

Б21,771  
Н 632



Министерство образования и науки  
Украины  
Запорожская государственная  
инженерная академия

**В.А. Николаев**

**КАЛИБРОВКА ВАЛКОВ  
ТРЕХВАЛКОВЫХ СОРТОВЫХ  
КЛЕТЕЙ**

по дисциплине  
“Технология процессов прокатки и волочения”

**УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ**  
для студентов ЗГИА специальности  
**ОМД**

Запорожье  
2003

**Министерство образования и науки Украины**

**Запорожская государственная инженерная академия**

**В.А. Николаев**

**Калибровка валков трех валковых сортовых клетей**

**По дисциплине : Технология процессов прокатки и  
волочения**

**Учебное пособие для студентов ЗГИА  
специальности ОМД**

Рекомендовано к изданию  
на заседании кафедры МОМЗ,  
протокол № 8 от 27.12.02

**Запорожье  
2003**

621.771.073,8(075)

Н 632

УДК 621.771.

В.А.Николаев . Калибровка валков трехвалковых сортовых клетей (по дисциплине: Технология процессов прокатки и волочения). Учебное пособие.- Запорожье, ЗГИА, 2003.- 59 с.

В пособии излагается краткая характеристика технологического процесса прокатки алюминиевой проволоки с использованием машины непрерывного литья заготовки (совмещенный процесс литье-прокатка) и методика расчета размеров калибров. Приведены фактическая калибровка валков и фактические размеры калибров и рабочих шайб.

Учебное пособие предназначено для студентов, обучающихся по специальности «Обработка металлов давлением», а также будет полезно для инженерно-технических работников металлургических предприятий.

8/у

Запорізька державна  
інженерна академія  
БІБЛІОТЕКА

## Предисловие

В последнее время получают широкое применение непрерывные станы с трехвалковыми клетями для прокатки катанки. Так, весь выпуск алюминиевой катанки осуществляют на литейно-прокатных агрегатах (ЛПА) с трехвалковыми клетями. В тоже время теоретических разработок процесса прокатки в многовалковых клетях еще недостаточно для выполнения расчетов размеров калибровки валков. Это связано со сложностью определения необходимых размеров смежных калибров и величин уширения металла в калибре, образованном тремя валками.

В данной работе представляется новый подход к расчету элементов калибров различного типа, уширения металла в калибрах, а также алгоритм расчета калибровок валков.



# 1. Параметры калибровки непрерывного стана

## 1.1 Краткая характеристика стана

При совмещенных процессах производства алюминиевой катанки применяют непрерывные станы с трехвалковыми блоками клетей. Такие же блоки используют и при прокатке стальной проволоки. Основные преимущества таких блоков и анализ схем калибровок валков трехвалковых клетей представлены в работах [1, 2], некоторые вопросы прокатки в трехвалковых калибрах рассматриваются в работах [3 – 6].

При прокатке в трехвалковом очаге деформации имеет место значительно меньшая величина уширения по сравнению с двухвалковым очагом деформации, что позволяет прокатывать в одних и тех же калибрах металл с различной склонностью к уширению. Более благоприятная схема деформации, с преимущественным развитием напряжений сжатия, положительно сказывается на качестве структуры полосы.

На Запорожском заводе алюминиевой катанки установлен десятиклетевой стан типа С6 / 1400 - 2 ÷ 8 / 9 - мини, в котором имеются: первая клеть с двумя горизонтальными валками; вторая - с двумя вертикальными валками; третья трехвалковая клеть с треугольным калибром, а остальные трехвалковые клетки со стрельчатыми треугольными калибрами (нечетные) и круглыми калибрами (четные).

Схема расположения оборудования стана представлена на рис.1, а кинематическая схема привода валков - на рис.2. Стан прокатывает катанку диаметром  $d = 9,5$  мм из алюминия марки А7Е ( $Si \leq 0,08\%$ ,  $Fe = 0,12...0,20\%$ ,  $Ti, Mn, Mg, Cu, Ni, Zn, Cr, Pb, Zr, Na, V$  в пределах  $0,00005...0,001\%$ , остальное Al). Проволока из алюминия марки А5Е содержит в своем составе:  $Si=0,09...0,10\%$  и  $Fe = 0,21...0,35\%$ .

Расплавленный алюминий при температуре  $715...720^{\circ}C$  из печи (две печи) по желобу поступает сначала в ванну кристаллизатора 6 (рис.1), а затем через дозатор 5 заливается в полость (калибр), образованную выточкой в колесе кристаллизатора 6 и лентой 8, обхватывающей колесо. Лента натягивается холостым шкивом 7 и в месте заливки металла прижимается к колесу роликом 9. Пройдя совместно с колесом путь в  $\sim 180^{\circ}$ , алюминий застывает и выдается в виде бесконечного слитка 10 (рис.1). Оптимальное заполнение формы кристаллизатора регулируется дозатором. Слиток (заготовка), опираясь на ролик, передается в непрерывный стан 14, состоящий из

10 клетей, где он обжимается в катанку до необходимого диаметра, которая затем поступает на моталку 18, 19.

В первую клеть стана слиток (заготовка) задается с температурой перед клетью в пределах 460...500<sup>0</sup>С, а из чистовой клетки №10 выходит круг  $d = 9,5$  мм с температурой 180...200<sup>0</sup>С. Крулый профиль прокатывают с точностью  $\pm 0,3$  мм. Перед станом установлены ножницы 13 для отрезки переднего конца слитка и разрезания его на куски в случае задержки на прокатном стане.

Кристаллизатор и валки прокатного стана приводятся от двигателей постоянного тока, что позволяет регулировать и синхронизировать скорости. Если скорость входа заготовки в прокатный стан превышает скорость выхода заготовки из кристаллизатора, то петля между кристаллизатором и прокатным станом автоматически выбирается. Кристаллизатор охлаждают водой, а на валки прокатного стана подают эмульсию концентрацией 12...15% из эмульсола марки "Просол-67". Эмульсия на валки подается из бака емкостью 15 м<sup>3</sup>.

Кинематическая схема прокатного стана представлена на рис.2. Нижние валки нечетных клетей приводятся во вращение от общего привода мощностью  $N = 212$  кВт через конические передачи. Остальные валки в клетях получают привод от нижних валков через шестеренные передачи. Четные клетки с круглыми калибрами имеют общий привод на верхние валки. Остальные два валка приводятся через конические шестерни. Характеристика валков стана дана в табл.1.

Применяемые на стане валки выполнены составными из оси и рабочей шайбы (см. ниже). Рабочие шайбы в клетях 1-4 насаживают непосредственно на ось со шпоночным соединением, а в клетях 5-10 - на промежуточные шайбы на "горячо" после подогрева в масле до  $t \approx 60^{\circ}$ С. Демонтаж рабочих шайб после износа наружных поверхностей калибра необходимо также выполнять на "горячо" с целью предотвращения износа (повреждения) поверхностей промежуточных шайб.

Перед валками установлены линейки, которые плотно удерживают входящую в клеть заготовку и предотвращают ее кантовку на произвольный угол. Не допускается ослабление крепления линеек.

Скорость вращения валков в чистовой клетях 10 составляет  $n_{10}=477,7$  об/мин, а в предыдущих клетях определяется в соответствии с величинами коэффициентов кинематических вытяжек  $\mu_k$ .

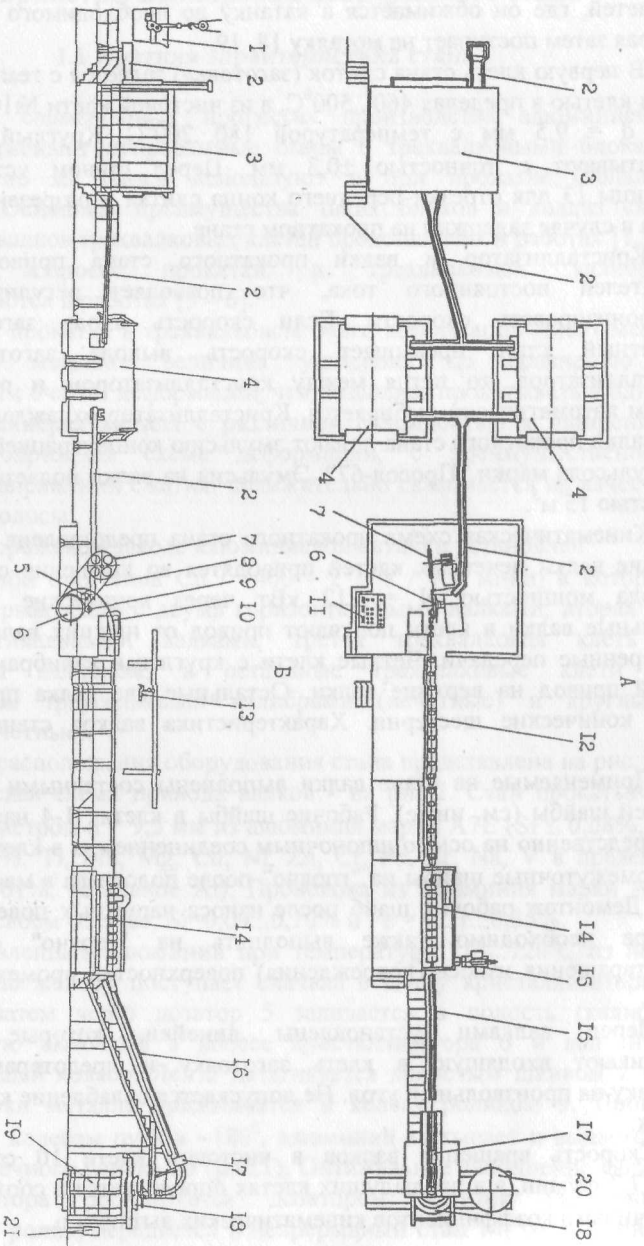


Рис. 1. Литейно-прокатный агрегат для производства алюминиевой катанки: А — план расположения оборудования агрегата; Б — продольный разрез по линии прокатки; 1 — заливочный ковш; 2 — желоб; 3 — плавильная печь; 4 — печная миксер; 5 — дозатор; 6 — литейное колесо; 7 — натяжное колесо; 8 — стальная лента; 9 — прижимной ролик; 10 — литая заготовка; 11 — пулт управления агрегатом; 12 — транспортный ролик; 13 — ножницы; 14 — рабочая клетка № 1-10; 15 — привод стана; 16 — направляющая трубка; 17 — тянущие ролики; 18 — конусный распределитель; 19 — накопитель бунта; 20 — запасной накопитель; 21 — пулт управления моталкой.

**Таблица 1. Краткая характеристика валков стана.**

№ клетки	Диаметр шайбы (вала) внутренний $D_{\text{в}}$ , мм	Диаметр шайб (валков) наружный $D_{\text{н}}$ , мм	Ширина шайб (валков) $B$ , мм	Диаметр вписан. круга, мм
10	137,0	174,4	30/29,6	9,53
9	137,0	172,55	30/29,6	9,38
8	137,0	173,01	30/29,6	11,99
7	137,0	171,1	30/29,6	11,80
6	137,0	171,5	30/29,6	15,12
5	137,0	167,8	30/29,6	14,84
4	45,0	168,75	38,2	19,78
3	45,0	160,8	38,2	19,30
2	85,0	177,5	60,0	28,73
1	100,0	192,0	70,0	22,47

В соответствии с паспортными данными окружные скорости валков по клетям имеют следующие значения (по среднему диаметру валков) (табл.2):

Колесо –  $v_0 = 0,247$  м/с;

Клеть 1 –  $v_1 = 0,339$  м/с;

Клеть 2 –  $v_2 = 0,480$  м/с;

Клеть 6 –  $v_6 = 1,74$  м/с;

Клеть 8 –  $v_8 = 2,76$  м/с;

Клеть 10 –  $v_{10} = 4,37$  м/с.

Кинематические вытяжки по клетям стана следующие:

От клетки 1 до клетки 2 - 1,6;

От клетки 2 до клетки 4 - 1,4151;

От клетки 4 до клетки 6 - 1,2979;

От клетки 6 до клетки 10 - 1,25.

Вследствие наличия опережения и различных упругих деформаций клетей фактические коэффициенты вытяжек не совпадают с кинематическими вытяжками.

## 1.2. Общие положения калибровки валков

В соответствии с калибровкой валков расчетные коэффициенты вытяжек равны  $\mu_p \approx 1,25 \dots 1,45$  (табл.2). В табл.2 также

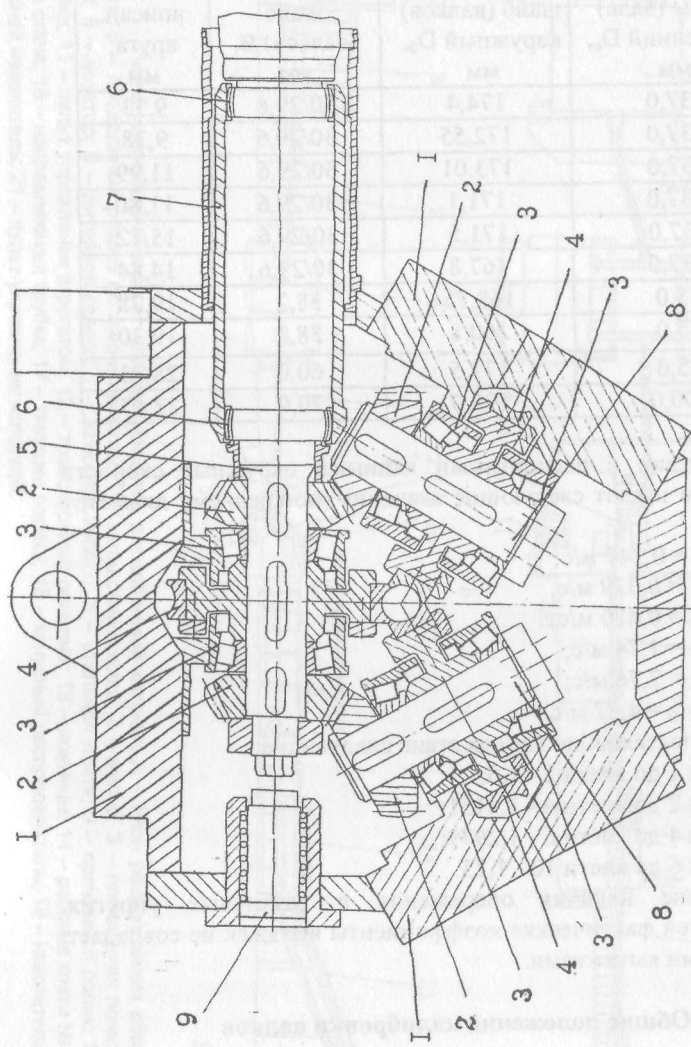


Рис. 2. Кинематическая схема привода валков: 1 – корпус клетки; 2 – коническая шестерня; 3 – радиально – упорный подшипник; 4 – валок; 5 – ведущий вал; 6 – шлицевое соединение; 7 – шлицевой вал; 8 – ведомый вал; 9 – ключ для ручного проворота.

Таблица 2. Коэффициенты вытяжек и площади поперечного сечения темплетов по клетям стана (Площадь заготовки  $q = 1290 \text{ мм}^2$ , диам. готовой проволоки –  $d_{10} = 9,53 \text{ мм}$ ).

№№ клетей	$q, \text{ мм}^2$	$\mu$	$v, \text{ м/с}$	$D_k, \text{ мм}$	$n_{ki},$ об/мин
1	914	1,413	0,339	182,2	35,6
2	648	1,413	0,480	157	58,3
3	446	1,454	0,698	160,7	82,8
4	307	1,454	1,015	163	118,8
5	236	1,303	1,325	166	152,3
6	179,5	1,316	1,74	167	195,6
7	143	1,255	2,17	169	245,7
8	112,9	1,271	2,79	169,66	305,6
9	90,3	1,247	3,45	171,22	384
10	71,3	1,265	4,37	171,75	477,4

даны величины площадей поперечных сечений темплетов калибров (рис.3). Коэффициенты вытяжек по клетям рассчитывали по выражению

$$\mu_p = q_{i-1}/q_i \quad (1)$$

где  $q_i$  – площадь поперечного сечения полосы в  $i$ -ой клетке;  $q_{i-1}$  – тоже в предыдущей клетке.

Линейный размер полосы в горячем состоянии будет равен

$$a_r = a_x(1 + \alpha t) \text{ мм},$$

где  $a_r$  и  $a_x$  – линейные размеры полосы соответственно в горячем и холодном состояниях;  $\alpha$  – коэффициент линейного расширения;  $t$  – температура металла.

С учетом теплового расширения площадь поперечного сечения полосы со стороны  $a_x$  будет равна

$$q_r = a_r^2 = a_x^2(1 + \alpha t), \quad (2)$$

где  $q_r$  – площадь поперечного сечения полосы в горячем состоянии.

Например, если  $a_x = 40 \text{ мм}$  и  $b_x = 32 \text{ мм}$ ,  $\alpha = 23,8 \cdot 10^{-6}$ , а  $t = 700^\circ\text{C}$ , то площадь сечения полосы в горячем состоянии равна



$$q_r = 40 \cdot 32(1 + 0,00002 \cdot 38 \cdot 700)^2 = 1301,5 \text{ мм}^2.$$

Таким образом, увеличение площади сечения полосы составляет ~1,7%, что желательнее учитывать в расчетах калибровок.

В соответствии с данными технологической документацией число оборотов валков в клети 10 составляет  $n_{10}=477,7$  об/мин. Скорости вращения валков в предыдущих клетях определим из выражения

$$n_{k(i-1)} = n_{ki} / \mu_{pi}, \quad (3)$$

где  $n_{k(i-1)}$  - число оборотов валков в предыдущей клети;  $n_{ki}$  - число оборотов валков в данной клети.

Применение группового привода валков затрудняет расчет калибров и согласование скоростей полосы в смежных клетях. Сложность калибровки валков станом с групповым приводом заключается в том, что, зная размеры чистового профиля и кинематическую характеристику стана, трудно определить размеры профиля (при заданной форме) в промежуточных клетях, которые удовлетворяли бы, с одной стороны, условиям деформации металла в последующих клетях и, с другой, - скоростным условиям прокатки, которые в свою очередь определяются конструктивными параметрами стана (начальным диаметром валка и передаточными отношениями редукторов главного привода).

С целью обеспечения стабильности процесса прокатки и получения высокой точности чистового профиля, прокатка в трехвалковых клетях непрерывной группы должна производиться с натяжением. Основным условием непрерывной прокатки является постоянство секундных объемов металла, проходящих через клеть в секунду, то есть:

$$V_1 = V_2 = V_3 = \dots = V_{10}, \quad (4)$$

где  $V_i$  - секундный объем металла в клети.

Условие постоянства секундных объемов металла в клетях (константа прокатки) может быть также выражена следующим образом:

$$q_{10} D_{10} n_{10}(1 + S_{10}) = q_9 D_9 n_9(1 + S_9) = \dots = q_1 D_1 n_1(1 + S_1), \quad (5)$$

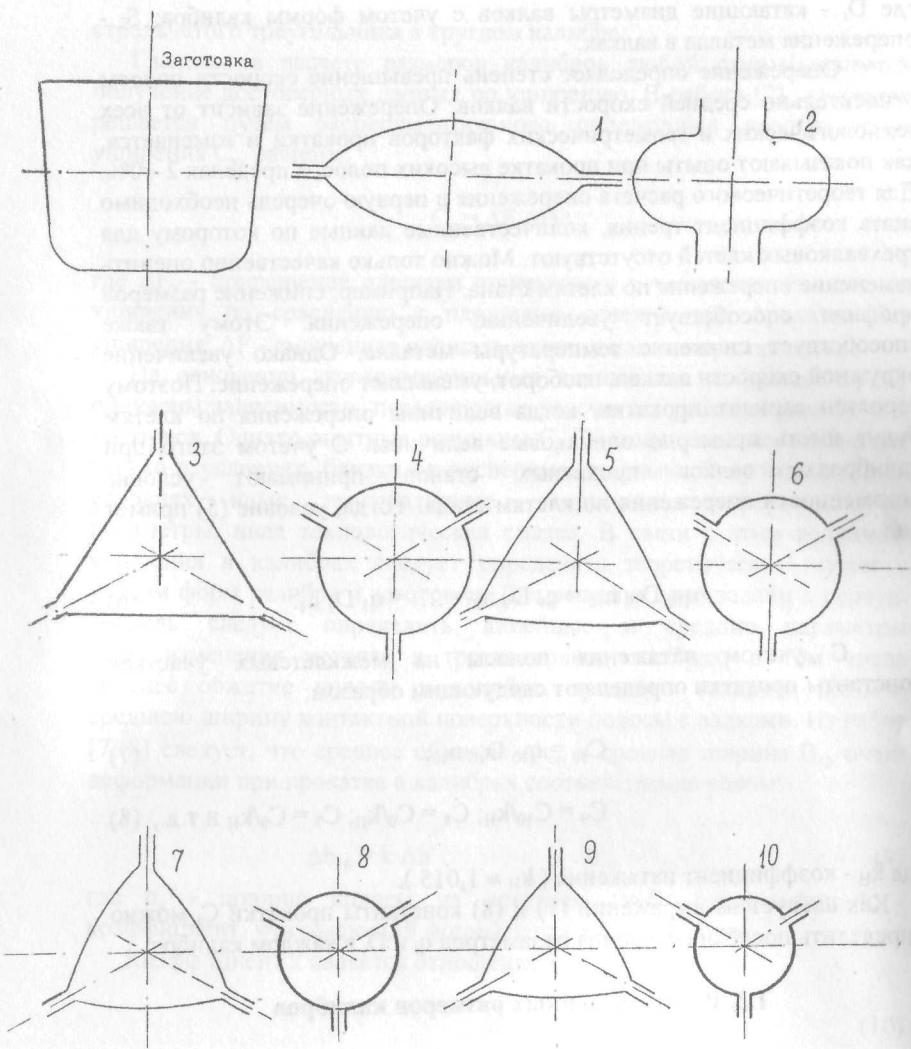


Рис.3. Калибровка валков непрерывного стана для прокатки алюминиевой проволоки (1-10 – номера клеток) Размеры калибров даны на чертежах.



где  $D_i$  - катающие диаметры валков с учетом формы калибра;  $S_i$  - опережение металла в валках.

Опережение определяет степень превышение скорости полосы относительно средней скорости валков. Опережение зависит от всех технологических и геометрических факторов прокатки и изменяется, как показывают опыты при прокатке высоких полос, в пределах 2-10%. Для теоретического расчета опережения в первую очередь необходимо знать коэффициент трения, количественные данные по которому для трехвалковых клетей отсутствуют. Можно только качественно оценить изменение опережение по клетям стана. Например, снижение размеров профиля способствует увеличению опережения. Этому также способствует снижение температуры металла. Однако увеличение окружной скорости валков, наоборот, уменьшает опережение. Поэтому вероятен вариант прокатки, когда величины опережения по клетям будут иметь примерно одинаковые величины. С учетом этого при калибровке валков прокатных станов принимают условие неизменности опережения по клетям стана. Тогда, условие (5) примет вид

$$q_{10} D_{10} n_{10} = q_9 D_9 n_9 = \dots = q_1 D_1 n_1. \quad (6)$$

С учетом натяжения полосы на межклетевых участках константы прокатки определяют следующим образом:

$$C_{10} = q_{10} D_{10} n_{10}; \quad (7)$$

$$C_9 = C_{10}/k_H; C_8 = C_9/k_H; C_7 = C_8/k_H \text{ и т.д.}, \quad (8)$$

где  $k_H$  - коэффициент натяжения ( $k_H \approx 1,015$ ).

Как следует из выражений (7) и (8) константы прокатки  $C_i$  можно определить после определения параметров  $q_i$  и  $D_i$  в каждом калибре.

### 1.3. Расчет линейных размеров калибров

Как отмечали ранее (рис.3) в нечетных трехвалковых клетях применяют калибры в виде стрелчатого треугольника (кроме калибра 3), а в четных круглые калибры. По данным [2] указанная система калибровки является наиболее целесообразной и имеет ряд преимуществ по сравнению с калибровками треугольник-треугольник (треугольник-шестиугольник). В системе по рис.3 имеет место меньшее уширение в стрелчатых калибрах и лучшая устойчивость

стрельчатого треугольника в круглом калибре.

Главным в расчете размеров калибров любой формы является получение достоверных данных по уширению. В работе [2] эта задача решается путем экспериментального определения коэффициента уширения  $C_y$ , равного:

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

где  $\Delta F_y$  - приращение площади поперечного сечения полосы за счет уширения по сравнению с площадью сечения при прокатке без уширения;  $\Delta F$  - смещенная площадь сечения полосы при прокатке.

На основании экспериментальных данных по коэффициенту  $C_y$  получены зависимости, позволяющие рассчитать размеры калибров и заготовок. Однако опытные величины  $C_y$  [2] могут быть использованы только в условиях, близких к экспериментальным. В промышленных условиях, иные температурные, скоростные, деформационные параметры, иная технологическая смазка. В связи с этим величины уширения в калибрах следует определять теоретическим путем с учетом форм калибра и заготовки. Для решения этой задачи в первую очередь следует определить линейные и средние параметры формоизменения металла в трехвалковых калибрах, в том числе среднее обжатие полосы в калибре, среднюю толщину полосы, среднюю ширину контактной поверхности полосы с валками. Из работ [7, 8] следует, что среднее обжатие  $\Delta h_{cp}$  и средняя ширина  $B_{cp}$  очага деформации при прокатке в калибрах соответственно равны:

$$\Delta h_{cp} = k \Delta h \qquad B_{cp} = b_k \sqrt{k} \qquad (9)$$

где  $b_k$  - ширина полосы на контакте очага деформации;  $k$  - коэффициент, учитывающий формы заготовки и калибра.

Коэффициент  $k$  является отношением

$$k = F_k / F_{np}, \qquad (10)$$

где  $F_k$  - фактическая контактная площадь при прокатке в калибре;  $F_{np}$  - площадь описанного прямоугольника.

Коэффициент  $k$  определяется экспериментальным, теоретическим путем или графоаналитическим способом. Графоаналитическим способом установили, что при прокатке стрельчатого треугольника в круглом калибре коэффициент  $k$  равен 0,86, а круга в стрельчатом треугольнике -  $k = 0,82$ .

Аналогичным образом определены коэффициенты  $k$  и для системы трехвалковых калибров шестиугольник - стрельчатый калибр (табл.3).

**Таблица 3. Значения  $k$  при полном заполнении калибра**

Заготовка – калибр	Коэффициент $k$
Шестиугольник-стрельчатый треугольник	0,69
Стрельчатый треугольник– шестиугольник	0,68
Стрельчатый треугольник - круг	0,86
Круг - стрельчатый треугольник	0,82
Квадрат - овал	1,05
Ребровой овал - круг	0,78

Для расчета средних линейных параметров очага деформации необходимо в первую очередь установить величину линейного обжатия в калибре. Рассмотрим условия деформации металла в калибрах системы стрельчатый треугольник-круг (рис.4, 5, 6). Из рис.4, 5 следует, что линейное обжатие выполняется по оси заготовки, а уширение происходит по оси калибра [11]. Каждому линейному обжатию соответствует площадь поперечного сечения OCDN профиля, заключенная между образующей каждой части валка и линиями ОС и ОН. Всего таких площадей в каждом калибре – три. Такая разбивка калибра дает возможность определить параметры деформации относительно одного валка, полагая, что при симметричном расположении заготовки, параметры деформации на других валках будут идентичными. Найдем взаимосвязь между геометрическими размерами калибров различной формы. При этом в системе круг - стрельчатый треугольник (рис.5) деформация металла аналогично прокатке круга в овальном калибре двухвалковых клетей.

#### 1.4. Размеры стрельчатого треугольника

Площадь каждого участка стрельчатого треугольника состоит из площадей треугольника  $q_T$  и сегментов (полуовалов)  $q_C$ . Тогда (рис.4)

$$q_T = a^2 \sqrt{3} / 4 = 0,435 a^2; \quad (11)$$

$$q_C \approx 2\delta a, \quad (12)$$

где  $a$  - сторона стрельчатого треугольника по конструкционным точкам;  $b_k$  - фактическая ширина контакта полосы с валками;  $\delta$  - стрела вогнутости калибра.

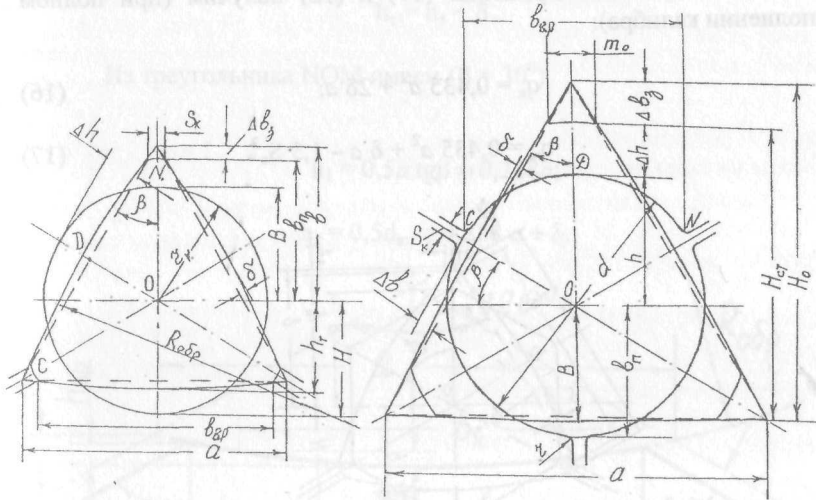


Рис.4. Прокатка круглой заготовки в стрельчатом треугольном калибре (клетки 5, 7, 9).

Рис.5. Прокатка заготовки стрельчатого треугольника в круглом калибре (клетки 4, 6, 8, 10).

Если известны длина и угол  $2\beta$  выпуклой стороны стрельчатого треугольника, то тогда стрелка  $\delta$  определяется выражением (рис. 7)

$$\delta = \frac{a}{2} \operatorname{tg} \beta / 2, \quad (13)$$

где  $2\beta$  - центральный угол ( $\beta = 30^\circ$ ).

Тогда площади самого калибра и металла будут равны:

$$q_k = q_r + q'_c; \quad (14)$$

$$q_m = q_r + q_c - 1,3S_k^2, \quad (15)$$

где  $S_k$  - зазор между валками;  $q_k$  - площадь калибра;  $q_m$  - площадь металла в калибре;  $q_T$  - площадь треугольного калибра;  $q_c$  - площадь сегментов со стрелкой  $\delta$ .

Или с учетом выражений (11) и (12) получим (при полном заполнении калибра):

$$q_k = 0,435 a^2 + 2\delta a; \quad (16)$$

$$q_m = 0,435 a^2 + \delta a - 1,3 S_k^2. \quad (17)$$

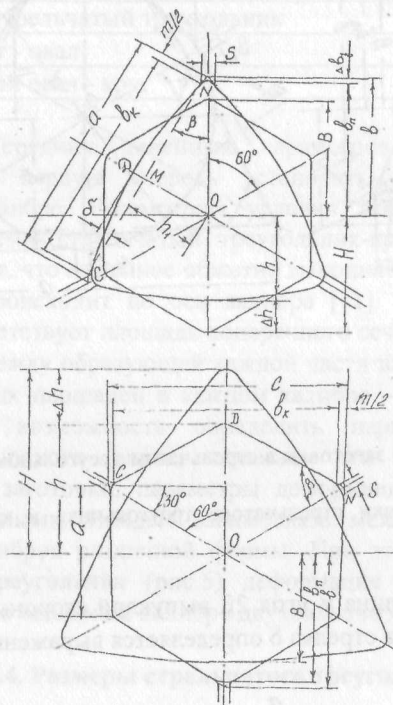


Рис.6. Система шестиугольник – стрелчатый калибр.

Линейное обжатие по оси заготовки равно

$$\Delta h = H - h_T = H - r_{вп}, \quad (18)$$

где  $H$  и  $h_r$  - высоты заготовки и калибра по оси заготовки;  $r_{вп}$  - радиус вписанного круга в стрелчатый треугольник.

Толщина полосы по оси заготовки равна

$$h_r = h_1 + \delta.$$

Из треугольника  $NOM$  имеем ( $\beta = 30^\circ$ )

$$h_1 = 0,5a \operatorname{tg}\beta \approx 0,288a;$$

$$h_r = 0,5d_{вп} = 0,288 a + \delta.$$

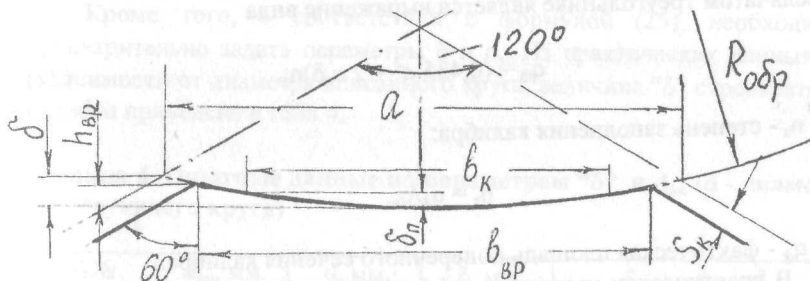


Рис.7. Образующий контур калибра стрелчатого треугольника

Средняя толщина полосы в очаге деформации применительно к каждому валку:

$$\left. \begin{aligned} h_{ср} &= 0,33 q_{\phi} / b_{к}; \\ h_{ср} &= 0,33 q_{\phi} / b_{п}. \end{aligned} \right\} \quad (20)$$

Простор на уширение металла по одной оси калибра равен

$$\Delta b_{п} = b_{п} - 0,5d_{кр}, \quad (21)$$

где  $b_{п}$  - ширина полосы по оси зазора;  $d_{кр}$  - диаметр круглой заготовки;  $q_{\phi}$  - фактическая площадь полосы.

Если калибр не полностью заполнен металлом, то его площадь определяется выражением

$$q_{\phi} = 0,435 a^2 + 2 \delta a k, \quad (22)$$



где  $k_3$  - коэффициент, учитывающий уменьшение площади металла в вершинах калибра за счет кривизны образующей калибра (рис.4).

Коэффициент  $k_3$  определяется по выражениям:

$$k_3 = 1 - \frac{(a - b_k)(\delta - \delta_n)}{a\delta},$$

$$\delta_n = b_k^2 / 8R_{обр},$$

где  $b_k$  - ширина полосы в контакте с валком;  $\delta_n$  - высота сегмента полосы на ширине контакта с валком.

Эти выражения решают методом итераций относительно  $b_k$  и  $\delta_n$ .

Более удобным для расчета фактической площади металла в стрелчатом треугольнике является выражение вида

$$q_\phi = (0,435 a^2 + 2 a \delta) n_3, \quad (24)$$

где  $n_3$  - степень заполнения калибра:

$$n_3 = q_\phi / q_k,$$

где  $q_\phi$  - фактическая площадь поперечного сечения калибра.

В практических условиях коэффициент  $n_3$  равен  $n_3 = 0,85 \dots 0,93$ . Из квадратного уравнения (24) получим выражение для расчета параметра "а" при известных площади  $q_\phi$  и степени заполнения калибра металлом

$$a = -2,36\delta + \sqrt{5,6\delta^2 + 2,30q_\phi / n_3}. \quad (25)$$

Ширину вреза калибра при настроечном зазоре  $S_k$  определим по выражению ( $\beta = 30^\circ$ )

$$b_{вр} = \frac{R_{обр}}{a} \left( \frac{a^2}{R_{обр}} - S_k \cos \beta \right). \quad (26)$$

Глубину вреза калибра в валки  $h_{вр}$  можно определить из выражения (рис.7)

$$h_{вр} = b_{вр}^2 / 8R_{обр} \quad (27)$$

Ширина полосы по оси калибра равна ( $b_k/a > 0,6$ )

$$b_n = a(0,17 + 0,43b_k/a), \quad (28)$$

где  $b_n$  - ширина полосы по оси зазора между валками.

Как следует из приведенных выражений, при расчете стрелчатого треугольника предварительно может быть определена его площадь поперечного сечения, из выражения

$$Q_{\Phi i} = Q_{\Phi(i+1)} \mu_{i+1}, \quad (29)$$

где  $Q_{\Phi(i+1)}$  - площадь последующего круглого калибра;  $\mu_{i+1}$  - коэффициент вытяжки в последующем круглом калибре.

Кроме того, в соответствии с формулой (25), необходимо предварительно задать параметры  $\delta$  и  $n_3$ . Из практических данных, в зависимости от диаметра вписанного круга, величина " $\delta$ " стрелчатого калибра приведена в табл.4.

**Таблица 4. Опытные данные по параметрам " $\delta$ " и  $d_{вп}$  ( $d$  - диаметр последующего круга)**

№№ клетей	$d_{вп}$ , мм	$d$ , мм	$\delta$ , мм	$\frac{\delta}{d_{вп}}$	$\frac{d_{вп}}{d}$
3	19,30	19,78	-	-	0,973
5	14,84	15,12	1,4	0,106	0,98
7	11,8	11,99	1,45	0,123	0,983
9	9,38	9,53	1,2	0,126	0,986

Зависимость  $\delta/d_{вп}$  имеет параболический характер и описывается выражением

$$\frac{\delta}{d_{вп}} = 0,1055 + 0,0215[-0,0028(d_{вп} - 9)^2] \quad (30)$$

где  $d_{вп}$  - диаметр вписанного круга в треугольный калибр.

Диаметр вписанного круга в треугольный калибр (с плоскими или стрелчатыми гранями) зависит от диаметра  $d$  последующего круглого калибра (по ходу прокатки). Из практических данных (табл.4) зависимость между  $d_{вп}$  и  $d$  (последующий круглый калибр по ходу



прокатки) имеет вид

$$\frac{d_{\text{вп}}}{d} = 0,973 + 0,013[1 - 0,092(d - 9)]. \quad (31)$$

Центральный угол  $\alpha$  с основанием "а" определим из выражения

$$\operatorname{tg} \alpha / 4 = 2\delta / a. \quad (32)$$

Тогда радиус образующей калибра равен

$$R_{\text{обр}} = \delta / 2 \sin^2 \alpha / 4. \quad (33)$$

Ширину контакта полосы с валками определим из выражения

$$b_{\kappa} = a - 1,25 \sqrt{(1 - n_3) q_m}. \quad (34)$$

Таким образом, если известен диаметр круглого калибра, например, чистового определяют диаметр вписанного круга в треугольном калибре по формуле (31), стрелку "δ" вогнутости поверхности образующей стрельчатого калибра по формуле (30), фактическую площадь  $q_{\text{ф}}$  по формуле (29), затем сторону "а" стрельчатого треугольника по формуле (25) и все остальные параметры.

Приведем пример расчета размеров стрельчатого треугольного калибра в клети 9. Размеры чистового круглого калибра в клети 10 равны  $d_{10} = 9,53$  мм,  $q_{\text{ф}} = 71,3$  мм<sup>2</sup>. Опытные размеры стрельчатого треугольного калибра представлены на рис.8. Диаметр вписанного круга в калибр клети 9 из формулы (31) равен

$$d_{\text{вп}} = 9,53 \{0,973 + 0,013[1 - 0,092(9,53 - 9)]\} = 9,38 \text{ мм.}$$

Стрелка δ кривизны образующей калибра из формулы (30) равна

$$\delta = 9,38 \left\{ 0,1055 + 0,0215 \left[ 1 - 0,0028(9,38 - 9)^2 \right] \right\} \approx 1,2 \text{ мм.}$$

Фактическая площадь калибра 9 при  $\mu_{10} = 1,265$  (табл.2) из формулы (29)  $q_{\text{ф}9} = 71,3 \cdot 1,265 = 90,3 \text{ мм}^2$ .

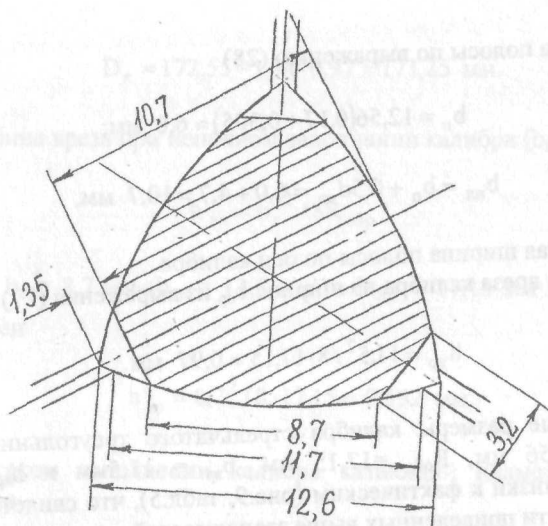


Рис.8. Поперечное сечение темплета клетки 9 ( $R_{\text{обр}} = 17 \text{ мм}$ )

Сторона "а" треугольника из формулы (25) равна ( $n_3 = 0,91$ )

$$a = -2,36 \cdot 1,2 + \sqrt{5,6 \cdot 1,44 + 2,30 \cdot 90,3 / 0,91} = 12,56 \text{ мм.}$$

Радиус образующей калибра стрельчатого калибра по формулам (32) и (33) равен

$$\operatorname{tg} \alpha / 4 = 2,4 / 12,56 = 0,192; (\alpha \approx 43);$$

$$R_{\text{обр}} = 1,2 / 2 \cdot 0,035 = 17,15 \text{ мм.}$$

Ширину вреза калибра  $b_{\text{вр}}$  при настроечном зазоре  $S_{\text{к}} = 0,9 \text{ мм}$  определим из выражения (26) при  $\beta = 30^\circ$

$$b_{\text{вр}} = \frac{17,15}{12,56} \left( \frac{157}{17,15} - 0,9 \cdot 0,866 \right) = 11,5 \text{ мм.}$$

Ширина контакта полосы с валками из выражения (34) равна

$$b_{\text{к}} = 12,56 - 1,25 \sqrt{(1 - 0,91) \cdot 99,4} = 8,9 \text{ мм.}$$

Ширина полосы по выражению (28)

$$b_{\pi} = 12,56(0,17 + 0,305) \approx 6,0 \text{ мм};$$

$$b_{\text{пл}} = b_{\pi} + 0,5d_{\text{вп}} = 6,0 + 4,7 = 10,7 \text{ мм},$$

где  $b_{\text{пл}}$  - полная ширина полосы по оси калибра.

Глубина вреза калибра на ширине  $b_{\text{вр}}$  из выражения (27) равна

$$h_{\text{вр}} = 11,5^2 / 8 \cdot 17,15 = 0,97 \text{ мм}.$$

Расчетные размеры калибра стрельчатого треугольника ( $\delta=1,2$  мм,  $a = 12,56$  мм,  $R_{\text{обр}}=17,15$  мм,  $b_{\text{вр}} = 11,5$  мм и  $h_{\text{вр}}=0,97$  мм) достаточно близки к фактическим (рис.9, табл.5), что свидетельствует о достоверности приведенных выше зависимостей.

Катающий диаметр валков при полном заполнении калибра металлом равен

$$D_{\text{к}} = D_{\text{б}} - 1,34 \cdot h_{\text{вр}}, \quad (35)$$

где  $D_{\text{б}}$  - максимальный диаметр валков по буртам.

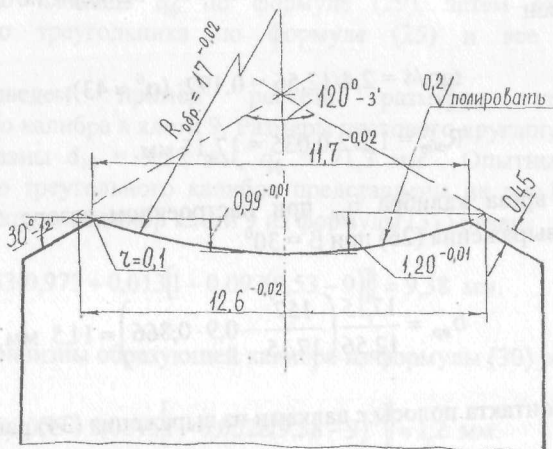


Рис.9. Размеры стрельчатого калибра клетки 9.

Из табл.1 для клетки 9 диаметр валка равен  $D_{\text{б}} = 172,55$  мм. Тогда

$$D_k = 172,55 - 1,34 \cdot 0,97 = 171,25 \text{ мм.}$$

Глубина вреза при неполном заполнении калибра ( $b_k < b_{вр}$ ) равна

$$h'_{вр} = b_k^2 / 8R_{обр} \quad (36)$$

При  $b_k = 8,7$  мм ( $b_{вр} = 11,7$  мм) и  $R_{обр} = 17,15$  мм параметр  $h'_{вр}$  будет равен

$$h'_{вр} = 8,7^2 / 8 \cdot 17,15 = 0,552 \text{ мм.}$$

При таком заполнении калибра катающий диаметр валков из выражения

$$D_k = D_6 - 1,34 \cdot h_{вр} + 0,66 \cdot h'_{вр} \quad (37)$$

равен

$$D_k = 172,5 - 1,30 + 0,36 = 171,56 \text{ мм.}$$

### 1.5. Размеры круглого калибра

Обычно в круглый калибр входит заготовка стрельчатого треугольника со скругленными вершинами (рис.5; 8). Такая форма заготовки обеспечивает достаточную ее устойчивость в круглом калибре. При высотной деформации  $\Delta h$  металл получает уширение  $\Delta b$  по оси калибра и ширина заготовки "В" увеличивается до размера  $b_n$ . В этих условиях вершины заготовки имеют криволинейную поверхность. Площадь круглого калибра при полном заполнении его металлом будет равна (без учета выпуска)

$$q_m = q_k = 0,785d^2 \quad (38)$$

Высота полосы в зоне деформации равна (рис.5)

$$h = 0,5d,$$

Таблица 5. Размеры валков и калибров клетей ЛПА 170

№ клетки	Форма калибра	$D_6^{X)}$ , мм	$D_0$ , мм	$d_{вр}$ , мм	$b_{вр}$ , мм	$h_{вр}$ , мм	$R_{обр}$ , мм
10	Круг	174,4	170,64	9,53	8,5	1,98	—
9	Стрельчатый треугольник	172,55	170,57	9,38	11,7	0,99	17,0
8	Круг	173,01	170,48	11,99	10,5	2,53	—
7	Стрельчатый треугольник	170,68	169,43	11,80	14,7	1,25	23
6	Круг	171,33	168,08	15,12	13,3	3,25	—
5	Стрельчатый треугольник	167,67	166,4	14,84	19,9	1,27	40,3
4	Круг	168,75	164,48	19,78	17,45	4,27	—
3	Цилиндр	160,7	160,7	—	—	—	—
2	Круг	177,5	151,28	28,73	30,0	13,11	—
1	Овал	192,0	177,52	22,47	59,4	7,24	67,1

X)  $D_6$  - максимальный диаметр валка (шайбы);  $D_0$  - диаметр валка по оси;  $d_{вр}$  - диаметр вписанного круга в калибр;  $b_{вр}$  - ширина вреза калибра в валки;  $h_{вр}$  - глубина вреза калибра в валки.

а ширина  $b'_{вр}$  (без учета радиусов закруглений и выпусков) равна

$$b'_{вр} = 0,5(1,73d - S_k). \quad (39)$$

Средняя высота зоны деформации определяется из выражения

$$h_{ср} = 0,384q_{п} / d. \quad (40)$$

Среднее обжатие  $\Delta h_{ср}$  и ширина контакта  $V_{ср}$  рассчитывают из выражений (9) (табл.3).

Формулы для расчета размеров приведены параллельно с определением размеров чистового круглого калибра для прокатки катанки диаметром  $d = 9,53$  мм (рис.5; 10).

Площадь металла в калибре равна

$$q_{\phi} = 0,785d_{10}^2 = 0,785 \cdot 9,53^2 = 71,3 \text{ мм}^2.$$

Для снижения вероятности переполнения круглого калибра металлом и образования подрезов и заусенцев ширину круглого калибра, т.е. размер по разъему валков, выполняют несколько больше диаметра калибра. То есть, калибр выполняют с выпуском, который обычно делают по прямой, касательной к образующей калибра. Угол выпуска принимается равным  $\varphi = 20 \dots 25^\circ$  (рис.10).

Определим геометрические размеры чистового круглого калибра при  $\varphi = 20$  и  $\beta = 30^\circ$ :

$$\left. \begin{aligned} C_0 &= ON = 0,5d / \cos \varphi; \\ b &= 2C_0 \cdot \cos \beta; \\ b_{\text{вр}} &= b - S_{\text{к}} \cdot \cos 2\varphi; \\ \Delta C &= C_0 - r_{\text{к}}; \\ h_{\text{N}} &= 0,5d \cdot \text{tg} \varphi; \end{aligned} \right\} \quad (41)$$

где  $C_0$  - расстояние от оси калибра до конструкционной точки N;  $b$  - ширина калибра по конструкционным точкам;  $b_{\text{вр}}$  - ширина вреза калибра в валки;  $\Delta C$  - ширина выпуска калибра;  $h_{\text{N}}$  - высота прямолинейного участка калибра;  $b_{\text{к}}$  - ширина контакта полосы с валком при номинальном размере круга;  $S_{\text{к}}$  - зазор между валками.

Определим размеры калибра для круга диаметром  $d=9,53\text{мм}$  без учета теплового расширения полосы и валков, величины которых существенно меньше размеров полосы. Из формул (41) имеем (мм):

$$C_0 = 0,5 \cdot 9,53 / 0,94 = 5,07;$$

$$b = 2 \cdot 5,07 \cdot 0,866 = 8,80;$$

$$b_{\text{вр}} = 8,80 - 0,7 \cdot 0,766 = 8,26;$$

$$\Delta C = 5,07 - 4,7 = 0,37;$$

$$h_{\text{N}} = 0,5 \cdot 9,53 \cdot 0,364 = 1,73.$$

Высота вреза калибра в валки относительно конструкционных точек равна:





Глубина вреза и ширина на участке  $b_k$  равна (неполное заполнение калибра):

$$h'_{вр} = h_k - 0,5 \cdot d \cdot \operatorname{tg} \varphi \cdot \sin[90 - (\beta + \varphi)]$$

$$b_k = \sqrt{4 \cdot d \cdot h'_{вр}}$$

Для нашего случая имеем ( $\beta = 30^\circ$ ,  $\varphi = 20^\circ$ ):

$$h'_{вр} = 2,22 - 0,5 \cdot 9,53 \cdot 0,364 \cdot 0,643 = 1,10 \text{ мм};$$

$$b_k = \sqrt{4 \cdot 9,53 \cdot 1,1} = 6,48 \text{ мм}.$$

Простор на уширение металла в круглом калибре равен (по оси калибра) (рис.5)

$$\Delta b_{п} = 0,5d - r_{вп}, \quad (44)$$

где  $d$  - диаметр круглого калибра;  $r_{вп}$  - радиус вписанного круга в предыдущий стрелчатый калибр.

Средняя толщина полосы применительно к одному валку определяется по выражению (20). Линейное обжатие по оси заготовки равно (рис.4; 5)

$$\Delta h = b_{пт} - 0,5d, \quad (45)$$

где  $b_{пт}$  - ширина участка заготовки стрелчатого треугольника;  $d$  - диаметр круглого калибра.

Катающий диаметр, соответствующий средней окружной скорости валков будет зависеть от степени заполнения калибра. Если имеет место полное заполнение калибра ( $b_k = b_{вр}$ ), то катающий диаметр будет равен

$$D_k = D_{\sigma} - 2 \cdot 0,67 \cdot h_{вр} \quad (46)$$

или в числовом выражении ( $D_{\sigma} = 174,4 \text{ мм}$ )

$$D_k = 174,4 - 1,34 \cdot 2,02 = 171,67 \text{ мм}.$$

В случае, если калибр не полностью заполнен металлом, то



средний катающий диаметр равен

$$D_k = D_б - 2(h_{вр} - h'_{вр}) - 1,34h'_{вр}; \quad (47)$$

$$D_k = D_б - 2h_{вр} + 0,66 \cdot h'_{вр}.$$

В числовом выражении получим

$$D_k = 174,4 - 4,04 + 0,73 = 170,9 \text{ мм.}$$

Таким образом, в случае неполного заполнения калибра металлом, катающий диаметр уменьшается.

Полученные расчетные размеры калибра предполагают его полное заполнение металлом. Сравнение расчетных и опытных размеров образующих круглого калибра показывает их хорошее совпадение (рис.11).

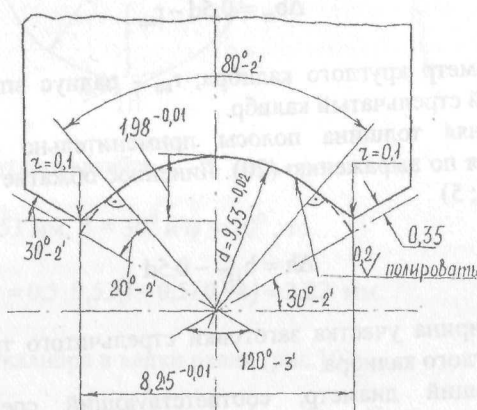


Рис.11. Размеры круглого калибра клетки 10.

### 1.6. Секундный объем металла в клетях 9 и 10

Полученные данные позволяют рассчитать величины секундных объемов прокатки в клетях 9 и 10. Из условий (7), (8) они должны быть равны между собой при  $k_n = 1$ . Из табл.2 следует, что число оборотов в клетях 9 и 10 соответственно равны:  $n_9 = 384$  об/мин и  $n_{10} = 474,4$  об/мин. Секундные объемы равны ( $\mu_k = 1,265$ ):

$$C_{10} = q_{10} \cdot D_{K10} \cdot n_{10} = 71,3 \cdot 170,9 \cdot 477,4 = 5,817 \cdot 10^6 \frac{\text{мм}^3 \cdot \text{об}}{\text{мин}};$$

$$C_9 = q_9 \cdot D_{K9} \cdot n_9 = 90,3 \cdot 171,31 \cdot 384 = 5,94 \cdot 10^6 \frac{\text{мм}^3 \cdot \text{об}}{\text{мин}}.$$

Так как  $C_9 > C_{10}$ , то при данных параметрах деформации происходит подпор полосы, заходящей в клеть 10. Коэффициент рассогласования секундных объемов металла в клетях равен

$$k_H = C_{10} / C_9 = 5,817 / 5,94 = 0,973.$$

Обычно в практике непрерывных станов коэффициент  $k_H$  в расчетах принимают равным  $k_H = 1,01 \dots 1,02$ .

При постоянной площади в чистовой клетке 10 регулирование величины межклетевого натяжения (подпора) (коэффициента  $k_H$ ) полосы осуществляется изменением площади металла в клетке 9 за счет изменения зазора между валками по сравнению с расчетным.

Определим изменение площади поперечного сечения металла в клетке 9 после увеличения или уменьшения зазора на  $\Delta S_K = 0,2 \text{ мм}$ , используя формулу

$$\Delta q_9 = \frac{3}{2} a \cdot \Delta S_K / \cos 30^\circ - 1,34 \Delta S_K^2 \quad (48)$$

Так как  $a = 12,7 \text{ мм}$ ,  $\Delta S_K = 0,2 \text{ мм}$ , то получим

$$\Delta q_9 = 1,5 \cdot 12,7 \cdot 0,2 / 0,866 - 1,34 \cdot 0,2^2 = 4,36 - 0,05 = 4,31 \text{ мм}^2.$$

Таким образом, за счет изменения зазора между валками на  $\Delta S_K = 0,2 \text{ мм}$  можно увеличить или уменьшить площадь сечения полосы в клетке 9 на  $\Delta q_9 = 4,31 \text{ мм}^2$ , что обеспечит регулирование межклетевого натяжения в пределах допустимых значений параметра  $k_H$ .

Определим изменение площади поперечного сечения полосы в клетке 10 (чистой клетке) после изменения зазора между валками на  $\Delta d = 0,1 \text{ мм}$ :

$$\Delta q_{10} = 0,785 (d_{10}^2 - d_{10p}^2) \quad (49)$$

где  $d_{10}$  и  $d_{10p}$  - диаметры круга до и после изменения зазоров.

При  $d_{10} = 9,5$  мм и  $d_{10p} = 9,4$  мм ( $d_{10p} = 9,6$  мм) получим

$$\Delta q_{10} = 0,785(90,25 - 88,36) = 1,483 \text{ мм}^2.$$

Как следует, изменение площади поперечного сечения в клети 10 при изменении диаметра круга на  $\Delta d_{10} = 0,1$  мм позволяет изменять площадь сечения на  $\sim 2\%$  в ту или иную сторону, что достаточно для регулирования межклетевого натяжения при допустимых размерах готового профиля.

Аналогичным образом рассчитываются параметры секундных объемов металла и в остальных клетях стана.

## 2. Расчет размеров калибров

### 2.1. Расчет уширения металла

Выше рассмотрены условия деформации металла в трехвалковых калибрах. Предложены выражения (9) для расчета линейного обжатия со стороны валка и средней ширины контакта металла с валком. Кроме того получены выражения (21) и (44) для определения линейного (по оси зазора между валками) простора на уширение металла по заданному размеру ширины полосы. Простор на уширение в калибре является эталоном, величину которого не может превысить теоретическое (расчетное) уширение  $\Delta b_0$ . То есть, необходимо иметь  $\Delta b_0 \leq \Delta b_n$  для того, чтобы не было переполнения калибра. Параметр  $\Delta b_0$  рассчитывают исходя из среднего уширения для условий прокатки в гладких валках [7 – 9]. В общем случае симметричной применительно к прокатке в двух гладких валках, среднее уширение рассчитывают из выражения

$$\Delta b = 0,53 \cdot C_m \cdot C_n \cdot \Delta h \cdot V_{cp} / h'_{cp},$$

где  $C_n$  - коэффициент, учитывающий влияние ширины контакта;  $\Delta h$  - линейное обжатие полосы;  $V_{cp}$  - средняя ширина полосы;  $h'_{cp}$  - средняя высота полосы в очаге деформации;  $C_m$  - коэффициент, учитывающий материал полосы.

Применительно к условиям деформации на одном валке трехвалкового калибра среднее уширение будет равно

$$\Delta b = 0,265 \cdot C_m \cdot C_n \cdot \Delta h_{cp} \cdot V_{cp} / (2h'_{cp} \cdot n_{\phi})$$

где  $\Delta h_{cp}$  - среднее обжатие полосы на одном валке;  $h'_{cp}$  - средняя толщина полосы относительно одного валка;  $n_{\phi}$  - коэффициент формы калибра.

Тогда получим

$$\Delta b = 0,132 \cdot C_m \cdot C_n \cdot \Delta h_{cp} \cdot V_{cp} / (h'_{cp} \cdot n_{\phi}) \quad (50)$$

Параметр  $\Delta h_{cp}$  определяют по формуле (9). Линейное уширение по оси зазора между валками определяется по формуле [7, 8]

$$\Delta b_0 = \Delta b / n, \quad (51)$$

где  $n$  - коэффициент, учитывающий форму площади простора на уширение.

Коэффициенты  $n_{\phi}$  и  $n$  находят из табл.6 [7, 8]

Коэффициент  $C_n$  рассчитывают из формул табл.7 в зависимости от параметра  $V_{cp} / \ell_d$  (где  $\ell_d$  - средняя длина дуги контакта

$$\ell_d = \sqrt{R_k \cdot \Delta h_{cp}}, \quad (52)$$

где  $R_k$  - средний катающий диаметра валка (шайбы).

**Таблица 6. Значения коэффициентов  $n_{\phi}$  и  $n$ .**

Система калибров	$n_{\phi}$	$n$
Стрельчатый треугольник - круг	1,3	0,7
Круг - стрельчатый треугольник	1,2	0,5
Стрельчатый треугольник - шестиугольник	1,15	0,5
Шестиугольник - стрельчатый треугольник	1,15	0,5
Трапеция - овал	1,15	0,5
Плоский овал - круг	1,3	0,7

Таблица 7. Формулы для расчета коэффициента  $C_n$

$B_{cp} / \ell_d$	Коэффициент $C_n$	Коэффициент $n_b$
1...4	$C_n = \left[ 1,9 - 0,14 \left( \frac{B_{cp}}{\ell_d} - 1 \right)^2 \right] \cdot e^{-\frac{B_{cp}}{\ell_d}}$	-
<1	$C_n = n_B \cdot e^{\left( \frac{B_{cp}}{\ell_d} - 0,8 \right)}$	-
0,8...1	-	$n_B = 0,58 + 4 \left( 1 - \frac{B_{cp}}{\ell_d} \right)^{1,4}$
<0,8	-	$n_B = 1$

## 2.2. Прокатка овальной полосы в треугольном калибре

На рис.12, 13 и в табл.8 показаны формы и размеры темплетов полос при прокатке круглого профиля  $d = 9,53\text{мм}$ .

Наиболее сложным в расчете является определение линейных и средних размеров овальной заготовки (калибр клетки 2), которую прокатывают в треугольном калибре клетки 3 (рис.14, табл.8). При таких формах заготовки и калибра обжатие металла по высоте  $H$  происходит двумя боковыми валками. Третий (нижний) валок, в данных условиях деформации, выполняет вспомогательную функцию - препятствует поперечному течению металла. Действительно, поскольку в верхней части калибра обжатие заготовки существенно больше, чем в нижней, то согласно закону наименьшего сопротивления течению металла при деформации, заготовка перемещается в сторону нижнего валька, на котором металл обжимается как на наковальне. Теоретически учесть эти особенности деформации представляет определенные сложности. Поэтому в первом приближении полагаем, что высотная пластическая деформация осуществляется двумя боковыми валками.

Площадь треугольного калибра определяют из формулы ( $i = 2$ )

$$q_{\phi i} = \mu_{i-1} \cdot q_{\phi(i-1)}, \quad (53)$$

где  $q_{i-1}$  и  $\mu_{i-1}$  - площадь предыдущего по ходу расчета калибра (круглого) и коэффициент вытяжки в нем.

Параметр "а" определяется из выражения (рис.13)

$$a = 1,52 \cdot \sqrt{q_{\phi i} / n_{3i}} \quad (54)$$

Ширина контакта полосы с валками  $b_{ki}$  равна

$$b_{ki} = a_i - 1,25 \sqrt{(1 - n_{3i}) \cdot q_{\phi i} / n_{3i}}. \quad (55)$$

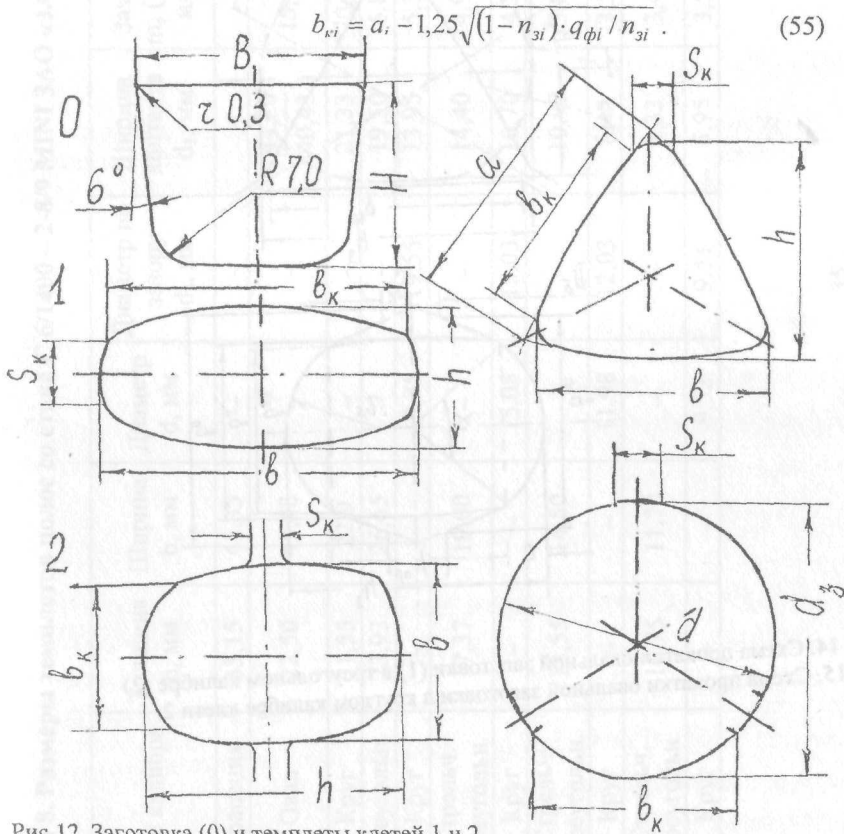


Рис. 12. Заготовка (0) и темплеты клеток 1 и 2.

Рис. 13. Темплеты полос из стрелчатого треугольника (3) и круглого калибров (4).



Средняя толщина готовой полосы в калибре равна

$$h_{\text{ср}} = q_{\text{ф}} / b_{\text{к}}, \quad (56)$$

где  $b_{\text{к}}$  - ширина контакта полосы с валками с учетом степени заполнения калибра.

Величину обжатия двумя валками находим из условия постоянства объема ( $\lambda_1 = \mu_1$ )

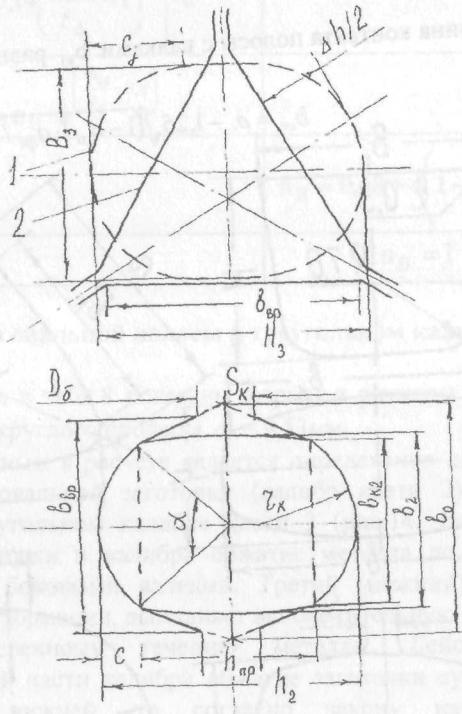


Рис. 14. Схема прокатки овальной заготовки (1) в треугольном калибре (2)

Рис. 15. Схема прокатки овальной заготовки в круглом калибре клетки 2.

Таблица 8. Размеры темплетов полосу станка С 6/1400 – 2-8/9 MINI ЗАО «ЗАКАЛ».

№ п/п клетки	Тип калибра	Толщина h, мм	Ширина b, мм	Диаметр d, мм	Диаметр по зазору d <sub>з</sub> , мм	Ширина контакта d <sub>з</sub> , мм	Зазор п, (S <sub>к</sub> ), мм	Длина очага деформации ℓ <sub>ог</sub> , мм	Ширина вреза калибра B <sub>вр</sub> , мм	a, мм
Загот.	Трапеция	33,15	41,35	—	—	—	—	—	—	—
1	Овал	22,50	45,48	—	—	$\frac{44,20}{40,43}$	15,50	$\frac{35,80}{34,90}$	59,40	—
2	Круг	31,55	22,9	—	—	21,33	20,05	35,95	30,0	—
3	Треугольн.	23,93	26,65	—	—	19,50	6,83	29,40	31,80	33,3
4	Круг	—	—	19,75	19,55	13,95	5,30	27,90	17,45	—
5	Стрельч. треугольн.	17,37	19,00	—	—	14,40	4,93	19,90	19,90	21,0
6	Круг	—	—	15,08	15,03	10,70	4,21	19,60	13,30	—
7	Стрельч. Треугольн.	13,55	14,50	—	—	10,90	3,80	18,10	14,70	15,5
8	Круг	—	—	11,98	12,03	8,43	3,50	19,20	10,50	—
9	Стрельч. Треугольн.	10,75	11,70	—	—	8,33	3,43	16,10	11,70	12,3
10	Круг	—	—	9,52	9,51	5,95	3,50	14,50	8,25	—



$$\beta_{\text{пн}} \cdot \lambda_i = \frac{1}{\eta_i}; \quad \beta_{\text{пн}} \cdot \lambda_i = 1 + \Delta h_{\text{срi}} / h_{\text{срi}}; \quad (57)$$

$$\Delta h_{\text{срi}} = h_{\text{срi}} (\mu_i \cdot \beta_{\text{пн}} - 1), \quad (58)$$

где  $\Delta h_{\text{срi}}$  - среднее обжатие со стороны двух валков;  $h_{\text{срi}}$  - средняя толщина готовой полосы в треугольном калибре;  $\beta_{\text{пн}}$  - коэффициент уширения ( $\beta_{\text{пн}} = b_{\text{срi}} / B_i$ );  $b_{\text{срi}}$  - средняя ширина полосы после прокатки;  $\lambda_i$  - коэффициент удлинения полосы.

Коэффициент  $\beta_{\text{пн}}$  является варьируемым параметром. Но в первом расчете принимают  $\beta_{\text{пн}} = 1$ .

После расчета величины среднего уширения определяют размеры заготовки плоского овала из клетки 2. В первую очередь можно найти ширину и высоту плоского овала (рис.14, 15) по выражениям:

$$\left. \begin{aligned} B_3 &\approx b_{kj} = (b_{\text{пн}} - \Delta b_1) + 0,9 \frac{d_{\text{впj}}}{2}; \\ \alpha_j / 2 &= \arcsin b_{ki} / d_{\text{впj}}; \\ C_j &= 0,5 \cdot b_{kj} \cdot \operatorname{tg} \alpha_j / 4; \\ q_{\text{сj}} &= 0,67 \cdot b_{kj} \cdot 2C_j = 1,34 \cdot b_{kj} \cdot C_j; \\ q_{\text{прj}} &= q_{\text{фj}} - q_{\text{сj}}; \\ H_3 = h_{2j} &= q_{\text{прj}} / b_{kj} + 2 \cdot C_j, \end{aligned} \right\} \quad (59)$$

где  $B_3$  - ширина исходной заготовки;  $b_{kj}$  - ширина контакта овальной заготовки с валками (рис.15);  $\alpha_j$  - центральный угол с основанием  $b_{kj}$ ;  $d_{\text{впj}}$  - диаметр вписанного круга в калибре клетки 2;  $C_j$  - высота сегмента;  $q_{\text{сj}}$  - площадь двух сегментов заготовки;  $q_{\text{прj}}$  - площадь прямоугольной части плоского овала;  $H_3(h_2)$  - высота заготовки; 0,9 - опытный коэффициент.

### 2.3. Прокатка трапецевидной заготовки в овальном калибре и овальной заготовки в круглом калибре

Прокатка трапецевидной заготовки в овальном калибре подобна прокатке квадратной заготовки в таком калибре [7-9]. Отличие заключается в том, что для расчета ширины принимают

$$B'_{cp} = 0,5(B_1 + B_2).$$

Остальные размеры определяют по формулам из работ [7, 8]. При этом принимают (табл.3):

$$\Delta h_{cp} = k \cdot \Delta h; \quad B'_{cp} = 1,05 \cdot b_n. \quad (60)$$

Полная площадь калибра равна

$$q_m = 0,67 \cdot b_{вр} \cdot h(1 + 0,5S_k/h), \quad (61)$$

а фактическая ( $S_k \approx 15,5\text{мм}$ )

$$q_{\phi} = n_3 \cdot q_m.$$

Коэффициент заполнения  $n_3$  калибра принимают равным (рис.16)

$$n_3 = q_{\phi} / q_m \approx b_1 / b_{вр}$$

В связи с небольшой величиной коэффициента  $n_3$  из овального калибра (клеть 1) выходит полоса близкая по своей форме к плоскому овалу (рис.14-16). Эту заготовку прокатывают в вертикальной клетке 2 в круглом калибре со степенью его заполнения по ширине  $n_3 = b_n / b_{вр} = 0,76...0,78$ . При расчете средних размеров полосы в калибре принимают параметр  $k$  из табл.3, коэффициенты  $n_{\phi}$  и  $n$  из табл.6, а среднюю ширину контакта определяют из выражения

$$B_{cp} = b_n \cdot \sqrt{k}$$

Для определения среднего уширения в двухвалковых калибрах (клетях 1, 2) используем формулу [7-9]:

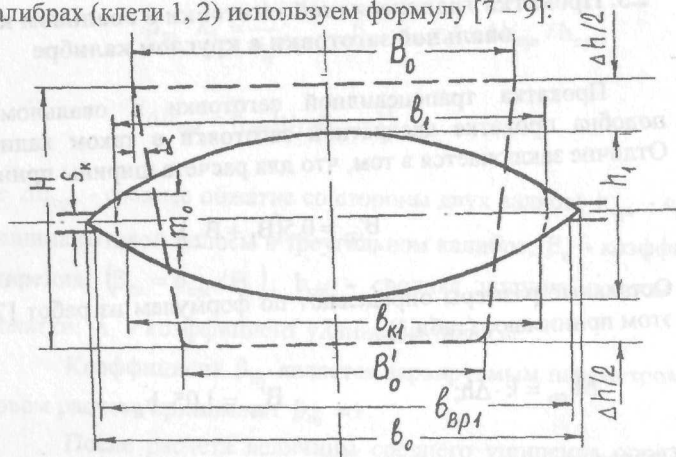


Рис.16. Схема прокатки трапециевидной заготовки в овальном калибре клетки 1.

$$\left. \begin{aligned} \Delta b &= 0,53 \cdot C_m \cdot C_n \cdot \Delta h_{cp} \cdot B_{cp} / (h'_{cp} \cdot n_{\phi}) \\ \Delta b_o &= \Delta b / n. \end{aligned} \right\} \quad (63)$$

Остальные геометрические размеры очага деформации в двухвалковых калибрах определяют по известным формулам [7-9], приведенным в алгоритмах для других калибров.

Расчет размеров калибров в двухвалковых клетях выполняют итерационным методом [7-9]. Суть этого метода заключается в том, что в первом и втором расчетах предварительно задают величины простора на уширение в калибре. В обоих случаях производят расчет размеров калибров и величин уширений по формулам (63). При этом, если в первом расчете получили  $\Delta b'_n < \Delta b'_o$ , то во втором расчете задают  $\Delta b''_n > \Delta b'_o$  и наоборот. Затем рассчитывают действительное уширение по формуле

$$\Delta b_d = \Delta b'_o + (\Delta b''_o - \Delta b'_o) \left( 1 - \frac{\Delta b'_o}{\Delta b'_n} \right) / \left( \frac{\Delta b''_o}{\Delta b''_n} - \frac{\Delta b'_o}{\Delta b'_n} \right), \quad (64)$$

где  $\Delta b'_n$  и  $\Delta b''_n$  - простор на уширение в калибре в первом и втором

расчетах;  $\Delta b'_0$  и  $\Delta b''_0$  - величины уширения, полученные расчетом (по оси калибра).

Размеры овальной заготовки из калибра 1 при прокатке ее в круглом калибре 2 рассчитывают по формулам:

$$\left. \begin{aligned} h_1 &= 1,08b_{K2} - \Delta b_{d2}; \\ b_1 &= q_{\phi 1} / h_1 [1 - 0,33(1 - m_0 / h_1)] \end{aligned} \right\} \quad (65)$$

где  $h_1$  и  $b_1$  - фактические высота и ширина полосы в калибре 1;  $m_0$  - высота свободной кромки полосы в калибре; 1,08 - опытный коэффициент, равный отношению  $b_2 / b_{K2}$  (рис.15);  $b_{K2}$  - ширина контакта полосы с валками в клетке 2;  $b_2$  - ширина полосы по оси калибра 2.

Необходимость использования параметра  $m_0$  обусловлена наличием существенного незаполнения металлом калибра 1. Использование опытного коэффициента  $b_2 / b_{K2} = 1,08$  связано с неравномерным уширением по высоте деформированной полосы (рис.15) с максимумом по оси калибра. Параметр  $m_0$  зависит от степени заполнения калибра и может быть определен по формуле ( $S_K = 3...4\text{мм}$ ) [7-9].

$$m_0 = h \left\{ 1 - \left[ 1 - \frac{(b_0 - B_{cp})^2}{b_0} \right] \right\}, \quad (66)$$

где  $b_0$  - ширина калибра по конструкционным точкам;  $B_{cp}$  - средняя ширина трапецевидной заготовки.

#### 2.4. Алгоритмы расчета калибровки валков непрерывного стана

Задачей калибровки валков является расчет размеров последовательно расположенных калибров против или по ходу прокатки. Удобнее выполнять расчет против хода прокатки при известных размерах чистового калибра. Кроме размеров чистового калибра предварительно задают величины коэффициентов вытяжек и степень заполнения калибров, а следовательно, и площади

сечений полос в калибрах.

Расчет выполняют итерационным способом с применением или без применения ЭВМ. Варьируемым параметром в этом расчете является уширение в калибре. В соответствии с выражением (21) простор на уширение есть разница между допустимой шириной полосы в данном калибре и шириной заготовки. Допустимая ширина полосы в калибре, а следовательно, и уширение, должны быть определены с учетом степени заполнения калибра.

Расчет выполняют против хода прокатки. Поскольку формулы для расчета геометрических параметров различны, то и алгоритмы для расчета круглого и стрельчатого калибров будут несколько отличны. Целью расчета является получение теоретических величин уширения и оценка их соответствия величинам простора на уширение металла в калибре и размеров калибров.

К р у г л ы й к а л и б р .

1. Задание исходных данных:  $D_{би}$ ,  $d_i$ ,  $\mu_i$ ,  $n_{зi}$ ,  $n_{з(i-1)}$ ,  $n_{\phi i}$ ,  $n_i$ ,  $k_i$ ,  $\beta_i$ ,  $\varphi_i$ ,  $S_{ки}$ ,  $C_{ми}$ . (индекс  $i$  – данный калибр;  $j$  – предыдущий калибр). Все линейные размеры получены в мм.

$$2. d_{внj} = d_j \{0,973 + 0,013[1 - 0,092(d_i - 9)]\};$$

$$3. \delta_j = d_{вн(i-1)} \left\{ 0,1055 + 0,0215 \left[ 1 - 0,0028(d_{внj} - 9)^2 \right] \right\};$$

$$4. q_{\phi i} = 0,785 \cdot d_i^2;$$

$$5. q_{\phi j} = \mu_i \cdot q_{\phi i};$$

$$6. a_j = -2,36 \cdot \delta_j + \sqrt{5,6 \cdot \delta_j^2 + 2,30 \cdot q_{\phi j} / n_{зj}};$$

$$7. b_{kj} = a_j - 1,25 \sqrt{(1 - n_{зj}) \cdot q_{\phi j} / n_{зj}};$$

$$8. b_{nj} = a(0,17 + 0,43 b_{kj} / a_j);$$

$$9. \Delta h_i = b_{nj} - 0,5 \cdot d_{внj};$$

$$10. \Delta h_{срi} = k_i \cdot \Delta h_i;$$

11.  $C_{oi} = 0,5 \cdot d_i / \cos \varphi_i$ ;      12.  $b_i = 2 \cdot C_{oi} \cdot \cos \beta_i$ ;
13.  $b_{вpi} = b_i - S_{ki} \cdot \cos 2\varphi_i$ ;      14.  $h_{ki} = 0,5d_i(1 - \sin \beta_i / \cos \varphi_i)$ ;
15.  $h_{вpi} = h_{ki} - 0,5(b_i - b_{вpi}) \cdot \operatorname{tg}[90 - (\beta_i + \varphi_i)]$ ;
16.  $h'_{вpi} = h_{ki} - 0,5d_i \cdot \operatorname{tg} \varphi_i \cdot \sin[90 - (\beta_i + \varphi_i)]$ ;
17.  $b_{ki} = \sqrt{4 \cdot d_i \cdot h'_{вpi}}$ ;      18.  $B_{сpi} = b_{ki} \cdot \sqrt{k_i}$ ;
19.  $D_{ki} = D_{oi} - 2h_{вpi} + 0,66 \cdot h_{вpi}$ ;      20.  $\ell_{di} = \sqrt{0,5D_{ki} \cdot \Delta h_{сpi}}$ ;
21.  $h_{сpi} = 0,33 \cdot q_{\varphi_i} / b_{ki}$ ;      22.  $h'_{сpi} = h_{сpi} + \Delta h_{сpi}$ ;
23.  $n_{vi} = 0,58 + 4(1 - B_{сpi} / \ell_{di})^{1,4}$  - при  $B_{сpi} / \ell_{di} = 0,8 \dots 1$ ;  
 $n_{vi} = 1$  - при  $B_{сpi} / \ell_{di} < 0,8$ ;
24.  $C_{ni} = n_{vi} \cdot e^{[(B_{сpi} / \ell_{di}) - 0,8]}$  - при  $B_{сpi} / \ell_{di} < 1,0$ ;  
 $C_{ni} = \left[ 1,9 - 0,14 \left( \frac{B_{сpi}}{\ell_{di}} - 1 \right)^2 \right] \cdot e^{-B_{сpi} / \ell_{di}}$  - при  $\frac{B_{сpi}}{\ell_{di}} = 1 \dots 4$ .
25.  $\Delta b_i = 0,132 \cdot C_{mi} \cdot C_{ni} \cdot \Delta h_{сpi} \cdot B_{сpi} / (2h'_{сpi} \cdot n_{\varphi_i})$  - при  $\frac{B_{сpi}}{\ell_{di}} < \dots 4$ .
26.  $\Delta b_{oi} = \Delta b_i / n_i$ ;
27.  $\Delta b_{mi}^0 = 0,5(d_i - d_{впj})$ ;      28.  $\Delta b'_{ni} = C_{oi} - 0,5d_{впj}$ ;
29. Если  $\Delta b'_{oi} = (0,98 \dots 1,02)\Delta b'_{ni}$ , то расчет закончен.
30. Если  $\Delta b'_{oi} \neq (0,98 \dots 1,02)\Delta b'_{ni}$ , то выполняют новый расчет при

увеличении или уменьшении диаметра  $d_{впj}$  - вписанного круга в стрелчатый треугольник с шагом  $m = 0,02$  мм.

$$31. d_{впj}'' = (1 - m)d_{впj}; \quad 32. \mu_i'' = (1 - m)^2 \cdot \mu_i;$$

$$3. \delta_j'' = d_{впj}'' \left\{ 0,1055 + 0,0215 \left[ 1 - 0,0028(d_{впj}'' - 9)^2 \right] \right\};$$

$$4. q_{\phi i} = 0,785 \cdot d_i^2; \quad 5. q_{\phi j}'' = \mu_i'' \cdot q_{\phi i};$$

33. Далее расчет по п.п. 6-30 до получения в данном варианте равенства  $\Delta b_{oi} = (0,98 \dots 1,02) \Delta b_{mi}^0$ .

Калибр стрелчатого треугольника.

34. Задание исходных данных:  $D_{oi}, d_{впi}, \mu_i, n_{zi}, n_{\phi i}, n_i, k_i, \beta_i, S_{ki}, C_{mi}$ .

Параметры  $d_{впi}$  и  $q_{\phi i}$  принимают из предыдущего расчета

круглого калибра ( $d_{впi} = d_{впj}''; q_{\phi i} = q_{\phi j}''$ ).

$$35. q_{\phi j} = \mu_i \cdot q_{\phi i}; \quad 36. d_j = \sqrt{q_{\phi j} / 0,785};$$

$$37. \Delta h_i = 0,5(d_j - d_{впi}); \quad \Delta h_{cpi} = k_i \cdot \Delta h_i;$$

$$38. \delta_i = d_{впi} \left\{ 0,1055 + 0,0215 \left[ 1 - 0,0028(d_{впi} - 9)^2 \right] \right\};$$

$$39. a = -2,36\delta + \sqrt{5,6 \cdot \delta^2 + 2,3 \cdot q_{\phi i} / n_{zi}}.$$

$$40. q_{mi} = q_{\phi i} / n_{zi}; \quad 41. b_{ki} = a - 1,25 \sqrt{(1 - n_{zi}) \cdot q_{mi}};$$

$$42. h_{cpi} = 0,33 \cdot q_{\phi i} / b_{ki}; \quad 43. h'_{cpi} = h_{cpi} + 0,5 \Delta h_{cpi};$$

$$44. b_{ni} = a_i (0,17 + 0,43 b_{ki} / a_i);$$

$$45. \operatorname{tg} \alpha_i / 4 = 2\delta_i / a_i; \quad 46. \alpha_i / 4 = \operatorname{arctg}(2\delta_i / a_i);$$



$$47. R_{\text{обри}} = \delta_i / 2 \cdot \sin^2 \alpha_i / 4; \quad 48. b_{\text{бри}} = \frac{R_{\text{обри}} \left( \frac{a_i^2}{R_{\text{обри}}} - S_{\text{ки}} \cdot \cos \beta_i \right)}{a_i};$$

$$49. b_{\text{ки}} = a_i - 1,25 \sqrt{(1 - n_{3i}) \cdot q_{\phi i}} / n_{3i}.$$

$$50. h_{\text{ври}} = b_{\text{ври}}^2 / 8R_{\text{обри}};$$

$$51. h'_{\text{ври}} = b_{\text{ки}}^2 / 8R_{\text{обри}};$$

$$52. D_{\text{ки}} = D_{\text{би}} - 2h_{\text{ври}} + 0,66h'_{\text{ври}}; \quad 53. \ell_{\text{ди}} = \sqrt{0,5 \cdot D_{\text{ки}} \cdot \Delta h_{\text{ври}}};$$

$$54. B_{\text{ври}} = b_{\text{ки}} \sqrt{k_i};$$

55. Расчет по формулам (23) - (26) предыдущего расчета круглого калибра.

$$56. \Delta b_{\text{ни}}^0 = b_{\text{ни}} - 0,5d_j;$$

$$57. \Delta b'_{\text{ни}} = b_{\text{ври}} / \cos \beta_i - 0,5d_j;$$

58. Расчет по п. 29.

59. Если  $\Delta b'_{\text{oi}} > (0,98 \dots 1,02) < \Delta b'_{\text{ни}}$ , то выполняют новый расчет при увеличении или уменьшении диаметра круглого профиля, с шагом  $m_i = 0,02$  мм.

$$60. d_j'' = (1 - m_i)d_j;$$

$$61. \mu_i'' = (1 - m_i)^2 \cdot \mu_i;$$

$$62. q_j'' = 0,785 \cdot d_j^2.$$

63. Далее расчет по п.п. 37-59 до получения в данном варианте равенства  $\Delta b_{\text{oi}} = (0,98 \dots 1,02) \Delta b_{\text{ни}}^0$ .

64. При расчете треугольного калибра (клеть 3) с плоскими образующими рабочих шайб принимают  $\delta = 0$ .

Клеть 3. Треугольный калибр, в который задают заготовку в виде плоского овала.

65. Задание исходных данных:  $D_{\text{би}}, d_{\text{внп}}, q_{\text{фи}}, \mu_i, n_{\text{зи}}, n_{\text{фи}}, n_i, k_i, \beta_i, \beta_{\text{пи}}, S_{\text{ки}}, C_{\text{ми}}$ . Параметры  $d_{\text{внп}}$  и  $q_{\text{фи}}$  принимают из предыдущего расчета круглого калибра ( $d_{\text{внп}} = d_{\text{внп}}''; q_{\text{фи}} = q_{\text{фи}}''$ )

$$66. q_{\text{фj}} = \mu_i \cdot q_{\text{фи}};$$

$$67. a_i = 1,52 \sqrt{q_{\text{фи}} / n_{\text{зи}}};$$

$$68. b_{\text{ки}} = a_i - 1,25 \sqrt{(1 - n_{\text{зи}}) \cdot q_{\text{фи}} / n_{\text{зи}}};$$

$$69. h_{\text{срi}} = q_{\text{фи}} / b_{\text{ки}};$$

$$70. \Delta h_i = h_{\text{срi}} \left( \frac{\mu_i}{\beta_{\text{пи}}} - 1 \right);$$

$$71. \Delta h_{\text{срi}} = 0,82 \cdot \Delta h_i;$$

$$72. h_{\text{срi}} = h_{\text{срi}} + 0,5 \Delta h_{\text{срi}};$$

$$73. b_{\text{ни}} = a_i (0,17 + 0,43 b_{\text{ки}} / a_i);$$

$$74. D_{\text{ки}} = D_{\text{би}};$$

$$75. \ell_{\text{ди}} = \sqrt{0,5 \cdot D_{\text{ки}} \cdot \Delta h_{\text{срi}}};$$

$$76. B_{\text{срi}} = b_{\text{ки}} \sqrt{k_i};$$

77. Расчет по п.п. 23, 24;

$$78. \Delta b_i = 0,265 \cdot C_{\text{ми}} \cdot C_{\text{пи}} \cdot \Delta h_{\text{срi}} \cdot B_{\text{срi}} / (h_{\text{срi}} \cdot n_{\text{фи}}) - \text{при } \frac{B_{\text{ср}}}{\ell_{\text{д}}} < 4;$$

$$79. \Delta b_{\text{oi}} = \Delta b_i / n_i;$$

$$80. \Delta b_{\text{ни}}^0 = (0,5 \cdot a_i - b_{\text{ни}}) \cdot \cos \beta_i / n_{\text{зи}};$$

81. Если  $\Delta b'_{\text{oi}} = (0,98 \dots 1,02) \Delta b_{\text{ни}}^0$ , то расчет закончен.

82. Если  $\Delta b'_{oi} \gg (0,98...1,02)\Delta b_{oi}^0$ , то выполняют новый расчет при увеличении или уменьшении коэффициента вытяжки с шагом  $m_i = 0,002$

$$\mu'_i = \mu_i - m_i;$$

83. Выполняют повторный расчет по п.п. 66-80 до получения

$$\Delta b_{oi} = (0,98...1,02)\Delta b_{oi}^0;$$

$$84. B_3 \approx b_{kj} = (b_{ni} - \Delta b_{ni}) + 0,9 \frac{d_{впj}}{2}; \quad 85. \alpha_j = 2 \arcsin b_{kj} / d_{впj};$$

$$86. C_j = 0,5 b_{kj} \cdot \operatorname{tg} \alpha_j / 4; \quad 87. q_{cj} = 1,34 \cdot b_{kj} \cdot C_j;$$

$$88. q_{npj} = q_{\phi j} - q_{cj}; \quad 89. h_{np} = q_{npj} / b_{kj};$$

$$90. H_3 = h_{2j} = q_{npj} / b_{kj} + 2 \cdot C_j.$$

Клеть 2. Круглый калибр в вертикальной клетке. В этот калибр задают заготовку из овального калибра клетки 1 со степенью заполнения  $n_{3j} = 0,76...0,78$ .

91. Задание исходных данных:  $D_{\delta i}$ ,  $\mu_i$ ,  $h_i = H_3$ ,  $b_{ki} = B_3$ ,  $n_{3j}$ ,  $n_{\phi i}$ ,  $k_i$ ,  $n_i$ ,  $q_{\phi i}$ ,  $C_{mi}$ ,  $\Delta b'_{oi}$ ,  $S_{kj}$ ,  $S_{ki}$ ,  $h_{npi}$ .

$$92. m_{oi} = S_{kj} / (1 - n_{3j});$$

$$93. q_{\phi j} = \mu_i \cdot q_{\phi i}; \quad 94. h_j = 1,07 b_{ki} - \Delta b_{ni};$$

$$95. b_j = q_{\phi j} / h_j \left[ 1 - 0,33 (1 - S_{kj} / h_j) \right];$$

$$96. \Delta h_i = b_j - h_j; \quad 97. \Delta h_{cpi} = k_i \cdot \Delta h_i;$$

$$98. h_{cpi} = q_{\phi i} / 1,02 b_{ki}; \quad 99. h'_{cpi} = h_{cpi} + 0,5 \Delta h_{cpi};$$

$$100. D_{ki} = D_{\delta i} - (h_{cpi} - S_{ki}); \quad 101. \ell_{di} = \sqrt{0,5 \cdot D_{ki} \cdot \Delta h_{cpi}};$$

$$102. B_{cpi} = b_{ki} \sqrt{k_i};$$

$$103. n_{bi} = 0,58 + 4 \left( 1 - \frac{B_{cpi}}{\ell_{di}} \right)^{1,4} - \text{при } \frac{B_{cpi}}{\ell_{di}} = 0,8 \dots 1,0;$$

$$n_{bi} = 1 \quad - \text{при } \frac{B_{cpi}}{\ell_{di}} < 0,8;$$

$$104. C_{ni} = n_{bi} \cdot e^{\left( \frac{B_{cpi}}{\ell_{di}} - 0,8 \right)} - \text{при } \frac{B_{cpi}}{\ell_{di}} < 1;$$

$$C_{ni} = \left[ 1,9 - 1,14 \left( \frac{B_{cpi}}{\ell_{di}} \right)^2 \right] \cdot e^{-\frac{B_{cpi}}{\ell_{di}}} - \text{при } \frac{B_{cpi}}{\ell_{di}} = 1 \dots 4;$$

$$105. \Delta b_i = 0,53 \cdot C_{mi} \cdot C_{ni} \cdot \Delta h_{cpi} \cdot B_{cpi} / (h'_{cpi} \cdot n_{\phi i}) - \text{при } \frac{B_{cpi}}{\ell_{di}} < 4;$$

$$106. \Delta b_{oi} = \Delta b_i / n_i;$$

107. Если  $\Delta b'_{ni} \neq \Delta b'_{oi}$ , то необходимо выполнить второй расчет при ином значении  $\Delta b_{ni}$ .

Если  $\Delta b'_{ni} < \Delta b'_{oi}$ , то второй расчет выполнить при  $\Delta b''_{ni} > \Delta b'_{oi}$ .

108. Если  $\Delta b'_{ni} > \Delta b'_{oi}$ , то второй расчет выполнить при  $\Delta b''_{ni} < \Delta b'_{oi}$ .

$$109. \Delta b_{di} = \Delta b'_{oi} + (\Delta b''_{oi} - \Delta b'_{oi}) \left( 1 - \frac{\Delta b'_{oi}}{\Delta b'_{ni}} \right) / \left( \frac{\Delta b''_{oi}}{\Delta b'_{ni}} - \frac{\Delta b'_{oi}}{\Delta b'_{ni}} \right);$$

$$110. h_1 = h_j = 1,08 \cdot b_{ki} - \Delta b_{di};$$

$$111. b_1 = b_j = q_{\phi i} / h_j [1 - 0,33(1 - m_{oj} / h_3)]$$

112. Расчет размеров калибров 1 и 2 закончен.

Клеть 1. Овальны й к а л и б р, в который задают трапецевидную заготовку (рис.16, табл.8), с размерами  $H_o = 33,15$  мм,  $B_o = 41,35$  мм,  $q_{\phi j} = 1290$  мм.

113. Исходные данные:  $h_1 = h_j, b_1 = b_j, b_{вр}, n_{зи}, D_{би}, \mu_1, q_{\phi i}, n_{\phi i}, k_i, n_i, \gamma_i, C_{mi}, S_{ки}$ .

$$114. B'_o = B_o - H_o \cdot \text{tg}\gamma;$$

$$115. B'_{cpi} = 0,5(B_o + B'_o);$$

$$116. H_{cpi} = q_{\phi j} / B_{cpi};$$

$$117. h_{cpi} = q_{\phi i} / b_i;$$

$$118. \Delta h_1 = H_{cpi} - h_i;$$

$$119. \Delta h_{cpi} = k_i \cdot \Delta h_1;$$

$$120. h'_{cpi} = h_{cpi} + 0,5 \cdot \Delta h_{cpi};$$

$$121. D_{ки} = D_{би} - (h_{cpi} - S_{ки});$$

$$122. \ell_{di} = \sqrt{0,5 \cdot D_{ки} \cdot \Delta h_{cpi}};$$

$$123. B_{cpi} = B_{cpi} + \Delta b_{mi};$$

124. Расчет:  $B_{cpi} / \ell_{di}; B_{cpi} / h'_{cpi};$

$$125. n_{bi} = 0,58 + 4 \left( 1 - \frac{B_{cpi}}{\ell_{di}} \right)^{1,4} - \text{при } \frac{B_{cpi}}{\ell_{di}} = 0,8 \dots 1,0;$$

$$n_{bi} = 1 \quad - \text{при } \frac{B_{cpi}}{\ell_{di}} < 1;$$

$$126. C_{ni} = n_{bi} \cdot e^{\left( \frac{B_{cpi}}{\ell_{di}} - 0,8 \right)} - \text{при } \frac{B_{cpi}}{\ell_{di}} < 1;$$

$$C_{\text{ни}} = \left[ 1,9 - 0,14 \left( \frac{B_{\text{срi}}}{\ell_{\text{di}}} - 1 \right)^2 \right] \cdot e^{-\frac{B_{\text{срi}}}{\ell_{\text{di}}}} - \text{при } \frac{B_{\text{срi}}}{\ell_{\text{di}}} = 1 \dots 4;$$

$$127. \Delta b_i = 0,53 \cdot C_{\text{ми}} \cdot C_{\text{ни}} \cdot \Delta h_{\text{срi}} \cdot B_{\text{срi}} / (h'_{\text{срi}} \cdot n_{\text{фи}}) - \text{при } \frac{B_{\text{срi}}}{\ell_{\text{di}}} < 4;$$

$$128. \Delta b_{\text{oi}} = \Delta b_i / n_i.$$

129. Сравнение  $\Delta b_{\text{ни}} \gg \Delta b_{\text{oi}}$ . Расчет закончен, так как размеры заготовки заданы. Простор на уширение равен

$$\Delta b_{\text{ни}} = 0,98b_i - B'_{\text{срi}}.$$

## 2.5. Примеры расчета размеров калибров и уширения в круглом и стрельчатом треугольном калибрах

К л е т ь 10. К р у г л ы й к а л и б р. В этом калибре прокатывают заготовку стрельчатого треугольника.

1. Исходные данные:  $D_{\text{oi}} = 174,4 \text{ мм}$ ,  $d_i = 9,53 \text{ мм}$ ,  $\mu_i = 1,265$ ,  $n_{\text{зи}} = 1$ ,  $n_{\text{зj}} = 0,91$ ,  $k_i = 0,86$ ,  $n_{\text{фи}} = 1,3$ ,  $n_i = 0,7$ ,  $\beta_i = 30^\circ$ ,  $\varphi_i = 20^\circ$ ,  $S_{\text{ки}} = 0,7 \text{ мм}$ ,  $C_{\text{ми}} = 0,7$ . Все линейные размеры в расчете приведены в мм.

$$2. d'_{\text{впj}} = 9,53 \{ 0,973 + 0,013 [ 1 - 0,092(9,53 - 9) ] \} = 9,38;$$

$$3. \delta_j = 9,38 \{ 0,1055 + 0,0215 [ 1 - 0,0028(9,38 - 9)^2 ] \} = 1,2;$$

$$4. q_{\text{фи}} = 0,785 \cdot 9,53^2 = 71,3 \text{ мм}; \quad 5. q'_{\text{фи}} = 1,265 \cdot 71,3 = 90,3 \text{ мм}^2;$$

$$6. a_j = -2,36 \cdot 1,2 + \sqrt{5,6 \cdot 1,44 + 2,30 \cdot 90,3 / 0,91} = 12,56;$$

$$7. b_{\text{кj}} = 12,56 - 1,25 \sqrt{(1 - 0,91) \cdot 90,3 / 0,91} = 8,9;$$

$$8. b_{\text{пj}} = 12,56 \cdot (0,17 + 0,305) = 6,0;$$

9.  $\Delta h_i = 6 - 4,7 = 1,3$ ;                      10.  $\Delta h_{\text{cpi}} = 0,86 \cdot 1,3 = 1,12$ ;
11.  $C_{oi} = 0,5 \cdot 9,53 / 0,94 = 5,07$ ;            12.  $b_i = 2 \cdot 5,07 \cdot 0,866 = 8,8$ ;
13.  $b_{\text{вpi}} = 8,8 - 0,7 \cdot 0,766 = 8,26$ ;
14.  $h_{ki} = 0,5 \cdot 9,53(1 - 0,5 / 0,94) = 2,2$ ;
15.  $h_{\text{вpi}} = 2,22 - 0,5 \cdot 0,54 \cdot 0,731 = 2,02$ ;
16.  $h'_{\text{вpi}} = 2,22 - 0,5 \cdot 9,53 \cdot 0,364 \cdot 0,643 = 1,1$ ;
17.  $b_{ki} = \sqrt{4 \cdot 9,53 \cdot 1,1} = 6,48$ ;            18.  $B_{\text{cpi}} = 6,48 \cdot \sqrt{0,86} = 7,0$ ;
19.  $D_{ki} = 174,4 - 4,04 + 0,66 \cdot 1,1 = 170,9$ ;
20.  $\ell_{di} = \sqrt{85,45 \cdot 1,12} = 9,78$ ;
21.  $h_{\text{cpi}} = 0,33 \cdot 71,3 / 6,48 = 3,67$ ;            22.  $h'_{\text{cpi}} = 3,67 + 0,36 = 4,03$ ;
23.  $n_{\text{вi}} = 1 \cdot (B_{\text{cpi}} / \ell_{di} < 0,8)$ ;
24.  $C_{\text{ни}} = 1,0 \cdot e^{-0,084} = 0,919$ ;
25.  $\Delta b_i = 0,132 \cdot 0,7 \cdot 0,919 \cdot 1,12 \cdot 1,75 / 1,3 = 0,13$ ;
26.  $\Delta b_{oi} = 0,13 / 0,7 = 0,185$ ;
27.  $\Delta b_{\text{ни}}^0 = 0,5(9,53 - 9,38) = 0,075$ ;            28.  $\Delta b'_{\text{ни}} = 5,07 - 4,7 = 0,37$ .

Из расчета следует, что минимальное значение простора на уширение меньше, а максимальное значение простора на уширение больше расчетного уширения  $\Delta b_{oi}$ . То есть, переполнения калибра



металлом не будет и, следовательно полученные размеры калибров являются приемлемыми. Уточнение размеров заготовки стрелчатого треугольника выполняют итерационным путем с использованием ЭВМ.

Клеть 9. Калибр стрелчатого треугольника, куда задают круглую заготовку, размеры которой необходимо определить.

34. Исходные данные:  $D_{\text{би}} = 172,5$  мм,  $d_{\text{внн}} = 9,38$  мм,  $\mu_i = 1,247$ ,  $n_{zi} = 0,91$ ,  $n_{zj} = 1,0$ ,  $k_i = 0,82$ ,  $n_{\text{фи}} = 1,2$ ,  $n_i = 0,5$ ,  $\beta_i = 30^0$ ,  $S_{\text{ки}} = 0,9$  мм,  $C_{\text{ми}} = 0,7$ . Из расчета круглого калибра имеем:  $d_{\text{внн}} = d'_{\text{внн}}$  (п.2),  $q_{\text{фи}} = q'_{\text{фи}}$  (п.5) предыдущего расчета;

$$35. q_{\text{фи}} = 1,247 \cdot 90,3 = 112,9; \quad 36. d_j = \sqrt{112,9/0,785} = 11,99;$$

$$37. \Delta h_i = 0,5(11,99 - 9,38) = 1,305; \quad \Delta h_{\text{срн}} = 0,82 \cdot 1,305 = 1,07;$$

$$38. \delta_i = 9,38 \left\{ 0,1055 + 0,0215 \left[ 1 - 0,0028(9,38 - 9)^2 \right] \right\} = 1,2;$$

$$39. a_i = -2,36 \cdot 1,2 + \sqrt{5,6 \cdot 1,44 + 2,3 \cdot 90,3/0,91} = 12,56;$$

$$40. q_{\text{ми}} = 90,3/0,91 = 99,4;$$

$$41. b_{\text{ки}} = 12,56 - 1,25 \cdot \sqrt{(1 - 0,91) \cdot 99,4} = 8,9;$$

$$42. h_{\text{срн}} = 0,33 \cdot 90,3/8,9 = 3,35; \quad 43. h'_{\text{срн}} = 3,35 + 0,535 \approx 3,88;$$

$$44. b_{\text{ни}} = 12,56(0,17 + 0,304) = 5,96;$$

$$45. \text{tg} \alpha_i / 4 = 2,4/12,56 = 0,192; \quad 46. \alpha^0 = 43^0;$$

$$47. R_{\text{обн}} = 1,2/2 \cdot 0,035 = 17,15;$$

$$48. b_{\text{вpi}} = \frac{17,15}{12,56} \left( \frac{157}{17,15} - 0,9 \cdot 0,866 \right) = 11,5;$$

$$49. b_{\text{ки}} = 12,56 - 1,25 \sqrt{(1 - 0,91) \cdot 99,4} = 8,9;$$

$$50. h_{\text{вpi}} = 133/8 \cdot 17,15 = 0,97; \quad 51. h'_{\text{вpi}} = 79,3/8 \cdot 17,15 = 0,55;$$

$$52. D_{\text{ки}} = 172,5 - 1,94 + 1,11 = 171,31; \quad 53. \ell_{\text{ди}} = \sqrt{85,66 \cdot 1,07} = 9,62;$$

$$54. B_{\text{сpi}} = 8,9 \sqrt{0,82} = 8,1; \quad B_{\text{сpi}} / \ell_{\text{ди}} = 0,84; \quad B_{\text{сpi}} / h'_{\text{ср}} = 2,23;$$

$$23. n_{\text{ви}} = 0,58 + 4(1 - 0,84)^{1,4} = 0,89;$$

$$24. C_{\text{ни}} = 0,82 \cdot e^{0,04} = 0,71;$$

$$25. \Delta b_i = 0,132 \cdot 0,7 \cdot 0,71 \cdot 1,07 \cdot 2,23 / 1,2 = 0,13;$$

$$26. \Delta b_{\text{oi}} = 0,13 / 0,5 = 0,26.$$

$$56. \Delta b_{\text{ни}}^0 = 5,96 - 5,995 = -0,035;$$

$$57. \Delta b'_{\text{ни}} = 5,75 / 0,866 - 0,5 \cdot 11,99 = 0,63.$$

Таким образом, в первом случае (п.56) простор на уширение  $\Delta b_{\text{ни}}^0$  меньше, а во втором случае (п.57) простор на уширение  $\Delta b'_{\text{ни}}$  существенно больше расчетного уширения  $\Delta b_{\text{oi}}$ . Применение итерационного процесса расчета параметров прокатки позволит получить действительные (необходимые) размеры круглой заготовки для заполнения металлом калибра с заданной степенью заполнения.

Остальные калибры системы круг - стрельчатый треугольник (треугольник) рассчитывает в соответствии с алгоритмом по п.п. 1-64.

Клеть 3. Треугольный калибр, в который задают заготовку в виде плоского овала.

65. Исходные данные:  $D_{\text{би}} = 160,7$  мм,  $q_{\text{фи}} = 446$  мм<sup>2</sup>,  $d_{\text{вни}} = 19,3$  мм,  $\mu_i = 1,454$ ,  $n_{\text{зи}} = 0,93$ ,  $n_{\text{фи}} = 1,3$ ,  $n_i = 0,5$ ;  $k_i = 0,82$ ,  $\beta_i = 30^\circ$ ;  $\beta_{\text{ни}} = 1,0$ ;  $S_{\text{ки}} = 6,83$  мм,  $C_{\text{ми}} = 0,7$ . Все линейные размеры в мм.

$$66. q_{\text{фи}} = 1,454 \cdot 446 = 650 \text{ мм}^2;$$

$$67. \alpha_i = 1,52 \cdot \sqrt{446/0,93} = 33,2;$$

$$68. b_{\text{ки}} = 33,2 - 1,25 \sqrt{(1-0,93) \cdot 446/0,93} = 22,9;$$

$$69. h_{\text{срi}} = 446/22,9 = 19,5;$$

$$70. \Delta h_i = 19,5(1,454 - 1) = 8,85;$$

$$71. \Delta h_{\text{срi}} = 0,82 \cdot 8,85 = 7,26;$$

$$72. h'_{\text{срi}} = 19,5 + 3,63 = 23,13;$$

$$73. b_{\text{ни}} = 33,2(0,17 + 0,43 \cdot 22,90/33,2) = 14,9;$$

$$74. D_{\text{ки}} = 160,7;$$

$$75. \ell_d = \sqrt{80,35 \cdot 7,26} = 24,2;$$

$$76. B_{\text{срi}} = 22,9 \cdot \sqrt{0,82} = 20,8;$$

$$B_{\text{ср}} / \ell_d = 0,86;$$

$$77. n_{\text{ви}} = 0,58 + 4(1 - 0,86)^{1,4} = 0,815; C_{\text{ни}} = 0,815 \cdot e^{0,06} = 0,867;$$

$$78. \Delta b_i = 0,265 \cdot 0,7 \cdot 0,867 \cdot 7,26 \cdot 20,8 / 23,13 \cdot 1,3 = 0,81;$$

$$79. \Delta b_{\text{oi}} = 0,81/0,5 = 1,62;$$

$$80. \Delta b_{\text{ни}}^0 = (16,6 - 14,9) \cdot 0,866/0,93 = 1,58.$$

Различие  $\Delta b_{oi}$  и  $\Delta b_{ni}^0$  составляет  $\sim 2,5\%$  что позволяет прекратить дальнейший расчет уширения и перейти к расчету размеров заготовки по формулам п.п. 84-90 алгоритма.

$$84. B_3 \approx b_{kj} = 14,9 - 0,81 + 8,7 = 22,8;$$

$$85. \alpha_j = 2 \cdot \arcsin 22,8 / 28,73 \approx 54 \text{ град};$$

$$86. C_j = \frac{22,79}{2} \cdot 0,5095 = 5,8;$$

$$87. q_{cj} = 1,34 \cdot 22,8 \cdot 5,8 = 177 \text{ мм}^2;$$

$$88. q_{пpi} = 650 - 177 = 473 \text{ мм}^2; \quad 89. h_{пp} = 473 / 22,8 = 20,7 \text{ мм};$$

$$90. H_3 = h_j = 473 / 22,8 + 11,6 = 32,3.$$

Расчетные и опытные параметры достаточно близки между собой.

**К а л и б р 2. К р у г л ы й к а л и б р**, в который заходит овальная заготовка из калибра 1. В данном расчете определяют размеры овального калибра.

$$91. \text{Исходные данные: } D_{bi} = 177,5 \text{ мм, } \mu_i = 1,413, h_i = H_3 = 32,3 \text{ мм, } b_{ki} = B_3 = 22,8 \text{ мм, } n_{zj} = 0,76; n_{фj} = 1,15; n_{\phi i} = 1,3; q_{\phi i} = 650 \text{ мм}^2; k_i = 0,78; n_i = 1,0; C_{mi} = 0,7; \Delta b'_{ni} = 2,2 \text{ мм, } S_{kj} = 3,6 \text{ мм.}$$

$$92. m_{oj} = 3,6 / (1 - 0,77) = 15,5 \text{ мм};$$

$$93. q_{фj} = 1,413 \cdot 650 = 920 \text{ мм}^2;$$

$$94. h_j = 1,07 \cdot 22,8 - 2,2 = 22,4 \text{ мм};$$

$$95. b_j = 920 / 22,4 [1 - 0,33(1 - 0,69)] = 45,8 \text{ мм};$$

96.  $\Delta h_i = b_j - h_i = 45,8 - 32,3 = 13,5$  мм;
97.  $\Delta h_{\text{срi}} = 0,78 \cdot 13,5 = 10,4$  мм;
98.  $h_{\text{срi}} = 650 / 22,8 = 28,5$  мм;
99.  $h'_{\text{срi}} = 28,5 + 5,2 = 33,7$  мм;
100.  $D_{\text{ки}} = 177,5 - (28,5 - 15,5) = 164,5$  мм;
101.  $l_{\text{di}} = \sqrt{82,25 \cdot 10,4} = 29,4$  мм;
102.  $B_{\text{срi}} = 22,8 \cdot 0,885 = 20,2$  мм;  $B_{\text{срi}} / l_{\text{di}} = 0,69$ ;  $B_{\text{срi}} / h'_{\text{срi}} = 0,6$ ;
103.  $n_{\text{вi}} = 1$ ;
104.  $C_{\text{ни}} = 1 \cdot e^{-0,05} = 0,950$ ;
105.  $\Delta b'_i = 0,53 \cdot 0,7 \cdot 0,89 \cdot 10,4 \cdot 0,6 / 1,3 = 1,58$ .
106.  $\Delta b_{\text{oi}} = 1,58 / 1,0 = 1,58$ .
107. Так как  $\Delta b'_{\text{ни}} > \Delta b_{\text{oi}}$ , то следует принять для второго расчета  $\Delta b''_{\text{ни}} < \Delta b'_{\text{oi}}$ . Принимаем  $\Delta b''_{\text{ни}} = 1,2$  мм.
108. Во втором расчете получили  $\Delta b'_i = 1,42$  мм.
109.  $\Delta b_{\text{d}} = 1,58 + (1,42 - 1,58)(1 - 0,72) / (1,218 - 0,72) = 1,48$  мм;
110.  $h_1 = h_j = 1,07 \cdot 22,8 - 1,48 \approx 22,90$  мм;
111.  $b_1 = b_j = 920 / 22,90 [1 - 0,33(1 - 0,62)] = 45,9$  мм.
112. Как следует из данных, расчетные величины  $h_j$  и  $b_j$  достаточно близки к опытным значениям и  $h_1$  и  $b_1$  (табл. 8, рис. 16).

Клеть 1. Овальны й калибр, в котором прокатывают трапецевидную заготовку (рис.16, табл.8) с размерами  $h_j = H_o = 33,15$  мм,  $b_j = B_o = 41,35$  мм,  $q_{фj} = 1290$  мм<sup>2</sup>;  $i = 1$ .

113. Исходные данные:  $h_i = 22,5$  мм;  $b_i = 45,48$  мм,  $b_{вpi} = 59,4$  мм;  $D_{би} = 192$  мм,  $\mu_i = 1,413$ ,  $n_{zi} = 0,77$ ,  $q_{фи} = 920$  мм<sup>2</sup>,  $n_{фи} = 1,15$ ;  $k_i = 1,05$ ;  $n_i = 0,7$ ;  $\gamma_i = 6^0$ ;  $C_{mi} = 0,7$ ;  $S_{ки} = 3,6$  мм.

$$114. B'_o = 41,35 - 33,15 \cdot 0,105 = 37,85 \text{ мм};$$

$$115. B'_{cpi} = 0,5(41,35 + 37,85) = 39,6 \text{ мм};$$

$$116. H_{cpi} = 1290/39,6 = 32,6 \text{ мм};$$

$$117. h_{cpi} = 920/46,3 = 19,9 \text{ мм};$$

$$118. \Delta h_i = 32,6 - 22,5 = 11,1 \text{ мм};$$

$$119. \Delta h_{cpi} = 1,05 \cdot 10,1 = 10,6 \text{ мм};$$

$$120. h'_{cpi} = 19,9 + 5,30 = 25,1 \text{ мм}.$$

$$121. D_{ki} = 192 - 16,4 = 175,6 \text{ мм};$$

$$122. \ell_{di} = \sqrt{87,8 \cdot 10,6} = 29,6 \text{ мм};$$

$$123. B_{cpi} = 39,6 + 3 = 42,6 \text{ мм};$$

$$124. B_{cpi} / \ell_{di} = 1,44; B_{cpi} / h'_{cpi} = 1,71;$$

$$126. C_{п} = [1,9 - 0,14(1,44 - 1)^2] \cdot e^{-1,44} = 0,45;$$

$$127. \Delta b_i = 0,53 \cdot 0,7 \cdot 0,45 \cdot 10,2 \cdot 1,71/1,15 = 2,54 \text{ мм};$$

$$128. \Delta b_{oi} = 2,54/0,7 = 3,63 \text{ мм};$$

129. Простор на уширение равен.

$$\Delta b_{\text{ни}} = b_i - B'_{\text{срj}} = 45,48 - 39,6 = 5,88 \text{ мм.}$$

Как следует из расчета, простор на уширение  $\Delta b_{\text{ни}}$ , равный здесь разнице между средней по оси ширины овальной полосы и средней шириной заготовки существенно больше расчетного уширения  $\Delta b_{\text{oi}}$  по оси полосы. Это несоответствие обусловлено тем, что в овальном калибре клетки 1 зазор  $m_0$  по контуру полосы с валками составляет  $m_0 = 15,5$  мм (табл.8), а ширина овальной полосы по контакту с валками равна  $b_{\text{кл}} = 44,2/40,3$  мм (табл.8), что заметно меньше фактической ширины  $b_1$  полосы по оси ( $b_1 = 45,48$  мм) (рис.16). Вследствие этого средняя фактическая ширина овальной полосы в калибре 1 должна определяться по выражению  $b_{\text{ср1}} = b_{\text{кл}} + 0,67(b_1 - b_{\text{кл}})$

или

$$b_{\text{ср1}} = 0,67b_1 \left( 1 + \frac{b_{\text{кл}}}{2b_1} \right).$$

По опытным данным составляющая  $b_{\text{кл}}/2b_1 = 0,466$ . Тогда

$$b_{\text{ср1}} = 0,98 \cdot b_1$$

С учетом этого фактический простор на уширение (с учетом незаполнения калибра) равен

$$\Delta b_{\text{ни}} = 0,98b_i - B'_{\text{срj}},$$

а в числовом выражении получим

$$\Delta b_{\text{ни}} = 0,98 \cdot 45,48 - 39,6 = 44,5 - 39,6 = 4,9 \text{ мм.}$$

Расчетное уширение (п.128) заметно меньше, чем фактический простор на уширение и пересчета параметров деформации не требуется. Различие расчетного и опытного уширения, по-нашему мнению, обусловлено отсутствием учета в формуле (п.127) особенности деформации литой алюминиевой заготовки (меньшая



плотность металла, высокая шероховатость поверхности и высокая температура металла). Указанные выше особенности деформации алюминиевых полос требуют выполнения дополнительных исследований.

## Библиография

1. Ласкин А.В., Минкин А.В. Методика расчета калибровки валков трехвалковых клетей непрерывного проволочного стана // Черная металлургия. Бюл. НТИ, 1973, №11.- С.44-47.
2. Минкин А.В. Расчет систем вытяжных калибров. - М.: Металлургия, 1989. -208 с.
3. Чекмарев А.П., Борисенко Г.П., Горбанев А.А. Калибровка трехвалковых станов по максимальным углам захвата //Прокатное производство. Сб. научных трудов. ИЧМ, МЧМ СССР, XXVIII. - М.: Металлургия, 1967. -С.156-159.
4. Чекмарев А.П., Борисенко Г.П., Горбанев А.А. Экспериментальное исследование прокатки в трехвалковых калибрах //Прокатное производство. Сб. науч. трудов. ИЧМ, МЧМ СССР, т. XXIX. - М.: Металлургия, 1969. -С.111-133.
5. Удельные давления при прокатке сплошных тел в трехвалковых калибрах /А.П. Чекмарев, Г.П. Борисенко, А.А. Горбанев, Б.Н. Колосов //Прокатное производство. Сб. науч. трудов ИЧМ, МЧМ СССР, т. XXXIV. - М.: Металлургия, 1970. -С.155-163.
6. Первый отечественный литейно-прокатный агрегат медной катанки /П.И. Софинский, А.Ю. Шевченко, А.В. Ласкин и др.// Научные труды ВНИИМетмаш. - М.: ВНИИМетмаш. 1974, №36. С.92-99.
7. Николаев В.А. Уширение металла при прокатке //Теория и практика металлургии, 1997, №3. -С.8-11.
8. Николаев В.О., Мазур В.Л. Технология виробництва сортового та листового прокату. Навч. Посібник. Частина I. Запоріжжя, ЗГІА, 1999. -260 с.
9. Николаев В.А. Расчет уширения с учетом формы калибра //Изв. вузов. Черная металлургия, 1999, №12. -С.28-32.
10. Силовые условия прокатки в клетях с трехвалковыми калибрами /М.Г. Поляков, Г.С. Гун, А.К. Белан и др. Сборник научных трудов, вып. 140 //- Магнитогорск: Министерство высшего и среднего образования РСФСР, 1974. -С.68-76.
11. Николаев В.А. Расчет параметров калибров в трехвалковых клетях //Металлургическая и горнорудная промышленность, 2000, №2. - С.23-26.

## Содержание

	стр.
Предисловие .....	3
1. Параметры калибровки непрерывного стана.....	4
1.1 Краткая характеристика стана.....	4
1.2. Общие положения калибровки валков .....	7
1.3. Расчет линейных размеров калибров.....	12
1.4. Размеры стрельчатого треугольника .....	14
1.5. Размеры круглого калибра.....	23
1.6. Секундный объем металла в клетях 9 и 10.....	28
2. Расчет размеров калибров .....	30
2.1. Расчет уширения металла .....	30
2.2. Прокатка овальной полосы в треугольном калибре .....	32
2.3. Прокатка трапецевидной заготовки в овальном калибре и овальной заготовки в круглом калибре .....	37
2.4. Алгоритмы расчета калибровки валков непрерывного стана.....	39
2.5. Примеры расчета размеров калибров и уширения в круглом и стрельчатом треугольном калибрах.....	48
Клеть 10. Круглый калибр .....	48
Клеть 9. Калибр стрельчатого треугольника.....	50
Клеть 3. Треугольный калибр,.....	52
Калибр 2. Круглый калибр,.....	53
Клеть 1. Овальный калибр,.....	55
Библиография .....	58

*Учебное издание*

**Виктор Александрович  
Николаев**

*доктор технических наук, профессор*

**КАЛИБРОВКА ВАЛКОВ  
ТРЕХВАЛКОВЫХ СОРТОВЫХ  
КЛЕТЕЙ**

*по дисциплине*

*«Технология процессов прокатки и волочения»*

*Учебное пособие для студентов ЗГИА*

*специальности*

**“ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ”**

Подписано к печати 03.04.2003 г. Формат 60x84 1/32.

Бумага офсетная. Усл. печ.л. 3,3. Тираж 30 экз.

Заказ № 622К

Отпечатано в типографии издательства ЗГИА  
с компьютерного оригинал-макета автора

69006, г. Запорожье, пр. Ленина, 226

Тел. 601240

3-00