

2.3 Формули для розрахунку розширення в калібрах

Неодмінною умовою визначення розрахункових розмірів калібру будь-якої форми є розрахунок розширення металу. Формули (2.1) - (2.3), (2.8) придатні лише для розрахунку розширення в гладких валках (на гладкій бочці). При прокатуванні в калібрах визначення розширення ускладнюється.

Метал, що деформується, зустрічаючи на своєму шляху бічні стінки калібру з діаметром валків, що змінюється, вимушений набувати форми, що утворюється калібром. У подібних умовах розкат отримує сковане (обмежене або вимушене) розширення.

Наприклад, при прокатуванні в ящичному калібрі (рис. 1.3) горизонтальна сила від похилих стінок порушує природну течію металу, обмежує розширення і збільшує подовжнє витягання металу. Обмежене розширення в цьому випадку дещо менше за вільне, причому найбільше стиснення випробовують ділянки профілю, що знаходяться в найвужчих місцях калібру (у дна калібру). Умови деформації в середній частині калібру наближаються до вільного.

Внаслідок опору течії металу в місцях калібру, розташованих у дна, середнє розширення менше, ніж в гладких валках. Міра обмеження розширення залежатиме від міри стиснення металу $\delta_0 = B/b_d$. У практичних умовах параметр $\delta_0 = 0,99 \dots 1,01$. Ще більше обмеження існує при прокатуванні розкатів в квадратних, ромбічних і круглих калібрах, що також пояснюється стримуючим впливом похилих стінок калібрів. Проте, разом з цим, наявність похилих стінок калібрів сприяє збільшенню подовжнього напруження σ_z , що підпирає і, отже, підвищенню значень розширення. Результуюче розширення визначатиметься мірою впливу похилих стінок калібру на поперечний і подовжній опір течії металу.

Завданням калібрування є визначення розрахунковим методом таких розмірів заготовки (при відомих розмірах калібрів або навпаки), які б забезпечили при деформації металу із заданою висотою заплановане заповнення калібру по ширині без виходу його в проміжок.

Розробці методів розрахунку розширення в калібрах присвячені роботи [1,3,5,6,9-11,13,14,16,17,24]. Серед них існують прості і складні методи розрахунку. Так, в роботі [5] пропонується враховувати вплив форми калібру на розширення в калібрах поправочним коефіцієнтом, який входить в якості складової (множника) в одну з формул для розрахунку розширення при прокатуванні в гладких валках

$$k_\phi = [\cos(\alpha + \gamma)/2 - \sin(\alpha + \gamma)/2f] / (\cos \theta \pm \sin \theta/f),$$

де γ – кут критичного перерізу в осередку деформації ;

θ – середній кут нахилу стінок калібру.

Знак плюс відноситься до калібрів увігнутої форми (квадрат, ромб, овал і тому подібне), знак мінус – до калібрів з опуклою формою. У приведеній формулі чисельником враховується кривизна поверхні осередку деформації і розмір зони випередження, а знаменником – величина кута нахилу стінок калібру.

При прокатуванні в калібрах приріст ширини по осі розкату не може бути мірою поперечної деформації по усій його висоті. Тому автори [5,6,10,11] вважають, що об'єктивною

характеристикою поперечної течії металу є відношення величини зміщеного об'єму в поперечному напрямі до усього зміщеного об'єму в процесі деформації. Відповідно до цього коефіцієнт поперечної деформації визначається формулою

$$C_y = \Delta F_y / \Delta F,$$

де ΔF_y – приріст площі поперечного перерізу готового профілю за рахунок розширення; ΔF – повна зміщена при прокатуванні площа перерізу профілю.

Для визначення коефіцієнта C_y в роботі [10] виконані дослідження по встановленню залежностей C_y від різних технологічних чинників. Отримані залежності апроксимовані функціями виду (прокатка квадратного профілю в овальному калібрі)

$$C_y = 1 / (1 + \{A \cdot H \cdot h (H + \Delta h) [1 + 12,5A(\Delta h / R_{обр})^3] / \Delta h \cdot h (4H + D)\}),$$

де A – коефіцієнт, залежний від матеріалу профілю, температури і умов тертя; $R_{обр}$ – радіус овольного калібру.

Аналогічні залежності отримані і для інших систем калібрів. Потім розраховують площу ΔF_y і по спеціальних формулах розміри калібрів. Для кожної системи калібрів пропонується своя методика розрахунку коефіцієнта C_y і їх розмірів. Автори [6] для розрахунку розширення у витяжних простих калібрах пропонують використати в якості базової формулу Е. Зибеля:

$$\Delta b = c \cdot \frac{\Delta h}{H} \sqrt{R \cdot \Delta h}.$$

Проте числовий коефіцієнт «с» має бути визначений для кожного конкретного випадку формозміни по спеціальній формулі, що враховує різний характер течії металу в окремих зонах по довжині осередку деформації. У результаті автори [6] отримали наступну формулу для розрахунку розширення

$$\Delta b = 1,41 \cdot \theta \cdot h(\eta_0 - 1) \sqrt{(D/h - 1) \cdot (\eta_0 - 1) / \eta_0},$$

де θ – коефіцієнт, що враховує умови деформації металу в калібрах різних форм; η_0 – коефіцієнт висотної деформації ($\eta_0 = H/h$).

Після перетворень формула прийме вид

$$\Delta b = 2 \cdot \theta \cdot \frac{\Delta h}{H} \sqrt{(R - \frac{h}{2}) \Delta h},$$

яка схожа на формулу Е. Зибеля. Коефіцієнт θ за даними [6] рівний $\theta = \Delta b / \Delta h$ і визначається ітераційним методом залежно від розмірів зон випередження і відставання.

Вказані формули придатні в основному при $V_{cp} / l_d \approx 1$

Зручніші формули для розрахунку розширення в калібрах систем ромб-квадрат, овал - квадрат і овал - ребровий овал запропоновані М.С. Мутьєвим [11]. Так, для розрахунку розширення по осі калібрів системи ромб - квадрат отримані наступні формули (відповідно для ромба і квадрата):

$$\Delta b_p = \left(0,2 + 0,08 \frac{l_d}{B_{cp}} \right) \frac{b}{H} \cdot \Delta h,$$

$$\Delta b_k = \left(0,2 + 0,12 \frac{l_d}{B_{cp}} \right) \frac{b}{H} \cdot \Delta h,$$

де Δh – обтиснення по осі калібру; B_{cp} – середня ширина профілю в осередку деформації – $B_{cp} = 0,5(B + b)$; l_d – середня довжина дуги контакту.

2.4 Розрахунок розширення в калібрах за експериментальними даними

Вище відмічали, що комплексним параметром для оцінки умов деформації в гладких валках являється параметр (див. формулу 2.8)

$$m = \Delta h \cdot V_{cp} / h_{cp}. \quad (2.12)$$

Цей же параметр може бути використаний для отримання залежностей $\Delta b = \Phi(m)$ для калібрів простої форми. Дослідні величини розширення по осі калібру приймали з даних Г. Цоухара [12] для систем калібрів : квадрат-ромб, ромб-ромб, квадрат-овал, круг-овал. При отриманні залежностей $m = \Phi(m)$ усі дослідні величини Δb при різних параметрах V_{cp}/l_d приводили до постійного $V_{cp}/l_d \approx 0,8$, при якому поправочний коефіцієнт C_{II} дорівнює $C_{II} = 1,0$ (рис.2.2). Отримані таким чином залежності представлені на рис.2.3 і, окрім одного випадку (крива 4), мають лінійний характер. Так само, як і для гладких валків, розширення по осі калібру зростає у міру збільшення параметра m .

Розширення має найбільше значення при прокатуванні в системі калібрів квадрат-овал, там де нерівномірність деформації максимальна і найменше в системі круг-овал (ромб-ромб), де нерівномірність деформації мінімальна. Так, при $m = 15$ мм при прокатуванні овалу в квадраті величина розширення дорівнює $\Delta b = 15,5$ мм (крива 1), а в системі ромб-ромб - $\Delta b = 7$ мм (крива 3), тобто більш ніж в два рази менше. При $m = 15$ мм розширення для гладких валків ($C_{II} = 1$) по формулі (2.8) рівне $\Delta b = 7,9$ мм, а по формулі (2.1) - ($\Delta b = 7,4$ мм. Ці значення дещо більше чим, для випадку прокатки в системі ромб-ромб, але менше, ніж в інших системах калібрів.

Апроксимація залежностей (рис. 2.3) дає наступні формули з урахуванням поправочних коефіцієнтів C_{II} і C_M (розширення по осі калібру):

Квадрат - ромб, ромб-квадрат ($m \leq 20$) –

$$\Delta b_0 = 0,52 C_{II} \cdot C_M (3,85 + m); \quad (2.13,а)$$

Ромб - ромб ($m \leq 20$) –

$$\Delta b_0 = 0,37 C_{II} \cdot C_M (4 + m); \quad (2.13,б)$$

Овал - квадрат ($m \leq 20$) –

$$\Delta b_0 = 0,8 C_{II} \cdot C_M (4,25 + m); \quad (2.13,в)$$

Квадрат - овал ($m \leq 52$) –

$$\Delta b_0 = 25 C_{II} \cdot C_M [1 - (1 - 0,02m)^2]; \quad (2.13,г)$$

Круг - овал; овал - круг ($m \leq 25$) –
 $\Delta b_0 = 0,31 C_{II} \cdot C_M (15,3 + m);$ (2.13,д)

Рєбровий овал - овал; овал - ребровий овал ($m \leq 25$) –
 $\Delta b_0 = 0,31 \cdot C_{II} \cdot C_M (15,3 + m).$ (2.13,е)

Формули (2.13) дають значення величин розширення по осі калібру. Залежності, що мають лінійний характер, можуть бути використані і при $m > 20$.

Окрім вказаних, дослідниками запропоновані інші, але складніші, емпіричні формули для розрахунку розширення в калібрах різних систем [22]. Визначення точності приведених формул вимагає додаткових широких досліджень.

Слід зазначити, що усі приведені емпіричні формули придатні для розрахунку розширення в умовах, подібних тем, в яких вони були отримані. В цьому відношенні емпіричні формули не можуть змагатися з теоретичними, які враховують загальні закономірності поперечної течії металу при прокатуванні. Емпіричні формули можуть бути корисні в якості оцінних.

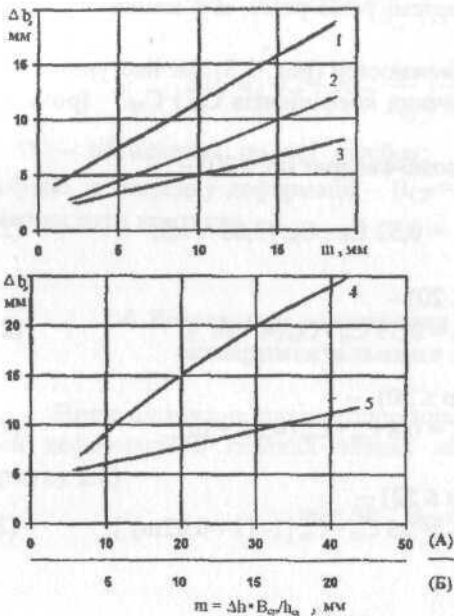


Рисунок 2.3 - Розширення по осі калібрів різних форм при прокатки:
 1 - овал-квадрат;
 2 - ромб-квадрат (квадрат-ромб);
 3 - ромб-ромб;
 4 (А) - квадрат-овал (овал-квадрат);
 5 (Б) - круг-овал (овал-круг).
 Шкала А - для кривої 4;
 шкала Б - для кривої 5.
 (Дані Г. Цоухара при $C_{II}=0,8$)

2.5 Розрахунок розмірів калібрів з урахуванням розширення та їх форми

При прокатуванні в калібрах простої форми розширення по осі визначається величиною площі q_n простору на розширення і формами заготовки і калібру, на що було звернено увагу раніше [13]. Слід розрізняти середнє розширення і лінійне розширення по осі калібру. Середнім розширенням оцінюють міру заповнення площі простору q_n на розширення в калібрі.

Лінійне розширення по осі калібру буде більше, ніж середнє, оскільки висота простору на розширення між валками не постійна по його ширині і зменшується до периферії, тобто відрізняється від прямокутної форми, як при прокатуванні в гладких валках. Таким чином, зміщений в результаті обтиснення в поперечному напрямі метал в площині виходу має площу q_{cm} , яка має бути в ідеальному випадку дорівнює (чи дещо менше) площі власне простору на розширення q_n .

Площа простору на розширення обумовлена формами заготовки і калібру. Визначимо величини q_n для деяких систем калібрів, виходячи з геометричних параметрів заготовки і калібру (рис.2.4).

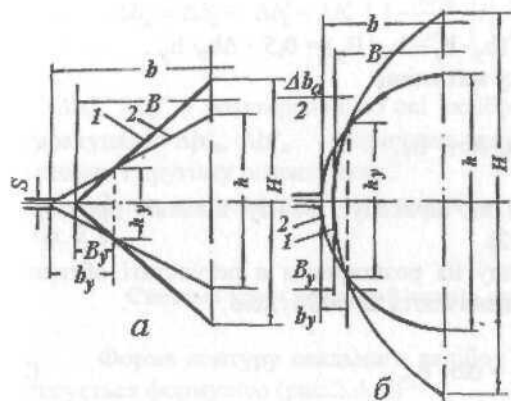


Рисунок 2.4 - Схема деформації розкатів: а - квадратного в ромбічному калібрі; б - овалного в круглому калібрі

Система ромб - квадрат

При аналізі цієї системи допускаємо відсутність закруглень ребер, а простір на розширення по осі калібру рівний $\Delta b_n = 2 (b_y - B_y)$. Різниця $(b_y - B_y)$ є відстань від ребер калібру і заготовки до вертикального перерізу h_y , в якому контури калібру і заготовки мають точку перетину. Рівняння контурів калібру і заготовки мають вигляд (рис.2.4, а):

$$\left. \begin{aligned} h_y &= 2b_y \operatorname{tg}\varphi; & H_y &= 2B_y \operatorname{tg}\varphi_1; \\ \operatorname{tg}\varphi &= h/b; & \operatorname{tg}\varphi_1 &= H/B. \end{aligned} \right\} \quad (2.14)$$

Оскільки в місці перетину контурів $H_y = h_y$, то маємо

$$b_y \cdot h/b = B_y \cdot H/B$$

чи

$$b_y = 0,5 \cdot \Delta b_n / (1 - h \cdot B/H \cdot b). \quad (2.15)$$

З формул (2.14) і (2.15) отримаємо

$$h_y = \Delta b_n / (b/h - B/H).$$

Площа області простору на розширення в калібрі рівна

$$q_n = (h_y \cdot b_y - h_y \cdot B_y) = 0,5 \cdot \Delta b_n \cdot h_y. \quad (2.16)$$

У загальному випадку матимемо

$$q_n = n_n \cdot \Delta b_y \cdot h_y, \quad (2.17)$$

де n_n – коефіцієнт, що враховує форму ділянки простору на розширення (табл. 2.2).

Зміщену площу на розширення в результаті обтиснення заготовки в калібрі визначають за формулою

$$q_{cm} = \Delta b \cdot h_y, \quad (2.18)$$

де Δb – середнє розширення в калібрі, яке визначають теоретичним шляхом.

Повне заповнення калібру досягається за умови рівності площ, тобто $q_n = q_{cm}$ з формул (2.17) і (2.18). Відшукування

параметрів деформації в калібрі, що задовольняють рівності $q_n = q_{cm}$, виконується методом ітерації [14] за умови лінійних залежностей Δb від параметрів деформацій

$$q_d = q'_{cm} + (q'_{cm} - q'_{cm}) (1 - q'_{cm}/q'_n) / (q'_{cm}/q''_n - q'_{cm}/q'_n), \quad (2.19)$$

де q_d – дійсна площа простору на розширення, що відповідає цим умовам деформації; q'_{cm} і q''_{cm} – зміщені площі металу в поперечному напрямі за формулою (2.18) в першому і другому розрахунках; q'_n і q''_n – площі простору на розширення в калібрі, що відповідають заданим значенням $\Delta b'_n$ і $\Delta b''_n$ в першому і другому розрахунках [формула (2.17)].

Розширення по осі калібру буде рівне

$$\Delta b_0 = \Delta b/n_n \quad (2.20)$$

Розділивши ліву і праву частині формули (2.19) на параметр h_y отримаємо формулу для розрахунку дійсного розширення по осі калібру

$$\Delta b_d = \Delta b'_0 + \Delta b''_0 - \Delta b'_0 \left(1 - \frac{\Delta b'_0}{\Delta b'_n} \right) / \left(\frac{\Delta b''_0}{\Delta b''_n} - \frac{\Delta b'_0}{\Delta b'_n} \right), \quad (2.21)$$

де $\Delta b'_0$, $\Delta b''_0$ – розширення по осі калібру в першому і другому розрахунках; $\Delta b'_n$, $\Delta b''_n$ – величини простору на розширення в першому і другому розрахунках..

Значення коефіцієнта n_n для різних систем калібрів дані в табл. 2.2.

Система круг(ребровий овал) - овальний калібр

Форма контуру овального калібру в першому наближенні описується формулою (рис.2.4, б)

$$h_y = h [1 - (1 - 2 \cdot \Delta b_n/b)^2]. \quad (2.22)$$

Площа простору на розширення в калібрі рівна

$$\left. \begin{aligned} q_n &= 2n_n \cdot h_y (b - B) = n_n \cdot \Delta b_n \cdot h_y; \\ q_n &= n_n \cdot \Delta b_n \cdot h'_{cp}, \end{aligned} \right\} \quad (2.23)$$

де n_n – коефіцієнт, равний $n_n = 0,7$ (табл. 2.2).

Дійсне розширення по осі калібру визначають по формулах (2.20) і (2.21).

Приклад. Визначимо розміри квадратного калібру при прокатуванні в нім ромбічної заготовки: $H = 81,2$ мм, $B = 48$ мм, $q_0 = 1950$ мм², $q = 1663$ мм², діаметр валків по буртах $D_6 = 445$ мм, проміжок $S = 4$ мм, $n_0 = n = n_n = 0,5$, $n_k = 0,63$, $V_{cp}/b = 0,83$, $C_m = 1$ (табл. 1.2).

Робимо перший розрахунок при заданому *заздалегідь розширенні* $\Delta b'_p = 5$ мм, яке, вважаємо, буде достатнім для повного заповнення калібру металом (усі розміри, окрім особливих випадків приведені в мм):

$$\begin{aligned} b &= B + \Delta b'_n = 48 + 5 = 53; & h &= q/n \cdot b = 1663/0,5 \cdot 53 = 62,8; \\ \Delta h &= H - h = 81,2 - 62,8 = 18,4; & \Delta h_{cp} &= n_k \cdot \Delta h = 0,63 \cdot 18,4 = 11,6; \\ h'_{cp} &= 0,5 \cdot h = 0,5 \cdot 62,8 = 31,4; & V_{cp} &= 0,83 \cdot b = 0,83 \cdot 53 = 44; \\ D &= D_6 - (h'_{cp} - S) = 445 - (31,4 - 4) = 418; \\ l_d &= \sqrt{R \cdot \Delta h} = \sqrt{209 \cdot 11,6} = 49,3; \\ V_{cp}/l_d &= 44/49,3 = 0,9; \\ V_{cp}/h_{cp} &= V_{cp}/0,5 (H + h) = 44/0,5 (81,2 + 62,8) = 0,61; \\ m &= \Delta h_{cp} \cdot V_{cp}/h_{cp} = 11,6 \cdot 0,61 = 7,1. \end{aligned}$$

З формул (2.8) і (2.9) маємо

$$C_{II} = e^{-1,2 \cdot 0,9 - 0,9^{0,9}} = 0,807$$

Середнє попереднє розширення дорівнює

$$\Delta b' = 0,53 \cdot C_n \cdot C_m \cdot m = 0,53 \cdot 0,807 \cdot 7,1 = 3,0;$$

Дійсне розширення по осі

$$\Delta b_0' = 3,0/0,5 = 6,0 \text{ мм},$$

що більше прийнятого $\Delta b_n' = 5,0$ мм і може бути переповнювання калібру.

Оскільки заздалегідь задане розширення менше розрахункового $\Delta b_n' < \Delta b_0'$, робимо повторний розрахунок розмірів калібру з новим значенням $\Delta b_n'$. Для даного випадку прокатки приймаємо $\Delta b_n'' = 10$ мм. В результаті розрахунку отримали: $\Delta b'' = 5,1$ мм і $\Delta b_0'' = 10,2$ мм. Дійсне розширення по осі калібру рівне по (2.21)

$$\Delta b_d = 6,0 + (10,2 - 6,0)(1 - 1,2)/(10,2 - 1,2) = 10,7 \text{ мм},$$

що близько до заданого.

Таблиця 2.2 - Базові формули для розрахунку простору на розширення в калібрах

Форма		$h_y (b_y, R_{обр}, r_{обр}),$ мм	$q_n,$ мм ²	n_n
Заготовки	калібру			
1	2	3	4	5
Ромб (квадрат)	Квадрат (ромб)	$h_y = \Delta b_n / (b/h - B/H).$	$q_n =$ $0,5 \Delta b_n h_y$	0,5
Ребровий овал (круг)	Овал	$h_y = h [1 - (B/b)^{2,3}].$	$q_n =$ $0,7 \cdot \Delta b_n h_y$	0,7
Овал	Ребро- вий овал (круг)	$h_y = \sqrt{8b_y r_{обр}};$ $R_{обр} = 0,25$ $B[1 + (H/B)^2];$ $b_y = 0,5 \Delta b_n / (1 - r_{обр}/R_{обр});$ $r_{обр} = 0,25 h (h/b + b/h)$		
Прямо- кутник	Ребро- вий овал	$h_y = \sqrt{4 \cdot \Delta b_n r_{обр}}$		
Квадрат	Овал	$h_y = h [1 - (1 - \Delta b_n/b)^2].$	$q_n =$ $0,5 \cdot \Delta b_n h_y$	0,5
Овал	Квадрат	$h_y = \Delta b_n \cdot h/b$		
Шісти- кутник	Квадрат	$h_y = \Delta b_n \cdot h/b$		
Квадрат	Шісти- кутник	$h_y = 1,67 \Delta b_n \cdot h/b$		

Таким чином, розміри квадратного калібру по конструкційним точкам рівні:

$$b = B + \Delta b_d = 48 + 10,7 = 58,7 \text{ мм};$$

$$h = q/0,5 b = 1663/0,5 \cdot 58,7 \approx 56,8 \text{ мм}.$$

З урахуванням закруглень вершин калібру розміри h і b будуть дещо менше.

№	Назва	Матеріал	Розміри
1	Калібр	Сталь	$b = 58,7 \text{ мм}$ $h = 56,8 \text{ мм}$
2	Калібр	Сталь	$b = 58,7 \text{ мм}$ $h = 56,8 \text{ мм}$
3	Калібр	Сталь	$b = 58,7 \text{ мм}$ $h = 56,8 \text{ мм}$
4	Калібр	Сталь	$b = 58,7 \text{ мм}$ $h = 56,8 \text{ мм}$
5	Калібр	Сталь	$b = 58,7 \text{ мм}$ $h = 56,8 \text{ мм}$
6	Калібр	Сталь	$b = 58,7 \text{ мм}$ $h = 56,8 \text{ мм}$
7	Калібр	Сталь	$b = 58,7 \text{ мм}$ $h = 56,8 \text{ мм}$
8	Калібр	Сталь	$b = 58,7 \text{ мм}$ $h = 56,8 \text{ мм}$
9	Калібр	Сталь	$b = 58,7 \text{ мм}$ $h = 56,8 \text{ мм}$
10	Калібр	Сталь	$b = 58,7 \text{ мм}$ $h = 56,8 \text{ мм}$