

ЭОХ

Министерство высшего и среднего специального образования СССР

Челябинский политехнический институт  
имени Ленинского комсомола

На правах рукописи

ШЕРКУНОВ Виктор Георгиевич

РАЗРАБОТКА ТЕОРЕТИЧЕСКИХ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ВОПРОСОВ  
ДЕФОРМАЦИИ КРУГЛЫХ ПРОФИЛЕЙ В МНОГОВАЛКОВЫХ КАЛИБРАХ

Специальность 05.16.05 -  
"Обработка металлов давлением"

Автореферат диссертации на  
соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Челябинск, 1974

Диссертационная работа выполнена на кафедре "Обработка металлов давлением (прокатка)" и в проблемной лаборатории "Новые технологические процессы прокатки" Челябинского политехнического института имени Ленинского комсомола.

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

Научный консультант – кандидат технических наук, доцент Л.А.Барков.

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор В.К.Смирнов;  
кандидат технических наук, доцент Ю.И.Кокотовихин.

Ведущее предприятие – Балхашский завод обработки цветных металлов.

Автореферат разослан " \_\_\_\_\_ " \_\_\_\_\_ 197 г.

Защита диссертации состоится " \_\_\_\_\_ " \_\_\_\_\_ 197 г., в 15 час., на заседании Совета металлургического факультета по присуждению ученых степеней при Челябинском политехническом институте имени Ленинского комсомола.

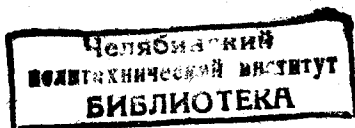
Отзывы в двух экземплярах просим направлять по адресу: 454044, г. Челябинск, проспект им. В.И. Ленина, 76, Челябинский политехнический институт имени Ленинского комсомола, ученому секретарю Совета института, тел. 39-39-64.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке института.

Ученый секретарь Совета  
доцент, кандидат технических наук

*В.Н. Гончар*

В.Н. Гончар



## Общая характеристика работы

Актуальность работы. Директивами по девятому пятилетнему плану развития народного хозяйства СССР предусмотрен дальнейший рост объема производства металлургической промышленности и поставлена задача улучшения качества и повышения точности выпускаемой продукции.

Выполнение поставленных задач в большой степени зависит от внедрения новых прогрессивных способов производства в прокатной и метизной промышленности.

В последние годы в нашей стране и за рубежом для получения профилей простой формы успешно применяется новый способ деформации металла в калибрах, образованных тремя и более валками. Применение многовалковых калибров для получения прутков, катанки и проволоки позволяет увеличить объем их производства, повысить точность размеров и улучшить качество продукции. Благоприятная схема напряженно-деформированного состояния позволяет получать в таких калибрах изделия с повышенной работоспособностью, в том числе из труднодеформируемых металлов и сплавов.

Цель работы. Разработка основных вопросов теории деформации круглых профилей в многовалковых калибрах. Проведение экспериментальных исследований процесса прокатки и волочения прутков и проволоки. Разработка оборудования и технологии получения передельной проволоки из углеродистых сталей и труднодеформируемых сплавов и внедрение их в промышленности.

Научная новизна. Впервые проведено комплексное теоретическое исследование формоизменения, кинематических и энергосиловых параметров деформации круглых профилей в многовалковых калибрах. Исследование выполнено на основе энергетической теории с широким применением вычислительной техники.

Практическая ценность. Разработана методика расчета основных технологических параметров процесса деформации. Результаты теоретических исследований представлены в виде номограмм, что упрощает их практическое применение. В результате экспериментальных исследований установлены оптимальные режимы деформации прутков и проволоки в многовалковых калибрах. Спроектировано и изготовлено оборудование и разработана технология получения передельной проволоки из углеродистых сталей и труднодеформируемых сплавов.

Реализация работы. Оборудование и технология внедряются на Балхшском заводе по обработке цветных металлов для замены грубого и среднего волочения литой труднодеформируемой бронзовой заготовки

прокаткой и волочением в многовалковых калибрах. На Магнитогорском калибровочном заводе оборудование и технология внедряются для получения передельной проволоки из углеродистых сталей. Новое оборудование и технология будут внедрены и на других заводах страны.

Апробация работы. Материалы диссертации доложены:

1. На межвузовской Всесоюзной научно-технической конференции "Современные достижения и проблемы прокатного производства." ЧТИ, Челябинск, 1971.

2. На научно-технической конференции республик Прибалтики, Белорусской ССР и Калининградской области, Каунас, КТИ, 1968.

3. На научно-технических семинарах "Прокатка в многовалковых калибрах". ЧТИ, Челябинск, 1967, МГМИ, Магнитогорск, 1968.

4. На ежегодных научно-технических конференциях ЧТИ, Челябинск, 1969-1974 г.г.

Публикация. Основное содержание работы опубликовано в 6 статьях.

Объем работы. Диссертация содержит III страниц машинописного текста, 106 рисунков, 7 таблиц, список использованной литературы из 125 наименований и приложение.

## Геометрия и кинематика процесса деформации металла в многовалковом калибре

Изучению геометрических и кинематических параметров при прокатке в вытяжных трех и четырехвалковых калибрах простой формы посвящено достаточно большое количество работ А.П.Чекмерева, В.Н.Имдрина, М.И.Бояршинова, М.Г.Полякова, Ю.М.Коковихина, И.М.Павлова, В.М.Клименко, Г.П.Борженко, Б.А.Никифорова, М.П.Казнельсона и других. Но в настоящее время практически отсутствуют публикации, где исследуются схемы деформации в круглых калибрах. Поэтому в данной работе рассмотрен вывод основных зависимостей для определения геометрических и кинематических параметров деформации в круглых трех- и четырехвалковых калибрах с учетом степени заполнения калибра металлом и наличия у заготовки скругленных граней.

На рис. I представлен очаг деформации при прокатке по схеме квадрат-круг. Совместным решением уравнений, описывающих поверхность заготовки и калибра, найдены уравнения линий, ограничивающих площадь контакта полосы с валком

на участке BB'

$$\frac{R_s - R_0 [\theta(\sqrt{2}-1) + 1] + a}{\cos \alpha} = R_s - \sqrt{R_0^2 - (a-y)^2}; \quad (1)$$

на участке B'C

$$\frac{R_s - R_0 [\theta(\sqrt{2}-1) + 1] + a + y}{\cos \alpha} = R_s - \sqrt{R_0^2 - (a+y)^2}, \quad (2)$$

где  $\theta$  - коэффициент заполнения калибра металлом, равный отношению  $AN:AM$ .

Для получения расчетных формул аналитические выражения (1) и (2) были заменены более простыми аппроксимирующими функциями на участке BB'

$$y_0' = a \left( \frac{d-d_0}{d_0-d_0} \right); \quad (3)$$

на участке B'C

$$y_0 = b_1 \left[ 1 - \left( \frac{d}{d_0} \right)^2 \right]. \quad (4)$$

Как показали экспериментальные исследования и расчеты, уравнения (3) и (4) с достаточной точностью можно использовать для теоретических исследований.

После интегрирования уравнений (3) и (4) были получены формулы для расчета площади контакта  $F_n$  и ее горизонтальной проекции  $F_k$  при прокатке в трех- и четырехвалковых круглых калибрах

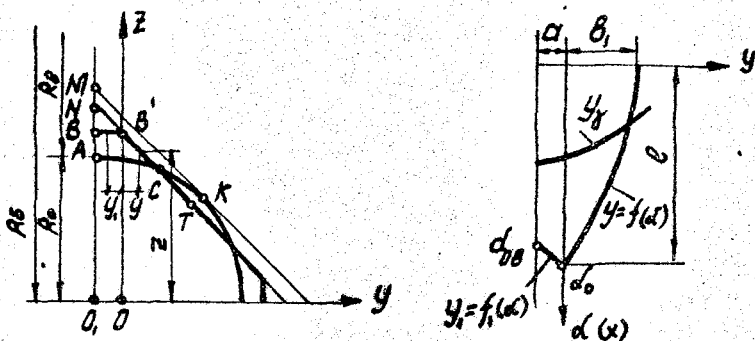


Рис.1. Схема прокатки квадрат-круг

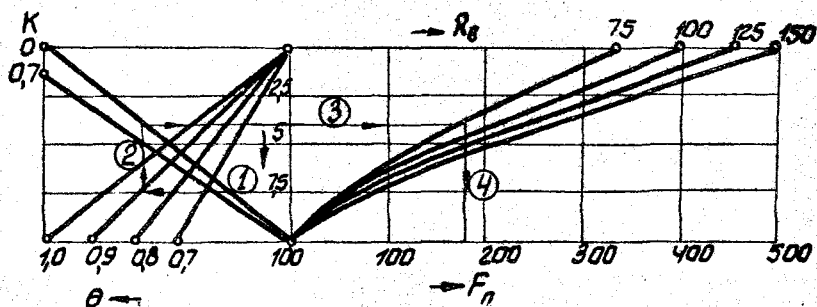


Рис.2. Номограмма для определения полной площади контакта при прокатке по схеме квадрат-круг

$$F_n = R_e \left[ \frac{4}{3} b_1 d_0 + a (d_0 e + d_0) \right]; \quad (5)$$

$$F_k = \left( a + \frac{4}{3} b_1 \right) R' \text{Sind}_0 + (2R_e - R') \text{Sind}_0 e, \quad (6)$$

где  $R' = R_e + R_0 - \sqrt{R_0^2 - Q^2};$

$$b_1 = \frac{1}{4} R_0 \left[ \sqrt{3} (1 + \theta) - \sqrt{3 - \theta(\theta - 2)} \right] - Q \quad \text{— для трехвалкового калибра};$$

$$b_1 = \frac{1}{2} R_0 \left\{ \theta(\sqrt{2} - 1) + 1 - \sqrt{2 - [\theta(\sqrt{2} - 1) + 1]^2} \right\} - Q \quad \text{— для четырехвалкового калибра}.$$

По аналогичной методике получены формулы для определения площади контакта при прокатке в трех- и четырехвалковых калибрах, образованных валками с гладкой бочкой.

По всем формулам для определения площадей контакта был сделан расчет на ЭВМ "Мир-1" и по результатам расчета построены номограммы. Типовая номограмма для определения полной площади контакта для системы квадрат-круг представлена на рис. 2. Порядок определения площади контакта показан стрелками, величиной  $K$  обозначено отношение  $\frac{Q}{R_0}$ .

В теоретических исследованиях и при расчете калибровки важно установить характер закономерности изменения вытяжки вдоль очага деформации.

В работе такие закономерности получены на основе анализа изменения поперечного сечения полосы в очаге деформации. Например, текущая площадь поперечного сечения полосы для системы квадрат-круг имеет вид

$$S = 2R_0 [1 + \theta(\sqrt{2} - 1)] \left\{ R_0 [1 + \theta(\sqrt{2} - 1)] - 2(y + a) \right\} + 4 \left\{ R_0 [(\sqrt{2} - 1)\theta + 1] - (y + a) \right\}^2 \arctg \frac{y + a}{R_0 [1 + (\sqrt{2} - 1)\theta] - (y + a)}. \quad (7)$$

В результате экспериментальных исследований и расчетов на ЭВМ "Мир-1" полученная закономерность была заменена экспонентой

$$S = S_1 e^{\frac{\alpha}{\alpha_0} \ln \lambda} \quad (8)$$

Здесь  $S_1$  — площадь поперечного сечения полосы на выходе из очага деформации;

$\lambda$  — вытяжка;

$\alpha$  — текущий угол в очаге деформации.

Экспериментальное исследование по установлению закономерности изменения вытяжки проводилось на недокатах путем их измерений на специальном приборе.

В работе исследован характер и получено уравнение критических линий

на участке  $BB'$

$$y_{cr} = a - \sqrt{R_0^2 - [R_0 + R_E(1 - \frac{S_{cr} \cos \gamma}{S \cos \alpha})]^2} ; \quad (9)$$

на участке  $B'C$

$$y_{cr} = \sqrt{R_0^2 - [R_0 + R_E(1 - \frac{S_{cr} \cos \gamma}{S \cos \alpha})]^2} - a . \quad (10)$$

В равенствах (9) и (10) приняты следующие обозначения:

$y_{cr}$  - координата критической линии;

$\gamma$  - критический угол;

$S_{cr}$  - площадь поперечного сечения полосы в критическом сечении.

Анализ расчетов, выполненных на ЭВМ "Мир-1", показал, что при прокатке в круглых многовалковых калибрах критическая линия, как правило, пересекает боковую границу очага деформации. В связи с этим возникает необходимость определения координаты точки пересечения боковой линии очага деформации с критической. Положение точки найдено в работе впервые из совместного решения уравнений боковой линии очага деформации и критической линии. На основе полученного выражения построена номограмма для определения координаты точки пересечения как функции основных технологических параметров.

Получены формулы для определения катающего радиуса  $R_k$  и опережения при прокатке в круглых многовалковых калибрах

$$R_k = (1 + \frac{\gamma}{\alpha} \ln \lambda) R_E ; \quad (11)$$

$$i = (\lambda - 1) \frac{\gamma}{\alpha} . \quad (12)$$

По формулам (11) и (12) выполнены расчеты на ЭВМ "Мир-1" для широкого диапазона изменения параметров и по результатам расчета построены номограммы для определения катающего радиуса и опережения.

Экспериментальные исследования указывают на достаточно хорошую сходимость результатов расчета по формулам (11) и (12) с данными эксперимента.



### Энергосиловые параметры процесса прокатки в многовалковых калибрах

Большой вклад в исследование энергосиловых параметров процесса деформации металла в многовалковых калибрах внесли А.П.Чекимарев, М.Г.Поляков, В.Н.Выдрин, М.И.Бояришинов, Г.П.Борисенко, А.А.Горбанев, Л.А.Барков, Ю.П.Сердега, А.В.Соловьев, Б.П.Никифоров, Ю.И.Козовихин, М.П.Кацнельсон и другие.

В основу расчета мощностей, критического угла и давления металла на валки положена энергетическая теория взаимодействия полос и валков.

В общем случае условие энергетического баланса записывается в виде

$$N_{\phi} - N_{\tau} - N_{\tau x} - N_x \pm N_0 \pm N_1 - N_u = 0, \quad (13)$$

здесь  $N_{\phi}$  - мощность на валках;

$N_{\phi}$  - мощность формоизменения;

$N_{\tau}, N_{\tau x}$  - соответственно мощности сил трения на приводных и холостых валках;

$N_x$  - мощность сил сопротивления вращению холостых валков;

$N_1, N_0$  - соответственно мощности переднего и заднего натяжения;

$N_u$  - мощность сил инерции.

Для расчета мощности на бочке валков при прокатке в круглых многовалковых калибрах была получена следующая формула:

$$N_{\phi} = k \omega R_c R_{\phi} \left\{ \bar{\tau}_c \left[ \frac{4}{3} b_1 d_0 + a (d_{0\phi} + d_0) \right] - \right. \\ \left. - (\bar{\tau}_c + \bar{\tau}_{c2}) b_1 \left[ (1 + 2 \frac{a}{b_1}) \beta_{\phi} + \frac{1}{3} d_n - (\beta_{\phi}^2 - d_n) \frac{d_n^2}{d_0^2} \right] \right\}, \quad (14)$$

где  $\beta_{\phi}$  - критический угол по вершине калибра приводного валка;

$k$  - число приводных валков;

$R_c$  - средний радиус валка, равный

$$R_c = R_{\phi} + 0,08 R_0 \quad - \text{ для четырехвалкового калибра,}$$

$$R_c = R_{\phi} + 0,13 R_0 \quad - \text{ для трехвалкового калибра;}$$

$\bar{\tau}_c, \bar{\tau}_{c2}$  - соответственно средние силы трения в зонах отставания и опережения;

$\omega$  - окружная скорость валков.

Получены также формулы для определения мощности прокатки в случае прокатки в трехвалковом и четырехвалковом калибрах, образованных валками с гладкой бочкой.

Указанные формулы были проверены экспериментально, в результате чего установлена их удовлетворительная сходимость с экспериментальными данными.

Выведены формулы для определения мощности сил трения на приводных и холостых валках. Например, для круглых калибров эти формулы имеют вид

$$N_T = \kappa \omega R_E (R_c - \frac{S_c}{S_c} R_E) \{ \tau_{c1} [ \frac{4}{3} \rho, d_o + a(d_{oE} + d_o) ] - (\tau_{c1} - \tau_{c2}) \rho, [ (1 - 2 \frac{a}{\rho}) \gamma_0 + \frac{1}{3} d_n - (\gamma_0 - d_n) \frac{d_n^2}{d_o^2} ] \}; \quad (I5)$$

$$N_{Tx} = m \omega_x R_E (R_c - \frac{S_{Tx} R_E}{S_c}) \{ \tau_{c1x} [ \frac{4}{3} \rho, d_o + a(d_{oE} + d_o) ] - (\tau_{c1x} - \tau_{c2x}) \rho, [ (1 + 2 \frac{a}{\rho}) \gamma_x + \frac{1}{3} d_x - (\gamma_x - d_x) \frac{d_x^2}{d_o^2} ] \}; \quad (I6)$$

здесь  $m$  - число холостых валков;

$S_c$  - средняя величина площади поперечного сечения в очаге деформации;

$S_{Tx}$  - площадь поперечного сечения полосы в критическом сечении, которому соответствует критический угол на холостых валках ( $\gamma_x$ ).

В формулах (I5) и (I6) индекс "x" в обозначениях указывает на принадлежность величины к холостому валку.

Из условия энергонейтральности на холостых валках

$$N_x = N_{c1} + N_g \quad (I7)$$

была получена зависимость для расчета критического угла  $\gamma_x$ .

Здесь  $N_{c1}$  - мощность сил сопротивления, возникающая в результате действия сил трения в подшипниках холостых валков;

$N_g$  - мощность сил сопротивления, возникающая от вращения вспомогательного двигателя, подключаемого к холостым валкам в период захвата полосы.

Для круглого многовалкового калибра формула имеет вид

$$\gamma_k = \frac{\tilde{\tau}_{c1} \left[ \frac{4}{3} b_1 d_0 + a(d_{0s} + d_0) \right]}{(\tilde{\tau}_{cm} + \tilde{\tau}_{cmk}) b_1 \left( \frac{4}{3} + 2 \frac{a}{b_1} \right)} - \frac{N_{cm} + N_g}{m \omega_k R_c R_f b_1 \left( \frac{4}{3} + 2 \frac{a}{b_1} \right) (\tilde{\tau}_{cm} + \tilde{\tau}_{cmk})} \quad (18)$$

Выведены также зависимости для определения величины критического угла на холостых валках для схем прокатки в многовалковых калибрах, имеющих валки с гладкой бочкой.

Величина критического угла на приводных валках определяется из условия энергетического баланса (13).

Для круглых многовалковых калибров было получено выражение для определения величины  $\gamma_B$  (критическая линия находится внутри очага деформации)

$$\gamma_B = \frac{S_c [n \rho \lambda \delta_s + \sigma_0 + \delta_1 + \frac{v_f^2}{2g} \rho \left( 1 - \frac{1}{\lambda} \right)]}{\kappa (\tilde{\tau}_{c1} + \tilde{\tau}_{c2}) \left( 1 - 2 \frac{a}{b_1} \right) R_c R_f} + \frac{m}{\kappa} \left\{ \frac{\tilde{\tau}_{cm} + \tilde{\tau}_{cmk}}{\tilde{\tau}_{c1} + \tilde{\tau}_{c2}} \gamma_k - \frac{\left[ \frac{4}{3} b_1 d_0 + a(d_{0s} + d_0) \right] (\tilde{\tau}_{cm} + \frac{\kappa}{m} \tilde{\tau}_{c1})}{b_1 \left( 1 + 2 \frac{a}{b_1} \right) (\tilde{\tau}_{c1} + \tilde{\tau}_{c2})} \right\}, \quad (19)$$

где  $\rho$  - плотность металла прокатываемой полосы;

$g$  - ускорение силы тяжести;

$v_f$  - скорость полосы на выходе из очага деформации;

$n$  - коэффициент, учитывающий неравномерность деформации;

$\delta_0, \delta_1$  - соответственно заднее и переднее натяжение;

$\delta_s$  - предел текучести металла.

Для случая, когда критическая линия пересекает боковую границу очага деформации, получено значительно более сложное выражение. Для упрощения их использования, полученные выражения были просчитаны на ЭВМ "Минск-22" и по результатам просчета построены номограммы. Получены также зависимости для определения величины  $\gamma_B$  при прокатке по схемам квадрат-квадрат и трехгранник-трехгранник.

Получена зависимость для определения КПД процесса прокатки

$$\lambda = \frac{1}{1 + \frac{\kappa \omega \varepsilon_c (R_c - R_p \frac{S_p}{S_c}) (F_n - 2F_2)}{S_p R_p n \ln \lambda \delta_s (1+i)}}, \quad (20)$$

где  $F_x$  - площадь зоны опережения.

Из условия энергетического баланса в системе полоса-валок, записанного для элементарного объема в очаге деформации, получена формула для определения среднего удельного давления. Уравнение энергетического баланса решалось совместно с уравнением пластичности, в результате чего получены аналитически точная и инженерная зависимости для подсчета среднего удельного давления при прокатке в круглых трех- и четырехвалковых калибрах.

Инженерная зависимость имеет вид

$$P_c = \frac{\sigma_c \ell}{F_x} \left\{ n \delta_s (\lambda - 1) \left[ \frac{\lambda_p^2}{2\lambda^2} - \frac{\lambda_p^4}{4\lambda^4} - \frac{1}{\lambda} \left( \frac{5}{12} - \frac{\lambda_p}{\rho} + \frac{\lambda_p^2}{2\rho^2} + \frac{\lambda_p^3}{3\rho^3} \right) \right] + \frac{\kappa \varepsilon \delta_s \rho}{S_c} \left( \frac{2}{9} - \frac{4}{3} \frac{\lambda_p}{\rho} - \frac{\lambda_p^2}{2\rho^2} + \frac{4}{9} \frac{\lambda_p^3}{\rho^3} \right) + \frac{2}{3} \delta_s \right\}, \quad (21)$$

здесь  $\ell$  - длина очага деформации;  
 $\lambda_p$  - длина зоны опережения.

Полученные зависимости были проанализированы с помощью ЭВМ "Минск-22", и по результатам анализа установлена зависимость среднего удельного давления от основных технологических параметров процесса деформации. Экспериментальные исследования силовых параметров подтвердили удовлетворительную сходимость полученных формул.

В работе впервые выявлены предельные энергетические условия осуществления процесса деформации в многовалковых калибрах при наличии холостых валков, а также при действии продольных усилий на прокатываемую полосу.

Предельные условия получены из уравнения баланса энергии в очаге деформации в виде

$$\kappa \varepsilon_c R_c \geq \frac{3m\sqrt{\sigma_{\text{сж}}}}{S_0 \times 3S_p} \varepsilon_{\text{сж}} \frac{\lambda - 1}{2(\lambda + 1)} + \kappa \varepsilon_c \omega R_c \left( 1 - \frac{2}{\lambda + 1} \frac{R_p}{R_c} \right) + \frac{\sqrt{\sigma_{\text{сж}}}}{F_n} (n \delta_s \ln \lambda \pm \delta_0 \pm \delta_1), \quad (22)$$

где  $V_{сек}$  - секундный объем;

$S_0$  - площадь поперечного сечения заготовки.

На основе теоретических зависимостей построены графики, позволяющие определить возможность осуществления процесса в зависимости от заданных условий для каждого конкретного случая деформации.

#### Формоизменение металла в многовалковых калибрах

Формоизменение металла в очаге деформации при прокатке в многовалковых калибрах является наименее изученным вопросом.

Практически отсутствуют публикации, посвященные исследованию формоизменения при прокатке в круглых калибрах.

В связи с этим в данной работе было проведено теоретическое и экспериментальное исследование процесса формоизменения при прокатке в круглом четырехвалковом калибре.

При экспериментальном исследовании использовался метод разрезных образцов. Прокатка осуществлялась на стане I65 с четырехвалковым калибром. В процессе исследования выяснено влияние величины заполнения калибра на характер деформации.

Для исследования течения металла в объеме очага деформации образцы изготавливались двух типов. В первом случае плоскость разреза образца совпадала с плоскостью разреза калибра, во втором - с направлением максимального обжатия. Это позволило составить объемную картину течения металла в очаге деформации. Анализ результатов экспериментального исследования указывает, что деформация металла по высоте образца не одинакова. Как правило, деформация контактных слоев в 7-8 раз больше, нежели деформация срединных слоев, что говорит о неравномерности проникновения деформации на глубину заготовки. Неравномерность деформации по высоте образца оценивалась коэффициентом  $K_n$ , представляющим собой отношение максимальной деформации слоя к минимальной. Оказалось, что наибольшая неравномерность по высоте наблюдается на расстоянии  $1/4 + 1/3$  длины очага деформации от плоскости входа в очаг. Затем к плоскости выхода она выравнивается и на последней трети остается практически постоянной и незначительной по величине.

Уменьшение степени заполнения калибра металлов приводит к увеличению неравномерности деформации по высоте образца. Однако, к плоскости выхода неравномерность уменьшается и приближается по ве-

личине к неравномерности при прокатке с полным заполнением.

При прокатке с неполным заполнением калибра металлом, необжимаемые участки заготовки практически полностью сохраняют свой первоначальный контур, несмотря на наличие утяжки или уширения профиля.

Исследования показали, что при прокатке со степенями заполнения, близкими к единице, полоса получает утяжку, а при степенях заполнения меньших единицы - уширение.

Результаты по распределению деформации после графического интегрирования были использованы для построения эпюр скоростей течения частиц металла и положены в основу теоретического исследования формоизменения.

Задача по исследованию формоизменения в круглом четырехвалковом калибре сводилась к определению величины уширения (утяжки) профиля, а также к выяснению степени влияния на него различных технологических параметров.

Поставленная задача была решена на основе использования энергетических принципов.

Энергетическое уравнение имеет вид

$$N_0 - \sum N = 0, \tag{23}$$

где  $\sum N$  - полная энергия, необходимая для осуществления деформации. Условие минимума энергии записывается в виде

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial \sum N}{\partial a_1} &= 0, \\ \frac{\partial \sum N}{\partial a_2} &= 0, \\ \dots & \\ \frac{\partial \sum N}{\partial a_i} &= 0, \end{aligned} \right\} \tag{24}$$

где  $a_1, a_2, \dots, a_i$  - варьируемые параметры.

В общем случае решение системы (24), при условии (23), представляет собой поиск условного экстремума функции  $\sum N$ . Для упрощения задачи была введена вспомогательная функция вида

$$\Phi = \sum N \varphi(N_0 - \sum N), \tag{25}$$

что свело задачу к поиску безусловного экстремума вспомогательной функции. В равенстве (25) коэффициент  $\psi$  представляет собой некоторый неопределенный множитель Лагранжа.

Как показано в ряде работ, при наличии двух и более варьируемых параметров, множитель Лагранжа в явном виде можно исключить.

Тогда основное вариационное уравнение можно записать в виде

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial}{\partial \lambda} N_{\Sigma} - \frac{\partial}{\partial \gamma} N'_{\Sigma} - \frac{\partial}{\partial \lambda} N_{\Sigma} \frac{\partial}{\partial \lambda} N'_{\Sigma} = 0, \\ N_{\Sigma} - N'_{\Sigma} = 0, \end{aligned} \right\} \quad (26)$$

где

$$\begin{aligned} N_{\Sigma} &= N_{\phi} + N_{\tau} + N_{\varphi}; \\ N'_{\Sigma} &= N'_{\phi} + N'_{\tau} + N'_{\varphi} \mp N_{\phi} \mp N_{\tau}, \end{aligned}$$

здесь  $N_{\varphi}$  - мощность сил сдвига.

В равенстве (26)  $\lambda$  и  $\gamma$  варьируемые параметры.

Реализация поставленной задачи осуществлялась на ЭВМ "Минск-22".

Алгоритм решения задачи приведен на рис.3. Ход решения осуществляется следующим образом. После введения данных из массивов  $\{\lambda_i\}$  и  $\{\gamma_j\}$  выбирались начальные значения параметров и осуществлялся просчет до получения условия  $N_{\Sigma} - N'_{\Sigma} = 0$ , если это условие не выполнялось, то переходили на новое значение  $\gamma'_{j+1} = \gamma_j + \Delta\gamma$  и так до определения величины критического угла, когда при заданном  $\lambda_i = \lambda$ , выполнялся баланс энергии в очаге деформации, затем находились производные и осуществлялось сравнение  $\frac{\partial N}{\partial \lambda_i} = 0$ . Если это условие не выполнялось, то происходил переход на новые значения  $\lambda_{i+1} = \lambda_i + \Delta\lambda$  и  $\gamma'_{j+1} = \gamma_j + \Delta\gamma$ , и решение повторялось до выполнения минимума.

Анализ результатов решения позволял определить условия, при которых наблюдается уширение или утяжка профиля и выявить характер влияния на нее различных параметров.

Было установлено, что уширение или утяжка профиля в значительной степени зависят от величины заполнения калибра металлом. При этом это влияние усиливается при увеличении коэффициента трения.

При коэффициенте трения, не превышающем величины  $f = 0,2$  и малой степени заполнения ( $\theta = 0,7$ ), наблюдается незначительное уширение (до 2%). По мере увеличения  $\theta$  относительное уширение растет и достигает 3% при степенях заполнения, близких 0,8. Затем наблюдается спад относительного уширения и при  $\theta > 0,9$  происходит утяжка профиля. Такой характер зависимости уширения (утяжки) в

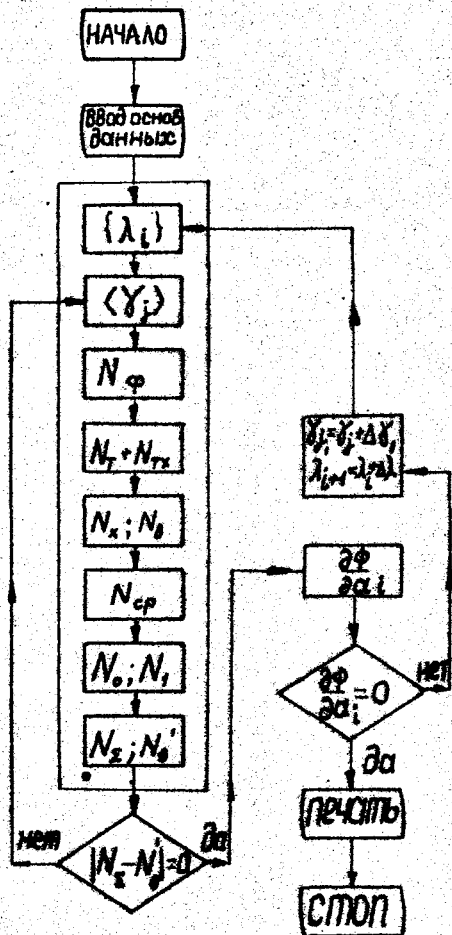


Рис.3. Алгоритм решения задачи формоизменения



функция заполнения калибра металлом  $\theta$  и коэффициента трения  $f$  можно объяснить тем, что при  $\theta$  близких к 0,6 деформация металла невелика, площадь контакта полосы с валком также незначительна и металл получает возможность течь в стороны. Наиболее благоприятные условия для уширения возникают при  $\theta$  близких 0,8. При увеличении величины заполнения, обжатие металла также увеличивается. Деформация проникает до срединных слоев и вызывает более интенсивную продольную деформацию, что приводит к уменьшению относительной деформации по ширине. С увеличением коэффициента трения утяжка наблюдается при более малых степенях заполнения. Установлено, что с уменьшением коэффициента трения уширение наблюдается в большем интервале степеней заполнения.

Экспериментальное исследование процесса деформации в многовалковых калибрах и разработка промышленной технологии

Экспериментальное исследование проводилось на оборудовании кафедры прокатки и проблемной лаборатории "Новые технологические процессы прокатки".

Прокатка осуществлялась на станах с четырехвалковым калибром с диаметрами валков 165 мм и 150 мм, и с трехвалковым калибром с диаметром валков 360 мм. Для измерений вытяжки на образцах через 100 мм наносились поперечные риски, и по изменению этого расстояния после прокатки судили о величине вытяжки.

Измерение опережения осуществлялось методом кернов. Измерение момента прокатки и давления на валки проводилось осциллографированием сигнала, поступающего от измерительных месдоз.

В качестве исследуемого материала были выбраны марки сталей с различной склонностью к уширению и ряд труднодеформируемых сплавов на основе меди.

В результате экспериментального исследования получены данные, отражающие влияние различных параметров (диаметра валков, степени заполнения калибра, коэффициента трения, заднего натяжения, наличия холостых валков и т.д.) на формоизменение, кинематические и энергосиловые параметры процесса деформации.

Экспериментальные данные подтвердили результаты теоретических исследований.

Особое внимание в работе уделялось разработке промышленной технологии деформации проволоки волочением и прокаткой в многовалковых калибрах взамен грубого и среднего волочения. Были разработаны и опробованы на полупромышленных станах три схемы калибровки. Новая технология разрабатывалась применительно к Балхашскому заводу по обработке цветных металлов с целью уменьшения промежуточных термообработок и брака из-за обрывов прутка при обработке бронзы Бр ОФ8-0,3 и к Магнитогорскому калибровочному заводу для замены кислотного удаления окалины на механическое с последующей протяжкой через роликовую волоку.

Разработана технология передела целой группы труднодеформируемых бронз и латуней, в том числе таких, как бронзы Бр ОФ8-0,3 и БрБ-2.

Разработанная технология одобрена и принята к внедрению Балхашским заводом по обработке цветных металлов и Магнитогорским калибровочным заводом.

Расчет экономической эффективности показывает, что от внедрения новой технологии только на этих двух заводах годовой экономический эффект составит сумму более 500 тыс. рублей.

#### Основные выводы

1. В работе исследованы параметры формоизменения полосы в многовалковых калибрах с учетом незаполнения калибра металлом и наличия у заготовки скругленных граней. Получены формулы для подсчета площади контакта полосы с валком. Выведена закономерность изменения вытяжки вдоль очага деформации. Проведена экспериментальная проверка полученных формул и зависимостей. Построены номограммы для подсчета полной площади контакта и ее горизонтальной проекции.

2. Исследована кинематика течения металла на контактной поверхности. Получены уравнения, описывающие положение критических линий в очаге деформации.

Установлены координаты точки пересечения критической линии с боковой границей очага деформации.

3. Получены формулы для определения катающего радиуса и опережения. Выполнено экспериментальное исследование и установлено влияние основных технологических параметров на опережение. Построены номограммы для нахождения катающего радиуса и опережения.

4. Выведены зависимости для подсчета момента и мощности на приводных валках, мощности сил трения на приводных и холостых валках, мощности среза.

5. Из условия энергетического баланса в очаге деформации получены формулы для подсчета критических углов на приводных и холостых валках. Построена номограмма для нахождения критического угла.

Установлены предельные условия существования процесса деформации в многовалковых калибрах.

6. На основе энергетической теории получено дифференциальное уравнение контактных напряжений и выведена формула для определения среднего удельного давления при прокатке.

7. Экспериментально исследовано формоизменение полосы в очаге деформации. Установлен характер течения металла и построены эпюры распределения деформации. Построено кинематически возможное поле скоростей течения металла и составлено вариационное уравнение, в результате решения которого определен характер уширения (утяжки) полос при прокатке в круглом четырехвалковом калибре. Исследования выполнены с применением современного математического аппарата и вычислительных машин.

8. Исследованы различные варианты калибровок и разработана технология прокатки и волочения проволоки в многовалковых калибрах. Результаты исследований приняты к внедрению на Белкашском заводе ОЦМ и Магнитогорском калибровочном заводе.

Ожидаемый экономический эффект от внедрения новой технологии составит 501,8 тыс. рублей.

Основное содержание работы опубликовано в следующих статьях:

1. Предельные вытяжки при прокатке в многовалковых калибрах. - Сб. "Теория и технология прокатки", № 54. Челябинск, 1969.

2. Прокатка в многовалковых калибрах с одним приводным валком. - "Известия вузов, Черная металлургия", 1970, № 12.

3. Исследование прокатки круглых профилей в многовалковых калибрах. Тезисы докладов межвузовской Всесоюзной научно-технической конференции "Современные достижения и проблемы прокатного производства", Челябинск, ЦПИ, 1970.

4. Характер критических линий при прокатке в четырехвалковых калибрах. - Сб. "Теория и технология прокатки", № 196, Свердловск, 1972.

5. Экспериментальное исследование формоизменения в четырехвалковом калибре. - Сб. "Теория и технология прокатки", № 102, Челябинск, 1972.

6. Исследование прокатки круглых профилей в многовалковых калибрах. - Сб. "Теория и технология прокатки", № 102, Челябинск, 1972.

**Ш е р к у н о в Виктор Георгиевич**

**Разработка теоретических и технологических вопросов деформации круглых профилей в многовалковых калибрах**

**Технический редактор Т.А.Нашевина**

---

ФБ 28223. Подписано к печати 27/III-74 г. Сдано в печать 30/III-74 г. Формат бумаги 60x90 1/16. Объем 1,25 п.л. Отпечатано на ротативной ЧМ. Тираж 120 экз. Заказ № 13/1314.