

УДК 621.771.2

Медведев В. С.  
Разиньков Н. А.  
Соленый В. К.

### МЕТОДИКА РАСЧЕТА СИСТЕМЫ ВЫТЯЖНЫХ КАЛИБРОВ «ГЛАДКАЯ БОЧКА – ПЛОСКИЙ РЕБРОВОЙ ОВАЛ»

При производстве профилей простой формы, наряду с традиционными системами вытяжных калибров «круг-овал», «овал-квадрат», применяют систему калибров «гладкая бочка-круг», которая реализует технологию малокалиберной прокатки круглой стали [1–3]. Данная система калибров позволяет заменить половину калиброванных валков гладкими валками (гладкой бочкой), значительно облегчить и ускорить технологическую подготовку производства, сократить затраты на изготовление калиброванных валков, уменьшить время простоев прокатного стана на перевалки и переходы с калибра на калибр и повысить за счет этого производительность технологического процесса.

Несмотря на значительные преимущества использования системы калибров «гладкая бочка-круг» она имеет и существенный недостаток, который ограничивает ее практическое использование. При прокатке полосы в круглом калибре трудно удержать скручивание раската вокруг продольной оси и обеспечить стабильное заполнение металлом круглого калибра без образования лампасов.

В ГП УкрНТЦ «Энергосталь» в результате комплексных экспериментальных исследований формоизменения металла при прокатке на гладкой бочке и в ребровых калибрах [4–6] была разработана новая ресурсосберегающая технология малокалиберной прокатки круглой стали, в основе которой положена вытяжная система калибров «гладкая бочка–плоский ребровой овал» (рис. 1). Эта система калибров обладает всеми преимуществами системы калибров «гладкая бочка–круг» и исключает ее недостатки. Прокатываемая в плоском ребровом овале полоса надежно удерживается от сваливания вводной и выводной привалковой арматурой, поскольку высота раската на входе в калибр и выходе и него значительно больше, чем ширина. Процесс прокатки устойчивый, скручивания раскатов не наблюдается, обеспечивается стабильное заполнение ребрового калибра без его переполнения по ширине. Качество готовых профилей удовлетворяет требования стандартов.

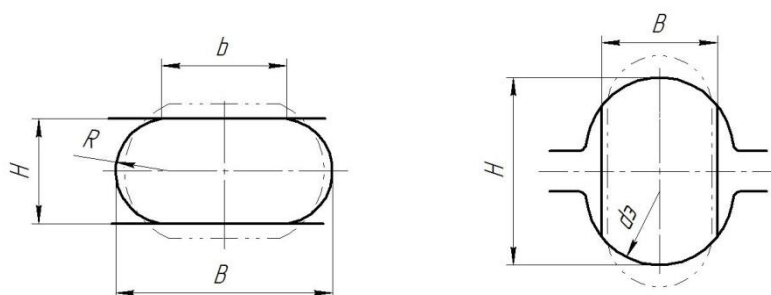


Рис. 1. Система вытяжных калибров «гладкая бочка–плоский ребровой овал»

Целью данной работы является разработка методики расчета калибровки валков при малокалиберной прокатке круглой стали с использованием вытяжной системы калибров «гладкая бочка – плоский ребровой овал».

Исходные данные для расчета: диаметр готового профиля  $d$ , диаметр исходной заготовки  $D$ , начальный диаметр валков прокатного стана  $D_0$ .

Принятые условные обозначения:  $n$  – число проходов,  $N$  – число пар калибров,  $M$  – номер пары калибров,  $i$  – номер калибра,  $\mu_c$  – средняя вытяжка в калибрах,  $\mu_i$  – вытяжка в  $i$ -ом калибре,  $\mu_{\phi M}$  – вытяжка в  $M$ -ой паре калибров,  $\mu_{\phi c}$  – средняя вытяжка в паре калибров,  $\mu_{\phi \Sigma}$  – суммарная вытяжка во всех парах калибров.

Расчет калибров производится против хода прокатки. Сначала распределяем коэффициенты вытяжек по парам калибров. Затем определяем площади поперечных сечений раскатов и размеры ребровых овалов. На заключительном этапе рассчитываем размеры и площади промежуточных полос, прокатываемых на гладкой бочке.

Суммарный коэффициент вытяжки  $\mu_{\Sigma} = D^2/d^2$ .

Задаемся средним коэффициентом вытяжки в калибре. Для системы калибров «гладкая бочка-плоский ребровой овал» можем принять  $\mu_c = 1,3$ . Тогда средняя вытяжка в паре калибров  $\mu_{\phi c} = \mu_c^2 = 1,69$ .

Число пар калибров  $N = \lg \mu_{\Sigma} / \lg \mu_{\phi c}$ . Округляем  $N$  до ближайшего большего целого числа и уточняем среднюю вытяжку в паре калибров  $\mu_{\phi c} = \sqrt[N]{\mu_{\Sigma}}$ . Число калибров  $n = 2N$ .

Распределяем коэффициенты вытяжки по парам калибров, при этом возможны различные варианты: первый – равномерное распределение вытяжек, т.е. во всех парах калибров вытяжек одинаковы; второй – коэффициенты вытяжек распределяются по линейному закону; третий – распределение коэффициенты вытяжек по параболическому закону.

В практике прокатки применяют параболический закон распределения коэффициентов вытяжек по проходам. В первой по ходу прокатки паре калибров коэффициент вытяжки максимальный, а в последующих парах они плавно уменьшаются. В чистовой паре калибров коэффициент вытяжки минимальный.

Распределение коэффициентов вытяжки по парам осуществляем с помощью, предложенной В.С. Медведевым [7], безразмерной параболической функции вида:

$$\mu'_{\phi m} = a \left( \frac{N-M}{N-1} \right)^2 + b \left( \frac{N-M}{N-1} \right) + c.$$

Здесь нумерация пар калибров производится в направлении против хода прокатки. Число  $M$  изменяется от 1 до  $N$ . Для чистовой пары  $M = 1$ . Константы  $a$ ,  $b$ ,  $c$ , задающие коэффициенты вытяжки при мягком, среднем и жестком режимах деформации, определяют из графиков, приведенных в работе [7]. Для мягкого режима деформации можно принять  $a = 0,1$ ;  $b = -0,35$  и  $c = 1,5$ .

Для того, чтобы расчетный суммарный коэффициент вытяжки в паре калибров, равный  $\mu'_{\phi \Sigma} = \mu'_{\phi 1} \mu'_{\phi 2} \dots \mu'_{\phi N}$  соответствовал фактическому суммарному коэффициенту вытяжки  $\mu_{\Sigma}$ , необходимо в каждое расчетное значение  $\mu'_{\phi m}$  ввести поправочный коэффициент

$k = \left( \mu_{\Sigma} / \mu'_{\phi \Sigma} \right)^{\frac{1}{N}}$  (при  $k > 1$  расчетное значение  $\mu'_{\phi m}$  увеличивается пропорционально  $k$ , а при  $k < 1$  соответственно уменьшается. Тогда  $\mu_{\phi 1} = \mu'_{\phi 1} k$ ;  $\mu_{\phi 2} = \mu'_{\phi 2} k$ ; ... ;  $\mu_{\phi N} = \mu'_{\phi N} k$ , а суммарная вытяжка  $\mu_{\phi \Sigma} = \mu_{\phi 1} \mu_{\phi 2} \mu_{\phi 3} \dots \mu_{\phi N} = \mu_{\Sigma}$ .

После определения коэффициентов вытяжек в парах калибров производим расчет размеров ребровых калибров (чистового круга и плоских ребровых овалов) в нечетных проходах  $i = 1, 3, 5, \dots, n-1$ .

Диаметр чистового круглого калибра  $d_1 = d k_t$ , где  $k_t = 1,013$  – коэффициент линейного расширения стали при температуре конца прокатки.

Определяем площади поперечных сечений раскатов в чистовом круге и ребровых калибрах.

Площадь чистового круга  $F_1 = 0,785 d_1^2$ .

Овальный калибр описывается окружностью диаметром эквивалентного круга  $d_{\varphi i} = 1,129 \sqrt{F_i}$ .

Площадь ребровых овалов  $F_3 = F_1 \mu_{\phi 1}$ ,  $F_5 = F_3 \mu_{\phi 2}$  и т. д.

Площадь заготовки  $F_{заг} = F_{n-1} \mu_{\phi N}$  или  $F_{заг} = 0,785 D^2$ .

Прокатку ведут с незаполнением металлом овальных калибров по ширине. Коэффициент заполнения калибра, равный отношению ширины раската к диаметру эквивалентного круга, составляет  $\delta_i = 0,80 \dots 0,85$ .

Ширина раската в овальном калибре  $B_i = \delta d_{\varphi i}$ .

Высота овала определяется из условия равенства площади эквивалентного круга и площади сечения раската в овальном калибре  $H_i = d_{\varphi i} + 2S_i/B_i$ , где  $S_i$  – площадь сегмента усеченного эквивалентного круга.

Площадь сегмента определяется из геометрических соотношений в круге [8]:

$$S_i = [lr - a(r - h)]/2,$$

где  $h = (d - B)/2$  – высота сегмента;  $a = 2\sqrt{2hr - h^2}$  – хорда сегмента;  $l = (8\sqrt{h^2 + a^2/4} - a)/3$  – длина дуги сегмента.

Размеры и площадь полос с закругленными кромками, прокатываемых на гладкой бочке в четных проходах  $i = 2, 4, \dots, n$ , определяем с учетом уширения металла на гладкой бочке и последующем по ходу прокатки ребровом калибре.

Высота полосы  $H_i = B_{i-1} - \Delta b_{i-1}$ , ширина полосы  $B_i = H_{i+1} + \Delta b_i$ .

Расчет размеров полос производится методом последовательного приближения. Для получения достаточной сходимости результата достаточно двух шагов приближения.

На первом шаге расчета считаем, что ширина полосы, прокатываемой на гладкой бочке, равна высоте последующего по ходу расчета ребрового овала. Исходя из этого условия, определяем уширение в предыдущем по ходу расчета ребровом овале, толщину полосы, уширение металла при прокатке плоского ребрового овала на гладкой бочке и уточненную ширину полосы с учетом этого уширения.

На втором шаге расчет повторяют с учетом уточненной ширины полосы.

Уширение металла рассчитываем по следующим формулам:

- прокатка полосы в чистовом круглом калибре ( $i = 1$ ) с учетом полного заполнения его металлом [5]

$$\Delta b_i = 0,47 \frac{B_{i+1} - d_i}{B_{i+1}} \sqrt{0,5(D_e - d_i)(B_{i+1} - d_i)};$$

- прокатка полос на гладкой бочке и в ребровых овальных калибрах ( $i = 2, 3, 4, \dots, n - 1$ ) [9]

$$\Delta b_i = 0,35 \frac{B_{i+1} - H_i}{B_{i+1}} \sqrt{0,5(D_e - H_i)(B_{i+1} - H_i)};$$

- прокатка круга диаметром  $D$  на гладкой бочке ( $i = n$ ) [4]

$$\Delta b_i = 39,6 [(D - H_i)/D]^2.$$

Ширина зоны контакта металла с рабочей поверхностью гладких валков при прокатке плоских ребровых овалов

$$b_i = \frac{(d_{\varphi i+1} + \Delta b_i)(d_{\varphi i+1} - H_i)}{a d_{\varphi i+1}} + (H_{i+1} - d_{\varphi i+1}), \text{ где } a = 0,797(d_{\varphi i+1} - H_i)/d_{\varphi i+1} + 0,237.$$

При прокатке круглой заготовки диаметром  $D$  на гладкой бочке [4]

$$b_i = (D + \Delta b_i)(D - H_i) / aD, \text{ где } a = 0,797(D - H_i) / D + 0,237.$$

Радиус закругления кромок полос [6] равен  $R = \frac{H_i^2 + (B_i - b_i)^2}{4(B_i - b_i)}$ .

Площадь полосы с закругленными кромками, прокатываемой на гладкой бочке ( $i = 2, 4, \dots, n$ ), составляет  $F_i \approx (2B_i + b_i) / 3$ .

Коэффициенты вытяжек в калибрах ( $i = 1, 2, 3, \dots, n-1$ ) равен  $\mu_i = F_{i+1} / F_i$ . В калибре  $i = n$  коэффициент вытяжки  $\mu_i = F_{заг} / F_n$ .

Суммарный коэффициент вытяжки  $\mu_{\Sigma} = \mu_1 \mu_2 \mu_3 \dots \mu_n$ .

Данная методика использована при разработке калибровок валков и ресурсосберегающей технологии малокалиберной прокатки круглой стали диаметром 40 мм на непрерывном стане 390 МФ ПАО «ЕМЗ» (рис. 2, табл. 1).

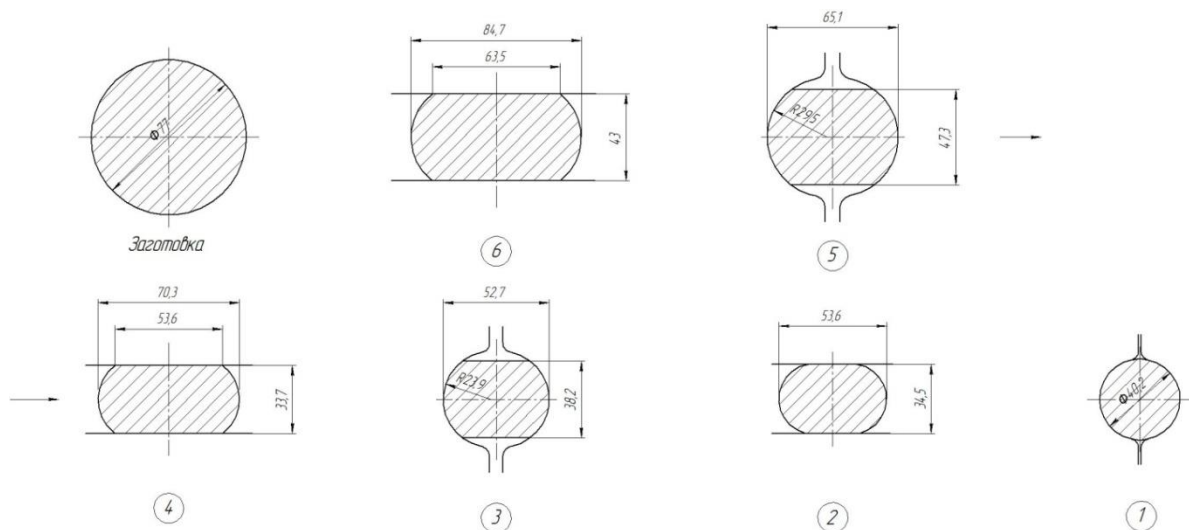


Рис. 2. Калибровка валков чистовой группы клетей стана 390 для прокатки круглой стали диаметром 40 мм

Таблица 1

Параметры калибровки валков в чистовой группе клетей стана 390 для прокатки круглой стали диаметром 40 мм

Номер калибра	Тип калибра	H, мм	B, мм	F, мм <sup>2</sup>	μ	Δh, мм	Δb, мм
загот.		77,0	77,0	4654			
6	г.б.	43,0	84,7	3364	1,3835	34,0	7,7
5	р.о.	65,1	47,3	2742	1,2268	19,6	4,3
4	г.б.	33,7	70,3	2181	1,2572	13,6	5,2
3	р.о.	52,7	38,2	1795	1,2150	17,6	4,5
2	г.б.	34,3	34,5	1628	1,1026	3,7	0,9
1	кр.	40,2	40,2	1269	1,2829	13,4	5,7

Примечание: г.б. – гладкая бочка; р.о. – ребровой овал; кр. – круг

### ВЫВОДЫ

Разработанная методика расчета вытяжной системы калибров «гладкая бочка-плоский ребровой овал» позволяет практически реализовать технологию ресурсосберегающей малокалиберной прокатки круглой стали, обеспечивающей улучшение технико-экономических показателей прокатных станов. Процесс прокатки в данной системе калибров устойчивый, скручивания раскатов не наблюдается, обеспечивается стабильное заполнение ребрового калибра без его переполнения по ширине. Качество готовых профилей соответствует требова-

ниям стандартов. Данную методику рекомендуется использовать при проектировании калибровок валков для прокатки круглой стали.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Смирнов В.К. Калибровка прокатных валков / В.К. Смирнов, В.А. Шилов, Ю.В. Инарович. – М. : *Металлургия*. – 1987. – 368 с.
2. Усовершенствованная система калибровки для прокатки круглых профилей из качественных сталей / Б.Е. Хайкин, А.В. Семков, Л.М. Железняк, Р.Д. Бондин // *Бюл. науч.-технич. информации «Черная металлургия»*. – 1986. – №4 (1008). – С. 38–39.
3. Аксенов С.А. Многовариантный анализ процессов прокатки на базе компьютерного моделирования / С.А. Аксенов, Е.Н. Чумаченко, О.О. Сырчина // *Вестник Воронежского ГТУ Т7*. – 2011. – №11.2. – С. 62–64.
4. Медведев В.С. Экспериментальное исследование уширения металла при прокатке кругов на гладкой бочке / В.С. Медведев, Н.А. Разиньков // *Обработка материалов давлением : сборник научных трудов*. – Краматорск : ДГМА, 2012. – №4(33). – С. 172–177.
5. Медведев В.С. Экспериментальное исследование уширения металла при прокатке полос в круглом калибре / В.С. Медведев, Н.А. Разиньков // *Обработка металлов давлением : сборник научных трудов*. – Краматорск : ДГМА, 2013. – №3(31). – С. 165–168.
6. Медведев В.С. Ресурсосберегающая малокалиберная прокатка сортовых профилей / В.С. Медведев, Н.А. Разиньков // *Вестник НТУ «ХПИ»*. Серия: Новые решения в современных технологиях. – Харьков : НТУ «ХПИ», 2012. – №46 (952). – С. 159–164.
7. Медведев В.С. Развитие научных основ создания технологии прокатки и проектирования калибровок для производства экономичных фасонных профилей. Диссертация на соискание научной степени докт. техн. наук. – Харьков : – 2009. – 476 с.
8. Бронштейн И.Н. Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов / И.Н. Бронштейн, К.А. Семендяев. – М. : Наука. Главная редакция физико-математической литературы. – 1981. – 718 с.
9. Виноградов А.П. Калибровка прокатных валков / А.П. Виноградов, Г.А. Виноградов. – М.: *Металлургиздат*, – 1950. – 344 с.

### REFERENCES

1. Smirnov V.K. Kalibrovka prokatnyh valkov / V.K. Smirnov, V.A. Shilov, Ju.V. Inatovich. – M. : *Metallurgija*. – 1987. – 368 s.
2. Usovershenstvovannaja sistema kalibrovki dlja prokatki kruglyh profilej iz kachestvennyh stalej / B.E. Hajkin, A.V. Semkov, L.M. Zheleznyak, R.D. Bondin // *Bjul. nauch.-tehnic. informacii «Chernaja metal-lurgija»*. – 1986. – №4 (1008). – S. 38–39.
3. Aksenov S.A. Mnogovariantnyj analiz processov prokatki na baze komp'juternogo modelirovanija / S.A. Aksenov, E.N. Chumachenko, O.O. Syrchina // *Vestnik Voronezhskogo GTU T7*. – 2011. – №11.2. – S. 62–64.
4. Medvedev V.S. Jeksperimental'noe issledovanie ushirenija metalla pri prokatke krugov na gladkoj bochke / V.S. Medvedev, N.A. Razin'kov // *Obrabotka materialov davleniem : sbornik nauchnyh trudov*. – Kramatorsk : DGMА, 2012. – №4(33). – S. 172–177.
5. Medvedev V.S. Jeksperimental'noe issledovanie ushirenija metalla pri prokatke polos v kruglom kalibre / V.S. Medvedev, N.A. Razin'kov // *Obrabotka metallov davleniem : sbornik nauchnyh trudov*. – Kramatorsk : DGMА, 2013. – №3(31). – S. 165–168.
6. Medvedev V.S. Resursosberegajushhaja malokalibernaja prokatka sortovyh profilej / V.S. Medvedev, N.A. Razin'kov // *Vestnik NTU «HPI»*. Serija: Novye reshenija v sovremennyh tehnologijah. – Har'kov : NTU «HPI», 2012. – №46 (952). – S. 159–164.
7. Medvedev V.S. Razvitie nauchnyh osnov sozdanija tehnologii prokatki i proektirovanija kalibrovok dlja proizvodstva jekonomichnyh fasonnyh profilej. Dissertacija na soiskanie nauchnoj stepeni dokt. tehn. nauk. – Har'kov : – 2009. – 476 s.
8. Bronshtejn I.N. Spravochnik po matematike dlja inzhenerov i uchashhihsja vtuzov / I.N. Bronshtejn, K.A. Semendjaev. – M. : Nauka. Glavnaja redakcija fiziko-matemati-cheskoj literatury. – 1981. – 718 s.
9. Vinogradov A.P. Kalibrovka prokatnyh valkov / A.P. Vinogradov, G.A. Vinogradov. – M.: *Metallurgizdat*, – 1950. – 344 s.

Медведев В. С. – д-р техн. наук ГП «УкрНТЦ» Энергосталь

Разиньков Н. А. – инженер, соискатель ГП «УкрНТЦ» Энергосталь

Соленный В. К. – канд. техн. наук ГП «УкрНТЦ» Энергосталь

ГП «УкрНТЦ» Энергосталь – Государственное предприятие «Украинский научно-технический центр металлургической промышленности «Энергосталь», г. Харьков.

E-mail: [mbc1642@ukr.net](mailto:mbc1642@ukr.net)

Статья поступила в редакцию 03.03.2016 г.