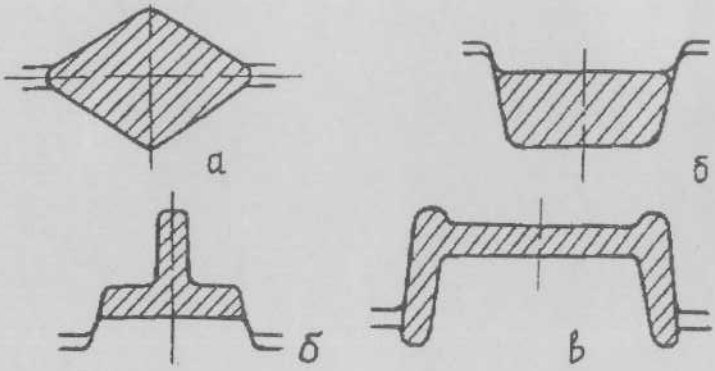
621.771
Н 632

Міністерство освіти і науки України
Запорізька державна інженерна академія

В. О. Ніколаєв

КАЛІБРУВАННЯ ПРОКАТНИХ ВАЛКІВ

Навчальний посібник



Міністерство освіти і науки України
Запорізька державна інженерна академія

Затверджено до друку
рішенням науково-методичної ради ЗДІА
протокол № 1 від 25.11.2015р.

КАЛІБРУВАННЯ ПРОКАТНИХ ВАЛКІВ

Навчальний посібник

Рекомендовано до видання
на засіданні вченої ради ЗДІА,
протокол № 10 від 26.11.2015р.

Запоріжжя
ЗДІА
2015

ББК 621.771
Н 632

В. О. Ніколаєв, д.т.н., професор

Відповідальний за випуск: *зав. кафедри ОМТ,*
професор В. О. Ніколаєв

Ніколаєв В.О.

Н 632 Калібрування прокатних валків. Видання 4-е, виправлене, доповнене: навчальний посібник / Ніколаєв В. О.; Запоріз. держ. інж. акад. – Запоріжжя: ЗДІА, 2015. – 158 с.

Виконаний аналіз різних систем калібрувань валків для отримання простих та фасонних профілів. Дано аналіз різних формул для розрахунку розширення металу при прокатуванні у гладких валках і у калібрах. Викладені раціональні принципи калібрування простих профілів прокату виходячи з уточненого розрахунку розширення металу, з урахуванням форми калібрів. Методи калібрування валків принципово відрізняються від вже відомих. Наведені приклади розрахунків калібрувань валків, розглянуті методи розрахунку геометричних параметрів прокатки в калібрах. Розроблено новий метод визначення середнього обтиснення в калібрах. Дані приклади розрахунків калібрувань валків. Розглянуті методи розрахунку енергосилових параметрів в калібрах з детальними прикладами.

Навчальний посібник призначено для студентів, які навчаються за фахом «Обробка металів тиском».

356784

© Ніколаєв В.О., 2015

ВСТУП

Основою технології прокатки сортових профілів є деформація металу в калібрах різної форми. Вивченню особливості формозміни металу в калібрах присвячений розділ «Калібрування прокатних валків» спецкурсу. У завдання калібрування входить визначення форми і розмірів калібрів, які потім виготовляють на валках для отримання різних прокатних профілів. Від того, наскільки правильно розраховані розміри прийнятих форм калібрів, залежать точність і якість поверхні готового профілю.

При калібруванні валків необхідно враховувати особливості деформації металу в калібрах, з тим щоб уникнути утворення великого внутрішнього напруження в деформованому металі і готовому профілі, отримати рівномірний і мінімальний знос калібрів. Калібрування повинне забезпечувати високу продуктивність прокатного виробництва при мінімальній витраті енергії і рівномірному розподілі навантаження по клітях. Відповідно з учбовою програмою в посібнику викладено загальній стан калібрування валків для прокатки простих профілів і розрахунку енергосилових параметрів.

Розглянуті особливості побудови простих калібрів, дано аналіз різних систем поєднання калібрів, методика розрахунку їх розмірів. Приведені приклади розрахунку калібрування валків деяких простих профілів, дані формули розрахунку геометричних параметрів деформації в калібрах.

При створенні навчального посібника автор використав багаторічний досвід читання лекцій з калібрування прокатних валків, а також результати різних досліджень. Використані відомі підручники і монографії за технологією прокаки і калібрування валків (О.П. Чекмарьов, М.С. Мутьев, О.П. Грудев, Л.Ф. Машкин, І.Я Тарновський, С.А. Тулупов, А.В. Минкин, В.Д. Смирнов, В.М. Клименко та ін.).

1 АНАЛІЗ СИСТЕМ КАЛІБРУВАНЬ ВАЛКІВ РОЗРАХУНОК ГЕОМЕТРИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ

1.1 Вимоги до калібрування валків

У двохвалковій кліті калібр як правило утворюється двома рівчаками, врізаними в тіло валка, вертикальні осі яких розташовані в одній площині. На рис. 1.1. зображено валковий вузол з овальним, квадратним і ромбічним калібрами. Кожен калібр складений двома рівчаками, які врізані у верхній і нижній валки. Сусідні два калібри мають різні форми і розміри. Причому, для здійснення витягання металу, площа поперечного перерізу подальшого калібру завжди менше площі попереднього калібру.

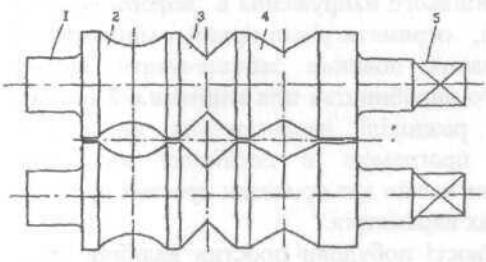


Рисунок 1.1 - Валки сортового стана:
1 - шийка;
2-4 - калібри;
5 - хвостовик.

Розкат після виходу, наприклад, з овального калібру задається в подальший квадратний калібр з кантуванням на 90^0. При цьому висота заготовки (овалу) завжди більша, а ширина менша, ніж, відповідно, висота і ширина наступного квадратного калібру. Це забезпечує в калібрі задане обтиснення і необхідний простір на поперечну течію (розширення) металу. Тобто дотримується умова:

$$H > h; \qquad B < b,$$

де H і B – висота і ширина заготовки, що входить в калібр; h і b – висота і ширина калібру.

Застосовують також калібри закритого типу, утворюванні одним рівчаком і буртом. Ряд послідовно розташованих калібрів складає систему калібрування для прокатки профілю. Розміри калібрів визначають розрахунковим шляхом, про що буде доведено нижче. Правильно сконструйоване калібрування повинне забезпечувати [1-3] необхідні розміри готового профілю, високу якість поверхні профілю, максимальну продуктивність

стана, мінімальну нерівномірність зносу валків, зручне обслуговування стана.

Проте необхідні (точні) розміри профілю по висоті і ширині на практиці отримують додатковим налаштуванням розмірів чорнових, передчистових і чистових калібрів шляхом регулювання положення одного з валків (верхнього) кліті , дотриманням заданих температурного і швидкісного режимів прокатки, стабільного натягнення розкату на неперервному стані.

Висока якість поверхні прокату досягається раціональним режимом нагріву заготовок, раціональними розподілом витягань по калібрах і формою використовуваних калібрів. Головна умова отримання максимальної продуктивності стана - застосування заготовок підвищеної маси, максимальних кутів захвату і коефіцієнтів витягань, а також системи калібрування, яке в чорнових клітях може бути використане для прокатки інших профілів. Мінімальна нерівномірність зносу по ширині валків забезпечується при використанні калібрів, подібних по своїй формі і плавних по контуру (овал - ребровою овал, овал - круг, овал - овал).

1.2 Елементи калібрів

У практиці прокатного виробництва застосовують прості і складні калібри різної форми [1-17,22,23 та ін.]. Деякі з них показані на рис.1.2; 1.3 та ін. Ящичний калібр (рис.1.3) має дно і бічні стінки, нахилені до вертикалі на кут $\varphi = 2...25^0$. Між валками є зазор S, який потрібний для регулювання висотних розмірів розкату в процесі налаштування або після зносу, мм:

$$S = (0{,}005...0{,}02)\, D_б,$$

де $D_б$ – діаметр валків стана по буртах. Кут (випуск калібру) визначається за формулою

$$\operatorname{tg} \varphi = cd/ca = (b - b_d)/h_к.$$

Внаслідок нахилу бічних стінок ширина b_d дна калібру менше ширини b у розняття. Кути рівчаків округляють на радіус $r = (0{,}10...0{,}15)\, h_к$, де $h_к$ – глибина урізання калібру у валках на діаметр. За наявності закруглень в кутах калібру зменшується концентрація напружень вигину в перерізах валка в місцях переходу. Тупі кути сприяють рівномірної деформації металу і

зменшенню утворення дефектів поверхні розкату. Проміжок і радіус закруглень визначаються діаметром валків, хімічним складом металу і іншими особливостями технологічного процесу.

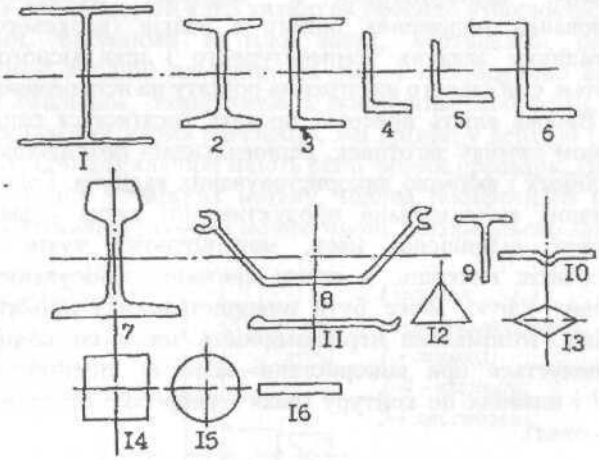


Рисунок 1.2 - Прості і фасонні профілі прокату:
1 - широкополочна балка; 2 - стандартна балка; 3 - швелер; 4 - нерівносторонній куток; 5 - рівносторонній куток; 6 - зетовий профіль; 7 - рейка; 8 - шпунтовий профіль; 9 - тавровий профіль; 10 - ресорна штаба; 11 – автообід; 12 -тригранний профіль; 13 - ромб; 14 - квадрат; 15 - круглий; 16 - штабовий вузький профіль.

Дно калібру має опуклість 2...5 мм, яка забезпечує стійкість розкату на рольганги і зменшує можливість переповнювання металом (утворення лампасів) при прокатуванні профілю в наступному калібрі. Нахил бічних стінок зношеного калібру дозволяє відновлювати при переточуванні на вальцетокарних верстатах його початкові розміри по ширині (рис.1.3).

Пояснимо деякі положення, висловлені вище. На рис. 1.4 показані схеми ящичних калібрів з паралельними (а) і похилими стінками (б). Калібри побудовані по конструкційних точках без урахування закруглень в кутах (так званий "скелет" калібру). Під час прокатки за схемою (а) кінцева ширина калібру має розмір

b – однаковий по висоті рівчака. Внаслідок зносу ширина калібру b більша початкової ширини ($b_з$>b) і відновити початкову ширину калібру шляхом переточування неможливо.

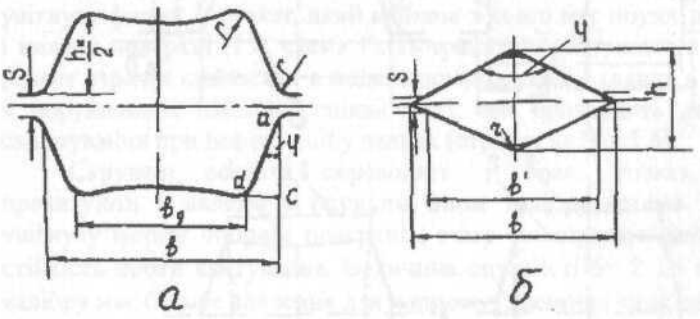


Рисунок 1.3 - Ящичний (а) і ромбічний (б) калібри

Це перший основний недолік по рис.1.4,а. Крім того, контур зносу 2 нерівномірний по висоті калібру, що обумовлює затискання розкату в калібрі і можливість оковування валка. Останнє призводить до аварійної ситуації і зупинки стана.

За наявності похилих бічних стінок калібру (рис.1.4,б) ширина і висота калібру повністю відновлюються шляхом зменшення діаметру валка на величину переточування

$$\Delta D = D_б - D'_б$$

де $D'_б$ - діаметр валка по буртах після переточування

При цьому, чим більше кут φ нахилу стінки, тим менше зменшується діаметр валка за одне переточування. З урахуванням того, що в чорнових калібрах допускається знос більше, ніж в чистових, то в чорнових калібрах кут складає $\varphi = 10...25^0$. Величина переточування діаметру, що допускається, складає 8…10%. Подальше зменшення діаметру валків недоцільне, оскільки застосування валків невеликого діаметру знижує їх міцність і швидкість валків (при постійному числі оборотів валків) і продуктивність стана.

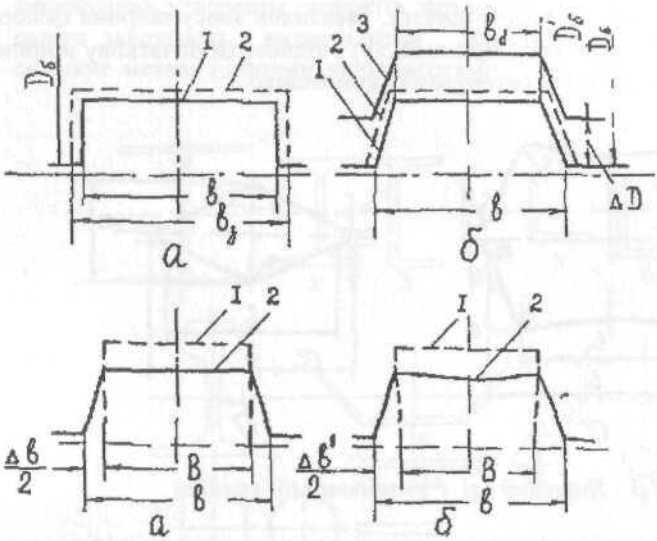


Рисунок *1.4 - Ящичний калібр з паралельними (а) і похилими (б) стінками: Контур: 1-новий; 2-після зносу; 3- після переточування*

Рисунок 1.5 - Прокатка в ящичному калібрі:1 - заготовка; 2 - калібр (а - заготовка з паралельними бічними поверхнями; б - заготовка з увігнутими бічними поверхнями)

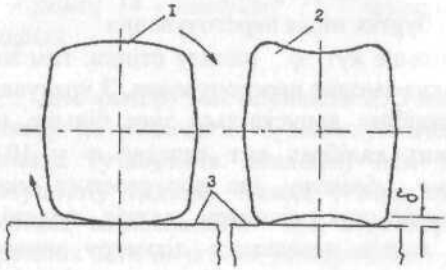


Рисунок 1.6 - Розкат після прокатки в ящичному калібрі і кантування: 1 – з початковим плоским, але зношеним, дном; 2 - з опуклим дном; 3 - ролик рольганга

Застосування опуклого дна ящичного калібру доцільне з кількох причин. По-перше, після кантування розкату на 90^0 для прокатування в наступному калібрі, увігнуті бічні поверхні (схема (рис.1.5,б) забезпечує більший простір на розширення металу

($\Delta b' > \Delta b$). Це запобігає переповнюванню калібру з виходом металу в зазор і утворення лампаса, що можливо при прокатуванні в калібрі за схемою "а", де прямі бічні поверхні заготовки.

По-друге, плоске дно калібру в результаті зносу отримує увігнуту форму, а розкат, який вийшов з нього має опуклі верхню і нижню поверхні (1.6, схема 1). Потрапляючи на рольганг такий розкат втрачає стійкість і в подальшому проході входить в калібр з порушенням взаємної співвісності, що призводить до його скручування при деформації у валках (стрілки на рис.1.6).

Скручені розкати переводять у брак. Розкат, який прокатують в калібрі з опуклим дном калібру (схема 2) має увігнуту форму опорної поверхні і тому він отримує необхідну стійкість проти кантування. Величина опуклості δ= 2…5 мм дна калібру має більше значення для чорнових ящичних калібрів.

У ромбічному калібрі (рис.1.3, б) є тільки похилі стінки, що утворюють кут φ = 110...120^0. Розміри ромбічного розкату $b_п$ можуть дорівнювати ширині калібру b_k або менше. Кути при вершині ромба округляють радіусом r. Відношення $b_п/b_k$ називають мірою заповнення калібру металом. При $b_п/b_k$= 0,87...0,97 відсутнє переповнювання калібру металом і утворення задирки. Кут нахилу стінок ромбічного калібру обумовлений розмірами розкату і величиною витягання. При цьому, чим менше розміри розкатів і передбачаються великі значення коефіцієнта витягання в системі калібрування ромб-квадрат, тим більшим має бути кут φ (φ=110…120^0).

1.3 Призначення, форми і типи калібрів

За призначенням калібри можна розділити на обтискні ящичні калібри і чорнові ящичні калібри, які використовують на блюмінгах і заготовочних станах, після яких розташовують **чорнові *витяжні*: *овальні, квадратні, ромбічні та ін. прості і фасонні калібри*), передчистові** калібри, що мають форму і розміри, досить близькі до готового профілю і **чистові**, розміри і форма яких повністю відповідають готовому профілю.

Калібри мають *просту і фасонну* форми. До калібрів простої форми відносять калібри, що мають вертикальну і горизонтальну осі симетрії *(круг, овал, квадрат, ромб)*. Калібри, в яких

прокатують рейки, балки, швелери, шпунтові палі, зетові, віконорамні і подібні до них профілі, є фасонними (рис. 1.2).

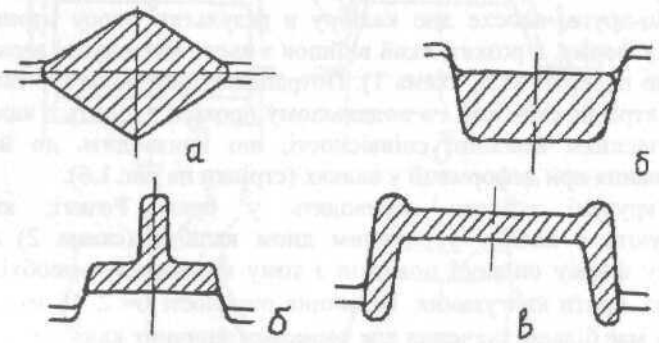


Рисунок 1.7- Типи калібрів : а - відкритий; б - закритий; в – напівзакритий

На рис.1.7 показані деякі типи відкритих і закритих калібрів. Відкриті калібри утворені двома рівчаками (рис.1.7,а) і зазор між валками розташований в площині калібру. Закриті калібри утворені рівчаком і буртом (рис.1.7,б) і зазор між валками розташований поза площиною профілю. Калібр швелерного типу (рис.1.7,в), в якому фланці частково розміщені в одному (нижньому) валку, називаються напівзакритими. Закриті і напівзакриті калібри застосовують для отримання точних розмірів профілів.

Системи витяжних калібрів простої форми і їх характеристика

Розглянемо наступні системи калібрувань*: ящичну (прямокутню); прямокутник - гладка бочка; овал - квадрат; ромб - квадрат; овал - ребровий овал; універсальну; гладка бочка - гладка бочка.* Використання тієї або іншої системи калібрування обумовлене типом стана, формою готової продукції, матеріалом профілю. Необхідно пам'ятати, що практично в усіх випадках прокатки при завданні розкату в наступний калібр виконують його кантування. Це необхідно для отримання висотної

деформації розкату при дотриманні приведеної вище умови:H>h; B < b.

Система ящичних калібрів

Ця система містить ряд послідовно розташованих ящичних (прямокутних) калібрів з послідовним зменшенням площі поперечного перерізу (рис.1.8). Її застосовують на обтискних (блюмінгах) і заготовочних станах неперервного і лінійного типів. На валках блюмінга врізають 4-5 калібрів і в кожному з них здійснюють декілька проходів (1 - 6). При передачі в наступний калібр розкат кантують на 90^0. На неперервно-заготовочному стані (НЗС) і лінійному заготовочному стані в кожному калібрі розкат прокатують в один прохід. Ящичні калібри мають невелике урізання рівчака у валки і, отже, підвищену їх міцність, рівномірне обтиснення по ширині розкату, а похилі стінки сприяють збільшенню граничного кута захвату розкату валками і величин обтиснення. .

В цілях запобігання утворенню лампасів ширина калібру у проміжку повинна складати, мм:

$$b = B + \Sigma\Delta b + (5...10), \qquad (1.1)$$

де B – ширина розкату до прокатки: $\Sigma\Delta b$ – сумарне розширення в усіх проходах в цьому періоді кантування.

Прокатка в ящичних калібрах характеризується великими кутами захвату (α=20...30^0) і, отже, значними абсолютними обтисненнями (Δh=80...120 мм) за один прохід. Глибина урізування калібру (h_K) на діаметр визначається відповідно до його призначення. Чим менше співвідношення сторін (H/B) розкату, що задається в калібр, тим менше глибина урізування, що важливо з точки зору збільшення діаметру і, отже, міцності валка.

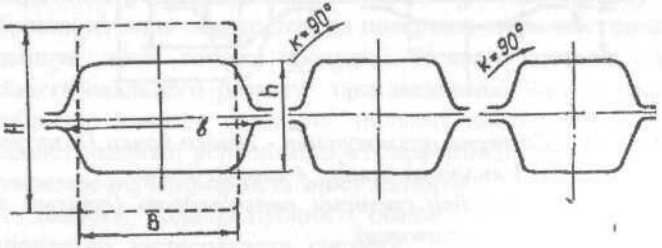


Рисунок 1.8 - Ящична система калібрів

За даними Б.П. Бахтинова і М.М. Штернова [3] при H/B<1,2 глибина урізування мінімальна ($h_к$ =70…80мм для гладкій бочці), а на слябінгу застосовують гладкі валки з $h_к = 0$ При прокатуванні розкатів з відношенням H/B > 1,2 висота урізування калібру валків блюмінга може бути визначена за співвідношенням (окрім першого калібру-гладкої бочки):

$$h_к = (0{,}15…0{,}18)D_б.$$

І.Я. Тарновській та ін. [2] рахують допустимим використання наступної залежності

$$h_к = 0{,}3b_d + 90.$$

Система прямокутник - гладка бочка

Цю систему застосовують в чорнових клітях неперервних і лінійних сортових станів, а також в чорнових клітях станів з послідовним розташуванням клітей (рис.1.9).

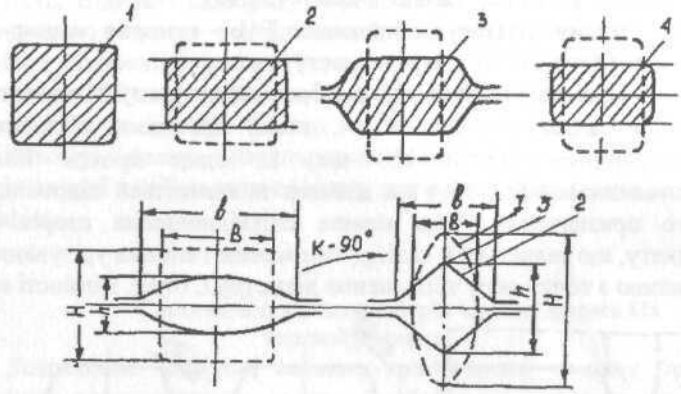


Рисунок 1.9 - Система прямокутник - гладка бочка (1-заготовка; 2-гладка бочка; 3-ящичний калібр; 4-гладка бочка)

Рисунок 1.10 - Калібри системи овал-квадрат (суцільні лінії - калібр; пунктирні - заготовка)

Вона дуже зручна для прокатки різних профілірозмірів готової продукції. У цій системі, як правило, передбачають кантування розкату після кожного проходу. Коефіцієнти витягань і допустимі кути захвату в ящичних калібрах на 10...15% більше, ніж в гладких валках. Внаслідок більшого розширення ефективність прокатки в гладких валках дещо менша. У цій системі калібрування глибина урізування чорнового ящичного калібру у валках дорівнює – $h_K = h - S$.

Зазор між валками S приймають рівним 6...25 мм і більше з урахуванням особливостей прокатки металу.

Система овал - квадрат

Систему овал – квадрат широко застосовують на станах лінійного (старого) типу. Вона забезпечує інтенсивну деформацію металу (рис.1.10). Відношення розмірів осей овалу зазвичай приймають рівним b/h= 2...3. Більші значення b/h забезпечують і великі величини витягань (обтиснень), але при цьому погіршуються умови захвату розкату валками. У зв'язку з цим для великих розмірів овалів значення b/h зменшують.. При прокатуванні трубної заготовки (d>80...100 мм) відношення діагоналей овалів знаходиться в межах b/h = 1,3...1,6.

Коефіцієнти витягань в квадратних калібрах $\mu_{кв}$ = 1,2...1,5, а в овалах $\mu_{ов}$ = 1,3...2,0. Більше витягання в овальному калібрі забезпечується більшою шириною розкату, що прокатується в нім, і наявності меншого розширення. Не велике урізування рівчака овального калібру у валки, забезпечуючи міцність валка, також дозволяє робити в нім інтенсивне обтиснення. При прокатуванні квадратного розкату в овальному калібрі кожного разу метал з ребрових ділянок переходить на поверхню овального розкату, що підвищує якість готової продукції. Недолік системи - недобра стійкість овального розкату при завдаванні його в квадратний калібр, що вимагає установки щільних лінійок перед валками. Наявність великої нерівномірності деформації по ширині розкату обумовлює нерівномірність зносу калібрів.

Замість однорадіусних овалів в деяких випадках раціонально застосовувати системи: шестикутник - квадрат і плоский овал-круг (рис.1.11,а,б). У шестикутному калібрі

параметр m = 0,4b. Окремим випадком є шестикутний калібр, в якому бічні стінки нахилені на кут 45^0. В цьому випадку $m = b - 1{,}41 \cdot h_к$, а в плоскому овалі радіус $r = h_К/2$ і параметр $m = b - h_К$. У цих системах підвищується стійкість, заготовок, що входять в калібр, і зменшується нерівномірність деформації по ширині калібрів. При прокатуванні в системі овал-квадрат (рис.1.10) коефіцієнт витягання в овальному калібрі завжди більший, ніж в квадратному. Співвідношення між коефіцієнтами витягання в квадратному і овальному калібрах на основі рекомендацій [1] визначається так:

$$\mu_{кв} = 1 + (0{,}3 - 0{,}35)\,(\mu_п - 1);$$

$$\mu_{ов} = 1 + (0{,}6 - 0{,}50)\,(\mu_п - 1),$$

де $\mu_{кв}$ і $\mu_{ов}$ - коефіцієнти витягання відповідно в квадратному і овальному калібрах; $\mu_п$- коефіцієнт витягання в парі калібрів. .

Коефіцієнт витягання в парі сусідніх калібрів рівний ($\mu_п$)

$$\mu_п = \mu_{кв} \cdot \mu_{ов}; \qquad \mu_{кв} = \mu_п/\mu_{ов}; \qquad \mu_{ов} = \mu_п/\mu_{кв}.$$

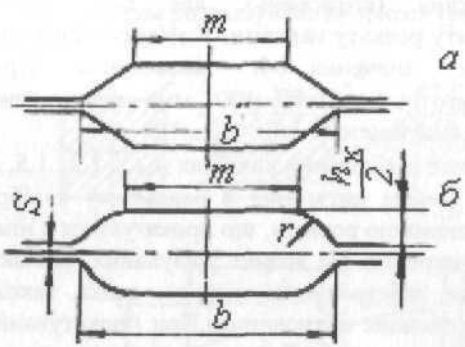


Рисунок 1.11. Калібри:
а - шестикутник;
б - плоский овал

Система ромб – квадрат

Систему ромб-квадрат (рис.1.12) використовують для прокатки квадратних профілів на неперервно-заготовочних станах Для цієї системи характерні порівняно невеликі коефіцієнти витягань. При цьому внаслідок більшої ширини ромба, коефіцієнт витягання в нім дещо більше, ніж в квадратному калібрі. Проте в

практичних розрахунках коефіцієнти витягань в калібрах цієї системи приймають однаковими в межах μ=1,2...1,4.

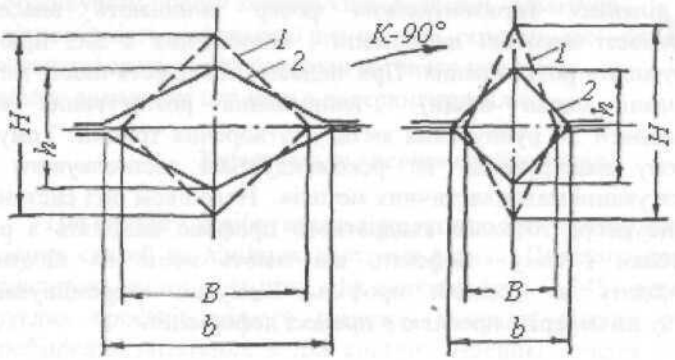


Рисунок 1.12 - Система калібрів ромб – квадрат

Кут при вершині ромба складає 100...120((b/h=1,2...1,4), а в чистовому квадратному калібрі ~ 88^0. Це необхідно для отримання кута квадрата при вершині рівним 90^0 після його охолодження.

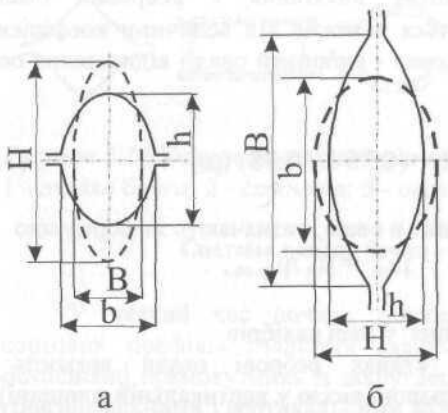


Рисунок 1.13- Система калібрів: а - овал - ребровий овал; б – ребровий овал-овал

Нахилені бічні стінки калібрів стримують поперечну течію металу і зменшують розширення металу в порівнянні з прокаткою в гладких валках при одній і тій же середній висотній деформації. Незважаючи на недоліки ця система калібрування широко застосовується на станах різного типу. Проте при

прокатуванні розкатів в цій системі горизонтальні ребра не піддаються деформації, більше охолоджуються і на них можуть з'являтися дефекти у вигляді заходів і тріщин. Поперечні тріщини на ділянках горизонтальних ребер виникають внаслідок відсутності висотної деформації і виникнення з цієї причини напруження розтягування. При недостатній пластичності металу (леговані марки стали) напруження розтягування може призводити до руйнування металу, утворення тріщин. Тому цю систему калібрування не рекомендується застосовувати при прокатуванні малопластичних металів. Недоліком цієї системи є і те, що ребра готового квадратного профілю виходять з ребер заготовки і тому дефекти, що мають місце на заготовки, переходять на готовий профіль. Відсутнє «перемішування» металу по перерізу профілю в процесі деформації.

Система овал - ребровий овал

Система уперше була застосована на неперервному дрібносортному стані Макіївського металургійного заводу (рис.1.13). Реброві овали застосовують із співвідношенням діагоналей h/b = 1,1...1,4, а відношення осей овалу - b/h = 2...3. При цьому, чим більше розміри ребрового овалу, тим менше відношення h/b. Коефіцієнт витягання в ребрових овалах ($\mu_{р.ов}$=1,2...1,4) і визначається залежно від величини коефіцієнта витягання в парі калібрів овал - ребровий овал і відношення осей овалу b/h за формулою

$$\mu_{р.ов} \approx 1 + (0{,}35 \ldots 0{,}38)(\mu_{п} - 1). \qquad (1.2)$$

Коефіцієнт витягання в овалі, визначають за формулою

$$\mu_{ов} = \mu_{п} / \mu_{р.ов.},$$

де $\mu_{п}$ – коефіцієнт витягання у парі калібрів

На неперервних станах реброві овали врізають в горизонтальні валки (з більшою віссю у вертикальній площині), а однорадіусні – у вертикальні валки (меншою віссю у горизонтальній площині). Ця система має наступні переваги в порівнянні з розглянутими вище:

- надійний захват розкату валками на великих швидкостях прокатки;
- самоцентрування ребрового овалу в овалі, що дозволяє застосовувати просту конструкцію валкової арматури
- рівномірність деформації по ширині розкату, що сприятливо позначається на якості поверхні готового профілю;
- якісне видалення окалини з поверхні профілю.

Універсальна система калібрування

Цю систему калібрування використовують при прокатуванні якісних сталей на лінійних сортових станах. Переваги системи - можливість зміни проміжку між валками (рис. 1.14) і отримання круглих профілів різного діаметру з овалів різного розміру. Коефіцієнти витягання в цій системі невеликі: гладка бочка - μ = 1,1...1,2; сходинка - μ = 1,2...1,25. Застосування невеликих витягань забезпечує збереження цілісності малопластичного матеріалу при прокатуванні. У цій системі, змінюючи висоту калібрів, прокатують різні, але близькі по розмірах, круглі профілі.

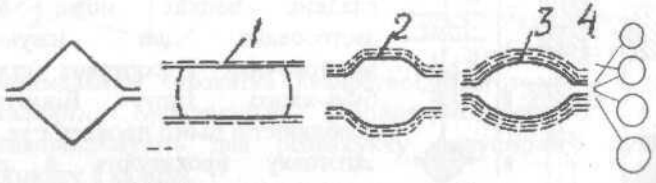


Рисунок 1.14 Універсальна система калібрування валків :
1 - гладка бочка; 2 - сходинка; 3 - овал; 4 –круг

Система гладка бочка – гладка бочка

У деякий час почали широко застосовувати прокатку сортових профілів гладкими валками [4]. Суть її полягає в обтисненні прямокутника із закругленими кромками поперемінно горизонтальними і вертикальними валками без калібрів або тільки горизонтальними валками з кантуванням розкату на 90° після кожного проходу. У останній, чистовій, кліті є калібр за формою готового прокату.

356784

Послідовність проходів показано на рис.1.15. Застосування процесу прокатки в гладких валках дозволяє підвищити техніко-економічні показники роботи неперервного стана, : підвищити використання робочій поверхні валків на 20...30%; збільшити вихід придатного металу в результаті виключення дефектів, пов'язаних з не заповненням або переповнюванням калібрів металом; зменшити брак сортового прокату із-за наявності волосовин, тріщин; збільшити термін служби валків завдяки зменшенню сили прокатки в гладких валках на 15...20% в порівнянні з прокаткою в калібрах; зменшити витрату валків в 3...4 разу.

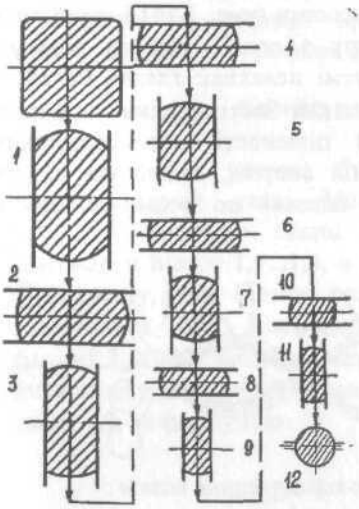


Рисунок 1.15 - Послідовність проходів (клітей) при реалізації прокатки в системі гладка бочка - гладка бочка

Технологія прокатування в гладких валках може бути застосована на існуючих заготовочних і сортових станах будь-якого типу. Відмітною особливістю цього процесу є те, що заготовку прокатують в двох паралельних циліндричних валках без калібрів і що мають ввідну проводку, здатну утримувати заготовку при її поданні у валки..

Заготовку задають у валки через ввідну проводку так, щоб з боку входу її менша вісь була паралельна робочим поверхням валків. Схема прокатки за цим способом показана на рис.1.16. Режим обтиснень вибирають з умови, що в кожному проході початкова товщина розкату має бути більше початкової ширини не більше ніж в 1,4 разу.

1.4 Геометричні параметри деформації в простих калібрах

У відмінності від рівномірної деформації в гладких валках, для прокатки металу в простих калібрах характерна нерівномірна деформація по висоті і ширині розкату, що супроводжується змінністю усіх геометричних параметрів по ширині калібру (рис.1.12 - 1.14). Визначимо параметри деформації в простих калібрах.

Абсолютне обтиснення Δh по осі калібру дорівнює

$$\Delta h = H - h \qquad (1.3)$$

де H і h – товщина розкату по осі калібру до і після прокатки.

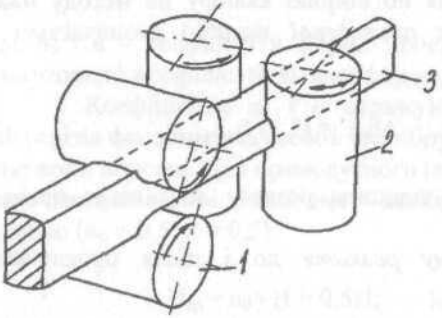


Рисунок 1.16 - Прокатка в системі гладка бочка - гладка бочка:
1 – горизонтальні валки;
2 - вертикальні валки;
3 - розкат.

Це обтиснення по осі калібру може бути максимальним (система ромб-квадрат) або мінімальним (прокатка квадратної заготовки в овальному калібрі). Максимальне лінійне обтиснення в калібрі використовують для розрахунку допустимого кута захвату розкату в калібрі.

Діаметр калібру по осі рівний

$$D_0 = D_б - (h - S), \qquad (1.4)$$

де $D_б$ – діаметр валка по буртах; h - висота розкату по осі калібру.

У зв'язку зі змінним діаметром по ширині калібру розраховують середній, який прокатує, діаметр в калібрі і який визначає *середню окружну швидкість валків і довжину дуги контакту рівен*

$$D = D_б - (h_{ср..к} - S), \qquad (1.5)$$

де $h_{ср.к}$ – середня товщина розкату після прокатки.

Кут захвату по осі калібру і середній *кут контакту* по ширині розкату:

$$\alpha = \sqrt{\Delta h / R_O}\ ; \qquad \alpha_{CP} = \sqrt{\Delta h_{CP} / R}\ , \tag{1.6}$$

де R_0 і R – мінімальний і середній катаючій радіуси валків в калібрі; $\Delta h_{ср}$ – середнє обтиснення по ширині калібру.

Довжини дуг контакту по осі і середня (наближена) по ширині калібру:

$$l_{do} = \sqrt{R_0 \cdot \Delta h}\ ; \qquad l_d = \sqrt{R \cdot \Delta h_{CP}}\ . \tag{1.7}$$

Середнє обтиснення по ширині калібру по методу максимальної ширини (метод *приведеної штаби*) визначається з формули

$$\Delta h_{ср} = H_{ср} - h_{ср.к}, \tag{1.8}$$

де $H_{ср}$ і $h_{срк}$ – середня товщина розкату до і після прокатки відповідно.

Середню товщину розкату до і після прокатування розраховують з формул:

$$H_{ср} = q_0/B; \qquad h_{ср} = q/b, \tag{1.9}$$

де q_0 і q – площі поперечного перерізу заготовки і профілю після прокатки. .

Для визначення q_0 і q в різних системах калібрів отримані відповідні формули. Так, для визначення q_o і q при прокатуванні в системі ромб - квадрат (рис.1.12) використовують наступні формули (без урахування закруглень кутів):

для заготовки:

$$q_0 = HB/2; \qquad H_{СР} = H \cdot B/2B = n_0 \cdot H = 0{,}5H; \tag{1.10}$$

для калибра:

$$q = h \cdot b/2; \qquad h_{CP} = \frac{h \cdot b}{2b} = n \cdot h = 0{,}5h. \cdot \tag{1.11}$$

Для розкатів, прокатаних в системі квадрат – ромб, коефіцієнт форми перерізу, отже, рівні: $n_0 = n = 0,5$.

Коефіцієнти витягань по осі калібру і середній рівні:

$$\mu = H/h; \qquad \mu_{ср} = q_0/q. \tag{1.12}$$

Площа розкату до або після прокатування за рахунок закруглень зменшується на 2%.

У загальному випадку для калібрів будь-якої форми *середнє обтиснення дорівнює*

$$\Delta h_{CP} = H_{CP} - h_{CP} = n_0 H - nh = n \cdot h\left(\frac{n_0}{n}\frac{H}{h} - 1\right), \tag{1.13}$$

де n_0 і n – коефіцієнти форми поперечних перерізів відповідно заготовки і профілю будь-якої форми.

Коефіцієнти n_0 і n отримують із співвідношень площ перерізів фасонних заготовок і калібру до площі прямокутників, в які вони вписані. Для прямокутного (ящичного) калібру $n_0 = n = 1$, для квадратного і ромбічного калібрів з формул (1.9) - (1.11) маємо ($n_0 = 0,5$; $n = 0,5$):

$$H_{ср} = n_0 \cdot H = 0,5H; \qquad h_{ср} = n \cdot h = 0,5h$$

Для однорадіусного овалу при $b/h \le 2,4$ коефіцієнт n визначається з формули (при $b/h \le 2,4$) (при $b/h > 2,4$, $n_i = 0,67$)

$$n_i = 0,69 + 0,035\,(2,4 - b/h)^3. \tag{1.14}$$

Для ребрового овала

$$n_i = 0,69 + 0,035\,(2,4 - h_{р.ов}/b_{р.ов})^3, \tag{1.15}$$

де $h_{р\cdot ов}$ і $b_{р\cdot ов}$ – відповідно велика і менша осі ребрового овалу.

Для круглого калібру при $b/h = 1,0$ з формули (1.14) маємо $n_i = 0,785$ (для заготовки $n_i = n_0$, а для калібру $n_i = n$).

З формули (1.14) також виходить, що зі збільшенням відношення b/h коефіцієнт n_i зменшується. При $b/h = 3,3$

коефіцієнт n=0,67. Для шестикутного калібру коефіцієнт $n \approx 0{,}77$, для плоского овалу – $n \approx 0{,}88$.

1.5 Площа контакту розкату з валками

Площа контакту розкату з валками залежить від обтиснення, діаметру валків, ширини розкату, форм заготовки і калібру і в загальному випадку визначається формулою

$$F = k \cdot b\sqrt{R_0 \cdot \Delta h}\,, \qquad (1.16)$$

де R_0 – радіус валків по осі калібру: k - коефіцієнт, отриманий з відношення площі контакту розкату з валками в калібрі до площі прямокутника, в який контури площі контакту вписані (коефіцієнт форми площі контактної поверхні в калібрі).

При прокатуванні в гладких валках маємо $k \cdot b = B_{CP}$.

При прокатуванні в системі ромб-квадрат (рис.1.17) максимальне обтиснення зосереджене по осі калібру, що обумовлює максимальні коефіцієнт витягання і довжину дуги контакту в цьому подовжньому перерізі розкату. Ширина ділянки контакту розкату і валків у момент захвату незначна, а у міру просування розкату уздовж осередку деформації вертикальне обтиснення, розширення розкату і ширина контакту збільшуються, досягаючи максимального значення в площині виходу з валків. В цьому випадку ширина контакту дорівнює ширині профілю b.

В результаті деформації металу в цій системі калібрування горизонтальна проекція площі, як виходить з дослідів, набуває форми напівовала і може бути розрахована з формули (якщо $l_{d0}/b > 2{,}5$)

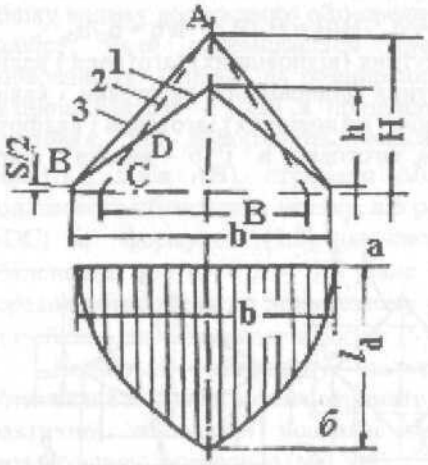
$$F = 0{,}67b\sqrt{R_0 \cdot \Delta h}\,, \qquad (1.17)$$

де 0,67 – співвідношення площ овалу і прямокутника з однаковими розмірами осей (k = 0,67).

При прокатуванні квадратної заготовки в овальному калібрі (рис.1.10) найбільше обтиснення зосереджене на бічних ділянках заготовки, де висотні розміри калібру менші, ніж по осі. У зв'язку з цим довжина дуги контакту в цьому поздовжньому перерізі

буде більше, ніж по осі розкату, а середня площа контакту розкату з валками рівна

$$F = 0{,}54(b + B)\sqrt{R_0 \cdot \Delta h}\,. \qquad (1.18)$$



При прокатуванні овального розкату в квадратному калібрі і в калібрах систем овал - ребровий овал, овал-круг коефіцієнт k ≈ 0,75 і тому

$$F = 0{,}75 \cdot b\sqrt{R_0 \cdot \Delta h}\,.$$

Рисунок 1.17- Деформація ромбічного розкату в квадратному калібрі (а) і форма контактної поверхні (б)

1.6 Аналіз методів визначення середнього обтиснення в калібрах простої форми

Для розрахунку середнього обтиснення в калібрах простої форми (при обтисненні, що змінюється, по ширині калібру) відомі декілька методів[15,17]::

-метод (1) приведеного прямокутного розкату до ширині профілю [див. формулу (1.13)];

-метод (2) відповідних площ розкату і прямокутника (А.Ф. Головін);

-метод (3) зміщених об'ємів металу (І.Я. Тарновський);

-метод (4) відповідної (прямокутній) контактної поверхні до фактичної контактної поверхні в калібрі (В.О. Ніколаєв).

Метод (1) приведеного розкату передбачає заміну заготовки прямокутником з рівною шириною (рис.1.18, а), і відповідною - заміну калібру прямокутником з рівним відношенням h/b (рис. 1.18, б,в).

Метод (2) відповідного розкату А.Ф. Головіна передбачає заміну форм заготовки і калібру прямокутниками з рівновеликими площами поперечних перерізів і рівними співвідношенням осей (рис.1.8,б,в):

$$q_0 = q_{0c};\quad q = q_c;\quad H/B = H_c/B_c;\quad h/b = h_c/b_c,$$

де q_{0c} і q_c – площі прямокутних (відповідних) заготовки і калібру; H_c і h_c – висота прямокутних (відповідних) заготовки і калібру; B_c і b_c – ширина прямокутних (відповідних) заготовки і калібру; H, B – висота і ширина заготовки; h і b – висота і ширина калібру.

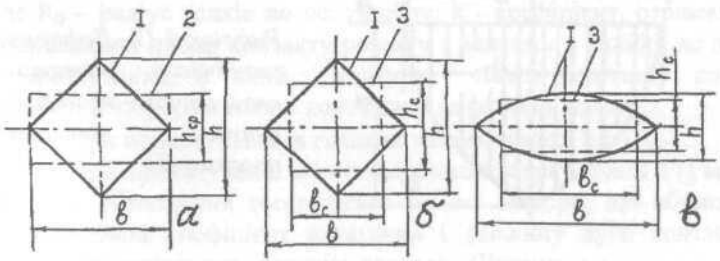


Рисунок1.18- Форми профілів (1) приведеного (2) і відповідного (3)

Висоту, ширину і обтиснення відповідних заготовки и розкату розраховують по формулах:

$$\left.\begin{aligned} H_C &= \sqrt{q_0/(H/B)}; \quad & h_C &= \sqrt{q/(h/b)}; \\ B_c &= H_c \cdot B/H; & b_c &= h_c \cdot b/h; \\ & & \Delta h_c &= H_c - h_c. \end{aligned}\right\} \qquad (1.19)$$

І.Я. Тарновський [5] на підставі теоретичних розрахунків встановив, що визначення обтиснення в овальному калібрі по методу (3) відповідного розкату дає ближчі результати до розрахунків по точному методу зміщеного об'єму в осередку деформації, чим по приведеному розкату. В. С. Смирнов показав, що площа контакту розкату з валками в калібрі, визначена з

використанням формул (1.19), з точністю до 1,8% співпадає з дослідною.

Основним недоліком формул (1.9) і (1.19) є відсутність обліку впливу додаткового обтиснення металу від похилих стінок калібру, який переміщається при висотній деформації в поперечному напрямі на розширення. У роботі [5] для системи калібрів квадрат - ромб в припущенні, що фактичний контур заготовки, що деформують, описаний лінійною залежністю (рис.1.17, лінія АВ), отримано Δh_{cp}=0,67Δh. Без урахування додаткового обтиснення металу, що розширюється (рис.1.17, лінія ADC) за формулою (1.8) для системи квадрат-ромб середнє обтиснення при $n_0 = n = 0,5$ рівне $\Delta h_{cp} = \Delta h_n = 0,5\Delta h$ (деΔh_n - середнє обтиснення по приведеному розкату), що істотно менше, ніж обтиснення, отримане в роботі [5] ($\Delta h_{cp} = 0,67\Delta h$).

Найбільш об'єктивну кількісну оцінку середнього обтиснення в калібрі можна отримати виходячи з форми і розмірів фактичної контактної поверхні металу і валків в калібрі, визначуваною формулою (метод4)

$$F = k \cdot b \cdot l_{do}, \qquad (1.20)$$

де b – ширина контакту розкату з калібром в площині виходу; l_{do} – довжина контакту по осі калібру; k - коефіцієнт форми площі контактної поверхні:

$$k = F / F_n, \qquad (1.21)$$

де F_n – площа прямокутника із сторонами b і l_{do}.

За відсутності даних про фактичний контур заготовки, що деформують в цьому калібрі, площа F визначається графо-аналітичним методом. Замінюючи для фактичної площі параметри b і l_{do} через відповідні прямокутники отримаємо:

$$B_{cp} = b\sqrt{k}; \quad l_d = l_{do}\sqrt{k}; \quad l_{do} = \sqrt{R_0 \cdot \Delta h}, \qquad (1.22)$$

де $B_{ср}$ і l_d – середньозважені величини ширини і довжини контактної поверхні (сторони відповідної контактної поверхні у вигляді прямокутника).

При знайденому значенні l_d розраховують середнє абсолютне обтиснення в калібрі по методу відповідної контактної поверхні дорівнює

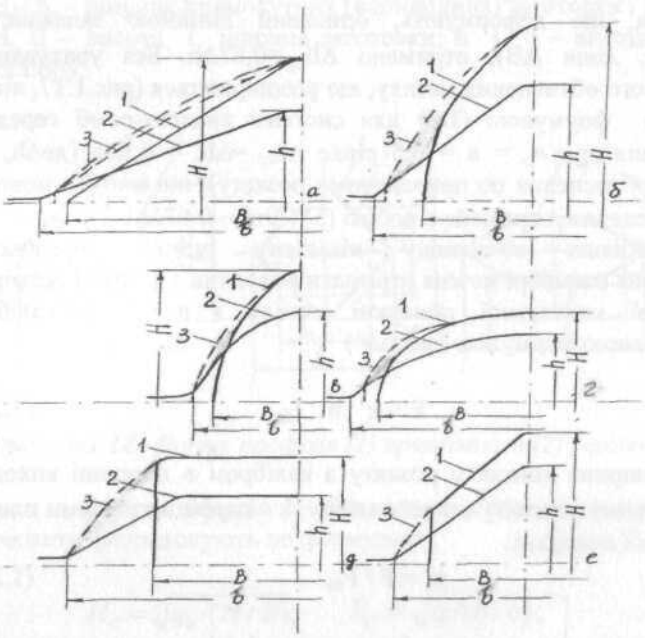


Рис. *1.19. - Системи калібрів: а - ромб-квадрат; б - овал-квадрат; в - овал - ребровий овал; г - ребровий овал-овал; д - квадрат-шестикутник; е - шестикутник-квадрат (1 - контур заготовки; 2 - калібр; 3 - контур обтиснення заготовки)*

$$\Delta h_k = \Delta h_{ср} = l_d^2/R, \qquad (1.23)$$

де R – середній радіус валків в калібрі, який відповідає середній швидкості розкату на виході з валків.

З урахуванням формул (1.22) та (1.23) отримаємо

$$\Delta h_k = k \cdot \Delta h \cdot R_0 / R; \quad n_к = \Delta h_k / \Delta h, \qquad (1.24)$$

де R_0 – радіус по осі калібру.

За рахунок розширення металу в калібрі контур 3 відрізняється від початкового контуру 1 заготовки. Контур 3 фактичного обтиснення металу в калібрі для систем ромб-квадрат, овал-круг визначали за дослідними даними Г. Цоухара [12] і автора [15,17]. Для системи шестикутник-квадрат Δh_k визначали, по аналогії з системою овал-квадрат, а для системи овал-ребровий овал - по аналогії з системою овал-круг. З рис.1.19 виходить, що фактична форма контуру 3 заготовки обумовлена початковими формами заготовки і калібру. Так, при прокатуванні в системі ромб-квадрат форми заготовки і калібру сприятливі для вільного розширення металу по усій довжині осередку деформації.

Проте метал, що розширюється, послідовно обтиснюють похилими стінками калібру у вертикальній площині. Завдяки цьому фактичне середнє обтиснення в цій системі калібрів зростає в порівнянні з обтисненням по приведеному розкату [(див. формулу 1.8).]. Дослідні і розрахункові значення середніх коефіцієнтів k для різних систем калібрів приведені в табл.1.1.

Наявність або відсутність закруглень вершин, зміна діаметру валків мало впливають на відношення $\Delta h_k / \Delta h$. При прокатуванні в системі шестикутник-квадрат (рис.1.19) розширення має місце лише на ділянці (b - B) і фактичний контур обтиснення представляє ламану лінію 1,3. На усій ширині калібру величина обтиснення менша, ніж по осі і тому середнє обтиснення рівне $\Delta h_K = 0{,}84\Delta h$. У цій системі величини $\Delta h_K / \Delta h$, визначені по формулах (1.8) і (1.23) практично співпадають. Найбільші відмінності між Δh_n и Δh_k спостерігаються в тих випадках, коли коефіцієнт форми заготовки n_0 істотно перевищує коефіцієнт форми калібру n [(овал-квадрат, круг-овал, квадрат-шестикутник (овал)].

При прокатуванні в гладких валках форма контактної поверхні мало змінюється по довжині дуги контакту і тому її площу визначають за формулою

$$F = B_{cp} \sqrt{R \cdot \Delta h}\ , \qquad (1.25)$$

де B_{cp} – середня ширина розкату в осередку деформації

$$B_{ср} = 0{,}5(b + B).$$

При прокатуванні в калібрах форма контактної поверхні відрізняється від трапецієвидної (наприклад, на рис.1.17,б). У системі калібрів квадрат-ромб площа контакту описана параболою і може бути розрахована за формулою (1.16) при k = 0,67. Середня ширина контакту розкату з валками визначається за формулою (1.22).

Таблиця 1.1 - Значення коефіцієнта k для розрахунку поверхні контакту різних систем калібрів

Форма		k	Форма		k
Заготовки	Калібру		Заготовки	Калібру	
Овал	Ребровий овал	0,65	Круг	Овал	0,73
Овал	Круг	0,65	Ребровий овал	Овал	0,8
Овал	Квадрат	0,65	Шести-кутник	Квадрат	0,84
Ромб	Квадрат	0,67	Квадрат	Шести-кутник	1,0
Квадрат	Ромб	0,67	Квадрат	Овал	1,06

Рішення рівнянь (1.16), (1,23), (1,25) з урахуванням даних табл.1.1 дає значення $n_k=\Delta h_k/\Delta h$ и $B_{ср}/b$, які представлені в табл.1.2 (при $R_0/R \approx 0{,}96$). Вказані параметри $n_к$ і $B_{ср}/b$ можна використати для розрахунку інших параметрів осередку деформації. У табл.1.2 представлені також дані $n_к = \Delta h_к/\Delta h$ і $B_{ср}/b$, визначені за результатами досліджень Г. Цоухара [12], яким відповідають теоретичні дані.

Надалі величини середніх обтиснень в калібрах простої форми необхідно визначати за даними табл. 1.2.

1.7 Нейтральна лінія калібра

Нейтральна (горизонтальна) лінія ділить калібр на дві частини так, що при рівності середніх діаметрів верхнього і

нижнього валків розкат виходить з валків без вигину переднього кінця. Неправильне визначення нейтральній лінії і розташування калібру у валках викликає при прокатуванні вигин переднього кінця розкату, нерівномірний знос верхнього і нижнього валків і нерівномірний розподіл крутного моменту між шпинделями приводу валків.

Таблиця 1.2 - Розрахункові та дослідні значення n_k и B_{cp}/b

Форма заготовки	Форма калібру	Розрахунок (рис.1.19)		Розрахунок за даними [12]	
		n_k	B_{cp}/b	n_k	B_{cp}/b
Овал	Ребровий овал (круг)	0,65	0,81	0,64-0,7	0,84-0,87
Овал	Квадрат	0,62	0,81	0,6-0,66	0,77-0,84
Ромб (квадрат)	Квадрат (ромб)	0,63	0,83	0,58-0,67	0,78-0,86
Овал	Круг	0,65	0,81	0,64-0,7	0,78-0,86
Круг	Овал	0,71	0,86	0,7-0,75	0,84-0,87
Ребр.овал	Овал	0,78	0,93	–	–
Шестикутн.	Квадрат	0,84	0,91	–	–
Квадрат	Шестикутник	0,98	1,0	–	–
Квадрат	Овал	1,04	1,03	1…1,2	1,05

Положення нейтральної лінії калібру в першому наближенні може бути визначено через положення центру тяжіння фігури калібру, а також рівність контактного дотичного напруження в осередку деформації з боку верхнього і нижнього валків.

Положення центру тяжіння визначають аналітично і експериментально. Для простих відкритих калібрів (квадрат, ромб, круг, шестигранник) лінія центру тяжіння співпадає з точкою перетину вертикальній і горизонтальній осей симетрії. Для фасонних калібрів центр тяжіння визначають графоаналітичним шляхом, розділивши профіль на окремі правильні фігури.

Визначимо положення нейтральної лінії NN, яка проходить через центр тяжіння швелера відносно нижньої поверхні стінки (рис.1.20)

$$y = (q_1 \cdot y_1 + 2q_2 \cdot y_2)/(q_1 + 2q_2), \qquad (1.26)$$

де q_1 і q_2 – площі поперечного перерізу відповідно стінки і полиць; y_1 і y_2 – відстань центрів тяжіння відповідно стінки і полиць відносно нижньої поверхні стінки. З геометричних співвідношень маємо:

$$d \cdot y_1 = d/2; \qquad q_1 = b \cdot d,$$

де d і b – відповідно товщина і ширина стінки калібру :

$$q_2 = (b_1 + a)\, h_1/2;$$
$$y_2 = h_1\,(2a + b_1)\,/3\,(a + b_1). \qquad (1.27)$$

Підставив формулу (1.27) у формулу (1.26) визначимо параметр y. Параметр z (відстань до верхньої площини стінки) рівний $z = d + y$.

Приклад. Визначити положення нейтральної лінії швелерного калібру №10 з розмірами h = 46 мм, b = 100 мм, D = 4,5 мм, a = 7,4 мм, b_1 = 7,8 мм.

З формул (1.26 і 1.27) отримаємо:

$y_1 = 4{,}25/2 = 2{,}125$ мм;
$q_1 = 100 \cdot 4{,}5 = 450$ мм^2;
$q_2 = 7{,}6 \cdot 41{,}5 = 315$ мм^2;
$y_2 = (41{,}5/3)\,[(27{,}4 + 7{,}8)/15{,}2] = 20{,}6$ мм;
$y = (450 \cdot 2{,}125 + 2 \cdot 315 \cdot 20{,}6)/(450 + 630) = 12{,}8$ мм;
$z = 4{,}5 + 12{,}8 = 17{,}3$ мм.

З урахуванням впливу різних величин сил тертя з боку верхнього і нижнього валків параметр z у швелерному калібрі зменшується (периметр нижньої поверхні швелера менший, ніж верхньої).

1.8 Розташування калібрів у валках

При прокатуванні в гарячому стані під впливом випадкових чинників передній кінець розкату згинається на один із валків. Наявність і напрям вигину обумовлені нерівномірністю нагріву розкату по висоті, різним станом верхньої і нижньої поверхонь, різними умовами охолодження валків і розкату, нахилом розкату до валка на вході і тому подібне [1,8]. Таким чином, вигин розкату на виході з валків визначається різними умовами деформації верхніх і нижніх шарів розкату. У тому випадку, якщо з боку верхнього валка обтиснення і випередження розкату більші, ніж з боку нижнього валка, то розкат згинатиметься у бік нижнього валка і може статися його обковування.

Для запобігання обковування валків (рівного діаметру) необхідно на кожен валок встановлювати спеціальні проводки, що ускладнює конструкцію кліті. У виробничих умовах для кожного стана підбирають необхідну різницю діаметрів верхнього і нижнього валків (рис.1.21), при якій забезпечується заданий вигин переднього кінця розкату вгору або вниз. Якщо діаметр верхнього валка більший, його окружна швидкість і швидкість течії металу більші, ніж з боку нижнього валка, і передній кінець розкату зігнеться вниз (верхній тиск). Нижній тиск відповідає випадку вигину переднього кінця на верхній валок.

На сортових станах метал прокатують з верхнім тиском (m_d = 2...15 мм) і проводку встановлюють тільки до нижнього валка (рис.1.21, б), а на обтискних станах із загальним приводом валків – з нижнім тиском ($m_d \approx 10$ мм). Це оберігає ролики рольганга від ушкодження. Тиск m_d є різниця діаметрів валків, тобто $m_d = D_B - D_H$, де D_B і D_H – діаметри відповідно верхнього і нижнього валків.

Після того, як виконаний розрахунок калібрування валків (визначені кількість і форми калібрів) калібри необхідно розмістити відповідним чином на валках прокатного стана. При цьому виходять з основного розміру - початкового діаметру валків D_0 в цій кліті. Початковий діаметр валків D_0 є відстань між осями верхнього і нижнього валків з урахуванням величини зазору S. Ці осі наносять на аркуш паперу (рис.1.22). На рівній відстані від них проводять осьову лінію, що означає середній діаметр валків D_{CP}.

Таким чином, середня лінія валків ділить початковий діаметр валків D_0 на дві рівні частини. Якщо на стані прокатують розкат з верхнім тиском ($D_B > D_H$), то на відстані $m_d/4$ наносять ще

одну лінію (лінію прокатки). Розподіл параметра «m_d» на чотири припускає розподіл верхнього тиску m_d на чотири радіуси валків. Для отримання нормального процесу прокатки із заданим вигином переднього кінця розкату нейтральну лінію калібру поєднують з лінією прокатки і роблять викреслювання усіх елементів калібру з урахуванням необхідного зазору між валками.

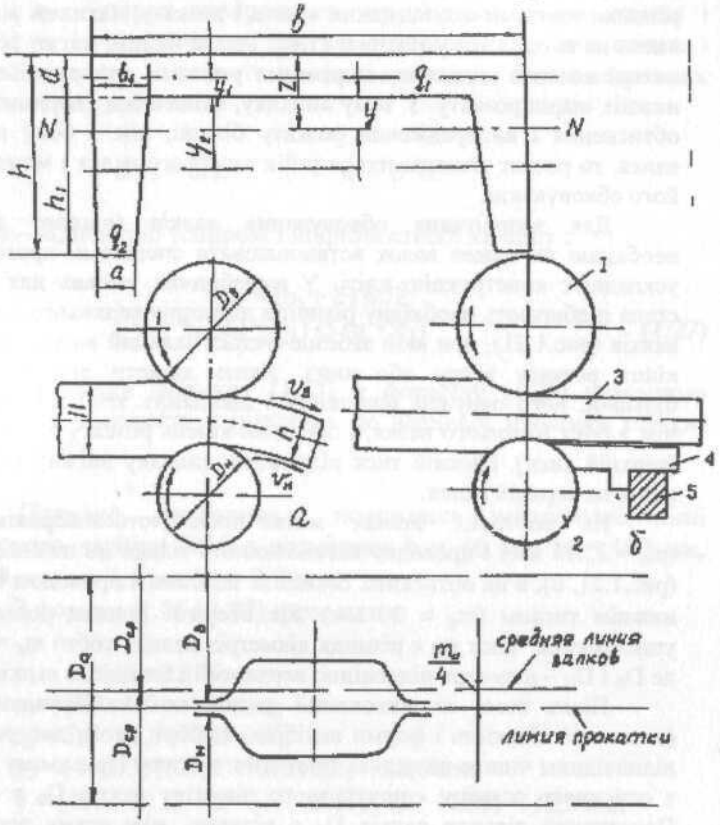


Рисунок 1.20 - Швелерний калібр

Рисунок 1.21 - Прокатка у валках різного діаметру без проводки (а) і з проводкою(б) :1-верхній валок більшого діаметру; 2 - нижній валок меншого діаметру;3 - розкат; 4 - проводка; 5 - брус

Рисунок 1.22 - Схема розташування калібру у валках

2 РОЗШИРЕННЯ МЕТАЛУ В КАЛІБРАХ

При прокатуванні висотна деформація викликає зміщення металу в подовжньому і поперечному напрямах. Співвідношення між поперечною і подовжньою деформаціями металу $k_y=\Delta b/\Delta h$ менше одиниці і метал розкату переважно переміщається в подовжньому напрямі. При цьому, чим більше це переміщення (менше коефіцієнт k_y), тим ефективніше процес подовжнього прокатування.

Розширення – небажане (негативне), але неминуче явище. Величина розширення незначна при прокатуванні тонких розкатів (тим більше широких) і грає істотну роль при прокатуванні середніх по товщині і високих розкатів, у тому числі і широких (блюми, сляби, товсті листи). Наявність неконтрольованого розширення призводить до збільшення бічних обрізків при прокатуванні листового металу. Ускладнює розрахунок формозміни металу при проектуванні калібрувань валків, а саме розрахунку розмірів ширини калібрів. Цим можна пояснити, що найбільший об'єм теоретичних досліджень присвячений саме пошуку і розробці прийнятних залежностей, що дають можливість заздалегідь розрахувати близькі до практичних величини розширень і потім реальні розміри калібрів.

2.1 Розрахунок розширення розкату у гладких валках

Для розрахунку розширення розкату при прокатуванні в гладких валках часто використовують формули О.П. Чекмарьова [1] і О.І. Целікова [7] відповідно:

$$\Delta b_1 = \frac{\Delta h \cdot B_{cp}/h_{cp}}{1+(1+\alpha)(B_{cp}/l_d)^n} \qquad (2.1)$$

$$\Delta b_2 = C_B\left(l_d - \frac{\Delta h}{2f}\right)\Phi\left(\frac{\Delta h}{H}\right), \qquad (2.2)$$

де α – кут контакту; n – тут показник степені (n = 1 – при $B_{cp}/l_d \le 1$; n = 2 – при $B_{cp}/l_d > 1$); f – коефіцієнт тертя;

C_B – коефіцієнт, що враховує вплив ширини розкату, введений у формулу (2.2) О.І. Грішковим; Ф (h/H) – функція обтиснення; h_{CP} – тут середня висота осередку деформації.

З урахуванням залежності Экелунда-Павлова між кутами контакту, тертя і критичного перерізу [7,8], формула (2.2) набирає вигляду

$$\Delta b_2 = C_B l_d \left(1 - \frac{\alpha}{2f}\right) \Phi\left(\frac{\Delta h}{H}\right)$$

або

$$\Delta b_2 = C_B l_d \frac{2\gamma}{\alpha} \Phi\left(\frac{\Delta h}{H}\right), \qquad (2.3)$$

де γ – кут критичного перерізу.

З формули (2.3) виходить, що розширення зростає зі збільшенням параметра $2\gamma/\alpha$. Формули (2.2) і (2.3) отримані за умови гіпотези «плоских перерізів» І.М. Павлова і, отже, дають найбільш точні значення при прокатуванні зі $B_{cp}/l_d > 3$. Нерівномірність деформації металу по висоті осередку деформації збільшує значення $2\gamma/\alpha$ і величину розширення. Проте формула (2.3) не враховує вплив нерівномірності висотної деформації і дає істотну помилку при $l_d / h_{cp} < 3$.

Вивід формули із закону найменшого опору течії металу

Згідно із *законом найменшого опору* течія металу в подовжньому і поперечному напрямах, переміщення металу обернено пропорційне до опору [8]

$$\frac{\ln \lambda}{\ln \beta} = \frac{Q_y / l_d \cdot h_{CP}}{T_{X1} + T_{X2} \ / B_{CP} \cdot h_{CP}} \qquad (2.4)$$

де β – коефіцієнт розширення; λ – коефіцієнт подовження; Q_y – сили опору переміщенню металу в поперечному напрямі; T_{X1} і T_{X2} – контактні сили тертя опору переміщенню металу в

подовжньому напрямі відповідно в зонах відставання і випередження.

Опори Q_y, T_{x1} і T_{x2} для одного валка можна визначити з відомих формул. Приймаємо закон тертя Амонтона ($\tau = f \cdot p_{CP}$) і замінюючи повні сили через контактне напруження отримаємо:

$$\left.\begin{aligned} Q_y &= f_b \cdot p_{cp} \cdot B_{cp} \cdot l_d; \\ T_{x1} &= f \cdot p_{cp} \cdot B_{cp} \cdot R\,(\alpha - \gamma) \cos\left(\frac{\alpha + \gamma}{2}\right) \\ T_{x2} &= f \cdot p_{cp} \cdot B_{cp} \cdot R\,\gamma \cdot \cos\gamma/2; \end{aligned}\right\} \qquad (2.5)$$

де f_b, f – коефіцієнти тертя в поперечному і подовжньому напрямах; B_{CP} – середня ширина розкату; R – середній радіус валка; p_{CP} – середнє нормальне контактне напруження в осередку деформації.

Після підстановки у формулу (2.4) і перетворень отримаємо

$$\ln \lambda / \ln \beta = f_b \cdot B_{cp} / f \cdot l_d.$$

Зважаючи на те, що $\ln \lambda = \ln 1/\eta - \ln \beta$, то

$$\ln \beta / \ln 1/\eta = 1/\left(1 + \frac{f_b}{f} \cdot \frac{B_{cp}}{l_d}\right), \qquad (2.6)$$

де $1/\eta = H/h$ – коефіцієнт висотного обтиснення.

Оскільки $\ln \beta \approx \Delta\, b/B_{cp}$ и $\ln 1/\eta \approx \Delta\, h/h_{cp}$, то після замін у формулі (2.6) будемо мати (для гладких валків)

$$\Delta b = \frac{\Delta h \cdot \dfrac{B_{CP}}{h_{CP}}}{1 + \dfrac{f_b}{f} \cdot \dfrac{B_{CP}}{l_d}} \qquad (2.7)$$

Формулу (2.7) складно використати для розрахунку розширення внаслідок відсутності даних про коефіцієнт тертя f_b, характерним для поперечної течії металу в осередку деформації. Проте формула (2.7) показує, що величина розширення обумовлена не абсолютним значенням коефіцієнта тертя, а співвідношенням коефіцієнтів тертя в поперечному і подовжньому напрямах.

З формули (2.7) також виходить, що при $f_b \cdot B_{cp}/f \cdot l_d = \text{const}$ основним параметром що визначає розширення являється параметр $m=\Delta h \cdot B_{cp}/h_{cp}$. На підставі експериментальних даних різних досліджень показано, що розширення лінійно залежить від параметра m (рис.2.1), а вплив B_{cp}/l_d на розширення представлено на рис.2.2 [8]. (Дослідні дані І.М. Павлова, О.П. Чекмарева, Л.Ф. Машкіна, Д.І. Старченко, О.І. Грішкова, Ю.М. Чижикова, С. Экелунда та ін. Дослідні точки не проставлені).

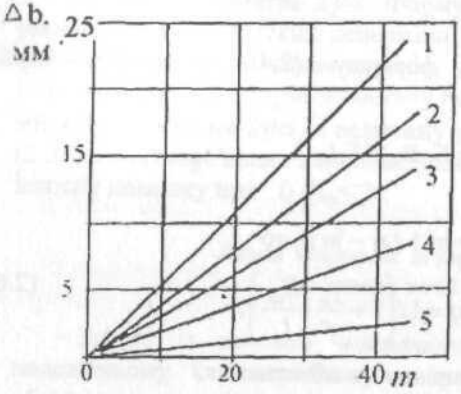


Рисунок 2.1 - Зміна дослідного розширення залежно від параметра ***m*** *при прокатуванні в гладких валках для B_{cp}/l_d: 1 - 0,80; 2 - 0,95; 3 - 1,15; 4 - 1,4...1,75; 5 - 2,0...3,0*

Як виходить з рис.2.1, розширення Δb лінійно зростає зі збільшенням параметра $m=\Delta h \cdot B_{cp}/h_{cp}$ незалежно від відношення B_{cp}/l_d. Збільшення розширення обумовлене збільшенням зміщеного об'єму по висоті металу (обтиснення) і підвищення опору течії металу в подовжньому напрямі за рахунок збільшення довжини дуги контакту і подовжнього напруження σ_3, що підпирає.

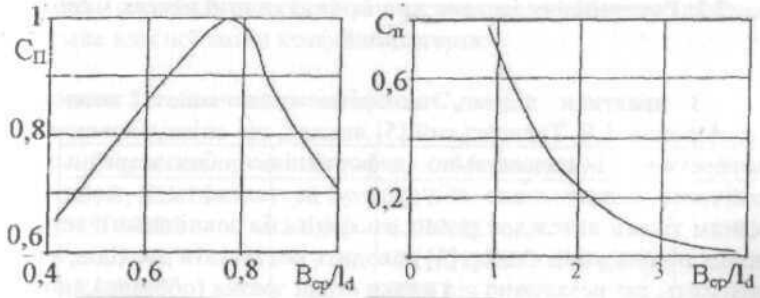


Рисунок 2.2 - Зміна коефіцієнта $C_п$ під впливом ширини розкату ($B_{ср}/l_d$) при m < 50

Останнє ж обумовлює збільшення розширення зі зменшенням відношення $B_{ср}/l_d$ в області зміни $B_{ср}/l_d \approx 0,8 \ldots 4$ (широкий осередок деформації). При прокатуванні з вузьким осередком деформації ($B_{ср}/l_d < 0,8$) - розширення зменшується зі зменшенням $B_{ср}/l_d$ і поперечного напруження σ_2. що підпирає (рис. 2.2).

Математична обробка залежностей рис.2.1, 2,2 дає наступні формули (з урахуванням коефіцієнта $C_М$) :

$$\Delta b = 0,53 \cdot C_П \cdot C_М \cdot \Delta h \cdot B_{СР}/h_{СР}. \qquad (2.8)$$

$$\left.\begin{array}{l} при \dfrac{B_{ср}}{l_d} \le 0,8 \text{ - } C_П = 0,24 + \dfrac{B_{ср}}{l_d}; \\ при \dfrac{B_{ср}}{l_d} > 0,8 \text{ - } C_П = e^{-\left(1,2\frac{B_{СР}}{l_d} - 0,9\right)^{0.9}} \end{array}\right\} \qquad (2.9)$$

Дані до коефіцієнту $C_М$ дивися далі. Ці формули придатні для розрахунку розширення при прокатуванні розкатів в гладких валках (на гладкій бочці) при $B_{ср}/l_d < 4$. Формули (2.8), (2.9) показують більш високу точність розрахунку розширення в порівнянні з відомими формулами [17].

2.2 Розширення металу при прокатуванні різних марок сталей

З практики відомо, що різні сталі мають неоднакові розширення. І.Я. Тарновський [5] вважає, що співвідношення між поперечною і подовжньою деформаціями безпосередньо від хімічного складу стали або сплаву не залежить, а може бути різним тільки внаслідок різних коефіцієнтів зовнішнього тертя за інших рівних умов. Автор [5] наводить результати дослідів, з яких виходить, що незалежно від марки стали зразки (образци), покриті хромом завжди мали при прокатуванні більше розширення, ніж зразки, поверхня яких покрита шаром нікелю, що забезпечує менші значення коефіцієнта тертя.

Досліди [8], виконані при прокатуванні зразків різних сталей при одночасному визначенні коефіцієнта тертя і розширення показали, що в загальному випадку ріст коефіцієнта тертя викликає збільшення показника розширення. З дослідів виходить, що застосування ефективнішого мастила з емульсії полімеризованої бавовняної олії (ПБМ) призводить до зменшення коефіцієнта тертя і розширення для усіх марок сталей.

Міра впливу коефіцієнта тертя на розширення дещо розрізняється для різних марок стали. Так, для сталі марки ШХ15 при зміні різних мастил коефіцієнт тертя змінюється в 1,45 разу, а розширення змінюється всього в 1,24 разу. Менший вплив коефіцієнта тертя на розширення проявляється при прокатуванні зразків стали ЭИ654. Найбільші значення розширення і коефіцієнта тертя отримані при прокатуванні зразків з хромисто-титанової сталі Х25Т, де маємо $f = 0,47$ і $\Delta b/\Delta h = 0,9$. З дослідів також виходить, що для кожної марки стали при більшій мірі зміни коефіцієнта тертя спостерігається менша зміна показника розширення. При середній мірі збільшення коефіцієнта тертя в 1,40 разу в результаті впливу мастила показник розширення зріс в середньому в ~1,15 разу.

Звертає на себе увагу відсутність повного кореляційного зв'язку між збільшенням коефіцієнта тертя при одному і тому ж технологічному мастилі і показником розширення різних марок сталей. Так, при прокатуванні з емульсією з Э-2(Б) сталей ШХ 15 і Х25Т коефіцієнт тертя зростає в 1,36 разу, а показник розширення

$\Delta b/\Delta h$ середній по висоті збільшується в ~1,76 разу, що значно більше власної зміни коефіцієнта тертя.

Таблиця 2.1 - Значення коефіцієнта $C_м$

Марка стали	См	Марка стали	См
Ст.3; ШХ15	1,0	Х17	1,28
45Г17Ю3	0,94	1Х17Н2	1,48
		1Х18Н12ТЮ (ЭИ-654)	1,50
Х18Н9Т	1,2	Х25Т	1,53

Це свідчить про те, що на величину показника розширення роблять вплив і інші чинники, у тому числі внутрішній опір течії металу і характер розширення металу по висоті, які у свою чергу, очевидно, обумовлені впливом коефіцієнта зовнішнього тертя. Вплив марки стали на розширення, на підставі дослідних даних, враховується поправочним коефіцієнтом См (табл. 2.1).

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 $\delta_0 = 0{,}99....1{,}01$. 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_3, 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 приведеної 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_y – 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 овального 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 $B_{ср}/l_d \approx 1$

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)

$$m = \Delta h \cdot B_{ср} / h_{ср}. \qquad (2.12)$$

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 $B_{ср}/l_d$ приводили до постійного $B_{ср}/l_d \approx 0{,}8$, при якому поправочний коефіцієнт $C_П$ дорівнює $C_П = 1{,}0$ (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 ($C_П = 1$) 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 $C_П$ і $C_М$ (розширення по осі калібру):

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

$$\Delta b_0 = 0{,}52\, C_П \cdot C_М\, (3{,}85 + m); \qquad (2.13,а)$$

Ромб - ромб ($m \le 20$) –

$$\Delta b_0 = 0{,}37\, C_П \cdot C_М (4 + m\ ); \qquad (2.13,б)$$

Овал - квадрат ($m \le 20$) –

$$\Delta b_0 = 0{,}8\, C_П \cdot C_М (4{,}25 + m); \qquad (2.13,в)$$

Квадрат - овал ($m \le 52$) –

$$\Delta b_0 = 25\, C_П \cdot C_М [1 - (1 - 0{,}02m)^2]; \qquad (2.13,г)$$

Круг - овал; овал - круг ($m \le 25$) –

$$\Delta b_0 = 0{,}31\ C_п \cdot C_м\ (15{,}3 + m); \qquad (2.13,д)$$

Ребровий овал - овал; овал - ребровий овал ($m \le 25$) –

$$\Delta b_0 = 0{,}31 \cdot C_п \cdot C_м\ (15{,}3 + m). \qquad (2.13,е)$$

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.

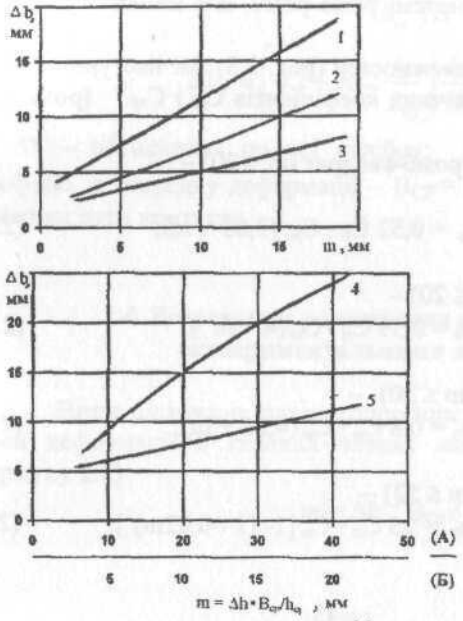


Рисунок 2.3 - Розширення по осі калібрів різних форм при прокатки: 1 - овал-квадрат; 2 - ромб-квадрат (квадрат-ромб); 3 - ромб-ромб; 4 (А) - квадрат-овал (овал-квадрат); 5 (Б) - круг-овал (овал-круг). Шкала А - для кривої 4; шкала Б - для кривої 5. (Дані Г. Цоухара при $C_П$=0,8)

2.5 Розрахунок розмірів калібрів з урахуванням розширення та їх форми

При прокатуванні в калібрах простої форми розширення по осі визначається величиною площі $q_п$ 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 $q_п$ 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 $q_{см}$, яка має бути в ідеальному випадку дорівнює (чи дещо менше) площі власне простору на розширення $q_п$.

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

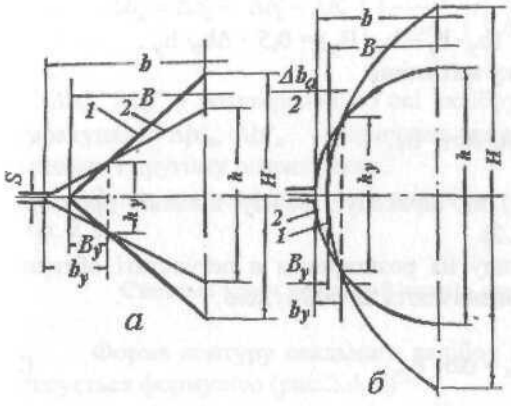


Рисунок 2.4 - Схема деформації розкатів:а - квадратного в ромбічному калібрі; б –овального в круглому калібрі

Система ромб - квадрат

При аналізі цієї системи допускаємо відсутність закруглень ребер, а простір на розширення по осі калібру рівний $\Delta b_п = 2\ (b_y - B_y)$. 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):

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

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

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

чи

$$b_y = 0{,}5 \cdot \Delta b_п/(1 - h \cdot B/H \cdot b). \qquad (2.15)$$

З формул (2.14) і (2.15) отримаємо

$$h_y = \Delta b_п/(b/h - B/H).$$

Площа області простору на розширення в калібрі рівна

$$q_п = (h_y \cdot b_y - h_y \cdot B_y) = 0{,}5 \cdot \Delta b_п \cdot h_y\,. \qquad (2.16)$$

У загальному випадку матимемо

$$q_п = n_п \cdot \Delta b_y \cdot h_y, \qquad (2.17)$$

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

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

$$q_{см} = \Delta b \cdot h_y, \qquad (2.18)$$

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

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

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

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

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

Розширення по осі калібру буде рівне

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

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

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

де $\Delta b_0'$, $\Delta b_0''$ – розширення по осі калібру в першому і другому розрахунках; $\Delta b'_п$, $\Delta b''_п$ – величини простору на розширення в першому і другому розрахунках..

Значення коефіцієнта $n_П$ 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)

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

Площа простору на розширення в калібрі рівна

$$\left.\begin{aligned} q_п = 2n_n \cdot h_y\,(b - B) = n_п \cdot \Delta\, b_п \cdot h_y; \\ q_п = n_n \cdot \Delta b_п \cdot h'_{ср}, \end{aligned}\right\} \qquad (2.23)$$

де $n_п$ – коэффициент, равный $n_п = 0{,}7$ (табл. 2.2).

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

Приклад. Визначимо розміри квадратного калібру при прокатуванні в ньому ромбічної заготовки: H = 81,2 мм, B = 48 мм, $q_0 = 1950$ мм^2, q = 1663 мм^2, діаметр валків по буртах $D_б$ = 445 мм, проміжок S = 4 мм, $n_0 = n = n_п = 0{,}5$, $n_k = 0{,}63$, $B_{ср}/b = 0{,}83$, $C_м = 1$ (табл. 1.2).

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

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

З формул (2.8) і (2.9) маємо

$$C_П = e^{-1{,}2 \cdot 0{,}9 - 0{,}9^{0.9}} = 0{,}807$$

Середнє попереднє розширення дорівнює

$$\Delta b' = 0{,}53 \cdot C_п \cdot C_м \cdot m = 0{,}53 \cdot 0{,}807 \cdot 7{,}1 = 3{,}0;$$

Дійсне розширення по осі

$\Delta b_0' = 3,0/0,5=6,0$ мм,

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

Оскільки заздалегідь задане розширення менше розрахункового $\Delta b_п' < \Delta b_0'$, робимо повторний розрахунок розмірів калібру з новим значенням $\Delta b'_п$. Для даного випадку прокатки приймаємо $\Delta b''_п = 10$ 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)

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

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	$q_п$, мм^2	$n_п$
Заготовки	калібру			
1	2	3	4	5
Ромб (квадрат)	Квадрат (ромб)	$h_y = \Delta b_п / (b/h - B/H)$.	$q_п = 0,5\Delta b_П h_y$	0,5
Ребровий овал (круг)	Овал	$h_y = h\,[1-(B/b)^{2,3}]$.	$q_п = 0,7\cdot\Delta b_П h_y$	0,7
Овал	Ребровий овал (круг)	$h_y = \sqrt{8 b_y r_{обр}}$; $R_{обр} = 0,25\,B[1+(H/B)^2]$; $b_y = 0,5\Delta b_п/(1-r_{обр}/R_{обр})$; $r_{обр} = 0,25\,h\,(h/b + b/h)$		
Прямокутник	Ребровий овал	$h_y = \sqrt{4\cdot\Delta b_П r_{обр}}$		
Квадрат	Овал	$h_y = h\,[1-(1-\Delta b_п/b)^2]$.		
Овал	Квадрат	$h_y = \Delta b_п \cdot h/b$	$q_п = 0,5\cdot\Delta b_П\cdot h_y$	0,5
Шістикутник	Квадрат	$h_y = \Delta b_п \cdot h/b$		
Квадрат	Шістикутник	$h_y = 1,67\Delta b_п \cdot h/b$		

Таким чином, розміри квадратного калібру по конструкційним точкам рівні:

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

$h = q/0,5\ b = 1663/0,5 \cdot 58.7 \approx 56.8$ мм.

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

3 ВИЗНАЧЕННЯ МАКСИМАЛЬНИХ КУТІВ ЗАХВАТУ І ОБТИСНЕННЬ

3.1 Коефіцієнт тертя при гарячому прокатуванні стали

Тертя між металом і валками при прокатуванні виникає внаслідок зачеплення нерівностей контактних поверхонь і зхватування чистих (не окислених і не забруднених) металів. Зовнішнє тертя робить великий вплив на процес пластичної деформації. Вплив зовнішнього тертя при прокатуванні позначається на нерівномірності деформації металу по висоті розкату, на умови захвату розкату валками, на енергосилові параметри прокатки.

Для початку процесу прокатки потрібно захват розкату валками, який, як правило, здійснюється за наявності деякої сили Q, яка заштовхує з боку попередньої кліті або рольганга. З теорії прокатки відомі граничні умови захвату [7,8]

$$\alpha_з = \operatorname{tg} \beta_з \approx f_з = f \cdot k_З \cdot k_Q , \qquad (3.1)$$

де $\alpha_з$ – граничний (максимальний) кут захвату; $\beta_з$ і $f_з$ – кут і коефіцієнт тертя при захваті розкату валками; $k_З$ – коефіцієнт, враховуючий відмінність умов тертя при захваті розкату валками і в процесі, що встановився; k_Q – коефіцієнт, що враховує поліпшення умов захвату при задаванні у валки розкату під дією рольганга або попередньої кліті.

Максимальний кут захвату певною мірою пов'язаний з коефіцієнтом тертя f в процесі, що встановився, який визначається з формули [8]

$$f = f_0 \cdot k_В \cdot k_Т \cdot k_V \cdot k_М \cdot k_{СМ} \cdot k_e, \qquad (3.2)$$

де f_0 – базовий коефіцієнт тертя залежно від температури прокатки; $k_в$, $k_т$, k_v, $k_м$ і $k_{см}$ – поправочні коефіцієнти, що враховують вплив відповідно стану поверхні валків, твердості поверхні валків, окружної швидкості валків, матеріалу розкату і типу мастила; k_e – коефіцієнт, що враховує вплив відносного обтиснення в калібрах.

Значення базового коефіцієнта тертя f_0 в процесі, що встановився (при температурах прокатки t = 800...1200^0 С при v = 4,7 м/с, розкат із сталі марки Ст.3, валки з твердістю поверхні 65 HSD) визначаються з даних[8,15,16]

$$f_0 = 0,27 - 0,1\,[(t/400) - 2]^2, \qquad (3.3)$$

де t – температура прокатки, °С.
Коефіцієнт $k_т$, що враховує вплив твердості валків, рівний

$$k_т = 1 + 0,43\,(1 - HSD/65), \qquad (3.4)$$

де HSD – твердість валків по Шору.
Якщо HSD≤ 65, слід приймати коефіцієнт $k_т = 1,0$.
Коефіцієнт k_v, що враховує окружну швидкість дорівнює (при $v_в$>10 м/с коефіцієнт $k_в = 0,76$)

$$k_v = 0,76 + 0,82\,(1 - 0,1\,v_в)^2. \qquad (3.5)$$

Значення коефіцієнтів $k_в$, $k_{см}$, $k_е$ і $k_м$ приведені в табл.. 3.1 [8, 15-17]. При розрахунку коефіцієнта тертя при захваті металу валками поправочний коефіцієнт $k_е$, що враховує вплив обтиснення слід приймати $k_е = 1,0$.

Приклад. Визначимо коефіцієнт тертя при прокатуванні розкату із сталі марки Ст.08пс з H = 40 мм і h = 28 мм; температура прокатки t = 1130^{0}С, окружна швидкість валків v= 3,5 м/с, валки з чавуну з твердістю 50 HSD, поверхня вироблена, діаметр валків D = 400 мм, охолодження валків водою, завдання розкату в горизонтальні валки рольгангом З табл. 3.1 маємо: $k_в$= 1,0; $k_{см}$ = 1,0; $k_м$ = 1,0; $k_е$ = 1,0. З формул (3.3) - (3.5) отримаємо:

$$f_0 = 0,27 - 0,1\,[(1130/400) - 2]^2 = 0,209;$$
$$k_т = 1 + 0,43\,(1 - 50/65)^2 = 1,02;$$
$$k_v = 0,76 + 0,86\,(1 - 0,1 \cdot 3,5)^2 = 1,13;$$
$$f = 0,209 \cdot 1,02 \cdot 1,13 \cdot 1,0 = 0,240.$$

Коефіцієнти f_3 і k_Q з формули (3.1) визначаються з літератури на підставі дослідних або розрахункових даних [31], обробка яких дозволяє рекомендувати для практичних цілей наступні значення коефіцієнтів:

- у разі завдання розкату в горизонтальні валки рольгангом коефіцієнт k_Q слід приймати рівним k_Q=1,05;
- якщо розкат входить в горизонтальні валки з підпором після виходу з валків попередньої кліті з вертикальними валками, то коефіцієнт k_Q=1,1...1,15;
- якщо розкат входить в горизонтальні валки з підпором із попередньої горизонтальної кліті, то, відповідно до розрахунків, коефіцієнт k_Q слід приймати рівним $k_Q \approx 1,3...1,4$.

Коефіцієнт тертя при захваті валками під дією рольганга рівний

$$f_3 = f \cdot k_3 \cdot k_Q = 0,240 \cdot 1,3 \cdot 1,05 = 0,327.$$

Граничний кут захвату розкату валками для цих умов прокатки рівний

$$\alpha_3 = f_3 = 0,327 \text{ рад } (18,7°).$$

3.2 Коефіцієнт тертя при захваті металу валками (промислові дані)

Коефіцієнт тертя f_3 при захваті розкату валками характеризує граничні умови, при яких розкат втягується у валки. Чисельно коефіцієнт тертя f_3 дорівнює допустимому (максимальному) куту захвату α_3 (рад), визначеному в конкретних умовах прокатки. При підводі розкату до валків в результаті короткочасного ковзання валків її кромки деформуються і при цьому зривається шар окалини, оголяючи чистий метал.

Коефіцієнт тертя ковзання по чистому металу завжди вищий, ніж по шару окалини [8,17]. Крім того, в процесі деформування кромок розкату при наявності води температура металу на цих ділянках знижується і внаслідок цього також відбувається підвищення коефіцієнта тертя. Цьому також сприяють і невеликі нормальні контактні напруження (менші, ніж величини нормальних напружень в сталому процесі). Роблять вплив і випадкові чинники (нерівність кромок розкату, сила завдання розкату у валки).

Досліди показують, що при завданні у валки розкату з пічною окалиною коефіцієнт тертя при його захваті помітно менше, ніж при прокатуванні з повітряною окалиною. Проте пічна окалина є присутньою лише в першому проході (якщо її не видаляють заздалегідь) і тому визначення максимальних кутів захвату можна виконувати для умов прокатки з повітряною окалиною.

На величини коефіцієнта тертя при захваті (максимальний кут захвату) роблять вплив ті ж чинники, що і на коефіцієнт тертя в сталому процесі. В умовах прокатки на блюмінгах, слябінгах, заготовочних станах, в чорнових групах сортових станів температура металу знаходиться в межах 1100...1230^{0}С, окружна швидкість валків - 0,5...2,5 м/с. При прокатуванні у вказаних умовах на нових валках максимальні кут захвату менші, ніж на зношених.

Тому нерідко з метою поліпшення умів захвату розкату поверхню валків необхідно загрубіти насічкою або накаткою, імітуючи цим поверхню зношеного валка.

Дані по дослідженню максимального кута захвату приведені в роботах [1, 2, 17, 18, 19-21]. Виходячи з даних цих досліджень в табл.3.2 представлені величини максимальних кутів захвату (коефіцієнта тертя при захваті) для обтискних станів і чорнових клітей заготовочних і сортових станів. Базові величини $\alpha_{з0}$ і $f_{з0}$ дані при окружній швидкості валків v = 1,6 м/с. Вплив швидкості на величини $\alpha_з$ і $f_з$ враховується коефіцієнтом k_v:

при $v_в$ <1,6 м/с - $k_v = 1{,}24 - 0{,}15v$; (3.6,а)

при $v_в$ = 1,6...3,0 м/с - $k_v = 1{,}56 - 0{,}35v$ (3.6,б)

Таблиця 3.1 - Поправочні коефіцієнти до розрахунку коефіцієнта тертя

Умови прокатки	Коефіцієнти	
	k_i	значення
1	**2**	**3**
Нові чавунні вибілені і сталеві валки	$k_в$	0,75
Чавунні і сталеві валки на початку роботи		1,0
Зношені валки (у кінці роботи, з сіткою розпалу)		1,15
З грубою насічкою сталеві валки		1,3 – 1,4
Відносне обтиснення розкату , %:	k_e	
15 - 30		0,9 – 1,0
30 – 45		1,0 - 1,1
Матеріал розкату :		
Ст. 3, 08кп (пс), ШХ15	$k_м$	1,0
20, Х18Н9		0,95
У5, ЭИ-94		0,90
30ХГСА, А12		0,85
У10, А20		0,80
1Х18Н9Т, 45Г17Ю3, ЭИ-654		1,08
1Х17Н2, Х17		1,15
Х25Т		1,25
Тип мастила :		
Сухі валки	$k_{см}$	1,15
Прокатка з водою		1,0
Емульсія мінерального масла (2%)		0,9
Емульсія полімеризованої бавовняної олії (~2%)		0,8
Захват розкату валками: вільний	$k_з$	1,2...1,35

При прокатуванні розкатів із швидкістю $v_B > 3,0$ м/с слід приймати $k_V = 0,5$.

Відповідно до впливу швидкості валків і впливу вмісту вуглецю в сталі величини максимальних кутів захвату (коефіцієнта тертя при захваті) можна визначити з формул:

$$\left.\begin{aligned} \alpha_3 &= \alpha_{3O} \cdot k_V \cdot k_M; \\ f_3 &= f_{3O} \cdot k_V \cdot k_M \end{aligned}\right\} \qquad (3.7)$$

де α_{3O} і f_{3O} – базові значення максимального кута захвату і коефіцієнта тертя при захваті металу валками з табл.3.2.

Коефіцієнт k_M з роботи [19] для різних сталей рівний:

Матеріал розкату :	Ст.3	Ст.6	Ст.У10
Коефіцієнт k_M :	1,0	0,93	0,85

При прокатуванні в ящичних калібрах максимальний кут захвату металу валками в 1,05...1,15 разу більше, ніж в гладких валках блюмінга, що відповідає дослідним даним [18]. З урахуванням результатів експериментів [15, 18] для практичних умов розрахунку можна прирівняти умови захвату металу в ромбічних і овальних калібрах до умов захвату в ящичних калібрах, а при прокатуванні в калібрах: квадратному, круглому і ребровому овалі - коефіцієнт форми $n_ф$= 1,3...1,4. Тоді максимальний кут захвату буде рівний $\alpha_3 = 28...30^0$ (див. табл. 3.2) (задавання у валки без зусилля).

Заштовхування розкату у валки із зусиллям за допомогою рольганга або попередньої кліті збільшує кут захвату в 1,05…1,2 разу. Для зниження динамічних навантажень при захваті необхідно щоб швидкість задавання зливка (розкату) у валки блюмінга складала 75…85% від горизонтальної складової окружної швидкості валків в точці захвату.

За даними [21] ***для умов блюмінга 1300*** максимальний кут захвату залежить від маси зливка, окружній швидкості валків і швидкості задавання зливка у валки

$$\alpha_3 = k_1 - k_2 n_3 + k_3 \cdot v_{сл}, \qquad (3.8)$$

де k_1 – коефіцієнт, що враховує форму калібру і масу зливка, град. (коефіцієнт k_1 чисельно дорівнює максимальному куту захвату за базових умов коли $n_з$ і $v_{сл}$ близькі до нуля); k_2 і k_3 – емпіричні коефіцієнти; $n_з$ – швидкість обертання валків при захваті (об/мін);

$v_{сл}$ – швидкість задавання металу у валки. За даними [21] коефіцієнти k_1, k_2, k_3 рівні:

Маса зливка, т	12	8,5
k_1 (гладка бочка) (град.)	24	28
k_1 (у калібрі)(град.)	26	30
k_2	0,30	0,22
k_3	1,8	1,8

З формули (3.8) виходить, що збільшення окружної швидкості валків сприяє зниженню максимального кута захвату, а збільшення швидкості задавання зливка у валки - підвищенню максимального кута захвату. У останньому випадку поліпшенню умов захвату сприяє пластичне деформування кромок розкату, утворення деякої площини контакту з валками і підвищення сил тертя на контакті з валками. При розрахунку режиму деформації на блюмінгу 1300 для визначення максимальних кутів захвату можна використати формулу (3.8).

При прокатуванні розкатів на слябінгу 1100 максимальний кут захвату менший, ніж на блюмінгу (гладка бочка) (див. табл. 3.2). Ще менші кути захвату ($\alpha_{зо}$ = 16...17^0 мають місце при прокатуванні на чавунних валках з вибіленою поверхнею (твердість≥65HSD). У клітях чорнової групи широкоштабового стана застосування валків з легованої сталі збільшує максимальний кут захвату до $\alpha_{зо}$=19...20^0, що в 1,18 разу більше, ніж в чавунних вибілених валках. Проте в порівнянні з прокаткою на слябінгу цей кут захвату в 1,05...1,1 разу менше.

У чорнових клітях неперервного широкоштабового стана максимальний кут захвата мало залежить від окружної швидкості валків, що змінюється в межах v = 1...2,5 м/с, що обумовлено одночасним впливом різних чинників (зміна температури металу, стан поверхні і матеріалу валків і тому подібне). При виборі реальних параметрів прокатки металу дані, що отримуються по формулах (3.7) і (3.8) мають хороший збіг. Використовуючи формули (3.2), (3.6) - (3.8) розраховують максимальний кут захвату по різних методиках і для розрахунку допустимого обтиснення слід приймати мінімальне його значення.

Таблиця 3.2 - Максимальні куті захвату при прокатуванні розкатів маловуглецевої сталі

Умови прокатки	Максимальні базові значення		Базова швидкість валків υ, м/с
	$\alpha_{з0}$, град	$f_{з0}$	
Блюмінг 1150 (прокатка на гладкій бочці)	22	0,385	1,6
Блюмінг 1150 (прокатка в ящичному калібрі)	24...25	0,4...0,44	1,6
Заготовочні і сортові стани (прокатка в ящичних, ромбічних, овальних калібрах) :			
задавання у валки без зусилля	24...25	0,4...0,44	1,6
задавання у валки із зусиллям	28...30	0,49...0,52	1,6
Заготовочні і сортові стани (прокатка в квадратних, круглих калібрах і ребрових овалах) :			
задавання у валки без зусилля	28...30	0,49...0,52	1,6
задавання у валки із зусиллям	32...34	0,56...0,6	1,6
Слябінг 1100	21	0,365	1,6
Чорнові кліті неперервного широкоштабового стана ($t = 1100...1200^0$ C) :			
чавунні вибілені валки	16...17	0,28...0,30	1...2,5
з легованої сталі	19...20	0,33...0,35	1...2,5

3.3 Вплив форми калібру на умови захвату розкату валками стана

При прокатуванні в прямокутному (ящичному) калібрі розкату, ширина якого B менше ширини дна калібру b_d, умови захвату відповідають прокатки в гладких валках (рис.3.1, а) і визначаються кутом тертя ($\beta_з$) при захваті і коефіцієнтом форми $n_ф = 1{,}0$. При прокатуванні розкату, ширина якого більше ширини дна калібру ($B > b_d$), на умови захвату впливають також сили, що виникають на бічних стінках калібру. Тому величина максимального кута захвату в прямокутному калібрі визначається не лише кутом тертя (коефіцієнтом тертя), але і кутом нахилу стінок калібру, мірою стискування металу в нім (B/b_d).

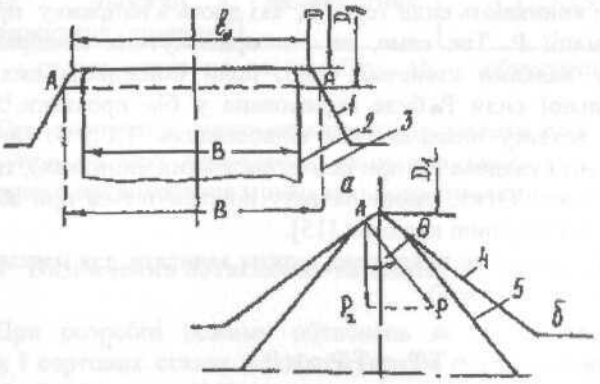


Рисунок 3.1 - Схема захвату прямокутного розкату в ящичному калібрі(а) і ромбічного розкату в квадратному калібрі (б):
1, 4 - контур калібру; 2 - розкат при $B<b_d$; 3 - розкат при $B>b_d$;
5 - контур ромбічної заготовки.

Очевидно, що максимальний кут захвату зростає зі збільшенням міри стискування розкату і зі збільшенням кута нахилу бічних стінок калібру до вертикалі.

Розкат в точках А, має спочатку невелику контактну поверхню із стінками калібру. У міру просування розкату в середину калібру поверхня бічного контакту збільшується і зростають сили тертя, діючі на цих поверхнях.

Ці сили примусово притискають торець розкату до дна калібру, забезпечуючи деформування горизонтальних кромок і захват його валками при $\alpha_з > f_з$. Чим більше міра стискування розкату в калібрі, тим більше коефіцієнт форми калібру $n_ф$ і граничний кут захвату в калібрі.

Значення коефіцієнта $n_ф$ для прямокутних калібрів дані в табл.3.3 [18].

Розглянемо умови захвату розкату при прокатуванні в ромбічному, квадратному і овальному калібрах. У момент зіткнення металу з валками в точках А (рис.3.1,б) при незначній поверхні контакту відбувається стирання і деформування кутів розкату, внаслідок чого передній кінець її проникає углиб калібру, первинний кут захвату дещо зменшується і збільшується площа контакту розкату з валками (осередок А). В результаті контакту розкату з валками і деякого її затискання в ромбічному калібрі виникають сили тертя Т, які діють в напрямку прокатки, і деформації Р. Так само, як і в прямокутних калібрах, захват металу валками станеться тоді, коли рівнодійна сил тертя і нормальної сили Р буде спрямована у бік прокатки. Оскільки умови захвату визначаються відношенням T/P_z, то чим менше радіальна складова P_z (при інших постійних чинниках), тим краще буде захват. Отже, умови захвату покращуються при збільшенні кута θ при вершині калібрах [15].

Враховуючи викладене, можна записати для максимального кута захвату ($Tx \approx T$)

$$\alpha_з = T/P_z = T/P \cos \theta. \qquad (3.9)$$

але оскільки $T/P = \operatorname{tg} \beta_з \approx \beta_з \approx f_з$, то

$$\alpha_з = f_з/\cos \theta \qquad (3.10)$$

З формули (3.10) виходить, що коефіцієнт форми $n_ф$, рівний $n_ф = 1/\cos\theta$. Граничний кут захвату в калібрі рівний

$$\alpha_{зк} = \alpha_з \cdot n_ф. \qquad (3.11)$$

Граничні (що допускаються) кути захвату мають бути дещо більше фактичних кутів захвату в первинних точках

контакту розкату з поверхнею валків. Так, при прокатуванні в квадратних, ромбічних і круглих калібрах фактичний кут захвату рівний

$$\alpha_з = \sqrt{2\Delta h_0 / D_0} = \sqrt{\Delta h_0 / R_0}\,, \qquad (3.12)$$

Таблиця 3.3 - Значення коефіцієнта форми $n_ф$ калібру, що враховує вплив додаткових сил

Калібр	Коефіцієнт $n_ф$
Гладка бочка	1,0
Квадратний, круглий	1,41
Ребровий овал	1,30
Овал, ромб при b/h: 1,15...3,0	1,30...1,1
Овал плоский, шестикутник, прямокутник (ящичний)	1,1...1,15

де R_0 – радіус валка по осі калібру; Δh_0 – обтиснення по осі калібру.

При визначенні максимальних кутів захвату слід виконати розрахунок по усіх приведених вище методиках і набути для подальшого використання мінімальні його значення.

3.4 Визначення обтиснення валками, що допускається

При розробці режиму обтиснень на обтискних, заготовочних і сортових станах не обмежуються тільки проектуванням розмірів і форм калібрів, але враховують і інші чинники, що роблять вплив на вибір обтиснення. До таких чинників відносяться: умови захвату металу валками, міцність валків, потужність головного двигуна, стійкість розкату у валках проти кантування, пластичні властивості металу, що деформується.

Правильне врахування усіх цих умов дозволяє розробити раціональний режим деформації металу, який забезпечить високу якість прокату при максимальній продуктивності стана.

Визначення обтиснення, що допускається, з умов захвату металу валками

Природний захват розкату валками відбувається за таких умов

$$\alpha_з = f_з \cdot k_з \cdot k_Q. \qquad (3.13)$$

З робіт [1, 2, 7] відомо, що $f_з$ і $\alpha_з$ помітно збільшуються при зменшенні окружної швидкості валків і збільшенні шорсткості їх поверхні. У зв'язку з цим захват розкату валками блюмінга виконують при оборотах валків 10...20 в хв. (~ 0,75…1,5 м/с), а поверхню валків блюмінгів необхідно загрубіти фрезеруванням, наплавленням, накаткою. Враховуючи відому залежність обтиснення, що допускається, дорівнює

$$\Delta h_d = R \cdot \alpha_з^2 \qquad (3.14)$$

Визначення обтиснення, що допускається, виходячи з міцності валка

Режим деформації металу повинен передбачати такі обтиснення, при яких валки стана не можуть бути зруйновані одиничним навантаженням. Відома формула для розрахунку сили прокатки

$$P = p_{ср} \cdot B_{ср} \sqrt{R \cdot \Delta h}\,.$$

Після зведення в квадрат обох частин і рішення відносно Δh при силі P_d, що допускається, отримаємо

$$\Delta h_d = \frac{1}{R}\left(\frac{P_d}{p_{CP} \cdot B_{CP}}\right)^2 \qquad (3.15)$$

де P_d – допустима сила на валки; $p_{ср}$ – середнє нормальне контактне напруження (СНКН).

У формулу (3.15) входить два невідомих Δh_d і $p_{ср}$. СНКН невідоме тому, що воно може бути визначене тільки при відомому обтисненні Δh. Тому рішення формули (3.15) виконується

ітераційним методом (методом наближень). Зважаючи на те, що сила прокатки практично лінійно залежить від обтиснення запропоновано рішення, що спрощує розрахунок обтиснення, що допускається [14] з формули

$$\Delta h_d = \Delta h' + (P_d - P') (\Delta h'' - \Delta h') / (P'' - P'), \qquad (3.16)$$

де $\Delta h'$ і $\Delta h''$ – абсолютні обтиснення відповідно мінімальне і максимальне, прийняті для розрахунку; P' і P'' – розрахункова сила прокатки, що відповідає обтисненням $\Delta h'$ и $\Delta h''$.

При розрахунку обтиснення, що допускається, задають величини обтиснень $\Delta h'$ і $\Delta h''$, можливі для цього стана і по відомих формулах розраховують сили прокатки P' і P''. Наприклад, для блюмінга можливі обтиснення знаходяться в межах 70...100 мм. Тому, величини $\Delta h'$ і $\Delta h''$ можна прийняти рівними відповідно $\Delta h' = 70$ мм і $\Delta h'' = 100$ мм.

Значення сили прокатки, що допускаються, визначають виходячи з міцності бочки і шийки валка на вигин. Для двохвалкової кліті маємо (МН):

для бочки

$$P_d = 0{,}1 \cdot D^3 \cdot [\sigma_{из}] / (1 - x/a) \cdot x; \qquad (3.17)$$

для шийки валка

$$P_d = 0{,}4\, d_ш^3 \cdot [\sigma_{из}] / l_ш, \qquad (3.18)$$

де $[\sigma_{из}]$ – напруження, що допускається, на вигин, Н/мм^2; D – діаметр валка в небезпечному перерізі, м; a – відстань між натискними гвинтами, м; x – відстань від осі натискного гвинта до небезпечного перерізу, м; $l_ш$ – довжина шийки валка, м; $d_ш$ – діаметр шийки валка, м.

Для розрахунку Δh_d по формулі (3.16) використовують менше значення P_d, визначене з формул (3.17) і (3.18).

Визначення обтиснення, що допускається, виходячи з крутного моменту прокатки

Після розрахунку P′ і P″ визначають і крутні моменти M′ і M″ для забезпечення прокатки розкату з обтисненнями відповідно Δh′ і Δh″. Крутний момент прокатки, що допускається, рівний

$$M_d=0{,}2d^3_ш\,[\tau_{KP}], \qquad (3.19)$$

де $[\tau_{KP}]$ – напруження матеріалу валка на кручення, що допускається.

Напруження, що допускається для сталевих валків блюмінга рівні (Н/мм$_2$):

$[\sigma_{из}]$= 100…130; $[\tau_{KP}]$ =80…90.

Після розрахунку M′ і M″ визначають обтиснення, що допускається за формулою

$$\Delta h_d = \Delta h' + (M_d - M')\,(\Delta h'' - \Delta h')\,/\,(M''-M'), \qquad (3.20)$$

Потім, встановлюють обтиснення, що допускається, мінімальне з трьох розрахункових значень.

Для станів, що мають в окремих проходах перевантаження головного приводу, виконують також визначення еквівалентного моменту ($M_{ЕКВ}$), значення якого не повинні перевищувати номінальний крутний момент ($M_{НОМ}$) (для двох валків):

$$M_{НОМ}=0{,}975N_d\cdot\eta\cdot10^{-2}\,/n_d\ ; \qquad (3.21)$$

$$M_{ЕКВ}=\sqrt{\frac{\sum M^2\cdot t_M+\sum M^2_{XX}\cdot t_П}{t_M+t_П}}, \qquad (3.22)$$

де N_d – потужність двигуна, який встановлено, кВт; η - ККД передачі (η≈0,95); n_d – номінальне число обертів двигуна (число обертів двигуна (число обертів двигуна у сталому процесі прокатки: 40…45об/хв); M – сумарній момент прокатки за всі проходи; M_{XX} – момент холостого ходу двигуна, кВт; t_M і $t_П$ – час, відповідно, прокатки і холостого ходу (пауз) (с або хв.).

Величини обтиснень виходячи із стійкості розкату проти кантування і пластичних властивостей металу встановлюють експериментально.

Приклад: 1. Визначити обтиснення, що допускається, для блюмінга з умов захвату при R = 500 мм, $f_з = 0,385$ і $k_M = 1,0$ (сталь марки Ст.3), $v_B = 1,2$ м/с. Отримаємо [формули (3.6) (3.7)]:

$$k_V = 1,25 - 0,15 \cdot 1,2 = 1,07;$$

$$f_з = 0,385 \cdot 1,07 \cdot 1,0 = 0,412;$$

$$\Delta h_d = 500 \cdot 0,412^2 = 85 \text{ мм}.$$

2. Визначити обтиснення, що допускаються, для блюмінга виходячи з міцності валків і крутного моменту при R = 0,5, a = 3,4 м, x = 1,6м, $[\sigma_{из}]$=130 Н/мм^2, $l_ш$ = 0,9 м, $d_ш$ = 0,72 м. Встановлена потужність головного приводу, що допускається , рівна N_d =13000 кВт, номінальне число обертів n_d=40об/хв. Отримаємо:

по бочці валка

$$P_d = 0,1 \cdot 1^3 \cdot 130/(1-1,6/3,4) \cdot 1,6 = 15,3 \text{ МН};$$

по шийці валка

$$P_d = 0,4 \cdot 0,72^3 \cdot 130/0,9 = 21,5 \text{ МН}.$$

Найбільш небезпечним є переріз бочки валка. Тому для розрахунку використовуваний P_d = 15,3 МН. Розрахунок за відомими формулами для прийнятих обтиснень $\Delta h'$ = 60 мм і $\Delta h''$, = 110 мм дає значення P' і P'' рівні P' = 8МН і P'' = 17МН. З формули (3.16) отримаємо:

$$\Delta h_d = 60 + (15,3 - 8)(100 - 70) / (17 - 8) = 82 \text{мм}.$$

3. Для отриманих P' і P'' (величини моментів крутіння) дорівнюють M' = 1,1 МНм і M'' = 3,5МНм. З формули (3.20) і (3.21) отримаємо:

$$M_{ном} = 0,975 \cdot 13000 \cdot 0,95 \cdot 10^{-2} / 40 = 3,0 \text{ МНм};$$

$$\Delta h_d = 60 + (3,0 - 1,1)(100 - 70)/(3,5 - 1,1) = 84 \text{ мм}.$$

Таким чином, маємо (мм):

Δh_d за умов захвату	Δh_d за умов міцності валків	Δh_d за умов крутного моменту
85	82	84

З даних таблиці виходить, що в кожному проході величина обтиснення не може бути більшою за Δh_d =82мм. Крим того, при прокатуванні на блюмінги з умов сталості розкату проти кантування необхідно мати співвідношення його сторін після виходу з валків *b/h:*

гладка бочка - ≤ 1,3;

калібр ящиковий - ≤ 1,7.

З метою виключення випадків буксування валків і перевантажень внаслідок впливу випадкових чинників рекомендують зменшувати розрахункове обтиснення, що допускається, на 7…10%, тобто

$$\Delta h_d = (0{,}9 \ldots 0{,}93)\, \Delta h_d.$$

4 ХАРАКТЕРИСТИКА КАЛІБРУВАНЬ ВАЛКІВ ПРОКАТНИХ СТАНІВ

4.1 Калібрування валків блюмінга

Обтискний реверсивний стан (блюмінг)[14,23] призначений для прокатки квадратних заготовок (блюмів) з розмірами ~200 х 200 мм до ~400 х 400 мм. Стан блюмінг має одну кліть з двома горизонтальними валками діаметром 1100...1300 мм. На бочках валків врізані рівчаки, що утворюють калібри ящичного типу (рис.4.1). На блюмінгах, де прокатують заготовки з маловуглецевих сталей у валки врізають чотири калібри, а для прокатки заготовок з легованих марок сталей у валки блюмінга врізають п'ять ящичних калібрів (більше проходів, менші розміри заготовок).

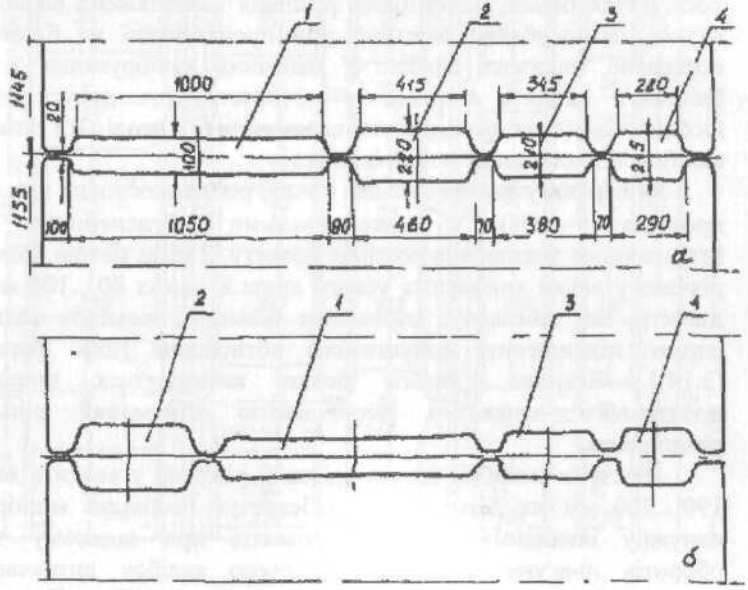


Рисунок 4.1 - Схеми розташування калібрів : а - з гладкою бочкою з краю валка; б - в середині.

При прокатуванні блюмів з маловуглецевих марок сталей застосовують дві схеми розташування калібрів на валках: гладка бочка з краю валка (рис. 4.1,а) і в середині (рис.4.1, б).

В обох схемах прокатку зливка починають на гладкій бочці при її ширині більше максимальної ширини конусного зливка. Тому прокатка зливка (розкату) на гладкій бочці (перший калібр) відбувається з вільним розширенням. Після закінчення прокатки на гладкій бочці розкат передають в калібр 2, а потім, у міру зменшення його розмірів, в калібри 3 і 4(5).

При використанні першої схеми розкат за допомогою лінійок маніпулятора послідовно переміщають від першого до четвертого калібру, а в другій схемі на переміщення розкату з калібру 2 до калібру 3 витрачається більший час, ніж в першій схемі і тому продуктивність другої схеми буде дещо менше.

Проте при використанні другої схеми розташування калібрів досягається більш рівномірний розподіл навантажень на шийки валків, що особливо важливо при прокатуванні на блюмінгу порівняно широких слябів. У завдання калібрування валків блюмінга входить визначення обтиснень, що допускаються, виходячи з різних обмежуючих параметрів (см розділ3) і розмірів калібрів відповідно до розмірів розкату.

У першому калібрі (гладка бочка) роблять основну кількість проходів (~60%) з максимальними обтисненнями для інтенсивного зменшення розмірів розкату. З цією метою врізання рівчака у валки виконують усього лише в межах 80…100 мм на діаметр, що забезпечує отримання більшого діаметру валків і сприяє підвищенню допустимого обтиснення [див. формулу (3.14)]. Ширина гладкої бочки визначається шириною початкового зливка і необхідністю отримання вільного розширення.

Наступні калібри мають врізання рівчаків у валки в межах 190…200 мм на діаметр, що забезпечує необхідні міцність і окружну швидкість прокатки розкатів при заданому числі оборотів двигуна. Ширина останнього калібру визначається шириною готового розкату в останньому проході. В перших трьох (рис.4.1,) на гладкій бочці і в ящичних калібрах роблять по декілька проходів (2-6), а в останньому - (чистовому) - один прохід.

Розміри чистового калібру визначають розміри блюма, що виходить. На сучасних меткомбінатах виробництво великих заготовок здійснюють на МБЛЗ (машини безперервного литва заготовок).

4.2 Калібрування валків заготовочних станів

Початковим продуктом для заготовочних станів є блюми з блюмінгів (блюмінга - слябінгу) і машин безперервного лиття заготовок. У складі прокатних цехів працюють заготовочні стани тріо (тривалкові), обтискні кліті тріо сортових станів лінійного типу.

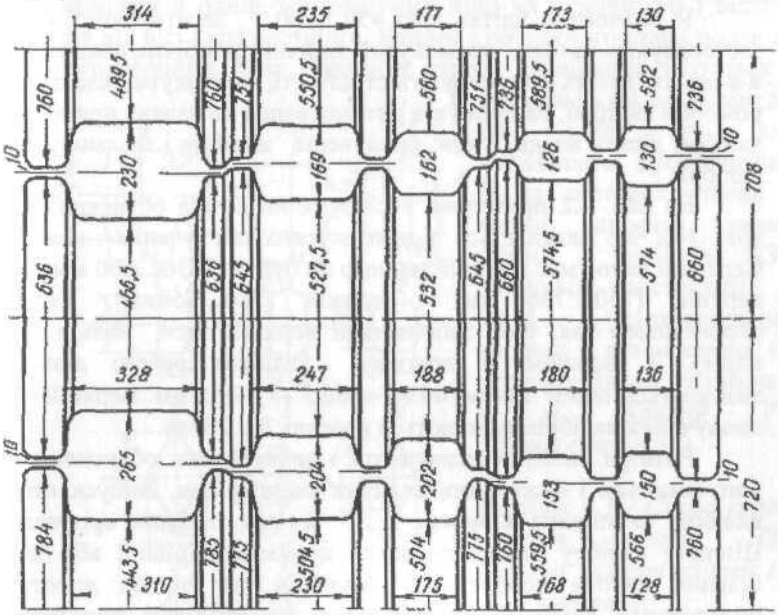


Рисунок 4.2 - Схема розташування валків кліті тріо

Після блюмінгів встановлені неперервно-заготовочні стани та трубозаготовочні стани з послідовним розташуванням клітей [14.23].

Заготовочні кліті тріо мають три валки, які обертаються від валків шестерінчастий кліті від одного приводу з маховиком. Застосування нереверсивних двигунів дозволяло застосовувати великі обтиснення, оскільки завантажувальна здатність приводу з маховиком в кілька разів вище, ніж двигуна без маховика. Заготовочні кліті тріо застосовують на прокатних станах старої побудови (старого лінійного типу).

Окрім заготовочних станів, що стоять окремо і мають у своєму складі 1-3 кліті, застосовують також обтискні кліті у складі сортових і дротяних станів лінійного типу (завод "Дніпроспецсталь"). Ці обтискні кліті мають валки діаметром 450…700 мм і прокатують дрібну квадратную заготовку з розмірами ~40х40...130х130мм.

У обтискних клітях тріо 450…700 заготовочних станів застосовують калібри: прямокутні (ящичні), ромбічні, квадратні, а в інших клітях застосовують стрілчасті, шестикутні, квадратні і ромбічні калібри. Залежно від розташування на валках прямокутні калібри ділять на два типи: сполученні калібри і не сполученні калібри.

На рис. 4.2 приведено калібрування валків обтискної кліті тріо 700, що складається з прямокутних сполучених калібрів. Середній валок має менший діаметр по буртах (636…660 мм), чим верхній (760…736 мм) і нижній (780…760мм). Калібри спроектовані так, щоб забезпечити верхній тиск валків (див. вище). У першому і другому калібрах робочі діаметри змінюються таким чином 443 →466,5 → 489,5 мм. Верхній тиск сполучених калібрів змінюються в межах 8…28 мм.

Розміри калібрів визначають з урахуванням обтиснень, що допускаються і фактичних величин розширення. Випуск стінок калібрів виконують в межах 5...15 % від глибини врізування. Ширину калібру нижнього валка приймають рівної або дещо більшої висоти попереднього калібру, так як ця висота в подальшому калібрі після кантівки на 90^0 стає початковою шириною розкату. Ширину рівчака біля основи середнього валка застосовують на 2...3 мм більше, ніж у нижнього валка. Радіуси закруглення внутрішніх кутів застосовують в межах 10...20 % від ширини калібру. Радіуси закруглених буртів зазвичай приймають на 5 мм менше радіусів закруглення внутрішніх кутів калібру.

В кліті тріо заготовку прокатують таким чином (номер проходу – розхил між валками; к – кантування):

1(265)- 2(230к)- 3(204)- 4(169к)- 5(202)-→
→ 6(162к)- 7(153)- 8(126к)- 9(150).

Непарні проходи виконують в калібрах нижнього горизонту (між нижнім і середнім валками), а парні – у калібрах верхнього горизонту (між верхнім і середнім валками). Для виключення переповнювання металом ширина рівчака середнього валка більша, ніж двох інших валків, а ширина рівчака верхнього валка більша, ніж нижнього валка.

Неперервно-заготовочні стани (НЗС) встановлюють за блюмінгами в одній технологічній лінії на відстані 50 і більше метрів від вісі кліті блюмінга. Блюми з обтискного стана подають на заготовочний стан, завдання якого - отримання заготовок з розмірами 60 х 60 мм до 200 х200 мм для подальшого прокатування їх на сортових станах в готові профілі різної форми і розмірів. НЗС останньої конструкції з 14-ю двохвалковими клітями встановлено на металургійному комбінаті в м. Кривий Ріг ("Криворіжсталь").

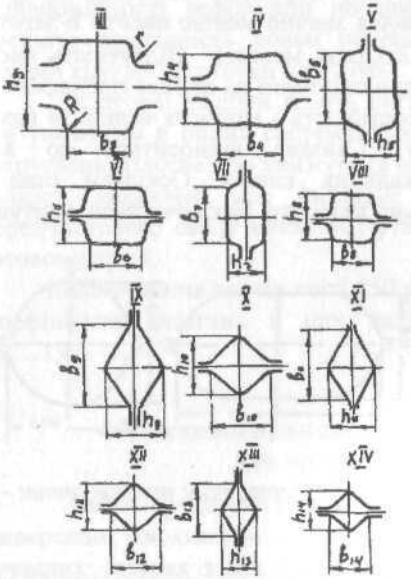


Рисунок 4.3 - Схема калібрування валків НЗС (ящичні калібри клітей I і II не показані).

Кліті розташовані в трьох групах: обтискний – 2 кліті з горизонтальними валками діаметром 900 мм; чорновий-4 кліті з горизонтальними і 2 кліті з вертикальними валками діаметром 900

і 730 мм; чистовий – 3 кліті з горизонтальними і 3 кліті з вертикальними валками діаметром 530 мм.

На стані прокатують заготовку для сортових станів комбінату з блюмів з розміром до 400 х 400 мм і масою до 12 т (НЗС 900/700/500). У відмінність від раніше за встановлених, стан має індивідуальний привід валків в усіх клітях.

Наявність клітей, що чергуються, з горизонтальними і вертикальними валками виключає операції кантування розкату на 90^0 в процесі прокатки, а індивідуальні приводи для валків кожної кліті дають можливість регулювати окружні швидкості валків в залежності від зміни умов деформації металу на стане.

Регулювання швидкісного режиму валків потрібне для отримання процесу прокатки з мінімальними подовжніми напруженнями в розкаті від натягнення або підпору між клітями.

На рис. 4.3 представлено калібрування валків НЗС. У чорновій групі клітей (кліті I - VIII) у валки врізані калібри ящичного (прямокутного) типу. Причому величина врізування рівчака h_k на діаметр валка значно менше висоти h заготовки (h_k /h ≈ 0,4...0,8 (в 1,2…2,5 разу менше). Відсутність високих похилих стінок знижує вплив сил тертя на процес прокатки і силу прокатки, підвищує зносостійкість і міцність валків за рахунок збільшення їх діаметру. Сказане відноситься до валків горизонтальних і вертикальних клітей. Оскільки стан має горизонтальні і вертикальні кліті, то виключається кантування розкатів.

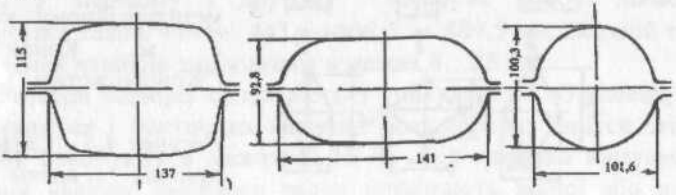


Рисунок 4.4 - Система калібрів : підготовчий прямокутник - овал - круг.

У чистовій групі клітей застосовують систему калібрування ромб-квадрат (кліті IX - XIV). Причому, першим калібром чистової групи в кліті IX є ромбічний калібр, в якому прокатують квадратну початкову заготовку після попереднього кантування на

45^0 (на діагональ). У шести клітях розкат обтискають в калібрах системи ромб-квадрат. Зазор між валками зменшують в клітях IX - XIV с 10 до 5 мм.

Трубну заготовку діаметром 90...270 мм прокатують на спеціалізованому трубозаготовочному стані 900/750 в лінії з блюмінгом 1150. (Дніпровський меткомбінат, м. Дніпродзержинськ). Сам трубозаготовочний стан має у своєму складі одну обтискну реверсивну двохвалкову кліть 900 і три двохвалкові нереверсивні кліті 750, які розташовані послідовно одна за одною. Відстань між кожною парою клітей дещо більше максимальної довжини розкату.

Трубну заготовку з вуглецевої сталі, як правило, прокатують в системі калібрів : підготовчий прямокутник - овал - круг (рис. 4.4). Роль підготовчого прямокутного калібру I полягає в усуненні ребер прямокутної заготовки і зниженні нерівномірності деформації при прокатуванні в овальному калібрі 2. Зниження нерівномірності деформації по ширині калібру виключає або зменшує вірогідність появи поперечних тріщин на поверхнях готової круглої заготовки для труб.

Підготовчі калібри мають вигляд прямокутника з плоским (чи увігнутим в інших системах) дном і збільшеними радіусами закруглень. Плоске або увігнуте (а не опукле) дно прямокутного калібру виключає або зменшує вірогідність переповнення передчистового овалу металом і утворення лампасів і заходів на готовому крузі.

Калібрування валків кліті 750 роблять емпіричним методом. Коефіцієнти витягань в цих калібрах знаходяться в межах 1,2…1,4.

4.3 Основні принципи калібрування валків для прокатки рельсов

Рейки прокатують на реверсивних станах лінійного типу (реверсивні двохвалкові і нереверсивні тривалкові стани) і на сучасних станах з послідовним розташуванням клітей. Прокатують рейки масою 43…75 кг на метр. Рейка належить до числа несиметричних профілів і характеризується неоднаковим розподілом металу між окремими його частинами, внаслідок чого неможливо досягти однакового обтиснення усіх частин профілю

при будь-якій системі калібрування. Найбільше обтиснення отримує шийка, а головку і підошву обтискають слабкіше.

Із-за матеріальної зв'язаності усіх частин профілю при неоднаковому їх обтисненні відбувається вимушене подовження ділянок, що менш обтискають, що неминуче супроводжується утворенням внутрішніх напружень. Останньому сприяють ще такі чинники, як прокатка з більшою швидкістю ділянок, що більше обтискають; інтенсивніше охолодження фланців підошви через те, що розміри їх менші, і вони утворюються раніше при вимушеному розширенні в перших пропусках.

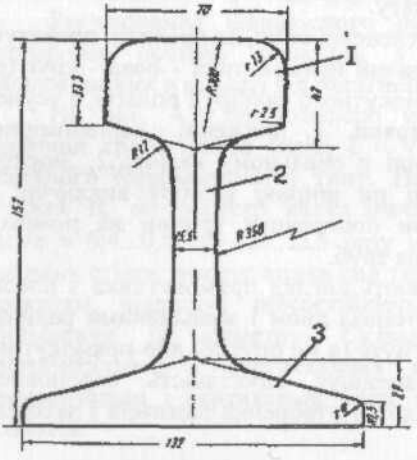


Рисунок 4.5 - Профіль рейки Р-50: 1 - головка; 2 - шийка; 3 – підошва.

Існує багато різних систем калібрувань валків для прокатки рейок, але усі вони мають наступні загальні характерні особливості.

1. Усі калібри за формою розділяються на дві основні категорії: реброві і пластові, або рейкові. Спочатку зазвичай розташовують реброві калібри, потім рейкові.

2. Для усіх калібрів слід вважати характерним два коефіцієнти: середній коефіцієнт витягання за усі пропуски, який у більшості випадків знаходиться в межах 1,20…1,22, і коефіцієнт витягання в останньому, чистовому калібрі, рівний 1,07...1,09. Перший коефіцієнт оцінює калібрування в цілому, надзвичайне його збільшення негативно позначається на якості рейок, оскільки призводить до зростання внутрішніх напружень. Другий невеликий коефіцієнт витягання дозволяє зменшити не лише внутрішні напруження, але і міру зносу чистових калібрів. Чим менше цей коефіцієнт, тим більше сприятливі умови роботи валків; мінімальне практичне значення його рівне 1,07.

Усі калібри для прокатки рейок розташовують в двох валках: верхньому і нижньому (кліті двохвалкові) або між середнім і одним з крайніх валків (кліті тривалкові). Усі бічні поверхні калібрів мають нахил на кут, величина якого більше на внутрішніх ділянках (до 10...40^0), чим на зовнішніх (1-2%).

Велику частину калібрувань розраховують з 9-10 фасонними калібрами (залежно від розташування стана). На рис 4.6 і 4.7 показано калібрування валків для прокатки рейок. У ній передбачені 4 реброві і 6 рейкових калібрів. У першому ребровому калібрі заготовку розрізають глибоким клином, а потім фланці підошви розгортаються в інших реброві калібрах.

Цей метод калібрування рейок передбачає усунення недоліків, пов'язаних із структурою металу при первинній кристалізації з утворенням стовпчастих кристалів і в утворенні підкіркових пухирів. (Стовпчасті кристалі розташовані перпендикулярно до поверхні зливка). При енергійній деформації стовпчасті кристали і газові пухирі міняють своє положення і розташовуються переважно паралельно площини підошви. Проте при недостатній деформації частина стовпчастих кристалів зберігає своє початкове положення не лише в розрізних, але і в рейкових калібрах, а це зменшує міцність підошви. Як відмічали вище на лінійних станах, рейки прокатують в калібрах, рівчаки яких врізані в два валки (рис.4.8).

Як видно, внаслідок різних висот розкату висотна деформація рейки буде нерівномірною і різною. Шийка по висоті деформується валками з практично однаковими діаметрами і швидкісні умови течії металу на верхньому і нижньому валках ідентичні. Умови деформації металу у відкритих і закритих фланцях різні. У відкритому фланці метал деформується двома валками, але швидкість в точці "А" з боку нижнього валка, внаслідок більшого його діаметру, буде істотно більше, ніж подовжня швидкість течії металу в точці "Б" з боку верхнього валка з меншим діаметром. Внаслідок відмінності в точках А і Б не лише горизонтальній, але і вертикальній швидкості течії металу, відбувається розтягування фланця і приріст його висоти.
У закритому фланці метал деформується в рівчаку одного валка і за рахунок меншої швидкості течії металу в подовжньому напрямі, відбувається його волочіння зі зменшенням товщини і висоти фланця. Саме внаслідок відмінності умов деформації

металу положення відкритого і закритого фланців від калібру до калібру змінюють. Тобто, в і - ом калібрі відкритий фланець розташовують з боку верхнього валка, а в (і + 1) -му калібрі - з боку нижнього валка. Тому з подальшого калібру (у тому числі і з чистового) рейка виходить з рівними розмірами фланців [14].

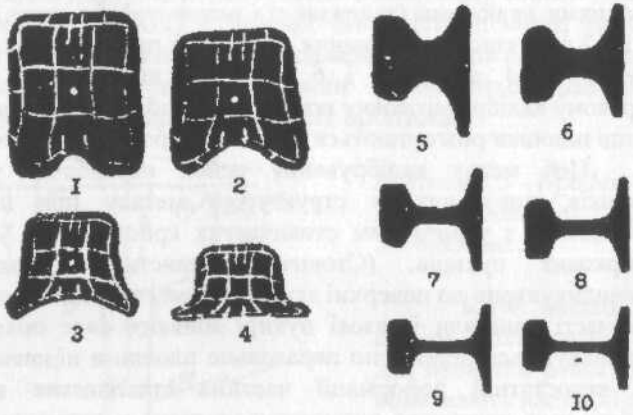


Рисунок 4.6 - Деформація металу в розрізних калібрах (по М.П. Галемину): 1-4 - номери калібрів
Рисунок 4.7 - Деформація металу в рейкових калібрах (по М.П. Галемину): 5-10 - номери калібрі

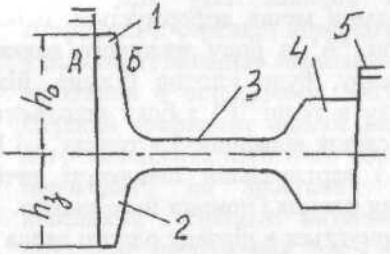


Рисунок 4.8 - Рейковий калібр: 1 - відкритий фланець; 2 - закритий фланець; 3 - шийка; 4 - головка; 5 - проміжок між валками

Спосіб прокатки рейок з використанням багатовалкових калібрів

У 1963-65 роках у Франції розроблений спосіб прокатки рейок з використанням багатовалкових калібрів. Застосовують рейкобалочні стани з послідовним розташуванням клітей і з реверсивним обертанням валків клітей (6-8 клітей). У лінії стана застосовують двохвалкові і чотиривалкові кліті. У двохвалкових клітях використовують горизонтальні валки (обтискна реверсивна кліть), в чотиривалкових – два горизонтальних і два вертикальних (рис.4.9). При цьому осі вертикальних валків розташовані в одній площині з осями горизонтальних валків. Чотиривалкові кліті з горизонтальними і вертикальними валками називають універсальними [14].

На станах з послідовним розташуванням клітей рейки прокатують з крупних блюмів до 13 т і із зливків. В першу чергу метал деформують в реверсивній обтискний кліті, а потім прямокутний блюм передають в чорнову універсальну кліть (рис.4.9,а). У універсальній чорновій кліті горизонтальні валки деформують шийку і внутрішні поверхні головки і підошви, а вертикальні валки деформують зовнішні поверхні головки і підошви. У допоміжній кліті робиться калібрування тільки ширини головки і підошви.

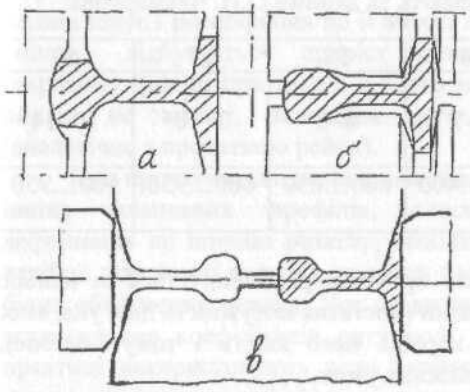


Рисунок 4.9 - Схема прокатки рейок з використанням багатовалкових калібрів : а-універсальна чотири-валкова кліть; б - допоміжна двохвалкова кліть; в - чистова універсальна кліть з тривалковим калібром.

У чорновій і допоміжній клітях (реверсивних) виконують по декілька проходів. У чистовій кліті робиться один калібрувальний

прохід. З метою зменшення кількості перевалок в горизонтальних валках чистової кліті виконують два чистових калібру.

4.4 Основні положення калібрування балочних профілів

Серед різних профілів прокатного виробництва особливе місце займають двотаврові балки, які застосовуються в усіх областях народного господарства. Типові схеми прокатки стандартних двотаврових балок показані на рис.4.10. Прокатка балок за схемою I виконується в калібрах закритого типу: перші 1-2 калібри по ходу прокатки називають розрізними. Зазвичай схема I застосовується для прокатки балок № 10-30 (висота їх H=100-300мм).

За схемою II роблять прокатку балок № 30-60, де профілювання заготовки виконують у відкритих балочних калібрах, які виточують у валках обтискної реверсивної кліті. На блюмінгу виконують два реброві проходу з метою отримання необхідної ширини профілю, який потім передають на рейкобалочний стан для прокатки в закритих балочних калібрах.

Діаметр валків і число проходів при прокатуванні двотаврових балок вибирають за даними О.П. Чекмарьова:

Номер профілю	10	18	27	50
Число проходів у фасонних калібрах	5–7	6–8	7–10	10–14
Діаметр валків, мм	350…400	600…650	800…950	900…950

Мінімальне число проходів рекомендується за найбільш сприятливих умов прокатки (достатня потужність двигуна, висока температура металу, хороша його якість і тому подібне), а максимальне – за протилежних умов.

Так звані стандартні балки з похилими поверхнями полиць прокатують в калібрах, які врізані в два суміжних горизонтальних валка. У кожному калібрі виконують по одному проходу. Балочні калібри виготовляють закритого типу і при цьому положення

відкритого і закритого фланців періодично міняють місцями, що пов'язано з різними умовами деформації металу в них.

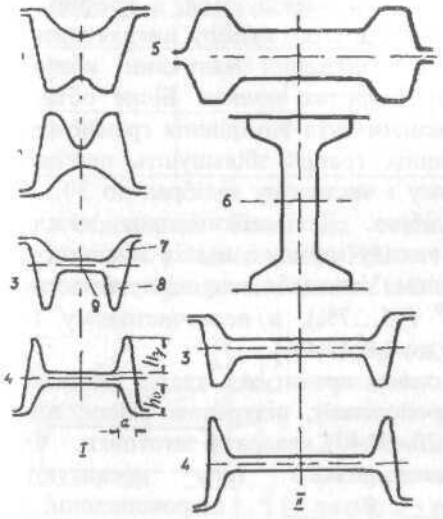


Рисунок 4.10 - Типові схеми прокатки стандартних балок : 1,2 - розрізні калібри; 3,4 - закриті балочні калібри; 5 - відкритий балочний калібр; 6 - ребровий прохід на блюмінгу; 7 - відкритий фланець; 8 - закритий фланець; 9 - стінка; h_0 і h_3 - висота відкритого і закритого фланців; а - ширина полиці біля її основи

У відкритому фланці метал деформується двома валками (верхнім і нижнім) і тому разом з обтисненням по ширині Δh полиці існує і розширення по її висоті Δb. Таким чином, в цьому випадку відбувається приріст розмірів висоти полиці. У закритому фланці при заході в нього металу відбувається осадка полиці по висоті, внаслідок чого розмір її зменшується (аналогічно з прокаткою рейок).

При прокатуванні двотаврових балок, як і при прокатуванні інших фланцевих профілів, спостерігається нерівномірна деформація по ширині розкату, особливо в першому розрізному калібрі; швидкості валків в окремих частинах калібру різні; існує бічне обтиснення металу. Усе це визначає і одночасно утрудняє встановлення коефіцієнтів витягання по елементах калібру. У практиці використовують різні варіанти розподілу коефіцієнтів витягання елементів профілю залежно від його розміру. Так, для балки № 24 розподіл коефіцієнтів витягання вказаний в таблиці. 4.1.

Як видно з табл. 4.1, в першому розрізному калібрі спостерігається максимальна деформація стінки. Потім, у міру прокатки, коефіцієнт $\mu_{ст}$ стінки зменшується, а коефіцієнт $\mu_{оп}$ відкритої полиці, починаючи з другого калібру, виявляється більш високим, ніж по стінці. Найменші величини коефіцієнта витягання характерні для закритих полиць. Бічне обтиснення полиць зростає зі збільшенням кута внутрішніх граней фланців. Тому кут ухилу внутрішніх граней збільшують приблизно з 10…12% в передчистовому і чистовому калібрах до 30…40% в чорнових розрізних калібрах. Для забезпечення можливості переточувань і вільного виходу металу з валків зовнішні стінки калібрів виконують з ухилом. Ухил (або випуск) приймається для чорнових калібрів $3…4^0$ (~5…7%), в передчистовому $1…1{,}5^0$ (1,7…2,6%) і в чистовому до $0{,}8^0$ (1,4%).

На рейкобалочних станах прокатують також рейки вузької колії, для трамваїв, метрополітену, підкранові рейки, швелери заввишки 200-400 мм (№ 20 - №40), квадратні заготовки.

Окрім балок стандартного типу прокатують і широкополочні балки (рис.4.11).

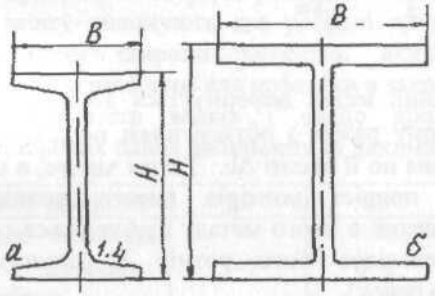


Рисунок 4.11 - Профілі стандартної (а) та широкополочної балок (б)

Таблиця 4.1 - Розподіл коефіцієнтів витягання μ_i і по елементам балки № 24

Коефіцієнти витягань	Номери калібрів				
	1	2	3	4	5
Стінки	1,48	1,45	1,43	1,4	1,33
Закритої полиці	1,035	1,065	1,065	1,062	1,035
Відкритої полиці	1,29	1,47	1,48	1,44	1,42

Продовження таблиці 4.1.

Коефіцієнти витягань	Номери калібрів				
	6	7	8	9	10
Стінки	1,23	1,16	1,13	1,085	1,06
Закритої полиці	1,03	1,01	0,98	0,95	0,94
Відкритої полиці	1,35	1,29	1,19	1,12	1,09

Стандартні балки по технологічним можливостям виготовлюють з відношенням H/B = 1,8…3,15, а широкополочні балки різного призначення мають H/B = 0,7…2,46.

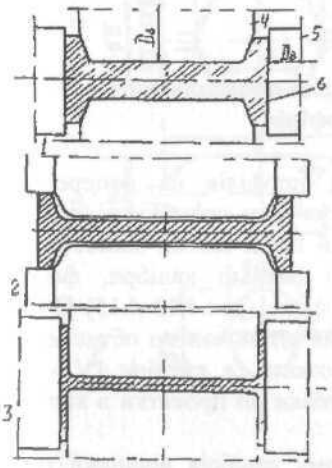


Рисунок 4.12 - Схема розташування валків для прокатки широкополочних балок: 1 - чорнова універсальна кліть; 2 - допоміжна кліть; 3 - чистова універсальна кліть; 4 - горизонтальні валки; 5 - вертикальні валки; 6 - розкат балки

Тобто, при одній і теж висоті балки другого типу мають ширші полиці і можуть нести більше навантаження. Крім того внутрішні поверхні полиць широкополочної балки взаємно паралельні (H = 200-1000 мм).

Для прокатки широкополочних балок використовують балочні стани, з універсальними (чотиривалковими) клітями [14,23]. На стані є декілька реверсивних чорнових універсальних і допоміжних клітей, в яких здійснюється по декілька проходів. У чистовій універсальній кліті виконують один прохід. На рис. 4.12. представлена схема деформації металу в клітях балочного стана.

Прокатку крупних широкополочних балок (H ≥ 600 мм) починають на блюмінгу 1500, а балки з H < 600 мм повністю прокатують на універсальному балочному стані. У чорнових універсальних клітях роблять основну пластичну деформацію по

висоті стінки і ширині балки. У допоміжній кліті обтиснюють полиці по висоті для калібрування розмірів ширини полиць. У чистовій кліті виконують один прохід, в якому роблять остаточне калібрування розмірів широкополочної балки.

Діаметри горизонтальних валків універсальних клітей дорівнюють 1350 мм, вертикальних, - 1100 мм, а допоміжних - 1200 мм. Усі кліті обладнані натискними пристроями для регулювання розмірів калібрів у вертикальній і горизонтальній площинах. Це дозволяє після кожного проходу в цій кліті робити задане обтиснення розкату. Чорнова універсальна і допоміжна кліті розташовані у безпосередній близькості одна від одної і складають одну неперервну групу клітей. Таких реверсивних груп на стані дві-три. У кожній групі виконують 3-7 проходів залежно від розмірів балки.

4.5 Калібрування валків для прокатування сортових профілів

При прокатуванні сортових профілів на неперервних станах в клітях чорнової групи застосовують прямокутні (ящичні) калібри і гладку бочку, а в чистовій групі клітей застосовують квадратні, овальні, круглі, реброві овальні калібри, фасонні калібри, що відповідають формі профілю (рис.4.13-4.15) [14,23]. Чорнові калібри I - IV призначені для інтенсивного обтиснення і зменшення поперечного перерізу розкату, а калібри (V - VII) чорнової групи готують форму заготовки до прокатки в калібрах чистової групи (кліті VIII - XV).

При прокатуванні кутка форму калібрів чорнової групи клітей не міняють, а в чистових клітях використовують спеціальне калібрування (рис.4.13) із закритими (чи відкритими) калібрами, які дозволяють отримувати точні розміри полиць по ширині. Початок деформації металу і зміна його форми починається з VI й кліті.

Заготовка задається в перший фасонний калібр закритого типу. У VII - м калібрі формуються перші контури кутка, зокрема його вершина; у IX - й кліті відбувається зменшення розмірів фігурного профілю; у XI - м калібрі відбувається формування кутового профілю.

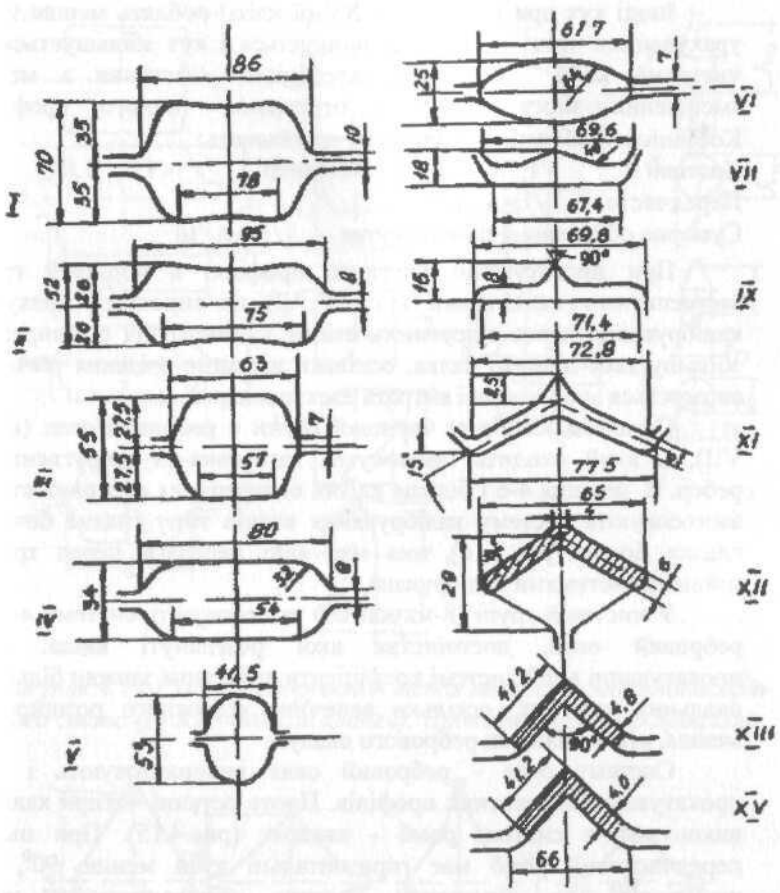


Рисунок 4.13 - Схема калібрування валків для прокатки кутка 4 × 40 × 40 мм (I – XV)- номера клітей).

При прокатуванні в горизонтальних валках розміри лівої і правої полиць можуть відрізнятися один від одного. Для калібрування ширини полиць застосовують XII-у кліть з вертикальними валками (це єдина вертикальна кліть, яка задіяна в чистовій групі при прокатуванні кутка). Товщина полиць і остаточна форма кутка формується в XIII - й і XV - й клітях.

Іноді кут при вершині (у XV-ої кліті) роблять менше 90^0 з урахуванням того, що калібр зношується і кут збільшується. У чистовий кліті невеликий коефіцієнт витягання з метою зменшення зносу валків і отримання точного профілю. Коефіцієнти обтиснень полиць μ_n приймають:

Чистові - 1,25…1,3; Чорнові - 1,6…1,8

Передчистові - 1,45...1,5;

Сумарне обтискання полиць кутка - $1/\eta = 6...10$.

При прокатуванні круглого профілю в чорновій групі застосовують гладкі валки (кліті IV, VI), що спрощує розрахунок калібрування через відсутність стінок і обмеження розширення, збільшується діаметр валка, оскільки відсутнє врізання рівчаків, знижується знос валків і витрата електроенергії.

Останнім калібром чорнової групи є ребровий овал (кліть VII), в який входить прямокутна заготовка із закругленнями ребер. В перших 4-6 і більше клітях неперервних сортових станів застосовують систему калібрування валків типу гладка бочка - гладка бочка (рис.1.16), яка має явні переваги перед традиційними системами калібрувань.

У чистовій групі (8-мь клітей) застосовують систему овал - ребровий овал, достоїнства якої розглянуті вище. При прокатуванні в цій системі коефіцієнти витягання завжди більше в овальних калібрах, оскільки величина відносного розширення менша, ніж в калібрах ребрового овалу.

Систему овал - ребровий овал використовують і при прокатуванні квадратних профілів. Проте останні чотири калібри виконують в системі ромб - квадрат (рис.4.15). При цьому передчистовий ромб має горизонтальні кути менше 90^0, що необхідно для отримання гострих горизонтальних кутів наступного чистового квадратного профілю. Розташування проміжків S в калібрах чистовий групи вказує на розташування валків в кліті (горизонтальне або вертикальне). Таке розташування валків виключає необхідність кантування розкатів перед задаванням в наступний калібр.

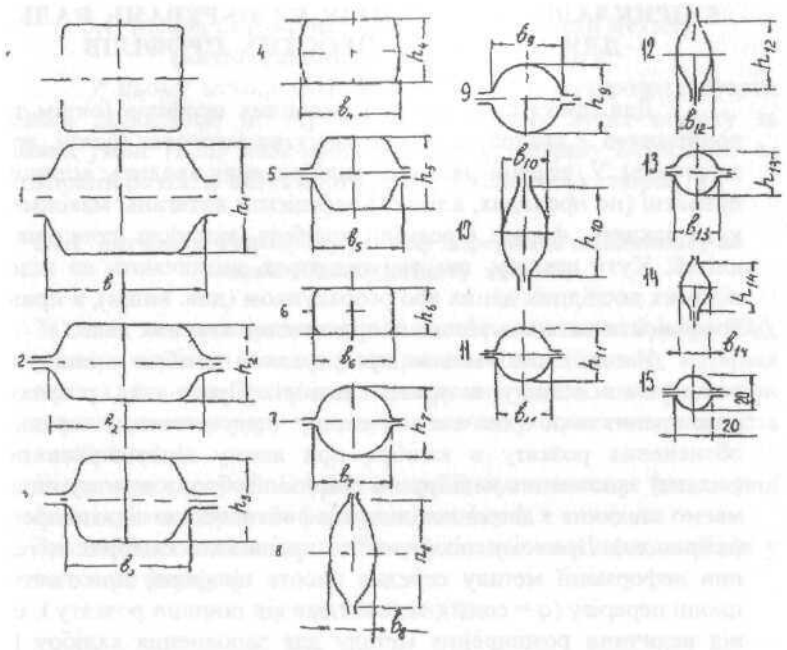


Рисунок 4.14-Схема калібрування валків неперервного дрібносортного стана (I - XV - номери клітей). Прокатка круглого профілю.

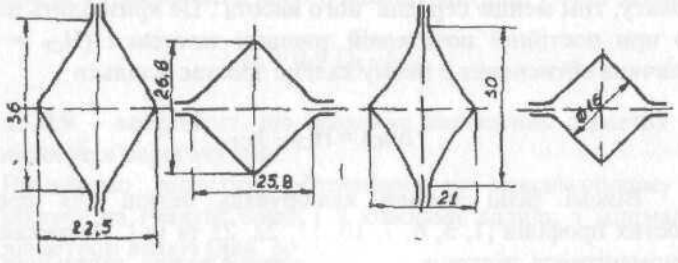


Рисунок4.15 - Передчистовий і чистовий калібр системи ромб-квадрат.

Додаткові відомості про системи калібрувань простих профілів дані в розділі 5.

5 ПРИКЛАДИ РОЗРАХУНКІВ КАЛІБРУВАНЬ ВАЛКІВ ДЛЯ ПРОКАТКИ ПРОСТИХ ПРОФІЛІВ

Для прокатки простих і фасонних профілів (окрім труб) початковою є квадратна або прямокутна заготовка (блюм, 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. вищи), 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 = const), залежатиме від ширини розкату і, 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 = const, чим більше ширина розкату, тим менше середня його висота . Це призводить до того, що при постійній початковій товщині заготовки (H_{CP} = 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 ($D_б$), 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 гладкої бочці та в калібрах по формулах розділу 3.
3. Знаходимо заздалегідь глибину урізання ящичних калібрів у валки по формулі

$$h_к = (0{,}15...0{,}18)\cdot D_б.$$

Глибину урізання на ділянці гладкої бочки приймають рівною $h_к = 80...100$ мм.

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

$$D_i = 0{,}9\ D_б - h_{кі}, \qquad (5.1)$$

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)

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

де R – в мм; $\alpha_з$ – у рад.

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

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

де Δh_i – обтискання на гладкій бочці і в калібрах.

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

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

де Н і В – 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 ($k_y = 0{,}1...0{,}2$) [1].

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

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

7. Визначимо число проходів по кожній стороні зливка:

$$N'_н = \Sigma\Delta h_н/\Delta h_{dc}; \qquad N'_в = \Sigma\Delta h_в/\Delta h_{dc}, \qquad (5.5)$$

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

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

$$\Delta h_d = \Delta h_{dc} \cdot (N'_н + N'_в)/(N_н + N_в),$$

де $N_н$ і $N_в$ – фактичні числа проходів.

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

Розрахунок калібрування виконуємо по більшому перерізу зливка, тобто початковою для першого проходу є висота Н = 815 мм і ширина В = 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 90^0 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 *Н* на бік *В* 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 блюмінги 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…1220^0C, (v=1…2м/с) [14,23]. Приймаємо число калібрів на валках рівним чотирьом.

Таблиця 5.1 - Розподіл проходів по калібрах валків блюмінга

Калібр	$n_з$, 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)

Зливок, мм		Блюм мм		Матеріал блюма	Температура початку прокатки, t^0,С	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

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

$$\alpha_з = \alpha_{зо} \cdot k_v \cdot k_м = 22 \cdot 1{,}09 \cdot 1{,}0 = 24^0 \ (0{,}418 \text{ рад});$$

в калібрах

$$\alpha_з = \alpha_{зо} \cdot k_v \cdot k_м = 24 \cdot 1{,}09 \cdot 1{,}0 = 26{,}2° \text{ (0,458 рад).}$$

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 ($n_з$) розкату в калібрах. По прийнятих значеннях $n_з$ визначають окружну швидкість валків по формулі

$$v = \pi \cdot D \cdot n_з/60.$$

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 – $h_{кі} = 200$ мм (див. п. 3). Тоді середні (катаючій) діаметри валків з формули (5.1) рівні:

$$D_1 = 0{,}9 \cdot 1150 - 80 = 950 \text{ мм;}$$
$$D_{2\text{-}4} = 0{,}9 \cdot 1150 - 200 = 830 \text{ мм.}$$

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

$$\Delta h_1 = 475 \cdot 0{,}418^2 = 83 \text{ мм;}$$
$$\Delta h_{2\text{-}4} = 415 \cdot 0{,}458^2 = 87 \text{ мм.}$$

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:

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

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 ΣN = 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

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

Це обтиснення менше допустимого в калібрах 2-4, що відповідає раніше прийнятим умовам (див.. п.3.4). Залишаємо розрахункове обтиснення в калібрі 1 рівним Δh_i =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:

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

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

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

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

Розширення металу визначимо по формулі (2.1) О. П. Чекмарьова при $n_\phi = 1$ (гладка бочка), n=2 и $C_м = 1$ (табл.2.1) ($B_{ср} \approx B_1$):

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

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

$h = 717 - 83 = 634$ мм; $\qquad B / l_d = 3{,}57$,

$\Delta b = 5$ мм; $\qquad b = 705 + 5 = 710$ мм.

Після цього проходу співвідношення b2/h2 = 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 90^0 і обтискаємо розкат по стороні *В*. Кантування також потрібна для зняття конусності зливка по стороні *В*.

Прохід 3. Обтиснення по стороні В в калібрі 1 після кантування розкату на 90^0. 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 В. 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…1,75, то можна продовжити прокатку на гладкій бочці.

Проходи 5, 6. У цих проходах на гладкій бочці (у калібрі 1) по стороні *В* 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^o. раскат передають в калібр 2.

Прохід 7. Прокатка в калібрі 2 по стороні *Н*. 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 $n_ф$ = 1,15 (табл.3.3):

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

Прохід 8. Прокатка по стороні *Н*. 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:

$h = 571 - 83 = 488$ мм; $B/l_d = 385/186 = 2{,}06$;
$\Delta b = 83 \cdot 0{,}73/1{,}15\ (1 + 1{,}45 \cdot 4{,}25) = 8$ мм;
$b = 385 + 8 = 393$ мм; b/h=0.8.

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

Прохід 9. Прокатка по стороні Н. 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:

$h = 488 - 83 = 405$ мм; $B / l_d = 393 / 186 = 2{,}11$;

$\Delta b = 83 \cdot 0{,}88 / 1{,}15\ (1 + 1{,}45 \cdot 4{,}45) = 9$ мм;
$b = 393 + 9 = 402$ мм.

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

$h = 405 - 83 = 322$ мм; $B / l_d = 402/186 = 2{,}15$;

$\Delta b = 83 \cdot 1{,}10 / 1{,}15\ (1 + 1{,}45 \cdot 4{,}7) = 10$ мм;
$b = 402 + 10 = 412$ мм.

Після проходу 10 розмір розкату h_{10} x b_{10} = 322 x 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 x b = 350 x 350 мм) і тому передаємо розкат в калібр 3 з попереднім кантуванням на 90^0.

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

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

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

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

$b = 322 + 12 = 334$ 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 $\sum\Delta h_H$ і $\sum\Delta b_B$ 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 H сумарне обтиснення більше на 350 – 329 = 21 мм, а по стороні B на 350 – 334 = 16 мм. На ці значення і необхідно зменшити обтиснення у відповідних періодах кантувань. По стороні H 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}=350мм 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 проходах, 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

Калібр	№ проходу	Сторона, яка деформ.	H (h), мм	B (b), мм	Δh, мм	Δb, мм
Зливок (800 /700) х (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.

Таблиця5.4 - Режим обтиснень після коригування.
Зливок: 800/700 х 740/640 мм

Таблиця Номер калібру и його разміри, 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 90^0.

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 стана (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

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

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

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

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

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

тобто секундний об'єм наступної кліті дещо більше попередньої кліті. Таке співвідношення потрібне для запобігання петлеутворення (підпора) розкату на міжклітьовій ділянці і застряванню 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 х80 (матеріал ст.3) з блюма з Н х В = 360 х 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 $t_H = 1130^0$ С, а кінця прокатки $t_K = 1060^0$С. Розподіл температур по клітях в першому наближенні може бути визначений за формулою (без урахування охолодження металу на проміжних рольгангах):

$$t_i = t_o - K/q_i; \qquad t_o = t_H + K/q_o; \qquad K = (t_H - t_K) \cdot q_o \cdot q / (q_o - q_{k-1}), \tag{5.7}$$

де q_o – 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:

кліті 1-4 $D_б$ = 900 мм;
кліті 5-8 – $D_б$ = 730 мм; } чорнова група
кліті 9-14 – $D_б$ = 530мм (чистова група)

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

$$D = 0{,}92\ D_б - h_к = 0{,}92 \times 900 - 150 = 680 \text{ мм}. \tag{5.8}$$

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

Невелике урізування $h_к$ 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 чистової кліті, але з проміжних клітей. Так, для даного стана передбачають випускати квадратну заготовку з розмірами 150 х 150 мм з кліті 8. У кліті 4 також планується прокатувати квадратну заготовку.

При великих розмірах готового прокату (більше 80 х 80 мм) проміжний квадрат може бути випущений з кліті 6 (наприклад, 180 х 180 або 195 х 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):

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

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

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

Визначимо заздалегідь коефіцієнти витягувань в парах калібрів:

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

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)

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

для ящичных квадратов (квадратов) (клети 4, 6, 8)

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

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

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

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

Сумарний коефіцієнт витягань для усього стана рівний

$$\mu_\Sigma = \mu_{чр} \cdot \mu_ч = 5{,}78 \cdot 3{,}52 = 22{,}11.$$

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 клітях 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 кліті кожної групи. Швидкість прокатки в кліті 8 приймаємо рівній або дещо меншій швидкості розкату, що входить в кліть 9. Приймаємо швидкість прокатки в кліті 14 рівною $v_{14} = 7$ м/с. Тоді секундні об'єми в клітях дорівнюють:

$C_{14} = v_{14} \cdot q_{14} = 7 \cdot 6{,}4 \cdot 10^3 = 44{,}8 \cdot 10^3$ м · мм^2/с;
$C_{13} = C_{14}/k_p = 44{,}8 \cdot 10^3/1{,}015 = 44{,}3 \cdot 10^3$ м · мм^2/с і т.д.
$v_{13} = v_{14} \cdot q_{14}/q_{13} = 7 \cdot 6400/7820 = 5{,}63$ м/с;
$v_{12} = v_{14} \cdot q_{14}/q_{12} = 7 \cdot 6400/10000 = 4{,}36$ м/с і т.д.

5. За формулою (5.7) визначимо температури по клітях стана ($t_H = 1130^0C$, $t_K = 1060^0C$).

Маємо:

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

$t_o = 1130 + 47{,}8 \cdot 10^4/13 \cdot 10^4 = 1130 + 4 = 1134°C$.

Визначаємо температури по клітях:

кліть 13

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

кліть 12.

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

6. По формулах (3.1) і (3.2) визначимо максимальні кути захвату в клітях 1 і 8 чорнової групи (сталеві валки з HSD = 40). У клітях 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 $n_ф = 1{,}15$, для квадратних калібрів (чистова група) - $n_ф = 1{,}41$ (табл.3.3).

Тоді, коефіцієнт $f_з$ при захваті рівний::

$$f_з = f \cdot k_з \cdot n_ф,$$

де $k_з$ – коефіцієнт, що враховує підвищення тертя при захваті в порівнянні зі сталим процесом.

Коефіцієнт $k_з$ для клітей 1, 3, 9 рівний: $k_з = 1{,}35$ (без заштовхування розкату), для подальших клітей – $k_з = 1{,}45$ – з урахуванням впливу заштовхуючої сили від попередніх клітей. Тоді для кліті 1 ($n_ф = 1{,}10$)

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

Для клітей 2 і 10 цього стана розрахунковий коефіцієнт тертя при захваті рівний $f_з = 0{,}60$, для кліті 8 – $f_з = 0{,}52$, для кліті 14 – $f_з = 0{,}46$ (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)]:

кліть 1, 3 - $\Delta h_d = 340 \cdot 0{,}54^2 = 100$;
кліть 2 - $\Delta h_d = 340 \cdot 0{,}6^2 = 123$;
кліть 8 - $\Delta h_d = 260 \cdot 0{,}55^2 = 78$;
кліть 9 - $\Delta h_d = 230 \cdot 0{,}52^2 = 61$;
кліть 10 - $\Delta h_d = 220 \cdot 0{,}6^2 = 80$;
кліть 14 - $\Delta h_d = 245 \cdot 0{,}46^2 = 53$.

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

$$D_{opi} = D_{окв} + 10, мм,$$

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

Діаметр валка по осі квадратного калібру рівний

$$D_{окв} = D_б - (1{,}41c_i - S),$$

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 обтиснень при заданих величинах μ_i обумовлені формозміною металу в калібрах (величинами обтиснень 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 клітях 1-4 режим деформації розраховують задаючи необхідні величини обтиснень, які менше за тих, що допускаються.

Таблиця 5.5 - Попередні параметри прокатки у калібрах НЗС

№ клеті	Форма калібру	D, мм	q, мм^2	μ	t, ^{0}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 клітях 1 і 9. Для пропонованого методу розрахунок калібрів здійснимий по ходу прокатки.

Кліть 1. **Ящичний прямокутник в горизонтальних валках.** Розміри блюма H = B = 360 мм. Умови захвату дозволяють застосувати обтиснення в перших клітях до Δh = 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 слідує 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 клітями 3 і 5, де відбувається кантування розкату (рис.4.3). Якщо заздалегідь прийняти в клітях 1,2 обтиснення Δh = 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 – Δh = 70 мм, а в кліті 2 – Δh = 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 $\Delta b_П$ = 15 мм, що не внесе помітної погрішності в подальших розрахунках:

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

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

Розрахункове розширення по осі калібру визначимо по формулах (2.8) і (2.9) з урахуванням обмеження розширення стінками калібру при $n_ф$ = 1,15 і $C_м$ = 1 (табл. 2.1; табл. 3.3):

$$C_П = e^{-(\frac{B_{ср}}{l_d} - 0{,}9)^{0{,}9}} = e^{-1{,}43^{0{,}9}} \approx 0{,}22.$$

За цією формулою визначаємо коефіцієнт Сп і для наступних калібрів:

$$\Delta b = 0{,}53 \cdot C_п \cdot C_м \cdot \Delta h \cdot B_{ср}/(h_{ср} \cdot n_ф). \qquad (5.12)$$

$$1/n_ф = 1/1{,}15 = 0{,}87;$$

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

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

$$h_1 = 290 \text{мм}; \qquad b_1 = B_1 + \Delta b = 360 + 8 = 368 \text{ мм}.$$

Кліть 2. Ящичний прямокутник в який задають розкат з $H_2 = h_1 = 290$ мм і $B_2 = b_1 = 368$ мм (без кантування). Маємо (за розрахунком $C_п = 0{,}16$, $1/n_ф = 0{,}87$, $\Delta b = 8$мм):

$$h_2 = 290 - 80 = 210; \qquad B_{ср} = B_2 + 0{,}5\Delta b = 368 + 4 \approx 371;$$

$$l_d = \sqrt{340 \cdot 80} = 165; \qquad B_{ср}/l_d = 37/165 = 2{,}25;$$

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

Розміри розкату після кліті 2 рівні:

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

Кліть 3. Ящичний прямокутник, в який задають розкат після кантування з розмірами $H_3 = b_2 = 376$ мм, $B_3 = h_2 = 210$ мм. В кліті 4 повинні отримати розкат у вигляді квадрата 240 х 240 мм (див. вище). Тому сумарне обтиснення по висоті в клітях 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 $\Delta b_п = 14$ мм, а за розрахунком коефіцієнт $C_п = 0{,}4$):

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

$$l_d = \sqrt{340 \cdot 60} = 150; \qquad B_{ср}/l_d = 217/150 = 1{,}44;$$

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

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:

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

Кліть 4. Ящичний квадрат, в який заходить розкат з розмірами : $H_4 = h_3 = 310$ мм і $B_4 = b_3 = 218$ мм. Обтиснення у кліті $\Delta h_4 = 70$ мм. Тоді ($\Delta b_n = 8$ мм і за розрахунком маємо $C_n = 0{,}4$):

$$h_4 = 310 - 70 = 240; \qquad B_{cp} = 218 + 8 = 226;$$
$$l_d = \sqrt{340 \cdot 70} = 154; \qquad B_{cp}/l_d = 226/154 = 1{,}46;$$

$B_{cp}/h_{cp} = 226/275 = 0{,}82$; $\Delta b = 0{,}53 \cdot 0{,}4 \cdot 70 \cdot 0{,}82 \cdot 0{,}87 = 10$мм.
Розміри розкату після кліті 4 такі:

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

Як виходить з розрахунку висота розкату відповідає заданої ($h_4 = 240$ мм), а ширина рівна $b_4 = 228$ 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 $b_4' = 240$ 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 5В. Ящичний прямокутник, в який входить заготовка з розмірами після кантування : $H_5 = b_4 = 228$ мм, $B_5 = h_4 = 240$ мм. Приймаємо заздалегідь $\Delta b_n = 9$ мм.

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

$$b_5 = B_5 + \Delta b_n = 240 + 9 = 249; \qquad h_5 = q_5/b_5 = 43800/249 = 176;$$
$$\Delta h = H_5 - h_5 = 228 - 176 = 52; \qquad l_d = \sqrt{260 \cdot 52} = 116;$$

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

$B_{ср}/h_{ср} = 245/0,5\ (H + h) = 245/202 = 1,21;$

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

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

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

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

$B_{ср}/l_d = 243/114 = 2,13;$ $B_{ср}/h_{ср} = 243/203 = 1,2;$

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

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

Кліть 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 $\Delta b_п$= 8 мм, з розрахунку маємо $C_п \approx 0,37$:

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

$B_{ср}/l_d = 186/121 = 1,52;$ $B_{ср}/h_{ср} = 186/218 = 0,91;$

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

Приймаємо $\Delta b_п = 10$ мм. Тоді:

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

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

$B_{ср} = 183;$ $B_{ср}/l_d = 183/118 = 1,55;$ $B_{ср}/h_{ср} = 183/219,5 = 0,84;$

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

Дійсне розширення по формулі (2.24) рівне:

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

Розміри ящичного квадрата:

$b_6 = 178 + 7 = 185$ мм, $h_6 = 36300/185 = 196$ 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, $\Delta b_п = 8$мм. Маємо (з розрахунку маємо Сп = 0,27, $n_ф = 1,15$):

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

Оскільки відмінність між $\Delta b_п$ 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 $C_п = 0,55$.
Абсолютне обтиснення в калібрі і інші параметри дорівнюють:

$$\Delta h_8 = H_8 - h_8 = 204 - 150 = 54 \text{ мм}.$$
$$l_d = \sqrt{275 \cdot 54} = 122; \qquad B_{ср} = 143;$$
$$B_{ср}/l_d = 143/122 = 1,17; \quad B_{ср}/h_{ср} = 143/177 = 0,81;$$
$$\Delta b = 0,53 \cdot 0,55 \cdot 54 \cdot 0,81 \cdot 0,87 = 11.$$

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 150x150 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 кантувння і прокатки матимемо $h_8 = h_7 (B_8) + \Delta h_8 = 139 + 11 = 150$ мм.

Переходимо до розрахунку розмірів калібрів чистової 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 $\Delta b_п = 10$ 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

$$\Delta h_к = n_к \cdot \Delta h = 0{,}63\ \Delta h$$

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

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

$b = B + \Delta b = 211 + 10 = 221$; $h = q/0{,}5b = 36600/221 = 166$;

$\Delta h = H - h = 211 - 166 = 45$; $\Delta h_{ср} = \Delta h_к = 0{,}63 \cdot \Delta h = 0{,}63 \cdot 45 = 28{,}4$;

$h'_{ср} = 0{,}5\ h = 0{,}5 \cdot 166 = 83$; $h_{ср} = h'_{ср} + 0{,}5\Delta h_{ср} = 83 + 14{,}2 = 97{,}2$;

$D = D_б - (h'_{ср} - S) = 530 - (83 - 8) = 445$ мм;

$l_d = \sqrt{R \cdot \Delta h_{ср}} = \sqrt{225{,}5 \cdot 28{,}4} = 80$; $B_{ср} = 0{,}83 \cdot b = 0{,}83 \cdot 221 = 183$;

$B_{ср}/l_d = 183/80 = 2{,}29$; $B_{ср}/h_{ср} = 183/97{,}2 = 1{,}88$,

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

$h_{ср}$ – середня товщина розкату в калібрі.

Для розрахунку розширення в калібрах чистової групи використовуємо формули (2.8), (2.9) і (5.12). При прокатуванні в простих калібрах НЗС з параметром форми осередку деформації $l_d/h_{ср} < 2$ 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 $n_ф$=1,15), тоді з формули (2.9) і рис.2.2 отримаємо:

$$C_П = e^{-(\frac{B_{ср}}{l_d}-0,9)^{0,9}} = e^{-1,39^{0,9}} \approx 0,2.$$

Δb=0,53·$C_п$·$C_м$·$\Delta h_{ср}$·$B_{ср}$/($h_{ср}$·$n_ф$)=0,53·0,2· 28,4 · 1,88·0,87≈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 $\Delta b'_п > \Delta b'_0$, то слід зменшити простір на розширення. Приймаємо $\Delta b_п$ = 5 мм і робимо повторний розрахунок:

$b = 211 + 5 = 216;$ $h = 36600/210 = 170;$

$\Delta h = 211 - 170 = 41;$ $\Delta h_{ср} = 0,63 \cdot 41 = 24,8;$

$h'_{ср} = 0,5 \cdot 170 = 85;$ $h_{ср} = 85 + 12,4 = 97,4;$

$D = 530 - (85 - 8) = 453;$ $l_d = \sqrt{226,5 \cdot 24,8} = 75;$

$B_{ср} = 0,83 \cdot 216 = 180;$ $B_{ср}/l_d = 180/75 = 2,4;$

$B_{ср}/h_{ср} = 180/97,4 = 1,85.$

З розрахунку маємо $C_п$ = 0,20; $m = 24,8 \cdot 1,85 = 46,0$:

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

За даними розрахунку з формули (2.21) дійсне розширення рівне Δb_d = 8 мм. Розміри калібру:

$b_9 = 211 + 8 = 219$ мм; $h_9 = 36600/219 = 167$ мм.

Кліть 10. Квадратний калібр із стороною c_{10} = 125 мм і діагоналями $h_{10} = b_{10}$ = 176 мм, в який входить ромбічна заготовка з розмірами після кантування на 90^0: $H_{10} = b_9$ = 219 мм, $B_{10} = h_9$ = 167 мм. Простір на розширення дорівнює

$\Delta b'_п$ = 176–167 = 9 мм Абсолютне обтиснення в калібрі рівне ($n_ф$ = 1,41, $1/n_ф$= 0,71, розрахункове значення $C_п$ = 0,26):

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

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

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

З розрахунку $C_п = 0{,}26$; $\Delta b'' = 0{,}53 \cdot 0{,}26 \cdot 40 \cdot 0{,}71 = 3{,}92$;
$\Delta b''_0 = 3{,}92 / 0{,}5 = 7{,}84$.

Оскільки $\Delta b''_0 \approx 8$ мм, то розміри калібру будуть рівні
$b_{10} = 167 + 8 = 175$ мм; $h = 15150/175 \cdot 0{,}5 = 173$ 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; $B_{11} = 174$ мм. Приймаємо простір на розширення ($\Delta b_п = 7$ мм:
$b_{11} = 174 + 7 = 181$; $h_{11} = 12200/0{,}5 \cdot 181 = 135$;
$\Delta h = 174 - 135 = 39$; $\Delta h_{ср} = 0{,}63 \cdot 39 = 24{,}6$;
$h'_{ср} = 0{,}5 \cdot 135 = 67{,}5$; $h_{ср} = 67{,}5 + 12{,}3 = 79{,}8$;
$D = 530 - (77 - 8) = 461$; $l_d = \sqrt{230{,}5 \cdot 24{,}6} = 75{,}2$;
$B_{ср} = 0{,}83 \cdot 181 = 150$; $B_{ср}/l_d = 150/75{,}2 = 2{,}0$;
$B_{ср}/h_{ср} = 150/79{,}8 = 1{,}88$; $m = 24{,}6 \cdot 1{,}88 = 46{,}2$;
$C_п = 0{,}280$; $\Delta b' = 0{,}53 \cdot 0{,}28 \cdot 46{,}2 \cdot 0{,}87 = 6{,}2$;
$\Delta b'_0 = 6{,}2/0{,}5 = 12{,}4$.

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

$b_{11} = 174 + 16 = 190$; $h_{11} = 12200/0,5 \cdot 190 = 128$;

$\Delta h = 174 - 128 = 46$; $\Delta h_{cp} = 0,63 \cdot 46 = 29,4$;

$h'_{cp} = 0,5 \cdot 128 = 64$; $h_{cp} = 64 + 14,7 = 78,7$;

$D = 530 - (64 - 8) = 474$; $l_d = \sqrt{237 \cdot 29,4} = 83,2$;

$B_{cp} = 0,83 \cdot 190 = 158$; $B_{cp}/l_d = 158/83,2 = 1,9$;

$B_{cp}/h_{cp} = 158/78,7 = 2,0$; $m = 29,4 \cdot 2,0 = 58,8$;

$C_n = 0,240$; $\Delta b'' = 0,53 \cdot 0,240 \cdot 58,8 \cdot 0,87 = 6,5$ и $\Delta b_d \approx 13$ мм.

Розміри калібра:

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

Кліть 12. Квадратний калібр із стороною $c_{12} = 100$ 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 90^0: $H_{12} = b_{11} = 187$ мм; $B_{12} = h_{11} = 130$ мм. Робимо розрахунок при $\Delta b'_n = 141 - 130 = 11$ мм:

$b_{12} = h_{12} = 141$; $\Delta h = 187 - 141 = 46$;

$\Delta h_{cp} = 0,63 \cdot 46 = 29$; $h'_{cp} = 0,5 \cdot 141 = 70,5$;

$h_{cp} = 70,5 + 14,5 = 85$; $D = 530 - (70,5 - 8) = 468$;

$l_d = \sqrt{234 \cdot 29} = 83$; $B_{cp} = 0,83 \cdot 141 = 117$;

$B_{cp}/l_d = 117/83 = 1,41$; $B_{cp}/h_{cp} = 117/85 = 1,37$;

$C_n = 0,4$; $m = 29 \cdot 1,37 = 40$;

$\Delta b' = 0,53 \cdot 0,4 \cdot 40 \cdot 0,71 = 6,0$; $\Delta b'_0 = 6,0/0,5 = 13$.

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 $b_{12} = h_{12} = B_{12} + \Delta b''_n = 130 + 14 = 144$ мм (по діагоналі).

Тоді:

$\Delta h = 187 - 144 = 43$; $\Delta h_{cp} = 0,63 \cdot 43 = 27$;

$h'_{cp} = 0,5 \cdot 144 = 72$; $h_{cp} = 72 + 13,5 = 85,5$;

$D = 530 - (72 - 8) = 466$; $l_d = \sqrt{233 \cdot 27} = 80$;

$B_{cp} = 0,83 \cdot 144 = 120$; $B_{cp}/l_d = 120/80 = 1,5$;

$B_{cp}/h_{cp} = 120/85,5 = 1,41$; $m = 27 \cdot 1,41 = 38,1$;

$C_п = 0{,}355$; $\Delta b'' = 0{,}53 \cdot 0{,}355 \cdot 38{,}1 \cdot 0{,}71 = 5{,}2$;

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

$b_{13} = 7800/0{,}5 \cdot 151 = 103$; $\Delta h = 141 - 103 = 38$;

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

$h'_{ср} = 0{,}5 \cdot 103 = 38$; $h_{ср} = 51{,}5 + 11{,}95 = 63{,}4$;

$D = 530 - (515 - 8) = 486$; $l_d = \sqrt{242 \cdot 23{,}9} = 76{,}6$;

$B_{ср} = 0{,}83 \cdot 151 = 125$; $B_{ср}/l_d = 125/76{,}6 = 1{,}63$;

$B_{ср}/h_{ср} = 125/63{,}4 = 1{,}97$; $m = 23{,}9 \cdot 1{,}97 = 47{,}0$;

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

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

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

$b_{13} = 141 + 17 = 158$; $h_{13} = 7800/0{,}5 \cdot 158 = 99$ мм;

$\Delta h = 141 - 99 = 42$; $\Delta h_{ср} = 0{,}63 \cdot 42 = 26{,}5$;

$h'_{ср} = 0{,}5 \cdot 99 = 49{,}5$; $h_{ср} = 49{,}5 + 13{,}25 = 62{,}4$;

$D = 530 - (49{,}5 - 8) = 488$; $l_d = \sqrt{244 \cdot 26{,}5} = 80{,}8$;

$B_{ср} = 0{,}83 \cdot 158 = 131$; $B_{ср}/l_d = 131/80{,}8 = 1{,}62$;

$B_{ср}/h_{ср} = 131/62{,}4 = 2{,}09$; $m = 26{,}5 \cdot 2{,}09 = 55{,}3$;

$C_п = 0{,}355$; $\Delta b'' = 0{,}53 \cdot 0{,}355 \cdot 55{,}3 \cdot 0{,}87 = 9{,}1$;

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

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

Розміри калібру:

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

Кліть 14. Квадратний калібр з розмірами c_{14} = 80 мм і діагоналями $h_{14} = b_{14}$ = 141·80 = 113 мм. В цей калібр входить ромбічна заготовка з розмірами після кантування на 90$_0$: H_{14} = 159 мм, B_{14} = 98 мм, при $\Delta b'_n$ = 15 мм:

$\Delta h = 159 - 113 = 46;$ $\Delta h_{ср} = 0{,}63 \cdot 46 = 29{,}0;$

$h'_{ср} = 0{,}5 \cdot 113 = 56{,}5;$ $h_{ср} = 56{,}5 + 14{,}5 = 71;$

$D = 530 - (71 - 7) = 446;$ $l_d = \sqrt{233 \cdot 29} = 82{,}2;$

$B_{ср} = 0{,}83 \cdot 113 = 94;$ $B_{ср}/l_d = 94/82{,}2 = 1{,}14;$

$B_{ср}/h_{ср} = 94/71 = 1{,}32;$ $m = 29 \cdot 1{,}32 = 38{,}4;$

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 ямокутник	290	366	210	376	80	10
3В	Ящичный прямокутник	376	210	310	218	66	8
4	Ящичный квадрат	310	218	240	228	70	10
5В	Ящичный прямокутник	228	240	178	246	50	6
6	Ящичный квадрат	246	178	196	185	53	7
7В	Ящичный прямокутник	185	196	137	204	48	8
8	Ящичный 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

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

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

Оскільки $\Delta b'_п < \Delta b'_0$, то виконуємо другий розрахунок при $\Delta b''_п = 17$ мм: Розміри квадратного калібра рівні: $b_{l4} = 98 + 17 = 115$ мм; $h_{l4} = b_{l4} = 115$ мм.

Інші параметри ($q_{l4} = 6620$ мм^2) :

$\Delta h = 159 - 115 = 44$; $\Delta h_{ср} = 0,63 \cdot 44 = 27,7$;

$h'_{ср} = 0,5 \cdot 115 = 57,5$; $h_{ср} = 57,5 + 13,85 = 71,3$;

$D = 530 - (57,5 - 7) = 480$; $l_d = \sqrt{240 \cdot 27,7} = 82$;

$B_{ср} = 0,83 \cdot 115 = 96$; $B_{ср}/l_d = 96/82 = 1,17$;

$B_{ср}/h_{ср} = 96/71,3 = 1,34$; $m = 27,7 \cdot 1,34 = 37,2$;

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

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

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

Розмір чистового калібру при $\Delta b_d = 16$ мм: $b_{l4} = 98+16 = 114$ мм, $h_{l4} = 6620/0,5 \cdot 114 = 116$ мм. З практичною точністю приймаємо $b_{l4} = h_{l4} = 115$мм (с = 81,5 мм).

Розміри квадрата з $h_{l4} = b_{l4} = 113$ і с = 80 мм досягаються шляхом коригування розмірів попередніх калібрів.

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 - $r = (0,15...0,2)\ h_к$;

у проміжку - $r_1 = (0,08...0,2)\ b_к$.

Висота і ширина урізання в квадратному калібрі:

$$h_к = h - 0,82r; \qquad b_к = b - S, \qquad (5.13)$$

у ромбічному калібрі:

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

де b_p – ширина урізання калібра у валки.

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

кліть 13 (ромб):

$r = 0{,}15 \cdot 98 \approx 15$ мм;

$h_p = 98 - 15\left(\sqrt{1 + 2{,}05} - 1\right) = 87$ мм;

$b_p = 141 - 7 \cdot 1{,}43 = 130$ мм;

кліть 14 (квадрат):

$r = 0{,}15 \cdot 115 = 17$ мм;

$h_к = 115 - 0{,}82 \cdot 17 = 101$ мм;

$b_к = 115 - 7 = 108$ мм.

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:

$$\Delta b_ф = b_к - h_p = 108 - 87 = 21 \text{ мм},$$

що більше розрахункового розширення $\Delta b_d = 17$ мм) (табл.5.6), а отже, переповнювання чистового калібру не буде. Якщо $\Delta b_d > \Delta b_ф$, 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 клітях стана, а нові форми калібрів чистової групи (овал, ребровою овал, круг) змінюють значення коефіцієнта форми $n_ф$.

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

мм, в чистовій - $D_б$ = 250 мм; швидкість прокатки профілю в чистовій кліті v = 15 м/с; розміри заготовки 100 х 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:

$$\mu_ч = 1,13 + 0,05\,(d - 5)/145 \qquad (5.15)$$

$$\mu_ч = 1,13 + 0,05\,(c - 5)/145,$$

для передчистового калібру (овалу або ромбу);

$$\left.\begin{aligned}\mu_{пч} &= 1,21 + 0,05\,(d - 5)/145;\\ \mu_{пч} &= 1,21 + 0,05\,(c - 5)/145,\end{aligned}\right\} \qquad (5.16)$$

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

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

У першому калібрі (кліть 1) приймають невелике обтиснення з метою видалення окалини і тому μ_1= 1,05. Тоді сумарний коефіцієнт μ_Σ в клітях, що залишилися (кліті 2-13) рівний:μ_Σ

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

Як слідує з рис. 4.14, в клітях 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
$q_{15}=\pi d_{15}^2/4=0,785\cdot 20^2=314$мм^2	$q_{14}=q_{15}\,\mu_{15}=314\cdot 1,135=357$мм^2

Заздалегідь визначимо середній коефіцієнт витягання в клітях 2-13:

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

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 клітях 1,2 розміщені ящичні

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

Коефіцієнт витягання в клітях стана може бути в межах μ_i = 1,2...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

$$\mu_{чр} = (0{,}97\ldots0{,}99)\mu_{ср},$$

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

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

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

де 6 – показник степіні – число клітей.

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

$$q_{i-1} = q_i \cdot \mu_{чр},$$

Так, для кліті 6 маємо

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

Середній коефіцієнт витягання в чистовій групі рівний:

$$\mu_ч = \mu^2_{СР} / \mu_{чр} = 1{,}293^2 / 1{,}273 = 1{,}318.$$

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

№ клети	μ	q, мм^2	№ клети	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

$$\upsilon_8 = \upsilon_{15} \cdot q_{15} / q_8 = 15 \cdot 314 / 1550 = 3{,}03 м/с.$$

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

$$\vee_7 = \vee_8 \cdot q_8 / q_7 = 3{,}03 \cdot 1550 / 2240 = 2{,}10 м/с.$$

Окружна швидкість валків в кліті 6 рівна

$$\vee_6 = \vee_7 \cdot q_7 / q_6 = 2{,}10 \cdot 2240 / 2850 = 1{,}64 м/с.$$

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 $n_ф$ = 1,15 для гладких валків $n_ф$ = 1,0, в однорадіусному овалі $n_ф$ = 1.15, для ребрового овалу $n_ф$ = 1,3. Усі розміри отримані в мм.

Кліть 7. Ребровий овал с q_7 = 2240 мм^2. Розміри ребрового овалу визначаємо при h/b = 1,1…1,4 по формулах:

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

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:

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

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

$$B_7 = b_7 - \Delta b'_п = 48{,}2 - 5 = 43{,}2; \qquad H_7 = q_6/n_0 \cdot B_7.$$

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

$$H_7 = 2850/43{,}2 = 66; \quad h'_{7ср} = n \cdot h_7 = 0{,}74 \cdot 62{,}7 = 46{,}5;$$
$$\Delta h_{ср} = H_7 - h'_{7ср} = 66\text{-}46{,}5 = 19{,}5;$$
$$h_{ср} = h'_{7ср} + 0{,}5\Delta h_{ср} = 46{,}5+9{,}75 = 56{,}25.$$

де $h_{(ср}$ – середня висота ребрового овалу:

$$D = D_б - (h'_{7ср} - S) = 400\text{-}38{,}5 = 362;$$
$$l_d = \sqrt{R \cdot \Delta h} = \sqrt{181 \cdot 19{,}5} = 59{,}4;$$
$$B_{ср} = 0{,}5(B+b) = 0{,}5(43{,}2+48{,}2) = 45{,}8; \quad B_{ср}/l_d = 0{,}77;$$
$$B_{ср}/h_{ср} = 0{,}82; \quad m = 19{,}5 \cdot 0{,}82 = 16; \; C_п = 1{,}0.$$
$$\Delta b' = 0{,}53 \cdot 1 \cdot 16/1{,}3 = 6{,}5; \quad \Delta b'_0 = 6{,}5/0{,}7 = 9{,}3.$$

Оскільки $\Delta b'_п < \Delta b_0'$, то другий розрахунок виконуємо при $\Delta b''_п = 10$ мм [в усіх випадках коефіцієнт $C_п$ визначений по формулі (2.9)]:

$$B_7 = 48{,}2\text{-}10 = 38{,}2; \quad H_7 = 2850/38{,}2 = 74{,}8;$$
$$\Delta h_{ср} = 74{,}8\text{-}46{,}5 = 27{,}7; \quad h_{ср} = 46{,}5+13{,}85 = 60{,}85;$$
$$l_d = \sqrt{181 \cdot 27{,}7} = 70{,}8; \quad B_{ср} = 0{,}5(38{,}2+48{,}2) = 43{,}2;$$
$$B_{ср}/l_d = 0{,}6; \quad B_{ср}/h_{ср} = 0{,}71; \quad C_п = 0{,}86;$$
$$m = 27{,}7 \cdot 0{,}71 = 19{,}8; \; \Delta b'' = 0{,}53 \cdot 0{,}86 \cdot 19{,}8/1{,}3 = 6{,}9$$
$$\Delta b''_0 = 6{,}9/0{,}7 = 9{,}9 \approx 10,$$

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

Фіктивний простір на розширення за відсутності бічних стінок рівний

$\Delta b'_п = b_6 - B_6 = 75–60,3 = 14,7$ мм.

Визначимо параметри деформації в кліті 6. Маємо:

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

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

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

$B_{ср}/h_{ср} = 1,37$; $C_п = 0,65$; $m = 22,1 \cdot 1,37 = 31,5$;

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

Як виходить $\Delta b'_п > \Delta b'$. Проте повторного розрахунку можна не виконувати, так як параметр $\Delta b'_п = 14,7$ мм через ширину $b_6 = 75$ мм, бере участь тільки у визначенні середньої ширини $B_{ср}$, 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.

$B_6 = b_6 - b_0 = 75 - 10,8 = 64,2$ мм;

$H_6 = 60,3$ 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 $q_5 = 3870$ 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 $q_0 = 4620$ мм^2 ($n_0 = 1$; $n = 1$; $n_ф = 1,15$). Приймаємо $\Delta b'_п = 5$ мм:

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

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

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

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

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

$B_{ср}/l_d = 1{,}02; \quad B_{ср}/h_{ср} = 0{,}783; \quad C_п = 0{,}68;$

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

Оскільки $\Delta b'_0 < \Delta b'_п$, то, отже, немає повного заповнення калібру металом і коефіцієнт форми $n_ф = 1$ (стінки калібру не обмежують розширення). У зв'язку з цим прорахуємо величину розширення при коефіцієнті $n_ф = 1{,}0$. 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 допускається. (Див. розділ 1).

Кліть 4. Гладка бочка, в якій розміри розкату після кантування на 90^0 будуть рівні : $h_4 = B_5 = 55{,}3$ мм. $b_4 = H_5 = 83$ мм, $q_4 = 4620$ мм^2. Площа перерізу заготовки з ящичного калібру 3 рівна $q_3 = 5880$ мм^2. Розміри сторін заготовки ящичного квадрата рівні

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

Простір на розширення в гладкій бочці

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

Визначимо параметри деформації:

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

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

$B_{ср}/l_d = 1{,}22; \quad B_{ср}/h_{ср} \cong 1{,}22; \quad C_п = 0{,}52;$

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

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

$B_4 = b_4 - \Delta b''_п = 83 - 8 = 75{,}0$; $H_4 = B_4 = 75$;

$\Delta h = 75 - 55{,}3 = 19{,}7$; $h_{ср} = 55 + 9{,}85 = 64{,}5$;

$l_d = \sqrt{200 \cdot 19{,}7} = 62{,}8$; $B_{ср} = 0{,}5\,(83+75) = 79{,}0$;

$B_{ср}/l_d = 1{,}26$; $B_{ср}/h_{ср} = 1{,}22$; $C_п = 0{,}49$;

$m = 19{,}7 \cdot 1{,}22 = 24{,}1$; $\Delta b'' = \Delta b''_0 = 0{,}53 \cdot 0{,}49 \cdot 24{,}1 = 6{,}3$.

Дійсне розширення

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

Розміри заготовки для калібру 4:

$B_4 = 83\text{-}6{,}8 = 76{,}2$; $H_4 = 5880/76{,}2 = 77{,}3$ мм.

Кліть 3. Ящичний квадратний калібр з розмірами $h_3 = B_4 = 76{,}2$ мм, $b_3 = H_4 = 77{,}3$ мм, $q_3 = 5880$ мм^2, в який заходить розкат з кліті 2 з площею $q_2 = 7480$ мм^2. Приймаємо $\Delta b'_п = 7$ мм:

$B = 77{,}3 - 7 = 70{,}3$; $H = 7480/70{,}3 = 106{,}5$;

$\Delta h = 106{,}5 - 76{,}2 = 30{,}3$; $h_{ср} = 77{,}3 + 15{,}15 = 92{,}45$;

$D = 400 - (77{,}3 - 8) \approx 330$; $l_d = \sqrt{165 \cdot 30{,}3} = 70{,}5$;

$B_{ср} = 0{,}5\,(70{,}3+77{,}3) = 73{,}8$; $B_{ср}/l_d = 1{,}05$;

$B_{ср}/h_{ср} = 0{,}8$; $C_п = 0{,}64$;

$m = 30{,}3 \cdot 0{,}8 = 24{,}3$; $\Delta b' = 0{,}53 \cdot 0{,}64 \cdot 24{,}3/1{,}15 \approx 7{,}0$.

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

$B_3 = 70{,}3$ мм; $H_3 = 106{,}5$ мм.

Якщо отримане $\Delta b'_п > \Delta b'$ ($\Delta b'_0$), то заповнення калібру не відбувається і похилі стінки калібру не формують ширину профілю. Тому можна з розрахунку виключити коефіцієнт $n_ф = 1{,}15$ і визначити дійсне розширення по осі калібру при його неповному заповненні. Якщо $\Delta b'_п < \Delta b'$, 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 мм^2. Приймаємо $\Delta b'_п = 5$ мм ($q_1 = 9500$ мм^2):

$B_2 = 106{,}5 - 5 = 101{,}5$; $H_2 = 9500/101{,}5 = 93{,}3$;

$\Delta h = 93{,}3 - 70{,}3 = 23{,}0$; $h_{ср} = 71{,}1 + 11{,}5 = 82{,}5$;

$D = 400 - (70{,}3 - 8) \approx 338$; $l_d = \sqrt{169 \cdot 23{,}0} = 62{,}3$;

$B_{ср} = 0{,}5(100{,}5 + 106{,}5) = 103{,}5$; $B_{ср}/l_d = 1{,}69$;

$B_{ср}/h_{ср} = 1{,}24$; $C_п = 0{,}33$;

$m = 23{,}0 \cdot 1{,}24 = 28{,}7$; $\Delta b' = 0{,}53 \cdot 0{,}33 \cdot 28{,}7 / 1{,}15 = 5{,}03$.

Таблиця 5.8 - Параметри калібрування валків чорнової групи дрібносортного стану

№ кліті	Калібр	Параметри деформації						
		H, мм	B, мм	h., мм	b, мм	Δh, мм	Δ b_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 $\Delta b'_п \approx \Delta b'$, то приймаємо $\Delta b_d = 5{,}0$ мм. В цьому калібрі використали коефіцієнт $n_ф$=1,15, що свідчить про повне заповнення калібру. У разі $\Delta b'_п < \Delta b'$ потрібний ітераційний розрахунок дійсного розширення.

Розміри заготовки розраховані раніше (мм):

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

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 $q_0 = 10000мм^2$ 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 заздалегідь 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 группа 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. вищі). Коефіцієнт $C_п$ в усіх випадках розрахований по формулі (2.9).

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

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

Тоді коефіцієнт витягання в ребровому овалі:

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

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

$$\mu_{р.ов} = 1 + 0,35(\mu_П - 1). \qquad (5.21)$$

На підставі практичних даних коефіцієнт витягання в парі калібрів $\mu_п = \mu_{р.ов}$, $\mu_{ов} = 1,60\ldots1,78$, в ребровому овалі

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

$$\mu_{ов} = 1 + 1{,}25\,(1{,}26 - 1) = 1{,}35;$$
$$\mu_{п} = \mu_{р.ов} \cdot \mu_{ов} = 1{,}26 \cdot 1{,}325 = 1{,}67.$$

що відповідає, отриманому раніше.

Проте не завжди прийняте співвідношення між $\mu_{р.ов}$ і $\mu_{ов}$ 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 90^0:

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

$$n = 0{,}7; \qquad n_0 = 0{,}75; \qquad n_ф = 1{,}1$$

Приймаємо $\Delta b'_п$= 5 мм. По аналогії з розрахунком в п.5.4. отримаємо (усі розміри в мм):

$$b_8 = B_8 + +b'_п = 62{,}7 + 5 = 67{,}7;$$
$$h_8 = q_8 / n \cdot b_8 = 1550 / 0{,}7 \cdot 67{,}7 = 32{,}7;$$
$$\Delta h = H_8 - h_8 = 48{,}2 - 32{,}7 = 15{,}5;$$
$$\Delta h_{ср} = n_к \cdot \Delta h = 0{,}78 \cdot 15{,}5 = 12{,}1;$$
$$h'_{ср} = 0{,}7 \cdot h_8 = 0{,}7 \cdot 32{,}7 = 22{,}9;$$
$$h_{ср} = h'_{ср} + 0{,}5\Delta h_{ср} = 22{,}9 + 6{,}05 = 28{,}95;$$
$$B_{ср} = 0{,}93 \cdot b_8 = 0{,}93 \cdot 67{,}7 = 63{,}0;$$
$$D = D_δ - (h'_{ср} - S) = 250 - 15 = 23{,}5;$$
$$l_d = \sqrt{R \cdot \Delta h_{ср}} = \sqrt{117{,}75 \cdot 12{,}1} = 38{,}6; \qquad B_{ср}/l_d = 1{,}63;$$
$$B_{ср}/h_{ср} = 2{,}17;\ C_п = 0{,}33;\ m = h_{ср} \cdot B_{ср}/h_{ср} = 12{,}1 \cdot 2{,}17 = 26{,}3.$$

Середнє розширення в калібрі з формули (2.8) рівне

$$\Delta b = 0{,}53 \cdot C_п\, m / n_ф = 0{,}53 \cdot 0{,}33 \cdot 26{,}3 / 1{,}1 = 4{,}2;$$

розширення по осі калібру з формули (2.20) рівне

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

Оскільки $\Delta b'_П < \Delta b'_0$, 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:

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

Кліть 9. Реброві овал з q_9 = 1230 мм^2, в який входить заготовка овалу з розмірами після кантування:

$H_9 = b_8 = 69$ мм; $B_9 = h_8 = 32{,}0$ мм, $q_8 = 1550$ мм^2;
коефіцієнти: $n = 0{,}75$; $n_0 = 0{,}7$; $n_ф = 1{,}3$.
Співвідношення осей ребрового овалу рівне $c_p = h_9/b_9$=1,1…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

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

Для прийнятих умов маємо:

$$b_9 = \sqrt{1230/0{,}75 \cdot 1{,}25} = 36{,}0;$$

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

Оскільки $\Delta b'_{П} < \Delta b'_{0}$, то при $q_9 = const$, необхідно збільшити ширину ребрового овалу на величину різниці

$$\delta b = \Delta b'_{0} - \Delta b'_{п} = 6 - 4 = 2 \text{ мм}.$$

Тоді

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

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

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

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

Приймаємо $\Delta b'_{П}=5$мм:

$b_{10} = 45 + 5 = 50$; $\quad h_{10} = 937/0,7 \cdot 50 = 26,8$;

$\Delta h = 38 - 26,8 = 11,2$; $\quad \Delta h_{ср} = 0,78 \cdot 11,2 = 8,7$;

$h'_{ср} = 0,7 \cdot 26,8 = 18,8$; $\quad h_{ср} = 18,8 + 4,35 = 23,15$;

$D = 250 - 13 = 237$; $\quad l_d = \sqrt{118,5 \cdot 8,7} = 32,2$;

$B_{ср} = 0,93 \cdot 50 = 46,5$; $\quad B_{ср}/l_d = 1,44$; $\quad B_{ср}/h_{ср} = 2,0$;

$C_{П} = 0,44$; $\quad m = 17,4$;

$\Delta b' = 0,53 \cdot 0,44 \cdot 17,4/1,1 = 3,7$; $\quad \Delta b'_{0} = 3,7/0,7 = 5,3$.

Оскільки різниця між $\Delta b'_{П}$ и $\Delta b'_{0}$ не перевищує 10%, то приймаємо більше значення розширення, тобто Δb_d=5,3мм. Розміри калібру в кліті 10В:

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

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

$b_{11} = \sqrt{742/0,75 \cdot 1,25} = 28,1$; $\quad h_{11} = 1,25 \cdot 28,1 = 35,1$;

$\Delta b'_{п} = 28,1 - 26,6 = 1,5$; $\quad \Delta h = 50,3 - 35,1 = 15,2$;

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

Оскільки $\Delta b'_П < \Delta b'_0$, 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:

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

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

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

Після другого розрахунку при $\Delta b''_П > \Delta b'_0$, дійсне розширення по формулі (2.21) рівне $\Delta b_d = 6{,}6$ мм. Тоді:
$b_{12} = 35.1+6.6 = 41{,}7$ мм, $h_{12} = 560/0{,}7 \cdot 41{,}7 = 19{,}2$ мм.

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

$b_{13} = \sqrt{434/0,75 \cdot 1,25} = 21,5$; $h_{13} = 1,25 \cdot 21,5 = 26,9$;

$\Delta b'_п = 21,5 - 19,3 = 2,2$; $\Delta h = 41,7 - 26,9 \approx 15$;

$\Delta h_{ср} = 0,65 \cdot 15 = 9,8$; $h'_{ср} = 0,75 \cdot 26,9 = 20,9$;

$h_{ср} = 20,9 + 4,9 = 25,8$; $D = 250 - 16 = 234$;

$l_d = \sqrt{117 \cdot 9,8} = 33,7$; $B_{ср} = 0,81 \cdot 215 = 17,4$;

$B_{ср}/l_d = 0,52$; $B_{ср}/h_{ср} = 0,68$;

$C_П = 0,74$; $m = 6,7$;

$\Delta b'_П = 0,53 \cdot 0,52 \cdot 6,7/1,3 = 1,42$; $\Delta b'_0 = 1,42/0,7 = 2,7$.

Відповідно до формули (5.22) маємо:

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

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

Приймаємо $\Delta b'_п = 3,5$мм і отримуємо:

$b_{14} = 26,3 + 3,5 = 29,8$; $h_{14} = 357/0,7 \cdot 29,8 = 17,2$;

$\Delta h = 22 - 17,2 = 4,8$; $\Delta h_{ср} = 0,78 \cdot 4,8 = 3,75$;

$h'_{ср} = 0,7 \cdot 17,2 = 12,1$; $h_{ср} = 12,1 + 1,87 = 13,97$;

$D = 250 - (13,97 - 4) = 240$; $B_{ср}/l_d = 1,30$; $B_{ср}/h_{ср} = 1,98$;

$C_п = 0,48$; $m = 3,75 \cdot 1,98 = 7,4$;

$\Delta b' = 0,53 \cdot 0,48 \cdot 7,4/1,1 = 1,7$; $\Delta b'_0 = 2,43$.

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

$b_{14} = 26,3 + 2 = 28,3$; $h_{14} = 357/0,7 \cdot 28,3 = 18,0$;

$\Delta h = 22 - 18 = 4,0$; $\Delta h_{ср} = 0,78 \cdot 4 = 3,12$;

$h'_{ср} = 0,7 \cdot 18 = 12,6$; $h_{ср} = 12,6 + 1,56 = 14,16$;

$D = 250 - (14{,}16 - 4) \approx 240$; $l_d = \sqrt{120 \cdot 3{,}12} = 19{,}3$;

$B_{ср} = 0{,}93 \cdot 28{,}3 = 26{,}3$; $B_{ср}/l_d = 1{,}36$; $B_{ср}/h_{ср} = 1{,}85$;

$C_п = 0{,}44$; $m = 3{,}12 \cdot 1{,}85 = 5{,}8$;

$\Delta b'' = 0{,}53 \cdot 0{,}44 \cdot 5{,}8/1{,}1 = 1{,}23$; $\Delta b''_0 = 1{,}23/0{,}7 = 1{,}76$.

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:

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

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

$B_{15} = 20 - 2 = 18$; $H_{15} = 357/0{,}7 \cdot 18 = 28{,}3$;

$\Delta h = 28{,}3 - 20 = 8{,}3$; $\Delta h_{ср} = 0{,}65 \cdot 8{,}3 = 5{,}4$;

$h'_{ср} = 0{,}785 \cdot 20 = 15{,}7$; $h_{ср} = 15{,}7 + 2{,}7 = 18{,}4$;

$D = 250 - (18{,}4 - 4) \approx 236$; $l_d = \sqrt{118 \cdot 5{,}4} = 25{,}3$;

$B_{ср} = 0{,}81 \cdot 20 = 16{,}2$; $B_{ср}/l_d = 0{,}64$; $B_{ср}/h_{ср} = 0{,}89$;

$C_П = 0{,}86$; $m = 5{,}4 \cdot 0{,}89 = 4{,}8$;

$\Delta b' = 0{,}53 \cdot 0{,}86 \cdot 4{,}8/1{,}4 = 1{,}56$; $\Delta b'_0 = 1{,}56/0{,}7 = 2{,}23$.

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

$B_{15} = 20 - 2{,}5 = 17{,}5$ мм; $H_{15} = 357/0{,}7 \cdot 17{,}5 = 29{,}3$мм.

$\Delta h = 29{,}3 - 20 = 9{,}3$; $\Delta h_{ср} = 0{,}65 \cdot 9.3 = 6{,}05$;

$h'_{ср} = 0{,}785 \cdot 20 = 15{,}7$; $h_{ср} = 15{,}7 + 3{,}025 = 18{,}72$;

$D = 250 - (18{,}72 - 4) = 235$; $l_d = \sqrt{117{,}5 \cdot 6{,}05} = 26{,}6$;

$B_{ср} = 0{,}81 \cdot 20 = 16{,}2$; $B_{ср}/l_d = 0{,}61$; $B_{ср}/h_{ср} = 0{,}86$;

$C_п = 0{,}88$; $m = 6{,}05 \cdot 0{,}86 = 5{,}2$;

$\Delta b'' = 0{,}53 \cdot 0{,}88 \cdot 5{,}2/1{,}4 = 1{,}73$; $\Delta b'' = 1{,}73/0{,}7 = 2{,}47$.

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

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

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 рівчака $b_д$ приймають рівною: $b_д = (0{,}95...1{,}0)\ \underline{B}$ (B - ширина заготовки), а ширину «b» по конструкційних точках визначають за формулою (рис.1.4, а)

$$b = b_д + h_к \cdot \operatorname{tg} \varphi, \qquad (5.24)$$

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

За розрахунковими параметрами h, b і $b_д$ роблять побудову скелета калібру. Залежно від діаметру валка вибирають зазор S (див. гл.1) і визначають розміри $b_к$ і $h_к$;

$$h_к = h - S; \qquad b_к = b + (h_к - S) \operatorname{tg} \varphi, \qquad (5.25)$$

де $b_к$ – ширина урізання калібру у валки (ширина профілю $b_п$ при $\delta_к$.

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	Δ h, мм	Δb_0, мм	μ
7	Ребровий овал	-	-	62,7	48,2	-	-	-
8В	Овал	48,2	62,7	32	69	16,2	6,3	1,335
9	Ребровой овал	69	32	45	38	24	6	1,21
10В	Овал	38	45	26,6	50,3	11,4	5,3	1,365
11	Ребровий овал	50,3	26,6	35,1	30,6	15,2	4,0	1,17
12В	Овал	30,6	35,1	19,2	41,7	11,4	6,6	1,433
13	Ребровий овал	41,7	19,2	26,3	22,0	15,4	2,8	1,29
14В	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. Наявність опуклості дна запобігає переповнюванню наступного калібру при задавання в нього заготовки після кантування. Радіуси закруглень в калібрі рівні: $r = (0,1...0,15)\ b_d$, а $r_1 = (0,8...1,0)\ r$.

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 $\delta_K = b_K/b = 0{,}9...95$.

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

ромбічний калібр -r=(0,15...0,2)h: r_1=(0,1...0,15)h;

квадратний калібр - r = (0,1...0,2) з; r_1 = (0,1...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 δ_K= 0,88...0,92 (окрім чистового квадратного і двох передчистових калібрів) (r і r_1 – радіуси закруглень вершин і у буртів). За наявності закруглень вершин висота калібру відповідним чином зменшується:

ромбічний калібр -

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

квадратний калібр -

$$h_к = 1{,}41 \cdot c - 0{,}82r.$$

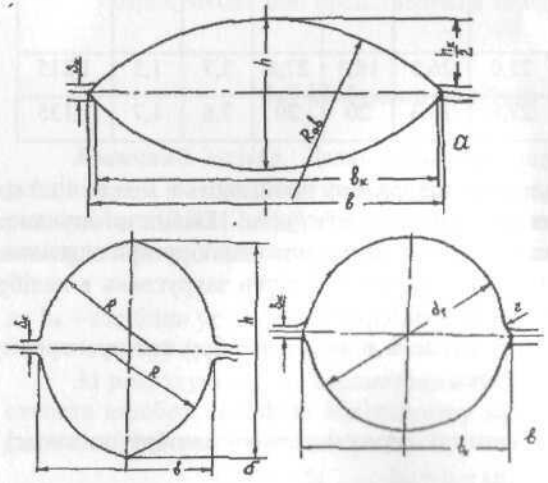


Рисунок 5 - До побудови калібрів овального (а), ребрового овалу (б) і круглого калібру (в)

Однорадіусний 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) $h_к$. Радіус r_1 переходу рівчака у бурт визначають по залежності r_1=(0,1...0,3) $h_к$; ($h_к$ = h - S). Розміри h, b і S визначають ширину рівчака $b_к$, а ширину рівчака - з урахуванням міри заповнення калібру металом

$$b_к = b - S \cdot b/h.$$

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)$b_к$. 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):

$$d_г = (1,012...1,015)\ (d_х + \Delta/2),$$

де $d_х$ – 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

$$b_к = d_г \cdot (1,012...1,015),$$

де $d_г$ – 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, крутній момент M і потужність N:

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

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

При прокатуванні в гладких валках деформація штаби по ширині постійна, тобто h = const, H = const, R = const. У калібрах, як виходить з глав 1,2, вказані параметри змінюються по ширині профілю і тому для розрахунку енергосилових параметрів використовують середні величини $H_{ср}$, $h_{ср}$ до $h_{ср}$, $\Delta h_{ср}$, $R_{ср}$ 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: $H_{ср} = H$; $h_{ср} = h$; $\Delta h_{ср} = \Delta h$, $R_{ср} = R$, 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.

Приклад1. Розрахувати енергосилові параметри прокатки розкату на блюмінгу. Початкові дані: H = 600 мм, B = 660 мм, h = 505 мм, Δh = 95 мм, діаметр валків по буртах $D_б$ = 1250 мм, глибина урізання гладкої бочки на діаметр $h_к$=110 мм, температура початку прокатки t=1200^{0}C.

Швидкість валків в кожному проході визначають з урахуванням практичних, даних і рекомендації розділу 5.1 з роботи [23]. Валки виготовлені із сталі 50ХН і їх поверхня наплавлена сталлю 30ХГСА, 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 $b_к$ = 414 мм (табл. 5.4). Тому коефіцієнт $n_ф$ впливу форми калібру на сили тертя можна приймати рівним $n_ф$ = 1,07, а в проході 10 має місце практично повний контакт розкату із стінками калібру (повне заповнення) і коефіцієнт $n_ф$ = 1,15.

Сказане відноситься і до інших ящичних калібрів. При прокатуванні на гладкій бочці контакт розкату з бічними стінками калібру відсутній і тому $n_ф$ = 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 бочці.

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

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

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

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

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

$l_d/h_{ср} = 232/552 = 0{,}42$; $B/h_{ср} = 1{,}08$.

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

2. ***Розширення металу знаходимо*** з формули (при $B_{ср}/l_d \leq 1 \ldots 3$).

$$\Delta b = 0{,}53 \cdot C_П \cdot \Delta h \cdot \left(B_{ср} / h_{ср}\right) / n_ф, \qquad (6.2)$$

де $C_П$ – коефіцієнт, що враховує вплив параметра $B_{ср}/l_d$; $B_{ср}$ – середня ширина розкату.

Коефіцієнт $C_П$ визначено з робіт [8, 23, 24] при $B/l_d=2{,}84$ і $n_ф = 1{,}0$ (гладка бочка)[формули (2.8) (2.9)]:

$$C_П = e^{-2{,}23} = 0{,}11;$$

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

Логарифмічний показник розширення при

$B_{ср} = B + 0{,}5\Delta b = 660 + 3 \approx 663$ мм;

дорівнює

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

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

$$\sigma_ф = \beta \cdot \sigma_{Тб} \cdot k_t \cdot k_\varepsilon \cdot k_u, \qquad (6.4)$$

де β – коефіцієнт Лоде ($\beta = 1 \ldots 1{,}15$); $\sigma_{Тб}$ – 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:

$$N_1 = C + Si + Mn + \ldots; \qquad (6.5)$$

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

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

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

рівне

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

де C, Si, Mn – зміст в сталі вуглецю, кремнію, марганцю .
Швидкість деформації металу в осередку рівна

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

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

$$\vee = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{60}; \qquad (6.8)$$

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

Швидкість деформації з формули (6.7) рівна

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Опір металу деформації при β=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 двух 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

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

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

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

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

$$M = M / i;$$
$$M_{тр} = M_{тр1} / i + M_{тр2} / i,$$

де i – передатне число редуктора в лінії приводу

$$\left.\begin{aligned} M_{тр1} &= P \cdot \mu \cdot d_{ш}; \\ M_{TP2} &= \left(\frac{1}{\eta} - 1\right)\left(M + M_{TP1}\right), \end{aligned}\right\} \qquad (6.16)$$

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

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

з конічними роликами - $\mu = 0{,}004$

з текстолитовими вкладишами - $\mu = 0{,}01$.

ККД передачі представляється складом ККД шестеренчастої кліті ($\eta_1 = 0{,}92 - 0{,}95$), редуктора ($\eta_2 = 0{,}95.0{,}97$) 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 ($M' = 2{,}94$ МН·м, $d_{ш} = 820$ мм):

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

$$M_{ст} = 2{,}94 + 0{,}1 + 0{,}026 = 3{,}666 \text{ МН} \cdot \text{м};$$
$$N_{ст} = 960 \cdot 3{,}666 \cdot 1{,}2 / 0{,}57 = 7350 \text{ кВт}.$$

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

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

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

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

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

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

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

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

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

$$M_{экв} = \sqrt{\frac{\Sigma M_i^2 t_i + \sum M_{XX} \cdot t_П}{T_П}}, \qquad (6.19)$$

де M_i – момент в кожному проході (повний); t_i – час прокатки в проході (машинний час); $T_п$ – темп прокатки ($T_п = \Sigma t_м + \Sigma t_п$); $t_м$ і $t_п$ – машинний час і час пауз.

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

$$M_H = \frac{2N_H}{\omega_H}, \qquad (6.20)$$

де $N_н$ – номінальна потужність встановленого привода; $\omega_н$ – номінальна кутова швидкість обертання якоря двигуна.

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

Сумарний номінальний момент двох електродвигунів при $N_н$= 6800кВт, $n_н$=40об/мін ($\omega_н$= 4 c^{-1}) чисел оборотів якоря рівний

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

Потім визначають відношення $M_н/M_{экв}$, яке не повинне перевищувати k = 2…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 С=0,5…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 $D_б$=0,9·1250=1125мм.

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

$d_ш = 0{,}65D_б = 0{,}65 \cdot 1250 = 820$ мм; $l_ш = d_ш = 820$ мм.

Реакції сили на шийку валка

$$P_ш = P(1 - c/a), \qquad (6.21)$$

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

Напруження в перерізі бочки і шийки визначимо по формулах:

$$\left.\begin{aligned} &\sigma_{из} = P_ш \cdot c/w = P_ш \cdot c\ /0{,}1 \cdot (D')^3; \\ &\sigma_ш = P_ш \cdot l_ш / 0{,}2 d_ш^3; \\ &\tau_{кр} = M_П /0{,}4 \cdot d_ш^3; \\ &\sigma_p = \sqrt{\sigma_ш^2 + 3 \cdot \tau_{кр}^2}, \end{aligned}\right\} \qquad (6.22)$$

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

Відстань *"c"* від краю гладкою бочки до осі шийки дорівнює

$$c = \frac{l_ш}{2} + l_б + \frac{b_d}{2}, \qquad (6.23)$$

де $l_б$ – довжина бурту між шийкою і калібром; ($l_б$ = 100 мм); b_d – ширина гладкої бочки (калібр 1) (b_d = 1050 мм).

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

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

Напруження матеріалу валка, що допускається $[\sigma_ш]$=120…130 Н/мм^2. Тобто, валки за даних умов деформації, витримують навантаження, але шийка валка працює при граничній напрузі.

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 = 1570мм^2). Заготовка має овальний переріз з q_0 = 2120 мм^2, шириною B = 40 мм. Матеріал валка високоміцний чавун з діаметром валків по буртах $D_б$ = 400 мм, швидкість прокатки v=7,0м/с, температура прокатки t = 1020^{0}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...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

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

Середня товщина готового профілю на виході з калібру

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

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

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

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

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

Середня висота заготовки, відносне обтиснення і швидкість деформації металу:

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

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

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

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

$$\sigma_\phi = 1{,}1 \cdot \sigma_{Tб} \cdot k_t \cdot k_\varepsilon \cdot k_u.$$

Конструкційна сталь марки Ст. 20 має наступний хімсклад. (%) : 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):

$$\sigma_{Tб} = 80 + 25\{1-[(5-N_1)/4{,}5]^{1{,}8}\} = 80 + 25\ (1 - 0{,}78^{1{,}8}) =$$

$$=89 \text{ Н/мм}^2;$$

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

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

$$k_u = ,03 + 0{,}1\ (\ln 40{,}3 - 2{,}3)^{1.5} = 1{,}19.$$

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):

$$f = f_0 \cdot k_T \cdot k_\upsilon \cdot k_B \cdot k_M \cdot k_e \cdot k_{CM}; \qquad (6.24)$$

де f_0 – базовий коефіцієнт тертя, залежний від температури металу; k_T, k_υ, $k_в$, $k_м$, $k_е$, $k_{см}$ – 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

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

$$k_\upsilon = 0{,}76 + 0{,}82\ \ 1 - 0{,}1 \cdot \vee\ ^2 = 0{,}76 + 0{,}82\ \ 1 - 0{,}1 \cdot 7\ ^2 = 0{,}83.$$

Приймаємо [8, 23] для зношених валків $k_в$ = 1,15, для маловуглецевої сталі $k_м$ = 1,0, для відносного обтиснення (ε=35%) маємо $k_е$ = 1,0, для охолодження водою без спеціального мастила $k_{см}$ = 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

$$f_п = f\,(0{,}92 + 1{,}27\varepsilon) = 0{,}261(0{,}92 + 1{,}27 \cdot 0{,}35) = 0{,}36.$$

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

$$\Delta b = 0{,}53 \cdot C_п \cdot \Delta h_{ср} \cdot B/n_ф \cdot h_{ср}. \qquad (6.25)$$

де $C_п$ – коефіцієнт впливу ширини профілю; $n_ф$ – коефіцієнт впливу форми калібру на умови тертя.

Оскільки ширина контакту змінна то $B_{ср} = 0{,}81 \cdot d = 0{,}8 \cdot 45 =$ 36,5 мм (табл. 1.2).

Середня товщина профілю в осередку деформації визначається за формулою

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

Визначимо коефіцієнт $C_п$ при

$$B_{ср}/l_d = 36,5/60,8 = 0,6.$$

Оскільки $B_{ср}/l_d < 0,8$, то

$$C_п = 0,24 + B_{ср}/l_d = 0,84$$

Коефіцієнт $n_ф$ з табл.3.3 рівний $n_ф = 1,41$. 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

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

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

при $l_d/h_{ср} < 1$

$$p_{ср} = \sigma_ф [1+0,20 (1-a) n_{ф\ d}/h_{ср}][1 + (1,1- l_d/h_{ср})^2]; \quad (6.26)$$

при $l_d/h_{ср} > 1$

$$p_{ср} = \sigma_ф [1 + 0,48 f_п (1-a) n_ф l_d/h_{ср}] \quad (6.27)$$

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

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

6. Знаходимо силу, момент крутіння і потужність прокатки

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

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

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

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

при $l_d/h_{ср}$ =1…3,5, $\psi=0,51(l_d/h_{ср})^{-0,10}$;
при $l_d/h_{ср}$> 3,5, $\psi=0,5(l_d/h_{ср})^{-0,092}$;

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

$$\psi=0,145(5,6-l_d/h_{ср});$$

овал - квадрат (шестикутник - квадрат)

$$\psi=0,12(6,1-l_d/h_{ср});$$

ромб - квадрат (ромб)

$$\psi=0,068(8,5-l_d/h_{ср}).$$

При $l_d/h_{ср}$ = 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·$D_б$= 0,6·400 = 240 мм, передатне число i=1, а ККД передачі η = 0,9 (шестерінчаста кліть і шпинделі), коефіцієнт тертя для підшипників кочення μ= 0,004.

Робимо розрахунок:

$$M(= 0{,}0261; M' = 0{,}0261;$$
$$M_{тр1} = 0{,}03 \cdot 0{,}004 \cdot 0{,}24 \approx 0{,}0004 \text{ МН} \cdot \text{м};$$
$$M_{TP2} = \left(\frac{1}{0{,}93} - 1\right)(0{,}03 - 0{,}0004) \approx 0{,}002 МН \cdot м;$$
$$M = 0{,}03 + 0{,}0004 + 0{,}002 = 0{,}0324 \text{ МН} \cdot \text{м}.$$

Потужність на валу двигуна

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

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

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Чекмарев А.П., Мутьев М.С., Машковцев Р.А.[Текст] Калибровка прокатных валков. - М., Металлургия, 1971. - 512 с.
2. Прокатка на блюминге.[Текст] /И.Я. Тарновский, Е.В. Пальмов, В.А. Тягунов и др. - М., Металлургия, 1963. - 339 с.
3. Бахтинов Б.П., Штернов М.М. .[Текст] Калибровка прокатных валков. - М., Металлургиздат, 1953. - 783 с.
4. Флеминг Ф. Прокатка заготовок на гладкой бочке. /Ф.Флеминг, Р. Куне, К. Кути и др. //Черные металлы (пер. с нем.). – 1992, - №3. – С. 7-10.
5. Тарновский И.Я. Формоизменение при пластической обработке металлов.[Текст] - М., Металлургиздат, 1954. - 534 с.
6. Тулупов С.А. Эффективность деформации сортовых профилей. [Текст] /Тулупов С.А., Гун Г.С., Онискив В.Д. и др. - М., *Металлургия, 1990. – 280 с.*
7. Целиков А.И. Теория прокатки. Справочник. [Текст] / А.И. Целиков, А.Д. Томленов, В.И. Зюзин и др. - М., Металлургия, 1982. - 335 с.
8. Николаев В.А. Теория прокатки полос: Учебное пособие. [Текст]. Запорожье, ЗГИА, 2014, - 257 с.
9. Смирнов В.С., Шилов В.А, Инатович Ю.В. [Текст] Калибровка прокатных валков. - М., Металлургия, 1987. - 368 с.
10. Минкин А.В. Расчет систем вытяжных калибров. [Текст] - М.: Металлургия, 1989. - 208 с.
11. Мутьев М.С. Калибровка черновых калибров. [Текст] - М., Металлургия, 1964. - 190 с.
12. Цоухар Г. Силовые воздействия при прокатке в вытяжных калибрах. [Текст] - М., Металлургиздат, 1963. - 207 с.
13. Николаев В.А. Уширение в калибрах простой формы. // Изв. вузов. Черная металлургия, 1965. – С. 103-105.
14. Николаев В.А. Технология прокатки сортовых профилей. Учебное пособие. [Текст] - Запорожье. ЗГИА. 2004. – 150 с.
15. Николаев В.А. Расчет среднего обжатия при прокатке в калибрах вытяжных систем. // Изв. вузов. Черная металлургия, 2000, №7.-С.38-40.
16. Николаев В.А. Калибровка валков для прокатки простых профилей. Учебное пособие. [Текст].- Запорожье, ЗГИА, 2004-153с.

17. Николаев В.А Деформация металла при прокатке в калибрах. [Текст].- Запорожье, ЗГИА, 2006.-196с.
18. Николаев В.А.,Чернета А.П., Нефедов А.А. Закономерности изменения опережения в калибрах для прокатки угловых профилей. // Изв. вузов. Черная металлургия. - 1963. - 4. - С. 83 - 87.
19. Чекмарев А.П., Николаев В.А. Условия захвата при прокатке в калибрах. //Изв.вузов. Черная металлургия. - 1958. - 11. - С. 77-85.
20. Чекмарев А.П., Николаев В.А. Исследование коэффициента трения при горячей прокатке.//Изв.вуз. Черная металлургия. – 1958, - 12. - С. 57-67.
21. Николаев В.А. Теория прокатки. [Текст].- Запорожье, ЗГИА, 2007.-228с.
22. Романченко В.Л., Гетманец В.В., Макаров И.А. Влияние размеров слитков и условий захвата на производительность блюминга. В кн. «Обработка металлов давлением» - М., Металлургия, 1976 (ДМетИ. Сб.59). - С. 105-110.
23. Грудев А.П., Машкин Л.Ф, Ханин М.И. Технология прокатного производства. [Текст] – М.: Металлургия, 1994. – 656 с.
24. Ніколаєв В.О., Мазур В.Л. Технологія виробництва сортового та листового прокату. Частина І. [Текст] – Запоріжжя, ЗДІА, 2000. 256 с.
25. Николаев В.А. Обработка металлов давлением. (Методические указания. Части 1 и 2). [Текст] – Запорожье, ЗГИА, 2014. – 44с.; 44с.
26. Королёв А.А. Конструкция и расчёт машин и механизмов прокатных станов. [Текст] – М.; Металлургия, 1969. – 464 с.
27. Николаев В.А. Валки прокатных станов. [Текст] – Учебное пособие. – Запорожье, ЗГИА, 2000. – 176 с.
28. Николаев В.А Расчёт истинного предела текучести при горячей деформации металла // Металлургическая и горнорудная промышленность, 1999, №1. -С. 26 – 29.
29. Николаев В.А. Влияние химического состава стали на предел текучести при пластической деформации //Металл и литье Украины, 2000, - 11, 12. С. 5 - 8.
30. Николаев В. А. Уширение металла при прокатке // Теория и практика металлургия. 1997. № 3. – с. 8-11.

31. Николаев В. А., Васильев А.Г. Допускаемые обжатия раската в черновых клетях ШСГП. Сб. наук. праць, Металургія // Запорожье, ЗГИА, 2014.С-143-148
32. Николаев В. А. Обжимное и сортовое производмтво. Учебное пособие. [Текст] - Запорожье, ЗГИА, 2008,-178с.
33. Николаев В.А. Процессы обработки металлов давлением. [Текст] -Запорожье: Акцент Инвест-трейд, 2014.-192с.

ЗМІСТ

Вступ..... 3

1 АНАЛІЗ СИСТЕМ КАЛІБРУВАНЬ ВАЛКІВ. РОЗРАХУНОК ГЕОМЕТРИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ..... 4
1.1 Вимоги до калібрування валків..... 4
1.2 Елементи калібрів..... 5
1.3 Призначення, форми і типи калібрів..... 9
1.4 Геометричні параметри деформації в простих калібрах..19
1.5 Площа контакту розкату з валками..... 22
1.6 Аналіз методів визначення середнього обтиснення в калібрах простої форми..... 23
1.7 Нейтральна лінія калібра..... 28
1.8 Розташування калібрів у валках..... 31

2 РОЗШИРЕННЯ МЕТАЛУ В КАЛІБРАХ..... 33
2.1 Розрахунок розширення розкату у гладких валках..... 33
2.2 Розширення металу при прокатуванні різних марок сталей..... 38
2.3 Формули для розрахунку розширення в калібрах..... 39
2.4 Розрахунок розширення в калібрах за експериментальними даними..... 42
2.5 Розрахунок розмірів калібрів з урахуванням розширення та їх форми..... 45

3 ВИЗНАЧЕННЯ МАКСИМАЛЬНИХ КУТІВ ЗАХВАТУ І ОБТИСНЕННЬ..... 51
3.1 Коефіцієнт тертя при гарячому прокатуванні стали..... 51
3.2 Коефіцієнт тертя при захваті металу валками (промислові дані)..... 53
3.3 Вплив форми калібру на умови захвату розкату валками стана..... 59
3.4 Визначення обтиснення валками, що допускається..... 61

4 ХАРАКТЕРИСТИКА КАЛІБРУВАНЬ ВАЛКІВ ПРОКАТНИХ СТАНІВ..... 67
4.1 Калібрування валків блюмінга..... 67
4.2 Калібрування валків заготовочних станів..... 69

4.3 Основні принципи калібрування валків для прокатки рельсов..... 73
4.4 Основні положення калібрування балочних профілів... 78
4.5 Калібрування валків для прокатування сортових профілів..... 82

5 ПРИКЛАДИ РОЗРАХУНКІВ КАЛІБРУВАНЬ ВАЛКІВ ДЛЯ ПРОКАТКИ ПРОСТИХ ПРОФІЛІВ..... 86
5.1 Метод розрахунку режиму деформації металу (калібрування валків) на блюмінгу..... 87
5.2 Калібрування валків неперервно-заготовочного стана (НЗС)..... 99
5.3 Побудова калібрів..... 117
5.4 Методика розрахунку калібрування валків для прокатки круглого профілю на неперервному стані..... 118
5.5 Побудова калібрів..... 134

6 РОЗРАХУНОК ЕНЕРГОСИЛОВИХ ПАРАМЕТРІВ ПРОКАТКИ В КАЛІБРАХ..... 138

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ..... 154

Методичне видання

Віктор Олександрович Ніколаєв
д.т.н., професор

КАЛІБРУВАННЯ ПРОКАТНИХ ВАЛКІВ

Навчальний посібник

Підписано до друку 14.12.2015р. Формат 60x84 1/32. Папір офсетний.
Умовн. друк. арк. 8,8. Наклад 3 прим.
Внутрішній договір № 131/15 Оц. 10,00

Запорізька державна інженерна академія
Свідоцтво про внесення до Державного реєстру суб'єктів
видавничої справи ДК № 2958 від 03.09.2007 р.

Віддруковано друкарнею
Запорізької державної інженерної академії
з оригінал-макету авторів

69006, м. Запоріжжя, пр. Леніна, 226
ЗДІА