



УДК 669

Поступила 06.10.2021

СПОСОБ ПОЛУЧЕНИЯ ВЫСОКОТОЧНОЙ ГЕОМЕТРИИ ПОПЕРЕЧНОГО ПРОФИЛЯ КРУГЛОГО СЕЧЕНИЯ ПРИ НЕПРЕРЫВНОЙ ПРОКАТКЕ

И. А. ПАНКОВЕЦ, ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга «БМК», г. Жлобин, Гомельская обл., Беларусь, ул. Промышленная, 37. E-mail: ivanpankovec@gmail.com

Рассмотрен процесс получения сортового проката в прутках геометрией повышенной точности на действующем производстве стана 370/150 ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга «БМК». Проведены исследования процесса прокатки в чистовых клетях для получения высокоточной геометрии готового профиля. На основе эмпирических данных произведена оценка эффективности действующих схем калибровки статистическим методом для получения профиля обычной точности и высокоточного профиля. Математически смоделированы процессы прокатки, приближенные к реальным условиям посредством численного моделирования. Эмпирические и теоретические данные выявили недостатки действующих схем калибровок, а также позволили определить дальнейшее направление исследования. Описаны ключевые факторы процесса прокатки, влияющие на формирование профиля, такие, как давление металла на валки и межклетьевое натяжение, на основании чего была разработана новая схема калибровки. На основе новой схемы калибровки смоделированы процессы прокатки при различных частотах вращения валков. Процесс математического моделирования максимально приближен к реальным условиям проката, благодаря чему удалось получить достоверные результаты исследования, позволяющие получать высокоточную геометрию поперечного профиля. После математического моделирования проведена серия экспериментов, выявлены закономерности получения высокоточной геометрии от межклетьевого натяжения.

Ключевые слова. Прокатный стан, калибровка профиля валков, воспроизводимость процесса, математическое моделирование, межклетьевое натяжение, высокоточная геометрия сортового проката.

A METHOD FOR OBTAINING HIGH-PRECISION GEOMETRY OF A CIRCULAR CROSS-SECTION DURING CONTINUOUS ROLLING

I. A. PANKOVETS, OJSC “BSW – Management Company of the Holding “BMC”, Zhlobin, Gomel region, Belarus, 37, Promyshlennaya str. E-mail: ivanpankovec@gmail.com

The process of obtaining long products in bars with a geometry of increased accuracy at the existing production of mill 370/150 of OJSC “BSW – Management Company of the Holding “BMC”. Research of the process of rolling in finishing stands to obtain high-precision geometry of the finished profile. In the work, based on empirical data, the effectiveness of the existing calibration schemes was assessed by a statistical method to obtain a profile of normal accuracy and high-precision profile. Mathematically, rolling processes were simulated, close to real conditions by means of numerical modeling. Empirical and theoretical data revealed the shortcomings of the existing calibration schemes, as well as made it possible to determine the further direction of research. The key factors of the rolling process influencing the formation of the profile, such as the metal pressure on the rolls and the inter-stand tension, on the basis of which a new calibration scheme was developed. ss of rolling at different frequencies of rotation of the rolls. The process of mathematical modeling is as close as possible to the real conditions of rolling, due to which it was possible to obtain reliable research results that allow obtaining high-precision geometry of the cross section. After mathematical modeling, a series of experiments was carried out, the regularities of obtaining high-precision geometry from the inter-stand tension were revealed.

Keywords. Rolling mill, roll profile calibration, process reproducibility, mathematical modeling, inter-stand tension, high-precision geometry of long products.

Введение

В современной промышленности при ее неуклонном развитии широко применяются наукоемкие технологии, обеспечивающие высокую конкурентоспособность продукции на мировых рынках. Помимо сокращения издержек на выпускаемую продукцию, важное место занимает точность геометрических размеров прокатываемого профиля, позволяющая удерживать лидирующие позиции в данном сегменте рынка. За счет совершенствования схемы калибровки валков и технологических совершенствований повышение точности геометрических размеров прокатываемого профиля значительно повысит конкурентное преимущество на рынке металлопродукции.

Для достижения цели по повышению точности сортового проката поперечного профиля необходимо решить ряд задач:

- определить эффективность действующих схем калибровки в обеспечении точности профиля;
- определить факторы, влияющие на формирование геометрических размеров профиля;
- разработать концептуальную схему калибровки, используя действующую нарезку профиля на прокатных валках;
- выявить и определить закономерности получения высокоточной геометрии от межклетьевого натяжения, разработать методику.

Определение эффективности действующих схем калибровок в обеспечении точности профиля

На текущий момент на прокатном стане 370/150 ОАО «БМЗ–управляющая компания холдинга «БМК» утверждены и применяются две схемы калибровки редуционно-калибровочного блока (РКБ), позволяющие получать сортовой прокат в прутках диаметром 22 мм. Первая схема – калибровка с использованием всех прокатных клеток РКБ (№ 22, 23, 24). Формирование конечного профиля происходит по схеме калибров Овал – Овал – Круг (рис. 1). Применение этой схемы позволяет получить стабильные геометрические размеры повышенной точности по всей длине раската только на небольшом количестве материала в связи с неустойчивостью положения овальной полосы в 2-роликовой коробке предчистойовой клетки (№ 23) и чистойвой клетки (№ 24). Даже минимальный износ роликов коробки приводит к отклонению раската от перпендикулярного положения относительно роликовой коробки и клетки № 24. Соответственно овальная полоса заходит в клетку № 24 под углом и формирование конечного круга происходит с большей овальностью и допусками. Быстрая замена и точная настройка привалковой арматуры в условиях прокатного стана проблематичны. Замена с настройкой в вальцетокарной мастерской является более точной, но продолжительней по времени.

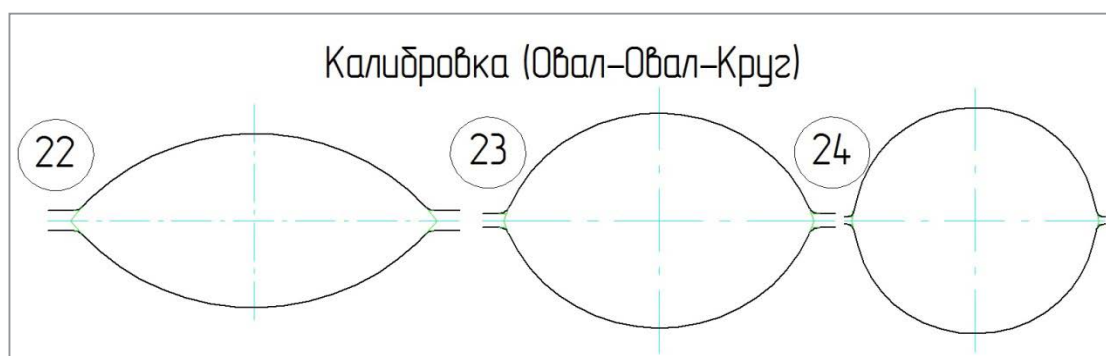


Рис. 1. Упрощенная схема калибровки РКБ по схеме Овал – Овал – Круг

Вторая схема калибровки Овал – Круг (рис. 2) предусматривает использование только двух прокатных клеток РКБ (№ 22, 23). Формирование конечного профиля происходит из более плоского овала клетки № 22. Данная схема позволяет стабильно производить прокат диаметром 22 мм с точностью нормального допуска на размер без частых остановок на контроль и замену роликовой коробки клетки № 24. Но получение геометрических размеров повышенной точности по данной схеме не представляется возможным ввиду отсутствия калибровочной клетки и более высоких степеней обжатия в калибрах клеток № 22 и 23.

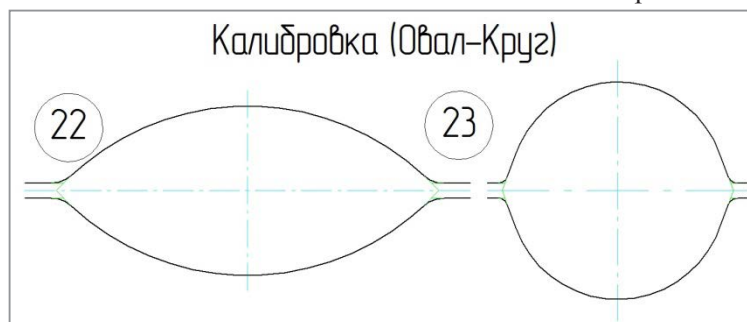


Рис. 2. Упрощенная схема калибровки РКБ по схеме Овал – Круг

Оценивая эффективность выбранных технологических решений, был рассчитан индекс воспроизводимости процесса C_{pk} сортового проката номинальным диаметром 22 мм, произведенного на стане

370/150 [1]. В табл. 1 приведены сводные значения индексов воспроизводимости процесса при прокатке по двум различным калибровкам с допуском на размер нормальной и повышенной точности [2].

Таблица 1. Сводные значения индекса воспроизводимости процесса

| Тип калибровки | | Овал – Круг | Овал – Овал – Круг |
|---|-----|-------------|--------------------|
| | | C_{pk} | C_{pk} |
| Допуск нормальной точности на размер $\pm 0,5$ мм | min | 2.452 | 0.792 |
| | max | 1.536 | 1.163 |
| Точный допуск на размер $\pm 0,2$ мм | min | 0.403 | 0.430 |
| | max | 0.407 | 0.512 |

Оценивая эффективность процесса проката математическим моделированием, получаем данные, приведенные в табл. 2.

Таблица 2. Выходные данные проектирования

| Выходные параметры | Номер клетки | Овал – Овал – Круг | Овал – Круг | Овал – Овал – Круг * | Овал – Круг * |
|--|--------------|--------------------|-------------|----------------------|---------------|
| Максимальная нагрузка на клетки, кН | 22 | 40 | 102 | 39 | 108 |
| | 23 | 13.5 | 56 | 13/0.7* | 43/19* |
| | 24 | 1 | – | 3/1.5* | – |
| Крутящий момент прокатки, Нм | 22 | 961 | 3071 | 943 | 3842 |
| | 23 | 386 | 2238 | 481/101* | 1330/7300* |
| | 24 | 6.5 | – | 107/544* | – |
| Максимальное напряжение, возникающее в очаге деформации, МПа | 22 | 36 | 95 | 36 | 95 |
| | 23 | 30 | 90 | 30/15* | 88/88* |
| | 24 | 20 | – | 20/20* | – |
| Геометрия готового профиля, мм | max | 21.72 | 22.34 | 21.57 | 21.92 |
| | min | 19.63 | 21.83 | 19.06 | 20.11 |
| | Овальность | 2.09 | 0.51 | 2.51 | 1.81 |

* Дополнительно спроектирован процесс проката с роликами вводной арматуры: ролики 23 и 24 клетки для Овал – Овал – Круг; ролики 23 клетки для Овал – Круг.

Из табл. 1, 2 можно сделать выводы:

- калибровка по схеме Овал – Круг обеспечивает нормальную точность профиля, однако не способна обеспечить производство проката с высокоточным допуском;
- калибровка по схеме Овал – Овал – Круг, исходя из практики, позволяет получить геометрические размеры повышенной точности по всей длине раската только на небольшом количестве материала, при этом очевидна сложность настройки клеток с данной схемой калибровки как для проката с обычной точностью, так и проката высокоточного.

Определение факторов, влияющих на формирование геометрических размеров профиля

Как известно, основными факторами, влияющими на точность размеров проката, являются жесткость рабочих клеток; температура прокатки и рабочих валков; износ валков и деталей клетки; давление металла на валки; межклетьеовое натяжение металла [3, 4].

Для расчета межклетьеового натяжения металла в [5] предложено дифференциальное соотношение, учитывающее характерные особенности межклетьеового деформирования и соответствующего реологического поведения металла. Однако если не брать в расчет реологическое поведение металла при прокате в предшествующих клетях, то для расчета межклетьеового натяжения возможно использование выражения, характеризующего натяжение между клетями $i-1$ и i [6]:

$$\frac{D_i}{D_{i-1}} \frac{n_i}{n_{i-1}} \frac{1+S_{o_i}}{1+S_{o_{i-1}}} \frac{1}{\mu_{o_i}} - 1 = \frac{K_{S_{i-1}} + K_{S_i} + K_{\mu_i}}{K_{S_{i-1}} + K_{S_i} + K_{\mu_i}}, \tag{1}$$

где D_i, D_{i-1} – катающие диаметры валков;
 n_i, n_{i-1} – частота вращения валков;

S_{oi} , S_{oi-1} , μ_{oi} – значение параметров проката опережения и коэффициента вытяжки при свободной прокатке;

K_{Si-1} , K_{Si} , $K_{\mu i}$ – технологические коэффициенты влияния натяжения на соответствующие параметры прокатки.

Согласно формуле (1), основными факторами, влияющими на межклетьеовое натяжение, являются диаметр валков; количество оборотов валка; опережение; вытяжка. При этом коэффициенты K_{Si-1} , K_{Si} , $K_{\mu i}$ отражают количественную меру влияния натяжения на изменение параметров процесса прокатки. Чем меньше технологических коэффициентов, тем слабее влияние натяжения на соответствующие параметры процесса. Для сортопрокатного стана такие коэффициенты необходимо получать эмпирическим путем, что на действующем стане затруднительно.

Анализируя вышесказанное, можно сделать следующий вывод: пренебрегая факторами, зависящими от технологического оборудования (жесткость рабочих клетей) и условий проката (износ валков и деталей клетки, температура прокатки и валков), ключевым фактором остается давление металла на валки (калибровка) и межклетьеовое натяжение металла (рис. 3).



Рис. 3. Диаграмма Кросби как способ управления качеством продукции

Разработка концептуальной схемы калибровки, используя действующую нарезку профиля на прокатных валках

При разработке новой калибровки за основу двух первых калибров была взята калибровка круга диаметром 23 мм по схеме Овал – Круг и добавлена третья калибрующая клеть с чистовым калибром для получения круга диаметром 22 мм. Далее при помощи математического моделирования симитирован процесс проката с различным натяжением между клетями № 23 и 24. На рис. 4 изображена упрощенная схема новой калибровки Овал – Круг – Круг.

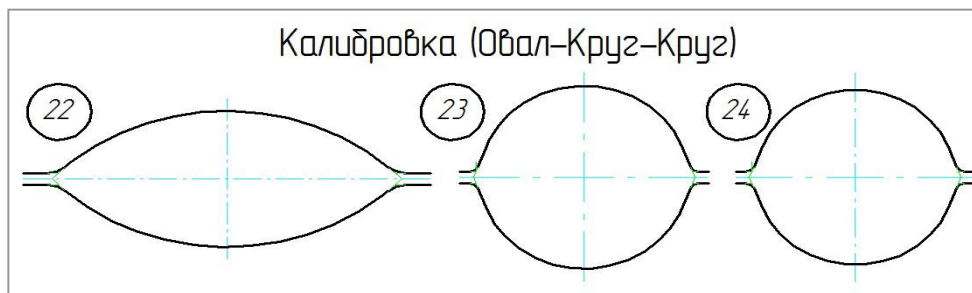


Рис. 4. Упрощенная схема калибровки РКБ по системе Овал – Круг – Круг

Выходные данные математического моделирования приведены в табл. 3.

Т а б л и ц а 3. Выходные данные математического моделирования

| Выходные параметры | Номер клетки | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|--|--------------|------|------|------|------|------|
| Максимальная нагрузка на клетки, кН | 22 | 28,8 | 29,2 | 29,2 | 28,9 | 29,2 |
| | 23 | 24,3 | 24,5 | 24,4 | 23,4 | 23,3 |
| | 24 | 14,8 | 14,2 | 9,3 | 15,5 | 16,4 |
| Крутящий момент прокатки, Нм | 22 | 636 | 700 | 720 | 606 | 605 |
| | 23 | 980 | 1113 | 984 | 939 | 930 |
| | 24 | 212 | 275 | 89 | 322 | 391 |
| Максимальное напряжение, возникающее в очаге деформации, МПа | 22 | 35 | 35 | 35 | 35 | 35 |
| | 23 | 30 | 25 | 27 | 30 | 32 |
| | 24 | 27 | 25 | 23 | 24 | 25 |
| Геометрия готового профиля, мм | max | 23,1 | 22,7 | 22,3 | 22,2 | 22,5 |
| | min | 22,1 | 22,1 | 21,6 | 21,9 | 22,3 |
| | овал | 1,0* | 0,6* | 0,7 | 0,3 | 0,2* |

* На профиле наблюдается незначительный двухсторонний ус на хвосте раската

Зависимость геометрических размеров профиля от частоты вращения валков приведена на рис. 5. Из рисунка можно сделать предварительный вывод: высокоточные геометрические размеры проката возможно получить в узком диапазоне работы валков (от 762 до 775 об/мин).

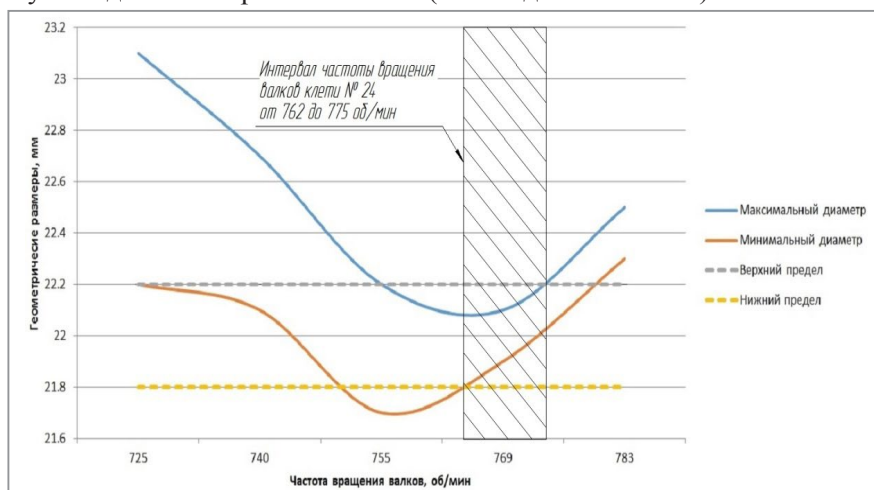


Рис. 5. Зависимость геометрических размеров от частоты вращения клетки № 24

Вывод – без применения сложных конструкционных и технологических решений оптимальным натяжением для получения высокоточной геометрии является натяжение между клетями № 23, 24, при этом натяжение составит от 1 до 3%.

Определение закономерностей

Проведя серию экспериментов при моделировании процесса проката профилей 27 и 32 мм, выявлена зависимость – разность площадей поперечного профиля подката и готового профиля, деленное на количество оборотов валков черновой клетки за вычетом оборотов чистовой. Для унификации понятия введем обозначение зависимости как k – коэффициент обеспечения необходимого натяжения:

$$k = \frac{S_{23} - S_{24}}{n_{24} - n_{23}}, \tag{2}$$

где S_{23}, S_{24} – площади поперечного сечения подката и готового профиля, мм²;
 n_{23}, n_{24} – частота вращения валков 23 и 24 клетей, об/мин.

Таким образом, определив эмпирическим путем коэффициент k составит 2,95–3,05.

При моделировании процесса проката профилей свыше 37–38 мм выявлено снижение эффективности межклетьевого натяжения по причине проскальзывания и пробуксовки валков 24-й клетки. Для предотвращения проскальзывания на профилях от 38 мм разница между профилем подката и профилем готового изделия не должна превышать 60 мм².

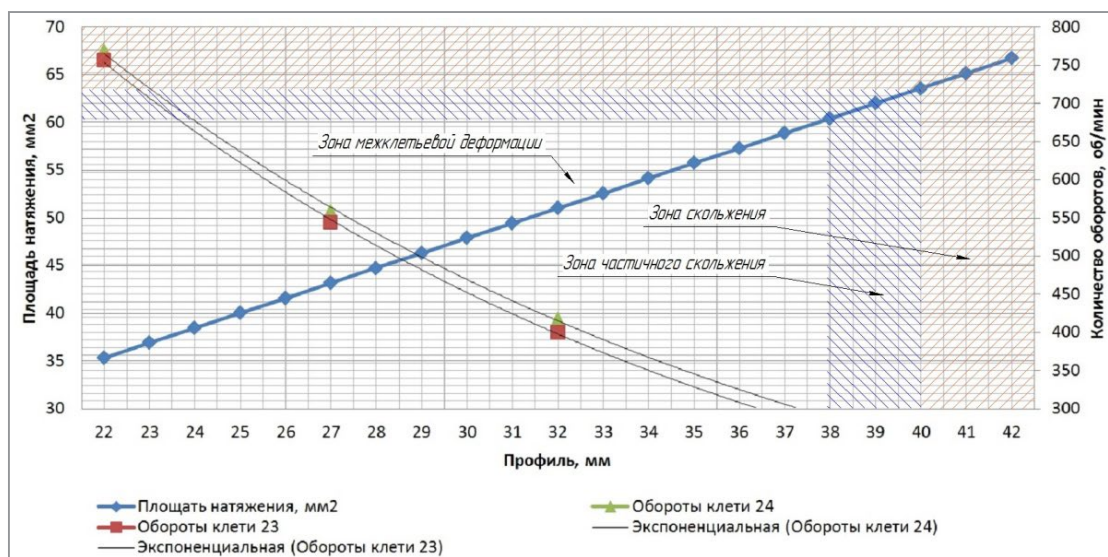


Рис. 6. Зависимость частоты вращения клеток № 23 и 24 от профиля

Анализируя зависимости, приведенные на рис. 6, можно сделать предварительные выводы:

- при прокате профилей от 20 до 38 мм на имеющемся парке валков (меняя только схему калибровки) и обеспечивая контролируемое межклетьеовое натяжение между 23 и 24 клетками, возможно получение высокоточного поперечного профиля;
- для получения высокоточного поперечного профиля при прокате профилей от 38 до 80 мм необходимо изменение калибровки (обеспечив разницу между профилем подката и профилем готового изделия не более 60 мм^2) и обеспечивая контролируемое межклетьеовое натяжение между 23 и 24 клетками.

Выводы

1. Калибровка по схеме Овал – Круг обеспечивает нормальную точность профиля, однако не способна обеспечить производство проката с высокоточным допуском.
2. Калибровка по схеме Овал – Овал – Круг, исходя из практики, позволяет получить геометрические размеры повышенной точности по всей длине раската только на небольшом количестве материала, при этом очевидна сложность настройки клеток с данной схемой калибровки как для проката с обычной точностью, так и проката высокоточного.
3. Калибровка по схеме Овал – Круг – Круг в теории является основным решением задачи по получению сортового проката диаметром от 20 до 80 мм повышенной точности.

ЛИТЕРАТУРА

1. ГОСТ Р 50779.46–2012/ISO/TR22514–4:2017. Статистические методы управления процессами. М.: Изд-во Стандартиформ, 2014. 51 с.
2. DINEN 10060:2005. Стержни арматурные стальные круглые горячей прокатки. Размеры, допустимые формы и предельные отклонения. DIN Немецкий институт стандартизации, 2004. 10 с.
3. Чекмарев А. П., Побегайло Г. Г. Точная прокатка сортовых профилей. М.: Металлургия, 1968. 236 с.
4. Шевакин Ю. Ф., Чернышев В. Н., Шаталов Р. Л., Мочалов Н. А. Обработка металлов давлением. М.: Изд-во Интермет Инжиниринг, 2005. 496 с.
5. Онищенко И. И., Куценко П. И., Куценко А. И. Теория непрерывной прокатки. Запорожье: Изд-во ЗГИА, 1998. 470 с.
6. Куваев В. Н., Токмаков П. В., Ключников К. Ю. и др. //Литье и металлургия. 2010. № 3(57). С. 204–209.