

**ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ДЕЙСТВУЮЩИХ СХЕМ
КАЛИБРОВКИ В ОБЕСПЕЧЕНИИ ТОЧНОСТИ ПРОФИЛЯ
ПРИ НЕПРЕРЫВНОЙ ПРОКАТКЕ
НА МЕЛКОСОРТНО-ПРОВОЛОЧНОМ СТАНЕ 370/150
ОАО «БМЗ – УПРАВЛЯЮЩАЯ КОМПАНИЯ ХОЛДИНГА «БМК»**

И. А. Панковец

*Учреждение образования «Гомельский государственный технический
университет имени П. О. Сухого», Республика Беларусь*

Научный руководитель М. Н. Верещагин

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.

Как известно, основными факторами, влияющими на точность размеров проката, являются: жесткость рабочих клетей; температура прокатки и рабочих валков; износ валков и деталей клетки; давление металла на валки; межклетевое натяжение металла [1]. 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 и межклетевое натяжение металла.

Цель данной работы – рассмотреть действующую технологию проката круглого профиля 22 мм в условиях ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга «БМК» на стане 370/150 при производстве сортового проката повышенной точности на линии прутка; произвести анализ двух различных технологий получения сортового проката на редуциционно-калибровочном блоке.

Краткое описание действующей технологии производства. Пластической деформации предшествует нагрев заготовок до температуры выдачи из печи 1070 ± 30 °С. Нагрев заготовок происходит в проходной печи с шагающими балками по кривой нагрева (рис. 1) с последующей выдачей в черновую группу клетей.

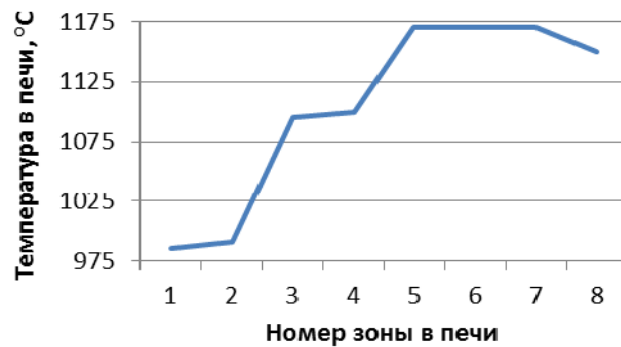


Рис. 1. Кривая нагрева заготовки сечением 250 x 300 мм и длиной до 5500 мм

После нагрева заготовка попадает в линию прокатного стана, которая включает в себя 24 прокатные клетки (рис. 2):

- черновая группа клеток состоит из 7 клеток с двойной опорой кассетного типа с горизонтальным и вертикальным расположением валков;
- промежуточная группа клеток состоит из 6 клеток с двойной опорой кассетного типа с горизонтальным и преобразуемым расположением валков;
- предчистовая/чистовая группа клеток, состоящая из 8 клеток кассетного типа с двойной опорой с горизонтальным и преобразуемым расположением валков;
- трехклетевой редуционно-калибровочный блок, используемый для увеличения типоразмера продукции окончательных операций при прокатке, а также для достижения максимально приближенных значений допуска.

Сортамент производства – диаметр от 20 до 80 мм в прутках длиной от 6000 до 12000 мм.

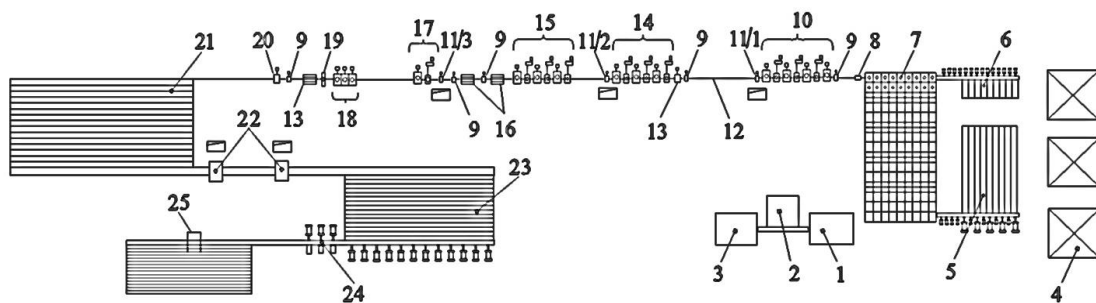


Рис. 2. Упрощенная схема прокатного стана 370/150 при производстве сортового проката в прутках: 1 – дробеструйная установка; 2 – магнитолюминесцентный метод определения дефектов; 3 – шлифовальный станок; 4 – склад заготовок; 5 – загрузочная решетка; 6 – аварийная решетка; 7 – нагревательная печь; 8 – устройство гидросбива окалины; 9 – трайбаппарат; 10, 1–7 – клетки черновой группы; 11 – зачистные ножницы; 12 – терморольганг; 13 – обрывные ножницы; 14, 8–13 – клетки первой промежуточной группы; 15, 14–19 – клетки второй промежуточной группы; 16 – трасса термоупрочнения; 17, 20, 21 – клетки предчистовой группы; 18 – редуционно-калибровочный блок; 19 – установка измерения диаметра NiGauge; 20 – делительные ножницы; 21 – холодильник; 22 – дисковые пилы; 23 – цепное передающее устройство; 24 – упаковочные машины; 25 – измерительный стенд массы

Редукционно-калибровочный блок (РКБ) используется для увеличения типоразмера продукции окончательных технологических операций при прокатке, а также для достижения максимально приближенных значений допуска. РКБ состоит из трех прокатных клетей (№ 22 горизонтальная – № 23 вертикальная – № 24 горизонтальная), которые приводятся в движение отдельными электродвигателями, которые в конфигурации установлены рядом друг с другом в компактной установке с целью достижения надежного направления заготовки. Различные изменения типоразмера продукции осуществляются на первых двух клетях, третья клетка используется для окончательной обработки с невысоким уровнем обжатия.

Основная проблематика. На сегодняшний день существует две основные утвержденные схемы калибровки РКБ, позволяющие получать сортовой прокат в прутках.

Калибровка для профилей $\varnothing 20\text{--}30$ мм использует все прокатные клетки РКБ (№ 22–24). Формирование конечного профиля происходит по системе калибров Овал–Овал–Круг, с соответствующими 2- или 4-роликовыми коробками позволяют получить стабильные геометрические размеры повышенной точности по всей длине раската на небольшом количестве материала. Причиной этого является неустойчивое положение овальной полосы в 2-роликовой коробке 23-й предчистовой клетки и 24-й чистовой клетки. Минимальный износ роликов коробки приводит к отклонению раската от перпендикулярного положения относительно 24-й роликовой коробки и клетки. Соответственно овальная полоса заходит в 24-ю клетку под углом, формирование конечного круга происходит с большей овальностью и соответственно допусками. Быстрая замена с точной установкой привалковой арматуры при производстве с такими допусками в условиях прокатного стана является проблематичной. Замена с установкой в условиях участка вальцетокарной мастерской является более точной, но продолжительней по времени.

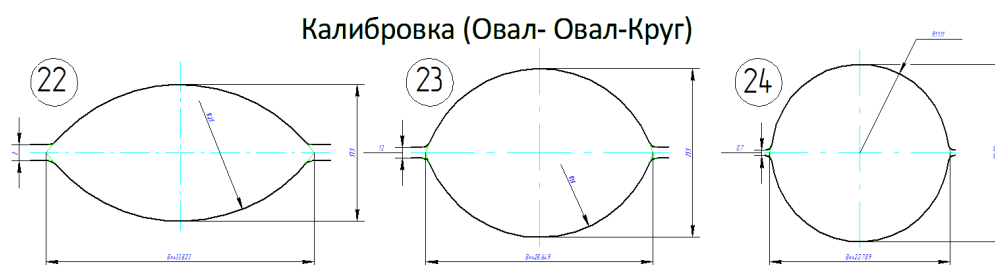


Рис. 3. Упрощенная схема калибровки РКБ по Овал–Овал–Круг

Ввиду имеющихся недостатков калибровки по схеме Овал–Овал–Круг в данный момент процесс прокатки осуществляется по схеме Овал–Круг. То есть в процессе не задействованы 24-я клетка и роликовая коробка, а формирование конечного профиля происходит из более плоского овала 22-й клетки. Данная схема позволяет стабильно производить $\varnothing 20\text{--}30$ с точностью нормального допуска на размер, без частых остановок на контроль и замену 24-й роликовой коробки. Но получение геометрических размеров повышенной точности по данной схеме не представляется возможным ввиду отсутствия калибровочной клетки и более глубоких вытяжек 22-й и 23-й клеток.



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

Оценка эффективности действующей калибровки. Для оценки эффективности выбранных технологических решений, а также для оценки пригодности процесса были построены гистограммы и рассчитан индекс воспроизводимости процесса C_{pk} сортового проката номинальным диаметром 22 мм, производимой на стане 370/150 за период с ноября 2017 по февраль 2019 г. [2]. На рис. 5 и 6 показаны гистограммы Гаусса с показателями индекса воспроизводимости процесса двух различных калибровок при допуске на прокат с нормальной точностью. По DIN EN 10060 для сортового проката номинальным диаметром 22 мм допуск на геометрические размеры обычной точности составляет $\pm 0,5$ мм, допуск повышенной точности $\pm 0,2$ мм [3].

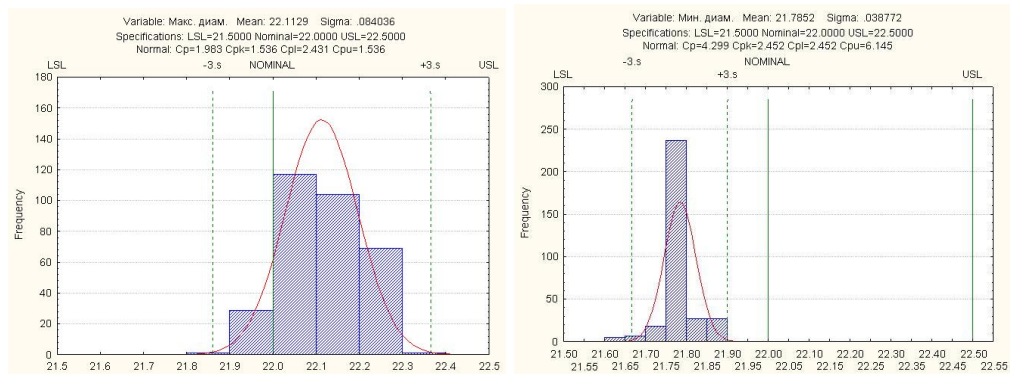


Рис. 5. Гистограммы Гаусса по воспроизводимости процесса проката с нормальной точностью для калибровки Овал–Круг

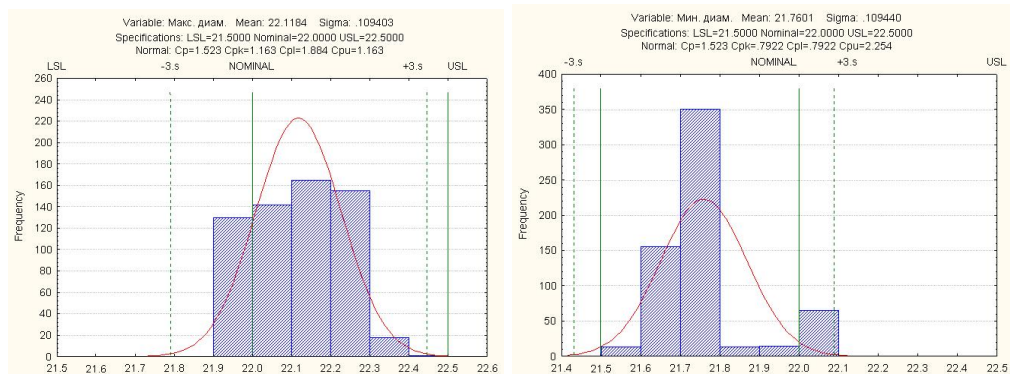


Рис. 6. Гистограммы Гаусса по воспроизводимости процесса проката с нормальной точностью для калибровки Овал–Овал–Круг

В табл. 1 представлены сводные значения индексов воспроизводимости процесса при прокатке по двум различным калибровкам, с допуском на размер нормальной точности и повышенной точности.

Таблица 1

Входные данные для проектирования

Тип калибровки		Овал–Круг				Овал–Овал–Круг			
		Ср	Срк	Срл	Сру	Ср	Срк	Срл	Сру
Допуск нормальной точности на размер $\pm 0,5$ мм	Мин	4,299	2,452п	2,452	6,145	1,523	0,792	0,792	2,254
	Макс	1,983	1,536	2,431	1,536	1,523	1,163	1,884	1,163
Точный допуск на размер $\pm 0,2$ мм	Мин	3,490	0,403	0,403	6,576	1,116	0,430	0,430	1,803
	Макс	1,251	0,407	2,095	0,4078	1,182	0,512	1,851	0,512

При показателе статистических данных Срк и Ср от 1,67 до 1,33 ширина интервала между контрольными нормативами в 8–10 раз превышает стандартное отклонение. Такой процесс считается хорошим (надежным).

При показателе статистических данных Срк и Ср от 1,33 до 1,0 ширина интервала между контрольными нормативами в 6–8 раз превышает стандартное отклонение. При приближении Ср к 1,0 вероятность появления брака составляет 0,27 %.

При показателе статистических данных Срк и Ср от 1,0 до 0,67, ширина интервала между контрольными нормативами всего лишь в 4–6 раз превышает стандартное отклонение. При приближении Ср к 0,67 вероятность появления брака достигает 4,56 %. Процесс протекает неудовлетворительно.

При показателе статистических данных Срк и Ср менее 0,67 ширина интервала между контрольными нормативами не превышает 4. Вероятность появления брака составляет более 4,56 %. Процесс не контролируем и должен быть остановлен до принятия определенных мер по его стабилизации.

Согласно статистическим данным видно, что процесс производства проката эффективен только для профиля обычной точности $\pm 0,5$ мм с калибровкой Овал–Круг и метастабилен для производства профиля повышенной точности $\pm 0,2$ мм для обоих типов калибровки.

Аналитическое описание модели. Полагая, что прокатные клетки и валки являются абсолютно жесткими, а условия проката не оказывают существенного влияния на формирование профиля (температура проката является постоянной и неизменной) определим ключевыми факторами, влияющими на формирование геометрических размеров профиля, давление металла на валки и межклетевое натяжение металла. Давление металла на валки можно определить по формуле (1):

$$P = p_{cp} F, \quad (1)$$

где p_{cp} – усредненное удельное давление в очаге деформации; F – площадь соприкосновения металла с валками [4]. Как видно из формулы (1), ключевым фактором, влияющим на давление металла, является форма и размер очага деформации, которые напрямую зависят от размера и формы калибра валка.

Для расчета межклетевого натяжения металла в работе [5] предложено дифференциальное соотношение, учитывающее характерные особенности межклетьевого деформирования и соответствующего реологического поведения металла. Однако

если не брать в расчет реологическое поведение металла при прокате в предшествующих клетях, то для расчета межклетевого натяжения возможно использование выражения, характеризующего натяжение между клетями $i-1$ и i [6] по формуле (2):

$$\sigma = \frac{\frac{D_i}{D_{i-1}} \cdot \frac{n}{n_{i-1}} \cdot \frac{1+S_{oi}}{1+S_{oi-1}} \cdot \frac{1}{\mu_{oi}} - 1}{K_{si-1} + K_{si} + K_{\mu i}}, \quad (2)$$

где D_i, D_{i-1} – катающие диаметры валков; n_i, n_{i-1} – частота вращения валков; $S_{oi}, S_{oi-1}, \mu_{oi}$ – 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 (2), основными факторами, влияющими на межклетевое 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.

Сравнительный анализ имеющихся схем калибровок. Наиболее перспективный способ определить энергосиловые и физико-механические показатели технологического процесса – численное моделирование ОМД. При использовании численного моделирования создается имитация реального процесса, который позволяет оценить распределение нагрузок на прокатные клетки. Моделирование процесса прокатки осуществляется с помощью метода конечных элементов (МКЭ). Преимущество данного метода заключается в возможности проведения комплексного физико-механического анализа, который основывается на концептуальных положениях, законах и теоремах механики сплошной среды и деформируемого объекта. Объемная модель создавалась в программном комплексе САПР. Затем полученная модель загружалась в специализированный программный комплекс, предназначенный для моделирования процесса ОМД, где задавались входные данные с дальнейшим моделированием непосредственно процесса прокатки.

Для разграничения процессов калибровки по схеме Овал–Овал–Круг присвоим имя DAN (разработка Danieli), а калибровке по схеме Овал–Круг присвоим имя BMZ (разработка БМЗ). При построении численного моделирования учитывались граничные условия реального проката. Модели построены с максимальным приближением к процессу, входные данные представлены в табл. 2.

Таблица 2

Входные данные для проектирования

Входные параметры	DAN	BMZ
Температура начала проката, °С	900	900
Температура поверхности инструмента, °С	50	50
Температура окружающей среды, °С	20	20
Марка стали	1008	1008

Окончание табл. 2

Входные параметры		DAN	BMZ
Диаметр подката, мм		27	27
Обороты валков, об/мин	Клеть 22	568,2	604,9
	Клеть 23	676,9	755,3
	Клеть 24	757	–
Вытяжка за проход	Клеть 22	1,120	1,170
	Клеть 23	1,176	1,235
	Клеть 24	1,115	–
Суммарная вытяжка за проход РКБ		1,468	1,444



Рис. 7. Объемная модель прокатки по двум калибровкам DAN и BMZ

По результатам проведенного математического моделирования полученные данные представлены в сводной табл. 3.

Таблица 3

Выходные данные проектирования

Выходные параметры		DAN	BMZ	DAN*	BMZ*
Максимальная нагрузка на клетки k_N	Клеть 22	40	102	39	108
	Клеть 23	13,5	56	13/0,7*	43/19*
	Клеть 24	1	–	3/1,5*	–
Крутящий момент прокатки N_m	Клеть 22	961	3071	943	3842
	Клеть 23	386	2238	481/101*	1330/7300*
	Клеть 24	6,5	–	107/544*	–
Максимальное напряжение, возникающее в очаге деформации, МПа	Клеть 22	36	95	36	95
	Клеть 23	30	90	30/15*	88/88*
	Клеть 24	20	–	20/20*	–
Геометрия готового профиля, мм	Макс	21,72	22,34	21,57	21,92
	Мин	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-й и 24-й клетки и для проекта DAN; ролики 23-й клетки для проекта BMZ.

После проектирования и расчета процесса существующих технологических решений выявлено, что процесс DAN по схеме Овал–Овал–Круг имеет не высокую вы-

тяжку на каждом из проходов. Относительно небольшая вытяжка влечет за собой незначительные энергосиловые затраты процесса проката. При этом с начальными параметрами (межвалковые зазоры, количество оборотов вала, форма калибра) не обеспечивает гарантированное получение геометрических размеров проката не только с высокоточным допуском, но и нормальной точностью. Соответственно данный процесс требует значительных трудозатрат настройки при производстве и высокую точность настройки при сборке клетей. Процесс DAN*, спроектированный с роликками вводной арматуры (ролики 23-й и 24-й клетей), также не показал положительных результатов, а лишь увеличил энергосиловые параметры проката за счет дополнительного сопротивления при удержании раската в роликках.

В процессе BMZ по схеме Овал–Круг геометрические размеры готового профиля соответствуют допуску нормальной точности при увеличении частоты измерений, на теле проката имеются сечения с допуском повышенной точности на прокат. Данный факт свидетельствует о метастабильном условии проката для получения допуска повышенной точности, но обеспечивает стабильное получение допуска нормальной точности. Процесс BMZ*, спроектированный с роликками вводной арматуры (ролики 23-й клетки), не существенно ухудшил геометрические показатели готового профиля. Причиной увеличения допуска послужили ролики 23-й клетки, которые в свою очередь создают дополнительный подпор при прокате.

Наложенные дополнительные граничные условия проката в виде роликов 23-й и 24-й клетей ухудшают анализ потока данных, дальнейшие исследования математических моделей будут происходить без них.

Заключение. Анализируя действующую систему калибровки на стане 370/150 как способ получения геометрического профиля сортового проката с точным допуском, выявлен ряд недостатков существующей технологии. Основная причина сложности получения стабильного проката с высокоточной геометрией – отсутствие учета межклетьевого натяжения как фактора управления показателями качества готовой продукции при производстве проката. Без глубокого анализа и принятия организационных, технологических и технических мероприятий на данный момент не представляется возможным стабильно, в серийном производстве получать высококачественный прокат с геометрическими допусками $\pm 0,2$ мм.

Литература

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