

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ КАЛИБРОВКИ ВАЛКОВ МЕЛКОСОРТНО-ПРОВОЛОЧНОГО СТАНА 370/150 ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ТОЧНОСТИ ПРОФИЛЯ ПРОКАТА

*И. А. ПАНКОВЕЦ¹, инженер-технолог 1 категории прокатного отдела технического управления, ivanpankovec@gmail.com; М. В. ОБОРОВ¹, начальник бюро трубопрокатного производства управления проектирования и реконструкции; Н. А. ХОДОСОВСКАЯ¹, инженер исследовательского центра; М. Н. ВЕРЕЩАГИН², д-р техн. наук, профессор, kaf_pressure@gstu.by
(¹ ОАО “БМЗ – управляющая компания холдинга “БМК”, Беларусь, г. Жлобин;
² УО “Гомельский государственный технический университет им. П.О. Сухого”, Беларусь, г. Гомель)*

Аннотация. Рассмотрена актуальная проблема получения сортового проката в прутках с геометрией повышенной точности на действующем производстве стана 370/150 ОАО “БМЗ – управляющая компания холдинга “БМК”. В качестве объекта исследования выбран редуциционно-калибровочный блок, состоящий из трех чистовых клетей. Предметом исследования является процесс прокатки в чистовых клетях для получения высокоточной геометрии готового профиля. В работе на основе эмпирических данных произведена оценка эффективности действующих схем калибровки статистическим методом для получения профиля обычной точности и высокоточного профиля. Методом конечных элементов 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. Аналитическое описание ключевых факторов процесса прокатки, влияющих на формирование профиля, позволило сделать выводы, что основы получения геометрических размеров поперечного профиля зависят от давления металла на валки и межклетевого натяжения, 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 прокатки, благодаря чему удалось получить достоверные результаты исследования, позволяющие получать высокоточную геометрию поперечного профиля. Полученные результаты исследования являются основой для проведения дальнейшего изучения межклетевой деформации с последующим экспериментальным прокатом на стане 370/150.

Ключевые слова: прокатный стан, калибровка профиля валков, воспроизводимость процесса, математическое моделирование, гистограммы Гаусса, межклетевое натяжение, высокоточная геометрия сортового проката.

Ссылка для цитирования: Панковец И.А., Оборов М.В., Ходосовская Н.А., Верещагин М.Н. Совершенствование калибровки валков мелкосортно-проволочного стана 370/150 для обеспечения точности профиля проката // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. 2020. Т. 76. № 11. С. 1119-1127.

Doi: 10.32339/0135-5910-2020-11-1119-1127

PERFECTION OF ROLLS SIZING IN BAR & WIRE ROD MILL 370/150 TO ENSURE ACCURACY IN ROLLED PRODUCT PROFILE

*I. A. PANKOVETS¹, engineer-technologist of 1st category, Rolling dpt. of Technical Dir., ivanpankovec@gmail.com; M. V. OBOROV¹, Head of bureau of pipe-rolling, Dir. of designing and reconstruction; N. A. KHODOSOVSKAYA¹, engineer, Res. Center; M. N. VERESHCHAGIN², HD (Tech.), Prof., kaf_pressure@gstu.by
(¹ OJSC “BMZ – managing company of Holding “BMC”, Belarus’, Zlobin;
² UO “Gomel State Technical University after P.O. Sukhoy”, Belarus’, Gomel’)*

Abstract. An actual problem of production bars with increased geometry accuracy at existing mill 370/150 at OJSC “BMZ – management company of Holding “BMC” has been reviewed. The object of research was reducing-sizing mill, composed of three finishing stands. The subject of research was rolling process in finishing stands aiming at achieving highly accurate geometry in the finished profile. In the work, based on empirical data, efficiency of existing methods of sizing by statistical method to produce a profile of regular accuracy and highly accurate profile was assessed. By the method of finite elements the rolling processes were simulated, approximated to real conditions by means of numerical modeling. Empiric and theoretic data revealed drawbacks of existing systems of sizing, as well as let determine further direction of research. Analytical description of key factors of rolling affecting creation of profile enabled to come to conclusion that the basis for achieving geometry sizes of transversal profile depends on pressure of steel on to rolls and the inter-stand tension. On this basis the new method of sizing has been developed. On the basis of the new method of sizing, rolling processes at different frequencies of rolls rotation were simulated. The process of mathematical simulation to the maximum approximated to real conditions of rolling. Thanks to this it became possible to obtain reliable results of research, enabling to achieve highly accurate geometry of transversal profile. Obtained results of research are the basis for further study of inter-stand deformation to be followed by experimental rolling at mill 370/150.

Key words: rolling mill, sizing of rolls profile, reproducibility of the process, mathematical simulation, Gaussian histograms, inter-stand tension, highly accurate geometry of bars.

For citation: Pankovets I.A., Oborov M.V., Khodosovskaya N.A., Vereshchagin M.N. Perfection of rolls sizing in bar & wire rod mill 370/50 to ensure accuracy in rolled product profile. *Chernaya metallurgiya. Byulleten' nauchno-tekhnicheskoi i ekonomicheskoi informatsii = Ferrous metallurgy. Bulletin of scientific, technical and economic information*, 2020, vol. 76, no. 11, pp. 1119-1127. (In Russ.).

Doi: 10.32339/0135-5910-2020-11-1119-1127

Стан 370/150 Белорусского металлургического завода (БМЗ) специализируется на производстве сортового проката диаметром от 20 до 80 мм как обычной точности, так и высокоточной геометрии конечного профиля. Освоение производства высокоточных геометрических размеров проката обеспечивает производителю металлопродукции конкурентное преимущество на рынке и стимулирует специалистов совершенствовать технологические процессы прокатного производства.

Увеличение числа типоразмеров выпускаемой продукции, а также достижение максимально точной геометрии готового профиля происходит в редуционно-калибровочном блоке (РКБ) стана 370/150. РКБ состоит из трех прокатных клетей: горизонтальной (№ 22), вертикальной (№ 23), горизонтальной (№ 24). Изменение типоразмера продукции осуществляется в первых двух клетях. В третьей (калибровочной) клетке происходит окончательная обработка при невысоком уровне обжатия для получения высокоточной геометрии проката.

Так как процесс прокатки профиля с высокоточной геометрией особенно не стабилен при диаметре от 20 до 30 мм, в исследовании рассмотрена действующая технология производства сортового проката диам. 22 мм. В исследовании не учитывались факторы, зависящие от технологического оборудования (жесткость рабочих клетей — клетки РКБ спроектированы для получения высокоточного допуска, заводом изготовителем в конструкцию заложена соответствующая жесткость клетей), а также условий прокатки (износ валков и деталей клетки — обслуживание оборудования проводится перед каждой производственной кампанией; температура прокатки и валков — температурно-скоростные параметры контролируются в режиме реального времени и стабильны при производстве). Изучено влияние на точность геометрических размеров проката давления металла на валки и межклетевого натяжения металла, в значительной мере определяемого калибровкой валков РБК.

Утверждены и применяются две схемы калибровки РКБ, позволяющие получать сортовой прокат в прутках диам. 22 мм. Первая схема — калибровка с использованием всех прокатных клетей РКБ (№ 22–24). 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 двухроликковой коробке предчистовой (№ 23) и чистой (№ 24) клетей. 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 проблематична. Замена с настройкой в вальцетокарной мастерской является более точной, но продолжительной по времени.



Рис. 1. Упрощенная схема калибровки РКБ по схеме овал–овал–круг

Fig. 1. Simplified diagram of RSB sizing according to scheme oval–oval–circle

Вторая схема калибровки овал–круг (рис. 2) предусматривает использование только двух прокатных клетей РКБ (№ 22, 23). Формирование конечного профиля происходит из более плоского овала клетки № 22. Данная схема позволяет стабильно производить прокат диам. 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 клетей № 22 и 23.

Для оценки эффективности обеспечения высокоточной геометрии при применении имеющихся схем калибровок был рассчитан индекс воспроизводимости процесса C_{pk} (изменчивость и настроенность процесса на центр поля допуска по отношению к техническим требованиям) и построены гистограммы Гаусса для сортового проката номинальным диаметром 22 мм с высо-

коточным допуском, произведенного на стане 370/150 с ноября 2017 г. по февраль 2019 г. [1].



Рис. 2. Упрощенная схема калибровки РКБ по схеме овал-круг

Fig. 2. Simplified diagram of RSB sizing according to scheme oval-circle

В табл. 1 представлены сводные значения индекса воспроизводимости процесса при прокатке по двум различным калибровкам с допуском на размер нормальной и повышенной точности. 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 [2].

При показателе статистических данных C_{pk} более 1,33 ширина интервала между контрольными нормативами в 8–10 раз превышает стандартное отклонение. Такой процесс считается надежным.

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

ТАБЛИЦА 1. СВОДНЫЕ ЗНАЧЕНИЯ ИНДЕКСА ВОСПРОИЗВОДИМОСТИ ПРОЦЕССА

TABLE 1. SUMMARY VALUES OF INDEX OF THE PROCESS REPRODUCIBILITY

Тип калибровки	C_{pk}	
	овал-круг	овал-овал-круг
Допуск нормальной точности на размер $\pm 0,5$ мм:		
	min	0,792
	max	1,163
Точный допуск на размер $\pm 0,2$ мм:		
	min	0,430
	max	0,512

При показателе статистических данных C_{pk} от 1,0 до 0,67 ширина интервала между контрольными нормативами всего лишь в 4–6 раз превышает стандартное отклонение.

При приближении C_{pk} к 0,67 вероятность появления брака достигает 4,56 %. Процесс протекает неудовлетворительно.

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

На рис. 3 и 4 показаны гистограммы Гаусса с показателями индекса воспроизводимости процесса двух различных калибровок при высокоточном допуске на прокат $\pm 0,2$ мм.

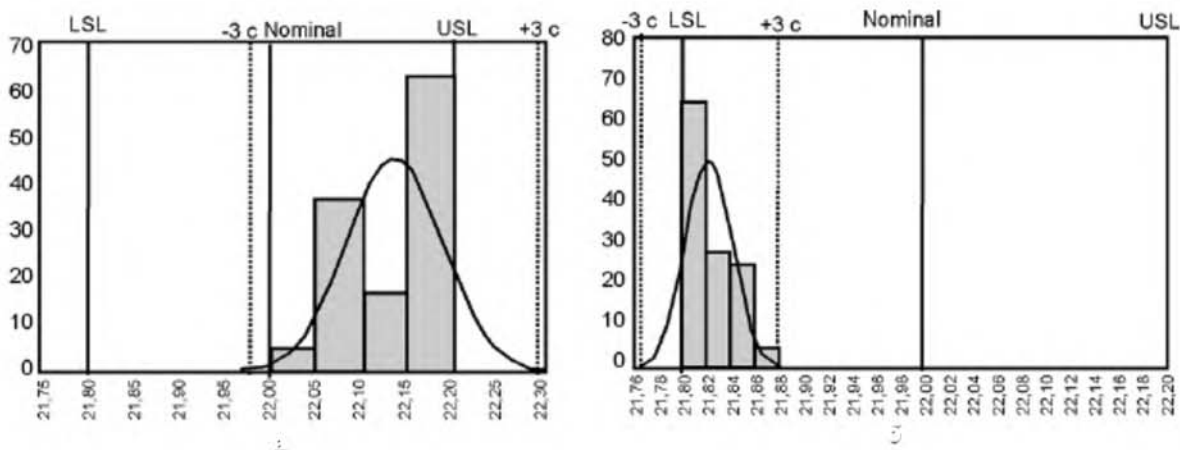


Рис. 3. Гистограммы Гаусса по воспроизводимости процесса прокатки с нормальной точностью для калибровки по схеме овал-круг

Fig. 3. Gaussian histograms of reproducibility of rolling process with normal accuracy for sizing according to scheme oval-circle

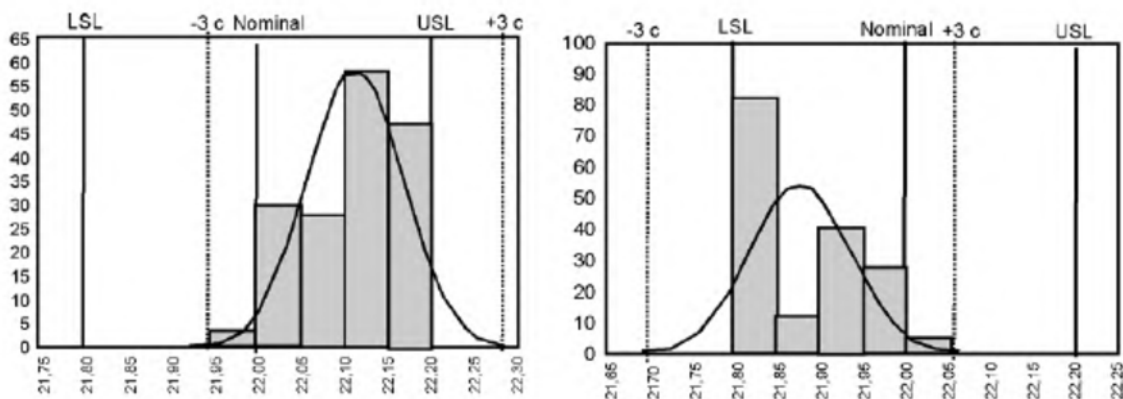


Рис. 4. Гистограммы Гаусса по воспроизводимости процесса прокатки с нормальной точностью для калибровки по схеме овал–овал–круг

Fig. 4. Gaussian histograms of reproducibility of rolling process with normal accuracy for sizing according to scheme oval–oval–circle

Распределение частоты полученных результатов (эмпирических) в виде гистограмм Гаусса дает важную предварительную информацию. Для калибровок овал–круг и овал–овал–круг эмпирическое распределение смещено в сторону верхнего и нижнего допусков, что свидетельствует о сложности воспроизводимости процесса (сложность в получении высокоточных допусков на протяжении длительного времени). Небольшое изменение процесса прокатки повлечет за собой получение несоответствующей продукции

по причине превышения максимального (минимального) допуска по геометрии проката.

Данные, приведенные в табл. 1 и на рис. 3 и 4, позволяют сделать вывод, что процесс производства проката эффективен только для профиля обычной точности $\pm 0,5$ мм с калибровкой овал–круг и метастабилен (т. е. осуществим только при идеальных условиях) для производства профиля повышенной точности $\pm 0,2$ мм для обоих типов калибровки.

Математическое моделирование процесса прокатки

Наиболее перспективным способом определения энергосиловых и физико-механических показателей технологического процесса является численное моделирование обработки металлов давлением. 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 в программном комплексе ANSYS/LS-Dyna (на базе Гомельского государственного технического университета им. П.О. Сухого). 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 (SolidWorks на базе БМЗ). Затем получен-

ная модель загружалась в специализированный программный комплекс, предназначенный для моделирования процесса обработки металлов давлением, где задавались входные данные с дальнейшим моделированием непосредственно процесса прокатки.

Для разграничения процессов калибровке 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 реальному процессу. Входные данные для построения численной модели представлены в табл. 2, а схема прокатки по данным калибровкам — на рис. 5.

**ТАБЛИЦА 2. ВХОДНЫЕ ДАННЫЕ
ДЛЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ**

TABLE 2. INPUT DATA FOR DESIGNING

Входной параметр	DAN	BMZ
Температура начала прокатки, °С	900	900
Температура поверхности инструмента, °С	50	50
Температура окружающей среды, °С	20	20
Сталь	100Cr6	100Cr6
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

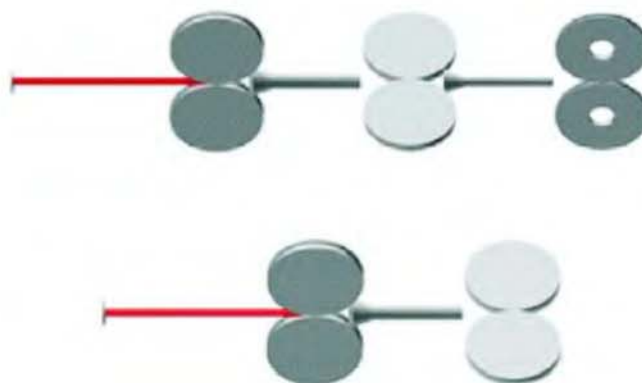


Рис. 5. Схема прокатки по калибровкам DAN и BMZ

Fig. 5. Scheme of rolling according to sizing variants DAN and BMZ

Данные, полученные в результате проведенного математического моделирования, представлены в табл. 3.

ТАБЛИЦА 3. ВЫХОДНЫЕ ДАННЫЕ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

TABLE 3. EXIT DATA OF THE DESIGNING

Выходной параметр	DAN	BMZ	DAN*	BMZ*
Максимальная нагрузка на клетки, кН:				
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, Нм:				
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:				
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 прокатки с роликами вводной арматуры:
 – ролики клеток № 23 и 24 для проекта DAN;
 – ролики клетки № 23 для проекта BMZ.

После проектирования и расчета процесса существующих технологических решений выявлено, что процесс DAN по схеме овал–овал–круг имеет невысокую вытяжку на каждом из проходов. Относительно небольшая вытяжка влечет за собой незначительные энергосиловые затраты процесса прокатки. При этом вместе с начальными параметрами (межвалковые зазоры, количество оборотов валка, форма калибра) данный процесс не обеспечивает гарантированное получение геометрических размеров проката

не только с высокоточным допуском, но и с нормальной точностью. Данный процесс требует значительных трудозатрат и высокой точности настройки при сборке клеток. Процесс DAN*, спроектированный с роликами вводной арматуры (ролики клеток № 23 и 24), также не показал положительных результатов, а лишь увеличил энергосиловые параметры прокатки за счет дополнительного сопротивления при удержании раската в роликах.

В процессе ВМЗ 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 также свидетельствует о метастабильности условий прокатки для получения допуска повышенной точности, но при этом обеспечивается стабильное получение допуска нормальной точности. Процесс ВМЗ*, спроектированный с роликами вводной арматуры (ролики клетки № 23), незначительно ухудшил геометрические показатели готового профиля. Причиной увеличения допуска послужили ролики клетки № 23, которые создают дополнительный подпор при прокатке.

Наложенные дополнительные граничные условия прокатки в виде роликов клеток № 23 и 24 ухудшают анализ потока данных, в связи с чем дальнейшие исследования математических моделей будут проводиться без них.

На основе результатов математического моделирования процесса прокатки можно сделать вывод, что производство проката осуществимо без дополнительных настроек прокатных клеток только для профиля обычной точности $\pm 0,5$ мм с калибровкой овал–круг и трудноосуществимы для производства профиля повышенной точности $\pm 0,2$ мм для калибровок овал–круг и овал–овал–круг.

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, межклетевое натяжение металла [3]. Пренебрегая факторами, зависящими от технологического оборудования (жесткость рабочих клеток — клетки РКБ спроектированы для получения высокоточного допуска, заводом изготовителем в конструкцию заложена соответствующая жесткость клеток), а также от условий прокатки (износ валков и деталей клетки — обслуживание оборудования проводится перед каждой производственной кампанией; температура прокатки и валков — температурно-скоростные параметры контролируются в режиме реального времени и стабильны при производстве), ключевым фактором остается давлени-

е металла на валки и межклетевое натяжение металла.

Давление металла на валки можно определить по формуле

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

где p_{cp} — усредненное удельное давление в очаге деформации; F — площадь соприкосновения металла с валками [4].

Как видно из формулы (1), основными факторами, влияющим на давление металла, являются 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 межклетевого деформирования и соответствующего реологического поведения металла. Однако, если не брать в расчет реологическое поведение металла при прокатке в предшествующих клетях, то для расчета межклетевого натяжения возможно использование выражения, характеризующего натяжение между клетями $i - 1$ и i [6] по формуле (2)

$$\sigma = \frac{D_i \cdot n_i \cdot \frac{1 + S_{o_i}}{1 + S_{o_{i-1}}} \cdot \frac{1}{\mu_{o_i}} - 1}{K_{S_{i-1}} + K_{S_i} + K_{\mu_i}}, \quad (2)$$

где D_i, D_{i-1} — катающие диаметры валков; n_i, n_{i-1} — частота вращения валков; $S_{o_i}, S_{o_{i-1}}, \mu_{o_i}$ — значение параметров проката опережения и коэффициента вытяжки при свободной прокатке; $K_{S_{i-1}}, K_{S_i}, K_{\mu_i}$ — технологические коэффициенты влияния натяжения на соответствующие параметры прокатки.

Согласно формуле (2), основными факторами, влияющими на межклетевое натяжение, являются: диаметр валков, число оборотов валка, опережение, вытяжка. При этом коэффициенты $K_{S_{i-1}}, K_{S_i}, K_{\mu_i}$ 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.

Исследование концептуальной калибровки

Полагаясь на факторы, утверждающие, что основы получения геометрических размеров заключаются в давлении металла на валки (значение имеет вытяжка и форма калибра), а также в

межклетевом натяжении (обороты валков при прокатке), была разработана абсолютно новая калибровка по схеме овал–круг–круг (рис. 6). Новой калибровке присвоим имя Concept.



Рис. 6. Упрощенная схема калибровки РКБ по схеме овал-круг-круг

Fig. 6. Simplified scheme of RSB sizing according to scheme oval-circle-circle

За основу двух первых калибров была взята калибровка круга диам. 23 мм по схеме овал-круг и добавлена третья калибрующая клеть с чистовым калибром для получения круга диам. 22 мм.

На основе концептуальной калибровки проведены численные эксперименты методом конечных элементов для определения условий натяжения при прокатке с целью получения "идеальной" геометрии проката. Входные данные для проектирования представлены в табл. 4.

ТАБЛИЦА 4. ВХОДНЫЕ ДАННЫЕ ДЛЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

TABLE 4. INPUT DATA FOR DESIGNING

Входной параметр	Concept 1	Concept 2	Concept 3	Concept 4	Concept 5
Температура начала прокатки, °С	900				
Температура поверхности инструмента, °С	50				
Температура окружающей среды, °С	20				
Сталь	100Cr6				
Диаметр подката, мм	27,6				
Обороты валков, об/мин:					
клеть № 22	611,9				
клеть № 23	756,8				
клеть № 24	725	740	755	769	783
Вытяжка за проход:					
клеть № 22	1,140				
клеть № 23	1,222				
клеть № 24	1,092				
Суммарная вытяжка за проход РКБ	1,536				

Данные, полученные в результате проведенного математического моделирования, представлены в табл. 5.

ТАБЛИЦА 5. ВЫХОДНЫЕ ДАННЫЕ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

TABLE 5. EXIT DATA OF THE DESIGNING

Выходной параметр	Concept 1	Concept 2	Concept 3	Concept 4	Concept 5
Максимальная нагрузка на клетки, кН:					
клеть № 22	28,8	29,2	29,2	28,9	29,2
клеть № 23	24,3	24,5	24,4	23,4	23,3
клеть № 24	14,8	14,2	9,3	15,5	16,4
Крутящий момент прокатки, Нм:					
клеть № 22	636	700	720	606	605
клеть № 23	980	1113	984	939	930
клеть № 24	212	275	89	322	391
Максимальное напряжение, возникающее в очаге деформации, МПа:					
клеть № 22	35	35	35	35	35
клеть № 23	30	25	27	30	32
клеть № 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
овальность	1,0*	0,6*	0,7	0,3	0,2*

* На профиле наблюдается незначительный двухсторонний ус на хвосте раската.

Оценивая результаты проведенного эксперимента, можно резюмировать следующее.

При увеличении частоты вращения прокатных валков клетки № 24 (Concept 4–5) наблюдается увеличение нагрузки на клетку № 24 и снижение нагрузки на клетку № 23, при этом происходит увеличение крутящего момента на клетку № 24 и снижение крутящего момента на клетках № 22 и 23. Очевидно, причиной изменения энергосиловых параметров прокатки послужило натяжение раската между клетками № 23 и 24, где происходила межклетевая деформация раската. Схожая ситуация наблюдается при уменьшении числа оборотов (Concept 1–2), увеличивается крутящий момент на клетку № 23, что обусловлено торможением свободного проката и увеличивающимся подпором раската клетки № 24.

Отобразив на рис. 7 зависимость геометрических размеров профиля от частоты вращения валков, можно сделать предварительный вывод — высокоточные геометрические размеры проката возможно получить в узком диапазоне работы валков (от 762 до 775 об/мин). Таким образом, без применения сложных конструктивных и технологических решений оптимальным натяжением для получения высокоточной геометрии является натяжение между клетками № 23 и 24. При этом натяжение составит от 1 до 3 %.

Анализ эмпирических и теоретических данных действующих и перспективной схем калибровок на стане 370/150, показал, что:

– 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 высокоточного;

– калибровка по схеме овал–круг–круг, в теории, является основным решением задачи по получению сортового проката диам. 22 мм повышенной точности.

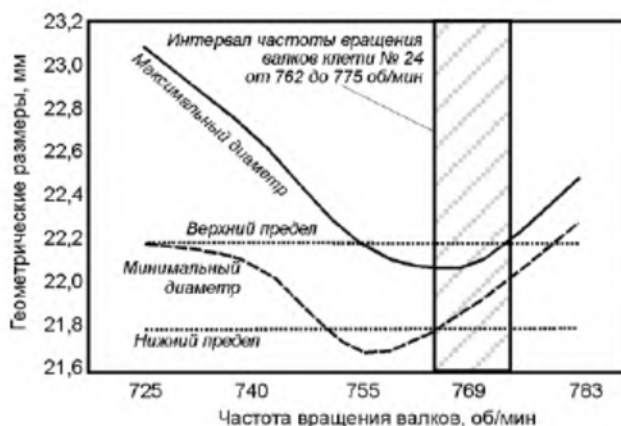


Рис. 7. Зависимость геометрических размеров от частоты вращения клетки № 24

Fig. 7. Dependence of geometrical sizes on No. 24 stand rotation frequency

Выводы

Для получения обычной точности сортового проката целесообразно использовать калибровку по схеме овал–круг, так как она обеспечивает стабильные геометрические размеры нормальной точности, позволяет снизить затраты на производство ввиду отсутствия калибровочной клетки № 24. При использовании калибровки по схеме овал–овал–круг не достигается геометрия как обычной точности, так и высокоточная, дальнейшее использование данного типа калибровки нецелесообразно.

Результаты математического моделирования прокатки по схеме калибровки овал–круг–круг показали достаточно хороший результат по получению высокоточной геометрии. Одним из

плюсов данной калибровки является отсутствие необходимости в использовании роликовой коробки на клетке № 24, так как выходом из клетки № 23 является профиль круглого сечения, в свою очередь, существенным недостатком можно считать сложность настройки и поддержания стабильности процесса по причине постоянного контроля частоты вращения валков в узком диапазоне.

Полученные результаты исследования являются основой для проведения дальнейшего изучения межклетевой деформации с последующим экспериментальным прокатом на стане 370/150 по схеме калибровки овал–круг–круг.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. ГОСТ Р 50779.46-2012/ISO/TR22514-4:2017. Статистические методы. Управление процессами. — М.: Стандартинформ, 2014. — 51 с.
2. DIN EN 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.: Metallurgiya, 1968. — 236 с.
4. Шевакин Ю.Ф., Чернышев В.Н., Шаталов Р.Л., Мочалов Н.А. Обработка металлов давлением. — М.: Интернет Инжиниринг, 2005. — 496 с.
5. Онищенко И.И., Куценко П.И., Куценко А.И. Теория непрерывной прокатки. — Запорожье: ЗГИА, 1998. — 470 с.
6. Куваев В.Н., Токмаков П.В., Ключников К.Ю. и др. Аналитические исследования нагрузок рабочих клетей стана 320 РУП «БМЗ» при прокатке арматурных профилей из заготовки увеличенного сечения с использованием системы минимального натяжения // *Литье и металлургия*. 2010. № 3 (57). С. 204–209.

Поступила 16 июля 2020 г.

REFERENCES

1. *GOST P 50779.46-2012/ISO/TR22514-4:2017. Statisticheskie metody. Upravlenie protsessami* [State Standard P 50779.46-2012/ISO/TR22514-4:2017. Statistical methods of processes control]. Moscow: Standartinform, 2014, 51 p. (In Russ.).
2. *DIN EN 10060:2005. Sterzhni armaturnye stal'nye kruglye goryachei prokatki. Razmery, dopustimye formy i predel'nye otkloneniya* [DIN EN 10060:2005 Hot rolled steel round reinforcing bars. Sizes, acceptable forms and limit deviations]. DIN Nemetskii institut standartizatsii, 2004, 10 p. (In Russ.).
3. Chekmarev A.P., Pobegailo G.G. *Tochnaya prokatka sortovykh profilei* [Precise rolling of section bars]. Moscow: Metallurgiya, 1968, 236 p. (In Russ.).
4. Shevakin Yu.F., Chernyshev V.N., Shatalov R.L., Mochalov N.A. *Obrabotka metallov davleniem* [Metals forming]. Moscow: Internet Inzhiniring, 2005, 496 p. (In Russ.).
5. Onishchenko I.I., Kutsenko P.I., Kutsenko A.I. *Teoriya nepreryvnoi prokatki* [Theory of continuous rolling]. Zaporozh'e: ZGIA, 1998, 470 p. (In Russ.).
6. Kuvaev V.N., Tokmakov P.V., Klyuchnikov K.Yu., Kisilev P.A., Kirilenko O.M., Rusalenko A.V., Gordienko V.V. Analytical study of loads of RUP "BMZ" mill 320 working stand at rolling reinforcing sections from a work piece of increased cross-section by application system of minimum tension. *Lit'e i metallurgiya*, 2010, no. 3 (57), pp. 204–209. (In Russ.).

Received July 16, 2020