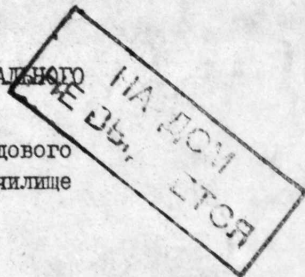


M336613

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО
ОБРАЗОВАНИЯ СССР

Московское ордена Ленина и ордена Трудового
Красного Знамени высшее техническое училище
имени Н.Э.Баумана



На правах рукописи

Еремин Александр Васильевич

ИССЛЕДОВАНИЕ ТОЧНОСТИ ПРОКАТКИ В КЛЕТИ
С ЧЕТЫРЕХВАЛКОВЫМ КАЛИБРОМ

Специальность 05.03.05 - "Процессы и машины
обработки давлением"

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва - 1979

Работа выполнена на кафедре обработки металлов давлением
Магнитогорского горно-металлургического института.

Научные руководители:

кандидат технических наук, профессор Болришинов М.И.
кандидат технических наук, доцент Завериха В.Н.

Официальные оппоненты:

доктор технических наук Жучин В.Н.
кандидат технических наук, доцент Борисов В.И.

Ведущее предприятие - Череповецкий сталепрокатный завод.

Защита состоится "14" марта 1979г на заседании
специализированного совета Д-053.15.05 Московского высшего тех-
нического училища им.Н.Э.Баумана, 107005, Москва Б-5, 2-я Бау-
манская ул., д.5.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МВТУ им.
Н.Э.Баумана.

Авторефер

Учен
специа

ов Ю.А.

M336613

Ро

100 экз.
ская д.5

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. XXV съездом КПСС перед металлургией поставлены задачи, заключающиеся в значительном улучшении качества металлопродукции и расширении ее сортамента.

В настоящее время прокатные сортовые профили площадью поперечного сечения больше 20 мм^2 получают в горячем состоянии. Для массового производства профилей малых сечений (площадью меньше 20 мм^2) используют волочение. Волочение уступает прокатке в производительности и экономичности. Получение профилей малых сечений из труднодеформируемых сталей затруднено из-за большого числа промежуточных отжигов. Для производства холоднокатаных профилей малых сечений из труднодеформируемых сталей перспективна прокатка в четырехвалковых калибрах. Необходимым условием реализации этого технологического процесса является точность размеров получаемых профилей.

Цель настоящей работы состоит в разработке метода расчёта точности размеров симметричных простых сортовых профилей и использовании этого метода для разработки новых конструкций клетей с четырехвалковыми калибрами, а также для проектирования промышленных станков.

Научная новизна состоит в определении закономерностей влияния конструктивных и технологических параметров на точность размеров прокатываемых профилей и в разработке новых конструкций клетей.

Практическая ценность работы заключается в разработке инженерных методов расчёта прочности и жесткости предварительно напряженных клетей с четырехвалковыми калибрами и точности размеров прокатываемых профилей.

Работа реализована в техническом проекте блока двух клетей с четырехвалковыми калибрами, включенного в состав технического задания на проектирование и строительство пятиклетевого стана, смонтированного на Белорецком металлургическом комбинате в цехе легированной проволоки.

Публикации: шесть статей, два авторских свидетельства на изобретения, три патента (ГДР, Бельгии, ФРГ).

Объем работы: 137 страниц машинописного текста, 53 рисунка, 15 таблиц, список использованной литературы из 131 наименования и приложение.

НТБ МГТУ им. Н.Э.Баумана



1336613

Еремкин А.В. Исследования

ВВЕДЕНИЕ

Для внедрения холодной прокатки простых сортовых профилей в четырехвалковых калибрах необходимо обеспечить точность их размеров. Эту задачу можно решать совершенствованием технологического процесса и технологического оборудования. Работы А.И.Целикова, А.А.Королева, А.П.Чекмарева, П.И.Грудева, П.И.Полухина, Ю.Д.Железнова, В.Н.Выдрина, И.М.Мееровича, А.И.Меренкова, И.М.Мериина и других исследователей направлены на решение задач, связанных с повышением точности прокатки в клетях с двухвалковыми калибрами. Задача определения точности прокатки в четырехвалковых калибрах впервые поставлена в работах В.Н.Выдрина, В.Г.Дукмасова, В.С.Нагорнова, В.В.Ключникова. Однако, теория расчета точности размеров профилей, получаемых в клетях с четырехвалковыми калибрами разработана недостаточно.

Анализ научно-технической литературы показал, что из всех существующих способов предварительного нагружения клетей наиболее эффективным в отношении точности размеров прокатываемых профилей является предварительное нагружение валков.

В соответствии с целью работы, задачи исследования состоят в изучении влияния конструктивных параметров предварительно напряженной клетки с четырехвалковым калибром на точность холодной прокатки симметричных простых сортовых профилей и разработке методов расчета точности прокатки в клетях этого типа.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ФОРМ СТАНИНЫ ПРОКАТНОЙ КЛЕТИ С ЧЕТЫРЕХВАЛКОВЫМ КАЛИБРОМ НА ЕЕ ЖЕСТКОСТЬ

Применение метода строительной механики - метода сил с использованием теоремы Максвелла-Мора позволило сравнить напряженно-деформированное состояние станин, основной контур которых образован следующими линиями: квадратом; окружностью, вписанной в квадрат; правильным восьмиугольником, вписанным в квадрат; неправильным восьмиугольником, вписанным в квадрат; квадратом, диагонали которого совпадают с направлениями усилий прокатки ("станина диагонального типа"); квадратом со срезанными вершинами углов, диагонали которого совпадают с направлениями усилий прокатки ("срезанный квадрат"). Сравнение показало, что наибольшей жесткостью обладает станина диагонального типа. Ее деформация в 6,45 раза меньше деформации станины, основной контур которой образован квадратом при одинаковых весе,

И. В. Т. У.

им. Н. Э. Баумана

ФУНДАМЕНТАЛЬНАЯ
БИБЛИОТЕКА

площади поперечного сечения основного контура и величине нагрузки. В порядке увеличения жесткости станины линии, определяющие геометрию ее основного контура, составляют следующий ряд: квадрат, правильный восьмиугольник, окружность, "срезанный квадрат", неправильный восьмиугольник, станина диагонального типа.

Получены зависимости напряжений и деформаций от усилия прокатки для станин различных типов. Результаты исследования использованы в разработке теории расчета предварительно напряженной клетки с четырехвалковым калибром, в математической модели точности прокатки и при проектировании блока двух клеток с четырехвалковыми калибрами.

ВЛИЯНИЕ КОНСТРУКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ КЛЕТИ НА РАЗМЕРЫ ПРОФИЛЯ

Для определения размеров профиля, обусловленных упругой деформацией клетки, нужно знать жесткость клетки. Вводя понятие частной жесткости и применяя принцип независимости действия сил, получены следующие формулы для определения жесткости станины:

$$C_{I(c)} = \frac{1}{\frac{\partial \delta_I}{\partial P_\theta} + \frac{P_\Gamma}{P_\theta} \frac{\partial \delta_I}{\partial P_\Gamma}}, \quad (1)$$

$$C_{II(c)} = \frac{1}{\frac{\partial \delta_{II}}{\partial P_\Gamma} + \frac{P_\theta}{P_\Gamma} \frac{\partial \delta_{II}}{\partial P_\theta}}, \quad (2)$$

где P_θ и P_Γ — усилия прокатки, действующие на клеть в двух взаимно перпендикулярных направлениях, соответственно в направлении I—I и II—II;

δ_I и δ_{II} — приращение размеров станины в направлениях I—I и II—II вследствие ее деформации;

$C_{I(c)}$ и $C_{II(c)}$ — жесткость станины в направлениях I—I и II—II.

Формулы (1) и (2) можно представить в виде удобном для пользования:

$$C_{I(c)} = \frac{1}{\lambda' - \frac{P_\Gamma}{P_\theta} \lambda''}, \quad (3)$$

$$C_{II(c)} = \frac{1}{\lambda' - \frac{P_\theta}{P_\Gamma} \lambda''}, \quad (4)$$

где λ' - частная податливость станины в направлении, совпадающем с направлением действия соответствующего усилия;
 λ'' - частная податливость станины в направлении перпендикулярном направлению действия усилия.

При прокатке симметричных сортовых профилей ($P_r/P_g = 1$) в четырехвалковых калибрах формулы (3) и (4) упростятся:

$$C_{II(c)} = C_{II(c)} = \frac{1}{\lambda' - \lambda''}.$$

Для всех типов станин в работе приведены значения частных податливостей λ' и λ'' в зависимости от отношения длины стороны квадрата ℓ к высоте прямоугольного сечения h в диапазоне $\ell/h = 4-10$.

Используя теорию расчета предварительно напряженных соединений, установлены зависимости, определяющие напряженно-деформированное состояние предварительно напряженной клетки с четырехвалковым калибром с двумя типами сопряжений валков при прокатке.

Двойной симметричный замок

Усилия, действующие на элементы клетки в направлениях I-I и II-II:

$$\left. \begin{aligned} Q_I &= P_{I(n\rho)} + \chi_I (P_g - N_{II} f_g) + \chi_{II} (P_r - N_I f_g) \Psi_I \\ Q_{II} &= P_{II(n\rho)} + \chi_{II} (P_r - N_I f_g) + \chi_I (P_g - N_{II} f_g) \Psi_{II} \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

Силы взаимного контактного давления валков в замке:

$$\left. \begin{aligned} N_I &= P_{I(n\rho)} + \chi_{II} (P_r - N_{II} f_g) \Psi_I - (P_g - N_{II} f_g) (1 - \chi_I) \\ N_{II} &= P_{II(n\rho)} + \chi_I (P_g - N_{II} f_g) \Psi_{II} - (P_r - N_I f_g) (1 - \chi_{II}) \end{aligned} \right\}, \quad (6)$$

где

$$\Psi_I = \frac{K_c}{1 + \frac{\lambda_{I(n\rho)}}{\lambda'}}; \quad \Psi_{II} = \frac{K_c}{1 + \frac{\lambda_{II(n\rho)}}{\lambda'}};$$

Ψ_I, Ψ_{II} - коэффициенты передачи усилия клетью;

$K_c = \frac{\lambda''}{\lambda'}$ - коэффициент передачи усилия станиной;

$\lambda_{I(n\rho)}, \lambda_{II(n\rho)}$ - податливости промежуточных деталей, находящихся между металлом и станиной;

f_g - коэффициент трения на контакте валков;

$P_{I(n\rho)}, P_{II(n\rho)}$ - усилия предварительного нагружения клетки,

$$1 - \chi_I = \frac{\lambda_I}{\lambda_I + \lambda_{I(z)}} = \frac{C_{I(z)}}{C_I + C_{I(z)}}; \quad 1 - \chi_{II} = \frac{\lambda_{II}}{\lambda_{II} + \lambda_{II(z)}} = \frac{C_{II(z)}}{C_{II} + C_{II(z)}};$$

$$\chi_I = \frac{\lambda_{I(z)}}{\lambda_I + \lambda_{I(z)}} = \frac{C_I}{C_I + C_{I(z)}}; \quad \chi_{II} = \frac{\lambda_{II(z)}}{\lambda_{II} + \lambda_{II(z)}} = \frac{C_{II}}{C_{II} + C_{II(z)}};$$

λ_I, λ_{II} - податливости клетки без учета податливостей замка;
 $\lambda_{I(z)}, \lambda_{II(z)}$ - податливости замка;
 C_I, C_{II} - жесткости клетки без учета жесткостей замка;
 $C_{I(z)}, C_{II(z)}$ - жесткости замка.

Уравнения размеров профиля в двух взаимно перпендикулярных направлениях при прокатке в предварительно напряженной клетке с четырехвалковым калибром:

$$\left. \begin{aligned} h_{I(n)} &= h_{I(o)} + \left[\frac{P - N_{II} f_g}{C_I + C_{I(z)}} - \frac{P_{I(np)} + \chi_{II} \psi_I (P - N_I f_g)}{C_{I(z)}} \right] + 2 \Delta_{I(g)} \\ h_{II(n)} &= h_{II(o)} + \left[\frac{P - N_I f_g}{C_{II} + C_{II(z)}} - \frac{P_{II(np)} + \chi_I \psi_{II} (P - N_{II} f_g)}{C_{II(z)}} \right] + 2 \Delta_{II(g)} \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

где $h_{I(o)}, h_{II(o)}$ - размеры калибра до прокатки;

$\Delta_{I(g)}, \Delta_{II(g)}$ - изменение размеров калибра вследствие упругого сплющивания валков.

При прокатке симметричных профилей и симметричном исполнении клетки уравнения (5), (6) и (7) получают вид:

$$\begin{aligned} Q &= P_{np} + \chi (P - N f_g) (1 + \psi), \\ N &= \frac{P_{np} - P (1 - \chi \psi - \chi)}{1 - f_g (1 - \chi \psi - \chi)}, \end{aligned} \quad (8)$$

$$h_n = h_o + (P - N f_g) \left(\frac{1}{C + C_z} - \frac{\chi \psi}{C_z} \right) - \frac{P_{np}}{C_z} + 2 \Delta_g. \quad (9)$$

Угловое сопряжение валков

$$\begin{aligned} Q &= P_{np} + P \chi (1 + \psi), \\ N &= [P_{np} - P (1 - \chi - \chi \psi)] \cos 45^\circ, \end{aligned} \quad (10)$$

$$h_n = h_o + P \left(\frac{1}{C + C_z} - \frac{\chi \psi}{C_z} \right) - \frac{P_{np}}{C_z} + 2 \Delta_g. \quad (11)$$

Из анализа уравнений (9) и (11) определена жесткость клетки:

$$C_k = \frac{(C + C_z)C_z}{C_z - C\psi}.$$

Тогда уравнения (9) и (11) будут представлены так:

$$h_n = h_0 + \frac{P - Nf_s}{C_k} - \frac{P_{np}}{C_z} + 2\Delta_s, \quad (12)$$

$$h_n = h_0 + \frac{P}{C_k} - \frac{P_{np}}{C_z} + 2\Delta_s. \quad (13)$$

Для определения жесткости клетки и решения уравнений (12) и (13) необходимо знать жесткость замка C_z и силу взаимного контактного давления валков N .

Жесткость двойного симметричного замка:

$$C_z = \frac{C_{kv}C_g}{2C_g + C_{kv}},$$

где C_{kv} — контактная жесткость валков как двух упругих элементов, соединенных параллельно;

C_g — жесткость двух дисков высотой h_g , сжатых соответствующей парой валков, определяемая для двух упругих элементов, соединенных параллельно.

Жесткость замка с угловым сопряжением валков:

$$C_z = \frac{1}{2} C_{kv},$$

где C_{kv} — контактная жесткость вала.

Так как приведенные формулы получены на основе принципа независимости действия сил, а деформация элементов замка изменяется от нагрузки нелинейно и жесткость замка зависит от усилия прокатки, то проведена линеаризация зависимостей упругой деформации элементов замка по методу Я.Г.Пановко.

Для двойного симметричного замка нелинейная зависимость контактной деформации валков δ_{kv} от силы взаимного контактного давления N

$$\delta_{kv}(N) = 1,3 \frac{N}{El_k} l_g \frac{33,5 El_k R_v}{N}.$$

Линеаризованная зависимость контактной деформации валков

$$\delta_{kv}^*(N) = \lambda_{kv}^* N,$$

где λ_{kv}^* — приведенная податливость при контактировании цилиндра с плоскостью.

Уклонение заменяющей линейной характеристики от заменяемой нелинейной зависит от величины силы N :

$$\gamma(N) = \delta_{kv}(N) - \delta_{kv}^*(N).$$

Уклонение подчинено требованию минимума интеграла:

$$J = \int_0^N \gamma^2(N) dN = \int_0^N [\delta_{\kappa\theta}(N) - \delta_{\kappa\theta}^*(N)]^2 dN.$$

Заменяв уклонение его моментом, приведенную податливость $\lambda_{\kappa\theta}^*$ определили из уравнения:

$$\frac{\partial}{\partial \lambda_{\kappa\theta}^*} \int_0^N \left\{ [\delta_{\kappa\theta}(N) - \lambda_{\kappa\theta}^* N] N \right\}^2 dN = 0,$$

из которого следует, что

$$\lambda_{\kappa\theta}^* = \frac{5}{N^5} \int_0^N \left(1,3 \frac{N}{E \ell_{\kappa}} \lg \frac{33,5 E \ell_{\kappa} R_{\theta}}{N} \right) N^3 dN. \quad (I4)$$

Из решения уравнения (I4):

$$\lambda_{\kappa\theta}^* = \frac{0,5645}{E \ell_{\kappa}} \left[\ln 35,5 E \ell_{\kappa} R_{\theta} - \left(\ln N - \frac{1}{5} \right) \right].$$

Тогда приведенная жесткость при контактировании цилиндра с плоскостью:

$$C_{\kappa\theta}^* = \frac{E \ell_{\kappa}}{0,5645 \left[\ln 35,5 E \ell_{\kappa} R_{\theta} - \left(\ln N - \frac{1}{5} \right) \right]}.$$

Используя зависимость деформации дисков валков, полученную В.Н.Выдриным, В.Г.Дукмасовым, В.В.Ключниковым, приведенная жесткость дисков валков определена по аналогии:

$$C_g^* = \frac{18}{\sqrt{\frac{2h_g^2}{E \ell_{\kappa} R_{\theta} N}}}.$$

Для углового сопряжения валков:

$$C_{\kappa\theta}^* = \frac{E \ell_{\kappa}}{0,2823 \left[\ln 16,75 E \ell_{\kappa} R_{\theta(\kappa\rho)} - \left(\ln N - \frac{1}{5} \right) \right]}.$$

Тогда жесткость двойного симметричного замка:

$$C_z = \frac{C_{\kappa\theta}^* C_g^*}{2C_g^* + C_{\kappa\theta}^*}. \quad (I5)$$

Для углового сопряжения валков:

$$C_z = \frac{1}{2} C_{\kappa\theta}^*. \quad (I6)$$

Сила взаимного контактного давления валков N определена численным решением на ЭВМ трансцендентных уравнений, полученных совместным решением уравнений (8) и (I5) - для клетки с двойным

симметричным замком и совместным решением уравнений (10) и (16) – для клетки с угловым сопряжением валков.

Получены уравнения для определения усилий, действующих на элементы клетки при прокатке, жесткости клетки, размеров калибра (профиля) при прокатке в предварительно напряженной клетке. Результаты использованы для расчета точности холодной прокатки простых сортовых профилей в отдельно взятой клетке с четырехвалковым калибром в зависимости от ее конструктивного исполнения.

ВЛИЯНИЕ КОНСТРУКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ КЛЕТКИ НА ТОЧНОСТЬ ПРОФИЛЯ

Влияние конструктивных параметров предварительно напряженной клетки с четырехвалковым калибром на точность размеров симметричного профиля проиллюстрировано на примере расчета точности холодной прокатки проволоки (сталь 60 по ГОСТ 1050-60, исходная термообработка – патентирование), прокатываемой по схеме исходный круг диаметром $d = 6,5$ мм – невыполненный квадрат. Расчет произведен для первой клетки предполагаемого непрерывного стана с четырехвалковыми калибрами при вытяжке $\mu = 1,44$, что соответствует получаемому невыполненному квадрату с номинальным размером стороны $h_n = 4,8$ мм.

Для определения размеров профиля в двух взаимно перпендикулярных направлениях применен метод расчета по возмущениям, отличающийся простотой, не требующий вычисления громоздких выражений частных производных по параметрам процесса, что увеличивает точность расчета. Размеры профиля находили решением уравнений (12) и (13) методом итераций по формулам:

$$h_{ni} = h_0 + \frac{P_i - N_i f_s}{C_{\kappa i}} - \frac{P_{np}}{C_{\gamma}} + 2\Delta \varepsilon_i,$$

$$h_{ni} = h_0 + \frac{P_i}{C_{\kappa i}} - \frac{P_{np}}{C_{\gamma}} + 2\Delta \varepsilon_i,$$

где i – номер итерации.

Среднее удельное давление металла на валки находили по формуле М.Г.Полякова, полученной по методике Т.Кармана-А.И.Целикова без учета температуры полосы, скорости прокатки, влияния внешних зон и упругого восстановления полосы. Упругое сплющивание валков определяли по формуле А.И.Целикова. Деформированный радиус валков находили по формуле, вытекающей из формулы Хитчкока. Предел текучести материала полосы принимали рав-

ным своему среднему значению в очаге деформации. Расчет содержит два этапа:

- а) расчет начальных размеров калибра по требуемым номинальным размерам выходящего из клетки профиля;
- б) расчет точности прокатки.

В соответствии с двумя этапами составлено два алгоритма расчета на ЭЦВМ, являющиеся математической моделью точности прокатки и отражающие прямую и обратную связь между параметрами процесса.

Расчет начальных размеров калибра. Начальные размеры калибра определяли по формуле:

$$h_0 = h_T \pm m \cdot 0,001,$$

где $h_T = 4,8$ мм – требуемый номинальный размер профиля;

m – число шагов счета на ЭЦВМ по заданному алгоритму.

Диаметр заготовки $d = 6,5$ мм, переднее натяжение $\sigma_1 = 36$ кг/мм², заднее натяжение $\sigma_0 = 20$ кг/мм², коэффициент трения металла о валки $f_n = 0,15$ и др. параметры принимали постоянными. Для шести вариантов конструктивного исполнения клетки определяли предварительно параметры c , R_0 , R_g , ψ . На печать выводили параметр h_0 .

Расчет точности прокатки. Возмущения подвергали в реальном диапазоне изменения пять параметров: d , h_0 , f_n , σ_0 , σ_1 . Диаметру, задаваемой в клетку заготовки, последовательно давали значения от 6,0–6,8 мм с шагом 0,1 мм, что соответствует допускам на размеры для стали круглой горячекатаной по ГОСТ 2590-71 ($d = 6,5^{+0,3}_{-0,3}$). Биеение валков рассматривали как изменение начального размера калибра в пределах $\pm 0,1$ мм с шагом 0,05 мм. Параметрам f_n , σ_0 , σ_1 давали соответственно значения 0,15–0,09 с шагом 0,03; 17–23 кг/мм² и 33–39 кг/мм² с шагом 1 кг/мм². Изменение размеров профиля по каждому из независимых возмущенных параметров определяли по формуле:

$$\delta h_k = h_n - h_g,$$

где h_n , h_g – номинальный и возмущенный размеры, выходящего из клетки профиля.

Отклонение размеров профиля определяли суммой отклонений размеров профиля по каждому из независимых возмущенных параметров:

$$\delta h_{\max} = \pm \sum_{k=1}^{k=n} \delta h_k.$$

Результаты расчета начальных размеров калибра и точности
прокатки симметричного профиля на ЭЦМ БЭСМ-4

П а р а м е т р	Т и п з а м к а						Угловое сопряжение валков
	Двойной симметричный						
	Т и п с т а н и н						
	диагональная			квадрат	абсолютно жесткая	диагональная	
	I	2	3	4	5	6	
Жесткость клетки без учета жесткости замка C , т/мм	20	38	38	20	58	38	
Радиус валка R_0 , мм	150	100	150	100	100	100	
Радиус контактных поверхностей валков R_c , мм	150	100	150	100	100	86	
Коэффициент передачи усилия клетью ψ	0,199	0,264	0,264	0,190	0	0,374	
Начальный размер калибра h_0 , мм	4,786	4,864	4,814	4,845	4,864	4,772	
Отклонение размеров профиля, мм	+0,141	+0,127	+0,137	+0,134	+0,127	+0,126	
	-0,188	-0,150	-0,173	-0,158	-0,150	-0,141	
Вероятное поле отклонений размеров профиля, мм	0,329	0,277	0,310	0,292	0,277	0,267	
Коэффициент выравнивания K_θ	1,965	2,44	2,14	2,34	2,44	2,62	

Приведены методика расчета точности холодной прокатки симметричного сортового профиля и результаты расчета точности прокатки (таблица) для шести вариантов конструктивного исполнения предварительно напряженной клетки с четырехвалковым калибром. Размеры профиля в двух взаимно перпендикулярных направлениях, за исключением расчетов по вариантам № 1 и 3, не выходят за пределы 5-го класса точности для стали калиброванной (ГОСТ 7417-57) и холодноотянутой (ГОСТ 2771-57).

ПРОВЕРКА ДОСТОВЕРНОСТИ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ТОЧНОСТИ ПРОКАТКИ

Математическая модель деформации системы "клеть-металл", учитывающая упругое сближение валков, деформированный радиус валков и нелинейную зависимость контактной деформации предварительно нагруженных валков, составленная в форме алгоритма, реализуемого на ЭЦВМ и разработанная методика расчета точности прокатки по возмущениям технологических и конструктивных параметров подлежат экспериментальной проверке.

Экспериментальное исследование точности прокатки заключалось в опытным определении изменения размеров профиля по длине полосы при прокатке симметричных простых профилей в предварительно напряженной клетке с четырехвалковым калибром с двумя типами сопряжений валков. Для этого на экспериментальной установке с четырехвалковым калибром со всеми приводными валками осуществляли прокатку калиброванных прутков из стали 10 кп по схеме круг - невыполненный квадрат с номинальной вытяжкой $\mu = 1,4$. Диски валков изготавливали из стали 9Х2 с последующей объемной закалкой до твердости $HR_C = 60$. Чистота контактных поверхностей валков находилась в пределах $V 9 - V 10$. Диаметр рабочих поверхностей был принят равным 204 мм. Калибр клетки настраивали по шаблону (при угловом сопряжении валков) на одинаковый размер в каждом из двух взаимно перпендикулярных направлений при незначительном усилии предварительного нагружения клетки (200-300 кг), обеспечивающего отсутствие зазоров в подшипниковых узлах и контакт валков. Прокаткой свинцовых полос диаметром 7 мм измеряли размеры калибра через каждые 30° за один оборот валков. Размеры калибра измеренные при этих условиях принимали за начальные. Разность наибольшего и наименьшего начальных размеров калибра за один оборот валков определяла биение калибра.

В предварительно напряженную клеть, находящуюся в рабочем состоянии, задавали калиброванные прутки из стали 10 кп диаметром 8 мм и длиной 1,8 м. Прокатку осуществляли на сухих валах со скоростью 0,16 м/сек с передним ($T_1 = 635$ кг) и задним ($T_2 = 600$ кг) натяжениями. Размеры профиля, полученные при данных условиях прокатки принимали за номинальные. Номинальным параметрам давали возмущения. При этом калиброванные прутки диаметром 8 мм выполняли ступенчатыми волочением их до диаметра 7,6 мм на длине равной две трети исходной длины. Изменяли величину переднего ($T_1 = 845$ кг) и заднего ($T_2 = 850$ кг) натяжений. Размеры профиля в двух взаимно перпендикулярных направлениях измеренные после прокатки с возмущенными параметрами являлись возмущенными. По выборочным средним значениям номинальных и возмущенных размеров профиля строили диаграммы изменения номинальных и возмущенных размеров профиля через каждые 30° за один оборот валков. Измерения показали (объем выборки $n = 12$), что с учетом погрешности настройки калибра по осциллографу на заданную величину усилия предварительного нагружения клетки и погрешности измерений микрометром номинальные размеры профиля $h_{I(n)} = 6,078 \pm 0,051$ мм с доверительной вероятностью $\alpha = 0,95$ и возмущенные размеры профиля $h_{I(8)} = 6,062 \pm 0,049$ с $\alpha = 0,95$ вблизи контрольных рисок валков, отпечатанных на полосе.

Расчет изменения номинальных размеров профиля за один оборот валков проводили при следующих исходных данных: начальные размеры калибра h_0 , исходный предел текучести материала полосы $\sigma_{s(n)} = 54$ кг/мм², коэффициенты кривой упрочнения $a = 3,9$ и $n = 0,5$, жесткость клетки без учета жесткости замка $C = 2,5 \cdot 10^3$ кг/мм, коэффициент передачи усилия клетью $\psi = 0,351$, коэффициент трения на контакте полосы с валками $f_n = 0,125$ определяли экспериментально; материал полосы - сталь 10 кп; усилие предварительного нагружения клетки $P_{np} = 6,5 \cdot 10^3$ кг; переднее натяжение $T_1 = 635$ кг ($\sigma_1 \approx 17$ кг/мм²); заднее натяжение $T_2 = 600$ кг ($\sigma_2 \approx 16$ кг/мм²); радиус рабочих поверхностей валков $R_0 = 102$ мм. Расчетные значения возмущенных размеров профиля за один оборот валков определяли при следующих условиях: $d = 7,6$ мм в интервале положения валков $0-240^\circ$; $d = 8$ мм в интервале положения валков $240-360^\circ$; $T_1 = 845$ кг ($\sigma_1 \approx 23$ кг/мм²); $T_2 = 850$ кг ($\sigma_2 \approx 23$ кг/мм²).

Остальные исходные данные принимали такими же, как и в случае номинальной прокатки.

Диаграммы изменения размеров профиля, полученные экспериментально сверяли с данными теоретического расчета размеров профиля на ЭЦМ ЕС-1020 по предложенной методике, а также сравнивали экспериментальные и теоретические значения коэффициентов выравнивания. Расчетные значения номинальных и возмущенных размеров профиля не выходили за пределы приведенного выше интервала ошибки эксперимента. Наибольший коэффициент выравнивания соответствует клетки с угловым сопряжением валков, что совпадает с данными теоретических исследований. Относительная погрешность экспериментального и расчетного значений коэффициента выравнивания составляет 15,4%.

Сравнение опытных данных с данными расчета, полученными с учетом условий проведения эксперимента, показало правильность зависимостей, установленных в теории расчета предварительно напряженной клетки с четырехвалковым калибром и правильность предложенной методики расчета точности прокатки по возмущениям, а также, как следствие - достоверность результатов теоретического исследования точности прокатки.

РАЗРАБОТКА НОВЫХ КОНСТРУКЦИЙ КЛЕТКИ С ЧЕТЫРЕХВАЛКОВЫМИ КАЛИБРАМИ

Разработанная методика расчета точности прокатки по возмущениям конструктивных и технологических параметров позволила выявить конструктивные исполнения предварительно напряженной клетки с четырехвалковым калибром, отвечающие целям точной прокатки.

Предложена станина диагонального типа, прямолинейные связи которой по внутреннему контуру на участках контактирования с клиновым механизмом установки валков попарно сопряжены в углы, составляющие $120-130^\circ$ при вершине (авторское свидетельство СССР № 556851). При такой форме станины в несущих элементах ее возникают преимущественно продольные силы. Это делает ее наиболее жесткой при меньшей металлоемкости в сравнении с другими типами станин. Отмеченное напряженно-деформированное состояние станины подтверждено поляризационно-оптическим методом на моделях из эпоксидной смолы марки ЭД-6. Напряжения, определенные экспериментально, превышали расчетные на 1%.

Теоретические и экспериментальные исследования показали, что наибольший коэффициент выравнивания соответствует клети оснащенной станиной диагонального типа и валковой системой с угловым сопряжением валков.

Предложен клиновой механизм установки валков (авторское свидетельство СССР № 441056), позволяющий использовать клети с малой жесткостью в режиме предварительного нагружения, запатентованный в Бельгии (патент № 822077), ГДР (патент № 113850), ФРГ (предварительный патент № 2450597).

ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

1. Прокатка в четырехвалковых калибрах – перспективный способ производства сортовых профилей из труднодеформируемых сталей. Внедрение этого способа требует разработки предварительно напряженных клеток с четырехвалковыми калибрами с предварительно нагруженной валковой системой, теория расчёта которых разработана недостаточно.

2. Выявлены закономерности влияния конструктивных параметров предварительно напряженной клетки с четырехвалковым калибром на размеры профиля.

3. Разработан метод расчёта жесткости предварительно напряженной клетки с четырехвалковым калибром, учитывающий нелинейную зависимость контактной деформации валков от усилия прокатки.

4. Разработан метод расчёта точности прокатки по возмущениям технологических и конструктивных параметров с реализацией на ЭЦВМ.

5. Достоверность математической модели точности прокатки подтверждена экспериментально. Результаты теоретического расчёта точности прокатки не выходят за пределы интервала погрешности эксперимента.

6. Теоретическими и экспериментальными исследованиями точности прокатки в предварительно напряженной клетке с четырехвалковым калибром установлено, что размеры профиля находятся в пределах четвертого-пятого класса точности холодного волочения.

7. Методами механики стержневых систем выявлена закономерность влияния формы станины на ее жесткость. Рациональной,

в отношении точности прокатки, следует считать станину диагонального типа.

8. Сравнение узлов сопряжений валков, образующих замкнутый четырехвалковый калибр, показало, что с точки зрения точности прокатки угловое сопряжение валков целесообразно применять в первых клетях, а узел сопряжения валков с двойным симметричным замком – в последних клетях непрерывного стана.

9. Предложена новая конструкция станины диагонального типа, несущие элементы которой нагружены только продольными силами, что подтверждено поляризационно-оптическим методом исследования напряжений на моделях из оптически активного материала.

10. Предложен новый механизм установки валков, расширяющий диапазон размеров профилей, прокатываемых в одном калибре, и позволяющий использовать клетки с малой жесткостью в режиме предварительного нагружения.

II. Материалы работы использованы в техническом задании, на основе которого спроектирован и изготовлен пятиклетевой стан с четырехвалковыми калибрами для холодной и теплой прокатки профилей из труднодеформируемых сталей.

Материалы диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Поляков М.Г., Никифоров Б.А., Еремин А.В. Теоретическое исследование и сравнительный анализ напряженно-деформированного состояния станин различной формы прокатных клеток с четырехвалковыми калибрами. – РЖ Металлургия, 1974, № 6, 6 Д21 ДЕП.

2. Поляков М.Г., Никифоров Б.А., Еремин А.В. Аналитическое определение статической жесткости станины прокатной клетки с четырехвалковыми калибрами. – Науч.тр. /Магнитогорск. горно-металлургич.ин-т, 1974, вып. 125.

3. Исследование распределения напряжений в станине прокатной клетки с четырехвалковым калибром поляризационно-оптическим методом /М.Г.Поляков, А.В.Еремин, Б.А.Никифоров, В.Д.Зюлин. – РЖ Металлургия, 1974, № II, II Д59 ДЕП.

4. Заверюха В.Н., Еремин А.В., Шамсутдинов Ф.С. Применение метода итераций к расчёту одной механической системы с неявной взаимосвязью между параметрами. – Научн.тр./Магнитогорск.горно-металлургич.ин-т, 1975, вып.155.

5. Еремин А.В. Теория расчёта предварительно напряженной клетки с четырехвалковым калибром. - РЖ Металлургия, 1977, № 8, 8Д 66ДЕП.

6. Рациональная форма станины прокатной клетки с четырехвалковым калибром / М.Г.Поляков, А.В.Еремин, В.Н.Заверюха, В.Д.Зюлин, - В кн.: Теория и практика производства метизов. Свердловск, 1977.

7. А.с. 441056 (СССР).

8. А.с. 556851 (СССР).

9. Пат. 822077 (Бельгия).

10. Пат. 113850 (ГДР).

11. Пат. 2450597 (ФРГ).

Материалы диссертации докладывались:

1. На республиканском научно-техническом семинаре "Применение установок с многовалковыми калибрами при обработке металлов давлением". Челябинск, 1972.

2. На ежегодных научно-технических конференциях Магнитогорского-горно-металлургического института, 1970-1977гг.