

5 ПРИКЛАДИ РОЗРАХУНКІВ КАЛІБРУВАНЬ ВАЛКІВ ДЛЯ ПРОКАТКИ ПРОСТИХ ПРОФІЛІВ

Для прокатки простих і фасонних профілів (окрім труб) початковою є квадратна або прямокутна заготовка (блєм, дрібна заготовка). У рішенні завдання калібрування входить: встановити приватні (по проходах, клітях) коефіцієнти витягань, максимальні кути захвату, форми і розміри калібрів, кількість проходів або клітей. Кути захвату, що допускаються, визначають на підставі відомих дослідних даних або розрахунком (див. вище), а приватні коефіцієнти витягань тільки на підставі практичних даних.

Неодмінною умовою проектування калібрів є визначення розширення металу в цьому калібрі. Проте для розрахунку розширення необхідно знати в першу чергу величину середнього обтиснення розкату в калібрі, при якому відбувається повне (задане) заповнення калібру по ширині. Тобто, в даному випадку маємо завдання з двома невідомими - обтисненням і розширенням (шириною). Причому, особливістю прокатки в калібрах є, те, що при деформації металу середня висота профілю, при постійній площі перерізу ($q = \text{const}$), залежатиме від ширини розкату i , отже, від величини розширення металу для заповнення калібру (див. розділ 1)

$$h_{CP} = q / n_i \cdot b_i.$$

З формули слідує що, при $q = \text{const}$, чим більше ширина розкату, тим менше середня його висота. Це призводить до того, що при постійній початковій товщині заготовки ($H_{CP} = \text{const}$) величина обтиснення в цьому калібрі зростає оскільки

$$\Delta h_{CP} = H_{CP} - h_{CP}.$$

Відомі різні методи калібрувань валків для прокатки простих профілів [1, 3, 6, 7, 10, 11, 22, 23 та ін.]. Незважаючи на різноманітність підходів до калібрування валків, загальною в них є необхідність попереднього і ітераційного визначення розширення і розмірів калібрів.

Особливо можна розглядати розрахунок режиму деформації (калібрування) валків блюмінга методом максимальних кутів захвату (О.П. Чекмарьов).

5.1 Метод розрахунку режиму деформації металу (калібрування валків) на блюмінгу

У цьому методі О.П. Чекмарьов пропонує розраховувати режим деформації металу по максимальних кутах захвату за деяких умов. Після закінчення розрахунку режиму обтиснень за розмірами розкатів визначають розміри ящичних калібрів [14].

5.1.1 Алгоритм розрахунку режиму деформації на блюмінгу по умовам захвату розкату валками

1. Задаємо початкові параметри: діаметр валків по буртах (D_6), розміри зливка і кінцеві розміри заготовки (блюма), матеріал зливка, стан поверхні валків, окружну швидкість валків при захваті, температуру металу на початку прокатки, кількість калібрів та ін.
2. Визначимо допустимі (максимальні) кути захвату на гладкій бочці та в калібрах по формулах розділу 3.
3. Знаходимо заздалегідь глибину урізання ящичних калібрів у валки по формулі

$$h_k = (0,15 \dots 0,18) \cdot D_6.$$

Глибину урізання на ділянці гладкої бочки приймають рівною $h_k = 80 \dots 100$ мм.

4. Знаходимо мінімальні середні діаметри валків в шкірному калібрі з урахуванням переточувань (найгірші умови захвату)

$$D_i = 0,9 D_6 - h_{ki}, \quad (5.1)$$

де 0,9 – коефіцієнт, що враховує зменшення діаметру валка після усіх переточувань.

5. Визначимо допустимі обтиснення по максимальному куту захвату на гладкій бочці і в кожному калібрі з мінімальним діаметром валків (див. розділ 3)

$$\Delta h_d = R_i \cdot \alpha_3^2,$$

де R – в мм; α_3 – у рад.

Потім визначимо середнє обтиснення для усіх 4-х калібрів по формулі:

$$\Delta h_{dc} = (\Delta h_1 + \Delta h_2 + \Delta h_3 + \Delta h_4) / 4, \quad (5.2)$$

де Δh_1 – обтискання на гладкій бочці і в калібрах.

6. Визначимо фактичне сумарне обтиснення по кожній стороні від зливка до готового блюма. Сумарне обтиснення $\Sigma \Delta h_n$ по висоті (H) зливка рівно

$$\Sigma \Delta h_n = H - h + k_y (B - b), \quad (5.3)$$

де H і B – максимальні розміри конусного зливка відповідно по висоті і ширині; h і b – висота і ширина готового блюма, що виходить з останнього калібру; k_y – показник розширення ($k_y = 0,1 \dots 0,2$) [1].

З формули (5.3) виходить, що сумарне обтиснення по стороні H складається власне з різниці висот H і h і добавки $k_y(B - b)$, що представляє величину обтиснення металу, який пішов на розширення в проходах, де деформували розкат по стороні B після кантування. Відповідно сумарне обтиснення по стороні B рівно

$$\Sigma \Delta h_n = B - b + k_y (H - h), \quad (5.4)$$

7. Визначимо число проходів по кожній стороні зливка:

$$N'_n = \Sigma \Delta h_n / \Delta h_{dc}; \quad N'_b = \Sigma \Delta h_b / \Delta h_{dc}, \quad (5.5)$$

де Δh_{dc} – допустиме обтиснення з формули (5.2).

Сума фактичної кількості проходів має бути непарним числом, а N'_n і N'_b округлюють до цілих чисел у бік збільшення. Після цього коригують допустиме обтиснення

$$\Delta h_d = \Delta h_{dc} \cdot (N'_n + N'_b) / (N_n + N_b),$$

де N_n і N_b – фактичні числа проходів.

Для отримання квадратних заготовок (блюмів) використовують зливки прямокутного перерізу. Причому головна і донна частини мають різні розміри. Так, наприклад, злинок киплячої сталі з наступними розмірами в головній частині - H x B = 735 x 675 мм, має наступні розміри в донній частині - H x B = 815 x 755 мм.

Розрахунок калібрування виконуємо по більшому перерізу зливка, тобто початковою для першого проходу є висота $H = 815$ мм і ширина $B = 755$ мм. В більшості випадках зливок задають у валки тонкою (головний) частиною. Це сприяє поліпшенню умов захвату зливка валками.

В процесі прокатки розкат кантують після деяких парних проходів на 90° з метою зменшення розмірів кожної сторони зливка. При прокатуванні на гладкій бочці кантування виконують після перших двох проходів для зняття конусності зливка. Потім прокатують розкат на гладкій бочці за 2-6 проходів не допускаючи після парних проходів отримання граничних значень b/h . Для гладкої бочки граничне відношення $b/h = 1,3...1,35$ (в попередньому проході перед кантуванням), а при прокатуванні в калібрах 2-4 допустимі значення $b/h = 1,7...1,75$. Перевищення цих значень призводить до втрати стійкості розкату в наступному калібрі (проході) і його скручуванню. Скручені розкати неможливо виправити у валках і їх переводять у брак. У практичних умовах, залежно від розмірів зливка, його хімічного складу і кількості калібрів встановлений порядок проходів і кантувань з боку H на бік B і навпаки (табл. 5.1)[1].

З цієї таблиці виходить, що 40-60% від загальної кількості проходів виконують на гладкій бочці, яка має найбільший діаметр валків. Залежно від розмірів блюма і зливка використовують три або чотири калібри. У першому випадку передбачається інтенсивний режим деформації.

5.1.2 Розрахунок режиму деформації при прокатуванні блюмів

Робимо розрахунок режиму деформації металу на блюмінгі з $D_6 = 1150$ мм (рис.4.1, а). Основні початкові умови прокатки дані в таблиці. 5.2. Більша сторона зливка в першому проході являється висотою. Вибір температури металу і швидкості прокатки при захваті розкату виконують на підставі практичних даних ($t=1180...1220^\circ\text{C}$, ($v=1...2\text{м/с}$) [14,23]. Приймаємо число калібрів на валках рівним чотирьом.

Таблиця 5.1 - Розподіл проходів по калібрах валків блюмінга

Калібр		Пз, об/хв				
I - (гладкая бочка) -		10...15				
II и III -		15...30				
IV и V -		30...40				

Кількість калібрів	Сумарна кількість проходів	Кількість проходів по калібрах				
		I	II	III	IV	V
4	9	2	4	2	1	-
4	9	4	4	1	-	-
4	11	6	4	1	-	-
4	11	4	4	2	1	-
4	13	8	4	1	-	-
4	13	6	4	2	1	-
4	15	8	4	2	1	-
5	15	6	4	2	2	1
5	17	8	4	2	2	1

Таблиця 5.2 - Початкові параметри прокатки (дані максимальні розміри перерізу зливка)

Зливков, мм		Блюм, мм		Матеріал блюма	Температура початку прокатки, t ⁰ , C	Окружна швидкість валків при захваті V, м/с
H	B	h	B			
800	700	350	350	Ст.3	1180	1,0

З табл. 3.2 і формул (3.6) і (3.7) визначимо максимальні кути захвату (розрахунок по інших методиках тут не приведений): на гладкій бочці

$$k_v = 1,24 - 0,15v = 1,24 - 0,15 \cdot 1 = 1,09;$$

$$\alpha_3 = \alpha_{30} \cdot k_v \cdot k_M = 22 \cdot 1,09 \cdot 1,0 = 24^0 (0,418 \text{ рад});$$

в калібрах

$$\alpha_3 = \alpha_{30} \cdot k_v \cdot k_M = 24 \cdot 1,09 \cdot 1,0 = 26,2^\circ (0,458 \text{ рад}).$$

У розрахунку прийнята однакова окружна швидкість обертання валків в калібрах ($v = 1,0$ м/с). Проте в роботі [1] рекомендуються наступні обороти валків при захваті (n_3) розкату в калібрах. По прийнятих значеннях n_3 визначають окружну швидкість валків по формулі

$$v = \pi \cdot D \cdot n_3 / 60.$$

Заздалегідь приймаємо схему, в якій передбачено використання чотирьох калібрів (табл.5.1) (прокатка маловуглецевої сталі). Приймаємо глибину урізування в калібрі 1 (гладка бочка) – $h_{к1} = 80$ мм, в калібрах 2 – 4 – $h_{кi} = 200$ мм (див. п. 3). Тоді середні (катаючий) діаметри валків з формули (5.1) рівні:

$$D_1 = 0,9 \cdot 1150 - 80 = 950 \text{ мм};$$

$$D_{2-4} = 0,9 \cdot 1150 - 200 = 830 \text{ мм}.$$

Обтискання, що допускаються, відповідно для калібрів 1-4 визначаємо з формули (3.14):

$$\Delta h_1 = 475 \cdot 0,418^2 = 83 \text{ мм};$$

$$\Delta h_{2-4} = 415 \cdot 0,458^2 = 87 \text{ мм}.$$

Розрахунок Δh_d по міцності валків і потужності двигуна тут не приведений. Середнє обтиснення при прокатуванні

$$\Delta h = (83 + 3 \cdot 87) / 4 = 86 \text{ мм}.$$

Сумарні обтиснення відповідно по сторонах Н і В знаходимо по формул (5.3) і (5.4) при $k_y = 0,15$:

$$\Sigma \Delta h_H = 800 - 350 + 0,15 (700 - 350) = 503 \text{ мм};$$

$$\Sigma \Delta h_B = 700 - 350 + 0,15 (800 - 350) = 412 \text{ мм}.$$

Тоді число проходів по формулах (5.5) для сторін відповідно Н і В рівно:

$$N'_H = 503 / 86 = 5,75; \quad N'_B = 412 / 86 = 4,8.$$

Сумарне число проходів $\Sigma N' = 10,55$. Оскільки це значення було визначене виходячи з максимальних кутів захвату, зменшувати сумарне число проходів проти розрахункового не можна. Тому приймаємо $N_H = 6$, $N_B = 5$ і $\Sigma N = 11$. Разом з цим

зменшимо і величину обтиснення при прокатуванні в калібрах пропорційно збільшенню кількості проходів, тобто в $10,55/11 = 0,96$ разу. Тоді середня величина обтискання дорівнює

$$\Delta h_1 = \Delta h \cdot 1,04 = 86 \cdot 0,96 = 83 \text{ мм.}$$

Це обтиснення менше допустимого в калібрах 2-4, що відповідає раніше прийнятим умовам (див.. п.3.4). Залишаємо розрахункове обтиснення в калібрі 1 рівним $\Delta h_1 = 83$ мм. Робимо розрахунок режиму деформації.

Гладка бочка. Прохід 1. Обтиснення зливка робимо по більшій стороні $H = 800$ мм. Формули для розрахунку дані в розділі 1.

Отримаємо:

$$h_1 = H_1 - \Delta h_1 = 800 - 83 = 717 \text{ мм;}$$

$$l_{d1} = \sqrt{R \cdot \Delta h_1} = \sqrt{475 \cdot 83} = 198 \text{ мм;}$$

$$\alpha = l_{d1}/R = 198 / 475 = 0,418 \text{ рад;}$$

$$B_1 / l_{d1} = 700 / 198 = 3,53;$$

Розширення металу визначимо по формулі (2.1) О. П. Чекарьова при $n_\phi = 1$ (гладка бочка), $n=2$ и $C_m = 1$ (табл.2.1)

($B_{cp} \approx B_1$):

$$\Delta b_1 = (\Delta h_1 \cdot B_{cp} / h_{cp}) / n_\phi [1 + (1 + \alpha_1)(B_{cp} / l_{d1})^n]; \quad (5.6)$$

$$\Delta b_1 = (83 \cdot 700 / 758) / (1 + 1,418 \cdot 12,5) = 4,1 \text{ мм.}$$

З метою спрощення розрахунків округлюємо розширення до величин кратних 5 мм. Тоді, ширина розкату після проходу рівна

$$b_1 = B_1 + \Delta b_1 = 700 + 5 = 705 \text{ мм.}$$

Прохід 2. Обтиснення по стороні H . Маємо (без кантування) відповідно до попереднього розрахунку $H_2 = h_1 = 717$ мм, $B_2 = b_1 = 705$ мм, $\Delta h_2 = 83$ мм, $l_{d2} = 198$ мм. Отримаємо (без вказівки індексів калібрів):

$$h = 717 - 83 = 634 \text{ мм;}$$

$$\Delta b = 5 \text{ мм;}$$

$$B / l_d = 3,57,$$

$$b = 705 + 5 = 710 \text{ мм.}$$

Після цього проходу співвідношення $b_2/h_2 = 710/663 = 1,12$. Якщо зробити обтиснення по стороні ще в двох проходах, то отримаємо

після четвертого проходу $b/h > 1,35$. У цьому випадку не можна продовжувати прокатку на гладкій бочці. Тому, після проходу 2 робимо кантування на 90° і обтискаємо розкат по стороні B . Кантування також потрібна для зняття конусності зливка по стороні B .

Прохід 3. Обтиснення по стороні B в калібрі 1 після кантування розкату на 90° . Маємо: $H_3 = b^2 = 710$ мм, $B_3 = h_2 = 634$ мм, $\Delta h_3 = 83$ мм, $l_{d3} = 198$ мм. Отримаємо:

$$h = 710 - 83 = 627 \text{ мм}; \quad B / l_d = 634 / 198 = 3,25;$$

$$\Delta b = 5 \text{ мм (после расчета);} \quad b = 634 + 5 = 639 \text{ мм.}$$

Прохід 4. Обтиснення по стороні B . Маємо: $H_4 = h_3 = 627$ мм; $B_4 = b_3 = 639$ мм, $\Delta h_4 = 83$ мм, $l_{d4} = 198$ мм. Отримаємо:

$$h = 627 - 83 = 544 \text{ мм}; \quad B / l_d = 639 / 198 = 3,22;$$

$$\Delta b = 5 \text{ мм (після розрахунку);} \quad b = 639 + 5 = 644 \text{ мм.}$$

Оскільки після проходу 4 відношення $b_4/h_4 = 1,18$, а при переході в калібр 2 допустиме відношення $b/h = 1,7 \dots 1,75$, то можна продовжити прокатку на гладкій бочці.

Проходи 5, 6. У цих проходах на гладкій бочці (у калібрі 1) по стороні B можна не робити розрахунок, а знаючи обтиснення ($\Delta h = 83$ мм) і припускаючи розширення $\Delta b = 5$ мм робимо обчислення і дані заносимо в таблиці 5.5 (попередній розрахунок). Після шостого проходу відношення $b_6/h_6 = 654/378 = 1,73$. Для гладкої бочки відношення велике, але оскільки прохід 7 виконують в ящичному калібрі, то відношення $b_6/h_6 = 1,73$ цілком допустимо. Остаточні розміри розкату після шостого проходу рівні

$$h_6 = 544 - (83 + 83) = 378 \text{ мм}; \quad b_6 = 644 + 5 + 5 = 654 \text{ мм}$$

Після проходу 6 і кантовки на 90° . раскат передають в калібр 2.

Прохід 7. Прокатка в калібрі 2 по стороні H . Після кантування розкату, що вийшов з калібру 1, маємо: $H_7 = b_6 = 654$ мм, $B_7 = h_6 = 378$ мм, $\Delta h_7 = 83$ мм. Коефіцієнт обмеження

розширення в цьому і наступних калібрах рівний $\mu_{\phi} = 1,15$ (табл.3.3):

$$\begin{aligned}h &= 654 - 83 = 571 \text{ мм}; & l_d &= 415 \cdot 83 = 186 \text{ мм}; \\ \alpha &= 186/415 = 0,45 \text{ рад}; & B/l_d &= 378/186 = 2,03; \\ \Delta b &= 83 \cdot 0,62/1,15 (1 + 1,45 \cdot 4,1) = 6,5 \text{ мм} \approx 7 \text{ мм}; \\ b &= 378 + 7 = 385 \text{ мм}.\end{aligned}$$

Прохід 8. Прокатка по стороні H . Маємо: $H_8 = h_7 = 571$ мм, $B_8 = b_7 = 385$ мм, $\Delta h_8 = 83$ мм, $l_{d8} = 186$ мм, $\alpha_8 = 0,45$ рад. Отримаємо:

$$\begin{aligned}h &= 571 - 83 = 488 \text{ мм}; & B/l_d &= 385/186 = 2,06; \\ \Delta b &= 83 \cdot 0,73/1,15 (1 + 1,45 \cdot 4,25) = 8 \text{ мм}; \\ b &= 385 + 8 = 393 \text{ мм}; & b/h &= 0,8.\end{aligned}$$

Оскільки $b/h < 1,70$, продовжуємо прокатку в калібрі 2 без кантування.

Прохід 9. Прокатка по стороні H . Маємо: $H_9 = h_8 = 488$ мм, $B_9 = b_8 = 393$ мм, $\Delta h_9 = 83$ мм, $l_{d9} = 186$ мм, $\alpha_9 = 0,45$ рад. Отримаємо:

$$\begin{aligned}h &= 488 - 83 = 405 \text{ мм}; & B / l_d &= 393 / 186 = \\ 2,11; \\ \Delta b &= 83 \cdot 0,88 / 1,15 (1 + 1,45 \cdot 4,45) = 9 \text{ мм}; \\ b &= 393 + 9 = 402 \text{ мм}.\end{aligned}$$

Прохід 10. Прокатка по стороні H . Маємо: $H_{10} = h_9 = 405$ мм, $B_{10} = b_9 = 402$ мм, $\Delta h_{10} = 83$ мм, $l_{d10} = 186$ мм, $\alpha_{10} = 0,45$ рад. Отримаємо:

$$\begin{aligned}h &= 405 - 83 = 322 \text{ мм}; & B / l_d &= 402/186 = \\ 2,15; \\ \Delta b &= 83 \cdot 1,10 / 1,15 (1 + 1,45 \cdot 4,7) = 10 \text{ мм}; \\ b &= 402 + 10 = 412 \text{ мм}.\end{aligned}$$

Після проходу 10 розмір розкату $h_{10} \times b_{10} = 322 \times 412$, а відношення $b_{10}/h_{10} = 1,28$. Відповідно до вимоги стійкості кантування розкату не потрібно. Проте отримані розміри розкату

досить близькі до кінцевих розмірів блюма ($h \times b = 350 \times 350$ мм) і тому передаємо розкат в калібр 3 з попереднім кантуванням на 90° .

Прохід 11. Прокатка по стороні В в калібр 3. Масмо після кантування на 90° : $H_{11} = b_{10} = 412$ мм, $B_{11} = h_{10} = 322$ мм, $\Delta h_{11} = 83$ мм. Отримаємо:

$$h = 412 - 83 = 329 \text{ мм}; \quad l_d = \sqrt{415 \cdot 83} = 186 \text{ мм};$$

$$B / l_d = 321 / 186 = 1,73; \quad \alpha = 186 / 415 = 0,45 \text{ рад};$$

$$\Delta b = 83 \cdot 0,86 / 1,15 (1 + 1,45 \cdot 3) = 12 \text{ мм};$$

$$b = 322 + 12 = 334 \text{ мм}.$$

Отримані розміри розкату по проходах заносимо в табл. 5.3, з якої виходить, що розрахунок не дозволив отримати задані розміри блюма. Проте розрахунковий режим, так само як і практичний, можна коригувати. Оскільки розміри h_{11} і b_{11} менше заданих розмірів блюма, то, отже, сумарні обтиснення $\sum \Delta h_n$ і $\sum \Delta b_n$ виявилися завищеними внаслідок того, що показник розширення k_y у формулах (5.3) і (5.4) насправді менше, ніж 0,15 і рівний по проходах 0,06...0,145.

З табл. 5.3 видно, що по стороні Н сумарне обтиснення більше на $350 - 329 = 21$ мм, а по стороні В на $350 - 334 = 16$ мм. На ці значення і необхідно зменшити обтиснення у відповідних періодах кантувань. По стороні Н зручне це зробити в 1 і 2 проходах, зменшити обтиснення до 75 мм (табл. 5.4). Тоді в проході 3 після кантування початкова ширина розкату буде рівна $B = 650$ мм, а після проходу $b = 655$ мм. Оскільки обтиснення і розміри розкату змінилися трохи, то величини розширень не перераховуємо. У проході 11 для отримання необхідного розміру блюма $h_{11} = 350$ мм зменшуємо обтиснення з 83 до 62 мм $\Delta h = 412 - 350 = 62$ мм). Проте при істотному зменшенні обтиснення в проході 11 відповідним чином зменшується і розширення. Маючи на увазі лінійну залежність розширення від обтиснення, отримаємо для проходу 11

$$\Delta b = \Delta b_p \cdot 62 / 83 = 12 \cdot 0,72 = 8 \text{ мм}.$$

Тоді початкова ширина розкату для 11 проходу має бути на $12 - 8 = 4$ мм більше, ніж в попередньому розрахунку (табл.

5.3). Отже, на 4 мм необхідно зменшити обтиснення по стороні Н в 7-10 проходів, яка є початковою шириною для 11 проходу. Тоді величини обтиснень у вказаних проходах дорівнюватимуть 82 мм. Таким чином, коригування режиму обтиснень дозволило у результаті отримати необхідні розміри кінцевого блюма при прокатуванні в трьох калібрах (табл.5.4).

У проходах 1 і 3 в графі Δh в знаменнику дані величини обтиснень тонкого кінця конусного зливка. Як виходить з розрахунку, для отримання необхідних розмірів блюма знадобилися всього три калібри, а не чотири, як планувалось на початку розрахунку. Проте перерахунок режиму деформації не потрібно, оскільки з кінцевими розмірами може бути як калібр 3, так і калібр 4. Розміри чистового калібру визначаються практичними вимогами.

Таблиця 5.3 – Розрахунковий (попередній) режим деформації

Калі бр	№ проходу	Сторона, яка деформ.	H (h), мм	B (b), мм	Δh , мм	Δb , мм
Зливок (800 /700) x (740/640)						
	0	-	800	700	-	-
1	1	H	717	705	83/23	5
	2	H	634	710	83	5
Кантування						
1	3	B	627	639	83/13	5
	4	B	544	644	83	5
	5	B	461	649	83	5
	6	B	378	654	83	5
Кантування						
2	7	H	571	385	83	7
	8	H	488	393	83	8
	9	H	405	402	83	9
	10	H	322	412	83	10
Кантування						
3	11	B	329	334	83	12

5.1.3 Побудова калібрів і розміщення їх на валках

На існуючих блюмінгах валки обертаються від індивідуальних двигунів і тому нижній тиск для вигину переднього кінця розкату створюється різницею швидкостей валків (окружна швидкість нижнього валка більша на 1%).

При цьому діаметри валків однакові і лінія прокатки співпадає з середньою лінією валків. Якщо максимальна ширина зливка на стані не перевищує 950 мм, то ширину гладкої бочки по дну калібру можна прийняти рівною $b_d = 1000$ мм, а у зазорі $b = 1050$ мм. Глибина рівчака рівна $h_k = 80$ мм. На рис.1.1 показаний ящичний калібр. Глибина урізання калібру II на діаметр валка визначена раніше і рівна $h_k = 200$ мм, а зазор між валками рівний $S = 20$ мм.

Таблиця 5.4 - Режим обтиснень після коригування.

Зливки: 800/700 x 740/640 мм

Таблиця калібру розміри, мм	№ про- ходу	H, мм	B, мм	h, мм	b, мм	Δh , мм	Δb , мм
Сторона Н							
1	1	800	700	725	705	75/15	5
80x1000/1050	2	725	705	650	710	75	5
Кантовка (В)							
1	3	710	650	627	655	83/13	5
	4	627	655	544	660	83	5
	5	544	660	461	665	83	5
	6	461	665	378	670	83	5
Кантовка (Н)							
2	7	670	378	588	385	82	7
200x376/414	8	588	385	506	393	82	8
	9	506	393	424	402	82	9
	10	424	402	342	412	82	10
Кантовка (В)							
3	11	412	342	350	350	62	8
200x340/352							

Ширину калібру встановлюємо з урахуванням того, що ширина дна калібру b_d має бути на 2...5 мм менше ширини початкового розкату для 7 проходу (першого в цьому калібрі), а ширина калібру у зазорі має бути на 2...5 мм більше максимальної ширини розкату в цьому калібрі (у 10 проході).

Таким чином, в калібрі 2 його ширина рівна

$$b_d = B_7 - (2...5) = 378 - 2 = 376 \text{ мм};$$

$$b = b_{10} + (2...5) = 412 + 2 = 414 \text{ мм};$$

В калібрі 3

$$b_d = b_{10} - (2...5) = 342 - 2 = 340 \text{ мм};$$

$$b = b_{10} + (2...5) = 350 + 2 = 352 \text{ мм}.$$

Ухил стінок в калібрах:

калібр 2

$$\varphi = (b - b_d) 100 / h_k = (414 - 376) 100 / 200 = 19\%;$$

калібр 3

$$\varphi = (352 - 340) 100 / 200 = 6\%.$$

Якщо різницю в розмірах b і b_d в калібрі збільшити, то зросте ухил стінок і це запобігатиме утворенню «лампасів» (вихід металу в зазор між валками), але погіршується стійкість розкату після кантування на 90° .

Радіус закруглення у дна калібру приймають рівним

$$r = (0,08...0,1) b_d,$$

а радіус закруглень кутів буртів рівний

$$r_1 = (0,1...0,15) h_k.$$

Опуклість дна калібру приймають рівною 2...5 мм і тому висота калібру по осі буде менше за розрахункову. При такій формі калібру, розкат що виходить з валків отримує більшу стійкість на рольганги навіть у разі його вироблення. Крім того, при кантуванні такого розкату і прокатки його в наступному калібрі простір на розширення виявляється більшим на 4...10 мм, що знижує можливість утворення «лампасів». По розрахованих розмірах необхідно побудувати ящичні калібри. Після розрахунку калібрування по відомих методиках необхідно визначити силу, прокатки, моменти крутіння і потужність головного приводу. Ці параметри мають бути менші за тих, що допускаються.

5.2 Калібрування валків неперервно-заготовочного стану (НЗС)

Нагадаємо, що неперервним заготовочним називається стан, що має у своєму складі послідовно розташовані кліті, а розкат прокатують одночасно в декількох (двох і більше) клітях. У зв'язку з цим процес неперервної прокатки в суміжних клітях пов'язаний обов'язковою умовою - законом постійності секундних об'ємів металу у осередках деформації [14,23]. Відповідно до цього закону об'єм металу, що проходить в одну секунду через осередок деформації в кожній кліті має бути однаковим, тобто дотримується наступне співвідношення

$$v_1 \cdot q_1 (1 + S_1) = v_2 \cdot q_2 (1 + S_2) = \dots v_n \cdot q_n (1 + S_n),$$

де v_i , q_i , S_i – середня окружна швидкість валків, площа перерізу розкату і випередження металу в кожній кліті. Допускаючи, що $S_i = \text{const}$, отримаємо

$$C_i = v_1 \cdot q_1 = v_2 \cdot q_2 \dots = v_n \cdot q_n. \quad (5.6)$$

Це ідеальна умова закону. У практичних умовах процес прокатки відбувається з деяким натягненням розкату, тобто

$$C_i < C_{i+1}.$$

Відношення секундних об'ємів в клітях рівне

$$k_p = C_{i+1}/C_i \approx 1,01 \dots 1,015,$$

тобто секундний об'єм наступної кліті дещо більше попередньої кліті. Таке співвідношення потрібне для запобігання петлеутворення (підпора) розкату на міжклітьовій ділянці і застряганню розкату в кліті. Проте значне натягнення коли $k_p > 1,015$, також неприпустимо із-за можливого значного пластичного деформування розкату на міжклітьовій ділянці і пориві розкату

Приклад. Як приклад виконаємо розрахунок розмірів калібрів для прокатки заготовок з розмірами 80 x 80 (матеріал ст.3) з блюма з $H \times B = 360 \times 360$ мм. Число клітей в групах – 14 (2+6+6), в кліті 14 швидкість валків 6...7 м/с. У чорновій групі

приймаємо ящичну систему калібрування валків, а в чистовій використовуємо систему ромб-квадрат (см рис.4.3). Розміри валків дані вище. Температура початку прокатки $t_H = 1130^0 \text{ C}$, а кінця прокатки $t_K = 1060^0 \text{ C}$. Розподіл температур по клітях в першому наближенні може бути визначений за формулою (без урахування охолодження металу на проміжних рольгангах):

$$\left. \begin{aligned} t_i &= t_0 - K/q_i; & t_0 &= t_H + K/q_0; \\ K &= (t_H - t_K) \cdot q_0 \cdot q / (q_0 - q_{k-1}), \end{aligned} \right\} \quad (5.7)$$

де q_0 – початкова площа поперечного перерізу блюма; q_i – площа розкату після попереднього проходу; q_{k-1} – площа розкату в передостанньому проході; q – площа кінцевої заготовки.

У зв'язку з великим перерізом розкату не розрахунок впливу проміжного рольганга між групами кліті не зробить помітного впливу на розподіл температур розкату по клітях.

1. Розрахунок режиму деформації металу і розмірів ящичних калібрів в чорновій групі клітей виконуємо по ходу прокатки з умов захвату металу валками по аналогії з розрахунком для блюмінга. У зв'язку з цим визначимо максимальні кути захвату (гл.3) і обтиснення, що допускаються, за формулою (3.14) для мінімального (після переточувань валків) діаметрів валків і з урахуванням урізування калібрів у валки: кліті 1,2 - $h_K = 100...150$ мм; кліті 3 - 6 - $h_K = 120...140$ мм; кліті 7, 8 - $h_K = 120...130$ мм.

Розміри валків по клітях:

$$\left. \begin{aligned} \text{кліті 1-4 } D_6 &= 900 \text{ мм;} \\ \text{кліті 5-8 } - D_6 &= 730 \text{ мм;} \\ \text{кліті 9-14 } - D_6 &= 530 \text{ мм} \end{aligned} \right\} \begin{array}{l} \text{чорнова група} \\ \text{(чистова група)} \end{array}$$

Тоді катаючі діаметри валків чорнової групи рівні (кліті 1, 2)

$$D = 0,92 D_6 - h_K = 0,92 \times 900 - 150 = 680 \text{ мм.} \quad (5.8)$$

де 0,92 – коефіцієнт, що враховує зменшення діаметру валків при переточуваннях.

Невелике урізування h_K рівчака калібру забезпечує підвищення міцності валка за рахунок менших значень напружень вигину. Аналогічно визначимо діаметри валків і інших клітей чорнової групи (табл.5.5). У останніх клітях урізування калібру зменшують у зв'язку зі зменшенням товщини розкату.

2. При розрахунку калібрування валків НЗС планують випускати готовий прокат не лише з чистої кліти, але з проміжних клітей. Так, для даного стана передбачають випускати квадратну заготовку з розмірами 150 x 150 мм з кліти 8. У кліті 4 також планується прокатувати квадратну заготовку.

При великих розмірах готового прокату (більше 80 x 80 мм) проміжний квадрат може бути випущений з кліти 6 (наприклад, 180 x 180 або 195 x 195 мм). Це підвищує ефективність роботи чорнової групи клітей.

3. Визначимо площі поперечного перерізу розкатів, сумарний і індивідуальні коефіцієнти витягування. Площі калібрів без урахування закруглень при вершинах (квадратні калібри) (мм):

$$\left. \begin{aligned} \text{чистова (кліть 14)} - q_{14} &= c_{14}^2 = 80 = 6400; \\ \text{проміжна (кліть 8)} - q_8 &= c_8^2 = 150 = 22500; \\ \text{заготовка} - q_0 &= c_0^2 = 360 = 130000. \end{aligned} \right\} (5.9)$$

Аналогічно визначаємо площі інших проміжних калібрів. Сумарні коефіцієнти витягувань в групах:

$$\left. \begin{aligned} \text{чорнової} - \mu_{\text{чр}} &= q_0 / q_8 = 130000 / 22500 = 5,78; \\ \text{чистої} - \mu_{\text{ч}} &= q_8 / q_{14} = 22500 / 6400 = 3,52; \end{aligned} \right\} (5.10)$$

Визначимо заздалегідь коефіцієнти витягувань в парах калібрів:

$$\left. \begin{aligned} \mu_{\text{П}} &= \sqrt[4]{\mu_{\text{чр}}} = \sqrt[4]{5,78} = 1,552; \text{ - чорнова група;} \\ \mu_{\text{П}} &= \sqrt[3]{\mu_{\text{ч}}} = \sqrt[3]{3,52} = 1,52. \text{ - чистова група} \end{aligned} \right\} (5.11)$$

У прямокутних і ромбічних калібрах коефіцієнт витягування можна прийняти більше, ніж в квадратних, оскільки внаслідок більшої їх ширини, розширення в них буде менше. Співвідношення між коефіцієнтами можна прийняти в межах 0,95. Отримані значення приватних коефіцієнтів витягань заносимо в табл. 5.5. Алгебраїчна сума приватних коефіцієнтів витягувань має дорівнювати сумарному коефіцієнту витягувань. Знаючи

значення коефіцієнтів витягувань в парах калібрів, визначимо значення коефіцієнтів в кожному калібрі за формулою:

для ящичних прямокутників (ромбів)

$$\mu_i \approx \sqrt{\mu_{\Pi}} / 0,97;$$

для ящичних квадратів (квадратів) (клети 4, 6, 8)

$$\mu_i \approx \sqrt{\mu_{\Pi}} / 1,02.$$

Сума приватних коефіцієнтів витягань має дорівнювати сумарному коефіцієнту витягання в кожній групі і по усьому стану, тобто:

$$\mu_{\text{гр}} = \mu_1 \cdot \mu_2 \cdot \mu_3 \cdot \mu_4 \cdot \mu_5 \cdot \mu_6 \cdot \mu_7 \cdot \mu_8 = 5,78;$$

$$\mu_{\text{ч}} = \mu_9 \cdot \mu_{10} \cdot \mu_{11} \cdot \mu_{12} \cdot \mu_{13} \cdot \mu_{14} = 3,52.$$

Сумарний коефіцієнт витягань для усього стану рівний

$$\mu_{\Sigma} = \mu_{\text{гр}} \cdot \mu_{\text{ч}} = 5,78 \cdot 3,52 = 22,11.$$

Значення приватних коефіцієнтів розраховують з точністю до 0,001. Відомі площі дозволяють визначити розміри сторін квадратної заготовки c_i , а діагональ квадрата визначається без урахування закруглень ребер по формулі

$$h_i = b_i = 1,41 \cdot c_i.$$

Для q_i з табл. 5.5 сторони квадратів по клітках рівні (мм):
4 - $c_4 = 240$; 6 - $c_6 = 190$; 8 - $c_8 = 150$.

4. Визначимо константу прокатки при $k_p = 1,015$, (випередження $S = 0$) і швидкості прокатки окремо для кліт кожної групи. Швидкість прокатки в кліт 8 приймаємо рівній або дещо меншій швидкості розкату, що входить в кліт 9. Приймаємо швидкість прокатки в кліт 14 рівною $v_{14} = 7$ м/с. Тоді секундні об'єми в клітках дорівнюють:

$$C_{14} = v_{14} \cdot q_{14} = 7 \cdot 6,4 \cdot 10^3 = 44,8 \cdot 10^3 \text{ м} \cdot \text{мм}^2/\text{с};$$

$$C_{13} = C_{14}/k_p = 44,8 \cdot 10^3 / 1,015 = 44,3 \cdot 10^3 \text{ м} \cdot \text{мм}^2/\text{с} \text{ і т.д.}$$

$$v_{13} = v_{14} \cdot q_{14}/q_{13} = 7 \cdot 6400/7820 = 5,63 \text{ м/с};$$

$$v_{12} = v_{14} \cdot q_{14}/q_{12} = 7 \cdot 6400/10000 = 4,36 \text{ м/с і т.д.}$$

5. За формулою (5.7) визначимо температури по клітках стана ($t_H = 1130^\circ\text{C}$, $t_K = 1060^\circ\text{C}$).

Маємо:

$$K = (1130 - 1060) \cdot 130000 \cdot 6400 / (130000 - 7820) = 47,8 \cdot 10^4;$$

$$t_6 = 1130 + 47,8 \cdot 10^4 / 13 \cdot 10^4 = 1130 + 4 = 1134^\circ\text{C}.$$

Визначаємо температури по клітках:

кліть 13

$$t_{13} = 1134 - 47,8 \cdot 10^4 / 7,82 \cdot 10^3 = 1074^\circ\text{C};$$

кліть 12.

$$t_{12} = 1134 - 47,8 \cdot 10^4 / 10 \cdot 10^3 = 1085^\circ\text{C} \text{ и т.д.}$$

6. По формулах (3.1) і (3.2) визначимо максимальні кути захвату в клітках 1 і 8 чорнової групи (сталеві валки з HSD = 40).

У клітках 9-14 - чавунні валки з твердістю 50 HSD). Тоді ($k_B = 1,15$; $k_M = 1,0$; $k_{CM} = 1,0$; $k_3 = 1,35$):

кліть 1:

$$f_0 = 0,27 - 0,1 (1130 / 400 - 2)^2 = 0,2;$$

$$k_T = 1,0 + 0,43 (1 - 40 / 65)^2 = 1,06;$$

$$k_V = 0,76 + 0,82 (1 - 0,046)^2 = 1,49;$$

$$f = 0,2 \cdot 1,15 \cdot 1,06 \cdot 1,49 = 0,363.$$

При прокатуванні в калібрах їх форма впливає на умови захвату металу. Відповідно до досліджень [8] для ящичних калібрів коефіцієнт впливу форми калібру $n_\Phi = 1,15$, для квадратних калібрів (чистова група) - $n_\Phi = 1,41$ (табл.3.3).

Тоді, коефіцієнт f_3 при захваті рівний:

$$f_3 = f \cdot k_3 \cdot n_\Phi,$$

де k_3 - коефіцієнт, що враховує підвищення тертя при захваті в порівнянні зі сталим процесом.

Коефіцієнт k_3 для клітей 1, 3, 9 рівний: $k_3 = 1,35$ (без заштовхування розкату), для подальших клітей - $k_3 = 1,45$ - з урахуванням впливу заштовхуючої сили від попередніх клітей. Тоді для кліті 1 ($n_\Phi = 1,10$)

$$f = 0,363 \cdot 1,35 \cdot 1,10 = 0,54.$$

Для клітей 2 і 10 цього стана розрахунковий коефіцієнт тертя при захваті рівний $f_3 = 0,60$, для кліті 8 - $f_3 = 0,52$, для кліті 14 - $f_3 = 0,46$ (зменшення коефіцієнта тертя при захваті в кліті 14

обумовлено збільшенням швидкості прокатки). Діаметр валка, який відповідає захвату металу, в ящичних калібрах дорівнює діаметру по дну калібру. У ромбічних і квадратних калібрах (чистова група) захват металу відбувається по вершині калібру, тобто по мінімальному радіусу валка. З урахуванням викладеного обтиснення, що максимально допускається, рівне (мм)[формула (3.14)]:

$$\text{кліть 1, 3} \quad - \Delta h_d = 340 \cdot 0,54^2 = 100;$$

$$\text{кліть 2} \quad - \Delta h_d = 340 \cdot 0,6^2 = 123;$$

$$\text{кліть 8} \quad - \Delta h_d = 260 \cdot 0,55^2 = 78;$$

$$\text{кліть 9} \quad - \Delta h_d = 230 \cdot 0,52^2 = 61;$$

$$\text{кліть 10} \quad - \Delta h_d = 220 \cdot 0,6^2 = 80;$$

$$\text{кліть 14} \quad - \Delta h_d = 245 \cdot 0,46^2 = 53.$$

Для клітей 9, 11, 13 радіус валка по осі ромбічного калібру прийнятий приблизно таким

$$D_{\text{опі}} = D_{\text{окв}} + 10, \text{ мм},$$

де $D_{\text{опі}}$ і $D_{\text{окв}}$ – діаметри по осі відповідно ромбічного і квадратного калібрів..

Діаметр валка по осі квадратного калібру рівний

$$D_{\text{окв}} = D_6 - (1,41c_i - S),$$

де c_i – сторона квадрата; S – зазор між валками.

Діаметр валка декілька збільшується за рахунок закруглення вершин калібру.

Отримані Δh_d є граничними. Фактичні величини обтисень при заданих величинах μ_i обумовлені формозміною металу в калібрах (величинами обтисень і розширень, які заздалегідь невідомі і взаємозв'язані між собою).

У роботі [23] представлений ітераційний метод розрахунку розмірів калібрів для прокатки простих профілів без використання або з використанням ЕОМ. При прокатуванні в якому-небудь калібрі, змінюючи величини розширення і обтиснення, що задаються заздалегідь, на підставі двох розрахунків можна визначити дійсні розміри калібру з умови (2.21) (при розрахунку

по ходу прокатки) або розміри заготовки (при розрахунку проти ходу прокатки). У ящичних калібрах 1-4 розрахунок режиму деформації виконуємо без ітерацій, для того, щоб отримати задані розміри калібру4. Тому в клітках 1-4 режим деформації розраховують задаючи необхідні величини обтиснень, які менше за тих, що допускаються.

Таблиця 5.5 - Попередні параметри прокатки у калібрах НЗС

№ клітки	Форма калібру	D, мм	q, мм ²	μ	t, °C	v, м/с
Чорнова група						
1.	Ящичний прямокутник	680	101500	1,28	1130	0,46
2.	Ящичний прямокутник	680	79300	1,28	1124	0,6
3.	Ящичний прямокутник	680	67800	1,171	1123	0,71
4.	Ящичний квадрат	680	57500	1,181	1121	0,96
5.	Ящичний прямокутник	520	43800	1,312	1119	1,16
6.	Ящичний квадрат	520	36300	1,208	1117	1,46
7.	Ящичний прямокутник	520	28000	1,298	1113	1,84
8.	Ящичний квадрат	520	22500	1,243	1109	2,3
Чистова група						
9.	Ромб	457	18300	1,23	1104	2,3
10.	Квадрат	440	15500	1,187	1099	2,74
11.	Ромб	476	12200	1,267	1090	3,52
12.	Квадрат	466	10000	1,22	1085	4,36
13.	Ромб	490	7820	1,28	1074	5,63
14.	Квадрат	480	6400	1,22	1060	7,0

Незалежно від порядку розрахунку необхідно виконувати коригування розмірів калібрів. Проте при розрахунку по ходу прокатки виконують коригування розмірів калібрів 7 і 13, а при розрахунку проти ходу прокатки – в клітках 1 і 9. Для пропонованого методу розрахунок калібрів здійснимий по ходу прокатки.

Кліть 1. Ящичний прямокутник в горизонтальних валках.

Розміри бльома $H = B = 360$ мм. Умови захвату дозволяють застосувати обтиснення в перших клітках до $\Delta h = 100$ мм. Проте при визначенні обтиснень в одній площині (кліті 1, 2) (рис.4.3) до кантування слід мати увагу на обмеження за умовами стійкості розкату після кантування. Як слідє з практики прокатки, перед кантуванням і при задаванні розкату в наступну кліть (калібр) відношення повинно бути $b/h < 1,75$. Це відношення необхідно витримати перед клітками 3 і 5, де відбувається кантування розкату (рис.4.3). Якщо заздалегідь прийняти в клітках 1,2 обтиснення $\Delta h = 80 + 80 = 160$ мм, а сумарне розширення $\Delta b_{1,2} \approx 20$ мм, то після кліті 2 отримаємо розміри розкату і відношення b/h :

$$h_2 = H_1 - \Delta h_{1,2} = 360 - 160 = 200 \text{ мм};$$

$$b_2 = B_1 + \Delta b_{1,2} = 360 + 20 = 380 \text{ мм},$$

а відношення $b_2/h_2 = 380/200 = 1,90$, що вище за те, що допускається. Тому приймаємо в кліті 1 – $\Delta h = 70$ мм, а в кліті 2 – $\Delta h = 80$ мм (в кліть 2 розкат задається з підпором з кліті 1). Виконуємо розрахунки за відомими формулами, використовуючи данні табл. 5.5.

Визначимо товщину і ширину розкату після кліті 1 (усі параметри, окрім особливих випадків, дані в мм):

$$h_1 = H_1 - \Delta h_1 = 360 - 70 = 290;$$

$$l_d = \sqrt{R \cdot \Delta h} = \sqrt{340 \cdot 70} = 158.$$

Для розрахунку середньої ширини розкату в осередку деформації заздалегідь приймемо розширення $\Delta b_{\Pi} = 15$ мм, що не внесе помітної погрішності в подальших розрахунках:

$$B_{cp} = B_1 + 0,5 \cdot \Delta b_1 = 360 + 7,5 \approx 368; \quad B_{cp}/l_d = 368/158 = 2,33;$$

$$h_{cp} = h + 0,5 \Delta h = 290 + 35 = 325, \quad B_{cp}/h_{cp} = 368/325 = 1,15.$$

Розрахункове розширення по осі калібру визначимо по формулах (2.8) і (2.9) з урахуванням обмеження розширення стінками калібру при $n_{\phi} = 1,15$ і $C_m = 1$ (табл. 2.1; табл. 3.3):

$$C_{\Pi} = e^{-\left(\frac{B_{cp}}{l_d} - 0,9\right)^{0,9}} = e^{-1,43^{0,9}} \approx 0,22.$$

За цією формулою визначаємо коефіцієнт C_p і для наступних калібрів:

$$\Delta b = 0,53 \cdot C_n \cdot C_m \cdot \Delta h \cdot V_{cp} / (h_{cp} \cdot n_\phi). \quad (5.12)$$

$$1/n_\phi = 1/1,15 = 0,87;$$

$$\Delta b = 0,53 \cdot 0,22 \cdot 70 \cdot 1,15 \cdot 0,87 \approx 8 \text{ мм.}$$

Розрахункове розширення не співпадає з прийнятим, але повторного розрахунку робити не слід, оскільки попереднє розширення входить лише у формулу для розрахунку V_{cp} , а уточнення буде незначним. Таким чином після кліті 1 отримали розкат з розмірами:

$$h_1 = 290 \text{ мм}; \quad b_1 = V_1 + \Delta b = 360 + 8 = 368 \text{ мм.}$$

Кліть 2. Ящичний прямокутник в якій задають розкат з $H_2 = h_1 = 290$ мм і $V_2 = b_1 = 368$ мм (без кантування). Маємо (за розрахунком $C_n = 0,16$, $1/n_\phi = 0,87$, $\Delta b = 8$ мм):

$$h_2 = 290 - 80 = 210; \quad V_{cp} = V_2 + 0,5\Delta b = 368 + 4 \approx 371;$$

$$I_d = \sqrt{340 \cdot 80} = 165; \quad V_{cp}/I_d = 37/165 = 2,25;$$

$$V_{cp}/h_{cp} = 371/250 = 1,48; \quad \Delta b = 0,53 \cdot 0,16 \cdot 80 \cdot 1,48 \cdot 0,87 = 8,7 \approx 8.$$

Розміри розкату після кліті 2 рівні:

$$h_2 = 210 \text{ мм}, \quad b_2 = 368 + 8 = 376 \text{ мм.}$$

Кліть 3. Ящичний прямокутник, в якій задають розкат після кантування з розмірами $H_3 = b_2 = 376$ мм, $V_3 = h_2 = 210$ мм. В кліті 4 повинні отримати розкат у вигляді квадрата 240×240 мм (див. вище). Тому сумарне обтиснення по висоті в клітках 3, 4 має бути рівне:

$$\Delta h_{3,4} = H_3 - h_4 = 376 - 240 = 136 \text{ мм.}$$

Приймаємо (спираючись на практику) $\Delta h_3 = 66$ мм, $\Delta h_4 = 70$ мм і робимо розрахунок інших параметрів (заздалегідь орієнтовно приймаємо $\Delta b_n = 14$ мм, а за розрахунком коефіцієнт $C_n = 0,4$):

$$h_3 = H_3 - \Delta h_3 = 376 - 66 = 310; \quad V_{cp} = 210 + 7 = 217;$$

$$I_d = \sqrt{340 \cdot 60} = 150; \quad V_{cp}/I_d = 217/150 = 1,44;$$

$$V_{cp}/h_{cp} = 217/345 = 0,63; \quad \Delta b = 0,53 \cdot 0,4 \cdot 66 \cdot 0,63 \cdot 0,87 = 7,7 \approx 8.$$

При такому розширенні не буде повного заповнення калібру. Проте для калібрів цієї системи не має значення.

Ширину самого калібру в кінцевому виді можна визначати з урахуванням фактичного розширення. Крім того виключається вихід металу в проміжки і утворення задирки (лампаса).

Розміри розкату після кліті 3:

$$h_3 = 310 \text{ мм}, \quad b_3 = 210 + 8 = 218 \text{ мм}.$$

Кліть 4. Ящичний квадрат, в який заходить розкат з розмірами : $H_4 = h_3 = 310 \text{ мм}$ і $V_4 = b_3 = 218 \text{ мм}$. Обтиснення у кліті $\Delta h_4 = 70 \text{ мм}$. Тоді ($\Delta b_n = 8 \text{ мм}$ і за розрахунком масо $C_n = 0,4$):

$$h_4 = 310 - 70 = 240; \quad V_{cp} = 218 + 8 = 226;$$

$$l_d = \sqrt{340 \cdot 70} = 154; \quad V_{cp}/l_d = 226/154 = 1,46;$$

$$V_{cp}/h_{cp} = 226/275 = 0,82; \quad \Delta b = 0,53 \cdot 0,4 \cdot 70 \cdot 0,82 \cdot 0,87 = 10 \text{ мм}.$$

Розміри розкату після кліті 4 такі:

$$h_4 = 240 \text{ мм}, \quad b_4 = 218 + 10 = 228 \text{ мм}.$$

Як виходить з розрахунку висота розкату відповідає заданій ($h_4 = 240 \text{ мм}$), а ширина рівна $b_4 = 228 \text{ мм}$, що на 12 мм менше за задану (240 мм). Ця невідповідність вийшла внаслідок відмінності розрахункового розширення від пропонованого перед розрахунком. Оскільки ширина b_4 менше прийнятого раніше розміру $b_4' = 240 \text{ мм}$, то перерахунок не потрібен. Коригування режиму деформації може бути виконано в процесі прокатки. Починаючи з кліті 5, розрахунок розмірів калібрів виконуємо з використанням ітераційного процесу, оскільки необхідно отримати точні розміри заготовки. Проте це не виключає невідповідність розрахункових і заданих розмірів проміжних калібрів (заготовок).

Кліть 5B. Ящичний прямокутник, в який входить заготовка з розмірами після кантування : $H_5 = b_4 = 228 \text{ мм}$, $V_5 = h_4 = 240 \text{ мм}$. Приймаємо заздалегідь $\Delta b_n = 9 \text{ мм}$.

Тоді (за розрахунком $C_n = 0,22$, $n_\phi = 1,15$):

$$b_5 = V_5 + \Delta b_n = 240 + 9 = 249; \quad h_5 = q_5/b_5 = 43800/249 = 176;$$

$$\Delta h = H_5 - h_5 = 228 - 176 = 52; \quad l_d = \sqrt{260 \cdot 52} = 116;$$

$$V_{cp} = 0,5 (b + B) = 0,5 (240 + 249) \approx 245; \quad V_{cp}/l_d = 245/116 = 2,12;$$

$$V_{cp}/h_{cp} = 245/0,5 (H + h) = 245/202 = 1,21;$$

$$\Delta b = 0,53 \cdot 0,22 \cdot 52 \cdot 1,21 \cdot 0,87 = 6,3 \text{ мм.}$$

Оскільки $\Delta b \neq \Delta b_n$, виконуємо повторний розрахунок при $\Delta b_n = 6$ мм. Маємо:

$$b_5 = 240 + 6 = 246; \quad h_5 = 43800/246 = 178;$$

$$\Delta h = 228 - 178 = 50; \quad l_d = \sqrt{260 \cdot 50} = 114;$$

$$V_{cp}/l_d = 243/114 = 2,13; \quad V_{cp}/h_{cp} = 243/203 = 1,2;$$

$$\Delta b = 0,53 \cdot 0,22 \cdot 0,87 \cdot 50 \cdot 1,2 = 6,0.$$

Отже, $\Delta b_n = \Delta b = \Delta b_d = 6,0$ мм. Розміри заготовки: $b_5 = 246$ мм; $h_5 = 178$ мм.

Квіт 6. Ящичний квадрат в який входять заготовка з розмірами після кантування: $H_6 = b_5 = 246$ мм, $B_6 = h_5 = 178$ мм. Розміри ящичного квадратного калібру рівні $h_6 = b_6 = 190$ мм. Маємо $\Delta b_n = 8$ мм, з розрахунку маємо $C_n \approx 0,37$:

$$\Delta h_6 = H_6 - h_6 = 246 - 190 = 56 \text{ мм}; \quad l_d = \sqrt{260 \cdot 56} = 121;$$

$$V_{cp}/l_d = 186/121 = 1,52; \quad V_{cp}/h_{cp} = 186/218 = 0,91;$$

$$\Delta b = 0,53 \cdot 0,37 \cdot 56 \cdot 0,91 \cdot 0,87 = 8,6.$$

Приймаємо $\Delta b_n = 10$ мм. Тоді:

$$b_6 = B_6 + \Delta b_n = 178 + 10 = 188; \quad h_6 = q/b_6 = 36300/188 = 193;$$

$$\Delta h = 246 - 193 = 53 \text{ мм}; \quad l_d = \sqrt{260 \cdot 53} = 118;$$

$$V_{cp} = 183; \quad V_{cp}/l_d = 183/118 = 1,55; \quad V_{cp}/h_{cp} = 183/219,5 = 0,84;$$

$$\Delta b = 0,53 \cdot 0,37 \cdot 53 \cdot 0,84 \cdot 0,87 = 7,6.$$

Дійсне розширення по формулі (2.24) рівне:

$$\Delta b_d = 8,6 + (7,6 - 8,6) (1 - 0,72) / (1,06 - 0,86) \approx 7,0 \text{ мм.}$$

Розміри ящичного квадрата:

$$b_6 = 178 + 7 = 185 \text{ мм}, \quad h_6 = 36300/185 = 196 \text{ мм.}$$

Попри те, що задані заздалегідь розміри квадрата не отримані ($h_6 = b_6 = 190$ мм) продовжимо розрахунок. Необхідні розміри квадратної заготовки отримують шляхом коригування величин обтиснень в попередніх клітях.

Кліть 7В. Ящичний прямокутник, в який входить заготовка з розмірами: $H_7 = b_6 = 185$ мм, $B_7 = h_6 = 196$ мм, $\Delta b_n = 8$ мм. Маємо (з розрахунку маємо $C_n = 0,27$, $n_\phi = 1,15$):

$$\begin{aligned} b_7 &= 196 + 8 = 204; & h_7 &= 28000/204 = 137; \\ \Delta h &= 185 - 137 = 48; & l_d &= \sqrt{260 \cdot 48} = 112; & V_{cp} &= 200; \\ V_{cp}/l_d &= 200/112 = 1,79; & V_{cp}/h_{cp} &= 200/161 = 1,25. \\ \Delta b &= 0,53 \cdot 0,27 \cdot 48 \cdot 1,25 \cdot 0,87 = 7,5. \end{aligned}$$

Оскільки відмінність між Δb_n та Δb невелика, приймаємо $\Delta b_d = 8$ мм. Тоді: $b_7 = 196 + 8 = 204$ мм, $h_7 = 137$ мм.

Кліть 8. Ящичний квадрат с $h_8 = 150$, в який входить заготовка с розмірами: $H_8 = b_7 = 204$ мм; $B_8 = h_7 = 137$ мм. З розрахунку маємо $C_n = 0,55$. Абсолютне обтиснення в калібрі і інші параметри дорівнюють:

$$\begin{aligned} \Delta h_8 &= H_8 - h_8 = 204 - 150 = 54 \text{ мм.} \\ l_d &= \sqrt{275 \cdot 54} = 122; & V_{cp} &= 143; \\ V_{cp}/l_d &= 143/122 = 1,17; & V_{cp}/h_{cp} &= 143/177 = 0,81; \\ \Delta b &= 0,53 \cdot 0,55 \cdot 54 \cdot 0,81 \cdot 0,87 = 11. \end{aligned}$$

Розміри профілю: $b_8 = 137 + 11 = 148$ мм; $h_8 = 150$ мм.

В результаті розрахунку не отримані точні розміри ящичних квадратних калібрів. Задані розміри квадратних профілів забезпечуються шляхом коригування коефіцієнтів витягання в калібрах. Наприклад, для того, щоб отримати в кліті 8 квадрат 150×150 слід зменшити величину обтиснення в калібрі кліті 7 на величину $\Delta h = 2$ мм. Тоді отримаємо $h_7 = 139$ мм, а в кліті 8 після кантування і прокатки матимемо $h_8 = h_7 (B_8) + \Delta h_8 = 139 + 11 = 150$ мм.

**Переходимо до розрахунку розмірів калібрів
чистої групи**

Кліть 9В. Ромбічний калібр, в який входить квадратна заготовка з розмірами по конструкційних точках (без урахування закруглень вершин): $H_9 = B_9 = 1,41 \cdot 150 = 211$ мм. Квадратну заготовку задають в ромбічний калібр на ребро. При розрахунку розмірів калібрів використовуємо формули розділів 1 і 2. Оскільки при розрахунку цих калібрів мають бути отримані точні розміри, то розглянутий для чорнової групи метод тут не підходить. Тому використовуємо метод ітерацій, суть якого буде ясна з прикладів розрахунку. Заздалегідь приймаємо простір на середнє розширення по осі калібру $\Delta b_n = 10$ мм. Розрахунок виконуємо по конструкційних точках і середніх розмірах заготовки і калібру, коефіцієнт $n = 0,5$ (см розділ 1).

За даними табл.1.2 середня величина обтиснення в системі ромб-квадрат рівна

$$\Delta h_k = n_k \cdot \Delta h = 0,63 \Delta h$$

де Δh – абсолютне обтиснення по осі калібру, а середня ширина розкату в осередку деформації рівна $V_{cp} = 0,83 b$.

Робимо розрахунок параметрів деформації в калібрі 9 (усі розміри, окрім особливих випадків, дані в мм). Приймаємо $S = 8$ мм, тоді:

$$\begin{aligned} b &= B + \Delta b = 211 + 10 = 221; & h &= q/0,5b = 36600/221 = 166; \\ \Delta h &= H - h = 211 - 166 = 45; & \Delta h_{cp} &= \Delta h_k = 0,63 \cdot \Delta h = 0,63 \cdot 45 = 28,4; \\ h'_{cp} &= 0,5 h = 0,5 \cdot 166 = 83; & h_{cp} &= h'_{cp} + 0,5 \Delta h_{cp} = 83 + 14,2 = 97,2; \\ D &= D_6 - (h'_{cp} - S) = 530 - (83 - 8) = 445 \text{ мм}; \\ l_d &= \sqrt{R \cdot \Delta h_{cp}} = \sqrt{225,5 \cdot 28,4} = 80; & V_{cp} &= 0,83 \cdot b = 0,83 \cdot 221 = 183; \\ V_{cp}/l_d &= 183/80 = 2,29; & V_{cp}/h_{cp} &= 183/97,2 = 1,88, \end{aligned}$$

де h'_{cp} – середня товщина профілю після прокатки;

h_{cp} – середня товщина розкату в калібрі.

Для розрахунку розширення в калібрах чистої групи використовуємо формули (2.8), (2.9) і (5.12). При прокатуванні в простих калібрах НЗС з параметром форми осередку деформації $l_d/h_{cp} < 2$ вплив тертя на напружений стан металу малий, а вплив

форми калібру на розширення значне і вплив його на розширення може бути врахований коефіцієнтом форми (для ромба $n_\phi=1,15$), тоді з формули (2.9) і рис.2.2 отримаємо:

$$C_{II} = e^{-\left(\frac{B_{cp}}{l_d} - 0,9\right)^{0,9}} = e^{-1,39^{0,9}} \approx 0,2.$$

$$\Delta b = 0,53 \cdot C_n \cdot C_m \cdot \Delta h_{cp} \cdot V_{cp} / (h_{cp} \cdot n_\phi) = 0,53 \cdot 0,2 \cdot 28,4 \cdot 1,88 \cdot 0,87 \approx 4,5.$$

По формулі (5.12) отримали середнє розширення в калібрі. Лінійне розширення по осі калібру визначимо по формулах (2.20), (2.21) і табл.2.2:

$$\Delta b'_0 = \Delta b' / 0,5 = 4,5 / 0,5 = 9;$$

Оскільки $\Delta b'_n > \Delta b'_0$, то слід зменшити простір на розширення. Приймаємо $\Delta b_n = 5$ мм і робимо повторний розрахунок:

$$\begin{aligned} b &= 211 + 5 = 216; & h &= 36600/210 = 170; \\ \Delta h &= 211 - 170 = 41; & \Delta h_{cp} &= 0,63 \cdot 41 = 24,8; \\ h'_{cp} &= 0,5 \cdot 170 = 85; & h_{cp} &= 85 + 12,4 = 97,4; \\ D &= 530 - (85 - 8) = 453; & l_d &= \sqrt{226,5 \cdot 24,8} = 75; \\ V_{cp} &= 0,83 \cdot 216 = 180; & V_{cp}/l_d &= 180/75 = 2,4; \\ & & V_{cp}/h_{cp} &= 180/97,4 = 1,85. \end{aligned}$$

$$\text{З розрахунку маємо } C_n = 0,20; \quad m = 24,8 \cdot 1,85 = 46,0;$$

$$\Delta b'' = 0,53 \cdot 0,2 \cdot 46 \cdot 0,87 = 4,2; \quad \Delta b''_0 = 4,2 / 0,5 = 8,4.$$

За даними розрахунку з формули (2.21) дійсне розширення рівне $\Delta b_d = 8$ мм. Розміри калібру:

$$b_9 = 211 + 8 = 219 \text{ мм}; \quad h_9 = 36600/219 = 167 \text{ мм}.$$

Кліть 10. Квадратний калібр із стороною $s_{10} = 125$ мм і діагоналями $h_{10} = b_{10} = 176$ мм, в який входить ромбічна заготовка з розмірами після кантування на 90° : $H_{10} = b_9 = 219$ мм, $V_{10} = h_9 = 167$ мм. Простір на розширення дорівнює

$\Delta b'_n = 176 - 167 = 9$ мм Абсолютне обтиснення в калібрі рівне ($n_\phi = 1,41$, $1/n_\phi = 0,71$, розрахункове значення $C_n = 0,26$):

$$\begin{aligned} \Delta h &= 219 - 176 = 43; \quad \Delta h_{cp} = 0,63 \cdot 43 = 27,1; \\ h'_{cp} &= 0,5 \cdot 176 = 88; \quad h_{cp} = 88 + 13,55 = 101,6; \\ D &= 530 - (88 - 8) = 450; \quad l_d = \sqrt{225 \cdot 27,1} = 78; \\ V_{cp} &= 0,83 \cdot 176 = 146; \quad V_{cp}/l_d = 146/78 = 1,87; \\ V_{cp}/h_{cp} &= 146/101,6 = 1,43; \quad m = 27,1 \cdot 1,43 = 38,8; \\ \Delta b' &= 0,53 \cdot 0,26 \cdot 38,8 \cdot 0,71 = 3,8; \quad \Delta b'_0 = 7,6 \text{ мм.} \end{aligned}$$

Оскільки $\Delta b'_n > \Delta b'_0$, то відповідно до логіки розрахунку, необхідно зменшити Δb_n шляхом зменшення розмірів квадрата. Приймаємо $\Delta b''_n = 7$ мм ($\Delta b''_n < \Delta b'_0$) і робимо другий розрахунок:

$$\begin{aligned} b &= 167 + 7 = 174; \quad h = b = 174; \quad q_{10} = 15150 \text{ мм}^2; \\ \Delta h &= 219 - 174 = 45; \quad \Delta h_{cp} = 0,63 \cdot 45 = 28,3; \\ h'_{cp} &= 0,5 \cdot 174 = 87; \quad h_{cp} = 87 + 14,15 = 101,1; \\ D &= 530 - (87 - 8) = 451; \quad l_d = \sqrt{225,5 \cdot 28,3} = 79,5; \\ V_{cp} &= 0,83 \cdot 174 = 144; \quad V_{cp}/l_d = 144/79,5 = 1,81; \\ V_{cp}/h_{cp} &= 144/101,1 = 1,42; \quad m = 28,3 \cdot 1,42 = 40. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{З розрахунку } C_n &= 0,26; \quad \Delta b'' = 0,53 \cdot 0,26 \cdot 40 \cdot 0,71 = 3,92; \\ \Delta b''_0 &= 3,92/0,5 = 7,84. \end{aligned}$$

Оскільки $\Delta b''_0 \approx 8$ мм, то розміри калібру будуть рівні

$$b_{10} = 167 + 8 = 175 \text{ мм}; \quad h = 15150/175 \cdot 0,5 = 173 \text{ мм.}$$

З достатньою для практики точністю приймаємо $h_{10} = b_{10} = 174$ мм.

Кліть 11В. Ромбічний калібр, врізаний у вертикальні валки. У калібр входить квадратна заготовка з розмірами: $H_{11} = 174$ мм; $V_{11} = 174$ мм. Приймаємо простір на розширення ($\Delta b_n = 7$ мм:

$$\begin{aligned} b_{11} &= 174 + 7 = 181; \quad h_{11} = 12200/0,5 \cdot 181 = 135; \\ \Delta h &= 174 - 135 = 39; \quad \Delta h_{cp} = 0,63 \cdot 39 = 24,6; \\ h'_{cp} &= 0,5 \cdot 135 = 67,5; \quad h_{cp} = 67,5 + 12,3 = 79,8; \\ D &= 530 - (77 - 8) = 461; \quad l_d = \sqrt{230,5 \cdot 24,6} = 75,2; \\ V_{cp} &= 0,83 \cdot 181 = 150; \quad V_{cp}/l_d = 150/75,2 = 2,0; \\ V_{cp}/h_{cp} &= 150/79,8 = 1,88; \quad m = 24,6 \cdot 1,88 = 46,2; \\ C_n &= 0,280; \quad \Delta b' = 0,53 \cdot 0,28 \cdot 46,2 \cdot 0,87 = 6,2; \\ \Delta b'_0 &= 6,2/0,5 = 12,4. \end{aligned}$$

Оскільки $\Delta b'_n < \Delta b'_0$, то слід збільшити простір на розширення до $\Delta b''_n = 16$ мм. Отримаємо в другому розрахунку:

$$\begin{aligned} b_{11} &= 174 + 16 = 190; & h_{11} &= 12200/0,5 \cdot 190 = 128; \\ \Delta h &= 174 - 128 = 46; & \Delta h_{cp} &= 0,63 \cdot 46 = 29,4; \\ h'_{cp} &= 0,5 \cdot 128 = 64; & h_{cp} &= 64 + 14,7 = 78,7; \\ D &= 530 - (64 - 8) = 474; & l_d &= \sqrt{237 \cdot 29,4} = 83,2; \\ V_{cp} &= 0,83 \cdot 190 = 158; & V_{cp}/l_d &= 158/83,2 = 1,9; \\ V_{cp}/h_{cp} &= 158/78,7 = 2,0; & m &= 29,4 \cdot 2,0 = 58,8; \\ C_n &= 0,240; & \Delta b'' &= 0,53 \cdot 0,240 \cdot 58,8 \cdot 0,87 = 6,5 \text{ и} \\ & & \Delta b_d &\approx 13 \text{ мм.} \end{aligned}$$

Розміри калібра:

$$b_{11} = 174 + 13 = 187 \text{ мм; } h_{11} = 12200/0,5 \cdot 187 = 130 \text{ мм.}$$

Кліть 12. Квадратний калібр із стороною $s_{12} = 100$ мм і діагоналями по конструкційних точках, рівними: $h_{12} = b_{12} = 1,41 \cdot 100 = 141$ мм. В цей калібр входить ромбічна заготовка з розмірами після кантування на 90° : $H_{12} = b_{11} = 187$ мм; $V_{12} = h_{11} = 130$ мм. Робимо розрахунок при $\Delta b'_n = 141 - 130 = 11$ мм:

$$\begin{aligned} b_{12} &= h_{12} = 141; & \Delta h &= 187 - 141 = 46; \\ \Delta h_{cp} &= 0,63 \cdot 46 = 29; & h'_{cp} &= 0,5 \cdot 141 = 70,5; \\ h_{cp} &= 70,5 + 14,5 = 85; & D &= 530 - (70,5 - 8) = 468; \\ l_d &= \sqrt{234 \cdot 29} = 83; & V_{cp} &= 0,83 \cdot 141 = 117; \\ V_{cp}/l_d &= 117/83 = 1,41; & V_{cp}/h_{cp} &= 117/85 = 1,37; \\ C_n &= 0,4; & m &= 29 \cdot 1,37 = 40; \\ \Delta b' &= 0,53 \cdot 0,4 \cdot 40 \cdot 0,71 = 6,0; & \Delta b'_0 &= 6,0/0,5 = 13. \end{aligned}$$

Оскільки $\Delta b'_n < \Delta b'_0$, то виконаємо другий розрахунок при $\Delta b_n = 14$ мм. Це викликає при постійних розмірах заготовки, необхідність збільшення розмірів квадратного калібру до $b_{12} = h_{12} = V_{12} + \Delta b''_n = 130 + 14 = 144$ мм (по діагоналі).

Тоді:

$$\begin{aligned} \Delta h &= 187 - 144 = 43; & \Delta h_{cp} &= 0,63 \cdot 43 = 27; \\ h'_{cp} &= 0,5 \cdot 144 = 72; & h_{cp} &= 72 + 13,5 = 85,5; \\ D &= 530 - (72 - 8) = 466; & l_d &= \sqrt{233 \cdot 27} = 80; \\ V_{cp} &= 0,83 \cdot 144 = 120; & V_{cp}/l_d &= 120/80 = 1,5; \\ V_{cp}/h_{cp} &= 120/85,5 = 1,41; & m &= 27 \cdot 1,41 = 38,1; \end{aligned}$$

$$C_n = 0,355; \quad \Delta b'' = 0,53 \cdot 0,355 \cdot 38,1 \cdot 0,71 = 5,2;$$

$$\Delta b''_0 = 5,2/0,5 = 10,4 \text{ мм.}$$

Дійсне розширення рівне

$$\Delta b_d = 13 + (10,4 - 13)(1 - 1,18)/(0,68 - 1,18) \approx 11,0.$$

Відповідно до повторного розрахунку отримане значення Δb_d рівне $\Delta b'_d \approx 11$ мм. У зв'язку з цим залишаємо первинні розміри квадратного калібру: $b_{12} = h_{12} = 141$ мм.

Кліть 13В. Ромбічний калібр, в який входить квадратна заготовка з $H_{13} = 141$ мм, $B_{13} = 141$ мм. Приймаємо $\Delta b'_n = 10$ мм:

$$b_{13} = 7800/0,5 \cdot 151 = 103;$$

$$\Delta h = 141 - 103 = 38;$$

$$\Delta h_{cp} = 0,63 \cdot 38 = 23,9;$$

$$h'_{cp} = 0,5 \cdot 103 = 38;$$

$$h_{cp} = 51,5 + 11,95 = 63,4;$$

$$D = 530 - (515 - 8) = 486;$$

$$l_d = \sqrt{242 \cdot 23,9} = 76,6;$$

$$B_{cp} = 0,83 \cdot 151 = 125;$$

$$B_{cp}/l_d = 125/76,6 = 1,63;$$

$$B_{cp}/h_{cp} = 125/63,4 = 1,97;$$

$$m = 23,9 \cdot 1,97 = 47,0;$$

$$C_n = 0,355;$$

$$\Delta b' = 0,53 \cdot 0,355 \cdot 47 \cdot 0,87 = 7,7;$$

$$\Delta b'_0 = 7,7/0,5 = 15,4.$$

Оскільки $\Delta b'_n < \Delta b'_0$, то виконуємо другий розрахунок при $\Delta b''_n = 17$ мм:

$$b_{13} = 141 + 17 = 158;$$

$$h_{13} = 7800/0,5 \cdot 158 = 99 \text{ мм};$$

$$\Delta h = 141 - 99 = 42;$$

$$\Delta h_{cp} = 0,63 \cdot 42 = 26,5;$$

$$h'_{cp} = 0,5 \cdot 99 = 49,5;$$

$$h_{cp} = 49,5 + 13,25 = 62,4;$$

$$D = 530 - (49,5 - 8) = 488;$$

$$l_d = \sqrt{244 \cdot 26,5} = 80,8;$$

$$B_{cp} = 0,83 \cdot 158 = 131;$$

$$B_{cp}/l_d = 131/80,8 = 1,62;$$

$$B_{cp}/h_{cp} = 131/62,4 = 2,09;$$

$$m = 26,5 \cdot 2,09 = 55,3;$$

$$C_n = 0,355; \quad \Delta b'' = 0,53 \cdot 0,355 \cdot 55,3 \cdot 0,87 = 9,1;$$

$$\Delta b''_0 = 9,1/0,5 = 18,2.$$

$$\Delta b_d = 15,4 + (18,2 - 15,4)(1 - 1,54)/(1,07 - 1,54) \approx 18,0.$$

Розміри калібру:

$$b_{13} = 141 + 18 = 159 \text{ мм}; \quad h_{13} = 7800/0,5 \cdot 159 = 98 \text{ мм.}$$

Кліть 14. Квадратний калібр з розмірами $c_{14} = 80$ мм і діагоналями $h_{14} = b_{14} = 141 \cdot 80 = 113$ мм. В цей калібр входить ромбічна заготовка з розмірами після кантування на 90° : $H_{14} = 159$ мм, $B_{14} = 98$ мм, при $\Delta b'_n = 15$ мм:

$$\Delta h = 159 - 113 = 46;$$

$$h'_{cp} = 0,5 \cdot 113 = 56,5;$$

$$D = 530 - (71 - 7) = 446;$$

$$B_{cp} = 0,83 \cdot 113 = 94;$$

$$B_{cp}/h_{cp} = 94/71 = 1,32;$$

$$\Delta h_{cp} = 0,63 \cdot 46 = 29,0;$$

$$h_{cp} = 56,5 + 14,5 = 71;$$

$$l_d = \sqrt{233 \cdot 29} = 82,2;$$

$$B_{cp}/l_d = 94/82,2 = 1,14;$$

$$m = 29 \cdot 1,32 = 38,4;$$

Таблиця 5.6 - Параметри прокатки в чорновій і чистовій групах НЗС

№ кліті	Сторона обтиснення	Параметри режиму деформації					
		H, мм	B, мм	h, мм	b, мм	Δh , мм	Δb , мм
1	Ящичний прямокутник	360	360	290	366	70	6
2	Ящичний прямокутник	290	366	210	376	80	10
3В	Ящичний прямокутник	376	210	310	218	66	8
4	Ящичний квадрат	310	218	240	228	70	10
5В	Ящичний прямокутник	228	240	178	246	50	6
6	Ящичний квадрат	246	178	196	185	53	7
7В	Ящичний прямокутник	185	196	137	204	48	8
8	Ящичний квадрат	204	137	150	148	54	11
9В	Ромб	211	211	167	219	44	8
10	Квадрат	219	167	173	175	46	8
11В	Ромб	173	173	130	187	45	14
12	Квадрат	187	130	141	141	46	11
13В	Ромб	141	141	98	159	43	18
14	Квадрат	159	98	115	115	44	17

$$C_{II} = 0,58;$$

$$\Delta b' = 0,53 \cdot 0,58 \cdot 38,4 \cdot 0,71 = 8,4;$$

$$\Delta b'_0 = 8,4/0,5 = 16,8.$$

Оскільки $\Delta b'_n < \Delta b'_0$, то виконуємо другий розрахунок при $\Delta b''_n = 17$ мм: Розміри квадратного калібру рівні: $b_{14} = 98 + 17 = 115$ мм; $h_{14} = b_{14} = 115$ мм.

Інші параметри ($q_{14} = 6620$ мм²):

$$\Delta h = 159 - 115 = 44;$$

$$\Delta h_{cp} = 0,63 \cdot 44 = 27,7;$$

$$h'_{cp} = 0,5 \cdot 115 = 57,5;$$

$$h_{cp} = 57,5 + 13,85 = 71,3;$$

$$D = 530 - (57,5 - 7) = 480;$$

$$l_d = \sqrt{240 \cdot 27,7} = 82;$$

$$V_{cp} = 0,83 \cdot 115 = 96;$$

$$V_{cp}/l_d = 96/82 = 1,17;$$

$$V_{cp}/h_{cp} = 96/71,3 = 1,34;$$

$$m = 27,7 \cdot 1,34 = 37,2;$$

$$C_{II} = 0,57;$$

$$\Delta b'' = 0,53 \cdot 0,57 \cdot 37,2 \cdot 0,71 = 8,0;$$

$$\Delta b'_0 = 8/0,5 = 16;$$

$$\Delta b_d = 16,8 + (16 - 16,8)(1 - 1,12)/(0,94 - 1,12) \approx 16,0.$$

Розмір чистового калібру при $\Delta b_d = 16$ мм: $b_{14} = 98 + 16 = 114$ мм, $h_{14} = 6620/0,5 \cdot 114 = 116$ мм. З практичною точністю приймаємо $b_{14} = h_{14} = 115$ мм ($c = 81,5$ мм).

Розміри квадрата з $h_{14} = b_{14} = 113$ і $c = 80$ мм досягаються шляхом коригування розмірів попередніх калібрів.