КАЛИБРОВКА ШАРОПРОКАТНЫХ ВАЛКОВ С НЕПРЕРЫВНО МЕНЯЮЩИМСЯ ШАГОМ

В. Ю. РУБЦОВ^{1,2}, аспирант, Uriylot@mail.ru;

О. И. ШЕВЧЕНКО³, д-р техн. наук, заведующий кафедрой
металлургических технологий

(¹ АО “ЕВРАЗ Нижнетагильский металлургический комбинат”, Россия, г. Нижний Тагил;

² Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, Россия,

г. Екатеринбург; ³ Нижнетагильский технологический институт (филиал) Уральского федерального
университета им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, Россия, г. Нижний Тагил)

Аннотация. Представлено состояние развития шаропрокатного производства, дан обзор существующих методик калибровок шаропрокатных валков на сегодняшний день. Описаны возможности создания калибровок валков с учетом существующего металлорежущего оборудования и способы изменения параметров шага. Установлен приоритет использования шаропрокатных валков с непрерывно меняющимся шагом по сравнению с калибровками валков с дискретно меняющимся шагом. Показана возможность использования 5-координатного фрезерного оборудования для получения заданного профиля с несколькими переменными значениями. Разработана модель расчета калибровки шаропрокатных валков с непрерывно меняющимся шагом при сохранении постоянства объемов в процессе продвижения заготовки между валками. Выведены функции изменения шага при калибровках шаропрокатных валков с постоянной и переменной шириной реборды, с применением которых возможно определить теоретический шаг при любом угле поворота валков. Разработана методика построения 3D модели, в ее основе используются полученные данные для построения кривой 2-го порядка для получения спирали, являющейся основой винтовой поверхности с непрерывно меняющимся шагом. По данным моделям предложено производить нарезку профиля на 5-координатном обрабатывающем центре. На примере изготовления шара диам. 120 мм описан опыт практического использования калибровок, которые были рассчитаны по выведенной функции для валков с постоянной шириной реборды, в условиях вновь вводимого шаропрокатного стана АО ЕВРАЗ НТМК. Среди основных технических результатов после введения новой калибровки следует отметить: снижение усилий прокатки в отличие от действующих валков с дискретно меняющимся шагом на 25–30 %, получение размеров шара, максимально приближенных к номинальным значениям действующего стандарта, а также уменьшение поверхностных дефектов и увеличение равномерности обжатия по всей длине формирующей части валков.

Аналитические решения, представленные в данной статье, в сочетании с промышленной апробацией позволяют использовать новую методику калибровки валков шаропрокатного стана с непрерывно меняющимся шагом в учебных и производственных целях.

Ключевые слова: шаропрокатное производство; шаропрокатный стан; поперечно-винтовая прокатка; калибровка валков; переменный шаг; функция изменения шага; кривые 2-го порядка.

Ссылка для цитирования. Рубцов В.Ю., Шевченко О.И. Калибровка шаропрокатных валков с непрерывно меняющимся шагом // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. 2018. № 8. С. 58–63.

Doi: 10.32339/0135-5910-2018-8-58-63

В ближайшие годы в металлургической и горнорудной промышленности России планируется значительный рост. Основным толчком является строительство Удоканского горно-обогатительного комбината с запуском в строй в 2021–2022 гг. В связи с этим расширяется объем производства мелющих шаров. За последние годы уже запустили в эксплуатацию шаропрокатные станы: “Северсталь” (Череповец), KSP Steel (Павлодар), УГМК (Сухой Лог), идет строительство стана на ЕВРАЗ НТМК (Нижний Тагил). На сегодняшний день в мире установлено более 20 шаропрокатных станов для производства мелющих шаров. Большинство из них были запущены еще в 60-е гг. XX в. Прокатка периодических профилей с использованием винтовых калибров

была разработана в начале 1950-х гг. во ВНИИМЕТМАШ под руководством А.И. Целикова [1]. Среди методик калибровок, кроме оригинальной, разработанной А.И. Целиковым [2], существуют и другие, например, представленные в работах отечественных [3–5], а также зарубежных [6–9] авторов. Однако все методики применимы к валкам с дискретным шагом.

Согласно технологии поперечно-винтовой прокатки в процессе постепенного врезания реборды вала в заготовку производится приращение шага для обеспечения условия постоянства временных объемов.

В классическом виде нарезка винтового калибра происходит на токарно-винторезных станках, которые ограничены своими технологиче-

скими возможностями (дискретностью шага), поэтому вышеперечисленные методики калибровок сводятся к подбору оптимального набора шагов в соответствии с параметрами используемого оборудования для обеспечения наиболее равномерного обжатия. Изготовленные таким методом валки требуют обкатки на стане. Впервые возможность применения непрерывно меняющегося шага описана в работе [2], в которой было предложено применение специальных копируемых устройств для его обеспечения. Одним из первых исследовал и использовал непрерывно меняющийся шаг В.И. Котенок [10]. Его способ калибровки заключается в применении непрерывно меняющегося шага по заданной функции с использованием копируемых полуавтоматов. Применение данного способа в настоящее время является наиболее технологичным, рациональным и позволяет получить оптимальные параметры обжатия.

Однако современное металлорежущее оборудование позволяет получать винтовые поверхности с переменным шагом любого параметра. Обработка таких поверхностей возможна с использованием 5-координатных обрабатывающих центров с независимыми приводами для каждого координатного перемещения.

Авторы из Люблинского технического университета [7–9] используют в своих работах метод конечных элементов с построением 3D модели. Это позволяет даже при использовании дискретно меняющегося шага оперативно варьировать параметры подрезки реборды, вытяжки и приращения шага, получая схему нагрузок на элементы валка.

Целью данной работы является разработка методики калибровки валков шаропрокатного стана с непрерывно меняющимся шагом при выполнении условия полного заполнения калибров и сохранения постоянства мгновенных объемов металла для валков с постоянной и переменной шириной реборды.

Согласно теории расчета калибровки валков для полного заполнения профиля шара необходимо, чтобы в процессе формовки металл заготовки непрерывно прилегал к реборде калибра. Это возможно при условии, что элементарный объем металла, вытесненный из перемычки ($dV_{\text{па}}$), всегда равен или несколько меньше элементарного приращения объема полусфер шара ($dV_{\text{ша}}$) (рис. 1) [3].

Модель расчета калибровки шаропрокатных валков с непрерывно меняющимся шагом

Для расчетной модели примем коэффициент натяжения в перемычке $k = 1$, тогда объем, вытесненный из перемычки, будет равен объему

Рис. 1. Сечение заготовки во время прокатки с развалкой калибра

Fig. 1. Section of a bar during rolling with roll pass expansion

Коэффициент натяжения в перемычке, компенсирующий неточности изготовления валков и настройки стана:

$$k = \frac{|dV_{\text{ша}}|}{|dV_{\text{па}}|}. \quad (1)$$

При значениях $k > 1$ будет происходить вытяжка металла с возможным образованием пустот между заготовкой и ребордой, что в дальнейшем образует накат, а при $k < 1$ будет происходить натяжение перемычки, что может привести к разрыву заготовки в процессе прокатки. Коэффициент k варьируется от 1 до 1,2. Оптимальным считается сохранение постоянства объема и коэффициента $k = 1$ по всей длине валка.

приращения полусфер (включая приращение цилиндрической части). Выводим формулы для нахождения элементарных фигур:

$$V_{\text{па}} = \pi r_{\alpha}^2 b_{\alpha}; \quad (2)$$

$$V_{\text{ша}} = \frac{3}{4} \pi R^3 - V_{\text{ш.с}\alpha}, \quad (3)$$

где $V_{\text{ш.с}}$ — объем шарового сегмента, усеченного перемычкой;

$$V_{\text{ус.ка}} = \left(R - \sqrt{R^2 - r_{\alpha}^2} \right)^2 \left(R - \frac{R - \sqrt{R^2 - r_{\alpha}^2}}{3} \right). \quad (4)$$

Подставив формулу (4) в выражение (3) и упростив, получим:

$$V_{\text{ша}} = \frac{3}{4} \pi R^3 - r_{\alpha}^2 \left(R - \frac{r_{\alpha}}{3} \right); \quad (5)$$

$$V_{\text{ца}} = \pi R^2 s_{\alpha}, \quad (6)$$

где $V_{\text{па}}$, $V_{\text{ша}}$, $V_{\text{ца}}$ — объем перемычки, полусфер с усеченными сегментами и шара в определенный момент соответственно.

Сумма данных объемов в любой момент прокатки равна

$$\Sigma V = V_{\text{па}} + V_{\text{ша}} + V_{\text{ца}} = \text{const}. \quad (7)$$

Рассмотрев два произвольных положения, получим:

$$V_{\text{пан}} + V_{\text{шан}} + V_{\text{цан}} - V_{\text{пан+1}} - V_{\text{шан+1}} - V_{\text{цан+1}} = 0. \quad (8)$$

Далее принимаем следующие условия и выводим расчет калибровки.

1. Ширина реборды по всей длине калибра постоянна.

2. Весь металл идет в вытяжку:

$$\begin{aligned} & \pi r_{\alpha n}^2 b_{\alpha} + \left(\frac{3}{4} \pi R^3 - r_{\alpha n}^2 \left(R - \frac{r_{\alpha n}}{3} \right) \right) + \pi R^2 s_{\alpha n} - \pi r_{\alpha n+1}^2 b_{\alpha} - \\ & - \left(\frac{3}{4} \pi R^3 - r_{\alpha n+1}^2 \left(R - \frac{r_{\alpha n+1}}{3} \right) - r_{\alpha n}^2 \left(R - \frac{r_{\alpha n}}{3} \right) \right) - \\ & - \pi R^2 s_{\alpha n+1} = 0. \end{aligned} \quad (9)$$

Вытяжка будет определяться как

$$\Delta S = s_{\alpha n+1} - s_{\alpha n}. \quad (10)$$

Выразив из уравнения (9) вытяжку и упростив, получим:

$$\Delta S = \frac{\pi b_{\alpha} (r_{\alpha n}^2 - r_{\alpha n+1}^2) + r_{\alpha n+1}^2 \left(R - \frac{r_{\alpha n+1}}{3} \right)}{\pi R^2}. \quad (11)$$

Шаг определяем по следующей формуле:

$$t_{\alpha} = T_{\text{осн}} - \frac{\alpha_{\text{форм}}}{\Delta \alpha} \Delta S, \quad (12)$$

где $\alpha_{\text{форм}}$ — угол формирующей части вала; $\Delta \alpha$ — угол, соответствующий смене шага.

Формула (12) справедлива для нахождения шага при угле $0 < \Delta \alpha < \alpha_{\text{форм}}$.

Для определения функции изменения шага возьмем весь формирующий участок, тогда $\alpha_{\text{форм}}/\Delta \alpha = 1$, $r_{\alpha n} = R$ — как начало формирования шара, а $r_{\alpha n+1} = dx(d\alpha)$ — как переменный показатель изменения радиуса перемычки, зависящий от угла его расположения, находящийся в пределах $0 < r_{\alpha n+1} < R$. Получим зависимую функцию изменения шага.

$$\Delta t_{\alpha} = T_{\text{осн}} - \int_R^0 \frac{\pi b_{\alpha} (R^2 - x^2) + x^2 \left(R - \frac{x}{3} \right)}{\pi R^2} d\alpha. \quad (13)$$

Далее примем условия, при которых:

1. Ширина реборды увеличивается по мере заполнения калибра по закону подъема реборды.

2. Весь металл идет в вытяжку:

$$\begin{aligned} & \pi r_{\alpha n}^2 b_{\alpha n} + \left(\frac{3}{4} \pi R^3 - r_{\alpha n}^2 \left(R - \frac{r_{\alpha n}}{3} \right) \right) + \pi R^2 s_{\alpha n} - \pi r_{\alpha n+1}^2 b_{\alpha n+1} - \\ & - \left(\frac{3}{4} \pi R^3 - r_{\alpha n+1}^2 \left(R - \frac{r_{\alpha n+1}}{3} \right) - r_{\alpha n}^2 \left(R - \frac{r_{\alpha n}}{3} \right) \right) - \\ & - \pi R^2 s_{\alpha n+1} = 0. \end{aligned} \quad (14)$$

$$\Delta S = \frac{\pi r_{\alpha n}^2 b_{\alpha n} - \pi r_{\alpha n+1}^2 b_{\alpha n+1} + r_{\alpha n+1}^2 \left(R - \frac{r_{\alpha n}}{3} \right)}{\pi R^2}. \quad (15)$$

Согласно условию 1, по которому ширина реборды прямо пропорциональна закону прироста реборды, выводим следующее соответствие:

$$\Delta b_{\alpha n+1} = \frac{b_{\alpha n+1}}{b_{\alpha n}} = \frac{\alpha_{n+1}}{\alpha_n} = \frac{r_{\alpha n}}{r_{\alpha n+1}}. \quad (16)$$

Выражаем $b_{\alpha n+1}$ через радиус реборды

$$b_{\alpha n+1} = \frac{r_{\alpha n} b_{\alpha n}}{r_{\alpha n+1}}. \quad (17)$$

Из полученных условий аналогично для первого случая $0 < \Delta\alpha < \alpha_{\text{форм}}$, $r_{\text{ан}} = R$, $r_{\text{ан}+1} = dx$ и интегрируем также в пределах $0 < r_{\text{ан}+1} < R$, используя формулу (12), подставляя условие вытяжки по формуле (15) и ширину реборды по формуле (17), получим.

$$\Delta t_{\alpha} = T_{\text{осн}} - \int_R^0 \frac{\pi R b_{\text{ан}} (1-x) + x^2 \left(R - \frac{x}{3} \right)}{\pi R^2} dx. \quad (18)$$

Используя формулы (13) и (18), можно определить теоретический шаг на любом угле поворота валков для калибровки с постоянной или переменной шириной реборды при непрерывно меняющемся шаге.

Производственные испытания

С использованием данной методики была произведена калибровка шаропрокатных валков для получения шара диам. 120 мм. Согласно ГОСТ 7524–2015 размеры получаемого шара 125 ± 5 мм [11]. В опытном валке была использована постоянная ширина реборды по всей длине валка, которая составляла 11 мм, в связи с этим расчет проводился по формуле (13). Проинтегрировав выражение (13), определили пять точек для построения кривой, образующей винтовую поверхность валка. Спираль с непрерывно меняющимся шагом является кривой 2-го порядка, следовательно, она определяется пятью своими точками, если никакие четыре из них не лежат на одной прямой [12]. По данным пяти точек была выстроена кривая с непрерывно меняющимся шагом, на основе которой построена 3D модель валка. По данной модели на 5-координатном обрабатывающем центре был изготовлен комплект валков (рис. 2).

После изготовления валков в процессе прокатки на вводимом в эксплуатацию стане 60–120 АО ЕВРАЗ НТМК результаты показали, что нагрузка при использовании валков с непрерывно меняющимся шагом при прокатке снизилась на 25–35 % в отличие от валков с дискретно меняющимся шагом.

Геометрия получаемого шара на новых валках составила $125 \pm 0,4$ мм (рис. 3), что превышает требования ГОСТ 7524–2015 [11]. На шаре остается незначительный поясok шириной до 4 мм, что не является браковочным признаком, а необходимо для предотвращения переполнения калибра в случае прокатки заготовки диаметром с допуском по верхнему предельному значению. Также практически отсутствуют поверхностные дефекты.

Рис. 2. Валок с постоянной шириной реборды и непрерывно меняющимся шагом

Fig. 2. A roller with constant flange width and continuously variable pitch

Рис. 3. Шар, полученный прокаткой на экспериментальных валках

Fig. 3. A ball, produced by rolling using experimental rollers

Выводы

1. Определена преимущественность использования шаропрокатных валков с непрерывно

меняющимся шагом в условиях существования современного металлорежущего оборудования.

2. Найдены функции изменения шага при постоянной и переменной ширине реборды. С помощью данной зависимости возможно создание сетки координат, изготовление валков по которой обеспечит $k = 1$, что создаст максимально равномерное обжатие с минимальными нагруз-

ками на валок при отсутствии разрыхления металла.

3. Проведено практическое испытание на валках для шара диам. 120 мм с постоянной шириной реборды и непрерывно меняющимся шагом, что показало положительные результаты подтверждения данной теории.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Разумов-Раздолов К.Л. Прогрессивные методы конструирования и технология изготовления калибров валков для поперечно-винтовой прокатки: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. — Тула, 2000. — 16 с.
2. Целиков А.И., Барбарич М.В. Специальные прокатные станы. — М.: Металлургия, 1971. — 336 с.
3. Перетяtko В.Н., Климов А.С., Филиппова М.В. Калибровка валков шаропрокатного стана. Сообщение 1 // Изв. вузов. Черная металлургия. 2013. № 4. С. 27–30.
4. Перетяtko В.Н., Климов А.С., Филиппова М.В. Калибровка валков шаропрокатного стана. Сообщение 2 // Изв. вузов. Черная металлургия. 2013. № 6. С. 16–20.
5. Перетяtko В.Н., Климов А.С., Филиппова М.В. Калибровка валков для прокатки шара // Вестник горно-металлургической секции Российской академии естественных наук. Отделение металлургии. 2012. № 30. С. 44–50.
6. Pater Z. etc. Experimental and numerical analysis of helical-wedge rolling process for producing steel balls // International Journal of Machine Tools and Manufacture. 2013. Vol. 67. P. 1–7.
7. Chila P., Pater Z., Tomczak J., Chila P. Numerical analysis of rolling process for producing steel balls using helical rolls // Archives of Metallurgy and Materials. 2016. Vol. 61. № 2. P. 485–492.
8. Pater Z. Analysis of helical rolling process of balls formed from a head of a scrapper rail // Advances in Science and Technology Research Journal. 2016. Vol. 10. № 30. P. 110–114.
9. Pater Z. FEM analysis of the multi-wedge helical rolling process for a workholding bolt // MATEC Web of Conferences. 2016. 80. 13001. doi: 10.1051/mateconf/20168013001.
10. Котенок В.И. Развитие теории формообразования профилей в винтовых калибрах и создание высокоэффективных процессов и оборудования для прокатки деталей машин: Дис. ... д-ра техн. наук. — Москва, 2005. — 342 с.
11. ГОСТ 7524–2015. Шары мелющие стальные для шаровых мельниц.
12. Корн Г., Корн Т. 2.4–5. Характеристическая квадратичная форма и характеристическое уравнение // Справочник по математике. 4-е изд. — М: Наука, 1978. — 64 с.

CALIBRATION OF BALL-ROLLING ROLLERS WITH CONTINUOUSLY VARIABLE PITCH

V. YU. RUBTSOV^{1,2}, postgraduate, Uriyot@mail.ru;

O. I. SHEVCHENKO³, HD (Tech), head of Dpt of metallurgical technologies

(¹ JSC "EVRAZ Nizhny Tagil Steelworks", Russia, Nizhny Tagil;

² Ural Federal University after the First President of Russia B.N. El'tsin, Russia, Ekaterinburg;

³ Nizhny Tagil Technological Institute (branch) of Ural Federal University after the First President of Russia B.N. El'tsin, Russia, Nizhny Tagil)

Abstract. The status of ball rolling production presented, review of existing techniques for calibration of ball-rolling rollers for today quoted. Possibilities of roll pass design with regard to the existing metal cutting equipment and variation of pitch parameters described. The priority is set for the use of ball-rolling rollers with a continuously varying pitch, in comparison with roll passes with discretely varying pitch. Possibility of using 5-axis milling equipment for obtaining a given profile, with several variable values shown. Model of calculating the roll pass design for rollers with a continuously varying pitch elaborated, at saving constant amount of metal during the work piece passing between the rollers. Pitch change functions for roll pass design of ball-rolling rollers with a constant and variable flange width derived, using which it is possible to determine the theoretical pitch at any rollers rotation angle. Technique for constructing a 3D model elaborated, based use on obtained curve of the 2nd order, which is the basis helical surface with a continuously varying pitch. Production of profile on a 5-axis machining center, according to the 3D models proposed. Experience of practical use of roll pass design described, at the example of a ball with a diameter of 120 mm. The roll pass designs were calculated from the deduced function for rollers with a constant width of the flange under conditions of the newly put into operation ball-rolling mill of JSC "EVRAZ-NTMK". After introduction of a new roll pass design, the following should be noted among the main technical results: the reduction in force rolling, in contrast with the existing rollers with discretely varying pitch - by 25–30%, obtaining ball sizes that are close to nominal values of GOST standard, decrease of surface defects, increase of uniformity of reduction along the entire length of the rollers forming part.

The analytical solutions presented in this article, in combination with industrial approbation, make it possible to use a new methodology of calibration of ball-rolling mill rollers with a continuously variable pitch for educational and production purposes.

Keywords: balls rolling production; ball-rolling mill; cross-helical rolling; roll-pass design; variable pitch; function of variable pitch; curves of 2nd order.

For citation: Rubtsov V.Yu., Shevchenko O.I., Calibration of ball-rolling rollers with continuously variable pitch. *Chernaya metallurgiya. Byulleten nauchno-tehnicheskoy i ekonomicheskoy informacii* = *Ferrous metallurgy. Bulletin of scientific, technical and economic information*, 2018, no. 8, C. 58–63. (In Russ.).

Doi: 10.32339/0135-5910-2018-8-58-63

REFERENCES

1. Razumov-Razdolov K.L. *Progressivny'e metody' konstruirovaniya i tekhnologiya izgotovleniya kalibrov valkov dlya poperechno-vintovoj prokatki. Avtoref. ... dis. kand. texn. nauk* [Progressive methods of designing and a technology of roll pass designs for cross-helical rolling production. Extended Abstract of Cand. Sci. Diss.]. Tula, 2000, 16 p. (In Russ.).
2. Celikov A.I., Barbarich M.V. *Special'ny'e prokatny'e stany'* [Special rolling mills]. Moscow: Metallurgiya, 1971, 336 p. (In Russ.).
3. Peretyat'ko V.N., Klimov A.S., Filippova M.V. Calibration of ball-rolling mill rollers. Part 1. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya*, 2013, no. 4, pp. 27–30. (In Russ.).
4. Peretyat'ko V.N., Klimov A.S., Filippova M.V. Calibration of ball-rolling mill rollers. Part 2. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya*, 2013, no. 6, pp. 16–20. (In Russ.).
5. Peretyat'ko V.N., Klimov A.S., Filippova M.V. Calibration of ball-rolling mill rollers. *Vestnik gorno-metallurgicheskoy sekcii Rossijskoj akademii estestvenny'x nauk. Otdelenie metallurgii*, 2012, no. 30, pp. 44–50. (In Russ.).
6. Pater Z. etc. Experimental and numerical analysis of helical-wedge rolling process for producing steel balls. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2013, vol. 67, pp. 1–7.
7. Chila P., Pater Z., Tomczak J., Chila P. Numerical analysis of rolling process for producing steel balls using helical rolls. *Archives of Metallurgy and Materials*, 2016, vol. 61, no. 2, pp. 485–492.
8. Pater Z. Analysis of helical rolling process of balls formed from a head of a scrapper rail. *Advances in Science and Technology Research Journal*, 2016, vol. 10, no. 30, pp. 110–114.
9. Pater Z. FEM analysis of the multi-wedge helical rolling process for a workholding bolt. *MATEC Web of Conferences*, 2016, 80, 13001. doi:10.1051/mateconf/20168013001.
10. Kotenok V.I. *Razvitie teorii formoobrazovaniya profilej v vintovy'x kalibrax i sozdanie vy'sokoe'ffektivny'x processov i oborudovaniya dlya prokatki detalej mashin: Dis. ... dokt. texn. nauk* [Development of theory of profiles forming in helical roll passes and creation of high effective processes and equipment for rolling of machines parts. Dr. eng. sci. diss.]. Moscow, 2005, 342 p. (In Russ.).
11. GOST 7524–2015. *Shary' melyushhie stal'ny'e dlya sharovy'x mel'nicz* [Milling steel balls for ball mills]. Moscow, Standartinform Publ., 2015, 8 p. (In Russ.).
12. Korn G., Korn T. 2.4-5. *Xarakteristicheskaya kvadratichnaya forma i xarakteristicheskoe uravnenie. Spravochnik po matematike* [Characteristic quadratic form and characteristic equation]. 4nd ed. Moscow: Nauka, 1978, 64 p. (In Russ.).