

5.76.05

332

Министерство высшего и среднего специального  
образования СССР

Челябинский политехнический институт  
имени Ленинского комсомола

На правах рукописи

ДЕНИСОВ Юрий Петрович

ИССЛЕДОВАНИЕ И ОСВОЕНИЕ ТОЧНОЙ ПРОКАТКИ  
КРУГЛОЙ СТАЛИ НА МНОГОНИТОЧНОМ СТАНЕ

Специальность 05.16.05 –  
"Обработка металлов давлением"

Автореферат диссертации на  
искание ученой степени  
кандидата технических наук

Челябинск, 1978

ЧПИ

«Читальный зал  
профессорский»

Работа выполнена на кафедре прокатки Челябинского политехнического института имени Ленинского комсомола и Челябинском металлургическом заводе.

Научный руководитель - заслуженный деятель науки и техники РСФСР, доктор технических наук профессор В.Н.Выдрин.

Официальные оппоненты:  
доктор технических наук профессор В.К.Смирнов;  
кандидат технических наук В.П.Полушкин.

Ведущее предприятие - Златоустовский металлургический завод.

Зашита диссертации состоится " " 1978 г., в 14 часов, на заседании Специализированного совета № К-597/3 по присуждению ученой степени кандидата технических наук в Челябинском политехническом институте имени Ленинского комсомола ( 454044, г.Челябинск, пр. им. В.И.Ленина, 76).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке института.

Автореферат разослан " " 1978 г.

Ученый секретарь  
Специализированного совета,  
кандидат технических наук  
доцент

О.К.Токовой

## Общая характеристика работы

Актуальность проблемы. В основных направлениях развития народного хозяйства СССР на 1976-80 гг. перед металлургами поставлена задача: "Значительно улучшить качество, расширить сортамент металлоизделий и сэкономить за счет этого в 1980 году в народном хозяйстве 5-6 млн. тонн металла ..." Пятилетним планом предусматривается широкий комплекс мероприятий, направленных на улучшение качества металла и его экономии. Одним из важнейших направлений улучшения качества металла является повышение точности проката. Повышение точности готового проката равносильно увеличению его выпуска. Наряду с экономией металла улучшаются эксплуатационные характеристики изделий у потребителей.

Повышение точности готового проката на действующих и вновь строящихся станах достигается совершенствованием технологии и конструкции прокатных станов. Значительных успехов прокатостроение достигло в области проектирования сортовых станов. Широко применяются на практике жесткие рабочие клети, в том числе с предварительным напряжением чистовых прокатных клетей блочной конструкции, а для обеспечения особой точности проката применяются чистовые калибрующие блоки. В Советском Союзе на металлургических заводах "Красный Октябрь", Златоустовском, Челябинском, им. А.К.Серова, Криворожском, Череповецком и др. установлены жесткие клети, обеспечивающие получение проката повышенной степени точности.

Проблема повышения точности прокатки требует тесной связи науки с производством. Благодаря трудам советских ученых А.И.Целикова, А.П.Чекмарева, И.М.Мееровича, В.Н.Выдрина, М.И.Бояршинова, В.К.Смирнова, И.Ф.Приходько, М.Я.Бровмана, Г.Г.Побегайло и др. достигнуты значительные успехи в повышении качественных показателей проката. Большие экспериментальные и теоретические исследования по точности прокатки проводят научные работники ВНИИМЕТМАШа, УкрНИИМЕТА, ДонНИИЧермета, ЧПИ и др. научно-исследовательских организаций. Однако имеющиеся теоретические зависимости позволяют рассчитывать поперечные размеры круглой стали только в двух взаимно перпендикулярных направлениях - по высоте и ширине профиля - и не учитывают специфические особенности формирования профиля. Нет зависимостей для расчета контура поперечного сечения круглой стали, овальности профиля, нет методики расчета точности круглой стали при многониточной прокатке. Таким образом, вопросы расчета точности прокатки круглой стали на

многониточных станах освещены недостаточно и требуют дальнейшего изучения. Решение проблемы повышения точности прокатки на многониточных станах при обеспечении устойчивой работы без снижения производительности стана имеет важное народно-хозяйственное значение.

Цель работы. Получить зависимости, определяющие размеры круглой стали при многониточной прокатке по всему периметру поперечного сечения и отклонение этих размеров в зависимости от параметров процесса прокатки и прокатной клети. Экспериментально исследовать упругую деформацию жестких клетей новой конструкции. Экспериментально исследовать точность прокатки круглой стали и технологические параметры на многониточном стане. Изучить работу жестких клетей новой конструкции и, основываясь на результатах исследований, внедрить клети в производство с целью получения круглой стали повышенной степени точности и арматурной стали с уменьшенным весом погонного метра.

Научная новизна. Получены и рекомендуются к применению аналитические зависимости для описания контура поперечного сечения круглой стали, расчета ее поперечных размеров, отклонений поперечных размеров и овальности профиля с учетом радиальной деформации клети, осевого смешения валков, особенностей многониточности прокатки, формы калибров и положения полосы в круглом калибре. Разработана методика расчета точности круглой стали при многониточной прокатке с применением ЭЦВМ. Разработана новая форма овала предчистовой клети ("фасонный овал"), выведены аналитические зависимости для расчета размеров фасонного овала и составлена программа для их расчета на ЭЦВМ "МИР".

Практическая ценность. Разработанная методика расчета точности прокатки круглой стали с использованием ЭЦВМ, позволяет оценить точность прокатки круглой стали на любом сортовом стане. Особенно эффективно она может быть использована при проектировании новых сортовых станов.

Методика расчета точности прокатки круглой стали и экспериментальные исследования использованы для оптимизации конструкции жестких клетей и параметров калибровки двухниточного мелкосортного стана. Это позволило освоить прокатку мелкосортной стали повышенной степени точности.

Реализация работы в промышленности. Новые клети с предложенными конструктивными изменениями отдельных узлов установлены в чистовой линии стана 240 Челябинского металлургического завода. На них

осуществляется прокатка в две нитки круглых профилей повышенной степени точности и арматурной стали с уменьшенным весом погонного метра. При этом сталь 35ГС периодического профиля диаметром 10, 12 и 14 мм поставляется потребителю с государственным Знаком качества. Внедрение новой формы предчистового калибра "фасонный овал", обеспечивающего правильную форму круга, позволило вести прокатку на чистовой линии стана 240 с использованием двухниточного обводного аппарата и отказаться от применения ручного труда при задаче овальной полсы в чистовой калибр.

Апробация работы. Материалы диссертации были доложены и обсуждены:

1. На научных семинарах кафедры прокатки Челябинского политехнического института в 1970-78 гг.
2. На научно-технической конференции "Пути повышения надежности и эффективности основного оборудования прокатных цехов". Свердловск, 1972.
3. На научно-технических конференциях Челябинского политехнического института в 1972-78 гг.
4. На III национальной конференции по черной металлургии с международным участием. София, Болгария, 1973.
5. На научно-техническом семинаре "Повышение точности прокатки на сортовых и листовых станах". Челябинск, 1974.
6. На областной научно-технической конференции "Экономия черных металлов и пути повышения эффективности их использования в народном хозяйстве". Челябинск, 1975.
7. На научно-техническом семинаре "Повышение точности прокатки и экономия металла в прокатном производстве". Челябинск, 1977.

Публикации. Основное содержание диссертации опубликовано в девяти печатных работах.

Объем работы. Диссертация включает 92 страниц машинописного текста с 73 рисунками и 4 таблицами, библиографию (III наименований), приложения на 15 листах.

Обзор методов производства точного проката,  
теоретических и экспериментальных исследований  
точности прокатки

Точность проката характеризуется величиной отклонения действительных его размеров от номинальных. В процессе прокатки на точность

размеров поперечного сечения круглой стали влияет много одновременно действующих факторов, которые объединяются в две группы: технологического и конструктивного характера. В соответствии с факторами, влияющими на отклонения размеров профиля в отечественной и зарубежной практике наметились следующие пути повышения точности прокатки:

установка прокатных клетей высокой постоянной жесткости или клетей, жесткость которых регулируется в зависимости от параметров прокатки;

установка дополнительных прокатных клетей (блоков) за чистовой клетью стана с целью калибровки профиля;

применение систем автоматического регулирования (САР) размеров профиля;

применение новых технологических схем прокатки, в частности прокатка в многовалковых калибрах;

совершенствование существующего оборудования и технологии прокатки.

За последние годы создано большое количество клетей различных конструкций. Наибольшее распространение получили предварительно напряженные клети конструкции Леффена.

Во ВНИИМЕТМАШе разработана универсальная предварительно напряженная клеть 350 для точной прокатки рессоры с параболическими кромками, круглой, квадратной и шестиугранной сталей. Клеть установлена на Донецком металлургическом заводе. Продолжая работы по устранению недостатков первых образцов отечественных предварительно напряженных клетей, ВНИИМЕТМАШ разработал клеть с самоустанавливающимися подшипниками жидкостного трения применительно к стану 280 Златоустовского металлургического завода. На мелкосортном стане 250-1 Магнитогорского металлургического комбината установлены объемно-напряженные клети, разработанные ВНИИМЕТМАШем. На Череповецком металлургическом заводе для повышения точности катанки на проволочном стане 250-2 применяются малогабаритные предварительно-напряженные клети и внедрено автоматическое петлерегулирование в межклетевом промежутке.

Наряду с предварительно-напряженными клетями разрабатываются и внедряются в производство новые конструкции клетей без предварительного нагружения.

Для производства сортовой стали особо высокой степени точности применяются новые конструкции калибрующих клетей и блоков. Фирма Кокс (ФРГ) разработала калибрующие блоки, состоящие из трех трехвалковых клетей, обеспечивающих прокатку круглых профилей диаметром 8-150 мм с овальностью до 0,15 мм.

ДонНИИЧЕРМЕТ совместно с металлургическим заводом им. Серова разработал и внедрил в промышленную эксплуатацию калибрующий блок из двух трехвалковых клетей для прокатки на мелкосортном линейном стане 320 круглой и шестигранной стали высокой точности. Овальность круглых профилей составляет 0,05-0,2 мм при среднестатистическом значении 0,1-0,12 мм. Это соответствует требованиям на холоднотянутую сталь.

На непрерывном стане 300-2 Челябинского металлургического завода установлена калибрующая четырехвалковая клеть 300/400 конструкции ЧПИ, позволяющая получать рессорную полосу и круглые профили высокой степени точности с овальностью круглых профилей 0,2-0,3 мм.

На непрерывном стане 250 Челябинского металлургического завода применяется универсальный четырехвалковый блок для горячей калибровки круглой стали, изготовленный по проекту Челябинского политехнического института и позволяющий получать круглые профили высокой точности с овальностью 0,15 мм.

Достигнутые успехи в повышении точности прокатки являются следствием новых научных разработок, теоретических и экспериментальных исследований. Много исследований с целью повышения точности прокатки проводится на действующих станах.

Работниками УкрНИИМЕТА были проведены обширные исследования для определения точности прокатки на существующих станах. В результате было установлено, что на ряде существующих прокатных станов выпускается прокат обычной степени точности с максимальным использованием поля допуска.

Исследования станов различных типов сотрудниками ИЧМ (г. Днепропетровск) под руководством академика А.П.Чекмарева показали, что наибольшие колебания размеров профиля наблюдаются по разъему калибра, точность проката зависит от схемы калибровки валков, а применение жестких клетей дает возможность значительно повысить точность проката.

Теоретические исследования точности прокатки относятся, в основном, к прокатке листа или описывают изменение размеров профиля по высоте калибра. Многие факторы, оказывающие влияние на отклонение размеров и формы сортового проката, в этих работах не учитываются. Нет зависимостей для определения поперечных размеров круглой стали по всему периметру профиля, овальности профиля, нет методики расчета точности при многониточной прокатке. Ограниченнное количество работ по точности многониточной прокатки не позволяет дать ответа на

многие вопросы, связанные со специфическими условиями многониточной прокатки. Значительная эффективность многониточной прокатки круглой стали и в то же время недостаточная изученность вопросов ее точности определяют актуальность работы в этом направлении.

### Теоретическое исследование точности многониточной прокатки круглой стали

Для аналитического описания контура поперечного сечения круглой стали рассмотрим случай прокатки овальной полосы в чистовом круглом калибре в наиболее общем виде с учетом радиального и осевого смещения ручьев валков, а также "сваливания" полосы в калибре.

Контур поперечного сечения полосы и калибра имеет следующие участки: радиусные участки  $BC$  и  $B_1C_1$ , образованные радиусом  $\gamma_i$ , участки выпусксов  $AB$ ,  $CD$ ,  $A_1B_1$ ,  $C_1D_1$ , и участки разъемов калибра, образованные дугами  $AD$  и  $D_1A_1$ , радиус которых  $\gamma_{i+1}$  определяется формой боковой поверхности предчистового овала. Вывод аналитических зависимостей, описывающих контур поперечного сечения круглой стали и определяющих поперечные размеры  $d_1$ ,  $d_2$  и  $d_3$ , выполним в полярных координатах.

Уравнение радиусного участка  $BC$  есть уравнение окружности с центром  $O_1$  и радиусом  $\gamma_i$ :

$$\rho = \rho_0 \cos(\varphi - \varphi_0) + \sqrt{\gamma_i^2 - \rho_0^2 \sin^2(\varphi - \varphi_0)}, \quad (1)$$

Тогда размер  $d_1$  равен

$$d_1 = 2 \sqrt{\left(\frac{\Delta_{oc}}{2}\right)^2 + \left(\frac{h\delta_i + \Delta_h - \gamma_i}{2}\right)^2} \cdot \cos(\varphi - \varphi_0) + \\ + 2 \sqrt{\left[\left(\frac{\Delta_{oc}}{2}\right)^2 + \left(\frac{h\delta_i + \Delta_h - \gamma_i}{2}\right)^2\right] \cos^2(\varphi - \varphi_0) - \left(\frac{\Delta_{oc}}{2}\right)^2 - \left(\frac{h\delta_i + \Delta_h - \gamma_i}{2}\right)^2 + \gamma_i^2}, \quad (2)$$

где  $\Delta_{oc}$  – осевое смещение валков;

$h\delta_i$  – зазор между валками по дну чистового калибра при отсутствии в нем прокатываемой полосы (настроечный зазор);

$\Delta_h$  – радиальная деформация клети при прокатке;

$\varphi_0$  – угол между полярной осью и  $OO_1$ ;

$\varphi$  – угол измерения, отсчитываемый от полярной оси.

Уравнение контура участка выпуска  $AB$  есть уравнение касательной  $AB$  к окружности (2)

$$y = \frac{l}{\cos(\varphi_i)} \left[ \frac{B_k + \Delta_{oc}}{2} + \left( \frac{t + h_{bi} + \Delta_h}{2} - z_i \right) \operatorname{tg} \varphi_i \right] \cos \varphi_i, \quad (4)$$

Поперечный размер участка выпусков  $d_1 = 2D_1$ , равен

$$d_1 = 2 \left[ \frac{B_k + \Delta_{oc}}{2} + \left( \frac{t + h_{bi} + \Delta_h}{2} - z_i \right) \operatorname{tg} \varphi_i \right] \cos \varphi_i, \quad (5)$$

а поперечный размер  $d_2'$  участка выпусксов  $CD$  равен

$$d_2' = 2 \left[ \frac{B_k - \Delta_{oc}}{2} + \left( \frac{t + h_{bi} + \Delta_h}{2} - z_i \right) \operatorname{tg} \varphi_i \right] \cos \varphi_i. \quad (6)$$

Уравнение контура участка  $AD_1$ , разъема калибра есть уравнение окружности с радиусом  $z_{i-1}$  и центром  $D_3$

$$\dot{y} = \sqrt{\left(z_{i-1} - \frac{B_{1i}}{2}\right)^2 \cos^2(\varphi_i + \psi) - \left(z_{i-1} - \frac{B_{1i}}{2}\right)^2 + z_{i-1}^2 - \left(z_{i-1} - \frac{B_{1i}}{2}\right)^2 \cos^2(\varphi_i + \psi)}. \quad (7)$$

Размер  $d_3$  участка разъема калибра  $d_3 = 2P$  или

$$d_3 = 2 \left[ \left(z_{i-1} - \frac{B_{1i}}{2}\right)^2 \cos^2(\varphi_i + \psi) - \left(z_{i-1} - \frac{B_{1i}}{2}\right)^2 + z_{i-1}^2 - 2 \left(z_{i-1} - \frac{B_{1i}}{2}\right)^2 \cos^2(\varphi_i + \psi) \right], \quad (8)$$

где  $B_{1i}$  – размер круга по разъему калибра после прокатки;

$\psi$  – угол "сваливания" полосы в чистовом калибре.

Отклонения поперечных размеров от их номинального значения определим, вычисляя приращение функции нескольких переменных путем дифференцирования уравнений (3), (5) и (8).

Отклонение размера  $d_1$  радиусного участка

$$\delta d_1 = \frac{\partial d_1}{\partial h_{bi}} \cdot \delta h_{bi} + \frac{\partial d_1}{\partial \Delta_h} \cdot \delta \Delta_h + \frac{\partial d_1}{\partial \Delta_{oc}} \cdot \delta \Delta_{oc} + \frac{\partial d_1}{\partial z_i} \cdot \delta z_i. \quad (9)$$

Это уравнение можно записать в другом виде

$$\delta d_1 = A_1 \cdot \delta h_{bi} + A_2 \cdot \delta \Delta_h + A_3 \cdot \delta \Delta_{oc} + A_4 \cdot \delta z_i. \quad (10)$$

Аналогично определяем отклонения размера  $d_2'$  участка выпусксов

$$\delta d_2' = \frac{\partial d_2'}{\partial h_{bi}} \cdot \delta h_{bi} + \frac{\partial d_2'}{\partial \Delta_h} \cdot \delta \Delta_h + \frac{\partial d_2'}{\partial \Delta_{oc}} \cdot \delta \Delta_{oc} + \frac{\partial d_2'}{\partial z_i} \cdot \delta z_i, \quad (11)$$

или

$$\delta d_1 = B_1 \cdot \delta h_{11} + B_2 \cdot \delta \Delta_A + B_3 \cdot \delta \Delta_{cc} + B_4 \cdot \delta \gamma_1, \quad (12)$$

Для участка по разъему калибра приращение размера  $\delta z_3$  равно

$$\delta d_3 = \frac{\partial \delta z_3}{\partial \gamma_{11}} \cdot \delta \gamma_{11} + \frac{\partial \delta z_3}{\partial \beta_{11}} \cdot \delta \beta_{11} + \frac{\partial \delta z_3}{\partial \psi} \cdot \delta \psi, \quad (13)$$

или

$$\delta d_3 = B_1 \cdot \delta \gamma_{11} + B_2 \cdot \delta \beta_{11} + B_3 \cdot \delta \psi. \quad (14)$$

Далее определим приращения  $\delta h_{11}$ ,  $\delta \Delta_A$ ,  $\delta \Delta_{cc}$ ,  $\delta \gamma_1$ ,  $\delta \beta_{11}$  и  $\delta \psi$  переменных, входящих в уравнения (10), (12) и (14) приращений попечных размеров.

Радиальную деформацию  $\Delta_A$  клети при многониточной прокатке определим путем совместного решения уравнения равновесия сил при многониточной прокатке и уравнения перемещений, вызванных этими силами

$$\delta \Delta_A = \frac{P + P_\Sigma}{C_{kl}} - P \cdot \frac{C_{ll\Sigma}}{C_{kl}(C_{ll\Sigma} + C_{ll\Gamma})}, \quad (15)$$

где  $P_\Sigma$  - суммарное давление на валок прокатываемых ниток до задачи в клеть дополнительной полосы;

$P$  - дополнительное давление, равное давлению прокатки дополнительной полосы или увеличению давления прокатки в одной из полос;

$C_{kl}$  - коэффициент радиальной жесткости клети;

$C_{ll\Sigma}$  - суммарный коэффициент жесткости одновременно прокатываемых полос.

Приращение радиальной деформации найдем из уравнения (15) при дифференцировании его и замене производных условными обозначениями

$$\delta \Delta_A = A_5 \cdot \delta P - A_6 \cdot \delta C_{ll\Sigma} + A_7 \cdot \delta K, \quad (16)$$

где  $K = \frac{P_\Sigma}{P} = 0$  при однониточной прокатке и  $K > 0$  при многониточной прокатке.

Осьевое смещение валков равно

$$\Delta_{cc} = \Delta_{cc}' \mp \Delta_{cc}^{\prime \prime}, \quad (17)$$

где  $\Delta_{os}$  - упругое смещение валков под действием осевых сил;  
 $\pm \Delta_{os}''$  - погрешность начальной осевой установки валков (принимается со знаком "+" при совпадении по направлению с упругим смещением валков и со знаком "-" - в противном случае).

Упругое смещение валков  $\Delta_{os}'$  под действием осевых сил определим аналогично  $\Delta_A$

$$\Delta_{os}' = P_{os} \left[ \frac{1 + K_1}{C_{os}} - \frac{C_{Mz}^{os}}{C_{os}(C_{Mz}^{os} + C_{os})} \right]. \quad (18)$$

Приращение осевой упругой деформации  $\delta\Delta_{os}'$  найдем из уравнения (18) его дифференцированием и после соответствующих преобразований получим

$$\delta\Delta_{os}' = A_{os} \cdot K_{os} \cdot \delta P - A_{os} \cdot K_{os} \cdot \delta C_{Mz} + A_{os} \cdot \delta K_1. \quad (19)$$

В формулах (18) и (19) обозначено:

- $P_{os}$  - дополнительное осевое усилие, действующее на валки в результате задачи дополнительной полосы или увеличения давления в одной из прокатываемых ниток;
- $C_{os}$  - коэффициент осевой жесткости клети;
- $C_{Mz}$  - суммарный коэффициент осевой жесткости одновременно прокатываемых полос;

$$K_1 = \frac{P_z}{P_{os}}.$$

Давление прокатки в формулах (15) и (18) можно определить по известным формулам, а приращение  $\delta P$  давления прокатки найдем, рассматривая давление как функцию нескольких переменных

$$\delta P = C_m (\delta h_{oi} - \delta h_{ci} - \delta \Delta A) + M, \quad (20)$$

где  $\delta h_{oi}$  - отклонение исходной толщины полосы.

Приращение размера круга по разъему калибра равно

$$\delta b_{ci} = \delta b_{(i-1)} + \delta \Delta b_i, \quad (21)$$

где  $\delta b_{(i-1)}$  - отклонение толщины овала, прокатываемого в чистовом калибре;

$\delta \Delta b_i$  - отклонение уширения в чистовом калибре.

Для определения  $\delta h_{i(i-s)}$  и  $\delta d_i$  можно использовать известные формулы.

Приращение угла "сваливания"  $\delta \psi$  равно

$$\delta \psi = \frac{h_{oi}}{h_{oi}^2 + \Delta_p^2} \cdot \delta \Delta_p - \frac{\Delta_p}{h_{oi}^2 + \Delta_p^2} \cdot \delta h_{oi}, \quad (22)$$

где  $\Delta_p$  - зазор между роликами валковой арматуры и овальной полосой.

Приращение зазора  $\delta \Delta_p$  зависит от износа роликов и должно приниматься по опытным данным.

Приращения  $\delta h_{oi}$ ,  $\delta z_i$  и  $\delta z_{i-1}$  зависят от износа поверхностей ручьев чистового и предчистового калибров. Ввиду отсутствия аналитических выражений для расчета этого износа указанные величины следует принимать по опытным данным.

После подстановки найденных приращений и замены вычислительных значений производных в уравнения (10), (12) и (14) приращений поперечных размеров получим в окончательном виде формулы расчета отклонений размеров  $d_1$ ,  $d_2$  и  $d_3$  поперечного сечения круглой стали при многощечечной прокатке в таком виде

$$\begin{aligned} \delta d_1 &= \delta h_{oi} (A_1 - A_3 \cdot A_8 \cdot \text{Кос} \cdot C_m) + \frac{A_5 \cdot C_m (\delta h_{oi} - \delta h_{oi}) + A_5 \cdot M + A_5 \cdot \delta C_{Mz} + A_7 \cdot \delta K}{1 + A_5 \cdot C_m} \times \\ &\quad \times (A_2 - A_3 \cdot A_8 \cdot \text{Кос} \cdot C_m) + A_3 \cdot A_8 \cdot \text{Кос} \cdot C_m \cdot \delta h_{oi} + A_3 \cdot A_7 \cdot \text{Кос} \cdot M - \\ &\quad - A_3 \cdot A_9 \cdot \text{Кос} \cdot \delta C_{Mz} + A_9 \cdot A_{10} \cdot \delta K_1 + A_4 \cdot \delta z_i, \end{aligned} \quad (23)$$

$$\begin{aligned} \delta d_2 &= \delta h_{oi} (B_1 - B_3 \cdot A_8 \cdot \text{Кос} \cdot C_m) + \frac{A_5 \cdot C_m (\delta h_{oi} - \delta h_{oi}) + A_5 \cdot M + A_5 \cdot \delta C_{Mz} + A_7 \cdot \delta K}{1 + A_5 \cdot C_m} \times \\ &\quad \times (B_2 - B_3 \cdot A_8 \cdot \text{Кос} \cdot C_m) + B_3 \cdot A_8 \cdot \text{Кос} \cdot C_m (\delta h_{oi} + \frac{M}{\delta m}) - B_3 \cdot A_9 \cdot \text{Кос} \cdot \delta C_{Mz} + \\ &\quad + B_3 \cdot A_{10} \cdot \delta K_1 + B_4 \cdot \delta z_i, \end{aligned} \quad (24)$$

$$\begin{aligned} \delta d_3 &= B_1 \cdot \delta z_{i-1} + \delta h_{oi} (B_2 \cdot B_5 - B_3 \cdot B_5 + B_2 \cdot B_4) + B_3 (\delta h_{i-1} - \delta h_{i-1} + \delta C_{Mz} + \delta K) + \\ &\quad + B_3 \cdot B_8 \cdot \delta \Delta_p - B_2 \cdot B_4 \left[ \delta h_{oi} - \frac{A_5 \cdot C_m (\delta h_{oi} - \delta h_{oi}) + A_5 \cdot M - A_5 \cdot \delta C_{Mz} + A_7 \cdot \delta K}{1 + A_5 \cdot C_m} \right]. \end{aligned} \quad (25)$$

Овальность круглой стали принято характеризовать разностью максимального и минимального размеров поперечного сечения полосы. В общем случае овальность  $P_o$  можно определить по формуле

$$\Pi_0 = d_3 \varphi_A - d_1 \varphi_C , \quad (26)$$

$$\begin{aligned} \Pi_0 = & 2 \sqrt{\left(\gamma_{i-1} - \frac{d + \delta b_{1i}}{2}\right)^2 \cos^2(\varphi_A + \psi) - \left(\gamma_{i-1} - \frac{d + \delta b_{1i}}{2}\right)^2 + \gamma_{i-1}^2} - \\ & - 2 \left(\gamma_{i-1} - \frac{d + \delta b_{1i}}{2}\right) \cos(\varphi_A + \psi) - 2 \sqrt{\left(\frac{\Delta \alpha r^2}{2}\right) + \left(\frac{d + \delta b_{1i}}{2} - \gamma_i\right)^2} \times \\ & \times \cos(\varphi_C - \varphi_A) - 2 \sqrt{\left[\left(\frac{\Delta \alpha r^2}{2}\right) + \left(\frac{d + \delta b_{1i}}{2} - \gamma_i\right)^2\right] \cos^2(\varphi_C - \varphi_A) - } \\ & - \left(\frac{\Delta \alpha r^2}{2}\right) - \left(\frac{d + \delta b_{1i}}{2} - \gamma_i\right)^2 + \gamma_i^2 , \end{aligned} \quad (27)$$

где  $d$  — номинальный диаметр круглой стали

$$d + \delta b_{1i} = b_{1i} , \quad d + \delta b_{1i} = \beta_{1i} . \quad (28)$$

Необходимо, чтобы овальность не превышала заданной величины. Как правило, овальность круглой стали задается определенной долей  $m_0$  от допуска на ее диаметр, т.е.

$$\Pi_0 = m_0 \cdot \Pi , \quad (29)$$

где  $\Pi$  — допуск на диаметр круглой стали.

По ГОСТ 2590-71  $m_0 = 0,5$ , а отклонения размеров круглой стали не должны превышать допуска  $\Pi$ , т.е.

$$\delta d_1 \leq \Pi , \quad \delta d_2 \leq \Pi , \quad \delta d_3 \leq \Pi . \quad (30)$$

Таким образом, для получения круглой стали, удовлетворяющей требованиям к размерам поперечного сечения, необходимо одновременно выполнить условия (29) и (30).

Учитывая, что зависимости для определения  $\delta d_1$  (23),  $\delta d_2$  (24),  $\delta d_3$  (25) и  $\Pi_0$  (27) весьма громоздки и расчет вручную весьма трудоемок, составим программу (ЭЦВМ "МИР-2") для расчета точности круглой стали при многониточной прокатке.

### Экспериментальное исследование точности прокатки круглой стали

Экспериментальное исследование точности прокатки круглой стали выполнено на промышленном двухниточном линейном стане 240 Челябинс-

кого металлургического завода. По результатам измерений давления прокатки и температуры металла построены графики, определено влияние марочного сортамента и температуры прокатываемого металла на давление прокатки. В результате низкой скорости прокатки (на предчистовой линии 5-6 м/с, на чистовой 7-7,5 м/с) и наличия больших петель раскатка прокатка передней и задней частей полосы на чистовой клети осуществляется при значительных колебаниях температурн. Разность температуры концов полосы при прокатке круга диаметром 12 мм в среднем составляет  $50\text{--}60^{\circ}\text{C}$ , но иногда достигает  $90^{\circ}\text{C}$ . Неравномерное распределение температуры металла по длине полосы отражается на давлении металла на валки. Во всех клетях наблюдается увеличение давления прокатки от переднего к заднему концу полосы. В первых проходах относительная разность между максимальным и минимальным давлениями меньше по сравнению с последними проходами на чистовой линии. Относительный перепад давлений составляет 15-20% для первой клети линии 350, 5-15% для второй клети линии 350 и 20-30% для первой и второй клетей чистовой линии 300. Иногда перепад давления достигает 50%.

Наибольшее давление металла на валки наблюдается в овальных калибрах предчистовой линии и характерно для сталей X18H10T, 20Х13 и 60С2.

Исследование уширения проводилось при прокатке круглой стали диаметром 10 и 12 мм в одну нитку путем отбора и замера проб от предчистовых (овальных) и чистовых (круглых) полос. Установлено, что колебания размеров по ширине полосы значительно превышают колебания размеров по высоте как на овальных так и на круглых образцах. Отклонения по ширине овала достигают  $0,6\pm0,9$  мм отклонения по ширине круга достигают  $0,7\pm0,8$  мм.

Была изучена зависимость уширения от температуры прокатки. Установлено, что наибольшая разность размеров по ширине как овала, так и круга между передним и задним концами характерна для стали X18H10T и составляет  $0,5\pm0,8$  для овальной полосы,  $0,3\pm0,5$  мм для круглой полосы.

Исследование точности круглой стали диаметром 10 и 12 мм осуществлялось при прокатке в одну нитку, так как в две нитки ввиду малой жесткости клетей эти профили на обычных клетях не прокатывались. Пробы отбирались на ножницах холодной разки. Установлено, что при прокатке на клетях дуо 300x600 колебание размеров профиля по высоте составляет  $0,45\text{--}0,6$  мм, по ширине -  $0,7\text{--}0,8$  мм. При этом ко-

лебания размеров круга диаметром 10 мм в 1,1-1,3 раза превышают колебания размеров круга диаметром 12 мм. Размеры готового профиля с трудом укладываются в поле допуска (0,8 мм) обычной степени точности ГОСТа 2590-71. При этом среднестатистическая разность между размерами по высоте и ширине круга составляет 0,2 мм, а максимальная - 0,5 мм.

### Экспериментальное исследование упругой деформации прокатных клетей

Для определения упругой деформации прокатных клетей спроектировано и изготовлено специальное клиновое устройство для радиального нагружения валков и устройство для осевого нагружения валков.

Характеристика упругой деформации клети снималась клиновым устройством без использования месдоз давления под нажимными винтами.

Клети дуо 300x600 и 350x550 имеют различные коэффициенты жесткости, определенные до и после работы в линии стана. Жесткость клети после работы в линии стана возрастает.

Так как в практике работы на стане 240 применялся способ предварительного нагружения валков клети 300x600 нажимным устройством, то было проведено исследование упругой деформации клети с предварительно напряженными валками. При давлении прокатки ниже величины предварительного нагружения клеть работает как предварительно напряженная и имеет коэффициент жесткости в 3-4 раза выше по сравнению с обычной клетью.

При давлении металла на валки более 30 т коэффициент жесткости новой клети становится постоянным. При давлении 10 т и выше коэффициент жесткости новой клети в три раза выше по сравнению с коэффициентом жесткости обычной клети. (105 т/мм и 35 т/мм соответственно).

Клеть квартро 300 имеет меньшую жесткость по сравнению с новой клетью дуо (80 т/мм). При этом коэффициент осевой жесткости обычной клети дуо в 2-2,5 раза меньше по сравнению с коэффициентом осевой жесткости новой клети дуо и составляет 10 т/мм.

Новая клеть дуо характеризуется большим осевым люфтом. Обычная клеть дуо, валки которой установлены на текстолитовых подшипниках, не имеет осевых люфтов и осевое перемещение валков во всем диапазоне осевого давления имеет линейный характер. Осевой люфт новых подшипников качения жестких клетей дуо составляет 0,13-0,22 мм. После работы в линии стана в течение 300-350 часов люфт увеличивается до 0,25-0,35 мм.

### Исследование и освоение точной прокатки круглой стали

Прокаткой свинцовых образцов определена величина раскрытия свального и круглого калибров, а также величина радиального бieniaия валков

предчистовой и чистовой клетей дуо жесткой конструкции. Биение высоты калибра чистовой клети достигает 0,03 мм, предчистовой – 0,07 мм. Раскрытие калибра ( $\Delta A$ ) в чистовой клети составляет 0,1 мм, предчистовой – 0,13 мм.

На этих же клетях осуществлялась прокатка в две нитки круга диаметром 12 мм из сталей 20, 35, 60С2 и Х18Н9Т с отбором проб по длине полосы (от переднего конца, середине и заднего конца) и массовым отбором проб на ножницах холодной резки. Из анализа полученных данных следует вывод, что точность прокатки с применением новых жестких клетей заметно возросла по сравнению с точностью прокатки на прежних клетях дуо. Колебания размеров по высоте профиля составляют 0,24–0,4 мм. Однако отклонения размеров по ширине и овальность профиля остались достаточно большими (соответственно 0,4–0,6 мм, до 0,5–0,6 мм). Только в отдельных случаях при непродолжительной работе удавалось получить профиль повышенной точности.

Используя методику расчета точности круглой стали при многониточной прокатки и программу для ЭЦВМ "Мир-2", выполнили расчет точности круглой стали при прокатке на новых клетях в проектном варианте. Результаты расчета хорошо согласуются с экспериментальным исследованием. С помощью этой же программы определили влияние параметров калибровки и клетей на точность прокатки. Это позволило выявить конструктивные недостатки клетей.

Конструктивные недостатки новых клетей (значительные осевые люфты подшипников валковых опор, механизма осевой регулировки валков) затрудняли дальнейшее эффективное освоение новых клетей. В результате проведенных исследований были установлены новые упорные подшипники (№ 8140), заменены устройства осевой регулировки валков и заменены универсальные шпинделы с бронзовыми вкладышами на карданы. Это дало возможность исключить влияние люфтов в подшипниках валков и в механизме осевой регулировки валков на отклонения размеров полосы по ширине профиля и осуществлять устойчивую прокатку круглой стали в две нитки.

После реконструкции клети было проведено теоретическое и экспериментальное исследование влияния размеров и формы предчистового и чистового калибров на точность профиля при прокатке в две нитки. Не изменяя формы предчистового дуги, уменьшили ширину ручья чистового калибра на 0,1 мм и прокатали в круге диаметром 12 мм различные стали. Средняя овальность снизилась до 0,25–0,30 мм (большинство полос), а максимальная овальность снизилась до 0,4 мм.

Далее предложили новую форму предчистового овала "фасонный овал", у этого двухрадиусного овала один радиус остался без изменения, а величину второго радиуса ( $\gamma_{i-1}^o$ ) определили расчетом. Для расчета размеров двухрадиусного предчистового овала, получены следующие аналитические выражения: радиус овала

$$\gamma_{i-1}^o = \gamma_i \frac{\cos \varphi_i}{\cos \varphi_i - \cos \psi} - \frac{d_{max} \cos \psi}{2(\cos \varphi_i - \cos \psi)}, \quad (31)$$

хорда  $m$  дуги радиуса  $\gamma_i^o$ ,

$$m = d_i \cdot \sin (\varphi_A^m + \psi), \quad (32)$$

где  $\varphi_A^m$  - угол, отсчитываемый от полярной оси до отрезка, соединяющего конец хорды  $m$  с полюсом  $O$ .

Для расчета на ЭВМ величин  $m$  и  $\gamma_{i-1}^o$  составлена программа.

При прокатке фасонного овала в круглом калибре обеспечивается точная форма круга на участках выпуска и разъема калибра. Прокатка круглой стали диаметром 12 мм после изменения формы предчистового овала и уменьшения ширины ручья чистового калибра дала хорошие результаты. Средняя овальность снизилась до 0,15 мм (большинство полос), а максимальная уменьшилась до 0,30 мм. В дальнейшем двухрадиусный овал был применен при прокатке всех профилей на стане 240. При прокатке круглой стали было исследовано влияние на точность степени износа калибра фасонного овала. Установлено, что с течением времени овальность готового профиля увеличилась. Слепок ручья фасонного калибра после прокатки показал значительное увеличение радиуса  $\gamma_{i-1}^o$ . Для обеспечения устойчивости размеров фасонного овала квадратный калибр, из которого полоса задается в фасонный овал, был заменен на круглый.

Сравнение результатов прокатки на жесткой клети дуо и квартро 300 показывает примерно одинаковую точность готового профиля. Использование клети квартро 300 на месте чистовой клети затруднено ввиду малого числа калибров клети квартро и стесненной установки на ней валковой арматуры. Поэтому целесообразней клеть квартро использовать на месте предчистовой клети.

Внедрение теоретических разработок данной работы совместно с конструктивными изменениями новых прокатных клетей впервые позволило осуществлять прокатку круглых профилей на стане 240 в две нитки. При этом размеры круглой стали устойчиво укладываются в поле допуска повышенной степени точности (ГОСТ 2590-71). К тому же прокатка

ведется в минусовом поле допуска, что позволило помимо реализации круглой стали с приплатами на ее цену организовать сдачу металла по теоретическому весу.

Благодаря устойчивости формы и размеров чистового круга при прокатке по новой калибровке появилась возможность внедрения на чистовой линии обводного двухниточного аппарата, а это в свою очередь позволило заменить ручной физический труд по задаче овальной полосы в чистовую клеть.

Внедрение новых клетей с конструктивными изменениями отдельных узлов впервые позволило осуществлять прокатку в две нитки арматурной стали с уменьшенным весом погонного метра, а сталь ЗБГС периодического профиля диаметром 10, 12, 14 мм поставлять потребителю с государственным Знаком качества.

#### Основные выводы

1. Известные теоретические зависимости позволяют рассчитывать поперечные размеры круглой стали только по высоте и ширине профиля и не учитывают специфические особенности многониточной прокатки. Нет зависимостей для расчета контура поперечного сечения круглой стали, овальности профиля, нет методики расчета точности круглой стали при многониточной прокатке. Таким образом, вопросы расчета точности прокатки круглой стали освещены недостаточно и требуют дальнейшего изучения.

2. В работе получены формулы для расчета размеров поперечного сечения круглой стали по всему периметру, расчета отклонений размеров и овальности профиля.

3. Разработана методика расчета точности круглой стали при многониточной прокатке. Все расчеты по предлагаемой методике выполняются с применением ЭЦВМ.

4. Исследовано давление металла на валки при прокатке различных марок круглой стали в одну и две нитки.

5. Установлена закономерность изменения температуры металла по длине раската при прокатке на двухниточном мелкосортном стане.

6. Выполнено исследование точности прокатки на обычных клетях дуо двухниточного стана и установлено, что осуществлять прокатку мелкосортной круглой стали в две нитки на них нельзя из-за значительных отклонений размеров профиля, превышающих допустимые ГОСТом. Все профили на обычных клетях прокатывались в одну нитку. При этом поле

допуска использовалось полностью. Овальность профиля составляла 0,6 мм. Попытки повысить точность прокатки за счет изменения калибровки и других мероприятий к положительному результату не привели.

7. Разработана специальная методика и устройства для исследования радиальной и осевой упругой деформации прокатных клетей.

Исследована радиальная упругая деформация обычных и жестких клетей дуо и сортовой клети кварт. Коэффициент жесткости обычных клетей дуо в три раза ниже по сравнению с коэффициентом жесткости новых клетей дуо (35 т/мм и 105 т/мм соответственно) и в два с лишним раза ниже по сравнению с коэффициентом жесткости сортовой клети кварт (80 т/мм).

9. Определена упругая деформация обычных и жестких клетей дуо и клети кварт от осевой нагрузки на валки. Установлено, что осевая деформация жестких клетей с подшипниками качения в 2-2,5 раза меньше, чем обычных клетей с текстолитовыми подшипниками.

10. Проведено исследование точности прокатки на новых клетях жесткой конструкции в проектном варианте. Установлено, что на отклонения размеров поперечного сечения круглой стали оказывает влияние наличие люфтов в подшипниках валков и в механизме осевой регулировки валков. Прокатываемая в две нитки круглая сталь имеет максимальную овальность до 0,6±0,6 мм.

11. В результате исследований внесены изменения в конструкцию отдельных узлов жестких клетей. В клети дуо (320x500) реконструированы подшипниковые опоры рабочих валков и устройство осевой регулировки валков. В клети кварт (300) изменена конструкция подшипниковых опор рабочих валков и верхнего опорного валка, реконструировано устройство осевой регулировки валков. Заменены универсальные шпинделли с бронзовыми вкладышами на карданы.

12. Исследовано влияние размеров и формы предчистового и чистового калибров на точность профиля. Установлено, что при применении обычных однорадиусных овалов не удается получить круг повышенной точности.

13. Разработана новая форма овала предчистовой клети ("фасонный овал"). Выведены аналитические зависимости для определения размеров фасонного овала и составлена программа для их расчета на ЭЦВМ МИР.

14. Для повышения износостойчивости калибра фасонного овала изменена форма предшествующего калибра с квадратной на круглую.

15. Освоена двухниточная прокатка круглой стали повышенной степени точности на стане 240.

16. Освоена прокатка арматурной стали с уменьшенным весом пологонного метра. Сталь 35ГС периодического профиля диаметром 10, 12 и 14 мм поставляется потребителю с государственным Знаком качества.

17. Экономический эффект от реализации рекомендаций работы на промышленном стане 240 составил 282389 рублей.

18. Результаты работы могут быть использованы на других мелкосортных станах страны.

Основное содержание работы опубликовано в  
следующих работах

1. Новая конструкция прокатной клети для точной прокатки. Сб. тезисов докладов научно-технической конференции "Пути повышения надежности и эффективности основного оборудования прокатных цехов". Свердловск, 1972.

2. Прокатка мелкосортной стали повышенной точности на двухниточном линейном стане. Сб. материалов ІІ национальной конференции по черной металлургии с международным участием. София, Болгария, 1973.

3. Исследование жесткости сортовых прокатных клетей. Сб. научных трудов ЧПИ. № 130 "Прокатное производство", Челябинск, 1974.

4. Применение рабочих клетей новой конструкции на линейном стане. Тезисы докладов научно-технического семинара "Повышение точности прокатки на сортовых и листовых станах". Челябинск, 1974.

5. Прокатка круглой стали повышенной точности на двухниточном стане. Сталь № 1, 1975, с. 59-61.

6. Организация производства проката высокой точности. Тезисы докладов областной научно-технической конференции "Экономия черных металлов и пути повышения эффективности их использования в народном хозяйстве". Челябинск, 1975.

7. Точность многониточной прокатки круглой стали. Тезисы докладов научно-технического семинара "Повышение точности прокатки и экономия металла в прокатном производстве". Челябинск, 1977.

8. Освоение прокатки точных профилей на мелкосортных станах ЧМЗ. Тезисы докладов научно-технического семинара "Повышение точности прокатки и экономия металла в прокатном производстве". Челябинск, 1977.

9. Точность прокатки круглой стали в многовалковых калибрах. Тезисы докладов научно-технического семинара "Повышение точности прокатки и экономия металла в прокатном производстве". Челябинск, 1977.