

## РАСЧЕТ КАЛИБРОВКИ ВАЛКОВ ПРОКАТНО-КОВОЧНЫХ СТАНОВ ПРИ ПРИМЕНЕНИИ СХЕМЫ ПРОКАТКИ «ГЛАДКАЯ БОЧКА – КРУГ»

*Г.И. Коваль, Т.Г. Каримова*

*Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск*

Изложена методика расчета параметров прокатных валков прокатно-ковочных станков и их калибровки при применении запатентованного способа шаговой прокатки круглых профилей и используемой при этом калибровки прокатных валков. Применение такой схемы шаговой прокатки и калибровки обеспечивает существенное упрощение технологии изготовления валков и повышение производительности процесса шаговой прокатки.

Рабочая поверхность прокатных валков содержит обжимной, калибрующий и расположенный между ними переходный участок.

Обжимной участок валка выполнен с переменным радиусом относительно оси его поворота и имеет гладкую рабочую поверхность. Калибрующий участок валка выполнен постоянным радиусом относительно оси его поворота и имеет скругленный ручей. На переходном участке форма и размеры ручья постепенно изменяются от гладкой рабочей поверхности до скругленного ручья.

С использованием известных закономерностей шаговой прокатки получен комплекс аналитических зависимостей, позволяющих рассчитывать параметры валков, форму и размеры их рабочей поверхности на каждом из указанных участков.

В качестве примера с применением разработанного алгоритма и программы приведены результаты расчета параметров валков и их калибровки для условий стана СШ 200.

Выполненные разработки могут быть использованы при проектировании технологии прокатки с применением существующих и вновь разрабатываемых прокатно-ковочных станков.

*Ключевые слова:* прокатно-ковочные станы; шаговая прокатка; параметры валков; калибровка валков; методика расчета.

На прокатно-ковочных станах [1] получение круглых профилей осуществляется несколькими (чаще всего четырьмя) валками переменного радиуса с обжимным и калибрующим участками рабочей поверхности. Обжимной участок валков осуществляет формирование конуса деформации, а калибрующий участок формирует готовый профиль. Для упрощения технологии изготовления валков и повышения производительности за счет увеличения подачи заготовки применяется способ прокатки, при котором обжатие заготовки на конусе деформации осуществляют на гладкой бочке [2]. При этом после каждого шага деформации выполняется кантовка заготовки на угол  $45^\circ$  и ее перемещение в сторону получаемого готового профиля на величину подачи  $m$ . При прокатке обжимным участком валков с гладкой бочкой из исходной заготовки высотой  $H_0$  формируется конус деформации с поперечным сечением в виде неправильного восьмигранника. Расстояние  $2Z$  между сторонами восьмигранника, получаемого в рассматриваемом шаге деформации, меньше расстояния  $2Z^1$  между сторонами восьмигранника, полученного в предыдущем шаге деформации, и меньше расстояния  $2Z^2$  между сторонами восьмигранника, полученного в предшествовавшем шаге деформации (рис. 1). Линии конусов деформации, образующие стороны восьмигранников, полученных в предыдущем и рассматриваемом шаге деформации, смещены вдоль оси прокатки в произ-

вольном сечении конуса деформации на величину линейного смещения металла  $\Delta X$  в результате подачи заготовки на величину  $m$  и ее последующей деформации. На калибрующем участке в каждом шаге деформации из неправильного восьмигранного профиля с размерами  $2Z^2$  и  $2Z_{m\lambda}$ , постепенно формируется готовый круглый профиль длиной  $m\lambda$  ( $\lambda$  – вытяжка заготовки) сначала с параметрами поперечного сечения  $2Z_{m\lambda}$  и  $H_1$ , а затем  $H_1$ .

Для реализации предложенного способа прокатки используются прокатные валки [3], рабочая поверхность которых (рис. 2) содержит обжимной  $ac$  и калибрующий  $cb$  участки. Обжимной участок имеет переменный радиус  $R_{\delta 1}$ . Калибрующий участок  $cb$  выполнен с постоянным радиусом  $R_{\text{кал}}$  и  $R_{\delta \text{кал.б}}$ . Ручей на калибрующем участке выполнен скругленным для образования с другими валками (установленными в одной клетке) круглого калибра. На части длины  $dc$  обжимного участка  $ac$ , который образован переменным радиусом  $R_{\delta 1}$ , выполнен ручей радиусом  $R_{\text{кал}}$ , равным расстоянию от оси поворота валка  $O$  до вершины ручья (т.  $n$ ) в начале калибрующего участка. Форма и размеры ручья постепенно изменяются от формы и размера ручья на калибрующем участке  $cb$  до гладкой бочки (т.  $d$ ). Точка  $d$  образована пересечением дуги постоянного радиуса  $R_{\text{кал}}$  с дугой переменного радиуса  $R_{\delta 1}$ , образующей рабочую поверхность валка на обжимном участке.

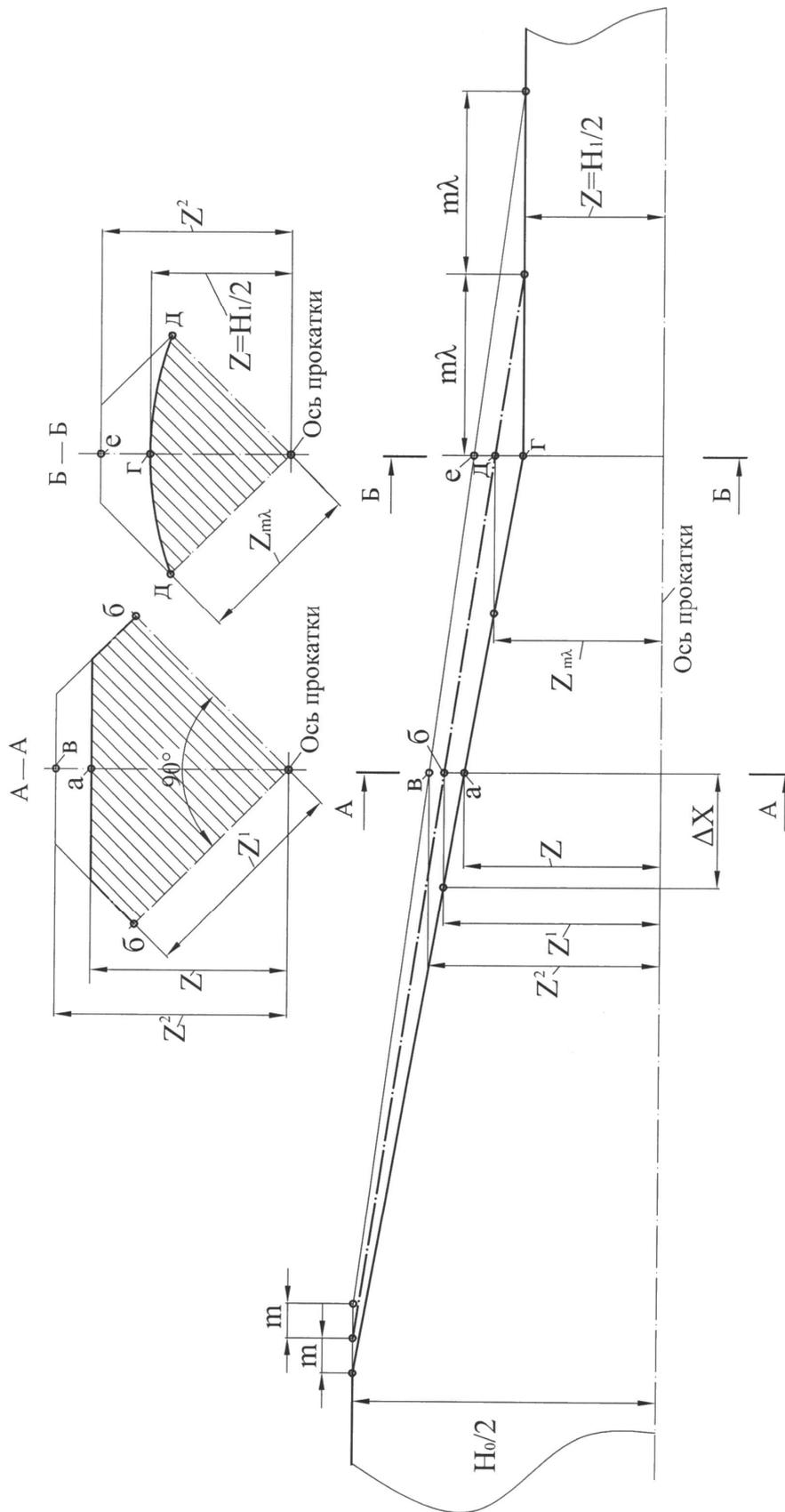


Рис. 1. К расчету параметров конуса деформации

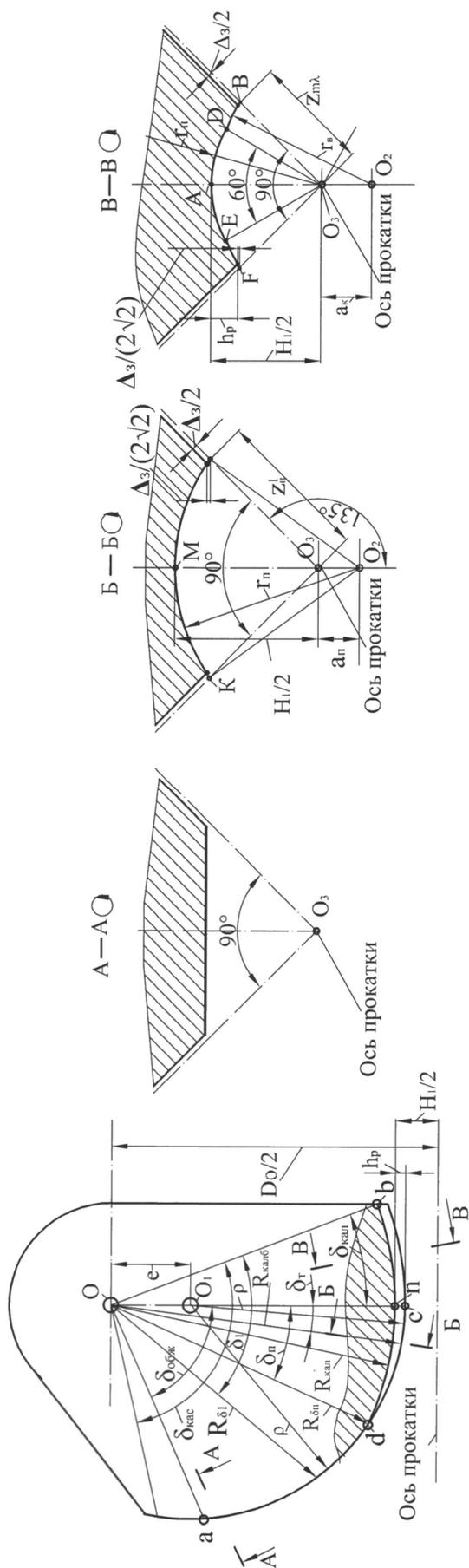


Рис. 2. Схема к расчету параметров валков и их калибровки

Для практического применения предложенного способа шаговой прокатки при использовании описанной калибровки валков необходимо знание аналитических зависимостей для расчета их геометрических параметров, к которым относятся радиус кривизны  $\rho$  обжимного участка, его эксцентриситет  $e$ , радиус калибрующего участка  $R_{\text{кал}}$ , а также параметры ручьев на переходном и калибрующем участках.

Исходными данными для расчета являются высота исходной заготовки  $H_0$  и получаемого профиля  $H_1$ , подача заготовки  $m$ , расстояние между осями валков  $D_0$ , зазор между валками  $\Delta_3$ , значение угла поворота валка, соответствующего касанию заготовки валками  $\delta_{\text{кас}}$ . Зависимости для определения угла  $\delta_{\text{кас}}$  приведены в работе [4].

Эксцентриситет  $e$  и радиус кривизны  $\rho$  определяется с учетом вреза переходного и калибрующего участков в рабочую поверхность валка (см. рис. 2) глубиной  $h_p$  равной

$$h_p = H_1/2(1 - 1/\sqrt{2}) - \Delta_3/(2\sqrt{2}). \quad (1)$$

С учетом этого в формуле [4] для расчета эксцентриситета  $e$  примем высоту исходной заготовки

$$H_{01} = H_0 + 2h_p. \quad (2)$$

Радиус кривизны  $\rho$  обжимного участка валков согласно рис. 2

$$\rho = D_0/2 - H_1/2 - e + h_p. \quad (3)$$

Тогда после преобразований

$$e = (D_0 - 2R_{\text{кал}})/(2\cos(\delta_{\text{кас}} - \delta_{\text{кал}}) - 1). \quad (4)$$

Углы поворота валка  $\delta_{\text{обж}}$  и  $\delta_{\text{кал}}$ , определяющие протяженность обжимного и калибрующего участков, вычисляются по формуле [4].

Угол  $\delta_{\text{п}}$ , определяющий протяженность переходного участка, на котором осуществляется врез ручья, вычисляется путем совместного решения уравнений

$$R_{\delta_{\text{п}}} = \sqrt{\rho^2 - e^2 \sin^2 \delta_{\text{п}}} + e \cos \delta_{\text{п}}, \quad (5)$$

$$R_{\text{кал}} = (D_0 - H_1)/2. \quad (6)$$

при условии  $R_{\delta_{\text{п}}} = R_{\text{кал}}$ .

Отсюда

$$\delta_{\text{п}} = \arccos(((D_0 - H_1)^2 + 4e^2 - 4\rho^2)/(4e(D_0 - H_1))). \quad (7)$$

Определим параметры ручья на калибрующем участке  $cb$ .

Ручей на калибрующем участке выполняется из двух зон (см. рис. 2), ограниченных центральным углом, равным  $90^\circ$ . Первая зона образуется дугой  $EAD$  с центральным углом  $60^\circ$  и выполняется радиусом  $r_n$ , проведенным из оси прокатки  $O_3$ . Вторая зона – зона выпусков образована дугами  $FE$  и  $DB$ , выполненными радиусом  $r_b$  из центра  $O_2$ , смещенного относительно оси прокатки на величину  $a_k$ . Радиус  $r_n$  равен половине диаметра готового профиля. Расстояние  $O_3B$  для исключения образования заусенцев (усов) в разъеме между валками должно превышать высоту восьмигранного профиля, полученного в предыдущем шаге деформации, повернутого на угол  $45^\circ$  и смещенного

в направлении готового профиля на величину  $m\lambda$ , т. е. равно  $Z_{m\lambda}$ .

Для построения ручья на калибрующем участке необходимо знать параметры  $a_k$  и  $r_b$ . Эти параметры можно определить из геометрических соотношений согласно рис. 2.

Искомая величина  $r_b$  является радиусом окружности, проходящей через т.  $D$  ( $r_n/2$ ;  $r_n\sqrt{3}/2 + a_k$ ) и т.  $B$  ( $Z_{m\lambda}\sqrt{2}/2$ ;  $Z_{m\lambda}\sqrt{2}/2 + a_k$ ) с центром в т.  $O_2$ .

Имеем систему уравнений с двумя неизвестными  $r_b$  и  $a_k$ .

$$(r_n/2)^2 + (r_n\sqrt{3}/2 + a_k)^2 = r_b^2, \quad (8)$$

$$(Z_{m\lambda}\sqrt{2}/2)^2 + (Z_{m\lambda}\sqrt{2}/2 + a_k)^2 = r_b^2. \quad (9)$$

Решив эту систему уравнений методом подстановки, получим

$$a_k = (Z_{m\lambda}^2 - r_n^2)/(r_n\sqrt{3} - Z_{m\lambda}\sqrt{2}), \quad (10)$$

$$r_b = \sqrt{((r_n/2)^2 + (r_n\sqrt{3}/2 + a_k)^2)}. \quad (11)$$

По этим зависимостям при подстановке в них соответствующих значений  $Z_{m\lambda}$  определяются параметры  $a_k$  и  $r_b$ .

Значения  $Z_{m\lambda}$  вычисляются следующим образом.

Решением уравнения

$$m\lambda = \rho\gamma + e \sin\gamma \quad (12)$$

определяется условный угол поворота валка  $\gamma$ .

При  $\gamma < \delta_{\text{кал}}$

$$Z_{m\lambda} = D_0/2 - R_{\text{кал}}. \quad (13)$$

При  $\gamma > \delta_{\text{кал}}$

$$Z_{m\lambda} = D_0/2 - \sqrt{\rho^2 - e^2 \sin^2 \gamma} - e \cos \gamma. \quad (14)$$

Радиус валка по бочке на калибрующем участке

$$R_{\text{кал.б}} = \rho + e. \quad (15)$$

Определим параметры ручья на переходном участке  $dc$ .

По дну ручья этот участок выполняется радиусом  $R_{\text{кал}}$ , проведенным из оси поворота валка  $O$ . По бочке этот участок выполняется радиусом  $\rho$ , выполненным из т.  $O_1$ . Угол поворота валка на этом участке изменяется от  $\delta_{\text{кал}}$  нуля до  $\delta_{\text{п}}$ .

Высота ручья по дну равна половине диаметра готового профиля  $H_1/2$ .

Параметры ручьев на участке  $KM$  в зависимости от угла поворота валка  $\delta_1$  определяются значениями  $r_n$  и  $a_n$ .

Из треугольника  $O_2O_3K$  с учетом  $O_2K = O_2M$  имеем

$$(a_n + H_1/2)^2 = a_n^2 + (Z_n^1)^2 - 2a_n Z_n^1 \cos 135^\circ. \quad (16)$$

Отсюда

$$a_n = ((Z_n^1)^2 - (H_1/2)^2)/(2(H_1/2 + Z_n^1 \cos 135^\circ)), \quad (17)$$

$$r_n = H_1/2 + a_n. \quad (18)$$

Параметр  $Z_n^1$ , входящий в зависимость (17), определяется следующим образом.

Определяется условный угол поворота валка  $\alpha$ , который соответствует параметру конуса деформации при его смещении вдоль оси прокатки при деформации металла,

$$X_{\delta_1} + \Delta X_n = \rho\alpha + e \sin\alpha. \quad (19)$$

## Обработка металлов давлением

В этом соотношении параметр конуса деформации при угле поворота валка на угол  $\delta_T$

$$X_{\delta_T} = \rho \delta_T + e \sin \delta_T. \quad (20)$$

В этой формуле угол  $\delta_T$  задается изменяющимся от нуля до  $\delta_{\Pi}$ .

Смещение конуса деформации на переходном участке, принимая линейный закон его изменения по длине конуса деформации,

$$\Delta X_{\Pi} = m + m(\lambda - 1)(\delta_{\text{обж}} - \delta_T) / \delta_{\text{обж}}. \quad (21)$$

Угол поворота валка, определяющий протяженность обжимного участка валка, определяется по формуле [4].

$$\text{При } \alpha < \delta_{\Pi} \quad Z_{\Pi}^1 = H_1 / 2. \quad (22)$$

$$\text{При } \alpha > \delta_{\Pi} \quad Z_{\Pi}^1 = D_0 / 2 - R_{\alpha}. \quad (23)$$

В последней формуле

$$R_{\alpha} = \sqrt{\rho^2 - e^2 \sin^2 \alpha} + e \cos \alpha. \quad (24)$$

С использованием разработанной методики, алгоритма и компьютерной программы рассчитаны параметры и калибровки валков стана СШ 200 при следующих исходных данных:

$$H_0 = 60 \text{ мм}, \quad H_1 = 30 \text{ мм}, \quad m = 5 \text{ мм},$$

$$D_0 = 400 \text{ мм}, \quad K_{\Pi} = 1, \quad \delta_{\text{кас}} = 52,58^{\circ}.$$

Параметры валков стана СШ 200:

$$\rho = 130,8 \text{ мм}; \quad e = 56,8 \text{ мм}; \quad R_{\text{кал}} = 185 \text{ мм};$$

$$h_p = 2,6 \text{ мм}; \quad R_{\text{кал.б}} = 187,6 \text{ мм};$$

$$\delta_{\text{кал}} = 6,2^{\circ}; \quad \delta_{\text{обж}} = 42^{\circ}; \quad \delta_{\Pi} = 14,6^{\circ}.$$

Параметры рабочей поверхности валков на калибрующем участке:

$$a_{\kappa} = 0 \text{ мм}, \quad r_{\text{в}} = 15 \text{ мм}.$$

В следующей таблице приведены параметры рабочей поверхности валков на переходном участке.

$\delta_T, ^{\circ}$	0	2,5	5	10	12,5
$a_{\Pi}, \text{ мм}$	0	0	1,82	38,2	473
$r_{\Pi}, \text{ мм}$	15	15	16,8	53,19	488

Таким образом, для условий прокатно-ковочных станов типа СШ 175, СШ 200 и СШ 280 получены зависимости, позволяющие рассчитывать параметры и калибровки валков при применении схемы прокатки «гладкая бочка – круг».

### Литература

1. Коваль, Г.И. Применение прокатно-ковочных станов для получения сортового проката из специальных сплавов черных и цветных металлов / Г.И. Коваль // Заготовительные производства в машиностроении. – 2012. – № 7. – С. 33–36.

2. Пат. № 1537336 Российская Федерация, МПК<sup>7</sup> В 21 В 13/18. Способ шаговой прокатки / В.Н. Выдрин, А.П. Литовченко, В.Г. Дремин, Г.И. Коваль и др. – № 24410889/02; заявл. 01.02.1988; опубл. 23.01.1990, Бюл. № 3. – 8 с.

3. Пат. № 2225763 Российская Федерация, МПК<sup>7</sup> В 21 В 13/18. Валок для шаговой прокатки / Г.И. Коваль, В.Г. Дремин, Т.Г. Каримова. – № 2002131099/02; заявл. 19.11.2002; опубл. 20.03.2004, Бюл. № 8. – 6 с.

4. Коваль, Г.И. Расчет параметров валков прокатно-ковочных станов / Г.И. Коваль, Т.Г. Каримова // Заготовительные производства в машиностроении. – 2013. – № 6. – С. 26–29.

**Коваль Григорий Иванович**, д-р техн. наук, профессор кафедры машин и технологий обработки материалов давлением, Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; kovalgi@susu.ru.

**Каримова Татьяна Григорьевна**, канд. экон. наук, доцент кафедры экономики и финансов, Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; karimovata@susu.ru.

Поступила в редакцию 6 июня 2015 г.

DOI: 10.14529/met160110

## CALCULATION OF ROLL CALIBRATION OF ROLLING-FORGING MILLS USING THE ROLLING PATTERN “SMOOTH DRUM – CIRCLE”

G.I. Koval', kovalgi@susu.ru,

T.G. Karimova, karimovata@susu.ru

South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation

Methods for calculating roll parameters of rolling-forging mills and their calibration with the use of the patented process of step rolling of round profiles and roll calibration used are discussed. This scheme of step rolling and calibration provides significant simplification of the roll manufacturing technology and the increase of productivity of the step rolling process.

The working surface of rolls contains crimping and caliber parts, and a transition region located between them. The crimping part of the roll is formed with a variable radius relative to its axis of rotation and has a smooth working surface. The caliber part of the roll is made with a constant radius relative to its axis of rotation and has a rounded groove. In the transition area the shape and size of the groove gradually change from the smooth working surface to the rounded groove.

Using known patterns of step rolling, a complex of analytical functions was obtained, which allows to calculate roll parameters, the shape and dimensions of their working surface on each part.

As an example of the use of the algorithm and the program, the results of calculation of roll parameters and their calibration for the mill SS 200 are presented.

Investigation results can be used in the design of the rolling technology with the use of existing and newly developed rolling-forging mills.

*Keywords: rolling-forging mills; step rolling; roll parameters; roll calibration; method of calculation.*

### References

1. Koval' G.I. [The Use of Rolling and Forging Machines for Long Products from Special Alloys of Ferrous and Non-Ferrous Metals]. *Zagotovitel'nye proizvodstva v mashinostroenii*, 2012, no. 7, pp. 33–36. (in Russ.)
2. Vydrin V.N. et al. *Sposob shagovoy prokatki* [Method of Stepwise Rolling]. Patent USSR, no. 1537336, 1990.
3. Koval' G.I. et al. *Valok dlya shagovoy prokatki* [Roll for Stepwise Rolling]. Patent RF, no. 2225763, 2004.
4. Koval' G.I. [Calculation of the Parameters of the Rolls of the Rolling-Forging Mills]. *Zagotovitel'nye proizvodstva v mashinostroenii*, 2013, no. 6, pp. 26–29. (in Russ.)

*Received 6 June 2015*

### ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Коваль, Г.И. Расчет калибровки валков прокатно-ковочных станков при применении схемы прокатки «гладкая бочка – круг» / Г.И. Коваль, Т.Г. Каримова // Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия». – 2016. – Т. 16, № 1. – С. 72–77. DOI: 10.14529/met160110

### FOR CITATION

Koval' G.I., Karimova T.G. Calculation of Roll Calibration of Rolling-Forging Mills Using the Rolling Pattern “Smooth Drum – Circle”. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Metallurgy*, 2016, vol. 16, no. 1, pp. 72–77. (in Russ.) DOI: 10.14529/met160110