й пружного сплюснення валків. Уширенням смуги зневажають.

Величину сили прокатки визначають із формули:

$$P = p_{\text{CP}} \cdot b \cdot l_{\text{C}}, \quad (3.1)$$

де  $p_{\text{CP}}$  – середнє нормальне контактне напруження у осередку деформації;

$b$  - ширина смуги;

$l_{\text{C}}$  – довжина дуги контакту з урахуванням пружного сплюснення.

Величину  $p_{\text{CP}}$  визначають по формулі:

$$p_{\text{CP}} = n_{\sigma} \cdot 2K_{\text{C}}, \quad (3.2)$$

де  $n_{\sigma}$  – коефіцієнт напруженого стану;

$2K_{\text{C}}$  – середньоінтегральне по довжині осередку деформації значення подвоєного опору чистому зрушенню, що характеризує фактичну величину порогу текучості  $\sigma_{\text{TC}}$  із урахуванням схеми напружено-деформованого стану.

$$2K_{\text{C}} = 1.15 \sigma_{\text{TC}}. \quad (3.3)$$

Величину середньоінтегрального значення фактичного порогу текучості  $\sigma_{\text{TC}}$  визначають із урахуванням деформаційного зміцнення

$$\begin{aligned} \sigma_{\text{TC}} = & A_0 + A_1 \cdot \varepsilon_0 + A_2 \cdot \varepsilon_0^2 + A_3 \cdot \varepsilon_0^3 + \frac{2}{3} \left( A_1 + 2A_2 \cdot \varepsilon_0 + 3A_3 \cdot \varepsilon_0^2 \right) \varepsilon + \\ & + \frac{8}{15} \left( -\varepsilon_0^2 \left( A_2 + 3A_3 \cdot \varepsilon_0 \right) \varepsilon^2 + \frac{16}{35} \left( -\varepsilon_0^3 A_3 \cdot \varepsilon^3 \right) \right), \end{aligned} \quad (3.4)$$

де  $\varepsilon_0$  – відносне обтиснення, отримане металом у попередніх пропусках;

$\varepsilon_1$  – відносне обтиснення, отримане в даному проході;

$A_0, A_1, A_2, A_3$  – коефіцієнти, що враховують природні властивості матеріалу (табл.3.1).

$$\varepsilon_0 = (H - H_0) / H, \quad (3.5)$$

де  $H$  - товщина відпаленого металу (перед першим пропуском);

$H_0$  – вихідна товщина прокату в даному проході.

$$\varepsilon = \Delta h / H_0; \quad (3.6)$$

$$\Delta h = H_0 - h_1, \quad (3.7)$$

де  $h_1$  – кінцева товщина прокату в даному проході.

У випадку прокатки відпаленого металу (перший проход) залежність (3.4) істотно спрощується:

$$\sigma_{\text{TC}} = A_0 + \frac{2}{3} A_1 \cdot \varepsilon + \frac{8}{15} A_2 \cdot \varepsilon^2 + \frac{16}{35} A_3 \cdot \varepsilon^3. \quad (3.8)$$

Величину коефіцієнта напруженого стану  $n_{\sigma}$  визначають із формули:

$$n_{\sigma} = \frac{1}{\Delta h} \left\{ \frac{\xi_0 \cdot h_0}{\delta - 2} \left[ \left( \frac{h_0}{h_H} \right)^{\delta - 2} - 1 \right] + \frac{\xi_1 \cdot h_1}{\delta + 2} \left[ \left( \frac{h_H}{h_1} \right)^{\delta + 2} - 1 \right] \right\}, \quad (3.9)$$



де  $\xi_0, \xi_1$  – коефіцієнти, що враховують вплив заднього й переднього натяжінь:

$$\xi_0 = 1 - \sigma_0 / 2K_c; \quad \xi_1 = 1 - \sigma_1 / 2K_c; \quad (3.10)$$

де  $\sigma_0, \sigma_1$  - напруження переднього й заднього натяжінь.

На практиці величину переднього й заднього натяжінь, як правило, задають відносинами  $\sigma_0 / 2K_c, \sigma_1 / 2K_c$  із наступним після розрахунку  $2K_c$  визначенням  $\sigma_0, \sigma_1$ .

$\delta$  - коефіцієнт, що враховує вплив контактної тертя й зовнішніх зон:

$$\delta = 2f \cdot l / \Delta h; \quad (3.11)$$

де  $f$  - коефіцієнт контактної тертя;

$l$  - довжина дуги контакту;

$h_H = 2\delta \sqrt{\xi_0 / \xi_1} h_0^{\delta-1} h_1^{\delta+1}$  – товщина смуги в нейтральному перетині.

Обчислення дуги контакту при холодній прокатці необхідно робити з урахуванням пружного сплюснення валків:

$$l_c = \sqrt{R \cdot \Delta h + x_2^2} + x_2, \quad (3.12)$$

$$\text{де } x_2 = 8\rho_{cp} R \left( \frac{1 - \nu_B^2}{\pi \cdot E_B} + \frac{1 - \nu_{II}^2}{\pi \cdot E_{II}} \right), \quad (3.13)$$

$\nu_B, \nu_{II}$  – коефіцієнти Пуассона матеріалу валків і смуги;

$E_B, E_{II}$  – модулі пружності матеріалу валків і смуги.

Очевидно, величина  $l_c$  залежить від величини  $\rho_{cp}$ , що залежить від величини  $\rho_{\sigma}$ , у розрахунок якої входить, у свою чергу, довжина дуги контакту. Таким чином, величину  $l_c$  можна визначити на основі методу послідовних наближень (ітераційне рішення). Спочатку визначають довжину дуги контакту без урахування пружного сплюснення:

$$l = \sqrt{R \cdot \Delta h}, \quad (3.14)$$

потім роблять розрахунок величини  $\rho_{cp}$  і на її основі виконують розрахунок  $l_c$  по формулі (3.12). Потім роблять порівняння  $l_c$  і  $l$  і, у випадку, якщо результат не задовольняє заданої похибки, підставляють знайдене значення  $l_c$  у формулу (3.11) і виконують повторний розрахунок  $\rho_{cp}$ , а потім  $l_c$ . Операцію повторюють, поки попереднє й розраховане значення  $l_c$  не будуть відрізнятися на задану величину (у навчальних завданнях – до 5%).

Формули (3.1)-(3.14) становлять повну методику розрахунку сили прокатки  $P$ .

Величину моменту прокатки  $M_{пр}$  визначають по формулі:

$$M_{пр} = 2P \cdot a = 2P \cdot \psi \cdot l_c; \quad (3.15)$$

де  $\psi$  - коефіцієнт плеча.

Через складність визначення  $\psi$  для розрахунку  $M_{пр}$  можна використовувати формулу:

$$M_{пр} = 2K_c \left\{ \frac{\xi_0 \cdot h_0}{\delta - 2} \left[ \left( \frac{h_0}{h_{II}} \right)^{\delta-2} - 1 \right] - \frac{\xi_1 \cdot h_1}{\delta + 2} \left[ \left( \frac{h_H}{h_1} \right)^{\delta+2} - 1 \right] \right\} \cdot \frac{2b \cdot R \cdot \mu \cdot l_c}{\Delta h}, \quad (3.16)$$

Потужність прокатки:

$$N = M \cdot \omega = M \cdot V / R, \quad (3.17)$$

де  $V$  - швидкість прокатки.

Величина переднього й заднього натяжінь, відповідно:

$$T_0 = \sigma_0 b h_0; \quad T_1 = \sigma_1 b h_1. \quad (3.18)$$

Таблиця 3.1 - Коефіцієнти регресії при холодній деформації

Матеріал	Коефіцієнти регресії			
	$A_0$	$A_1$	$A_2$	$A_3$
Сталь				
08 <b>пс</b>	319	2171	-3615	2393
08 <b>кп</b>	244	1227	-1470	827
10 <b>сп</b>	299	1294	-1247	221
20	368	1757	-3603	2666
40	356	3394	-10244	12121
45	350	2675	-5125	3750
65Г	460	3875	-9651	8555
В8А	381	1408	-995	437
В10А	405	3032	-6504	6364
Х18Н9	251	1951	-11	-303

### 3.2. Завдання

**Завдання 3.2.1.** **Визначити силу** прокатки при деформації смуги в першому проході вихідною товщиною  $H_0=2$  мм до товщини  $h_1=1.5$  мм. Ширина 1000 мм. Матеріал смуги – сталь 08 **кп**. Радіус валків – 200 мм. Валки **сталеві**. Коефіцієнт тертя  $f=0.09$ , коефіцієнти натягів  $\sigma_{0/2}K_c=0.3$ ;  $\sigma_{1/2}K_c=0.7$ . Довжину дуги контакту прийняти **рівної**  $l_c$  після першої ітерації.

**Завдання 3.2.2.** **Визначити** реальну довжину дуги контакту при прокатці стрічки зі сталі 20 товщиною у відпаленому стані 2 мм у другому проході ( $H_0=1.7$  мм,  $h_1=1.4$  мм) у валках діаметром 400 мм. Коефіцієнт тертя  $f=0.08$ , коефіцієнти натягів  $\sigma_{0/2}K_c=0.5$ ;  $\sigma_{1/2}K_c=0.3$ .

**Завдання 3.2.3.** **Визначити** потужність прокатки при деформації смуги зі сталі 10 сп, якщо відомі наступні параметри:  $H=3$  мм;  $H_0=2.4$  мм;  $h_1=2$  мм;  $R=200$  мм,  $f=0.08$ ;  $\sigma_{0/2}K_c=0.3$ ;  $\sigma_{1/2}K_c=0.3$ . Швидкість прокатки  $V=5$  м/с.

## 4. Розподіл одиничних витяжок по проходах. Розрахунок режимів обтиснень по граничних умовах захоплення. (практичне заняття 3)

**Ціль заняття** - закріплення теоретичних знань, придбання практичних навичок у визначенні й використанні коефіцієнта витяжки в технологічних

розрахунках, вибору обтиснень із застосуванням методу, заснованого на граничних умовах захоплювання.

#### 4.1. Теоретичні відомості.

##### 4.1.1. Розподіл одиничних витяжок по проходах.

Процес прокатки супроводжується зміною геометричної форми металу, що прокатується, і його розмірів. Якщо як вихідну заготовку для проміжних розкатів і кінцевого профілю прийняти смугу прямокутного перетину, то на підставі умови сталості об'єму можна записати:

$$HBL = h_1 b_1 l_1 = h_2 b_2 l_2 = \dots = h_n b_n l_n = \text{const}$$

або в загальному вигляді

$$HBL = hbl = \text{const} \quad (4.1)$$

Зробимо перетворення, записавши рівняння (4.1) у вигляді

$$\frac{H}{h} = \frac{l}{L} \cdot \frac{b}{B}$$

відносні величини, що входять до нього, називають:

$\frac{H}{h} = \eta$  - коефіцієнтом висотної деформації;

$\frac{l}{L} = \lambda$  - коефіцієнтом **поздовжньої** деформації або коефіцієнтом витяжки ( витяжкою );

$\frac{b}{B} = \beta$  - коефіцієнтом поперечної деформації.

Отже можна записати:

$$\lambda = \eta / \beta.$$

Переходячи до площин поперечного перерізу, маємо

$$\lambda = H/h \cdot B/b = F_0 / F, \quad (4.2)$$

де  $H, B, L, F_0$  – товщина, довжина й площа поперечного перерізу вихідної **заготовки**;

$h, b, l, F$  - те ж, відповідно для профілю після прокатки.

Таким чином, *витяжкою* називають відношення площі поперечного перерізу вихідної ( що задається) заготовки до площі поперечного перерізу розкату на виході з валків або кінцевого профілю. Витяжка характеризує ступінь зменшення площі поперечного перерізу розкату. Якщо це зменшення розглядається за один прохід, то витяжка називається разовою або одиничною. Якщо ж розглядається загальне зменшення площі поперечного перерізу за повне число проходів від вихідної заготовки до кінцевого профілю, така витяжка називається *загальною* або *сумарною*.

По величині разових витяжок можна судити про ступінь завантаженості кожної кліті. разові витяжки на практиці приймають різними залежно від профілю, що прокатується, і типу стана, форми й місця розташування калібру.

Приклади величин разових витяжок для різних випадків прокатки наведені нижче (10):

Стани, кліті й калібри	Разові витяжки
Обтискні стани, чорнові (ящикові) калібри . . . . .	1,35–1,45
Обтискні стани, передчистові й чистові ромбічні й квадратні калібри . . . . .	1,25–1,3
Чорнові кліті крупносортних станів, ящикові калібри	1,35–1,45
Обтискні стани, чорнові (ящикові) калібри . . . . .	1,35–1,45
Обтискні стани, передчистові й чистові ромбічні й квадратні калібри: . . . . .	1,25-1,3
квадратні й круглі . . . . .	1,25–1,3
Чистові кліті крупносортних станів:	
передчистові ромбічні й овальні калібри . . . . .	1,3–1,35
чистові круглі й квадратні калібри . . . . .	1,15–1,2
Середньосортні стани:	
ящикові калібри чорнових клітей . . . . .	1,35–1,45
ящикові, ромбічні калібри проміжних клітей . . . . .	1,3–1,35
передчистові овальні й ромбічні калібри . . . . .	1,25–1,35
чистові калібри . . . . .	1,15–1,2
Дрібносортні й дротопрокатні калібри:	
чорнові ящикові калібри . . . . .	1,35–1,5
овальні калібри проміжних клітей . . . . .	1,35–1,4
овальні передчистові калібри . . . . .	1,25–1,3
чистові калібри . . . . .	1,15–1,2

Рівняння (4.2) дозволяє зробити ряд висновків, що мають практичне значення. Якщо відомі площа поперечного перерізу вихідної заготовки  $F_0$  і витяжка в даному проході, то площа  $F$  поперечного перерізу розкату на виході з валків

$$F = F_0 / \lambda$$

Довжина розкату після проходу

$$l = \lambda \cdot L = L \cdot F_0 / F.$$

По відомим витяжці й кінцевій площі поперечного перерізу розкату або його довжині визначають площу поперечного перерізу або довжину вихідної заготовки:

$$F_0 = \lambda \cdot F ; L = l / \lambda.$$

Встановимо зв'язок між разовими, середньою й загальною витяжками при прокатці.

При декількох проходах разові витяжки визначають по формулах:  $\lambda_1 = F_0 / F_1$  (витяжка в першому проході) ;  $\lambda_2 = F_1 / F_2$  (витяжка в другому проході).

Після перетворень залежність між площею поперечного перерізу вихідної заготовки, площею поперечного перерізу розкату після другого проходу й витяжками в цих проходах одержує вигляд:

$$F_0 = \lambda_1 \cdot \lambda_2 \cdot F_2.$$

Витяжка в третьому проході  $\lambda_3 = F_2/F_3$ . Після додаткового перетворення визначимо значення сумарної витяжки за три проходи:

$$\lambda_{1-3} = F_0/F_3 = \lambda_1 \cdot \lambda_2 \cdot \lambda_3.$$

Аналогічно для проходів:

$$\lambda_{\text{заг}} = \lambda_1 \cdot \lambda_2 \cdot \lambda_3 \dots \lambda_n; \lambda_{\text{заг}} = F_0/F_n.$$

Таким чином, загальна витяжка при прокатці профілю за  $n$  проходів визначається як добуток разових витяжок. Відповідно до формули (4.3) маємо:

$$F_n = F_0 / \lambda_{\text{общ}}; F_0 = \lambda_{\text{общ}} F_n.$$

Якщо разові витяжки вважати рівними між собою, тобто, дорівнявши їхнє значення середній витяжці, одержуємо:

$$\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda_3 = \dots = \lambda_n = \lambda_{\text{cp}}^n \text{ або } F_0 / F_n = \lambda_{\text{cp}}^n \quad (4.4)$$

Середня витяжка характеризує ступінь завантаженості основного устаткування прокатного стану. По середній витяжці судять, наскільки інтенсивно ведеться технологічний процес прокатки, чи правильно визначений режим обтиснень і чи є резерви на прокатному стані. Середні витяжки для кожного стану визначають виходячи з умов деформації металу по проходах.

Середні витяжки для різних сортових станів наведені нижче:

Стани	Середні Витяжки
Безперервні дротопркатні	1, 38-1,385
Безперервні дрібносортні	1, 32-1,35
Середньосортні	1, 30-1,35
Крупнсортні	1, 28-1,32

При проектуванні нових прокатних станів потрібно визначити кількість робочих клітей. Звичайно в цьому випадку задаються вихідними величинами: розмірами заготовки й сортаментом готової продукції. Тоді число клітей або число проходів визначиться по залежності, отриманій після перетворення рівняння (4.4):

$$\lg \frac{F_0}{F_n} = n \cdot \lg \lambda_{\text{cp}}; \quad n = \frac{\lg F_0 - \lg F_n}{\lg \lambda_{\text{cp}}}. \quad (4.5)$$

Якщо відомі число проходів  $n$ , площі поперечного перерізу заготовки  $F_0$  і кінцевого профілю  $F_n$ , то середня витяжка

$$\lambda_{\text{cp}} = \sqrt[n]{\lambda_{\text{общ}}} = \sqrt[n]{F_0 / F_n}. \quad (4.6)$$

Розподіл разових витяжок по проходах може бути різним: вони можуть зростати від першого проходу до останнього; спочатку зростати, а потім зменшуватися; закономірно зменшуватися від першого проходу до останнього. Все це залежить від типу стану, його характеристики, умов захоплення, властивостей металу, що прокатується, і т.д.

Найпоширенішою закономірністю розподілу разових витяжок по проходах є збільшення їх з першого проходу до середніх проходів і потім зменшення до чистового проходу або прийняття максимальної витяжки спочатку

й зменшення до чистового проходу (малюнок 4.1). Пояснюється це зміною пластичних властивостей металу у зв'язку зі зниженням температури, а також у зв'язку з наближенням форми розкату до форми готового профілю. При малих витяжках у передчистовому і чистовому калібрах забезпечується більше точне одержання готового профілю. Крім того, до кінця прокатки збільшується тиск металу на валки у зв'язку зі зростанням опору деформації й зменшенням відносини товщини розкату до діаметра валків і щоб уникнути поломки валків деформація повинна бути знижена.

Таким чином, якщо вважати потужність електродвигунів достатньою, між коефіцієнтами деформації й інших факторів може бути наступна залежність.

малюнок

Чим вище температура металу (а отже, чим нижче його опір деформації й вище пластичність), тим більшими можуть бути витяжки. З метою максимального використання устаткування рекомендується здійснювати найбільшу деформацію в перших проходах, а найменшу - в останніх, у яких опір деформації металу вище через зниження його температури по ходу прокатки. Відхилення від цієї рекомендації можливе при погіршенні умов захоплювання, які найбільш важкі в перших проходах. Тому іноді на початку прокатки зменшують витяжку за рахунок її збільшення в середніх проходах і повторному зменшенні в останніх проходах.

На рис. 4.1 показані криві розподілу витяжок для різних станів. Середні значення цих витяжок для різних профілів наведені в таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 - Середні коефіцієнти витяжок по клітках

Профілі	Кліті		
	Чорнових груп	Проміжних груп	Чистова
Кругла й квадратна сталь	1, 40-1,45	1, 35-1,38	1, 20-1,25
Кутова сталь	1, 35-1,40	1, 30-1,35	1, 15-1,20
Балки й швелери	1, 35-1,40	1, 25-1,30	1, 10-1,15
Рейки	1, 35-1,40	1, 30-1,35	1, 13-1,18
Смуга	1, 40-1,45	1, 25-1,35	1, 15-1,23

#### 4.1.2. Розрахунок режимів обтиснень за граничними умовами захоплювання

Для здійснення надійного захоплювання металу валками необхідно забезпечити умову :

$$\mu \geq \operatorname{tg} \alpha ,$$

де  $\alpha$  - кут контакту металу з валками.

Однак всі наступні розрахунки виконані виходячи із граничних умов захоплювання:

$$\mu = \operatorname{tg} \alpha . \quad (4.7)$$

Кут контакту в радіанах:

$$\alpha = \sqrt{\Delta h / R} . \quad (4.8)$$

Рівняння (4.7) з урахуванням виразу (4.8) можна записати у вигляді:

$$\mu = \operatorname{tg} \alpha = C \cdot \alpha ; \quad \mu = C \cdot \sqrt{\Delta h / R}, \quad (4.9)$$

де  $c = \operatorname{tg} \alpha / \cos \alpha$  - коефіцієнт пропорційності.

Для реальних значень  $\alpha$  у межах від  $5^\circ$  до  $30^\circ$  середнє значення  $c_{\text{ср}} = 1.0525$ .

Оскільки рівняння (4.9) записано на основі граничних умов захоплення, то можна вважати, що  $\Delta h = \Delta h_{\text{макс}}$ , де  $\Delta h_{\text{макс}}$  – максимальне можливе обтиснення за прохід.

Після перетворення формули (4.9) маємо:

$$\Delta h_{\text{макс}} = 1/c^2 \cdot \mu^2 R, \quad (4.10)$$

де  $R$  – катаючий радіус.

З урахуванням значення  $c_{\text{ср}} = 1.0525$

$$\Delta h_{\text{макс}} \approx 0.9 \mu^2 R. \quad (4.11)$$

Для валків із гладкою бочкою радіус, що катає,  $R$  приймають рівним половині діаметра валка. При розрахунку режимів обтиснень по рівнянню (4.11) необхідно враховувати зношування валків, тобто їхній мінімальний діаметр. Із цією метою при розрахунках у кожному конкретному випадку вносять поправочний коефіцієнт  $k_1 = 0.90 \dots 0.95$  на переточування валків. Тоді в загальному вигляді рівняння (4.11) може бути записане так:

$$\Delta h_{\text{макс}} = 0.9 k_1 \mu^2 R.$$

При практичних розрахунках для стійкого захоплення величину  $\Delta h_{\text{макс}}$  зменшують на 3... 5%. Таким чином, якщо вважати, що зменшення діаметра валків при переточуваннях становить у середньому 10%, то для розрахунків режиму обтиснень смуги при нових валках можна прийняти рівняння:

$$\Delta h_{\text{макс}} = 0.9 k_1 k_2 \mu^2 R,$$

де  $k_2 = 0.95$  – коефіцієнт зменшення максимального обтиснення, що забезпечує стійке захоплення.

З урахуванням обох коефіцієнтів

$$\Delta h_{\text{макс}} = 0.77 \mu^2 R \quad (4.12)$$

Коефіцієнт тертя метала про валки визначають по формулах Ш. Гелеї з урахуванням матеріалу валків:

для сталевих

$$\mu = 1.05 - 0.0005 t - 0.056 V ; \quad (4.13)$$

для загартованих чавунних

$$\mu = 0.94 - 0.0005 t - 0.056 V ; \quad (4.14)$$

для шліфованих сталевих або чавунних загартованих

$$\mu = 0.82 - 0.0005 t - 0.056 V ; \quad (4.15)$$

де  $t$  - температура прокатки, (З;

$V$  - окружна швидкість валків, м/с.

Формули (4.13) – (4.15) дійсні при  $t > 700^\circ\text{C}$  и  $V < 5$  м/с.

## 4.2. Завдання

4.2.1. Визначити площу поперечного перерізу сляба, якщо загальна витяжка при прокатці листа перетином  $8.0 \times 3200$  мм склала 1.25.

4.2.2. Визначити довжину смуги перетином 1.5x1850 мм, якщо вона отримана зі сляба довжиною 9500 мм із площею поперечного перерізу, рівною  $6 \times 10^5$  мм<sup>2</sup>.

4.2.3. Визначити необхідне число клітей безперервного дротопркатного стана, призначеного для виробництва гарячекатаного дроту діаметром 5.5мм із заготовки перетином 80x80мм.

4.2.4. Визначити максимальне обтиснення злитка на блюмінгу 1300 у першому проході. Температура злитка – 1200<sup>0</sup>С. Швидкість обертання валків - 0.75 м/с. Матеріал валків - сталь.

### 4.3. Домашнє завдання

Визначити розміри вихідної сталеві заготовки при виробництві профілю прямокутного перетину, а також довжини розкатів після кожного проходу.

Варіант	Маса заготовки	Ширина заготовки	Розміри профілю		Витяжки по проходах		
			товщина	ширина	1	2	3
1	12.0	1100	85.0	1050	1.65	1.70	1.56
2	14.0	1030	95.0	1000	1.60	1.75	1.60
3	16.0	1120	100.0	1100	1.55	1.80	1.65
4	18.0	1230	98.0	1200	1.50	1.70	1.70
5	20.0	1450	96.0	1400	1.45	1.65	1.75
6	22.0	1500	94.0	1450	1.50	1.60	1.70
7	24.0	1550	90.0	1500	1.55	1.55	1.65
8	26.0	1600	88.0	1550	1.60	1.50	1.60
9	28.0	1600	86.0	1570	1.65	1.45	1.55
10	30.0	1620	84.0	1590	1.70	1.40	1.50
11	32.0	1630	82.0	1600	1.75	1.45	1.55
12	34.0	1740	80.0	1700	1.80	1.50	1.60
13	36.0	1850	85.0	1800	1.75	1.55	1.65
14	38.0	1920	88.0	1900	1.70	1.60	1.70
15	39.0	1980	90.0	1950	1.65	1.65	1.75
16	40.0	2040	92.0	2000	1.60	1.65	1.80
17	41.0	2150	95.0	2100	1.55	1.60	1.75
18	42.0	2200	98.0	2150	1.50	1.55	1.70
19	43.0	2250	100.0	2200	1.55	1.50	1.65
20	44.0	2260	105.0	2250	1.60	1.55	1.60
21	45.0	2300	108.0	2300	1.65	1.60	1.55
22	46.0	2220	112.0	2200	1.70	1.65	1.50
23	47.0	2130	115.0	2100	1.75	1.70	1.55
24	48.0	2050	120.0	2000	1.80	1.75	1.60
25	49.0	2000	125.0	1950	1.75	1.80	1.65



26	50.0	1900	130.0	1850	1.70	1.75	1.70
----	------	------	-------	------	------	------	------

## Контрольні питання

1. Укажіть коефіцієнти деформації.
2. Дайте визначення коефіцієнта витяжки.
3. Що називають разовою й загальною витяжкою?
4. Укажіть практичне значення закону сталості об'єму.
5. Як визначити загальну витяжку якщо відомі значення витяжок по проходах?
6. Що називають середньою витяжкою? Її значення?
7. Що необхідно знати для визначення числа проходів (клітей)?
8. Який характер розподілу разових витяжок по проходах (клітях)?
9. Проаналізуйте можливі розподіли разових витяжок по проходах (клітях)?
10. Що обмежує обтиснення в перших проходах на станах гарячої прокатки?
11. Укажіть граничні умови захоплювання металу валками.
12. Як визначити максимальне обтиснення по граничних умовах захоплювання?
13. Що необхідно знати для визначення коефіцієнта тертя при захоплюванні металу валками?

### 5. Розрахунок режимів обтиснень по потужності електродвигунів прокатного стану (Практичне заняття №4)

Ціль заняття - придбання практичних навичок у визначенні обтиснень із застосуванням методу розрахунку, заснованого на потужності електродвигунів.

#### 5.1. Теоретичні відомості

Розрахунок обтиснень, заснований на використанні повної потужності електродвигунів, роблять, виходячи з умов нормального протікання технологічного процесу прокатки. Відомо, що потужність привода валків має дві основні складові:

1. потужність прокатки  $N_{\text{пр}}$ , що потрібна для здійснення роботи деформації (обтиснення) металу й подолання при цьому сил тертя металу по поверхні валків;

2. потужність  $N_{\text{тр}}$ , що потрібна для подолання сил тертя, які виникають у підшипниках валків при прокатці.

При цьому потужність на валу двигуна, потрібна для обертання валків:

$$N = \frac{N_{\text{пр}} + N_{\text{тр}}}{\eta_{\text{л}}} \quad (5.1)$$

де  $\eta_{\text{л}}$  – к.к.д., що враховує втрати на тертя в підшипниках обертових деталей головної лінії стану й у зубчастих зачепленнях. Величина  $\eta_{\text{л}}$  залежить від конструкції шпинделів ( $\eta_1$ ), шестеренної кліті ( $\eta_2$ ) і редуктора ( $\eta_3$ ). Для двох тріфлових шпинделів  $\eta_1=0.97\dots 0.98$ ; для

універсальних шпинделів  $\eta_1=0.95\dots 0.98$ . К.к.д. шестеренної кліті (шевронні зуби) при підшипниках ковзання  $\eta_2=0.93\dots 0.95$ ; при підшипниках кочення  $\eta_2=0.94\dots 0.96$ . К.к.д. одноступінчастого редуктора  $\eta_3=0.93\dots 0.96$ .

Загальний к.к.д. головної лінії стану:  $\eta_L = \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot \eta_3$ .

Потужність по рівнянню (5.1) дорівнює номінальній потужності двигуна при прокатці з більшим машинним часом по проходах і постійному числі обертів валків. У випадку короткочасних навантажень на двигун, коли машинний час по проходах малий (число обертів валків постійне), потужність по рівнянню (5.1) буде приблизно дорівнювати або трохи менше максимальної потужності двигуна, обумовленої виходячи із припустимого навантаження. Обтиснення металу, що прокатується, у цьому випадку повинні визначатися з максимальної потужності; однак при цьому необхідна перевірка потужності двигуна на припустиме перевантаження й на нагрівання.

Для станів зі змінним числом обертів валків у плинні проходу потужність на валу двигуна буде також змінною за цей період. Її максимальне значення, по якому визначають обтиснення, обмежується величиною припустимого перевантаження двигуна за винятком динамічної потужності. При цьому перевірка завантаження двигуна по середньоквадратичній потужності (перевірка на нагрівання) є також обов'язковою. Потужність на валу двигуна стана зі змінним числом обертів валків

$$N = \frac{N_{\text{ПР}} + N_{\text{ТР}} \pm N_{\text{ДИН}}}{\eta_L} \quad (5.2)$$

де  $N_{\text{ДИН}}$  – потужність, потрібна для подолання інерції всіх обертових мас двигунів, частин головної лінії стану (валків, шпинделів, шестірень, муфт) у період розгону (+) або гальмування (-).

де  $N_{\text{ДИН}}$  – потужність, потрібна для подолання інерції всіх обертових від двигунів частин головної лінії стана (валків, шпинделів, шестірень, муфт) у період розгону або з (мінус).

Беручи до уваги вираз (5.2), максимальне обтиснення визначимо по припустимому моменті на валу двигуна. У цьому випадку максимальний момент прокатки дорівнює /11/:

$$M_{\text{ПР.МАКС}} = 2.5 N \eta_L / \omega - M_{\text{ТР}} - M_{\text{ХХ}} \pm M_{\text{ДИН}}, \quad (5.3)$$

де 2.5 - припустимий коефіцієнт перевантаження двигуна;

$N$  - потужність двигуна, кВт;

( - кутова швидкість, рад/з;

$M_{\text{ТР}}$  – момент, потребуємий для подолання сил тертя, кН·м;

$M_{\text{ДИН}}$  – момент динамічний, кН·м;

$M_{ХХ}$  – момент холостого ходу, кН·м.

Кутова швидкість:

$$\omega = \pi n / 30, \quad (5.4)$$

де  $n$  – частота обертання,  $\text{хв}^{-1}$ .

Беручи до уваги вирази (3.9), (3.11) і (3.18) і зробивши перетворення одержимо:

$$M_{\text{ПР.МАКС}} = 2r_{\text{СР}} b_{\text{СР}} \psi R \Delta h.$$

Тому що розрахунок здійснюється для максимального моменту прокатки, то можна вважати, що  $\Delta h = \Delta h_{\text{МАКС}}$ . Тоді максимальне можливе обтиснення за прохід:

$$\Delta h_{\text{МАКС}} = M_{\text{ПР.МАКС}} / (2r_{\text{СР}} b_{\text{СР}} \psi R). \quad (5.5)$$

Момент, необхідний для подолання сил тертя:

$$M_{\text{ТР}} = 2 P f_n d_{\text{ПОД}} / 2 \quad (5.6)$$

де  $f_n$  – коефіцієнт тертя в підшипниках;

$d_{\text{ПОД}}$  – діаметр цапфи підшипника.

Момент холостого ходу на подолання сил тертя в підшипниках без металу у валках

$$M_{\text{ХХ}} = G_{\text{В}} f_n d_{\text{ПОД}} / 2, \quad (5.7)$$

де  $G_{\text{В}}$  – вага валків.

Динамічний момент від неврівноважених мас при гальмуванні і прискоренні стана

$$M_{\text{ДИН}} = G D^2 / 375 \cdot \epsilon, \quad (5.8)$$

де  $GD^2$  – момент інерції всіх обертових елементів головної лінії стана, приведений до вала двигуна;

( $\epsilon$  - кутове прискорення валків,  $\epsilon = d\omega/dt$ ).

Для обтискних станів  $\epsilon = 60 \dots 80 \text{ с}^{-2}$ .

Якщо зніхтувати динамічним моментом і моментом холостого ходу, які становлять не більше 3%, то можна записати:

$$M_{\text{ДВ}} = M_{\text{ПР}} + (0.06 \dots 0.12) M_{\text{ПР}} \approx (1.06 \dots 1.12) M_{\text{ПР}};$$

$$M_{\text{ГПР}} = \frac{M_{\text{ДВ}}}{1.06 \dots 1.12} = \frac{2.5 \cdot N\eta}{(1.06 \dots 1.12)\omega} = 2p_{\text{ср}} b_{\text{ср}} \psi R \Delta h.$$

Тоді максимально можлива величина обтиснення за прохід

$$\Delta h_{\text{max}} = \frac{2.5 N\eta}{(1.06 \dots 1.12)p_{\text{ср}} b_{\text{ср}} \psi R \omega}. \quad (5.9)$$

Звичайно з метою стабілізації умов захвату величину  $\Delta h_{\text{MAX}}$  трохи зменшують, тобто

$$\Delta h_{\text{CP}} = \Delta h_{\text{MAX}} K, \quad (5.10)$$

де  $K$  - коефіцієнт запасу, приймають рівним  $0.90 \dots 0.95$ .

Серед інших конструктивних факторів, що обмежують величину максимального обтиснення за прохід, найбільш істотним є міцність валків прокатного стана, наприклад при прокатці широких слябів і товстих листів. Обтиснення за кожний прохід визначається силою прокатки, що допускається міцністю валків. Розглянемо валок робочої кліті дуо (рис 5.1,а). Сила притиснення  $P$  передається на валок у вигляді розподіленої по ширині смуги навантаження  $q=P/b$ , реакції в підшипникових опорах при симетричному додатку навантаження рівні  $P/2$ . Епюра згинальних моментів показана на малюнку 5.1,б. небезпечні перерізи - посередині бочки валка, де згинальний момент найбільший, і при переході бочки в шийку, де має місце перепад діаметрів з концентратором напруг. Умова міцності для середини бочки валка-

$$\sigma = \frac{M_{\text{из}}}{W_{\text{б}}} = \frac{P \left( \frac{a}{4} - \frac{b}{8} \right)}{0.1 D^3} \leq \sigma_{\text{п}}, \quad (5.11)$$

для переходу бочки в шийку-

$$\sigma = \frac{M'_{\text{из}}}{W_{\text{ш}}} = \frac{P l_{\text{ш}}}{2 \cdot 0.1 d_{\text{ш}}^3} \leq \sigma_{\text{п}}. \quad (5.12)$$

Допустима сила прокатки з умови міцності бочки валка-

$$P = \frac{0.1 \sigma_{\text{п}} D^3}{\left( \frac{a}{4} - \frac{b}{8} \right)}, \quad (5.13)$$

з умови міцності шийки-

$$P = \frac{0.1 \sigma \bar{d}^3}{l_{ш}}, \quad (5.14)$$

где  $D$  – діаметр бочки валка;

$d$  – діаметр шийки валка;

$[\sigma]$  – допустиме напруження на згин матеріалу валка.

У свою чергу, сила прокатки

$$P = p_{cp} \cdot b \cdot l = p_{cp} \cdot b \cdot \sqrt{R \cdot \Delta h} \quad (5.15)$$

Зрівнюючи праві частини виражень (5.15) і (5.13) або (5.14) одержимо

$$\Delta h_{max} = \frac{1}{R} \left[ \frac{0.1 \sigma \bar{D}^3}{p_{cp} \cdot b \cdot \left( \frac{a}{4} - \frac{b}{8} \right)} \right]$$

або

(5.16)

$$\Delta h_{max} = \frac{1}{R} \left[ \frac{0.1 \sigma \bar{d}^3}{p_{cp} \cdot b \cdot l_{ш}} \right]$$

Недоліком використання формул (5.9) і (5.16) є те, що в їхню відому частину входить середній контактний тиск  $p_{cp}$ , що, у свою чергу, залежить від  $\Delta h_{max}$ . Це потребує наявності ітераційної процедури. Спочатку, виходячи із практичних даних, задаються величиною  $p_{cp}$  і розраховують  $\Delta h_{max}$ , потім уточнюють значення  $p_{cp}$ . Розрахунок повторюють, поки значення  $p_{cp}$  не буде визначене з необхідною точністю.

У практичних розрахунках, використовуючи практичні дані й знаючи температуру й швидкість прокатки й задавшись попередньо обтисненням  $\varepsilon=20\%$  і  $n_{\sigma}=1.2$  можна попередньо визначити  $2K_{cp}$  і  $p_{cp}$ , після чого робити розрахунки по формулах (5.9) або (5.16).

Одним із критеріїв оптимізації технологічних режимів обтиснень є рівномірний розподіл сили прокатки по проходах ( $P=const$ ). Якщо відомо обтис-

нення  $\Delta h_1$  в одній із клітей або в одному із проходів, то обтиснення в n-й кліті (проході) можна визначити по формулі:

$$\Delta h_n = \left( \frac{p_{cp1} b_1}{p_{cp n} b_n} \right)^2 \frac{R_1}{R_n} \Delta h_1, \quad (5.17)$$

що відповідає постійній силі прокатки.

## 5.2. Завдання

5.2.1. Визначити величину максимального обтиснення при прокатці сляба зі злитка сталі Ст 3 сп, з огляду на, що потужність двигунів стана 4000 кВт,  $H_0=400$  мм,  $B_0=2000$  мм,  $t_{np}=1000^\circ\text{З}$ ,  $V=1$  м/с,  $D_B=1150$  мм, тип підшипників робочих валків – ковзання. Привод валків індивідуальний. Уточнити значення  $p_{cp}$  і  $\psi$ .

5.2.2. Визначити величину максимального обтиснення за прохід при прокатці товстого аркуша зі сляба  $H_0 \times B_0 = 300 \times 1800$  мм при температурі  $t_{np}=1120^\circ$  і швидкості прокатки 2 м/с, якщо діаметр валка 1000 мм, діаметр шийки 600 мм, відстань між опорами валка 3800 мм, довжина бочки валка 2300 мм. Напруження матеріалу валка, що допускається,  $[\sigma]=120$  Мпа.

## 5.3. Домашнє завдання.

Визначити величину максимального обтиснення за прохід при прокатці листа заданих розмірів з умови міцності робочого валка, уточнити значення  $p_{cp}$ . Вихідні дані:  $V=5$  м/с; сталь 45,  $t=950^\circ\text{С}$ .

Таблиця 5.1 - Вихідні дані

№ п/п	a, мм	b, мм	$[\sigma]$ , Мпа	D, мм	$h_0$ , мм
1	4000	2000	100	800	26
2	4000	1800	110	800	25
3	4000	1700	120	800	12
4	4000	1600	130	800	10
5	4000	1500	140	800	8
6	4000	1550	130	800	20

7	4000	1650	120	800	18
8	4000	1750	110	800	18
9	3500	1700	100	700	10
10	3500	1600	90	700	28
11	3500	1500	100	700	16
12	3500	1400	110	700	14
13	3500	1550	120	700	20
14	3500	1650	130	700	22
15	3500	1450	140	700	16
16	3000	1200	150	650	10
17	3000	1000	140	650	8
18	3000	900	100	650	12
19	3000	800	110	650	16
20	3000	700	120	650	20

#### 5.4. Контрольні питання

1. За якими критеріями роблять розрахунок максимальних обтиснень за прохід?
2. Укажіть, на що витрачається потужність двигунів головної лінії прокатного стану?
3. Як при відомій потужності визначити максимальний момент прокатки?
4. Яку частину від моменту прокатки становить тертя в підшипниках валків і момент холостого ходу?
5. Записати формулу для розрахунку  $\Delta h_{\max}$  по відомому моменті двигуна стану, пояснити її.
6. Зобразите епюру згинального моменту по довжині валка й укажіть небезпечні перерізи.
7. Запишіть формули для визначення  $\Delta h_{\max}$  за умовами міцності бочки й шейки валка.

8. Обґрунтуйте необхідність ітераційної процедури розрахунку  $\Delta h_{\max}$  за критеріями максимального моменту двигуна й міцності валків.
9. Як визначити обтиснення по проходах з урахуванням рівномірного розподілу сили прокатки по клітях (проходам)?

## **6 Розрахунок режимів обтиснень і калібрування валків блюмінга (практичне заняття № 5)**

**Ціль роботи:** вивчення технологічних особливостей прокатки блюмів, знаходження практичних навичок за розрахунками режимів обтиснень при прокатці блюмів.

### **6.1. Теоретичні відомості.**

Великі заготовки - блюми й сляби - є напівпродуктом, призначеним для подальшої прокатки на різних станах.

*Блюми* – заготовки квадратного (або близького до квадратного) перетину, використовуються для подальшої прокатки на безперервних заготовочних, рейко-балкових і крупносортних станах. Розміри перетину блюмів 140×140...450×450мм.

*Сляби* – заготовки прямокутного перетину з відношенням ширини до товщини  $B/H=3... 12$ , використовуються як підкат для товстолистових і широкоштабових станів гарячої прокатки. Товщина слябів досягає 350 мм, ширина – 2000 мм.

Заготовками для прокатки блюмів і слябів є злитки.

Стани для виробництва напівпродукту називають блюмінгами й слябінгами. На блюмінгах прокочують блюми й вузькі сляби, на слябінгах - широкі сляби.

Залежно від сортаменту блюмів, продуктивності, схеми прокатки й розташування устаткування блюмінги можна розділити на одноклітьові дуо-реверсивні й багатоклітьові.

Найбільше поширення одержали одноклітьові дуо-реверсивні блюмінги. Залежно від діаметра валків їх можна розділити на три групи:

- 1) більші ( $D=1100...1500$ мм);
- 2) середні ( $D=900...1000$ мм);
- 3) малі ( $D<900$  мм).

Схема устаткування одноклітьового дуо-реверсивного блюмінга показана на рис.6.1.

Прокатка блюмів здійснюється за кілька проходів, число яких встановлюють залежно від розмірів вихідного й кінцевого перетину (рис.6.2). Прокатку здійснюють у каліброваних валках. Вріз у тіло одного валка називають



рівчаком. Просвіт, утворений двома рівчаками в площині, що проходить через осі валків, називають калібром.

При прокатці блюмів у всіх калібрах відбувається лише зменшення поперечного перерізу. Калібри, призначені тільки для зменшення перетину металу, що прокатується, називають обтискними або витяжними. Прокатку блюмів зручно вести в прямокутних (ящикових) калібрах. Кожний такий калібр можна застосувати для декількох проходів з переміщенням верхнього валка після кожного проходу. Внаслідок цього скорочується число калібрів і забезпечується велика кількість проходів. При прокатці в калібрах частково або повністю обмежується розширення, що підвищує пластичні властивості металу й дозволяє збільшити обтиснення за кожний прохід.

Розрахунок режиму обтиснень і конструювання калібрів для одержання заданого профілю прокату називають калібруванням валків.

Розрахунок режимів обтиснень і калібрування валків для прокатки блюмів виконують стосовно до заданих умов, головні з яких:

- характеристика блюмів: розміри, припустимі відхилення, вимоги до якості поверхні та ін.
- характеристика вихідного матеріалу: розміри й маса злитка, марка стали, температура прокату та ін.
- характеристика блюмінга: діаметр і довжина бочки валків, швидкість валків, потужність двигуна та ін.

Калібрування валків блюмінга включає наступні етапи:

1. Вибір вихідної заготовки.
2. Розрахунок максимального обтиснення за прохід.
3. Визначення й уточнення числа проходів.
4. Розрахунок середнього обтиснення за прохід.
5. Складання схеми кантування блюма.
6. Уточнення величини середнього обтиснення по товщині й по ширині заготовки.
7. Складання режимів обтиснень.
8. Вибір схеми розташування калібрів по довжині бочки.
9. Проектування калібрів.

При прокатці блюмів фактором, що лімітує обтиснення, є умова захоплення металу валками. Тому максимальне обтиснення за прохід визначають по формулі (4.12)

$$\Delta h_{\max} = 0.77 \cdot \mu^2 \cdot R_K$$

де  $\mu$  - коефіцієнт тертя при захопленні металу;

$R_K$  – радіус, що катає, валка.

Коефіцієнт тертя  $\mu$  визначають по формулі Гелеї (4.13)-(4.15)

радіус, що катає, валка  $R = D_K/2$ , де  $D_K$  - діаметр, що катає. Діаметром, що катає, називають діаметр валка в калібрі, якому відповідає швидкість смуги при виході з валків без урахування випередження. При прокатці в прямокутних калібрах діаметр, що катає, приймають рівним діаметру валка по дну калібру.

Сумарне обтиснення

$$\sum \Delta h = (C_{cp} + C_{sp}) \left[ (H-h) + (B-b) \right] \quad (6.1)$$

де  $H, h$  - товщина злитка й блюма відповідно;

$B, b$  - ширина злитка й блюма відповідно;

$C_{cp}$  - середній показник уширення;

$(H-h)$  - сумарне обтиснення по товщині;

$(B-b)$  - сумарне обтиснення по ширині.

Схема прокатки квадратної заготовки показана рис.

Величину уширення розраховують по формулі А.І. Целікова

$$\Delta b = 2C_b C_\sigma \left( \sqrt{R \Delta h} - \frac{\Delta h}{2\mu} \right) \left[ \left( \frac{h_1}{\Delta h} \right)^2 \ln \frac{h_0}{h_1} - \frac{h_1}{\Delta h} + 0.5 \right] \quad (6.2)$$

Однак через її складність на стадії проектування приймають на підставі досвідних даних  $C_{cp}=0.15$ . Тоді сумарне обтиснення

$$\sum \Delta h = 1.15 \left[ (H-h) + (B-b) \right] \quad (6.3)$$

Приймаючи середнє обтиснення за прохід рівним максимальному обтисненню за прохід  $\Delta h_{cp}=\Delta h_{max}$ , визначають число проходів по формулі

$$n' = \frac{\sum \Delta h}{\Delta h_{max}} = \frac{1.15 \left[ (H-h) + (B-b) \right]}{\Delta h_{max}} \quad (6.4)$$

Число проходів на одноклітьовому блюмінгу повинне бути непарним (для двуклітьових реверсивних блюмінгів – парним), щоб забезпечити вихід готового блюма на вихідний бік кліті й подальше транспортування до ножиць. Тому отримане значення  $n'$  округляють до найближчого більшого непарного числа  $n$ . Уточнена величина середнього обтиснення за прохід

$$\Delta h_{cp} = \frac{1.15 \left[ (H-h) + (B-b) \right]}{n} \quad (6.5)$$

Важливим при визначенні режимів обтиснень є визначення числа кантувань і розподіл їх по проходах. Для збільшення продуктивності число кантувань повинне бути мінімальним. Однак для одержання блюмів високої якості кантування бажано робити можливо частіше, тому що велике обтиснення в одному напрямку приводить до появи дефектів на бічній поверхні прокату. оскільки кантувач установлений з передньої сторони блюмінга, кантування здійснюють після парного числа проходів. Останнє кантування проводять перед останнім проходом.

Раціональними вважаються схеми кантувань після чотирьох проходів на початку прокатки й після двох - наприкінці прокатки. При цьому число проходів по товщині й по ширині не повинне відрізнятися більш ніж на одиницю. Наприклад, при 13 проходах схеми кантування можуть бути наступними:

2 до 2 до 2 до 2 до 2 до 2 до 1

4 до 4 до 4 до 1

4 до 4 до 2 до 2 до 1

Перша схема має 7 проходів по товщині й 6 по ширині, однак незадовільна за продуктивністю. Друга схема має 8 проходів по товщині й 5 - по ширині, що веде до неоднорідності деформації й погіршення якості прокату. Третя схема раціональна як по числу проходів (7 по товщині, 6 по ширині), так і по продуктивності. Однак при необхідності одержати заготовку з високими вимогами по якості **використовують** першу схему, незважаючи на зниження продуктивності.

У такий спосіб схема кантувань визначає кількість проходів по товщині  $n_h$  і по ширині  $n_b$ . Середні обтиснення по товщині й по ширині складуть відповідно:

$$\Delta h_{h_{cp}} = \frac{1.15(H-h)}{n_h} \quad \text{и} \quad \Delta h_{b_{cp}} = \frac{1.15(B-b)}{n_b}. \quad (6.6)$$

Після цього визначають режими обтиснень по проходах. Причому в перших проходах рекомендують приймати обтиснення менше середнього (внаслідок зниження коефіцієнта тертя через окалину), а в наступних - більше середнього. Розширення в перших проходах до кантування, обмежене калібром і в перших проходах після кантувань, можна прийняти рівним нулю, а в інших

$$(b = C(h,$$

де  $3$  – показник розширення. У навчальних розрахунках можна приймати  $3 = C_{cp} = 0.15$ .

Після визначення режиму обтиснень знаходять число калібрів і їхні розміри (рис. 6.3).

При визначенні розмірів прямокутного калібру рекомендується **використовувати** наступні співвідношення (див. рис. 6.3):

$$b_k = (0.95 \dots 1.0)b$$

$$B_k = b + (1.025 \dots 1.75)b$$

де  $b$  - ширина металу, що **задається** у валки;

( $b$  - вільне розширення).

Радіуси **закруглення сторін**:

$$r = (0.22 \dots 0.25)h_p; r_1 = (0.258 \dots 1.0)r.$$

Глибину рівчака  $h_p$  визначають зі співвідношення сторін прокату  $h/b$  після прокатки:

при $h/b < 1.2$	$h_p = 0$ (прокатка на гладкій бочці)
$h/b < 1.25 \dots 1.30$	$h_p = (0.2 \dots 0.3)h$
$h/b > 1.3025 \dots 1.35$	$h_p = (0.2 \dots 0.35 \dots 0.45)h_{min}$
$h/b > 0.3$	$h_p = (hk - t)/2$

де  $h_{min}$  – мінімальна висота розкату, що виходить із калібру;

$h_k$  – загальна висота калібру;

$t$  - зазор між валками в останньому проході,  $t = (0.02 \dots 0.08)D$ .

Чим більше діаметр валків  $D$ , тим менше значення коефіцієнта приймають при розрахунках.

Існують два способи розташування калібрів на валках блюмінгів (рис. 6.4а, б)

Перевагою зазначеної на рис. 6.4а схеми розміщення калібрів є висока продуктивність, тому що знижується час на переміщення блюма від калібру до калібру. Її недоліком є нерівномірне навантаження на опори валків при прокатці слябів. Якщо частка слябів у програмі блюмінга значна, можна застосовувати калібрування із гладкою бочкою по середині валка (див. рис. 6.4б)

### 6.2 Завдання.

6.1.1. Визначити число проходів і схему кантувань при прокатці блюма 140x140 зі злитка 740x740. Діаметр валків 1150 мм; швидкість прокатки 1,5 м/с; температура прокатки  $t=1150^{\circ}\text{C}$ .

6.1.2. Виконати калібрування валків блюмінга при прокатці блюма 450x450мм зі злитка 800x800мм. Діаметр валків 1500мм, швидкість прокатки 2м/с, температура прокатки  $1140^{\circ}\text{C}$ .

### 6.3 Домашнє завдання

Скласти режими обтиснень при прокатці блюмів з вуглецевої сталі заданого перетину зі злитків, розміри яких наведені. Діаметр валків 1300 мм, швидкість прокатки 2.5 м/с, температура прокатки  $1150^{\circ}\text{C}$ , матеріал - сталь 45.

Таблиця 6.1 - Вихідні дані

№ п/п	$H_0 \times B_0$	$h_1 \times b_1$
1	740x740	250x250
2	740x740	270x270
3	740x740	300x300
4	740x740	320x320
5	740x740	350x350
6	740x740	280x280
7	760x760	250x250
8	760x760	270x270
9	760x760	300x300
10	760x760	330x330
11	760x760	350x350
12	760x680	250x250
13	760x680	270x270
14	760x680	300x300
15	760x680	320x320
16	760x680	350x350
17	700x700	250x250
18	700x700	270x270
19	700x700	300x300
20	700x700	330x330
21	700x700	350x350
22	800x800	250x250
23	800x800	300x300
24	800x800	350x350

#### 6.4. Контрольні питання.

1. Дати визначення блюма й сляба.
2. Укажіть типи блюмінгів.
3. Назвіть завдання калібрування валків блюмінга.
4. Який з факторів є, що лімітує при прокатці блюмів?
5. Обґрунтуйте призначення числа проходів для одноклітьового блюмінга.
6. Приведіть формулу для розрахунку числа проходів при прокатці блюмів.
7. Укажіть основні параметри ящикового калібру.

### 7 Визначення положення нейтральної лінії калібру. Розрахунок калібрування безперервних станів.

#### (практичне заняття №6)

**Ціль роботи:** закріплення теоретичних знань, придбання практичних навичок за розрахунками калібрувань за розрахунками калібрувань валків сортових станів, визначенню положення нейтральної лінії калібру.

#### 7.1. Теоретичні відомості.

Калібром називається просвіт певної форми, утворений двома валками в їхньому робочому положенні в прокатній клітці.

Рівчаком називається кільцевий виріз або виступ будь-якої форми на бочку одного валка. Рівчаки верхнього й нижнього валків утворюють калібр.

Калібрування профілю – метод визначення форми й розмірів послідовного ряду перехідних перетинів прокату від вихідної заготовки до готового профілю. Калібрування профілю включає визначення режимів обтиснень у кожному проході.

Калібрування прокатних валків – число й порядок розташування калібрів по довжині бочки валків.

Завдання калібрування профілю включають:

- визначення найбільш раціональної форми розкату в кожному перехідному перетині;
- визначення мінімального числа проходів, за яке можна одержати готовий профіль із урахуванням оптимального навантаження устаткування, тобто забезпечення максимальних витяжок за проход;
- забезпечення заданого температурного режиму, щоб зниження температури було мінімальним, а її розподіл по перетині - рівномірним;
- вибір форми калібрів, що забезпечують мінімальну енергію деформації, щоб розкат не защемлявся й вільно виходив з калібру;
- забезпечення простоти настроювання прокатних клітей, мінімізація простотів **стану**, підвищення його продуктивності;
- раціональне калібрування бочки прокатних валків, тобто найбільш доцільне **розташування** калібрів по довжині бочки валків.

Від правильності побудови калібру залежить прямолінійність виходу металу з валків. Для побудови калібру необхідно **визначити** його нейтральну лінію й середню лінію валків.

Середньою лінією валків називають горизонтальну лінію, що **ділить** навпіл відстань між осями верхнього й нижнього валків (рис. 7.1).

Залежно від типу стана і його калібрування діаметри верхнього  $D_v$  і нижнього  $D_n$  валків і зазор між валками  $t$  можуть бути різними. Тоді міжосова відстань дорівнює номінальному діаметру кліті

$$D_0 = \frac{D_{v \max} + D_{n \max}}{2} + t \quad (7.1)$$

Відстань від середньої лінії до осі валка

$$a = \frac{D_0}{2} = \frac{D_{v \max} + D_{n \max}}{4} + \frac{t}{2} \quad (7.2)$$

Розділ калібру – місце, де лінія обрису профілю переходить із одного валка на іншій.

Радіуси закруглення окремих елементів калібру виконуються з метою місцевого збереження температури й запобігання подрізів, більше сприятливих умов деформації в калібрі.

У розрахунках калібрування профілів при розрахунку швидкісних режимів необхідно знати розрахунковий діаметр валків. У зв'язку з мінливістю діаметра валків по **периметрі** калібру прийнятий умовно-розрахунковий діаметр валків – катаючий діаметр, калібру. Катаючий діаметр валків- це діаметр, якому відповідає швидкість виходу прокату з валків без урахування випередження. Його **визначають** по **наведеній** висоті прокату  $h_{\text{прив}}$

$$h_{\text{прив}} = F/b$$

де  $F$  - **площа** калібру;

$b$  - ширина калібру по **заповненню** металом.

Тоді **величина** діаметра, що катає

$$D_k = D_0 - h_{\text{прив}} = D_0 - (F/b) \quad (7.3)$$

Нейтральна лінія калібру – це лінія, щодо якої валки роблять рівнозначний силовий вплив на верхню й нижню частини металу. Т.е. це горизонтальна лінія калібру щодо якої величини моментів сил від верхнього й нижнього валків однакові при сполученні її із середньою лінією валків.

Для калібру, що має горизонтальну вісь симетрії, нейтральна лінія збігається із цією віссю. Для визначення нейтральної лінії калібру, що має тільки вертикальну вісь симетрії, застосовують метод, заснований на визначенні положення центра ваги перетину. У цьому випадку нейтральна лінія калібру являє собою горизонталь, що проходить через центр ваги калібру.

Послідовність розрахунку ординати нейтральної лінії наступна:

- калібр складної форми розбивають на ряд простих фігур, для яких можна визначити площу й положення центру ваги. Ці параметри для деяких простих перетинів наведені на рис. 7.2.;
- проводять допоміжну горизонтальну вісь  $X$ . Доцільно, щоб вона збігалася з однієї зі сторін калібру;

- визначають площі простих фігур і ординати їхніх центрів ваги щодо осі X по формулі:

$$S_i = F_i y_{ci},$$

де  $F_i$  – площа  $i$ -ої фігури;

$y_{ci}$  – ордината центра ваги  $i$ -ої фігури з урахуванням знака;

- визначають положення ординати центра ваги калібру по формулі:

$$y_c = \frac{\sum S_i}{\sum F_i} = \frac{\sum F_i y_{ci}}{\sum F_i},$$

і відкладають крапку Z на цій відстані від осі X на вертикальній осі асиметрії.

Проведена через крапку Z горизонталь і буде середньою лінією калібру.

Для забезпечення прямолінійного виходу металу з валків необхідно, щоб нейтральна лінія калібру збігалася із середньою лінією валків. Після їхнього сполучення визначають положення калібру на валку й будують калібри.

На практиці калібри на бочках валків не завжди розміщують при сполученні середньої лінії валків з нейтральною лінією калібру. Причина в наступному. Внаслідок нерівномірності нагрівання, неоднорідності хімічного складу по перетині прокату й т.д. можуть з'явитися відхилення від стійкого й прямолінійного виходу розкату з валків. Тому заздалегідь задають певне положення прокату на виході з валків, використовуючи поняття верхнього або нижнього тиску валків. Тиск валків - перевищення одного діаметра над іншим, характеризується різницею:

$$\text{верхній тиск} \quad \Delta D_B = D_B - D_H; D_B > D_H;$$

$$\text{нижній тиск} \quad \Delta D_H = D_H - D_B; D_H > D_B, \quad (7.4)$$

де  $D_B$  і  $D_H$  – діаметри верхнього й нижнього валків.

При виході з валків метал буде гнутись в напрямку валка з меншим діаметром.

На сортових станах, як правило, використовують верхній тиск валків у межах 0.5.....5мм залежно від стана й кліті. Тому нейтральну лінію калібрів розташовують нижче середньої лінії валків на величину  $0.25\Delta D_B$ . Лінія на якій розташовуються калібри, називається лінією прокатки.

При розміщенні калібрів на бочку валка дотримуються наступного порядку розрахунку:

- при даних діаметрах бочки верхнього й нижнього валків  $D_B$  і  $D_H$  і прийнятому зазорі  $t$  між ними визначають значення номінального діаметра по формулі (7.1);
- визначають середню лінію валків по формулі (7.2);
- сполучають лінію прокатки із середньою лінією валків. Якщо приймають певну величину верхнього або нижнього тиску, то лінію прокатки зміщують по вертикалі на величину  $\pm 0.25\Delta D_B$  від середньої лінії;
- визначають нейтральну лінію калібру по викладеній вище методиці, сполучають її з лінією прокатки й вичерчують повністю калібр із усіма його елементами;
- визначають ширину буртів у калібру й зазор між валками по краях бурту.

При калібруванні валків безперервних сортових станів необхідно враховувати рівність секундних обсягів металу для кожної кліті:

$$F_1 V_{h1} = F_2 V_{h2} = \dots = F_n V_{hn} = \text{const} = C \quad (7.4)$$

де  $F$  - площа поперечного перерізу розкату на виході з валків;

$V_h = V(1+S)$  – швидкість розкату на виході з валків з урахуванням випередження  $S$ ;

$V$  - швидкість прокатки.

Величину  $C$  називають константою безперервного стану. З обліком того, що випередження  $S$  незначно змінюється по клітях стану, можна записати:

$$F_1 V_1 = F_2 V_2 = \dots = F_n V_n = \text{const} = C \quad (7...5)$$

або  $F_i = D_{ki} n_i = C$ ,

де  $D_k$  – діаметр, що катає, валків;

$n$  - частота обертання валків стану.

Недотримання цього співвідношення в кожній із клітей веде до міжклітьового натягнення або утворення петлі між клітями.

## 7.2. Завдання

7.2.1. Визначити положення нейтральної лінії калібру в останньому чистовому проході для швелера №18

7...2.2. Визначити швидкості в чистовій безперервній групі

## 7.4. Контрольні питання.

1. Що називається калібром, струмком?
2. Укажіть основні завдання калібрування профілю?
3. Що називається калібруванням профілю, калібруванням валків? У чому їхньої відмінності?
4. Як визначити положення середньої лінії валків?
5. Укажіть призначення радіусів закруглень елементів калібру.
6. Дайте визначення діаметра, що катає, валків. Як його розрахувати?
7. Укажіть методику визначення нейтральної лінії калібру.
8. Укажіть умови прямолінійного виходу металу з калібрів.
9. Сформулюйте поняття “тиск валків”. Його призначення.
10. Як визначити положення лінії прокатки при верхньому, нижньому тиску?
11. Як визначити швидкості прокатки в клітях безперервної групи?

## 8 Техніко-економічні показники виробництва сортової сталі.

### (практичне заняття № 7)

Ціль заняття: придбання студентами практичних навичок і закріплення теоретичних знань за розрахунками продуктивності й оцінці техніко-економічних показників сортових станів.

### 8.1. Теоретичні відомості.

До основних техніко-економічних показників сортових станів ставляться продуктивність, а також витрата металу, електроенергії, палива, валків і води.

Технічно можливу годинну продуктивність сортового стану визначають по формулі



$$A = \frac{3600 \cdot G}{T} \quad \text{т/ч} \quad (8.1)$$

а практично можливу годинну продуктивність по формулі

$$A_1 = \frac{3600 \cdot G}{T} K \quad \text{т/ч} \quad (8.2)$$

де  $G$  - маса профілю, що прокатується;

$T$  - ритм прокатки;

$K$  - коефіцієнт використання стана, його приймають рівним 0,85 для рейко-балкових, крупно-, середньо- і дрібносортових станів лінійного типу й 0.9 для безперервних сортових і дротопркатних станів.

Для визначення ритму прокатки на сортових станах звичайно будують графіки роботи в часі (графіки Адамецького). Ритм прокатки визначається найбільшою тривалістю прокатки в одній кліті. Так, для станів з реверсивними клітями

$$T = \sum_{i=1}^n t_{M_i} + \sum t_{n_i} \quad (8.3)$$

де  $t_{M_i}$  – машинний час в  $i$ -м проході;

$t_{n_i}$  – час пауз для  $i$ -го проходу;

$n$  - число проходів у кліті з найбільшою тривалістю прокатки.

Для безперервних станів

$$T = t + t_n$$

Де  $t_M$ ,  $t_n$  – машинний час і час паузи для кліті з найбільшою тривалістю прокатки. Такі кліті називають "вузьким місцем". Ритм прокатки для стана буде меншим при рівномірному розподілі тривалості прокатки по клітях, тобто коли на стані ні "вузьких місць". Машинний час у даному проході визначається по формулі

$$t_M \approx \frac{l}{v}$$

де  $l$  - довжина розкату після кліті;

$v$  - швидкість прокатки в даній кліті.

У реверсивних клітях варто також урахувувати час на реверсування розкату.

Тривалість прокатки одного розкату на стані залежить від типу **стана**. Для безперервного **стана**, у якому машинний час для кожної кліті однаково

$$T_{np} = m \cdot t_M + \sum t_n \quad (8.4)$$

де  $m$  - число послідовних безперервних груп у лінії стана.

Для інших станів

$$T_{np} = \sum t_M + \sum t_n \quad (8.5)$$

Таким чином, одночасне знаходження смуги в декількох клітях (безперервний стан) забезпечує не тільки найменший ритм прокатки, але й найменшу тривалість прокатки.

Графіки роботи в часі прокатних станів називають графіками Адамецького (по імені їхнього автора). По горизонтальній осі графіка відкладають час у секундах, а по вертикальній осі - номер клітей стана. Тривалість проходу

(машинний час) показана на графіку товстою лінією по горизонталі, що відповідає даної кліті, а паузи між проходами - вільними проміжками між двома товстими лініями. Передача смуги з однієї кліті в іншу показана на графіку похилими лініями.

Час передачі розкату між окремо вартими клітями й безперервними групами клітей визначають як

$$t_n' = \frac{l_K}{v_{TP}}$$

де  $l_K$  – відстань між клітями;

$v_{TP}$  – швидкість транспортування розкату.

Час пауз для даної кліті вибирають за графіком Адамецького з умови, щоб між попереднім і наступним розкатом у лінії стана зберігалася певна відстань.

Визначивши ритм прокатки для кожного профілю, можна визначити практично можливу годинну продуктивність стана по формулі

$$A_{cp} = \frac{1}{\frac{a_1}{A_1} + \frac{a_2}{A_2} + \frac{a_3}{A_3} + \dots + \frac{a_n}{A_n}}, \quad \text{т/ч} \quad (8.6)$$

де  $A_1, A_2, A_3, A_n$  – продуктивність стана при прокатці різних профілів, т/ч;

$a_1, a_2, a_3, a_n$  – частка тих же профілів або груп у програмі прокатки.

Річну продуктивність стана розраховують по формулі

$$A_{\Gamma} = A_{cp} * T_{\Phi} \quad (8.7)$$

Де  $T_{\Phi}$  – фактичний час роботи стана в плинні року.

Тривалість роботи й ремонту для сортових станів, що працюють за графіком, наведена в табл.8.1.

Витрата металу визначається коефіцієнтом виходу придатного із заготовки. При цьому враховуються втрати металу на вигар у нагрівальних печах і під час прокатки, на обрізь кінців на ножицях або пилках і брак. При прокатці сортової сталі найбільші втрати металу мають місце на крупносортових, а найменші – на середньосортних і дротопркатних станах. Вихід придатного на сортових станах становить 0.91.....096, причому більші значення стосуються дрібносортових, смугових і дротопркатних станів. Витрата заготовки на 1 т готового прокату становить 1.099..1,104т.

Витрата електроенергії на сортових станах залежить від форми й розмірів профілю, що прокатується, сумарної деформації металу й інших факторів. **Середня питома витрата** електроенергії для різних станів показаний у табл.8.2.

Витрата палива на рейкобалкових і сортових станах при **нагріванні заготівель** у печах **становить 500 тис.ккал** на 1т **заготівель**, на дрібносортових, **дротових** і **штрипсових** станах – **360 тис.ккал** на 1т **заготівель**.

Витрата валків залежить від **зношування** калібрів, стійкості валків, кількості переточувань і т.д. Дані по **витраті** валків на 1т готовій продукції для різних станів **наведені** в табл.8.2.

**Витрата води.** На сортових станах вода витрачається на охолодження валків і готового прокату. Витрата води становить від 3400 м<sup>3</sup>/год на крупно-сортних і рейкобалкових станах до 1800...2000м<sup>3</sup>/год на дрібносортних і дрових станах.

Таблиця 8.2. - Техніко-економічні показники сортових станів.

	Тип стана	Питома витрата валків, кг/т	Витрата електроенергії, кВт·ч/т (МДж/т)
1.	Рейкобалковий	3.5	65 (234)
2.	Крупносортний	2.5	50...55(180...198)
3.	Безперервний середньосортний	1.0...1.5	35...45(126...162)
4.	Безперервний дрібносортний	0.4	50 (180)
5.	Безперервний дровий	0.3	70 (252)

### 8.2. Завдання.

8.2.1.Визначити річну продуктивність безперервного середнесортного стану при прокатці сталевго кутика №5 (площа поперечного переріза 480 мм<sup>2</sup>) із заготовки 60х60х2000мм. Швидкість прокатки в останній кліті V=15м/с, час паузи 1.5с.

8.2.2.Визначити тривалість прокатки круглого перетину діаметром 20мм із заготовки 150х150х12000мм, швидкість прокатки в останній кліті – 25м/с. Стан має 3 безперервні групи клітей з відстанню між клітями 3.5м, відстань між групами клітей – 8м. У першій групі 8 клітей, у **другій** і **третій** – по 6. Середня витяжка за прохід  $\lambda_{cp}=1.35$ .

### 8.3. Домашнє завдання.

Побудувати графік Адамецького для безперервного стану, що має дві безперервні групи (6 клітей у першої, 8 - у другій групі). Відстань між клітями - 4м, відстань між групами - 10м. Витяжки в кожному проході прийняти рівними середній витяжці

Таблиця 8.3. - Вихідні дані до рішення завдання 8.3.

№ п/п	Швидкість прокатки в останній кліті, м/с	Готовий прокат	Розміри вихідної заготовки
1	7	└ №5 (F <sub>1</sub> =480мм <sup>2</sup> )	60х60х5000
2	7	└ №4.5 (F <sub>1</sub> =429мм <sup>2</sup> )	60х60х5000
3	7	└ №4 (F <sub>1</sub> =308мм <sup>2</sup> )	60х60х5000
4	7	( 14х14	60х60х4000
5	7	( 16х16	60х60х5000
6	7	( 20х20	80х80х4000
7	7	( 25х25	80х80х5000
8	7	( 30х30	100х100х4000
9	7	( 35х35	100х100х4000
10	7	└ №7 (F <sub>1</sub> =815мм <sup>2</sup> )	80х80х4000

11	5	└ №7.5 ( $F_1=1010\text{мм}^2$ )	80x80x4000
12	5	( 15 мм	80x80x4000
13	5	( 20 мм	80x80x6000
14	5	( 25 мм	80x80x5000
15	5	( 30 мм	80x80x5000
16	5,5	( 35 мм	100x100x5000
17	5,5	( 40 мм	100x100x6000
18	5,5	I №14 ( $F_1=1740\text{мм}^2$ )	120x120x4000
19	5,5	I №20 ( $F_1=2680\text{мм}^2$ )	100x100x4000
20	6,5	I №10 ( $F_1=1200\text{мм}^2$ )	100x100x5000
21	6,5	[ №5 ( $F_1=616\text{мм}^2$ )	80x80x6000
22	6,5	[ №8 ( $F_1=898\text{мм}^2$ )	60x60x6000
23	6,5	[ №10 ( $F_1=1090\text{мм}^2$ )	80x80x5000
24	4,5	└ №5.6 ( $F_1=438\text{мм}^2$ )	100x100x6000
25	4,5	└ №6.3 ( $F_1=613\text{мм}^2$ )	80x80x6000

#### 8.4. Контрольні питання.

1. По якій формулі розраховують практичну годинну продуктивність стана?
2. Укажіть основні техніко-економічні показники сортових станів.
3. Що називають «вузьким місцем стану»?
4. Що називають ритмом прокатки?
5. Від чого залежить витрата палива на сортових станах?
6. Яка умова забезпечує найменший ритм і найменшу тривалість прокатки?
7. Як будуються графіки Адамецького?
8. Чим визначається вихід придатного на сортових станах?

### 9 Техніко-економічні показники виробництва листової сталі. (практичне заняття №8)

**Ціль заняття:** придбання студентами практичних навичок і закріплення теоретичних знань за розрахунками продуктивності й оцінці техніко-економічних показників листових і смугових станів гарячої й холодної прокатки.

#### 9.1. Теоретичні відомості.

До техніко-економічних показників виробництва листової сталі ставиться продуктивність стана, витрата металу, витрата електроенергії, витрата палива, витрата валків і витрата води.

Технічно можлива годинна продуктивність листового стана:

$$A = \frac{3600 \cdot G}{T}, \quad (9.1)$$

а практично можлива:

$$A_1 = \frac{3600 \cdot G}{T} \cdot K_{\text{и}}, \quad (9.2)$$

де  $G$  - маса листа, що прокатується, (смуги);

T - ритм прокатки;

$K_n$  – коефіцієнт використання стана.

Коефіцієнт використання стана  $K_n$  становить 0.85.....090.90, причому більше значення ставиться до безперервних станів.

Ритм прокатки двохклітьового стану залежить від розподілу проходів між клітьями. Він буде найменшим при однаковому завантаженні клітей за часом.

На безперервних широкоштабових станах у чорновій групі штаба прокатується послідовно в кожній кліті, а в чистовий - одночасно у всіх клітьях. Час прокатки в чорновій групі менше, ніж у чистовий (так званий час, що перекривається, тобто він перекривається часом інших операцій, що проходять одночасно). Тому ритм прокатки на безперервних смугових станах:

$$T = t_m + t_n \quad (9.3)$$

де  $t_m$  – машинний час для однієї чистової кліті;

$t_n$  – час паузи між кінцем прокатки попередньої смуги й початком прокатки наступної в чистовій кліті.

Збільшенню продуктивності стана сприяє збільшення швидкості прокатки, маси сляба й рулону, а також скорочення часу пауз.

Ритм прокатки на безперервному стані холодної прокатки можна визначити, використовуючи діаграму зміни швидкості при прокатці одного рулону (рис.9.1):

$$T = t_m + t_b, \quad (9.4)$$

де  $t_m$  – машинний час при прокатці одного рулону.

$t_b$  – час допоміжних операцій, дорівнює більшому із часу завантажувально-розвантажувальних операцій в головній або хвостовій частині стану.

Для реверсивних станів:

$$T = \sum t_m + \sum t_n + t_b$$

де  $\sum t_m$  – сумарний машинний час;

$\sum t_n$  – сумарний час пауз.

На діаграмі зміни швидкості при прокатці одного рулону розрізняють наступні періоди: прокатка переднього кінця смуги з постійною заправною швидкістю (час  $t_1$ ); прискорення стана для збільшення швидкості із заправної до робочої (час  $t_2$ ); прокатка на постійній робочій швидкості (час  $t_3$ ); зі стана з робочої до заправної швидкості (час  $t_4$ ); прокатка заднього кінця смуги з постійною заправною швидкістю (час  $t_5$ ). Тоді машинний час:

$$t_m = t_1 + t_2 + t_3 + t_4 + t_5. \quad (9.5)$$

Час прискорення стана:

$$t_2 = \Delta V/a, \quad (9.6)$$

де  $\Delta V = V_p - V_3$  – збільшення швидкості із заправної  $V_3$  до робочої  $V_p$ ;

$a$  - прискорення стана.

Час зі стана:

$$t_4 = \Delta V/a_3 \quad (9.7)$$

де  $a_3$  – зі стана.

Для визначення машинного часу визначимо довжину смуги. Вона буде дорівнювати площі фігури, обмеженої графіком швидкості (див. рис. 9):

$$L = V_3 \cdot t_M + \frac{a \cdot t_2^2}{2} + \frac{a_3 \cdot t_4^2}{2} + \Delta V \left[ t_1 + t_2 + t_4 + t_5 \right] \quad (9.8)$$

Вирішуючи це рівняння відносно  $t_M$  і підставляючи у формулу для визначення годинної продуктивності стана, одержимо:

$$A = \frac{3600 \cdot G \cdot \left( V_3 + \Delta V \right)}{L - \frac{a \cdot t_2^2}{2} - \frac{a_3 \cdot t_4^2}{2} + \Delta V \left( t_1 + t_2 + t_4 + t_5 \right) + t_B \left( V_3 + \Delta V \right)} \quad (9.9)$$

Приймаючи довжину переднього й заднього кінців рулону рівною  $L$ , визначаємо час прокатки на заправній швидкості:

$$t_1 + t_5 = L / V_3 \quad (9.10)$$

Позначивши

$$k = (a + a_1) / (2a_1)$$

і підставивши у формулу (9.9), одержимо остаточну формулу для розрахунку годинної продуктивності:

$$A = \frac{3600 \cdot G \cdot V_p}{L + k \cdot \Delta V^2 + \Delta V / V_3 + t_B \cdot V_p} \quad (9.10)$$

Річна продуктивність:

$$A_r = A \cdot \Phi_r \quad (9.11)$$

При розрахунку продуктивності реверсивного стана холодної прокатки ритм прокатки розраховується для всіх проходів у межах одного рулону. Графік зміни швидкості реверсивного стана показані на мал. 9.1. З розмотувача на заправній швидкості  $V_3$  передній кінець смуги прокатується в кліть й задається в моталку. Після цього кліть прискорюється за час  $t_y$  до робочої швидкості, на якій у плині  $t_n$  ведеться прокатка із до повної зупинки за час  $t_r$ . Під час реверса  $t_p$  відбувається зміна межвалкового зазору, після чого здійснюються розгін, прокатка, з і реверс. В останньому проході після прокатки на робочій швидкості треба з до заправної швидкості й прокатка заднього кінця рулону за час  $t_3$ . Допоміжний час  $t_b$  призначений для вантажно-розвантажувальних операцій на моталці й розмотувачі. Таким чином, ритм прокатки реверсивного стана при  $n$  проходах:

$$T = \sum_{i=1}^n t_n + \sum_{i=1}^n \left( t_y + t_r \right) + \sum_{i=1}^{n-1} t_p + t_{31} + t_{32} + t_b \quad (9.12)$$

Час  $t_n$ ,  $t_y$ ,  $t_r$ ,  $t_3$  у кожному проході визначаються, як і для безперервного стана, час реверса  $t_p$  визначають, виходячи зі швидкості натискного механізму  $V_H$ :

$$t_p = \Delta h_i / V_H$$

Час  $t_b$  приймається рівним більшому із часу завантаження наступного рулону й розвантаження попереднього.

Годинну продуктивність реверсивного стана можна визначити по формулах (9.1) і (9.2), річну - по формулі (9.11).

Нормативний річний фонд робочого часу  $\Phi_r$  для прокатних станів, що працюють за графіком, наведений у табл. 9.1.

Таблиця 9.1. - Нормативний річний фонд робочого часу для листових і смугових станів

Стан	Номінальний час роботи			Простій		Фонд робітника часу
	Доби в році	Годин у добу	Годин у році	%	годин	
Товстолистовий	345	24	8280	10	880	7400
НШПС і ПНШПС	338	24	8112	13	1112	7000
Безперервний 3-х і 4-х клетевий холодні прокатки	338	24	8112	10	812	7300
НСХП 5-клетевий	338	24	8112	13	1112	7000
Реверсивний холодної прокатки	338	24	8112	7,5	612	7500

Дані по інших техніко-економічних параметрах станів гарячої прокатки аркушів і смуг наведені в табл. 9.2, а станів холодної прокатки – у табл.9.3.

Таблиця 9.2 - Техніко-економічні показники листових станів гарячої прокатки.

	Видатковий коефіцієнт	Витрата електроенергії	Витрата палива	Витрата валків	Витрата води
Двухквіттові ТЛС	1, 18-1,27	216 (60)	2,51	1,25	2600
<b>НШПС</b>	1, 03-1,075	216(60)	2,10	0, 8-1,5	7500

Таблиця 9.3. - Техніко-економічні показники станів холодної прокатки.

### 9.2. Завдання.

9.2.1. Визначити годинну продуктивність безперервного широкоштабового стану при прокатці штаби перетином 5x1800 мм зі сляба 300x1600x9000 мм. Швидкість прокатки в останній чистовій кліті – 20 м/с. час паузи прийняти 1.5с, коефіцієнт виходу придатного  $K_r=0.85$ .

9.2.2. Визначити годинну продуктивність безперервного стана холодної прокатки при прокатці смуги 0.5x1200 мм у рулонах масою 10 т з гарячекатаної смуги 2x1200мм при наступних даних: швидкість прокатки в останній кліті – 15 м/с, заправна швидкість – 2м/с, прискорення стану – 1.8 м/с<sup>2</sup>, довжина переднього й заднього кінців – 5м, час допоміжних операцій – 50 с.

### 9.3. Домашнє завдання.

Визначити річну продуктивність безперервного стана холодної прокатки, якщо час допоміжних операцій на стані - 60з, довжини кінців - 5м.

№ вар	Перетин заготовлі H <sub>0</sub> xh <sub>0</sub> , мм	Кінцева товщина h, мм	Маса руло- ну, т	Швидкість в останній кліті, м/с	Швид- кість за- прав-на, м/с	Прис- ко- рення, м/с <sup>2</sup>	З, м/с <sup>2</sup>
1	2x1000	0,4	8	10	0,8	1	1,2
2	2x1000	0,5	8	11	0,7	1	1,2
3	2,5x1000	0,6	8	12	0,8	1	1,2
4	2,5x1000	0,7	8	10	0,7	1	1
5	2,5x1000	0,8	10	11	0,8	1	1
6	2,5x1000	0,9	10	12	0,7	2	1,8
7	3x1000	1,0	12	15	0,7	2	1,8
8	2x1200	0,4	10	10	0,7	2	1,8
9	2x1200	0,5	10	11	0,8	2	2,2
10	2x1200	0,6	10	12	0,6	2	2,2
11	2x1200	0,7	10	15	0,6	2	2,2
12	2,5x1200	0,8	10	10	0,8	1,5	1,8
13	2,5x1200	0,9	10	11	0,7	1,5	1,8
14	3x1200	1,0	12	12	0,6	1,5	1,8
15	3x1200	1,2	12	15	0,8	1,5	1,5
16	2x1500	0,5	10	10	0,7	1,5	1,5
17	2x1500	0,6	10	11	0,8	2	2,1
18	2x1500	0,7	10	12	0,6	2	2,1
19	2,5x1500	0,8	12	14	0,6	2	2,1
20	2,5x1500	0,9	12	16	0,6	2	2
21	3x1500	1,0	15	20	0,7	2	2
22	3x1500	1,2	15	15	0,6	2,5	2,6
23	2x1800	0,5	10	10	0,7	2,5	2,6
24	2x1800	0,6	10	11	0,7	2,5	2,6
25	2x1800	0,7	12	12	0,8	2,5	2,3
26	2,5x1800	0,8	12	15	0,6	1,5	1,6
27	2,5x1800	0,9	12	20	0,5	1,5	1,6
28	3x1800	1,0	15	15	0,5	1,5	1,5
29	3x1800	1,2	15	12	0,5	1,5	1,5
30	3,5x1800	1,5	18	10	0,8	1,5	1,4

### і. Контрольні питання

1. Які фактори визначають продуктивність безперервних широкополосних станів?
2. Укажіть шляхи зниження ритму прокатки на НШПС.
3. Назвіть складові ритму холодної прокатки на безперервному стані.
4. Як розрахувати годинну продуктивність стану холодної прокатки?



