

## АЛГОРИТМИЗАЦИЯ КАЛИБРОВКИ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ РЕЛЬСОВ

Железнодорожные рельсы относятся к сортовому прокату отраслевого назначения и характеризуются массой одного погонного метра профиля. По государственным стандартам предусматривается производство рельсов, предназначенных для Широкой железнодорожной и трамвайной колеи массой от 43 до 75 кг/м и для узкой колеи внутризаводского и рудничного транспорта массой от 8 до 38 кг/м. В поперечном несимметричном двутавровом сечении рельса (рис.1) выделяют подошву, головку и шейку, соединяющую головку с подошвой.

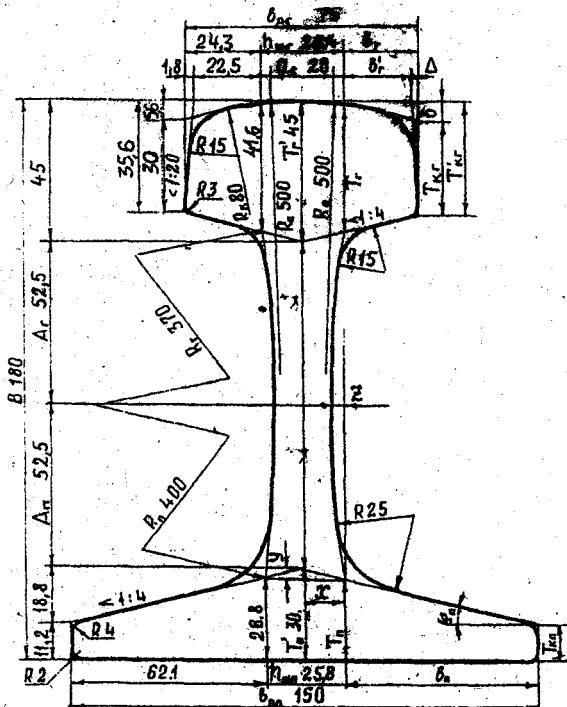


Рис.1. Форма и основные размеры поперечного сечения железнодорожного рельса Р 65.

При прокатке для образования из прямоугольной заготовки рельсового профиля достаточно бывает 9 - 11 фасонных калибров, из них 3-4 тавровых калибра с вертикальным положением стенки и 5 - 7 двутавровых несимметричных рельсовых калибров с горизонтальным или скепка наклонным положением шейки.

На первом этапе прокатки из прямоугольной заготовки в 3 - 4 тавровых калибрах образуется черновой Тавровый раскат, из полок которого в дальнейшем в разрезном и других двутавровых закрытых рельсовых калибрах формируются полки подошвы, а из толстой стенки таврового раската формируется головка и шейка рельса.

По характеру образования двутавровых рельсовых калибров различают две системы калибровки: прямую и косую. В прямой, редко применяемой в настоящем, время калибровке, используют закрытые

рельсовые двутавровые калибры с односторонним, чередующимся то снизу, то сверху разъёмом по краям полок подошвы и головки при горизонтальном положении шейки. В этой системе калибровки уклон боковых стенок закрытого ручья обычно не превышает 4 - 5 % и при ремонтных переточках валков ширина калибров до номинальных размеров не восстанавливается и увеличивается при каждой переточке, что является главным недостатком прямой системы калибровки.

В косой, более распространённой в наше время калибровке, используют закрытые двутавровые рельсовые калибры, тоже с чередующимися, но накрест, разъёмом по краям то одной, то другой пары полок подошвы и головки с наклонённой по отношению к горизонтали на 10 -15 % Шейкой и с таким же уклоном (выпуском) боковых стенок калибра по отношению к вертикали. Такие калибры полностью восстанавливаются при ремонтных переточках валков при малом съёме металла по диаметру. Кроме того, в косых калибрах исключается защемление раската и оков валков, улучшаются условия службы выводных проводок.

К недостаткам косых рельсовых калибров относится появление в них неуравновешенных горизонтальных сил, под действием которых валки смещаются в осевом направлении относительно друг друга, вследствие чего искается форма калибра. Для удержания валков от осевого смещения предусматривают на валках специальные прочные опорные бурты - рабочие конуса.

Известны различные способы калибровки рельсов, т. е. способы определения основных размеров калибров и технологических показателей прокатки, но во всех случаях, начиная с некоторого первого по ходу прокатки калибра, который принято называть разрезным, стремятся по возможности создавать во всех последующих калибрах более или менее равномерную деформацию по основным элементам раската, при этом в одних случаях показателем степени деформации принимают коэффициенты обжатия, а в других - коэффициенты вытяжки, а точнее коэффициенты обжатия площади поперечного сечения по подошве, головке и шейке, так как физически коэффициенты вытяжки по отдельным элементам раската не могут быть разными. Достаточно строгой и наиболее рациональной основой калибровки рельсов следует признать равномерность деформации по элементам раската, характеризуемую коэффициентами вытяжки. И, безусловно, целесообразно формализовать калибровку, создавая алгоритмы, позволяющие выполнять рабочие калибровки как с помощью простых счётных приборов, так и с помощью программируемых микрокалькуляторов высокого уровня и современных ЭВМ.

Общие принципы и методику косой калибровки рельсов целесообразно иллюстрировать конкретным примером. Для этого должны быть известны начальные условия прокатки и прежде всего, основные размеры профиля и общая характеристика стана, на котором намечается прокатка.

#### Начальные условия калибровки

Стан рельсобалочный линейного типа с расположением рабочих клетей в две **линии**: обжимной и чистовой. Обжимная клеть реверсивная, диаметр валков  $D = 1000$  мм. Чистовая линия состоит из двух трёхвалковых с общим приводом черновых клетей с валками диаметром  $D = 850$  мм и чистовой двухвалковой клети с индивидуальным приводом.

Основные начальные размеры поперечного сечения рельса Р65 (см. рис.1) известны из ГОСТа, но при выполнении калибровки требуются ещё дополнительные размеры, связанные с разбивкой профиля на 5 участков: шейку и верхние и нижние участки подошвы и головки, которые по аналогии с двутавровыми балками можно называть полками.

К таким размерам относятся базисная толщина шейки на стыке с подошвой  $h_{шп}$  и на стыке с головкой  $h_{шг}$ . Для подошвы эта толщина определяется с учётом того (см. рис.1), что

$$y = x \operatorname{tg} \varphi_n \quad (a)$$

$$z = x - h/2 = 0.5(2x - h) \quad (b)$$

а полухорда дуги вогнутости шейки на участке подошвы

$$A_n + y = \sqrt{2z(R_n - z/2)}$$

или после подстановки (а) и (б) в другом виде

$$A_n + x \operatorname{tg} \varphi_n = \sqrt{0.25(2x - h)[4R_n - (2x - h)]}$$

Отсюда определяется  $x$  и толщина шейки  $h_{шп} = 2x$ , иначе говоря

$$h_{шп} = \frac{2R_n + h - 2A_n \operatorname{tg} \varphi_n - \sqrt{(2R_n + h - 2A_n \operatorname{tg} \varphi_n)^2 - (\operatorname{tg}^2 \varphi_n + 1)(4A_n^2 + h^2 + 4R_n h)}}{\operatorname{tg} \varphi_n + 1}$$

$$= \frac{2400 + 18 - 252,5 \cdot 0,25 - \sqrt{(2400 + 18 - 252,5 \cdot 0,25)^2 - (0,25^2 + 1)(4 \cdot 52,5^2 + 18^2 + 4 \cdot 400 \cdot 18)}}{0,25^2 + 1}$$

$$= 25,8 \text{ мм} \quad (1)$$

Аналогично определяется толщина шейки на стыке с головкой, но с учётом радиуса кривизны дуги шейки на участке, примыкающем к головке  $R_g = 370$  мм, при этом

$$h_{шг} = \frac{2R_g + h - 2A_g \operatorname{tg} \varphi_g - \sqrt{(2R_g + h - 2A_g \operatorname{tg} \varphi_g)^2 - (\operatorname{tg}^2 \varphi_g + 1)(4A_g^2 + h^2 + 4R_g h)}}{\operatorname{tg} \varphi_g + 1}$$

$$= \frac{2370 + 18 - 252,5 \cdot 0,25 - \sqrt{(2370 + 18 - 252,5 \cdot 0,25)^2 - (0,25^2 + 1)(4 \cdot 52,5^2 + 18^2 + 4 \cdot 370 \cdot 18)}}{0,25^2 + 1} = 26,5 \text{ мм} \quad (1a)$$

Далее определяются другие недостающие размеры поперечного сечения рельса.

По подошве

Толщина по краям полок известна из ГОСТа (см. рис.1)

$$T_{кп} = 11,2 \text{ мм},$$

а толщина по основанию полок на стыке с шейкой

$$T_n = T_{кп}' - 0,5 h_{шп} \operatorname{tg} \varphi_n = 30 - 0,5 \cdot 25,8 \cdot 0,25 = 26,8 \text{ мм} \quad (2)$$

и ширина полок

$$b_n = 0,5(b_{пп} - h_{шп}) = 0,5(150 - 25,8) = 62,1 \text{ мм} \quad (3)$$

По головке

Прежде всего определяются стрелки выпуклости (см. рис.1) головки: посередине  $\delta_c$  на участке  $a_c = 20$  мм при радиусе кривизны  $R_c = 500$  мм по краям  $\delta_k$  на участках  $a_k = (b_{пп} - a_c)/2 = (75 - 20)/2 = 27,5$  мм при радиусе кривизны  $R_k = 80$  мм и общая  $\delta = \delta_c + \delta_k$ .

Стрелка посередине представится из условия, что хорда этого участка

$$a_c = 2 \sqrt{R_c^2 - (R_c - \delta_c)^2}$$

отсюда стрелка выпуклости

$$\delta_c = R_c - \sqrt{R_c^2 - 0,25a_c^2} = 500 - \sqrt{500^2 - 0,25 \cdot 20^2} = 0,1 \text{ мм} \quad (4)$$

при этом центральный угол полусектора среднего участка

$$\phi = \arcsin a_c / 2R_c = \arcsin 20 / 2 \cdot 500 = 1,146^\circ \quad (5)$$

Протяжённость наклонной к горизонтали под углом  $\phi$  хорды  $a_{kh}$  полусегмента крайнего выпуклого участка головки представится как

$$a_{kh} = a_k / \cos \phi + \delta_{kh} \tan \phi, \quad (6)$$

а стрелка этого полусегмента по отношению к хорде (4)

$$\delta_{kh} = R_k - \sqrt{R_k^2 - 0,25 a_{kh}^2}$$

или с учётом (6) после преобразования

$$\begin{aligned} \delta_{kh} &= [R_k - a_k \tan \phi / \cos \phi - \sqrt{(R_k - a_k \tan \phi / \cos \phi)^2 - (b_{nr} - a_k)^2 (1 + \tan^2 \phi)}] / (1 + \tan^2 \phi) = \\ &= [80 - 27,5 \cdot 0,02 / 0,9998 - \sqrt{(80 - 27,5 \cdot 0,02 / 0,9998)^2 - (75 - 20)^2 (1 + 0,02^2)}] / (1 + 0,02^2) = \\ &= 4,913 \text{ мм} \end{aligned} \quad (7)$$

при этом длина самой хорды (6)

$$a_{kh} = (75 - 20) / (2 \cdot 0,9998) + 4,913 \cdot 0,02 = 27,6 \text{ мм}$$

и стрелка выпуклости относительно горизонтали

$$\begin{aligned} \delta_k &= (\delta_{kh} + a_{kh} \tan \phi) \cos \phi = (4,913 + 27,6 \cdot 0,02) \cdot 0,9998 = 5,546 \text{ мм} \quad (8) \\ &= (4,913 + 27,6 \cdot 0,02) \cdot 0,9998 = 5,546 \text{ мм} \end{aligned}$$

и, наконец, общая стрелка выпуклости головки

$$\delta = \delta_c + \delta_k = 0,1 + 5,546 = 5,6 \text{ мм} \quad (9)$$

И ешё определяются: базисная толщина полок по бокам головки

$$T_{kr} = T_{kr} - \delta = 35,6 - 5,6 = 30 \text{ мм} \quad (10)$$

и толщина по основанию

$$T_r = T_r - 0,5 h_{wr} \tan \phi_r - \delta_c = 45 - 0,5 \cdot 26,5 \cdot 0,25 - 0,1 = 41,6 \text{ мм} \quad (11)$$

ширина полок без учёта уклона по бокам головки

$$b_r = 0,5(b_{nr} - h_{wr}) = 0,5(75 - 26,4) = 24,3 \text{ мм} \quad (12)$$

и ширина с учётом уклона по бокам

$$b_r = b_r - Y_k T_{kr} = 24,3 - 0,05 \cdot 35,6 = 22,5 \text{ мм} \quad (13)$$

Первый (чистовой) полузакрытый рельсовый калибр

Основные размеры чистового рельсового раската и калибра (табл. и рис.2) определяются по соответствующим номинальным размерам рельсового профиля (см. рис.1) с полным или частичным учётом допускаемых по ГОСТу минимальных отклонений и расширения металла при нагревании.

### По подошве

Толщина по краям полок

$$T_{kp1} = K_{ly}(T_{kp} - v) = 1,012(11,2 - 0,2) = 11,1 \text{ мм} \quad (14)$$

и толщина по основанию полок

$$T_{p1} = K_{ly}(T_p - v) = 1,012(26,8 - 0,2) = 26,9 \text{ мм} \quad (15)$$

Ширина полок

$$v_p = 0,5 K_{ly} [v_{pp} - (h_{wp} - v)] = 0,5 \cdot 1,012 [150 - (25,8 - 0,5)] = 63 \text{ мм} \quad (16)$$

Площадь поперечного сечения полок

$$q_{p1} = 0,5 v_p (T_{kp1} + T_{p1}) = 0,5 \cdot 63 (11,1 + 26,9) = 1197 \text{ мм}^2 \quad (17)$$

### По головке

Толщина по краям полок без учёта закругления

$$T_{kr1} = K_{ly}(T_{kr} - v) = 1,012 (30 - 0,3) = 30 \text{ мм} \quad (18)$$

и толщина по основанию полок

$$T_{r1} = K_{ly}(T_r - v) = 1,012(41,6 - 0,3) = 42 \text{ мм} \quad (19)$$

Полная ширина полок без учёта уклона по бокам головки

$$v_{r1} = 0,5 K_{ly} [v_{pr} - (h_{wr} - v)] = 0,5 \cdot 1,012 [75 - (26,5 - 0,5)] = 24,8 \text{ мм} \quad (20)$$

и ширина полок с учётом уклона по бокам головки

$$v'_{r1} = v_{r1} - Y_k (T_{kr1} + \delta_1) = 24,8 - 0,05(30 + 5,8) = 23 \text{ мм} \quad (21)$$

Площадь поперечного сечения полки головки без учёта закругления и уклона по краям

$$q_{r1} = 0,5 v'_{r1} (T_{kr1} + T_{r1}) = 0,5 \cdot 24,8 (30 + 42) = 893 \text{ мм}^2 \quad (22)$$

### По шейке

Толщина шейки посередине

$$h_1 = K_{ly}(h - v) = 1,012 \cdot (18 - 0,5) = 17,7 \text{ мм} \quad (23)$$

толщина на стыке с подошвой

$$h_{wp1} = K_{ly}(h_{wp} - v) = 1,012(25,8 - 0,5) = 25,6 \text{ мм} \quad (24)$$

и толщина на стыке с головкой

$$h_{wr1} = K_{ly}(h_{wr} - v) = 1,012(26,5 - 0,5) = 26,3 \text{ мм} \quad (25)$$

Полная ширина шейки

$$B_1 = K_{oy}(B - v) = 1,012 (180 - 0,2) = 182 \text{ мм} \quad (26)$$

и ширина шейки между подошвой и головкой

$$B_{w1} = B_1 - (T_{wp1} + T_{r1}) = 182 - (26,9 + 42) = 113,1 \text{ мм} \quad (27)$$

Радиус кривизны вогнутости шейки на участке, примыкающем к подошве

$$R_{p1} = [B_{w1}^2 - (h_{wp1} - h_1)^2] / [4(h_{wp1} - h_1)] = \\ = [113,1^2 - (25,6 - 17,7)^2] / [4(25,6 - 17,7)] = 403 \text{ мм} \quad (28)$$

и на участке, примыкающем к головке

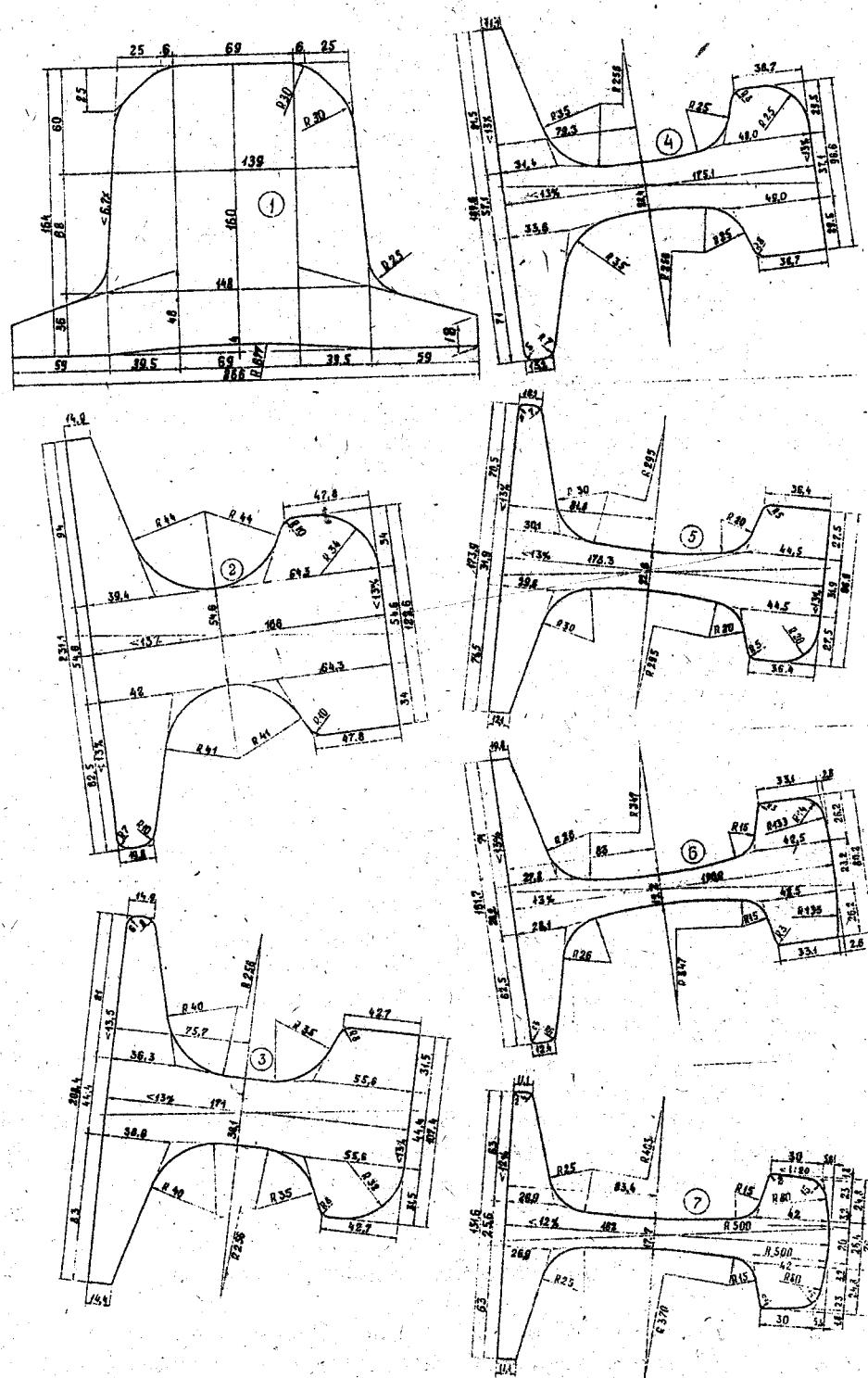
$$R_{r1} = [B_{w1}^2 - (h_{wr1} - h_1)^2] / [4(h_{wr} - h_1)] = \\ = [113,1^2 - (26,3 - 17,7)^2] / [4(26,3 - 17,7)] = 370 \text{ мм} \quad (29)$$

Площадь поперечного сечения шейки между подошвой и головкой представляется как площадь двух криволинейных трапеций. Для этого предварительно определяется центральный угол сектора вогнутости шейки на участке подошвы

$$\Phi_{wp1} = \arcsin(B_{w1} / 2R_{p1}) = \arcsin(113,1 / 2 \cdot 403) = 8,066^\circ \quad (30)$$

и на участке головки

$$\Phi_{wr1} = \arcsin(B_{w1} / 2R_{r1}) = \arcsin(113,1 / 2 \cdot 370) = 8,7914^\circ \quad (31)$$



**Рис.2** Косая калибровка железнодорожного рельса Р 65(см. табл.): а - черновой тавровый калибр первой трехвалковой клети; б - е - подготовительные и предчистовой рельсовые калибры первой трехвалковой клети; ж - чистовой рельсовой калибр двухвалковой клети

и тогда площадь поперечного сечения шейки

$$\begin{aligned}
 q_{w1} &= 0,5B_{w1}(h_{w1} + h_{w1}) - R_{p1}^2(\varphi_{p1} - \sin \varphi_{p1} \cos \varphi_{p1}) - \\
 &- R_{p1}^2(\varphi_{p1} - \sin \varphi_{p1} \cos \varphi_{p1}) = \\
 &= 0,5 \cdot 113,1 (25,6 + 26,3) - 403^2 (0,1408 - 0,1403 \cdot 0,9901) - \\
 &- 370^2 (0,1534 - 0,1528 \cdot 0,9982) = 2300 \text{ мм}^2 \quad (32)
 \end{aligned}$$

наконец, полная площадь поперечного сечения чистового рельсового раската

$$\begin{aligned}
 Q_1 &= 2(q_{p1} + q_{r1}) + q_{w1} + h_{w1}T_{p1} + h_{w1}T_{r1} = \\
 &= 2(1197 + 893) + 2300 + 256,6 \cdot 26,9 + 26,3 \cdot 42 = 8273 \text{ мм}^2 \quad (33)
 \end{aligned}$$

В предчистовом и во всех других рельсовых калибрах допускается сохранить толщину шейки на стыке с головкой такой же, как и на стыке с подошвой. И тогда для этих калибров общий радиус кривизны дуги вогнутости шейки (см. табл.1) представится достаточно точно как

$$R_{>1} = [B_{w1}^2 - (h_{w1} - h_r)^2]/[4(h_{w1} - h_r)] \quad (34)$$

при этом общий центральный угол сектора дуги вогнутости

$$\varphi_i = 2\arcsin(B_{w1}/2R) \quad (35)$$

и площадь поперечного сечения шейки

$$q_{w1>1} = h_{w1}B_{w1} - R_{>1}^2(\varphi_i - \sin \varphi_i) \quad (36)$$

По условиям работы рельсовых двутавровых калибров в открытых полках подошвы возможно обжатие полок раската только по толщине при свободном их уширении

$$\Delta b = 0,5 \dots 1 \text{ мм}, \quad (37)$$

а в закрытых полках наоборот предусматривается ребровое обжатие

$$\Delta b_p = 5 \dots 15 \text{ мм} \quad (38)$$

и контроль ширины при малом обжатии по толщине. Более того, в закрытых полках чистового и предчистового и даже следующего калибра возможно утолщение по краям полок, связанное с их ребровым обжатием.

Несколько иной характер деформации полок головки. Благодаря массивности этих полок возможно их всестороннее обжатие - по толщине и ширине как в закрытых, так и в открытых полках калибра, при этом допускается ребровое обжатие в пределах

$$\Delta b_p = 1 \dots 3 \text{ мм} \quad (39)$$

Благодаря расклинивающему действию средних буртов двутавровых рельсовых калибров в них возможно создавать как свободное, так и вынужденное и даже ограниченное уширение шейки раската и поэтому вполне допустимо определять уширение шейки нормативно как

$$\Delta B_i = B_i (2i + 1)/400 \quad (40)$$

Режим деформации раската по пропускам

С учётом типа и массы одного погонного метра рельса и возможностей стана назначают общее количество пропусков в фасонных калибрах  $n = 6 \dots 8$ , выбирают коэффициент вытяжки в чистовом калибре  $\mu_c = 1,07 \dots 1,10$  и средний коэффициент вытяжки  $\mu_{ср} = 1,18 \dots 1,20$  и определяют суммарный коэффициент вытяжки

$$\mu_c = \exp[(n - 1) \ln \mu_{ср}] = \exp[(7 - 1) \ln 1,18] = 2,6995 \quad (41)$$

коэффициент нарастания деформации против хода прокатки в нарастающем режиме

$$\begin{aligned}
 K_{нр} &= \exp[2 \ln \mu_c - (n - 1) \ln \mu_c]/(n - 1)(n - 2) = \exp[2 \ln 2,6995 - (7 - 1) \ln 1,18]/ \\
 &/ (7 - 1)(7 - 2) = 1,0285 \quad (42)
 \end{aligned}$$

коэффициент вытяжки по пропускам, начиная от чистового калибра (см. табл.)

$$\mu_i = K_{\text{нд}} \mu_{i-1} \quad (43)$$

Все основные, необходимые для построения калибров размеры и технологические показатели калибровки выполняются по специальному алгоритму (см. табл.)

Для получения чернового таврового раската традиционно используют один плоский ящичный (рис. 3,а) и два тавровых калибра с вертикальным положением стенки (рис. 3,б и 3в). В ящичном калибре за два пропуска получают прямоугольный с утолщением посередине подкат, из которого после кантовки на 90° за два пропуска в первом тавровом и один пропуск во втором тавровом калибрах получают подкат (см. рис. 3в) для чернового таврового калибра (см. рис. 2а) первой трёхвалковой клети чистовой линии стана.

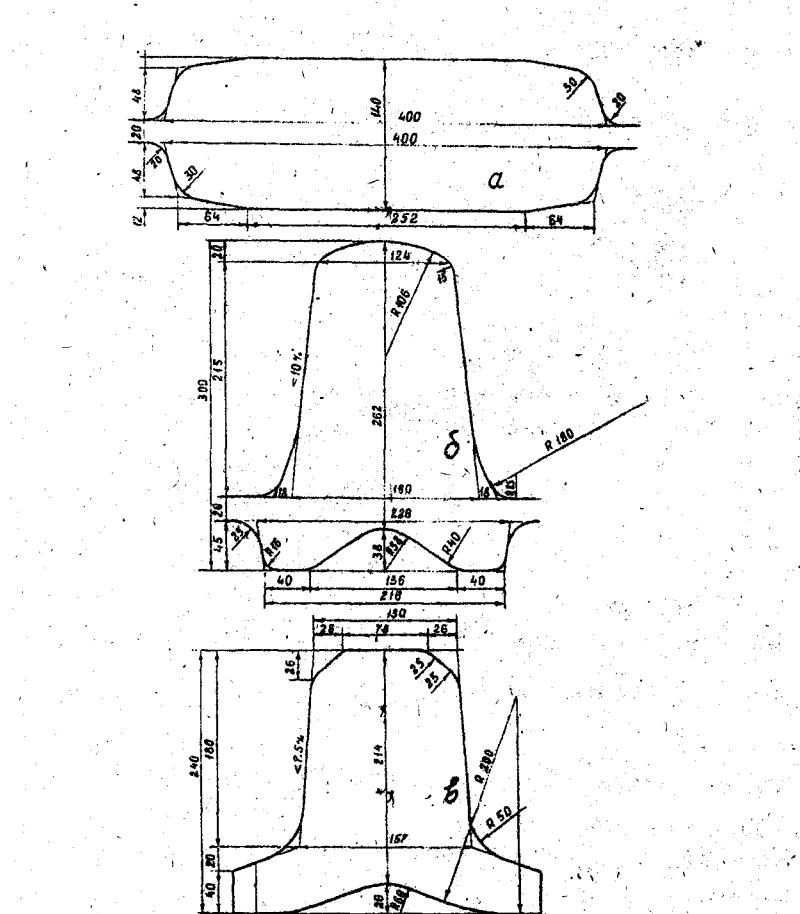


Рис. 3. Калибровка обжимной реверсивной клети рельсобалочного стана для прокатки железнодорожных рельсов Р 50, Р 65 и Р 75; а - ящичный калибр; б и в - вертикальнотавровые калибры

Алгоритм косой калибровки железнодорожных рельсов с реализацией калибровки рельса Р 65 (см. рис. 2)

№ п/п	Математическая операция или параметр	Реализация операции и номера калибров							
		1	2	3	4	5	6	7	
<b>Форма калибров</b>									
<b>Разъём полок подошвы: (верхних/нижних)</b>									
1	$K_{\text{нр}}$	-	3/0	0/3	3/0	0/3	3/0	3/0	
2	$\mu_i = K_{\text{нр}} \mu_{i-1}$	1,100	1,131	1,164	1,197	1,231	1,266	-	
3	$K_{\text{но}}$ - коэф. неравномерности обжатия	1,00	1,04	1,00	1,00	1,00	1,00	-	
4	$q_{\delta i} = \mu_{i-1} q_{\delta i-1}$	1197	1317	1490	1733	2079	2552	3221	
5	$q_{\text{в}i} = K_{\text{но}} \mu_{i-1} q_{\delta i-1}$	1197	1369	1490	1733	2079	2552	3221	
6	$q_{\text{н}i} = \mu_{i-1} q_{\delta i-1} / K_{\text{но}}$	1197	1266	1490	1733	2079	2552	3221	
7	$\Delta_{\text{в}i}$ - верхних полок	-8,6	0,5	-11,00	0,5	-13,0	-4,0	-	
8	$\Delta_{\text{в}i}$ - нижних полок	0,5	-9,0	0,5	-12	0,5	-15,5	-	
9	$\text{в}i = \text{в}i-1 - \Delta_{\text{в}i}$	63,0	71,0	70,5	81,5	81,0	94,0	98,0	
10	$\text{в}i = \text{в}i-1 - \Delta_{\text{в}i}$	63,0	62,5	71,5	71,0	83,0	82,5	98,0	
11	$T_{\text{с}b} = q_{\text{в}} / \text{в}i$	19,0	19,29	21,13	21,27	25,60	27,16	32,97	
12	$T_{\text{с}h} = q_{\text{н}} / \text{в}i$	19,00	20,26	20,83	24,41	24,99	30,94	32,97	
13	Кнт-коэффициент нарастания тангенса	-	1,0	1,02	1,02	1,02	1,02	1,02	
14	$\text{tg } \phi_{0i} = K_{\text{нт}} \text{tg } \phi_{0i-1}$	0,250	0,240	0,245	0,256	0,255	0,260	0,310	
15	$\text{tg } \phi_{3i} = K_{\text{нт}} \text{tg } \phi_{3i-1}$	0,250	0,250	0,255	0,260	0,263	0,271	0,310	
16	$T_{\text{к}b} = T_{\text{с}b} - 0,5 \text{ в}i \text{tg } \phi_{\text{в}}$	11,1	10,8	12,1	11,1	14,9	14,9	17,8	
17	$T_{\text{в}i} = T_{\text{с}b} + 0,5 \text{ в}i \text{tg } \phi_{\text{в}}$	26,9	27,8	30,1	31,4	36,3	39,4	48,2	
18	$T_{\text{к}h} = T_{\text{с}h} - 0,5 \text{ в}i \text{tg } \phi_{\text{н}}$	11,1	12,4	12,1	15,2	14,4	19,8	17,8	
19	$T_{\text{н}i} = T_{\text{с}h} + 0,5 \text{ в}i \text{tg } \phi_{\text{н}}$	26,9	28,1	29,6	33,6	38,6	42,0	48,2	
20	$T_{\text{с}p} = 0,5(T_{\text{в}i} + T_{\text{н}i})$	26,9	27,9	29,8	32,5	36,0	40,7	48,2	
21	$h_{\text{ш}pi} = \mu_{i-1} h_{\text{ш}pi-1}$	25,6	28,2	31,9	37,1	44,4	54,6	69,1	
22	$\text{в}p = \text{в}i + \text{в}h + h_{\text{ш}pi}$	151,6	161,7	173,9	189,6	208,4	231,1	265,1	
23	$q_{\text{ш}pi} = h_{\text{ш}pi} / \text{в}p$	688	787	951	1206	1595	2224	3329	
24	$q_{\text{пп}} = q_{\text{в}} + q_{\text{н}} + q_{\text{ш}pi}$	3082	3420	3930	4673	5743	7329	9790	
<b>Головка</b>									
<b>Разъём полок головки</b>									
25	$q_{\text{1}} = \mu_{i-1} q_{i-1}$	893	982	1111	1293	1548	1905	2411	
26	$\Delta_{\text{в}i}$ - верхние полки	-1,2	-1,5	-2,0	-2,0	-2,5	-1,0	-	
27	$\Delta_{\text{в}i}$ - нижние полки	-1,2	-1,5	-2,0	-2,0	-2,5	-1,0	-	
28	$\text{в}i = \text{в}i-1 - \Delta_{\text{в}i}$	24,8	26,0	27,5	29,5	31,5	34,0	35,0	
29	$\text{в}h i = \text{в}h i-1 - \Delta_{\text{в}h i-1}$	24,8	26,0	27,5	29,5	31,5	34,0	35,0	
30	$T_{\text{с}b} = q_{\text{в}} / \text{в}i$	36,0	37,78	40,41	43,83	49,13	56,02	68,88	
31	$T_{\text{с}h} = q_{\text{н}} / \text{в}h$	36,0	37,78	40,41	43,83	49,13	56,02	68,88	
32	$K_{\text{нт}} = 1,16 \dots 1,20; i > 2$	1,0	1,0	1,18	1,18	1,18	1,18	-	
33	$\text{tg } \phi_{\text{в}i} = K_{\text{нт}} \text{tg } \phi_{\text{в}i-1}; i > 2$	0,250	0,250	0,295	0,348	0,411	0,485	0,572	
34	$\text{tg } \phi_{\text{н}i} = K_{\text{нт}} \text{tg } \phi_{\text{н}i-1}; i > 2$	0,250	0,250	0,295	0,348	0,411	0,485	0,572	
35	ук - внешний уклон головки	-	0,100	0	0	0	0	0	
36	$T_{\text{к}b} = T_{\text{с}b} - 0,5 \text{ в}i (\text{tg } \phi_{\text{в}i} + \text{ук})$	30,0	33,2	36,4	38,7	42,7	47,6	58,9	
37	$T_{\text{в}i} = T_{\text{с}b} + 0,5 \text{ в}i (\text{tg } \phi_{\text{в}i} + \text{ук})$	42,0	42,5	44,5	49,0	55,6	64,3	78,9	
38	$T_{\text{к}h} = T_{\text{с}h} - 0,5 \text{ в}h (\text{tg } \phi_{\text{н}i} + \text{ук})$	30,0	33,2	36,4	38,7	42,7	47,6	58,9	

39	$T_H = T_{CH} + 0,5 \cdot v_H (\operatorname{tg} \phi_H + \operatorname{tg} \gamma)$	42,0	42,3	44,5	49,0	55,6	64,3	78,9
40	$T_{CP} = 0,5(T_B + T_H)$	42,0	42,3	44,5	49,0	55,6	84,3	78,9
41	$h_{wri} = h_{wp} ; i > 1$	26,3	28,2	31,9	37,1	44,4	54,6	69,1
42	$v_{pi} = v_B + v_H + h_{wri}$	75,9	80,2	86,9	96,1	107,4	122,6	139,1
43	$q_{wri} = h_{wri} T_{CP}$	1105	1196	1417	1915	2467	3509	5454
44	$q_{nr} = 2 + q_{wri}$ Шейка	2891	3160	3639	4402	5562	7319	10276
45	$\Delta v_i = v_i (2i + 1)/400$	1,4	2,3	3,2	4,1	5,6	5,9	-
46	$v_i = v_{i-1} - \Delta v_{i-1}$	182,0	180,6	178,3	175,1	171,0	166,0	160,1
47	$v_w = v - (T_{cn} + T_{cr})$	113,1	110,2	104,0	93,6	79,4	61,0	33,0
48	$K_{ndw} = 2 \ln(h_{n-1}/h_i) - (n-2) \ln \mu$ (n-2)(n-3)	1,0672	-	-	-	-	-	-
49	$\eta_i = K_{ndw} \eta_{i-1}$	1,1	1,174	1,253	1,337	1,426	-	-
50	$h_{wi} = \eta_{wi-1} h_{wi-1}$	17,7	19,5	22,8	28,6	38,3	54,6	69,1
51	$R = \frac{v_w^2 - (h_{wp} - h)^2}{4(h_{wp} - h)}$	403	347	295	256	257	-	-
52	$\phi_i = 2 \arcsin(R_{wi} / 2R_i); i > 1$	8,066 8,791	18,28	20,31	21,10	17,78	-	-
53	$K = R_i^2 (\phi_i - \sin \phi_i); i > 1$	695	648	642	540	327	0	-
54	$q_w = h_{wp} v_{wi} - K$	2300	2460	2676	2932	3198	3330	2280
55	$Q = 2(q_n + q_r) + q_w + q_{wp} + q_{wri}$	8275	9040	10246	12005	14514	17978	22337
56	$\mu_i = Q_i + 1 / Q_i$	1,093	1,133	1,172	1,209	1,239	1,242	-

Принятая символика обозначения физических величин на рис. 1 сохраняется и по всем другим калибрам, но с добавлением индекса  $i$  - порядкового номера и индексами  $v$  - по верхним полкам и  $h$  - по нижним полкам подошвы и головки.