

5.3 Побудова калібрів

Усі розрахункові параметри вносимо в табл.5.6, з якої виходить, що величини розрахункових обтиснень не перевищують допустимих. На підставі отриманих даних роблять визначення розмірів калібрів з урахуванням закруглень вершин. Деякі формули за розрахунком розмірів ящичних калібрів дані в гл.1 і §5.1.3, якими слід скористатися для побудови калібрів.

У ромбічному і квадратному калібрах приблизно приймають наступні радіуси закруглень:

при вершині - $r = (0,15...0,2) h_k$;
у проміжку - $r_1 = (0,08...0,2) b_k$.

Висота і ширина урізання в квадратному калібрі:

$$h_k = h - 0,82r; \quad b_k = b - S, \quad (5.13)$$

у ромбічному калібрі:

$$h_p = h - r \sqrt{1 + b^2/h^2 - 1}; \quad b_p = b - S \cdot b/h, \quad (5.14)$$

де b_p – ширина урізання калібра у валки.

З урахуванням закруглення вершин розміри калібрів в клітках 13 і 14 будуть рівні:

кліть 13 (ромб):

$$\begin{aligned} r &= 0,15 \cdot 98 \approx 15 \text{ мм}; \\ h_p &= 98 - 15 \sqrt{1 + 2,05^2 - 1} = 87 \text{ мм}; \\ b_p &= 141 - 7 \cdot 1,43 = 130 \text{ мм}; \end{aligned}$$

кліть 14 (квадрат):

$$\begin{aligned} r &= 0,15 \cdot 115 = 17 \text{ мм}; \\ h_k &= 115 - 0,82 \cdot 17 = 101 \text{ мм}; \\ b_k &= 115 - 7 = 108 \text{ мм}. \end{aligned}$$

За даними розрахунку необхідно побудувати ромбічний (13) і квадратний (14) калібри.

Простір на розширення в квадратному калібрі з урахуванням закруглення вершин в ромбічному калібрі рівний:

$$\Delta b_\phi = b_k - h_p = 108 - 87 = 21 \text{ мм},$$

що більше розрахункового розширення $\Delta b_d = 17$ мм) (табл.5.6), а отже, переповнювання чистового калібру не буде. Якщо $\Delta b_d > \Delta b_\phi$, то необхідно дещо збільшити радіус при вершині ромбічного калібру.

5.4 Методика розрахунку калібрування валків для прокатки круглого профілю на неперервному стані

Загальні принципи розрахунку розмірів калібрів для прокатки круглого профілю залишаються такими ж, що і при розрахунку калібрування валків НЗС. Дещо змінений підхід до визначення середнього коефіцієнта витягання по клітках стана, а нові форми калібрів чистової групи (овал, ребровою овал, круг) змінюють значення коефіцієнта форми n_ϕ .

Виконуємо розрахунок калібрування валків для прокатування круглого профілю діаметром $d = 20$ мм. Задаємо початкові дані: діаметр валків по буртах в чорновій групі $D_6 = 400$

мм, в чистовій - $D_6 = 250$ мм; швидкість прокатки профілю в чистовій клітці $v = 15$ м/с; розміри заготовки 100×100 мм; кількість клітей по групах, що беруть участь в прокатуванні профілю: чорнова – 7, чистова – 8; система калібрування в чорновій групі – ящичний прямокутник (квадрат) – гладка бочка; у чистовій групі овал – ребровий овал (рис.4.14)[14]. На підставі рекомендації [1] коефіцієнт витягання в чистовому калібрі (круглому або квадратному) рівний:

$$\mu_{\text{ч}} = 1,13 + 0,05 (d - 5) / 145 \quad (5.15)$$

$$\mu_{\text{ч}} = 1,13 + 0,05 (c - 5) / 145,$$

для передчистового калібру (овалу або ромбу);

$$\mu_{\text{пч}} = 1,21 + 0,05 (d - 5) / 145; \quad \left. \vphantom{\mu_{\text{пч}}} \right\} \quad (5.16)$$

$$\mu_{\text{пч}} = 1,21 + 0,05 (c - 5) / 145,$$

де d і c – діаметр чистового круга і сторона чистового квадрата.

Для даного прикладу масмо ($d = 20$ мм): $\mu_{14} = 1,215$ і $\mu_{15} = 1,135$, а площі поперечного перерізу дані в таблиці.

У першому калібрі (кліть 1) приймають невелике обтиснення з метою видалення окалини і тому $\mu_1 = 1,05$. Тоді сумарний коефіцієнт μ_{Σ} в клітках, що залишилися (кліті 2-13) рівний: μ_{Σ}

$$\mu_{2-13} = q_0 / \mu_1 \cdot \mu_{14} \cdot \mu_{15} \cdot q_{15} = 10000 / 1,45 \cdot 314 = 21,9.$$

Як слідує з рис. 4.14, в клітках 1-6 чорнової групи передбачено калібрування прямокутник - гладка бочка - ящичний квадрат, а в чистовій групі клітей - система овал - ребровою овал[14].

Для круга	Для овала
$q_{15} = \pi d_{15}^2 / 4 = 0,785 \cdot 20^2 = 314 \text{ мм}^2$	$q_{14} = q_{15} \cdot \mu_{15} = 314 \cdot 1,135 = 357 \text{ мм}^2$

Заздалегідь визначимо середній коефіцієнт витягання в клітках 2-13:

$$\mu_{\text{ср}} = \sqrt[12]{\mu_{2-13}} = \sqrt[12]{21,9} = 1,293. \quad (5.17)$$

Чорнова група клітей

Розрахунок розмірів калібрів в чорновій групі виконуємо по аналогії з розрахунком калібрування валків чорнової групи НЗС. Відповідно до рис. 4.14 в клітках 1,2 розміщені ящичні

прямокутні калібри, в клітках 3,5 – ящичні квадратні калібри, в клітках 4,6 – валки з гладкою бочкою (без урізувань), в клітці 7 – ребровий овал (проміжний).

Коефіцієнт витягання в клітках стана може бути в межах $\mu_i = 1,2 \dots 1,5$, а в окремих випадках приймає значення менше або більше середнього коефіцієнта витягання. Оскільки в чорновій групі розміри калібрів більші, ніж в чистовій групі, то середній коефіцієнт витягання в чорновій групі приймаємо менше середнього, тобто

$$\mu_{\text{чр}} = (0,97 \dots 0,99) \mu_{\text{ср}}$$

де $\mu_{\text{чр}}$ – середній коефіцієнт витягання в клітках чорнової групи.

Приймаємо $\mu_{\text{чр}} = 0,99 \cdot 1,293 = 1,273$. Тоді, площа поперечного перерізу в клітці 7 чорнової групи рівна

$$q_7 = q_0 / \mu_1 \cdot \mu_{(2-7)}^6 = 10000 / 1,05 \cdot 1,273^6 = 2240 \text{ мм}^2,$$

де 6 – показник степені – число клітей.

Площа поперечного перерізу в клітках 2-6 рівна (q_i)

$$q_{i-1} = q_i \cdot \mu_{\text{чр}}$$

Так, для клітці 6 маємо

$$q_6 = q_7 \mu_{\text{чр}} = 2240 \cdot 1,273 = 2850 \text{ мм}^2.$$

Середній коефіцієнт витягання в чистовій групі рівний:

$$\mu_{\text{ч}} = \mu_{\text{ср}}^2 / \mu_{\text{чр}} = 1,293^2 / 1,273 = 1,318.$$

Таблиця 5.7 - Величини коефіцієнтів витягання і площі поперечного перерізу в калібрах 1-15 (попередні дані)

№ клітки	μ	q , мм ²	№ клітки	μ	q , мм ²
Чорнова група			Чистова група		
1	1,05	9500	8В	1,435	1550
2	1,273	7480	9	1,26	1230
3	1,273	5880	10В	1,325	937
4	1,273	4620	11	1,26	742
5	1,273	3630	12В	1,325	560
6	1,273	2850	13	1,26	434
7	1,273	2240	14В	1,215	357
			15	1,135	314

Величина q_i для інших клітей приведені в табл. 5.7.

З умов закону постійності секундних об'ємів метала визначимо окружну швидкість валків в клітях (при зазорі $S = 0$). Швидкість в кліті 8 визначаємо з формули

$$v_8 = v_{15} \cdot q_{15} / q_8 = 15 \cdot 314 / 1550 = 3,03 \text{ м/с.}$$

Окружна швидкість валків в кліті 7 при спільної прокатки розкату в клітях 7 і 8 буде рівна

$$v_7 = v_8 \cdot q_8 / q_7 = 3,03 \cdot 1550 / 2240 = 2,10 \text{ м/с.}$$

Окружна швидкість валків в кліті 6 рівна

$$v_6 = v_7 \cdot q_7 / q_6 = 2,10 \cdot 2240 / 2850 = 1,64 \text{ м/с.}$$

Виконуємо розрахунок розмірів калібрів в клітях 1-7 проти ходу прокатки. Розширення визначаємо з формул (2.8) (2.9) (2.20) (2.21). Для ящичних калібрів приймаємо $n_\phi = 1,15$ для гладких валків $n_\phi = 1,0$, в однорадіусному овалі $n_\phi = 1.15$, для ребрового овалу $n_\phi = 1,3$. Усі розміри отримані в мм.

Кліть 7. Ребровий овал с $q_7 = 2240 \text{ мм}^2$. Розміри ребрового овалу визначаємо при $h/b = 1,1 \dots 1,4$ по формулах:

$$h/b = 1,30; \quad q = 1,3 n \cdot b^2; \quad b = \sqrt{q/1,3 \cdot n}. \quad (5.18)$$

Коефіцієнт n для ребрового овалу визначаємо з формули (1.15), а для овалу з (1.14). При $h/b = 1,3$ отримаємо (ребровий овал)

$$n = 0,69 + 0,035 \cdot 1,1^3 = 0,74.$$

З формули (5.18) маємо:

$$b_7 = \sqrt{2240/0,96} = 48,2; \quad h_7 = 1,30 \cdot 48,2 = 62,7.$$

Дійсне розширення визначаємо методом ітерацій. Для калібру 7 простір на розширення приймаємо $\Delta b'_n = 5 \text{ мм}$ і виконуємо розрахунок розмірів при зазорі між валками $S = 8 \text{ мм}$ ($n_\phi = 1,3$)

$$B_7 = b_7 - \Delta b'_n = 48,2 - 5 = 43,2; \quad H_7 = q_6/n_0 \cdot B_7.$$

Оскільки заготовкою для калібру 7 є прямокутник з кліті 6, ($q_6 = 2850 \text{ мм}^2$) то $n_0 = 1,0$. Тоді

$$H_7 = 2850/43,2 = 66; \quad h'_{7cp} = n \cdot h_7 = 0,74 \cdot 62,7 = 46,5;$$

$$\Delta h_{cp} = H_7 - h'_{7cp} = 66 - 46,5 = 19,5;$$

$$h_{cp} = h'_{7cp} + 0,5 \Delta h_{cp} = 46,5 + 9,75 = 56,25.$$

де h_{cp} – середня висота ребрового овалу:

$$D = D_6 - (h'_{7cp} - S) = 400 - 38,5 = 362;$$

$$l_d = \sqrt{R \cdot \Delta h} = \sqrt{181 \cdot 19,5} = 59,4;$$

$$B_{cp} = 0,5(B+b) = 0,5(43,2+48,2) = 45,8; \quad B_{cp}/l_d = 0,77;$$

$$B_{cp}/h_{cp} = 0,82; \quad m = 19,5 \cdot 0,82 = 16; \quad C_n = 1,0.$$

$$\Delta b' = 0,53 \cdot 1 \cdot 16/1,3 = 6,5; \quad \Delta b'_0 = 6,5/0,7 = 9,3.$$

Оскільки $\Delta b'_n < \Delta b'_0$, то другий розрахунок виконуємо при $\Delta b''_n = 10 \text{ мм}$ [в усіх випадках коефіцієнт C_n визначений по формулі (2.9)]:

$$B_7 = 48,2 - 10 = 38,2; \quad H_7 = 2850/38,2 = 74,8;$$

$$\Delta h_{cp} = 74,8 - 46,5 = 27,7; \quad h_{cp} = 46,5 + 13,85 = 60,85;$$

$$l_d = \sqrt{181 \cdot 27,7} = 70,8; \quad B_{cp} = 0,5(38,2+48,2) = 43,2;$$

$$B_{cp}/l_d = 0,6; \quad B_{cp}/h_{cp} = 0,71; \quad C_n = 0,86;$$

$$m = 27,7 \cdot 0,71 = 19,8; \quad \Delta b'' = 0,53 \cdot 0,86 \cdot 19,8/1,3 = 6,9$$

$$\Delta b''_0 = 6,9/0,7 = 9,9 \approx 10,$$

т.ч. рівно заданому простору на розширення. Розміри заготовки в кліті 7 рівні:

$$B_7 = b_7 - \Delta b_d = 48,2 - 10 = 38,2 \text{ мм};$$

$$H_7 = 2850/38,2 \approx 75 \text{ мм}.$$

Кліть 6. Гладка бочка, з якої виходить розкат з розмірами $h_6 = B_7 = 38,2 \text{ мм}$, $b_6 = H_7 = 75 \text{ мм}$, $q_6 = 2850 \text{ мм}^2$. У кліть 6 входить квадратна заготовка з $q_5 = 3630 \text{ мм}^2$. Розміри сторін ящичного калібру рівні: $C_6 = H_6 = B_6 = \sqrt{q_5} = \sqrt{3630} = 60,3 \text{ мм}$.

Фіктивний простір на розширення за відсутності бічних стінок рівний

$$\Delta b'_n = b_6 - B_6 = 75 - 60,3 = 14,7 \text{ мм.}$$

Визначимо параметри деформації в кліті 6. Маємо:

$$\Delta h = 60,3 - 38,2 = 22,1; \quad h_{cp} = h + 0,5 \cdot \Delta h = 38,2 + 11,05 = 49,25;$$

$$D = D_6 = 400; \quad l_d = \sqrt{200 \cdot 221} = 66,5;$$

$$B_{cp} = 0,5(60,3 + 75) = 67,7; \quad B_{cp}/l_d = 1,02;$$

$$B_{cp}/h_{cp} = 1,37; \quad C_n = 0,65; \quad m = 22,1 \cdot 1,37 = 31,5;$$

$$\Delta b' = 0,53 \cdot 0,65 \cdot 31,5 = 10,8.$$

Як виходить $\Delta b'_n > \Delta b'$. Проте повторного розрахунку можна не виконувати, так як параметр $\Delta b'_n = 14,7$ мм через ширину $b_6 = 75$ мм, бере участь тільки у визначенні середньої ширини B_{cp} , і вплив його на подальші розрахунки не великий. Тому *дійсне розширення буде рівне*

$$\Delta b_d = \Delta b'_0 = \Delta b' = 10,8.$$

Розміри заготовки, з кліті 5, що входить в кліть 6 з гладкою бочкою валків рівні.

$$B_6 = b_6 - b_0 = 75 - 10,8 = 64,2 \text{ мм;}$$

$$H_6 = 60,3 \text{ мм.}$$

Оскільки розміри H_6 і B_6 не співпадають із заданими, то слід визначити нову площу поперечного перерізу розкату в кліті 5

$$q_5 = H_6 \cdot B_6 = h_5 \cdot b_5 = 60,3 \cdot 64,2 = 3870 \text{ мм}^2.$$

Кліть 5. Ящичний квадратний калібр с розмірами після кантування (площа перерізу $q_5 = 3870 \text{ мм}^2$):

$$h_5 = B_6 = 64,2 \text{ мм, } b_6 = H_6 = 60,3 \text{ мм.}$$

В калібр входить заготовка из кліті 4 (гладка бочка) с $q_0 = 4620 \text{ мм}^2$ ($n_0 = 1; n = 1; n_\phi = 1,15$). Приймаємо $\Delta b'_n = 5$ мм:

$$B = b - \Delta b'_n = 60,3 - 5 = 55,3; \quad H = 4620/55,3 = 83;$$

$$\Delta h = 83 - 64,2 = 18,8; \quad h_k = h - S = 64,2 - 8 = 56,2;$$

$$h_{cp} = h + 0,5 \Delta h = 64,2 + 9,4 = 73,6; \quad D = 400 - 56,2 = 343,8;$$

$$l_d = \sqrt{171,9 \cdot 18,8} = 56,8;$$

$$V_{cp} = 0,5(B + b) = 0,5(55,3 + 60,3) = 57,8;$$

$$V_{cp}/l_d = 1,02; \quad V_{cp}/h_{cp} = 0,783; \quad C_{II} = 0,68;$$

$$\Delta b' = 0,53 \cdot 0,68 \cdot 14,7/1,15 = 3,55.$$

Оскільки $\Delta b'_0 < \Delta b'_n$, то, отже, немає повного заповнення калібру металом і коефіцієнт форми $n_\phi = 1$ (стілки калібру не обмежують розширення). У зв'язку з цим прорахуємо величину розширення при коефіцієнті $n_\phi = 1,0$. Тоді

$$\Delta b = \Delta b''_0 = 0,53 \cdot 0,68 \cdot 14,7 \approx 5,0.$$

Розміри заготовки для кліті 5 будуть рівні

$$B_5 = 55,3 \text{ мм}, \quad H_5 = 83 \text{ мм}.$$

Співвідношення $H_5/B_5 = 1,5$, що менше значення ($H_5/B_5 = 1,75$), що допускатється. (Див. розділ 1).

Кліть 4. Гладка бочка, в якій розміри розкату після кантування на 90° будуть рівні: $h_4 = B_5 = 55,3$ мм. $b_4 = H_5 = 83$ мм, $q_4 = 4620$ мм². Площа перерізу заготовки з ящичного калібру 3 рівна $q_3 = 5880$ мм². Розміри сторін заготовки ящичного квадрата рівні

$$H_4 = B_4 = \sqrt{q_3} = \sqrt{5880} = 76,7 \text{ мм}.$$

Простір на розширення в гладкій бочці

$$\Delta b'_n = b_4 - B_4 = 83 - 76,7 = 6,3 \text{ мм}.$$

Визначимо параметри деформації:

$$\Delta h = 76,7 - 55,3 = 21,4; \quad h_{cp} = 55,3 + 10,7 = 66;$$

$$l_d = \sqrt{200 \cdot 21,4} = 65,5; \quad V_{cp} = 0,5(76,7 + 83) \approx 80;$$

$$V_{cp}/l_d = 1,22; \quad V_{cp}/h_{cp} \approx 1,22; \quad C_{II} = 0,52;$$

$$m = 21,4 \cdot 1,22 = 26,1; \quad \Delta b' = \Delta b'_0 = 0,53 \cdot 0,52 \cdot 26,1 = 7,2.$$

Оскільки $\Delta b'_n < \Delta b'_0$, то виконаємо повторний розрахунок з більшим значенням $\Delta b''_n = 8,0$ мм ($D = 400$ мм):

$$\begin{aligned} V_4 &= b_4 - \Delta b''_n = 83 - 8 = 75,0; & H_4 &= V_4 = 75; \\ \Delta h &= 75 - 55,3 = 19,7; & h_{cp} &= 55 + 9,85 = 64,5; \\ l_d &= \sqrt{200 \cdot 19,7} = 62,8; & V_{cp} &= 0,5 (83+75) = 79,0; \\ V_{cp}/l_d &= 1,26; & V_{cp}/h_{cp} &= 1,22; & C_n &= 0,49; \\ m &= 19,7 \cdot 1,22 = 24,1; & \Delta b'' &= \Delta b''_0 = 0,53 \cdot 0,49 \cdot 24,1 = 6,3. \end{aligned}$$

Дійсне розширення

$$\Delta b_d = 7,2 + (6,3 + 7,2)(1 - 1,14)/(0,79 - 1,14) = 6,8 \text{ мм.}$$

Розміри заготовки для калібру 4:

$$V_4 = 83 - 6,8 = 76,2; \quad H_4 = 5880/76,2 = 77,3 \text{ мм.}$$

Кліть 3. Ящичний квадратний калібр з розмірами $h_3 = V_4 = 76,2$ мм, $b_3 = H_4 = 77,3$ мм, $q_3 = 5880$ мм², в який заходить розкат з кліті 2 з площею $q_2 = 7480$ мм². Приймаємо $\Delta b'_n = 7$ мм:

$$\begin{aligned} V &= 77,3 - 7 = 70,3; & H &= 7480/70,3 = 106,5; \\ \Delta h &= 106,5 - 76,2 = 30,3; & h_{cp} &= 77,3 + 15,15 = 92,45; \\ D &= 400 - (77,3 - 8) \approx 330; & l_d &= \sqrt{165 \cdot 30,3} = 70,5; \\ V_{cp} &= 0,5 (70,3 + 77,3) = 73,8; & V_{cp}/l_d &= 1,05; \\ V_{cp}/h_{cp} &= 0,8; & C_n &= 0,64; \\ m &= 30,3 \cdot 0,8 = 24,3; & \Delta b' &= 0,53 \cdot 0,64 \cdot 24,3/1,15 \approx 7,0. \end{aligned}$$

Таким чином $\Delta b'_n = \Delta b' = \Delta b'_0$ і повторного розрахунку не потрібно. Розміри заготовки :

$$V_3 = 70,3 \text{ мм}; \quad H_3 = 106,5 \text{ мм.}$$

Якщо отримане $\Delta b'_n > \Delta b' (\Delta b'_0)$, то заповнення калібру не відбувається і похилі стінки калібру не формують ширину профілю. Тому можна з розрахунку виключити коефіцієнт $n_\phi = 1,15$ і визначити дійсне розширення по осі калібру при його неповному заповненні. Якщо $\Delta b'_n < \Delta b'$, то потрібний повторний розрахунок.

Кліть 2. Ящичний прямокутник з розмірами після кантування на 90^0 рівними $h_2 = B_3 = 70,3$ мм, $b_2 = H_3 = 106,5$ мм, $q_2 = 7480$ мм². Приймаємо $\Delta b'_n = 5$ мм ($q_1 = 9500$ мм²):

$$\begin{aligned}
 B_2 &= 106,5 - 5 = 101,5; & H_2 &= 9500/101,5 = 93,3; \\
 \Delta h &= 93,3 - 70,3 = 23,0; & h_{cp} &= 71,1 + 11,5 = 82,5; \\
 D &= 400 - (70,3 - 8) \approx 338; & l_d &= \sqrt{169 \cdot 23,0} = 62,3; \\
 V_{cp} &= 0,5(100,5 + 106,5) = 103,5; & V_{cp}/l_d &= 1,69; \\
 V_{cp}/h_{cp} &= 1,24; & C_n &= 0,33; \\
 m &= 23,0 \cdot 1,24 = 28,7; & \Delta b' &= 0,53 \cdot 0,33 \cdot 28,7/1,15 = 5,03.
 \end{aligned}$$

Таблиця 5.8 - Параметри калібрування валків чорнової групи дрібносортового стану

№ кліті	Калібр	Параметри деформації						
		H, мм	B, мм	h, мм	b, мм	Δh , мм	Δb_d , мм	μ
1	Ящич. прямокутник	100	100	93,3	101,5	6,7	1,5	1,05
2	— // —	93,3	101,5	70,3	106,5	23,0	5,0	1,271
3	Ящич. квадрат	106,5	70,3	76,2	77,3	30,3	7,0	1,278
4	Гладка бочка	77,3	76,2	55,3	83,0	22,0	6,8	1,277
5	Ящич. квадрат	83	55,3	64,2	60,3	18,8	5,0	1,185
6	Гладка бочка	60,3	64,2	38,2	75,0	22,1	10,8	1,243
7	Ребровий овал	75,0	38,2	62,7	48,2	12,3	10,0	1,263

Оскільки $\Delta b'_n \approx \Delta b'$, то приймаємо $\Delta b_d = 5,0$ мм. В цьому калібрі використали коефіцієнт $n_\phi = 1,15$, що свідчить про повне заповнення калібру. У разі $\Delta b'_n < \Delta b'$ потрібний ітераційний розрахунок дійсного розширення.

Розміри заготовки розраховані раніше (мм):

$$B_2 = 101,5; \quad H_2 = 93,3.$$

Кліть 1. Ящичний прямокутник з розмірами: $h_1 = H_2 = 93,3$ мм, $b_1 = B_2 = 101,5$, $q_1 = 9500$ мм. Раніше, в калібрі 1 прийняли $\mu_1 = 1,05$, $\Delta b_1 = 1$ мм. Площа заготовки $q_0 = 10000 \text{ мм}^2$ з розмірами сторін $B_1 = 100$ мм, $H_1 = 100$ мм. Тоді, в калібрі 1 отримаємо

$$\Delta h_1 = 100 - 93,3 = 6,7 \text{ мм};$$

$$\Delta b_1 = 101,5 - 100 = 1,5 \text{ мм},$$

що близько до задалегідь прийнятого розширення. Для виключення затискання заготовки в калібрі ширину його можна виконати з $b = 102$ мм. Параметри деформації в чорновій групі дані в табл.5.8.

Чистова група клетей

Для розрахунку розмірів калібрів використовуємо спосіб, розглянутий в п.2.6. Визначення середніх параметрів деформації металу в калібрах приймаємо з табл.1.2, а величини розширення визначаємо по формулах (2.8), (2.9), (2.20) і (2.21). Розрахунок розмірів калібрів 8-15 робимо по ходу прокатки. Такий варіант розрахунку, на наш погляд, є найбільш раціональним.

Розміри ребрового овалу в кліті 7 рівні: $h_7 = 62,7$ мм, $b_7 = 48,2$ мм (див. вище). Коефіцієнт C_n в усіх випадках розрахований по формулі (2.9).

Як правило, коефіцієнт витягання в овальних калібрах дещо більше, ніж в ребрових овальних калібрах і рівний

$$\mu_{\text{ов}} = 1 + 1,25 (\mu_{\text{р.ов}} - 1). \quad (5.19)$$

Тоді коефіцієнт витягання в ребровому овалі:

$$\mu_{\text{р.ов}} = 1 + 0,8 (\mu_{\text{ов}} - 1). \quad (5.20)$$

При відомому коефіцієнті витягання μ_n в парі калібрів, коефіцієнт витягання в ребровому овалі також рівний [див. формулу(1.2)]

$$\mu_{\text{р.ов}} = 1 + 0,35 (\mu_n - 1). \quad (5.21)$$

На підставі практичних даних коефіцієнт витягання в парі калібрів $\mu_n = \mu_{\text{р.ов}}$, $\mu_{\text{ов}} = 1,60 \dots 1,78$, в ребровому овалі

$\mu_{p,ov} = 1,20 \dots 1,4$. Приймаємо коефіцієнт витягання $\mu_{p,ov} = 1,26$. Тоді коефіцієнт витягання в овальному калібрі і в парі дорівнює:

$$\begin{aligned}\mu_{ov} &= 1 + 1,25 (1,26 - 1) = 1,35; \\ \mu_n &= \mu_{p,ov} \cdot \mu_{ov} = 1,26 \cdot 1,325 = 1,67.\end{aligned}$$

що відповідає, отриманому раніше.

Проте не завжди прийняте співвідношення між $\mu_{p,ov}$ і μ_{ov} витримується в практиці прокатки металу. Розраховані заздалегідь площі поперечних перерізів профілів в калібрах для цього прикладу дані в таблиці 5.7.

Кліть 8В. Однорадіусній овал, в який входить заготовка ребрового овалу з розмірами після їх кантування на 90° :

$H_8 = b_7 = 48,2$ мм; $B_8 = h_7 = 62,7$ мм; $q_7 = 2070$ мм²; $q_8 = 1550$ мм²; коефіцієнти форми калібрів:

$$n = 0,7; \quad n_0 = 0,75; \quad n_\phi = 1,1$$

Приймаємо $\Delta b_n^1 = 5$ мм. По аналогії з розрахунком в п.5.4. отримаємо (усі розміри в мм):

$$\begin{aligned}b_8 &= B_8 + b'_n = 62,7 + 5 = 67,7; \\ h_8 &= q_8 / n \cdot b_8 = 1550 / 0,7 \cdot 67,7 = 32,7; \\ \Delta h &= H_8 - h_8 = 48,2 - 32,7 = 15,5; \\ \Delta h_{cp} &= n_k \cdot \Delta h = 0,78 \cdot 15,5 = 12,1; \\ h'_{cp} &= 0,7 \cdot h_8 = 0,7 \cdot 32,7 = 22,9; \\ h_{cp} &= h'_{cp} + 0,5 \Delta h_{cp} = 22,9 + 6,05 = 28,95; \\ B_{cp} &= 0,93 \cdot b_8 = 0,93 \cdot 67,7 = 63,0; \\ D &= D_8 - (h'_{cp} - S) = 250 - 15 = 235; \\ l_d &= \sqrt{R \cdot \Delta h_{cp}} = \sqrt{117,75 \cdot 12,1} = 38,6; \quad B_{cp} / l_d = 1,63; \\ B_{cp} / h_{cp} &= 2,17; \quad C_n = 0,33; \quad m = h_{cp} \cdot B_{cp} / h_{cp} = 12,1 \cdot 2,17 = 26,3.\end{aligned}$$

Середнє розширення в калібрі з формули (2.8) рівне

$$\Delta b = 0,53 \cdot C_n \cdot m / n_\phi = 0,53 \cdot 0,33 \cdot 26,3 / 1,1 = 4,2;$$

розширення по осі калібру з формули (2.20) рівне

$$\Delta b'_0 = \Delta b' / n_{\Pi} = 4,2 / 0,7 = 6,0.$$

Оскільки $\Delta b'_{\Pi} < \Delta b'_0$, то виконуємо другий розрахунок при $\Delta b'_0 = 9$ мм. В результаті розрахунків за формулами, приведеним вище, отримали $\Delta b'_0 = 6,9$ мм. Дійсне розширення по формулі (2.21) дорівнює

$$b_d = 6,0 + (6,9 - 6) (1 - 1,2) / (0,77 - 1,2) = 6,4 \text{ мм.}$$

Розміри профілю в калібрі 8 виявляються рівними:

$$b_8 = 62,7 + 6,4 \approx 69 \text{ мм;} \quad h_8 = 1550 / 0,7 \cdot 69 = 32,0.$$

Кліть 9. Ребровий овал з $q_9 = 1230 \text{ мм}^2$, в який входить заготовка овалу з розмірами після кантування:

$H_9 = b_8 = 69 \text{ мм; } B_9 = h_8 = 32,0 \text{ мм, } q_8 = 1550 \text{ мм}^2;$
 коефіцієнти: $n = 0,75;$ $n_0 = 0,7;$ $n_{\phi} = 1,3.$
 Співвідношення осей ребрового овалу рівне $c_p = h_9 / b_9 = 1,1 \dots 1,4.$
 Приймаємо $c_p = h_9 / b_9 = 1,25$, а площа перерізу ребрового овалу рівна

$$q_9 = 0,75 \cdot h_9 \cdot b_9.$$

Так як $h_9 = c_p \cdot b_9$; то

$$q_9 = 0,75 \cdot c_p \cdot b_9^2, \quad b_9 = \sqrt{q_9 / 0,75 \cdot c_p}. \quad (5.22)$$

Для прийнятих умов маємо:

$$\begin{aligned} b_9 &= \sqrt{1230 / 0,75 \cdot 1,25} = 36,0; \\ \Delta b'_n &= b_9 - B_9 = 36 - 32 = 4,0; \\ h_9 &= 1,25 b_9 = 1,25 \cdot 36 = 45; \\ \Delta h &= 69 - 45 = 24,0; \quad \Delta h_{cp} = 0,65 \cdot 24 = 15,6; \\ \Delta h'_{cp} &= 0,75 \cdot 45 = 33,8; \quad h_{cp} = 33,8 + 7,8 = 41,6. \\ D &= 250 - 28 = 222; \quad l_d = \sqrt{111 \cdot 15,6} = 41,6; \\ B_{cp} &= 0,81 \cdot 36 = 29,2; \quad B_{cp} / l_d = 0,71; \quad B_{cp} / h_{cp} = 0,7; \\ C_n &= 0,95; \quad m = 15,6 \cdot 0,7 = 10,8; \\ \Delta b' &= 0,53 \cdot 0,95 \cdot 10,8 / 1,3 = 4,2; \quad \Delta b'_0 = 4,2 / 0,7 = 6,0. \end{aligned}$$

Оскільки $\Delta b'_{II} < \Delta b'_0$, то при $q_9 = \text{const}$, необхідно збільшити ширину ребрового овалу на величину різниці

$$\delta b = \Delta b'_0 - \Delta b'_{II} = 6 - 4 = 2 \text{ мм.}$$

Тоді

$$b_9 = B_9 + \Delta b'_{II} + \delta b = 32 + 4 + 2 = 38 \text{ мм, } h_9 = 45 \text{ мм.}$$

Оскільки ширина профілю змінилася менш, ніж на 10%, то нового уточненого розрахунку можна не виконувати.

Кліть 10В. Овальний калібр з $q_{10} = 937 \text{ мм}^2$, в який входить заготовка ребрового овалу з розмірами після кантування:

$H_{10} = b_9 = 38 \text{ мм, } B_{10} = h_9 = 45 \text{ мм, } q_9 = 1280 \text{ мм}^2$; коефіцієнти: $n=0,7$; $n_0 = 0,75$; $n_\phi = 1,1$.

Приймаємо $\Delta b'_{II} = 5 \text{ мм}$:

$$\begin{aligned} b_{10} &= 45 + 5 = 50; & h_{10} &= 937/0,7 \cdot 50 = 26,8; \\ \Delta h &= 38 - 26,8 = 11,2; & \Delta h_{cp} &= 0,78 \cdot 11,2 = 8,7; \\ h'_{cp} &= 0,7 \cdot 26,8 = 18,8; & h_{cp} &= 18,8 + 4,35 = 23,15; \\ D &= 250 - 13 = 237; & l_d &= \sqrt{118,5 \cdot 8,7} = 32,2; \\ V_{cp} &= 0,93 \cdot 50 = 46,5; & V_{cp}/l_d &= 1,44; & V_{cp}/h_{cp} &= 2,0; \\ C_{II} &= 0,44; & m &= 17,4; \\ \Delta b' &= 0,53 \cdot 0,44 \cdot 17,4/1,1 = 3,7; & \Delta b'_0 &= 3,7/0,7 = 5,3. \end{aligned}$$

Оскільки різниця між $\Delta b'_{II}$ и $\Delta b'_0$ не перевищує 10%, то приймаємо більше значення розширення, тобто $\Delta b_d = 5,3 \text{ мм}$.
Розміри калібру в кліті 10В:

$$\begin{aligned} b_{10} &= 45 + 5,3 = 50,3 \text{ мм}; \\ h_{10} &= 937/0,7 \cdot 50,3 = 26,6 \text{ мм}. \end{aligned}$$

Кліть 11. Ребровий овал з $q_{11} = 742 \text{ мм}^2$, в який входить овальна заготовка з кліті 10 з розмірами: $H_{11} = b_{10} = 50,3 \text{ мм}$, $B_{11} = h_{10} = 26,6 \text{ мм}$, $q_{10} = 937 \text{ мм}^2$, коефіцієнти: $n = 0,75$; $n_0 = 0,7$; $n_\phi = 1,3$. З формули (4.21) отримаємо:

$$\begin{aligned} b_{11} &= \sqrt{742/0,75 \cdot 1,25} = 28,1; & h_{11} &= 1,25 \cdot 28,1 = 35,1; \\ \Delta b'_{II} &= 28,1 - 26,6 = 1,5; & \Delta h &= 50,3 - 35,1 = 15,2; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \Delta h_{cp} &= 0,65 \cdot 15,2 = 9,9; & h'_{cp} &= 0,75 \cdot 35,1 = 26,3; \\
 h_{cp} &= 26,3 + 4,95 = 31,3; & D &= 250 - 20 = 230; \\
 l_d &= \sqrt{115 \cdot 9,9} = 33,8; & B_{cp} &= 0,81 \cdot 28,1 = 22,8; \\
 B_{cp}/l_d &= 0,67; & B_{cp}/h_{cp} &= 0,73; \\
 C_{II} &= 0,93; & m &= 7,3; \\
 \Delta b' &= 0,53 \cdot 0,93 \cdot 7,3/1,3 = 2,80; & \Delta b'_0 &= 2,80/0,7 = 4,0.
 \end{aligned}$$

Оскільки $\Delta b'_{II} < \Delta b'_0$, то для отримання необхідних розмірів ребрового овалу можна йти різними шляхами: збільшити площу q_{11} , збільшити ширину ребрового овалу на величину $\Delta b'_0$ щоб виключити його переповнювання, а також зменшити співвідношення $c_p = h_{11}/b_{11}$.

Найбільш раціональним є варіант, який використаний для кліті 9. Маємо:

$$\begin{aligned}
 b_{11} &= B_{11} + \Delta b'_0; & (5.23) \\
 b_{11} &= 26,6 + 4 = 30,6 \text{ мм}; & h_{11} &= 35,1 \text{ мм}.
 \end{aligned}$$

Кліть 12В. Однорадіусний овал з $q_{12} = 560 \text{ мм}^2$, в який входить заготовка ребрового овалу з розмірами $H_{12} = b_{11} = 30,6 \text{ мм}$, $B_{12} = h_{11} = 35,1 \text{ мм}$, $q_{11} = 802 \text{ мм}^2$; коефіцієнти: $n = 0,7$; $n_0 = 0,75$; $n_\phi = 1,1$. Приймаємо $\Delta b'_n = 5 \text{ мм}$:

$$\begin{aligned}
 b_{12} &= 35,1 + 5 = 40,1; & h_{12} &= 560/0,7 \cdot 40,1 = 20,0; \\
 \Delta h &= 30,6 - 20 = 10,6; & \Delta h_{cp} &= 0,78 \cdot 10,6 = 8,3; \\
 h'_{cp} &= 0,7 \cdot 20 = 14; & h_{cp} &= 14 + 4,15 = 18,15; \\
 D &= 250 - 10 = 240; & l_d &= \sqrt{120 \cdot 8,3} = 31,7; \\
 B_{cp} &= 0,93 \cdot 40,1 = 37,5; & B_{cp}/l_d &= 1,18; & B_{cp}/h_{cp} &= 2,07; \\
 C_{II} &= 0,53; & m &= 17,2; \\
 \Delta b' &= 0,53 \cdot 0,53 \cdot 17,2/1,1 = 4,3; & \Delta b'_0 &= 4,3/0,7 = 6,1.
 \end{aligned}$$

Після другого розрахунку при $\Delta b''_{II} > \Delta b'_0$, дійсне розширення по формулі (2.21) рівне $\Delta b_d = 6,6 \text{ мм}$. Тоді:

$$b_{12} = 35,1 + 6,6 = 41,7 \text{ мм}, \quad h_{12} = 560/0,7 \cdot 41,7 = 19,2 \text{ мм}.$$

Кліть 13. Ребровий овал з $q_{13} = 434 \text{ мм}^2$, в який входить овальна заготовка з розмірами: $H_{13} = b_{12} = 41,7 \text{ мм}$, $V_{13} = h_{12} = 19,2 \text{ мм}$, $q_{12} = 560 \text{ мм}^2$; коефіцієнти: $n = 0,75$; $n_0 = 0,7$; $n_\phi = 1,3$. Маємо:

$$\begin{aligned} b_{13} &= \sqrt{434/0,75 \cdot 1,25} = 21,5; & h_{13} &= 1,25 \cdot 21,5 = 26,9; \\ \Delta b'_n &= 21,5 - 19,3 = 2,2; & \Delta h &= 41,7 - 26,9 \approx 15; \\ \Delta h_{\text{cp}} &= 0,65 \cdot 15 = 9,8; & h'_{\text{cp}} &= 0,75 \cdot 26,9 = 20,9; \\ h_{\text{cp}} &= 20,9 + 4,9 = 25,8; & D &= 250 - 16 = 234; \\ l_d &= \sqrt{117 \cdot 9,8} = 33,7; & V_{\text{cp}} &= 0,81 \cdot 215 = 17,4; \\ V_{\text{cp}}/l_d &= 0,52; & V_{\text{cp}}/h_{\text{cp}} &= 0,68; \\ C_{\text{II}} &= 0,74; & m &= 6,7; \\ \Delta b'_{\text{II}} &= 0,53 \cdot 0,52 \cdot 6,7/1,3 = 1,42; & \Delta b'_0 &= 1,42/0,7 = 2,7. \end{aligned}$$

Відповідно до формули (5.22) маємо:

$$b_{13} = 19,2 + 2,7 \approx 22 \text{ мм}; \quad h_{13} = 434 / 0,75 \cdot 22 = 26,3 \text{ мм}.$$

Кліть 14В. Однорадіусній овал з $q_{14} = 357 \text{ мм}^2$ в який входить заготовка ребрового овалу з розмірами $H_{14} = b_{13} = 22 \text{ мм}$, $V_{14} = h_{13} = 26,3 \text{ мм}$, $q_{13} = 454 \text{ мм}^2$, $S = 4 \text{ мм}$; коефіцієнти: $n = 0,7$, $n_0 = 0,75$, $n_\phi = 1,1$.

Приймаємо $\Delta b'_n = 3,5 \text{ мм}$ і отримуємо:

$$\begin{aligned} b_{14} &= 26,3 + 3,5 = 29,8; & h_{14} &= 357/0,7 \cdot 29,8 = 17,2; \\ \Delta h &= 22 - 17,2 = 4,8; & \Delta h_{\text{cp}} &= 0,78 \cdot 4,8 = 3,75; \\ h'_{\text{cp}} &= 0,7 \cdot 17,2 = 12,1; & h_{\text{cp}} &= 12,1 + 1,87 = 13,97; \\ D &= 250 - (13,97 - 4) = 240; & V_{\text{cp}}/l_d &= 1,30; & V_{\text{cp}}/h_{\text{cp}} &= 1,98; \\ C_{\text{II}} &= 0,48; & m &= 3,75 \cdot 1,98 = 7,4; \\ \Delta b' &= 0,53 \cdot 0,48 \cdot 7,4/1,1 = 1,7; & \Delta b'_0 &= 2,43. \end{aligned}$$

Оскільки $\Delta b'_n > \Delta b'_0$, то для отримання точних розмірів профілю потрібний перерахунок при $\Delta b''_n < \Delta b''_0$. Приймаємо $\Delta b''_n = 2,0 \text{ мм}$:

$$\begin{aligned} b_{14} &= 26,3 + 2 = 28,3; & h_{14} &= 357/0,7 \cdot 28,3 = 18,0; \\ \Delta h &= 22 - 18 = 4,0; & \Delta h_{\text{cp}} &= 0,78 \cdot 4 = 3,12; \\ h'_{\text{cp}} &= 0,7 \cdot 18 = 12,6; & h_{\text{cp}} &= 12,6 + 1,56 = 14,16; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 D &= 250 - (14,16 - 4) \approx 240; & l_d &= \sqrt{120 \cdot 3,12} = 19,3; \\
 V_{cp} &= 0,93 \cdot 28,3 = 26,3; & V_{cp}/l_d &= 1,36; & V_{cp}/h_{cp} &= 1,85; \\
 C_n &= 0,44; & m &= 3,12 \cdot 1,85 = 5,8; \\
 \Delta b'' &= 0,53 \cdot 0,44 \cdot 5,8/1,1 = 1,23; & \Delta b''_0 &= 1,23/0,7 = 1,76.
 \end{aligned}$$

Визначимо дійсне розширення по формулі (2.21)

$$\Delta b_d = 2,43 + (1,76 - 2,43) (1 - 0,7) / (0,88 - 0,7) \approx 1,5.$$

Розміри овального калібру:

$$b_{14} = 26,3 + 1,5 = 27,8; \quad h_{14} = 357/0,7 \cdot 27,8 = 18,3.$$

Кліть 15. Круглий калібр з $d_{15} = 20$ мм ($h_{15} = b_{15} = 20$ мм) і $q_{15} = 314$ мм² (гарячі розміри). У цей калібр входить овальна заготовка з $q_{14} = 357$ мм²; коефіцієнти форм калібру і заготовки: $n = 0,75$; $n_0 = 0,7$; $n_\phi = 1,4$; $n_k = 0,65$. Розміри заготовки: $H_{15} = b_{14} = 27,8$ мм, $V_{15} = h_{14} = 18,3$ мм. Приймаємо простір на розширення $\Delta b'_n = 2$ мм:

$$\begin{aligned}
 V_{15} &= 20 - 2 = 18; & H_{15} &= 357/0,7 \cdot 18 = 28,3; \\
 \Delta h &= 28,3 - 20 = 8,3; & \Delta h_{cp} &= 0,65 \cdot 8,3 = 5,4; \\
 h'_{cp} &= 0,785 \cdot 20 = 15,7; & h_{cp} &= 15,7 + 2,7 = 18,4; \\
 D &= 250 - (18,4 - 4) \approx 236; & l_d &= \sqrt{118 \cdot 5,4} = 25,3; \\
 V_{cp} &= 0,81 \cdot 20 = 16,2; & V_{cp}/l_d &= 0,64; & V_{cp}/h_{cp} &= 0,89; \\
 C_n &= 0,86; & m &= 5,4 \cdot 0,89 = 4,8; \\
 \Delta b' &= 0,53 \cdot 0,86 \cdot 4,8/1,4 = 1,56; & \Delta b'_0 &= 1,56/0,7 = 2,23.
 \end{aligned}$$

Отримане розрахунком розширення по осі калібру дещо більше простору ($\Delta b'_n < \Delta b'_0$) тому, незважаючи на невелику розбіжність, доцільно виконати повторний розрахунок при $\Delta b''_n = 2,5$ мм:

$$\begin{aligned}
 V_{15} &= 20 - 2,5 = 17,5 \text{ мм}; & H_{15} &= 357/0,7 \cdot 17,5 = 29,3 \text{ мм}; \\
 \Delta h &= 29,3 - 20 = 9,3; & \Delta h_{cp} &= 0,65 \cdot 9,3 = 6,05; \\
 h'_{cp} &= 0,785 \cdot 20 = 15,7; & h_{cp} &= 15,7 + 3,025 = 18,72; \\
 D &= 250 - (18,72 - 4) = 235; & l_d &= \sqrt{117,5 \cdot 6,05} = 26,6;
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 V_{cp} &= 0,81 \cdot 20 = 16,2; & V_{cp}/l_d &= 0,61; & V_{cp}/h_{cp} &= 0,86; \\
 C_n &= 0,88; & m &= 6,05 \cdot 0,86 = 5,2; \\
 \Delta b'' &= 0,53 \cdot 0,88 \cdot 5,2/1,4 = 1,73; & \Delta b'' &= 1,73/0,7 = 2,47.
 \end{aligned}$$

Оскільки простір на розширення і розрахункове розширення практично рівні між собою ($\Delta b''_n \approx \Delta b''_0$), то дійсне розширення не визначаємо. Оскільки розміри круглого калібру задані, то слід коригувати розміри передчистового овалу у напрямі зменшення висоти овального калібру ($h_{14} = V_{15}$) за рахунок деякого збільшення ширини овального калібру. Тоді

$$\begin{aligned}
 V_{15} = h_{14} &= h_{15} - \Delta b''_0 \approx 20 - 2,5 = 17,5 \text{ мм}; \\
 H_{15} = b_{14} &= 357/0,77 \cdot 17,5 = 29,3 \text{ мм}.
 \end{aligned}$$

Ці розміри дещо відрізняються від розмірів калібру 14В в попередньому розрахунку ($h_{14} = 18,3$ мм, $b_{14} = 27,8$ мм). Отримання необхідних розмірів профілю в калібрі 14В (вертикальна кліть) може бути досягнуте шляхом деякого регулювання розмірів в попередніх 2х - 3х калібрах, що завжди виконується в практиці прокатки.

Розрахункові дані представлені в таблиці. 5.9.

5.5 Побудова калібрів

Ящичний калібр. Деякі данні про ящичні калібри дані в розділах 1 і 3. Ширину калібру по дну рівчача b_d приймають рівною: $b_d = (0,95...1,0) B$ (B - ширина заготовки), а ширину « b » по конструкційних точках визначають за формулою (рис.1.4, а)

$$b = b_d + h_k \cdot \text{tg } \varphi, \quad (5.24)$$

де h_k – глибина урізання калібру на діаметр валка; φ – кут нахилу стінок калібру (випуск калібру).

За розрахунковими параметрами h , b і b_d роблять побудову скелета калібру. Залежно від діаметру валка вибирають зазор S (див. гл.1) і визначають розміри b_k і h_k ;

$$h_k = h - S; \quad b_k = b + (h_k - S) \text{tg } \varphi, \quad (5.25)$$

де b_k – ширина урізання калібру у валки (ширина профілю b_n при δ_k).

Таблиця 5.9 - Параметри калібрування валків для прокатки круглого профілю діаметром 20 мм (чистова група)

№ кліті	Калібр	Параметри режиму деформації						
		H, мм	B, мм	h, мм	b, мм	Δh , мм	Δb_0 , мм	μ
7	Рєбровий овал	-	-	62,7	48,2	-	-	-
8B	Овал	48,2	62,7	32	69	16,2	6,3	1,335
9	Рєбрової овал	69	32	45	38	24	6	1,21
10B	Овал	38	45	26,6	50,3	11,4	5,3	1,365
11	Рєбровий овал	50,3	26,6	35,1	30,6	15,2	4,0	1,17
12B	Овал	30,6	35,1	19,2	41,7	11,4	6,6	1,433
13	Рєбровий овал	41,7	19,2	26,3	22,0	15,4	2,8	1,29
14B	Овал	22,0	26,3	18,3	27,8	3,7	1,5	1,215
15	Круг	27,8	18,3	20	20	7,8	1,7	1,135

Величину опуклості дна калібру приймають в межах 1...3 мм (на радіус) залежно від розмірів заготовки. Найявність опуклості дна запобігає переповнюванню наступного калібру при заданні в нього заготовки після кантування. Радіуси закруглень в калібрі рівні: $r = (0,1 \dots 0,15) b_d$, а $r_1 = (0,8 \dots 1,0) r$.

З урахуванням закруглень в кутах калібру площу перерізу визначають за формулою:

$$q = 0,98 \cdot h \cdot b,$$

де h і b – в даному випадку середні розміри калібру по висоті і ширині.

У практичних умовах, за наявності випуску стінок калібру міру заповнення приймають рівною $\delta_k = b_k/b = 0,9 \dots 0,95$.

Ромбічний і квадратний калібри. Побудову калібру виконують відносно осевих ліній (лінії прокатки) по розрахункових величинах висоти «h» і ширини «b». Радіус закруглень:

ромбічний калібр $-r = (0,15 \dots 0,2)h$; $r_1 = (0,1 \dots 0,15)h$;

квадратний калібр $-r = (0,1 \dots 0,2)z$; $r_1 = (0,1 \dots 0,15)h$.

Наявність закруглень калібру при вершині запобігає переповнюванню подальшого калібру і утворенню задирок (виходу металу в зазор). Крім того, з цією ж метою приймають міру заповнення калібру в межах $\delta_k = 0,88 \dots 0,92$ (окрім чистового квадратного і двох передчистових калібрів) (r і r_1 – радіуси закруглень вершин і у бортів). За наявності закруглень вершин висота калібру відповідним чином зменшується:

ромбічний калібр -

$$h_k = h - r \left(\sqrt{1 + b^2 / h^2} - 1 \right)$$

квадратний калібр -

$$h_k = 1,41 \cdot c - 0,82r.$$

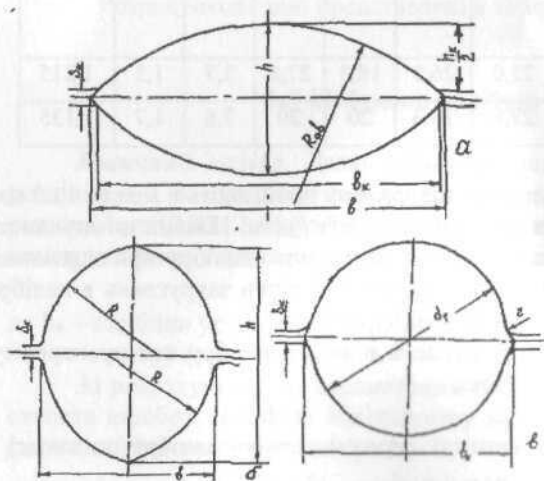


Рисунок 5 - До побудови калібрів овального (а), ребрового овалу (б) і круглого калібру (в)

Однорадіусній овал (рис.5.1,а). У практиці використовують овали з відношенням $b/h = 1,5...3$ і при цьому, чим менше розміри профілю, тим більше відношення b/h . Розмір рівчака $R_{обр}$ рівний

$$R_{обр} = (b^2 + h^2)/4h.$$

Зазор по буртах приймають рівним $S = (0,15...0,2) h_k$. Радіус r_1 переходу рівчака у бурт визначають по залежності $r_1 = (0,1...0,3) h_k$; ($h_k = h - S$). Розміри h , b і S визначають ширину рівчака b_k , а ширину рівчака - з урахуванням міри заповнення калібру металом

$$b_k = b - S \cdot b/h.$$

Ребровий овальний калібр (рис.5.1,б). Ці овали застосовують в практиці з відношенням осей $b/h = 1,15...1,4$. При побудові ребрового овалу наносять розрахункові розміри, визначені по конструкційним точках, наносять проміжок S і виконують закруглення $r_1 = (0,1...0,15)b_k$. Радіус $R_{обр}$ визначають за формулою:

$$R_{обр} = 0,25h (h/b + b/h).$$

Круглий калібр. Круглі калібри застосовують в якості чорнових і чистових. У останньому випадку діаметр круглого калібру визначають з формули, що враховує теплове розширення і допуски (рис.5.1,в):

$$d_r = (1,012...1,015) (d_x + \Delta/2),$$

де d_x – діаметр холодного круглого профілю; Δ – середній допуск на діаметр.

З метою виключення переповнювання калібру і утворення задирок калібр виконують з випуском бічних стінок («з розвалом»). З урахуванням цього ширина калібру у проміжку буде рівна

$$b_k = d_r \cdot (1,012...1,015),$$

де d_r – діаметр круглого профілю в гарячому стані.
Зазор між валками рівний

$$S = (0,005...0,0125)D,$$

а радіус

$$r_1 = 0,1 \cdot d.$$

6 РОЗРАХУНОК ЕНЕРГОСИЛОВИХ ПАРАМЕТРІВ ПРОКАТКИ В КАЛІБРАХ

До енергосилових параметрів прокатки відносять силу P , крутний момент M і потужність N :

$$\left. \begin{aligned} P &= p_{\text{cp}} \cdot l_d \cdot B_{\text{cp}} \cdot 10^{-6}, \text{ МН}; \\ M &= 2\psi P \cdot l_d \cdot 10^{-3}, \text{ МН} \cdot \text{м}; \\ N &= 960 M \cdot v/R, \text{ кВт}, \end{aligned} \right\} \quad (6.1)$$

де p_{cp} – середнє нормальне контактне напруження, $\text{Н}/\text{мм}^2$; l_d – середня довжина дуги контакту, мм ; B_{cp} – середня ширина контакту поверхні, мм ; ψ – коефіцієнт положення рівнодіючої сил в осередку деформації; v – окружна швидкість валків, $\text{м}/\text{с}$.

При прокатуванні в гладких валках деформація штаби по ширині постійна, тобто $h = \text{const}$, $H = \text{const}$, $R = \text{const}$. У калібрах, як виходить з глав 1,2, вказані параметри змінюються по ширині профілю і тому для розрахунку енергосилових параметрів використовують середні величини H_{cp} , h_{cp} до h_{cp} , Δh_{cp} , R_{cp} і так далі. У першому наближенні приймаємо, що усі формули для розрахунку енергосилових параметрів при прокатуванні в гладких валках придатні і для розрахунку їх в каліброваних валках.

Для цього досить прирівняти середні розміри осередку деформації в калібрі до лінійних розмірів штаби (валка) при прокатуванні в гладких валках, тобто: $H_{\text{cp}} = H$; $h_{\text{cp}} = h$; $\Delta h_{\text{cp}} = \Delta h$, $R_{\text{cp}} = R$, а також ввести у формули поправочний коефіцієнт, що враховує форму калібру.

Алгоритм розрахунку енергосилових параметрів має наступний вигляд:

- ✓ приймають початкові дані до розрахунку;
- ✓ розрахунок середніх геометричних розмірів заготовки і осередку деформації в калібрі;
- ✓ розрахунок коефіцієнта тертя;
- ✓ розрахунок розширення металу;
- ✓ розрахунок напруження течії металу (опору металу деформації);
- ✓ розрахунок середнього нормального контактного напруження, сили, крутного моменту і потужності прокатки (потужності двигуна).

Хід розрахунку покажемо на прикладах прокатки розкату на блюмінгу і на дрібносортному станах. Метод розрахунку енергосилових параметрів, який показано, придатний також і для умов прокатки на інших станах. В усіх випадках важливим є правильне визначення середнього абсолютного обтиснення в калібрі.

Приклад 1. Розрахувати енергосилові параметри прокатки розкату на блюмінгу. Початкові дані: $H = 600$ мм, $B = 660$ мм, $h = 505$ мм, $\Delta h = 95$ мм, діаметр валків по буртах $D_b = 1250$ мм, глибина урізання гладкої бочки на діаметр $h_k = 110$ мм, температура початку прокатки $t = 1200^\circ\text{C}$.

Швидкість валків в кожному проході визначають з урахуванням практичних, даних і рекомендації розділу 5.1 з роботи [23]. Валки виготовлені із сталі 50XH і їх поверхня наплавлена сталлю 30XГСА, твердість ~ 50 HSD, поверхня валків з накаткою. Прокатують блюми із сталі марки Ст. 3.

При прокатуванні на блюмінгу ширина розкату в кожному калібрі різна. Наприклад, в калібрі 2 (табл. 5.4) в проході 7 ширина розкату $b = 385$ мм і бічні поверхні розкату стикаються із стінками калібру, розміри якого по ширині дна рівні $b_d = 375$ мм і у зазору $b_k = 414$ мм (табл. 5.4). Тому коефіцієнт n_ϕ впливу форми калібру на сили тертя можна приймати рівним $n_\phi = 1,07$, а в проході 10 має місце практично повний контакт розкату із стінками калібру (повне заповнення) і коефіцієнт $n_\phi = 1,15$.

Сказане відноситься і до інших ящичних калібрів. При прокатуванні на гладкій бочці контакт розкату з бічними стінками калібру відсутній і тому $n_\phi = 1,0$ (табл. 3.3).

1. Визначаємо геометричні параметри деформації з використанням формул розділу 1 і роботи [8]. Оскільки деформація розкату відбувається в першому калібрі (гладка бочка), то лінійні розміри розкату розраховуємо по формулах для гладкої бочки.

Середня товщина розкату в осередку деформації, середній діаметр валків, довжина дуги контакту, кут контакту і відносне обтиснення рівні:

$$h_{cp} = 0,5 (600 + 505) \approx 552 \text{ мм};$$
$$D = D_b - h_k = 1250 - 110 = 1140 \text{ мм};$$

$$l_d = \sqrt{0,5D \cdot \Delta h} = \sqrt{570 \cdot 95} = 232 \text{ мм};$$

$$\alpha = l_d/R = 323/570 = 0,407 \text{ рад};$$

$$\varepsilon = \Delta h/H = 95/600 = 0,158;$$

$$l_d/h_{cp} = 232/552 = 0,42; \quad V/h_{cp} = 1,08.$$

При прокатуванні високих розкатів з $l_d/h_{cp} < 1$ можна не визначати коефіцієнт тертя, а приймати його значення в межах $f=0,3...0,5$.

2. Розширення металу знаходимо з формули (при $V_{cp}/l_d \leq 1...3$).

$$\Delta b = 0,53 \cdot C_{\Pi} \cdot \Delta h \cdot (B_{cp} / h_{cp}) / n_{\phi}, \quad (6.2)$$

де C_{Π} – коефіцієнт, що враховує вплив параметра V_{cp}/l_d ; B_{cp} – середня ширина розкату.

Коефіцієнт C_{Π} визначено з робіт [8, 23, 24] при $V/l_d=2,84$ і $n_{\phi} = 1,0$ (гладка бочка) [формули (2.8) (2.9)]:

$$C_{\Pi} = e^{-2,23} = 0,11;$$

$$\Delta b = 0,53 \cdot 0,11 \cdot 95 \cdot 1,08 \approx 6 \text{ мм}.$$

Логарифмічний показник розширення при

$V_{cp} = B + 0,5\Delta b = 660 + 3 \approx 663 \text{ мм};$
дорівнює

$$a = \frac{\Delta b}{\Delta h} \cdot \frac{h_{cp}}{B_{cp}} = \frac{6}{95} \cdot \frac{552,5}{663} \approx 0,053.$$

3. Опір металу деформації вчислимо по методу [8, 24, 27, 28]

$$\sigma_{\phi} = \beta \cdot \sigma_{T_0} \cdot k_t \cdot k_{\varepsilon} \cdot k_u, \quad (6.4)$$

де β – коефіцієнт Лоде ($\beta = 1...1,15$); σ_{T_0} – базове напруження течії при $k_t = k_{\varepsilon} = k_u = 1,0$; k_t – коефіцієнт впливу температури металу; k_{ε} – коефіцієнт впливу відносного обтиснення; k_u – коефіцієнт впливу швидкості деформації.

Для марки Ст.3 (група I сталей) сума N_1 хімічних елементів (окрім заліза, сірки і фосфору) визначається так:

$$N_1 = C + Si + Mn + \dots; \quad (6.5)$$

$$N_1 = 0,22 + 0,30 + 0,65 = 1,17.$$

Базове напруження течії для $N_1 \leq 5$ з формули

$$\sigma_{T6} = 80 + 25 \left\{ 1 - \left[\frac{(5 - N_1)}{4,5} \right]^{1,8} \right\} \quad (6.6)$$

рівне

$$\sigma_{T6} = 80 + 25 \left\{ 1 - \left[\frac{(5 - 1,17)}{4,5} \right]^{1,8} \right\} \approx 88,3 \text{ Н/мм}^2,$$

де С, Si, Mn – зміст в сталі вуглецю, кремнію, марганцю.

Швидкість деформації металу в осередку рівна

$$u = v \cdot \varepsilon / l_d. \quad (6.7)$$

Для гладкої бочки приймаємо число обертів валків в сталому процесі (для короткого розкату) (см §5.1) рівне $n = 20 \text{ мин}^{-1}$. При цьому окружна швидкість валків визначається з формули

$$v = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{60}; \quad (6.8)$$

$$v = \frac{3,14 \cdot 1,14 \cdot 20}{60} \approx 1,2 \text{ м/с}.$$

Швидкість деформації з формули (6.7) рівна

$$u = 1200 \cdot 0,158 / 232 = 0,82 \text{ с}^{-1}.$$

Коефіцієнт, що враховує вплив температури [8, 24]:

$$k_t = 1,66 - 1,1 \left(\frac{t}{400} - 2 \right)^{0,7}; \quad (6.9)$$

$$k_t = 1,66 - 1,1 \left(\frac{1200}{400} - 2 \right)^{0,7} \approx 0,56.$$

Коефіцієнт, що враховує відносне обтиснення ($\varepsilon > 0,1$) при

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

$$k_\varepsilon = 1 + 0,43 \left[1 - 6,3(0,5 - 0,158)^2 \right] = 1,18.$$

Коефіцієнт, що враховує швидкість деформації (при $u < 10 \text{ с}^{-1}$):

$$k_u = 0,22 + 0,072(7 + \ln u);$$

$$k_u = 0,22 + 0,072(7 + \ln 0,82) = 0,71$$

Опір металу деформації при $\beta=1,15$ з формули (6.4) рівно

$$\sigma_\phi = 1,15 \cdot 88,3 \cdot 0,56 \cdot 1,18 \cdot 0,71 = 47,8 \text{ Н/мм}^2$$

4. Сила і середнє нормальне контактне напруження в осередку деформації визначимо по формулі ($l_d/h_{cp} < 1$)

$$p_{cp} = \sigma_\phi [1 + 0,48f_n(1 - a)l_d/h_{cp}] \cdot [1 + (1,1 - l_d/h_{cp})^2], \quad (6.10)$$

де f_n – показник тертя.

Для умов прокатки на обтискних і заготовочних станах при $l_d/h_{cp} < 1$ (блюмінги, слябінги, чорнові кліті неперервно-заготовочні стани і так далі) можна прийняти $f_n = 0,4$ і тоді

$$p_{cp} = \sigma_\phi [1 + 0,20(1 - a)l_d/h_{cp}] \cdot [1 + (1,1 - l_d/h_{cp})^2], \quad (6.11)$$

З урахуванням розрахованих вище значень параметрів, що входять у формулу (6.11), отримаємо

$$p_{cp} = 47,8(1 + 0,20 \cdot 0,96 \cdot 0,42) [1 + (1,1 - 0,42)^2] = 70 \text{ Н/мм}^2.$$

Сила прокатки визначається по формулі (6.1)

$$P = p_{cp} \cdot l_d \cdot B_{cp} \cdot 10^{-6},$$

$$P = 70 \cdot 232 \cdot 662 \cdot 10^{-6} = 10,75 \text{ МН.}$$

5. Крутний момент власне процесу прокатки (в осередку деформації) розраховують по формулі (6.1), а коефіцієнт положення рівнодійної сил по формулі (тільки для обтискних станів)[32]

$$\psi = 0,54 + 0,18(1 - \frac{l_d}{h_{cp}})^2; \quad (6.12)$$

$$\psi = 0,54 + 0,18(1 - 0,42)^2 = 0,6.$$

Крутний момент на двох валках дорівнює

$$M = 2 \cdot 0,6 \cdot 10,75 \cdot 0,232 = 2,94 \text{ МН} \cdot \text{м}.$$

6. *Визначимо необхідну потужність головного приводу* (індивідуальний привід валків) використовуючи формулу

$$N_{\text{ст}} = 960 \cdot M_{\text{ст}} \cdot v / R, \quad (6.13)$$

де $M_{\text{ст}}$ – статичний сумарний момент на валках головних приводів

$$M_{\text{ст}} = M' + M'_{\text{тр1}} + M'_{\text{тр2}}; \quad (6.14)$$

де M' – момент в осередку деформації, приведений до валу двигуна; $M'_{\text{тр1}}$ – момент тертя в підшипниках валків, приведений до валу двигуна; $M'_{\text{тр2}}$ – момент тертя в передатних механізмах (шпинделі, шестерінчаста кліть, редуктор):

$$M = M / i;$$

$$M_{\text{тр}} = M_{\text{тр1}} / i + M_{\text{тр2}} / i,$$

де i – передатне число редуктора в лінії приводу

$$\left. \begin{aligned} M_{\text{тр1}} &= P \cdot \mu \cdot d_{\text{ш}}; \\ M_{\text{тр2}} &= \left(\frac{1}{\eta} - 1 \right) (M + M_{\text{тр1}}), \end{aligned} \right\} \quad (6.16)$$

де μ – коефіцієнт тертя в підшипниках валків; $d_{\text{ш}}$ – діаметр шийки валка; η – ККД передачі головної лінії стана.

Діаметр шийки валка рівний $d_{\text{ш}} = 0,65D_6$. Коефіцієнт тертя в підшипниках валків залежить від його типу і рівний:

з конічними роликками $\mu = 0,004$

з текстолитовими вкладишами $\mu = 0,01$.

ККД передачі представляється складом ККД шестеренчастої кліті ($\eta_1 = 0,92 - 0,95$), редуктора ($\eta_2 = 0,95 \cdot 0,97$) і шпинделя з муфтами ($\eta_3 = 0,99$). Тоді для блюмінга при $\eta_1 = \eta_2 = 1$, $\eta_3 = 0,99$.

Для умів прокатки на блюмінгу з індивідуальними приводами валків отримаємо ($M' = 2,94 \text{ МН} \cdot \text{м}$, $d_{\text{ш}} = 820 \text{ мм}$):

$$M_{\text{тр1}} = 10,75 \cdot 0,01 \cdot 0,82 \approx 0,1 \text{ МН} \cdot \text{м};$$

$$M_{ст} = 2,94 + 0,1 + 0,026 = 3,666 \text{ МН} \cdot \text{м};$$

$$N_{ст} = 960 \cdot 3,666 \cdot 1,2 / 0,57 = 7350 \text{ кВт}.$$

В даному випадку потужність $N_{ст}$ на валах двигунів відображає статичну потужність, в умовах сталого процесу прокатки. В період прискорення і уповільнення приводу разом з розкатом потужність буде рівна

$$N_d = M_{ст} \pm M_{дин}, \quad (6.17)$$

де $M_{дин}$ – динамічна складова потужності ("+" - прискорення, "-" - уповільнення валків з розкатом).

Динамічний момент при прискоренні (розгоні) валків із зливком визначимо за наступними даними (розгін із зливком) :
крутний момент інерції маси двох якорів електродвигунів

$$m_1 \cdot D_1^2 = 2 \times 1,6 = 3,2 \text{ МН} \cdot \text{м}^2,$$

двох валків

$$m_2 \cdot D_2^2 = 2 \times 0,4 = 0,8 \text{ МН} \cdot \text{м}^2,$$

двох універсальних шпинделів

$$m_3 \cdot D_3^2 = 2 \times 0,6 = 1,2 \text{ МН} \cdot \text{м}^2.$$

Момент інерції зливка (розкату) при діаметрі валка на гладкій бочці $D = 1150$ мм и масе зливка $m_4 = 12\text{т} = 0,12$ МН рівний

$$m_4 \cdot D^2 = 0,12 \times 1,14 \approx 0,2 \text{ МН} \cdot \text{м}^2.$$

Сумарний маховий (крутний) момент рівний

$$\Sigma GD^2 = 3,2 + 0,8 + 1,2 + 0,2 = 5,4 \text{ МН} \cdot \text{м}^2.$$

Динамічний момент при розгоні визначимо по формулі

$$M_{дин} = \frac{\Sigma GD^2}{4} \cdot \varepsilon_y, \quad (6.18)$$

де ε_y – кутове прискорення деталей, що обертаються, ($\varepsilon_y = d\omega/dt$, $1/c^2$); ω – кутова швидкість валків, t – тривалість прокатки зливка (розкату), с.

Кутове прискорення при прокатуванні зливка (розкату) рівне $\varepsilon_y = 5c^{-1}$, тоді динамічний момент рівний

$$M_{дин} = \frac{5,4}{4} \cdot 5 = 0,67 \text{ МН} \cdot \text{м}.$$

Сумарний крутний момент прокатки по формулах (6.17) і (6.18) рівний

$$M_{\Pi} = 3,666 + 0,67 = 4,336 \text{ МН} \cdot \text{м}.$$

Крім того, перевірку двигунів на нагрів його обмоток виконують по середньоквадратичному моменту, еквівалентному струму в якорі

$$M_{экв} = \sqrt{\frac{\sum M_i^2 t_i + \sum M_{ХХ} \cdot t_{\Pi}}{T_{\Pi}}}, \quad (6.19)$$

де M_i – момент в кожному проході (повний); t_i – час прокатки в проході (машинний час); T_{Π} – темп прокатки ($T_{\Pi} = \sum t_m + \sum t_{\Pi}$); t_m і t_{Π} – машинний час і час пауз.

Еквівалентний момент ($M_{экв}$) має бути менше номінального моменту приводу - $M_{экв} < M_{\Pi}$. Для індивідуального приводу валків номінальний момент визначають по формулі

$$M_{\Pi} = \frac{2N_{\Pi}}{\omega_{\Pi}}, \quad (6.20)$$

де N_{Π} – номінальна потужність встановленого приводу; ω_{Π} – номінальна кутова швидкість обертання якоря двигуна.

Двигуни постійного струму мають східні числа обертів якоря $n = 0-40-80$ в хв ($\omega_n = 0 - 4 - 8 \text{ с}^{-1}$).

Сумарний номінальний момент двох електродвигунів при $N_{\Pi} = 6800 \text{ кВт}$, $n_{\Pi} = 40 \text{ об/мін}$ ($\omega_n = 4 \text{ с}^{-1}$) чисел оборотів якоря рівний

$$M_H = \frac{2 \cdot 6800}{4,0} = 3300 \text{ кН} \cdot \text{м} = 3,3 \text{ МН}.$$

Потім визначають відношення $M_H/M_{\text{звб}}$, яке не повинне перевищувати $k = 2 \dots 2,2$ при короткочасному навантаженні (k – коефіцієнт перевантаження приводу).

7 Розрахунок валків на міцність

Валки блюмінгів і заготовочних станів виготовляють з низьколегованої (хром, нікель, марганець) сталі з вмістом вуглецю $C=0,5 \dots 0,6$ %. У валки врізають рівчаки калібрів і цим самим зменшують його робочий діаметр при одночасному зниженні його міцності і зносостійкості. Тому при розробці калібрувань валків глибину рівчака калібрів слід обмежувати, забезпечуючи при цьому отримання якісної заготовки.

Як правило, на валках блюмінга застосовують чотири калібри:

калібр 1-й – гладка бочка з глибиною рівчака 80...100мм на діаметр;

калібри 2-3-4-й – з глибиною рівчака 200...220мм на діаметр.

Мінімальний діаметр валків розташований на ділянках калібрів 2-3-4, а максимальне напруження вигину виникає в калібрах 2-3. Переточування валків після вироблення у кінці служби на 8...10% зменшують його діаметр і, отже, його міцність. У важчих умовах працюють шийки валків з боку приводу, які сприймають радіальні сили і момент прокатки. Тому перевірку на міцність виконують і для бочки валка і для шийки.

Алгоритм розрахунку. *Вихідні дані.* Після усіх переточувань діаметр валка блюмінга зменшується на 10% і складе $D_6=0,9 \cdot 1250=1125$ мм.

Розміри шийок (при максимальному діаметрі $D_6=1250$ мм:

$$d_{\text{ш}} = 0,65 D_6 = 0,65 \cdot 1250 = 820 \text{ мм}; l_{\text{ш}} = d_{\text{ш}} = 820 \text{ мм}.$$

Реакції сили на шийку валка

$$P_{\text{ш}} = P(1 - c/a), \quad (6.21)$$

де c – відстань від точки прикладення сили прокатки до реакції сили на шийку валка; a – відстань між натискними гвинтами (осями шийок валків); P – сила прокатки розкату на валках мінімального діаметру.

Напруження в перерізі бочки і шийки визначимо по формулах:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{из} &= P_{ш} \cdot c/w = P_{ш} \cdot c / 0,1 \cdot (D')^3; \\ \sigma_{ш} &= P_{ш} \cdot l_{ш} / 0,2d_{ш}^3; \\ \tau_{кр} &= M_{П} / 0,4 \cdot d_{ш}^3; \\ \sigma_p &= \sqrt{\sigma_{ш}^2 + 3 \cdot \tau_{кр}^2}, \end{aligned} \right\} (6.22)$$

де $\sigma_{из}$, $\sigma_{ш}$ – напруження вигину в перерізах відповідно бочки і шийки; W – модуль опору перерізу вигину; $\tau_{кр}$ – напруження кручення в шийці; σ_p – результуюча напруження в шийці.

Відстань " c " від краю гладкої бочки до осі шийки дорівнює

$$c = \frac{l_{ш}}{2} + l_{\delta} + \frac{b_d}{2}, \quad (6.23)$$

де l_{δ} – довжина бурту між шийкою і калібром; ($l_{\delta} = 100$ мм); b_d – ширина гладкої бочки (калібр 1) ($b_d = 1050$ мм).

Знаходимо для гладкої бочки при силі прокатки $P=10,75$ МН (рис.4.1)

$$\begin{aligned} c &= 410 + 100 + 525 = 1035 \text{ мм}; \\ P_{ш} &= 10,75 (1 - 1035/3300) = 7,2 \text{ МН}; \\ \sigma_{из} &= 7,2 \cdot 1,035 / 0,1 \cdot 1,125^3 = 52,0 \text{ Н/мм}^2; \\ \sigma_{ш} &= 7,2 \cdot 0,82 / 0,2 \cdot 0,82^3 = 54,0 \text{ Н/мм}^2; \\ \tau_{кр} &= 4,336 / 0,4 \cdot 0,82^3 = 60 \text{ Н/мм}^2; \\ \sigma_p &= \sqrt{54,0^2 + 3 \cdot 60^2} = 118 \text{ Н/мм}^2. \end{aligned}$$

Напруження матеріалу валка, що допускається [$\sigma_{ш}$]=120...130 Н/мм². Тобто, валки за даних умов деформації, витримують навантаження, але шийка валка працює при граничній нарузі.

Приклад 2. Визначити геометричні і енергосилові параметри при прокатуванні в калібрі круглого профілю із сталі марки Ст.20, діаметр перерізу $d = 45$ мм (площа перерізу $q = 1570 \text{ мм}^2$). Заготовка має овальний переріз з $q_0 = 2120 \text{ мм}^2$, шириною $B = 40$ мм. Матеріал валка високоміцний чавун з діаметром валків по буртах $D_6 = 400$ мм, швидкість прокатки $v = 7,0 \text{ м/с}$, температура прокатки $t = 1020^\circ\text{C}$.

1. *Оскільки висотна деформація овальної заготовки в круглому калібрі нерівномірна, то геометричні параметри осередку деформації визначимо з формул розділу 1. Заздалегідь приймаємо коефіцієнт форми заготовки $n_0 = 0,7$ і визначимо висоту заготовки (ширину овального калібру)*

$$H \approx q_0/n'_0 \cdot B = 2120/0,7 \cdot 40 = 75,8 \text{ мм.}$$

Перевіримо значення n'_0 при H/B (B/H) = $75,8/40 = 1,93$. з формули (1.14) і отримаємо

$$n_0 = 0,69 + 0,035 (2,4 - 1,93)^2 \approx 0,705.$$

Задане значення n'_0 практично рівно розрахунковому, тому продовжимо рішення. У випадку якщо відмінність між n'_0 і n_0 перевищує величину $0,015 \dots 0,02$ необхідно виконати перерахунок висоти H . Аналогічно вирішується завдання, якщо відомі параметри заготовки і не відомі параметри калібру.

Визначимо лінійне обтиснення по осі калібру

$$\Delta h = H - d(h) = 75,8 - 45 = 30,8 \text{ мм}$$

Середнє обтиснення з урахуванням даних табл. 1.2 дорівнює

$$\Delta h_{\text{cp}} = n_k \cdot \Delta h = 0,65 \cdot 30,8 = 20 \text{ мм.}$$

Середня товщина готового профілю на виході з калібру

$$h'_{\text{cp}} = q/d = 1570/45 = 34,9 \text{ мм.}$$

Катаючий діаметр валків в калібрі при зазорі $S = 5$ мм, довжина і кут контакту рівні:

$$D = 400 - (34,9 - 5) \approx 370 \text{ мм};$$

$$l_d = \sqrt{185 \cdot 20} = 60,8 \text{ мм}; \quad l/h_{CP} = 60,8/44,9 = 1,35;$$

$$\alpha = 60,8/185 = 0,329 \text{ рад.}$$

Середня висота заготовки, відносно обтиснення і швидкість деформації металу:

$$H_{CP} = h'_{CP} + \Delta h_{CP} = 34,9 + 20 = 54,9 \text{ мм};$$

$$\epsilon = 20/54,9 = 0,35 \text{ (35 \%)}$$

$$u = 7000 \cdot 0,35/60,8 = 40,3 \text{ с}^{-1}.$$

2. Опір металу деформації з робіт [8, 23, 28] дорівнює (див. приклад 1)

$$\sigma_\phi = 1,1 \cdot \sigma_{T0} \cdot k_t \cdot k_\epsilon \cdot k_u.$$

Конструкційна сталь марки Ст. 20 має наступний хімічний склад. (%) : 0,2C, 0,27Si, 0,5Mn, 0,2Gr, 0,25Ni. Сума елементів рівна

$$Ni = 0,2 + 0,27 + 0,5 + 0,25 + 0,25 = 1,47.$$

Базове значення напруження течії металу і коефіцієнти рівні (див. приклад 1):

$$\sigma_{T0} = 80 + 25 \{1 - [(5 - Ni)/4,5]^{1,8}\} = 80 + 25 (1 - 0,78^{1,8}) = 89 \text{ Н/мм}^2;$$

$$k_t = 1,66 - 1,1 \cdot 0,55^{0,7} = 0,93;$$

$$k_\epsilon = 1 + 0,43 (1 - 63 \cdot 0,15^2) = 1,37;$$

$$k_u = 0,03 + 0,1 (\ln 40,3 - 2,3)^{1,5} = 1,19.$$

Опір металу деформації ($\lambda = 1,1$)

$$\sigma_\phi = 1,1 \cdot 89 \cdot 0,93 \cdot 1,37 \cdot 1,19 = 151 \text{ Н/мм}^2.$$

3. З робіт [8, 23, 24] знаходимо значення коефіцієнта тертя по формулах (розділу 3):

$$f = f_0 \cdot k_T \cdot k_v \cdot k_B \cdot k_M \cdot k_\epsilon \cdot k_{CM}; \quad (6.24)$$

де f_0 – базовий коефіцієнт тертя, залежний від температури металу; k_T , k_v , k_b , k_m , k_e , k_{cm} – поправочні коефіцієнти впливу відповідно до твердості поверхні валків, окружної швидкості валків, стану поверхні валків (шорсткість), матеріалу валків, відносного обтиснення, технологічного мастила.

Базовий коефіцієнт тертя

$$f_0 = 0,27 - 0,1 \left(\frac{t}{400} - 2 \right)^2 = 0,27 - 0,1 \left(\frac{1020}{400} - 2 \right)^2 = 0,24.$$

При 50 HSD маємо

$$k_T = 1 + 0,43 \left(1 - \frac{50}{65} \right)^2 = 1,025,$$

$$k_v = 0,76 + 0,82 \cdot 1 - 0,1 \cdot v^2 = 0,76 + 0,82 \cdot 1 - 0,1 \cdot 7^2 = 0,83.$$

Приймаємо [8, 23] для зношених валків $k_b = 1,15$, для маловуглецевої сталі $k_m = 1,0$, для відносного обтиснення ($\epsilon=35\%$) маємо $k_e = 1,0$, для охолодження водою без спеціального мастила $k_{cm} = 1,0$ (табл. 3.1).

Коефіцієнт тертя рівний

$$f = 0,24 \cdot 1,025 \cdot 0,83 \cdot 1,15 \cdot 1,0 \cdot 1,1 \cdot 1,1 = 0,261.$$

Показник тертя рівний

$$f_n = f(0,92 + 1,27\epsilon) = 0,261(0,92 + 1,27 \cdot 0,35) = 0,36.$$

4. Розширення визначимо за виразом [8, 23, 24] (формула (2.8))

$$\Delta b = 0,53 \cdot C_n \cdot \Delta h_{cp} \cdot V/n_\phi \cdot h_{cp}. \quad (6.25)$$

де C_n – коефіцієнт впливу ширини профілю; n_ϕ – коефіцієнт впливу форми калібру на умови тертя.

Оскільки ширина контакту змінна то $V_{cp} = 0,81 \cdot d = 0,845 = 36,5$ мм (табл. 1.2).

Середня товщина профілю в осередку деформації визначається за формулою

$$h_{cp} = 0,5 (H_{cp} + h'_{cp}) = 0,5(54,9 + 34,9) \approx 44,9 \text{ мм.}$$

Визначимо коефіцієнт C_n при

$$V_{cp}/l_d = 36,5/60,8 = 0,6.$$

Оскільки $V_{cp}/l_d < 0,8$, то

$$C_n = 0,24 + V_{cp}/l_d = 0,84$$

Коефіцієнт n_ϕ з табл.3.3 рівний $n_\phi = 1,41$. Тоді середнє розширення

$$\Delta b = 0,53 \cdot 0,84 \cdot 20 \cdot 36,5/1,41 \cdot 47 = 4,8 \text{ мм}$$

Логарифмічний показник розширення визначуваний з формули

$$a = \frac{\Delta b}{\Delta h_{cp}} \cdot \frac{h_{cp}}{B_{cp}} = \frac{4,8}{20} \cdot \frac{44,9}{36,5} = 0,315.$$

5. Середнє нормальне контактне напруження визначаємо з використанням формули (6.11):

при $l_d/h_{cp} < 1$

$$p_{cp} = \sigma_\phi [1 + 0,20 (1-a) n_\phi l_d/h_{cp}] [1 + (1,1 - l_d/h_{cp})^2]; \quad (6.26)$$

при $l_d/h_{cp} > 1$

$$p_{cp} = \sigma_\phi [1 + 0,48 f_n (1-a) n_\phi l_d/h_{cp}] \quad (6.27)$$

В нашому випадку $l_d/h_{cp} > 1$ і в розрахунку приймаємо формулу (6.27)

$$p_{cp} = 151(1 + 0,48 \cdot 0,4 \cdot 0,685 \cdot 1,14 \cdot 1,35) \approx 200 \text{ Н/мм}^2$$

6. Знаходимо силу, момент крутіння і потужність прокатки

$$P = p_{cp} \cdot l_d \cdot V_{cp} \cdot 10^{-6} = 200 \cdot 60,8 \cdot 36,5 \cdot 10^{-6} = 0,44 \text{ МН.}$$

При розрахунку моменту крутіння коефіцієнт положення рівнодіючої сил визначають залежно від параметра l_d/h_{cp} . Якщо $l_d/h_{cp} < 1$, то приймаємо формулу (6.12)

$$\psi = 0,79 - 0,89 \frac{l_d}{h_{cp}} + 0,44 \left(\frac{l_d}{h_{cp}} \right)^2;$$

якщо $l_d/h_{cp} > 1$, то приймаємо формули:

$$\begin{aligned} \text{при } l_d/h_{cp} = 1 \dots 3,5, & \quad \psi = 0,51(l_d/h_{cp})^{-0,10}; \\ \text{при } l_d/h_{cp} > 3,5, & \quad \psi = 0,5(l_d/h_{cp})^{-0,092}; \end{aligned}$$

Для різних систем коефіцієнт ψ дорівнює [33]:
 овал - круг (овал - ребровий овал)

$$\psi = 0,145(5,6 - l_d/h_{cp});$$

овал - квадрат (шестикутник - квадрат)

$$\psi = 0,12(6,1 - l_d/h_{cp});$$

ромб - квадрат (ромб)

$$\psi = 0,068(8,5 - l_d/h_{cp}).$$

При $l_d/h_{cp} = 60,8/44,9 = 1,35$, отримаємо для системи калібрів овал - круг

$$\psi = 0,145(5,6 - 1,35) = 0,62.$$

Момент крутіння, на двох валках рівний

$$M = 2 \cdot 0,62 \cdot 0,44 \cdot 60,8 \cdot 10^{-3} = 0,033 \text{ МН} \cdot \text{м}.$$

Визначимо статичний момент крутіння, приведений до валу двигуна по формулах (6.14) - (6.16):

$$M_d = M' + M_{тр};$$

$$M' = M/i;$$

$$M_{тр1} = P \cdot \mu \cdot d_{ш};$$

$$M_{тр2} = \left(\frac{1}{\eta} - 1 \right) (M + M_{тр1}).$$

Діаметр шийки рівний $d = 0,6 \cdot D_6 = 0,6 \cdot 400 = 240$ мм, передатне число $i=1$, а ККД передачі $\eta = 0,9$ (шестерінчаста кліть і шпинделі), коефіцієнт тертя для підшипників кочення $\mu = 0,004$.

Робимо розрахунок:

$$M(= 0,0261; M' = 0,0261;$$

$$M_{\text{тп1}} = 0,03 \cdot 0,004 \cdot 0,24 \approx 0,0004 \text{ МН} \cdot \text{м};$$

$$M_{\text{тп2}} = \left(\frac{1}{0,93} - 1 \right) (0,03 - 0,0004) \approx 0,002 \text{ МН} \cdot \text{м};$$

$$M = 0,03 + 0,0004 + 0,002 = 0,0324 \text{ МН} \cdot \text{м}.$$

Потужність на валу двигуна

$$N_{\text{дв}} = 960 \cdot 0,0324 \cdot 7/0,185 = 1200 \text{ кВт}$$

Розрахунок на міцність валків може бути виконаний з використанням робіт [23, 25, 26] по методу прикладу 1..