

№ 1272

В.Б. Шишко
В.А. Трусов
Н.А. Чиченёв

Основы калибровки валков сортовых прокатных станов

Учебное пособие

№ 1272

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РФ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ «МИСиС»

Кафедра инжиниринга технологического оборудования
Кафедра пластической деформации специальных сплавов

В.Б. Шишко
В.А. Трусов
Н.А. Чиченёв

Основы калибровки валков сортовых прокатных станов

Учебное пособие

Допущено учебно-методическим объединением
по образованию в области металлургии в качестве учебного
пособия для студентов высших учебных заведений, обучающихся
по направлению 150100 – Металлургия и специальности
150404 – Металлургические машины и оборудование



Москва 2010

УДК 621.771.074
Ш55

Рецензент
д-р техн. наук, проф. *В.А. Осадчий*

Шишко В.Б., Трусов В.А., Чиченёв Н.А.

Ш55 Основы калибровки валков сортовых прокатных станов:
Учеб. пособие. – М.: Изд. Дом МИСиС, 2010. – 247 с.
ISBN 978-5-87623-338-7

Изложены основные принципы калибровки валков для прокатки сортовых профилей. Приведены способы построения, основные геометрические соотношения и способы расчета калибров для прокатки фасонных и сортовых профилей общего назначения. Рассмотрены примеры практического расчета формоизменения металла, построения калибров, температурных и энергосиловых параметров при прокатке сортовых профилей, а также примеры расчета формоизменения металла и построения калибров для прокатки угловой стали, балок, швеллеров и рельсов.

Пособие предназначено для студентов, обучающихся по направлению 150100 «Металлургия», при проведении практических занятий, курсовом и дипломном проектировании, а также может быть полезно специалистам, работающим в сфере сортопрокатного производства.

УДК 621.771.074

ISBN 978-5-87623-338-7

© Шишко В.Б.,
Трусов В.А.,
Чиченёв Н.А., 2010

ОГЛАВЛЕНИЕ

Условные обозначения.....	5
Предисловие.....	8
Введение.....	9
1. Геометрические соотношения в вытяжных калибрах и параметры формоизменения.....	10
1.1. Ящичные калибры.....	10
1.2. Ромбические (квадратные) калибры.....	11
1.3. Овальные калибры.....	12
1.4. Плоские овальные калибры.....	12
1.5. Шестигранные калибры.....	13
1.6. Круглые калибры.....	14
1.7. Ребровые овальные калибры.....	15
1.8. Шестиугольные калибры.....	16
1.9. Параметры формоизменения в вытяжных калибрах.....	17
2. Реверсивные станы.....	21
2.1. Технологические основы прокатки на реверсивных станах.....	21
2.2. Порядок расчета схемы обжатий блюмов.....	24
2.3. Скоростной режим прокатки на реверсивных станах.....	35
2.4. Продолжительность участков прохода.....	39
2.5. Порядок расчета скоростного режима.....	40
2.6. Усилие прокатки.....	47
2.7. Крутящий момент прокатки.....	50
2.8. Порядок расчета энергосиловых параметров прокатки.....	55
3. Вытяжные системы калибров.....	65
3.1. Порядок расчета вытяжных систем калибров.....	65
3.2. Системы ящичных калибров.....	68
3.3. Система калибров «прямоугольник–гладкая бочка».....	86
3.4. Система калибров «ромб–квадрат».....	86
3.5. Система калибров «овал–квадрат».....	92
3.6. Система калибров «шестигранник–квадрат».....	100
3.7. Система калибров «овал–круг».....	100
3.8. Система калибров «плоский овал–круг».....	101
3.9. Система калибров «овал–ребровой овал».....	108
3.10. Система калибров «гладкая бочка–круг».....	108
3.11. Энергосиловые параметры прокатки.....	108
3.12. Машинное время и время передачи раската из одного калибра в другой.....	112

3.13. Температура металла.....	113
4. Трехвалковые вытяжные системы	118
4.1. Особенности трехвалковых вытяжных систем.....	118
4.2. Геометрические соотношения и схема формоизменения	119
4.3. Порядок расчета калибровки валков	121
4.4. Трехвалковые калибрующие блоки клетей.....	128
5. Фасонные профили.....	129
5.1. Проектирование калибровки валков.....	130
5.2. Калибровка валков для прокатки угловой стали	132
5.3. Калибровка валков для прокатки двутавровых профилей	150
5.4. Калибровка валков для прокатки швеллеров.....	176
5.5. Калибровка валков для прокатки рельсов.....	211
Заключение.....	239
Библиографический список	240
Приложения	242

УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

Геометрия раската и калибра

- A – площадь калибра и поперечного сечения раската, мм²
 a – характерный размер заданного профиля, мм
 b_d – ширина дна калибра, мм
 h, b – высота и ширина раската и калибра, мм
 m – высота боковой внешней зоны (притупление раската), мм
 r – радиус закругления углов раската и в калибре, мм
 s – зазор между валками, мм
 Λ – соотношение осевых размеров раската
 ν – коэффициент формы поперечного сечения раската
 ν_k – коэффициент формы калибра
 φ – угол для построения калибра, град, рад
 ψ – коэффициент простора для уширения в калибре

Очаг деформации и параметры формоизменения

- $A_{\text{конт}}$ – площадь проекции поверхности контакта металла, мм²
 $K_{\text{зап}}$ – коэффициент заполнения калибра
 $l_{\text{дуг}}$ – длина проекции дуги контакта металла с валками, мм
 $R_{\text{кат}}$ – катающий радиус, мм
 α – угол захвата металла, град
 β – коэффициент уширения
 γ – нейтральный угол калибра, рад
 Δb – уширение металла, мм
 Δh – обжатие металла, мм
 ε – относительное обжатие
 λ – коэффициент общей вытяжки в системе калибров
 μ – коэффициент вытяжки
 $\mu_{\text{ср}}$ – коэффициент средней вытяжки
 μ_{Σ} – коэффициент общей вытяжки
 $1/\eta$ – коэффициент обжатия

Энергосиловые параметры

- e – плечо приложения равнодействующей усилия прокатки, мм
 F – усилие прокатки, кН
 f – коэффициент трения
 i – коэффициент опережения металла
 k_1 – коэффициент, учитывающий материал валков
 k_2 – коэффициент, учитывающий материал прокатываемого раската
 k_3 – коэффициент, учитывающий влияние скорости прокатки
 M – момент прокатки, кН·м
 n – частота вращения валков, мин⁻¹
 n_σ – коэффициент напряженного состояния
 $p_{\text{ср}}$ – среднее давление металла на валки, МПа
 T – температура металла перед входом в валки, °С
 u – скорость деформации, с⁻¹
 v – скорость прокатки, м/с
 W – условное число оборотов валков за проход
 y – ускорение, мин⁻¹/с
 σ – сопротивление металла деформации, МПа
 ψ – коэффициент плеча приложения равнодействующей

Температура металла

- C_s – постоянная излучения абсолютно черного тела, ккал/(м²·К·ч)
 c – теплоемкость металла, ккал/(кг·°С)
 D – приведенный диаметр поперечного сечения раската, мм
 L – длина пути раската, м
 Nu – критерий Нуссельта
 Re – критерий Рейнольдса
 T – температура, °С
 ΔT – изменение температуры, °С
 Δt – время охлаждения раската, с
 ε – коэффициент излучения;
 ζ – степень черноты металла
 k – коэффициент теплопередачи, ккал/(ч·м²·°С)
 $\lambda_{\text{воз}}$ – теплопроводность воздуха, ккал/(м·ч·°С)
 ρ – плотность металла, кг/м³
 Φ – площадь поверхности излучения раската, мм²
 φ – функция угла атаки
 ω – скорость потока омывающей среды относительно раската, м/с

Линейные размеры на стане

- D – диаметр, мм
 L – расстояние от оси прокатных валков до оси кантующих роликов, мм (расстояние между осями валков смежных рабочих клеток, м)
 $l_б$ – длина бочки валка, мм
 $l_ш$ – длина шейки валка, мм
 S – расстояние между осями линий стана, м
 α – угол скручивания при кантовке, град

Технико-экономические показатели

- $BГ$ – коэффициент выхода годного
 $П$ – производительность, т/ч
 $C_{кпр}$ – плановое число суток на ремонты
 T – такт прокатки, с
 $Ч_{ном}$ – фактическое число часов работы в году
 $Ч_{т.п}$ – текущие простои, ч
 G – масса раската, т
 g – доля профилеразмера в общем объеме производства (по массе)

ПРЕДИСЛОВИЕ

Методы расчета калибровок валков отличаются трудоемкостью и большими затратами времени. В настоящее время они, как правило, предусматривают использование информационных технологий. Однако при этом теряются их наглядность и понимание физического смысла происходящих процессов.

При обучении процессам калибровки валков сортовых станов для понимания методики и выработки навыков необходимо уметь выполнять весь комплекс расчетов вручную. Такая методика должна быть максимально приспособлена для ручных расчетов и не только отвечать учебным целям, но и быть пригодной для практического использования при разработке калибровок валков промышленных прокатных станов.

В учебных пособиях, опубликованных авторами в 2003 и 2007 гг., изложены основные принципы калибровки валков сортовых прокатных станов. В данном пособии рассмотрены примеры калибровки валков сортовых прокатных станов, в основу которых положены результаты анализа и разработки действующих калибровок валков, а также многолетний опыт преподавания для студентов и слушателей курсов повышения квалификации и переподготовки кадров на ряде металлургических предприятий.

Пособие предназначено для студентов, обучающихся по направлению 150100 «Металлургия», и может быть использовано при проведении практических занятий, выполнении курсовых и дипломных проектов. Оно может быть полезно инженерам-технологам при разработке режимов производства сортового проката, а также для инженеров-механиков, занимающихся проблемами эксплуатации оборудования сортовых прокатных станов.

ВВЕДЕНИЕ

В общем металлургическом цикле сортопрокатное производство занимает важное место. От уровня его рациональности и, в первую очередь, эффективности технологии прокатки зависят производительность станков, безаварийность работы оборудования, уровень механизации и автоматизации, себестоимость и, в конечном счете, потребительское качество готового проката.

Проектирование технологии прокатки на сортовых станах требует большого инженерного опыта. Ошибки приводят к значительным материальным и производственным потерям, а также к преждевременному выходу из строя производственного оборудования.

В настоящее время разработаны типовые схемы прокатки, научно обоснованные инженерные методы расчета формоизменения металла и проектирования калибровок валков, определены правила расположения калибров на валках.

Выраженными тенденциями развития сортопрокатного производства являются применение непрерывных процессов и непрерывно литых заготовок, увеличение скоростей прокатки при полной механизации и автоматизации технологических процессов.

Решение этих задач неразрывно связано с развитием и совершенствованием методов расчета калибровок валков как основного фактора, определяющего рациональность технологического процесса.

В данном пособии изложены основы инженерных методов расчета калибровок валков сортовых прокатных станков, выработанные на основании анализа действующих калибровок и многолетнего опыта проектирования технологии прокатки на сортовых станах, а также приведены примеры практических расчетов.

1. ГЕОМЕТРИЧЕСКИЕ СООТНОШЕНИЯ В ВЫТЯЖНЫХ КАЛИБРАХ И ПАРАМЕТРЫ ФОРМОИЗМЕНЕНИЯ

1.1. Ящичные калибры

Схема построения калибра приведена на рис. 1.1.

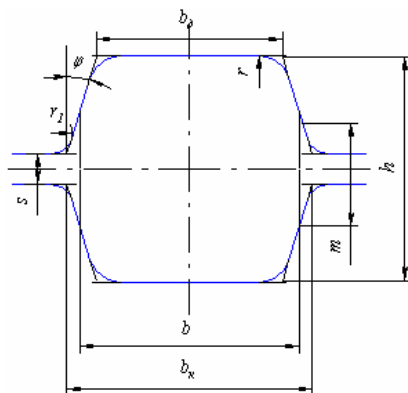


Рис. 1.1. Схема построения ящичного калибра

Выпуск ящичных калибров принимают равным: $\text{tg } \varphi = 0,08 \dots 0,15$ для чистовых и $\text{tg } \varphi = 0,20 \dots 0,35$ для черновых и обжимных калибров. Выпуклость дна калибра составляет $0 \dots 5,0$ мм (на рисунке не показана).

Остальные размеры определяют по следующим соотношениям:

$$r = (0,08 \dots 0,10) h; \quad r_1 = (0,8 \dots 1,0) r; \quad \varphi = \arcsin \frac{b_k - b_d}{h - s};$$

$$m = \frac{b_k - b}{\text{tg } \varphi} + s; \quad A_k = 0,5(b_k + b_d)(h - s) - 4r^2 \left[\text{tg} \left(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2} \right) - \left(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2} \right) \right].$$

Здесь для ящичного и последующих типов калибров A_k – сумма площадей поперечного сечения двух ручьев.

Площадь поперечного сечения прокатанного раската

$$A_m = 0,5(b + b_d)(h - m) - 4r^2 \left[\text{tg} \left(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2} \right) - \left(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2} \right) \right] + mb.$$

1.2. Ромбические (квадратные) калибры

Схема построения калибра приведена на рис. 1.2.

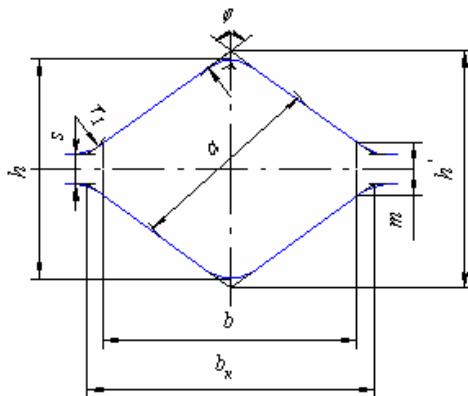


Рис. 1.2. Схема построения ромбического (квадратного) калибра

Радиусы закруглений калибра принимают из соотношений

$$r = (0,08...0,10)a; \quad r_1 = (0,8...1,0)r.$$

Для ромбических калибров можно принимать $r = (0,08...0,10)h$.

Угол при вершине

$$\varphi = \pi - 2 \left(\arctg \frac{h-s-2r}{b_k} + \arcsin \frac{2r}{\sqrt{(h-s-2r)^2 + b_k^2}} \right).$$

Для квадратных калибров при заданном значении φ

$$b_k = \left[(h-s) + 2r \left(\frac{1}{\sin \frac{\varphi'}{2}} - 1 \right) \right] \operatorname{tg} \frac{\varphi'}{2}; \quad h' = \frac{b_k}{\operatorname{tg} \frac{\varphi'}{2}} + s; \quad m = \frac{b_k - b}{\operatorname{tg} \frac{\varphi'}{2}} + s;$$

$$A_k = 0,5b_k(h'-s) - 2r^2 \left[\operatorname{tg} \left(\frac{\pi - \varphi}{2} \right) - \left(\frac{\pi - \varphi}{2} \right) \right];$$

$$A_m = 0,5b(h'-m) - 2r^2 \left[\operatorname{tg} \left(\frac{\pi - \varphi}{2} \right) - \left(\frac{\pi - \varphi}{2} \right) \right] + mb.$$

1.3. Овальные калибры

Схема построения калибра приведена на рис. 1.3.

Параметры овальных калибров определяют по формулам

$$r = \frac{b_k^2 + (h-s)^2}{4(h-s)}; \quad m = h - 2 \left(r - \sqrt{r^2 - \frac{b^2}{4}} \right); \quad \varphi = 2 \arcsin \frac{b_k}{2r};$$

$$r_1 = (0,07 \dots 0,08) h; \quad \varphi' = 2 \arcsin \frac{b}{2r};$$

$$A_k = r^2 \varphi' - b_k \sqrt{r^2 - \frac{b_k^2}{4}}; \quad A_M = r^2 \varphi' - b \sqrt{r^2 - \frac{b^2}{4}} + mb.$$

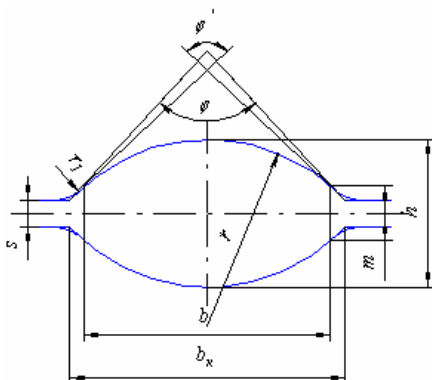


Рис. 1.3. Схема построения овального калибра

1.4. Плоские овальные калибры

Схема построения калибра приведена на рис. 1.4.

Параметры плоских овальных калибров вычисляют по формулам

$$r = \frac{h}{2}; \quad r_1 = (0,07 \dots 0,08) h; \quad b_d = b_0 - 2 r_0; \quad b_k = b_d + \sqrt{r^2 - \left(\frac{s}{2} \right)^2};$$

$$\varphi = \arcsin \frac{b_k - b_d}{2r}; \quad m = h - 2 \left[r - \sqrt{r^2 - \left(\frac{b - b_d}{2} \right)^2} \right]; \quad \varphi' = \arcsin \frac{b - b_d}{2r};$$

$$A_k = \frac{(b_k + b_d)(h - s)}{2} + 2r^2(\varphi - \sin \varphi);$$

$$A_m = \frac{(b + b_d)(h - m)}{2} + 2r^2(\varphi' - \sin \varphi') + mb.$$

Здесь b_0 и r_0 – соответственно ширина и радиус закругления поперечного сечения прямоугольного раската, задаваемого в калибр.

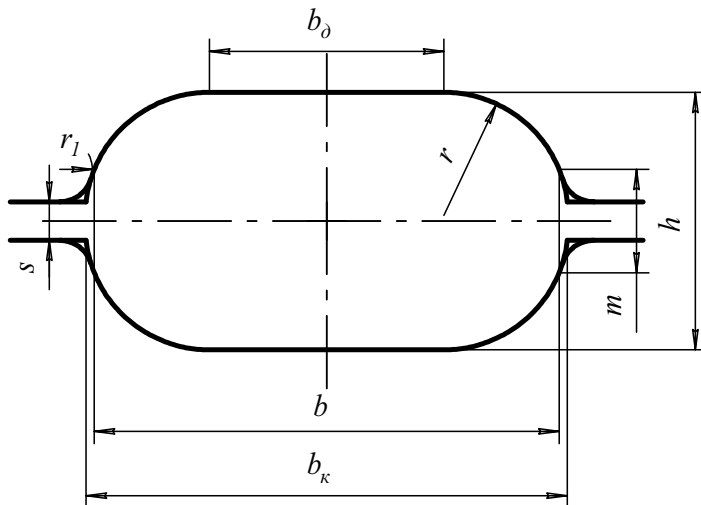


Рис. 1.4. Схема построения плоского овального калибра

1.5. Шестигранные калибры

Схема построения калибра приведена на рис. 1.5.

Параметры шестигранных калибров определяют по формулам

$$r = (0,1 \dots 0,4) h; \quad r_1 = (0,07 \dots 0,08) h;$$

$$\varphi = \frac{\pi}{4}; \quad b_d = b_k - h + s; \quad m = b_k - b + s;$$

$$A_k = \frac{(b_k + b_d)(h - s)}{2} - 4r^2 \left(\operatorname{tg} \frac{\varphi}{2} - \frac{\varphi}{2} \right);$$

$$A_m = \frac{(b + b_d)(h - m)}{2} - 4r^2 \left(\operatorname{tg} \frac{\varphi}{2} - \frac{\varphi}{2} \right) + mb.$$

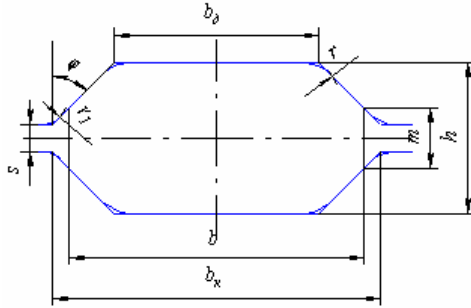


Рис. 1.5. Схема построения шестигранного калибра

1.6. Круглые калибры

Схема построения калибра приведена на рис. 1.6.

Параметры круглых калибров рассчитывают по формулам

$$r = \frac{d}{2}; \quad r_1 = (0,06 \dots 0,08) h; \quad h = d; \quad b_R \approx \frac{d}{(0,98 \dots 1,0)};$$

$$\varphi = \pi - 2 \left(\arcsin \frac{2r}{\sqrt{b_k^2 + s^2}} - \arctg \frac{s}{b_k} \right);$$

$$A_k = \frac{b_k^2}{2} \operatorname{tg} \frac{\pi - \varphi}{2} - 2r^2 \left[\operatorname{tg} \frac{\pi - \varphi}{2} - \left(\frac{\pi - \varphi}{2} \right) \right]; \quad A_m = \frac{\pi d^2}{4},$$

где d – диаметр круга (поперечного сечения раската).

Если $2r \cos \frac{\varphi}{2} < b < 2r$, то

$$m = \frac{b_k - b}{\operatorname{tg} \frac{\varphi}{2}} + s; \quad A_m = \frac{b^2}{2} \operatorname{tg} \frac{\pi - \varphi}{2} - 2r^2 \left[\operatorname{tg} \frac{\pi - \varphi}{2} - \left(\frac{\pi - \varphi}{2} \right) \right] + mb.$$

Если $b \leq 2r \cos \frac{\varphi}{2}$, то

$$m = 2\sqrt{r^2 - \left(\frac{b}{2}\right)^2}; \quad A_m = 2r^2 \arcsin \frac{b}{2r} + mb.$$

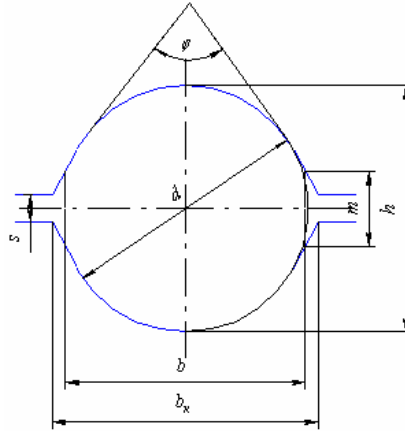


Рис. 1.6. Схема построения круглого калибра

1.7. Ребровые овальные калибры

Схема построения калибра приведена на рис. 1.7.

Параметры ребровых овальных калибров определяют по формулам

$$b_k = \frac{b}{0,97...1,00}; \quad h = (1,15...1,20)b; \quad R = (0,7...1,0)b_k;$$

$$r = (0,20...0,25)R; \quad \gamma = \arctg \frac{x}{\sqrt{(R-r)^2 - x^2}}; \quad x = \sqrt{R^2 - \left(\frac{s}{2}\right)^2} - \frac{b_k}{2};$$

$$\varphi = \left(\frac{\pi}{2} - \gamma\right) - \arcsin \frac{s}{2R}; \quad a = r \sin \gamma; \quad c = R \sin \left(\frac{\pi}{2} - \gamma\right) - \frac{s}{2};$$

$$m = 2\sqrt{R^2 - \left(\frac{b}{2} + x\right)^2}; \quad c_1 = R \sin \left(\frac{\pi}{2} - \gamma\right) - \frac{m}{2}; \quad \varphi' = \left(\frac{\pi}{2} - \gamma\right) - \arcsin \frac{m}{4R};$$

$$A_k = 2r^2(\gamma - \sin \gamma) + 2R^2(\varphi - \sin \varphi) + c(2a + b_k);$$

$$A_m = 2r^2(\gamma - \sin \gamma) + 2R^2(\varphi' - \sin \varphi') + c_1(2a + b) + mb.$$

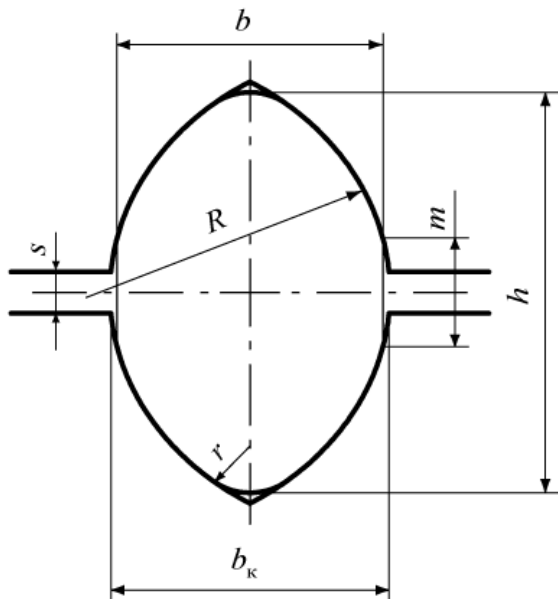


Рис. 1.7. Схема построения ребрового овального калибра

1.8. Шестиугольные калибры

Схема построения калибра приведена на рис. 1.8.

Параметры шестиугольных калибров рассчитывают по формулам

$$\gamma = 3 \dots 8^\circ; r = (0,08 \dots 0,10)d; h = 1,155d - 0,309r;$$

$$b_k = d + (0,578d - s) \operatorname{tg} \gamma;$$

$$A_k = 0,866d^2 - 0,322r^2 - ds + 2 \left(0,289d - \frac{s}{2} \right)^2 \operatorname{tg} \gamma,$$

где d – диаметр вписанной окружности.

Если $b = d$, то

$$A_M = 0,866d^2 - 0,322r^2.$$

Если $b < d$, то

$$m = 1,155d - 0,577b; \quad A_M = 0,289b^2 - 0,107r^2 + mb.$$

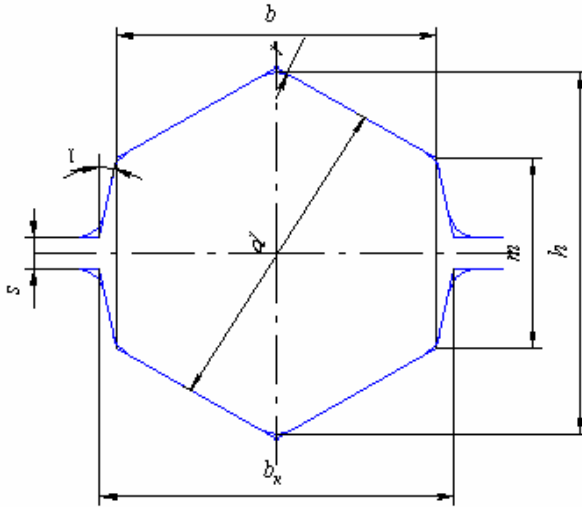


Рис. 1.8. Схема построения шестиугольного калибра

Если $b > d$, то

$$m = 0,578d - \frac{b-d}{\operatorname{tg} \gamma}; \quad A_M = 0,866d^2 - 0,322r^2 + \frac{(b-d)^2}{\operatorname{tg} \gamma} + m(b-d).$$

1.9. Параметры формоизменения в вытяжных калибрах

Коэффициент заполнения калибров $K_{\text{зап}} = b/b_k$. Его значение не должно превышать единицу, т.е. $K_{\text{зап}} \leq 1$. На практике рекомендуется применять: для ящичных калибров $K_{\text{зап}} = 0,80 \dots 0,95$; для овальных, шестиугольных и ромбических калибров $K_{\text{зап}} = 0,86 \dots 0,96$; для круглых, квадратных и ребровых овальных калибров $K_{\text{зап}} = 0,95 \dots 1,0$.

Коэффициент формы калибров

$$v_k = \frac{A_k}{b_k(h-s)}.$$

Коэффициент формы раската

$$v_M = \frac{A_M}{bh}.$$

Приведем формулы для расчета уширения металла:

1) формула Бахтинова

$$\Delta b = 1,15 \frac{\Delta h}{2h_0} \left(\sqrt{R\Delta h} - \frac{\Delta h}{2f} \right);$$

2) формула Губкина

$$\Delta b = \left(1 + \frac{\Delta h}{h_0} \right) f \left(\sqrt{R\Delta h} - \frac{\Delta h}{2f} \right) \frac{\Delta h}{h_0};$$

3) формула Чекмарева

$$\Delta b = \frac{2b_{cp}\Delta h}{(h_0 + h_1) \left[1 + (1 + \alpha) \left(\frac{b_{cp}}{R\alpha} \right)^2 \right]} \quad \text{при } b_{cp} > R\alpha;$$

$$\Delta b = \frac{2b_{cp}\Delta h}{(h_0 + h_1) \left[1 + (1 + \alpha) \frac{b_{cp}}{R\alpha} \right]} \quad \text{при } b_{cp} < R\alpha;$$

4) формула Целикова–Гришкова

$$\Delta b = C_\sigma C_b C_\varepsilon \left(\sqrt{R\Delta h} - \frac{\Delta h}{2f} \right) \ln \frac{h_0}{h_1},$$

где Δh – приведенное обжатие;

h_0 и h_1 – приведенная высота исходного и прокатанного раската соответственно;

f – коэффициент трения;

R – катающий радиус валков;

$b_{cp} = (b_0 + b_1)/2$ (b_0 и b_1 – ширина исходного и прокатанного раската соответственно);

α – угол захвата, рад.

Коэффициенты C_σ , C_b и C_ε учитывают влияние на величину уширения напряжений натяжения металла, ширины раската и деформации, при этом

$$C_{\varepsilon} = 0,5 + 0,48 \frac{\Delta h}{h_0} \left(1 - \frac{\Delta h}{h_0} \right).$$

Формула Шишко–Берковского

$$\beta = 0,87 \left(\frac{1}{\eta} \right)^{0,33} \left(\frac{h_0}{D} \right)^{-0,07} \left(\frac{v_0}{v_k} \right)^{0,37} \psi^{0,08} \Lambda_0^{0,05},$$

где $\beta = \frac{b_1}{b_0}$ – коэффициент уширения;

$$\frac{1}{\eta} = \frac{h_0}{h_1} \text{ – коэффициент обжатия;}$$

D – диаметр валков по буртам;

$$v_0 = \frac{A_0}{h_0 b_0} \text{ – коэффициент формы поперечного сечения исходного}$$

раската;

A_0 – площадь поперечного сечения исходного раската;

$$v_k = \frac{A_k}{h_k b_k} \text{ – коэффициент формы калибра;}$$

A_k – площадь калибра;

h_k и b_k – высота и ширина калибра по осям симметрии (площадь и высота калибра определяются без учета зазора между валками);

$$\psi = \frac{b_k}{b_0} \text{ – коэффициент простора для уширения;}$$

$$\Lambda_0 = \frac{h_0}{b_0} \text{ – отношение высоты к ширине раската.}$$

В дальнейшем для расчета коэффициента уширения используется формула Шишко–Берковского, которая обеспечивает с достоверностью 0,95 точность вычислений с погрешностью в пределах 5 %.

Коэффициент общей вытяжки

$$\mu_{\Sigma} = A_0 / A_{\Pi} = \lambda_N = \prod_{j=1}^N \lambda_j, \quad \text{или } \mu_{\Sigma} = \mu_{\text{ср}}^{\Pi},$$

где N – число систем калибров, использованных в схеме прокатки;

n – число проходов;

λ – коэффициент общей вытяжки в системе калибров.

Коэффициент средней вытяжки определяют по формуле

$$\mu_{\text{cp}} = 1 + 0,083 \left(\frac{A_{\text{п}}}{D^2} \right)^{-0,191}.$$

Обычно $\mu_{\text{cp}} \approx 1,2 \dots 1,4$. Здесь $A_{\text{п}}$ – площадь поперечного сечения готового профиля, мм²; D – диаметр валков для чистового прохода, мм.

Число необходимых проходов

$$n = \frac{\lg \mu_{\Sigma}}{\lg \mu_{\text{cp}}}.$$

Для первых проходов с учетом печной окалины и дефектов реза заготовок принимают величину λ на 5...10 % меньше среднего значения. Для предчистовой и чистовой систем калибров в целях обеспечения необходимой точности размеров и качества поверхности готового проката также целесообразно принять величину λ на 10...20 % ниже среднего значения, т.е.

$$\lambda = 1 + (0,8 \dots 0,9)(\lambda_{\text{cp}} - 1).$$

После этого для остальных систем калибров следует откорректировать значение λ таким образом, чтобы коэффициент общей вытяжки остался без изменения.

2. РЕВЕРСИВНЫЕ СТАНЫ

2.1. Технологические основы прокатки на реверсивных станах

Максимальное обжатие по условию захвата

$$\Delta h_{\max \alpha} = 0,8R_{\text{кат}}f^2, \quad \text{или} \quad \Delta h_{\max \alpha} = D_{\text{кат}} \left(1 - \frac{1}{\sqrt{1+f^2}} \right);$$

$$\Delta h_{\max \alpha} = 0,5D_{\text{кат}}\alpha^2, \quad \text{или} \quad \Delta h_{\max \alpha} = 2D_{\text{кат}} \sin^2 \frac{\alpha}{2},$$

где $D_{\text{кат}} = D_0 - h_1 + s$ – катающий диаметр, мм (D_0 – диаметр валков по буртам, мм; $h_1 = 60 \dots 150$ мм – высота первого калибра; s – расчетный зазор между валками, мм);

f – коэффициент трения;

α – допустимый угол захвата, рад.

Коэффициент трения по формуле Эжелунда с коэффициентами Б.П.Бахтинова

$$f = k_1 k_2 k_3 (1,05 - 0,0005 T),$$

где T – температура металла, °С.

Коэффициент k_1 учитывает материал валков: для стальных шероховатых $k_1 = 1,0$, для чугунных шероховатых $k_1 = 0,8$.

Коэффициент k_2 учитывает материал проката: для конструкционных углеродистых и легированных сталей $k_2 = 1,0$; ледебуритных сталей типа P18, X13M и др. $k_2 = 1,10$; для перлитных и перлитно-мартенситных сталей типа ШХ15, 38ХМЮА, 50ХГА, 40Х13 и др. $k_2 = 1,25 \dots 1,30$; для аустенитных сталей типа 12Х18Н10Т, 12Х17Г9АН4, 45Г17Ю3 и др. $k_2 = 1,40$; для двухфазных аустенитно-ферритных сталей типа 12Х21Н5Т, 15Х18Н12С4ТЮ и др. $k_2 = 1,45$; для ферритных сталей типа 15Х25Т, 15Х17Т и др. $k_2 = 1,55$.

Коэффициент k_3 учитывает скорость прокатки: при $v \leq 2$ м/с $k_3 = 1,0$, при $v \geq 20$ м/с $k_3 = 0,4$, при $2 < v < 20$ м/с $k_3 = 1,67v^{-0,25} - 0,4$.

Окружая скорость вращения валков равна $v_{\text{в}} = \pi D_{\text{кат}} n / 60$, где $D_{\text{кат}}$ – катающий диаметр, мм; n – частота вращения валков, мин^{-1} .

В табл. 2.1 приведены обобщенные значения допустимых углов захвата металла.

Допустимые углы захвата металла α при прокатке на реверсивных станах

Характеристика валков	Значение α , °, при скорости валков v_B , м/с								
	0	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4...7
Гладкая бочка	25,5	24,5	23,5	22,5	21,5	20,0	16,0	14,0	13,0
Калиброванные	29,0	27,5	26,0	24,5	24,0	23,0	19,0	17,0	15,0
Насечка (наварка)	33,0	32,0	31,0	30,0	28,0	26,0	24,0	21,0	20,0

Максимальный угол захвата по условию прочности валков

$$\Delta h_{\max F} = \frac{2}{D_{\text{кат}}} \left(\frac{[F]}{p_{\text{cp}} b} \right)^2.$$

где $[F]$ – допустимое усилие прокатки, Н;

p_{cp} – среднее давление металла на валки, Н/мм²;

b – ширина раската, мм.

Допустимое усилие прокатки

$$[F] = \frac{0,1 D_{\text{кат}}^3 [\sigma] (l_6 + l_{\text{ш}})}{l_x (l_6 + l_{\text{ш}} - l_x)},$$

где $[\sigma]$ – допустимое, с учетом пятикратного запаса, напряжение материала валков на изгиб (для стальных кованных валков $[\sigma] = 120 \dots 140$ МПа);

$l_6, l_{\text{ш}}$ – длина бочки и шейки валков соответственно;

l_x – расстояние от левой опоры до точки приложения равнодействующей усилия прокатки.

Максимальное обжатие по мощности привода

$$\Delta h_{\max P} = \eta_d \frac{M_n (K_n - 0,03) - \frac{1,1 G D^2}{375} y_p}{0,5 p_{\text{cp}} b D},$$

где η_d – коэффициент полезного действия;

M_n – номинальный момент двигателя;

K_n – коэффициент перегрузки двигателя;

$G D^2$ – маховый момент якоря двигателя;

y_p – ускорение разгона двигателя.

Основные технические характеристики некоторых прокатных двигателей приведены в Прил. 1.

Деформируемость слитка при прокатке зависит от многих факторов: марки стали, формы слитка и способа разливки, режима нагрева перед прокаткой, числа и порядка кантовок при прокатке и т.д. На основании практических данных установлено, что на блюмингах повышение интенсивности режимов обжатий улучшает деформируемость слитков.

Максимальное обжатие

$$\Delta h_{\max} = \min(\Delta h_{\max \alpha}, \Delta h_{\max F}, \Delta h_{\max P}),$$

среднее обжатие

$$\Delta h_{\text{cp}} = (0,80 \dots 0,95) \Delta h_{\max},$$

суммарное обжатие

$$\Sigma \Delta h = (1 + c_{\text{cp}})[(H - h) + (B - b)],$$

где H и B – исходные размеры заготовки (слитка), мм;

h и b – размеры прокатанного раската (блюма), мм;

$c_{\text{cp}} = 0,10 \dots 0,15$ – средний показатель уширения (для легированных марок стали его корректируют на величину коэффициента k_2 , т.е. $c_{\text{cp}} = c_{\text{cp}} k_2$).

Число проходов

$$n = \frac{\Sigma \Delta h}{\Delta h_{\text{cp}}}.$$

Длина раската, м, после каждого прохода

$$l = \frac{0,975 G 10^6}{q h b},$$

где G – масса слитка, т;

q – плотность стали, т/м³;

h и b – размеры раската, мм.

Коэффициент 0,975 учитывает угар металла, который при нагреве составляет примерно 2,5 %. При прокатке слитков из спокойной стали плотность литого металла можно принимать равной $q_0 = 7,3$ т/м³, после первого прохода $q_1 = 7,45$ т/м³, после второго $q_2 = 7,65$ т/м³, после третьего и последующих проходов $q_3 = 7,85$ т/м³. При прокатке слитков из кипящей стали принимают соответственно $q_0 = 6,9$, $q_1 = 7,05$, $q_2 = 7,25$, $q_3 = 7,45$, $q_4 = 7,65$, $q_5 = 7,85$ т/м³.

2.2. Порядок расчета схемы обжатий блюмов

Расчет режима обжатий и схемы прокатки в соответствии с исходными данными выполняют в следующем порядке.

1. В зависимости от диаметра и материала валков, мощности привода, марки стали и температуры прокатки определяют коэффициент трения и рассчитывают максимальное и среднее обжатие.

2. Вычисляют суммарное обжатие, определяют необходимое число проходов и выбирают схему распределения обжатий по проходам.

3. Для рассчитанного числа проходов в соответствии с величиной максимального и среднего обжатий для выбранной схемы распределения обжатий по проходам составляют таблицу обжатий.

4. В соответствии с таблицей обжатий, учитывая конкретные условия прокатки на стане, конструируют калибры и проектируют их монтаж на валках.

5. Рассчитывают углы захвата и длину раската по проходам.

Пример 2.1. Рассчитать режим обжатий, размеры и монтаж калибров на валках для прокатки на блюминге блюмов сечением

350×350 мм из слитка стали СтЗкп с размерами $\frac{960 \times 825}{895 \times 750} \times 2500$

массой 12,5 т. Температура начала прокатки – 1300 °С. Предусмотреть прокатку слябов с размерами 150×1000 мм.

Материал валков – сталь 60ХН, длина бочки – 2800 мм, длина шейки валков – 750 мм, диаметр шейки – 750 мм. Калибры восстанавливаются наплавкой. Привод валков – индивидуальный от двух двигателей МП 9250-60.

Решение

1. Максимальное обжатие по условию захвата металла валками. Для максимального использования диаметра бочки валков высота первого калибра (гладкая бочка) принята $h = 60$ мм. Зазор между валками $s = 20$ мм. Поскольку в сортаменте имеются слябы, для первого калибра (гладкой бочки) наварка или насечка не применяется. Катающий диаметр для предварительных расчетов принят

$$D_{\text{кат}} = D - h + s = 1300 - 60 + 20 = 1260 \text{ мм.}$$

Скорость прокатки при захвате металла обычно не превышает 2 м/с. Поэтому коэффициент k_3 можно принять равным единице. Тогда коэффициент трения

$$f = k_1 k_2 k_3 (1,05 - 0,0005T) = 1 \cdot 1 \cdot 1 (1,05 - 0,0005 \cdot 1300) = 0,400 .$$