

**ДОНЕЦКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ**

На правах рукописи

ДАО МИНЬ НГЫНГ

**ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ
КОНТАКТНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В ОЧАГЕ ДЕФОРМАЦИЙ
ПРИ ТОНКОЛИСТОВОЙ ХОЛОДНОЙ ПРОКАТКЕ**

Специальность 05.03.05 - "Процессы и машины обработки давлением"

Автореферат
диссертации на соискание
ученой степени кандидата
технических наук

Донецк-1996

Диссертация является рукописью.

Работа выполнена на кафедре прокатного производства Приазовского государственного технического университета.

ЛННБ України ім.В.Стефаника



00760000 (D)

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор В.И.Капланов

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор В.С.Горелик

кандидат технических наук, доцент К.Н.Савранский

Ведущее предприятие:


Украинский научно-исследовательский институт
специальных сталей г.Запорожье

Защита диссертации состоится 24 Октября 1996г. в 12.00 час.
в аудитории 5.353 на заседании специализированного совета
Д 06.04.03 в Донецком государственном техническом университете
по адресу: 340000, г.Донецк, ул. Артема, 58

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Донецкого
государственного технического университета

Автореферат разослан 22 сентября 1996г.

Ученый секретарь
специализированного совета Д 06.04.03,
доктор технических наук


С.М.Сафьянц

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. В современной теории холодной прокатки погрешность методик расчета энергосиловых параметров по сравнению с опытными данными, в частности силы прокатки, находится в диапазоне от -30% до +30%, а относительная разница между теоретическими результатами расчетов достигает 40%. Изложенное делает актуальной задачу повышения точности теоретического расчета параметров холодной прокатки листовой стали, что будет способствовать более надежному обеспечению технологического процесса и решать технико-экономические проблемы (повышение производительности, качества, экономия энергоресурсов).

Цель и задачи исследования. Цель настоящей работы заключается в разработке уточненной математической модели процесса холодной прокатки и программного обеспечения ее численной реализации, направленных на повышение точности теоретического расчета основных энергосиловых параметров холодной прокатки.

Для достижения поставленной цели решены следующие основные задачи:

-исследовано влияние основных факторов прокатки: закономерности упрочнения, условия трения и формы дуги контакта на распределение контактных напряжений при холодной прокатке тонколистовых полос;

-установлены закономерности появления погрешностей теоретического расчета основных параметров холодной прокатки при использовании разных законов и зависимостей при моделировании процесса холодной прокатки с упрочнением;

-разработана уточненная математическая модель процесса холодной прокатки с использованием более точных законов упрочнения, трения и представления формы дуги контактного металла с вальцами в виде экспоненциальной кривой;

-разработаны метод решения, алгоритм и программное обеспечение реализации уточненной математической модели с целью определения основных параметров холодной прокатки с повышенной точностью.

Методы исследования. Теоретическое моделирование очага деформации при холодной прокатке тонких листов выполнено автором на основе численного решения дифференциального уравнения равновесия.

Объект исследования: -очаг деформации при холодной прокатке тонких листов.

Научная новизна работы заключается в

-обосновании принятия закона упрочнения металла в очаге деформации и контактных напряжений трения в зависимости от упрочнения металла, а формы очага деформации как экспоненциальной зависимости от исходной толщины, обжатия полосы и длины дуги контакта;

-создании уточненной математической модели процесса холодной прокатки полос, позволяющей применить простой способ решения, основу которой составляют уравнение прокатки и другие зависимости, характеризующие влияние совокупности факторов (упрочнения, трения и формы контакта) на напряженно-деформированное состояние металла в очаге деформации;

-разработке алгоритма расчета и программного обеспечения численной реализации созданной математической модели для расчета контактных напряжений в очаге деформации и основных параметров холодной прокатки;

Практическая значимость работы состоит в создании методики, позволяющей определить энергосиловые параметры процесса холодной прокатки.

Основные положения, выносимые на защиту:

-результаты исследования влияния основных факторов: закономерности упрочнения, закона контактного трения и геометрической формы очага деформации на характер распределения контактных напряжений металла на валки;

-способы повышения точности теоретического расчета основных параметров прокатки;

-уточненная математическая модель процесса холодной прокатки.

-методы решения и программное обеспечение реализации математической модели;

-результаты теоретического расчета параметров холодной прокатки и их сравнение с экспериментальными данными.

Апробация работы. Материалы работы доложены и обсуждены в период с 1994г. по 1996г. на международной научно-технической конференции в Словакии, Технический университет, г. Кошице, научно-технических конференциях Приазовского государственного технического университета, кафедры "Обработка металлов давлением" Донецкого государственного технического университета.

Публикации. Основное содержание работы опубликовано в 4 статьях в научно-технических сборниках.

Структура и объем диссертации. Диссертация изложена на 184 машинописных страницах и состоит из введения, 5 глав, заключения, списка использованной литературы из 72 наименований, содержит 39 рисунка, 6 таблиц, 4 приложения.

Личный вклад автора состоит в постановке, проведении, анализе существующих методик расчета контактных напряжений и энергосиловых параметров холодной прокатки, разработке уточненной математической модели процесса холодной прокатки и программного обеспечения численной реализации модели.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

I. ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР СОВРЕМЕННОЙ ТЕОРИИ ТОНКОЛИСТОВОЙ ПРОКАТКИ

Исходя из анализа литературных источников, сделаны выводы:

1. Основным направлением развития и совершенствования теории холодной прокатки является разработка методов более точного определения контактных напряжений в очаге деформации, на основании которых определяются энергосиловые параметры с учетом упрочнения металла, контактного трения и упругой деформации валков. Упрочнение металла учитывается обычно путем использования различных упрощенных зависимостей предела текучести от обжатия, условия трения — через коэффициент трения, а упругая деформация — формулой Хичкока для определения длины дуги контакта.

2. Определенное внимание в методиках расчета энергосиловых параметров уделено учету упругой деформации полосы, влиянию температуры, скорости деформации на сопротивление металла, контактного трения не через коэффициент трения, а через силу трения в функции от ряда коэффициентов. Однако в изученных нами работах не в полной мере исследованы основные факторы, влияющие на контактные напряжения в условии упрочнения металла (действительный закон упрочнения, закон трения в зависимости от упрочнения и формы валков с учетом их сплющивания).

3. Упрощенные формулы, используемые в методиках расчета для определения силы прокатки, имеют ограниченное применение, а

аналитические формулы, учитывающие более сложные законы упрочнения (прямолинейные или параболические), были выведены с принятием грубых упрощений и допущений. Они имеют громоздкий вид, с их помощью затруднительно точно рассчитать толщину нейтрального сечения полосы и среднего давления прокатки.

2. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ УПРОЧНЕНИЯ, ТРЕНИЯ И ФОРМЫ КОНТАКТА НА РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ДАВЛЕНИЯ В ОЧАГЕ ДЕФОРМАЦИИ ПРИ ХОЛОДНОЙ ТОНКОЛИСТОВОЙ ПРОКАТКЕ

Для выбора закономерности упрочнения металла, наиболее точно описывающей процесс, установления уточненных закона трения и формы контакта металла с валками исследовано влияние каждого фактора, определяющего указанные величины. При этом использован графо-аналитический метод сравнения эпюр контактных напряжений, рассчитанных по всем возможным вариантам решения уравнения прокатки. Предварительно выполнен расчет давления металла на валки по наиболее приемлемым формулам для условий холодной прокатки полос стали 08кп при следующих исходных данных: толщина входной полосы $n=2\text{мм}$; диаметр рабочих валков $D=400\text{мм}$; коэффициент заднего и переднего натяжения $\xi_0=\xi_1=0,9$; коэффициент обжатия $\lambda=1,4$. При этом коэффициент трения f изменяли от 0,03 до 0,21 с шагом 0,03.

В итоге анализа результатов расчета были выбраны для дальнейших исследований четыре методики: А.И.Целикова, А.П.Чекмарева, А.А.Королева и А.В.Третьякова. В этих методиках приняты закон постоянства упрочнения по дуге контакта (А.И.Целиков и А.П.Чекмарев), прямолинейный (А.А.Королев) и параболический (А.В.Третьяков) законы.

Исследованы изменения расчетов, которые могут быть получены в каждой методике, если допущение о применении закона трения Амонтона заменить на допущение о применении закона трения Зибеля или наоборот. Для этого были выведены аналитические формулы определения давления с использованием законов трения Зибеля, где касательные напряжения зависят от принятых закономерностей упрочнения. Изменение внесенное в методику:

- 1) А.И.Целикова а) $\tau_x = f \cdot z \cdot k_{\text{ср}}$, где $k_{\text{ср}} = \frac{2k_1 + 2k_0}{2}$,
 $2k_0$ и $2k_1$ — сопротивление деформации металла до и после пропуска.

$$б) \tau_x = f \cdot \left[2k_0 + \Pi \left(\frac{z}{\Delta h} \right)^{n+1} \cdot \left(\ln \frac{H}{h_x} \right)^n \right],$$

где Π и n - коэффициенты, зависящие от прокатываемой полосы, h_x - текущая высота полосы;

2) А.П.Чекмарева $2k=2k_0=\text{const}$ в зоне отставания, $2k=2k_1=\text{const}$ в зоне опережения;

$$3) \text{ А.А.Королева } \tau_x = f \cdot \left[z \cdot k_1 - B(h_x - h) \right],$$

где $B = \frac{2k_1 - 2k_0}{\Delta h}$, Δh - обжатие, x - текущая координата дуги контакта;

$$4) \text{ А.В.Третьякова } \tau_x = f \cdot \left[2k_1 - A(h_x - h)^2 \right], \text{ где } A = \frac{2k_1 - 2k_0}{\Delta h^2}.$$

Уточненные формулы давления, полученные в диссертации, являются дополнением возможных решений уравнения прокатки, и они используются для анализа влияния условия трения на контактные напряжения.

Сравнение эпюр, рассчитанных по известным и уточненным формулам, позволяет оценить условие трения, а сравнение эпюр, рассчитанных по формулам разных методик - влияние закономерностей упрочнения на характер распределения давления.

При сравнении эпюр, рассчитанных по формулам А.И.Целикова и А.П.Чекмарева, выясняется влияние окружной формы валков на контактные напряжения с учетом постоянства сопротивления деформации металла по дуге контакта.

Для изучения влияния формы дуги контакта на контактные напряжения в условиях упрочнения металла разработаны и реализованы два способа уточнения решения уравнения прокатки при замене дуги контакта хордой, позволяющих получить значения давления с учетом любой формы дуги контакта. Способы заключаются в замене дуги контакта многогранником, вписанным в заданную кривую контакта, горизонтальная проекция каждой грани на оси x представлена одинаковыми отрезками длиной $L_{\text{Д}}/m$ (m - целое число). Уравнение прокатки проинтегрировано по каждой хорде последовательно со стороны входа металла в валки и выхода из них.

В этом случае уравнения прокатки и их решения для каждой хорды имеют одинаковый вид, изменяются только геометрические параметры в зависимости от дискретных значений координат $0 < L_1 < L_{\text{Д}}$. Тогда показатель трения можно вычислить по первому способу для зон отставания $\delta = \frac{2\tau(L_{\text{Д}} - L_1)}{H - h_1}$ и опережения $\delta = \frac{2\tau L_1}{h_1 - H}$, а по второму

$\delta = \frac{2rL}{m(h_i - h_{i-1})}$, где h_i и φ_i - толщина полосы и угол наклона хорды в точке i . Если дуга контакта принята окружностью, тогда $h_i = h + 2R - 2\sqrt{R^2 - L_i^2}$.

Анализ показал наличие разницы эпюр, рассчитанных по каждой методике при замене дуги хордой и окружностью.

В итоге исследования получены следующие результаты:

1. Установлено, что в условиях холодной прокатки использование закона постоянства упрочнения металла по усредненному значению не позволит получить достоверные результаты расчета энергосиловых параметров, а другие упрощенные законы - приводят к их занижению. Чем ближе принятый закон к действительному, тем больше становятся контактные напряжения в зоне отставания, а следовательно, и среднее давление. При этом нейтральное сечение смещено в сторону входа металла в валки, а в зоне опережения изменение давления незначительно.

2. Закон трения Зибеля, где касательные напряжения зависят непосредственно от упрочнения металла, является более прогрессивным по сравнению с законом Амонтона, то есть его применение отражает более правильную зависимость параметров (среднего давления, силы) от условия трения (коэффициента трения) и приводит к значительному упрощению метода решения задачи.

3. Форма дуги контакта при условиях постоянства упрочнения металла по дуге контакта металла с валками незначительно уменьшает давление в зоне отставания, а с учетом изменения упрочнения наоборот значительно повышает контактные напряжения, особенно в зоне отставания.

4. При разработке математической модели процесса прокатки должны быть учтены все основные факторы в их взаимосвязи, уточнение только одного из них может вызвать существенное ухудшение математической модели.

3. РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПРОЦЕССА ХОЛОДНОЙ ПРОКАТКИ, МЕТОДА РЕШЕНИЯ, АЛГОРИТМА И ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЧИСЛЕННОЙ РЕАЛИЗАЦИИ ПРОЦЕССА

Разработанная нами математическая модель базируется на дифференциальном уравнении равновесия Т.Кармана, с учетом изменения упрочнения по дуге контакта (рис.1)

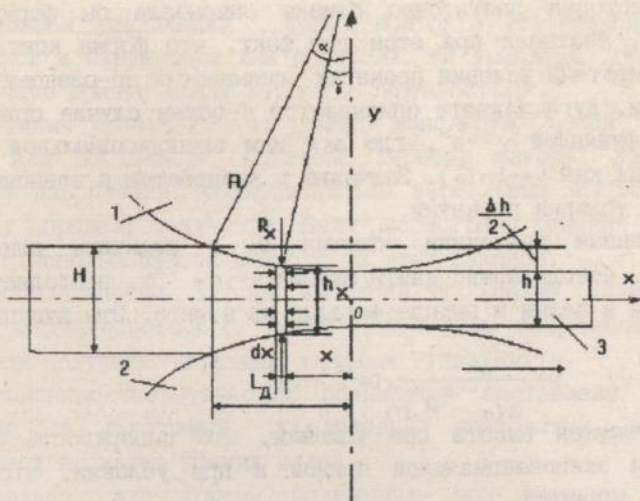


Рис.1 Схема очага деформации при холодной прокатке:
1 и 2 - рабочие валки; 3 - прокатываемая полоса.
Стрелкой показано направление прокатки.

$$\frac{dp_x}{dx} - \frac{d(2k)}{dx} - \frac{2k}{h_x} \cdot 2 \cdot \operatorname{tg} \varphi_x + \frac{2\tau_x}{h_x} = 0, \quad (1)$$

Где $h_x, \operatorname{tg} \varphi_x$ - переменные величины в зависимости от независимой переменной x .

Сопротивление деформации в очаге деформации принято по действительному закону, который подтверждается экспериментальными исследованиями

$$2k = \frac{2\sigma_{T0}}{\sqrt{3}} + \Pi \frac{2^{n+1}}{(\sqrt{3})^{n+1}} \left(\ln \frac{H}{h_x} \right)^n. \quad (2)$$

После дифференцирования уравнения (2) по независимой переменной x получим

$$\frac{d(2k)}{dx} = \Pi \cdot n \cdot \frac{2^{n+1}}{(\sqrt{3})^{n+1}} \left(\ln \frac{H}{h_x} \right)^{n-1} \frac{(-1)}{h_x} \cdot 2 \cdot \operatorname{tg} \varphi_x. \quad (3)$$

После подстановки выражения (2) и (3) в (1), получим уравнение прокатки в виде

$$\frac{dp_x}{dx} = \left[2k_0 + \Pi \left(\frac{2}{\sqrt{3}} \right)^{n+1} \left(\ln \frac{H}{h_x} \right)^n - n \cdot \Pi \left(\frac{2}{\sqrt{3}} \right)^{n+1} \left(\ln \frac{H}{h_x} \right)^{n-1} \right] \frac{2 \cdot \operatorname{tg} \varphi_x}{h_x} + \frac{2\tau_x}{h_x}. \quad (4)$$

Знак плюс перед последним членом в правой части уравнения относится к зоне опережения, а знак минус -к зоне отставания.

Для численного решения необходимо выбрать теоретическую формулу, которая достаточно близко описывала бы форму очага деформации, учитывая при этом тот факт, что форма контакта для разных конкретных условий прокатки описывается по-разному.

Допустим, дуга захвата описывается в общем случае приближенно степенной функцией $y = a^x$, где $a < 1$ или экспоненциальной $y = e^{-tx}$, где $t > 0$, так как $t = -\ln(a)$. Значение t выбирается в зависимости от конкретных условий прокатки.

По заданным значениям обжатия Δh и величины длины дуги контакта L_D всегда можно найти функцию $y = y(e^{-tx})$, проходящую через точки входа в валки и выхода металла из валков. Эта функция имеет вид

$$y = \frac{\Delta h}{2(e^{-tL_D} - 1)}, (e^{-tx} - 1). \quad (5)$$

Тогда текущая высота при условии, что поверхность контакта описывается экспоненциальной кривой и при условии, что $0 < x < L_D$ выражается формулой

$$h_x = h + \frac{\Delta h}{tL_D} \cdot (e^{tx} - 1). \quad (6)$$

Очевидно, что при $x=0$ имеем $h_x = h$ и при $x=L_D$, из (6) получим $h_x = H$.

Из уравнения (6) можно получить также выражение для тангенса угла касательной к экспоненциальной кривой

$$\operatorname{tg} \varphi_x = \frac{dh_x}{2dx} = \frac{\Delta h}{tL_D} \cdot t \cdot e^{tx}. \quad (7)$$

Разные значения t дают разные формы очага деформации. Выбираем такую форму, при которой касательная к экспоненциальной кривой в середине дуги контакта параллельна хорде. Тогда в точке $x=L_D/2$ имеется соотношение

$$\operatorname{tg} \varphi_x = \frac{\Delta h}{2L_D}.$$

После подстановки $x=L_D/2$ и $\operatorname{tg} \varphi_x = \frac{\Delta h}{2L_D}$ в (7), разделив обе части равенства на $\Delta h/2$, получим уравнение для нахождения t

$$\frac{t \cdot e^{tL_D/2}}{(e^{tL_D} - 1)} = \frac{1}{L_D}.$$

Окончательно получим

$$t = 1/L_D (1 - e^{-tL_D}) \cdot e^{tL_D/2}. \quad (8)$$

Методом итераций можно уточнить значение t для заданной длины

дуги контакта и заданного обжатия.

При определенном значении t получим форму, близкую к хорде, а при дальнейшем увеличении t форма контакта изменяется и может быть близкой к окружности или параболе. Из уравнения (8) получим промежуточную кривую между хордой и окружностью.

Для решения уравнения (4) обычно используют закон трения по Амонтону или по Зибелю. Согласно первому закону, касательные контактные напряжения пропорциональны нормальным напряжениям, а по второму — пределу текучести. Были рассмотрены решения уравнения прокатки с использованием каждого из этих законов.

При использовании закона Амонтона уравнение (4) является линейным дифференциальным. Эпюры контактных напряжений в этом случае были получены численным методом Рунге-Кутты.

На основании теоретических разработок составлены алгоритм, блок-схема и программа определения контактных напряжений при холодной прокатке тонких полос.

Установлено, что эпюры, полученные при решении уравнения прокатки с использованием закона трения по Амонтону, имеют высокие и острые вершины при больших коэффициентах трения.

Вторая математическая модель разработана с использованием закона Зибеля, но с учетом действительной закономерности упрочнения металла

$$\tau_x = \tau \cdot \left[2k_0 + \Pi \left(\frac{\varepsilon}{\sqrt{3}} \right)^{n+1} \cdot \left(1 + \frac{H}{H_x} \right)^n \right]. \quad (9)$$

Она позволяет решить широкий круг задач теории и технологии (определение нейтрального сечения, опережения, среднего давления, силы и момента прокатки) при холодной прокатке полос, простейшим численным способом с любой заданной точностью (за счет длины шага).

Дифференциальное уравнение (4), с учетом (6), (7) и (9), по виду громоздко, но оно удобно для использования при расчетах, потому что содержит одинаковые компоненты, а правая часть уравнения является сложной функцией от одной независимой переменной x . Решение этого уравнения приводит к вычислению интеграла правой части уравнения (4). Обозначим правую часть уравнения (4) для зоны отставания через $P_{OT}(x)$

$$\frac{dp_x}{dx} = P_{OT}(x);$$

для зоны опережения через $P_{OP}(x)$

$$\frac{dp_x}{dx} = P_{OP}(x).$$

Давление металла на валки P_{OTi} в точке x_i , находящейся в зоне отставания представляется определенным интегралом в интервале от точки входа до точки x_i (рис.2)

$$P_{OTi} = \int_{L_D}^{x_i} P_{OT}(x) dx, \quad (10)$$

где $|x_i| > |x_H|$; $|x_H|$ - положение нейтрального сечения.

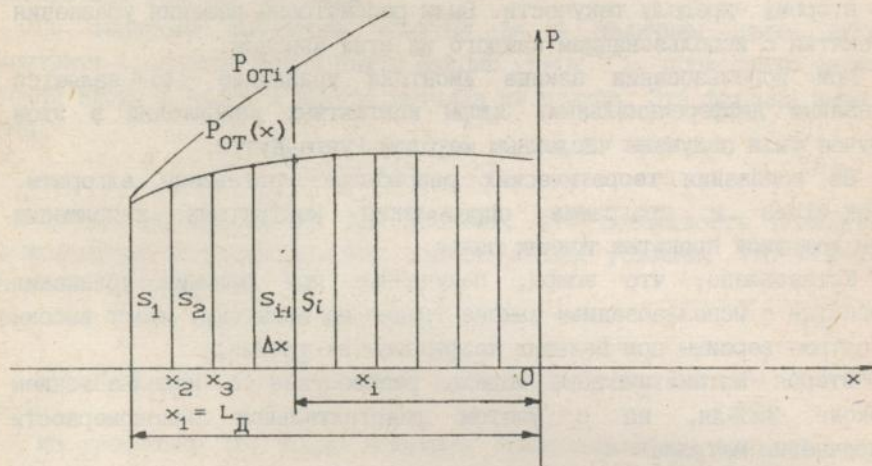


Рис.2 Схема вычисления давления как определенного интеграла.

Для зоны опережения, давление $P_{OПi}$ в точке x_i является определенным интегралом в интервале от начала координат до точки x_i при условии $|x_i| < |x_H|$:

$$P_{OПi} = \int_0^{x_i} P_{OП}(x) dx. \quad (11)$$

Отыскание точного значения интегралов (10) и (11) затруднено. Значительно легче найти приближенное значение определенного интеграла от любой непрерывной функции, с практически достаточной точностью применяя метод приближенного интегрирования.

Для этого длина очага деформаций делится на n равных частей (частичных интервалов) и криволинейные трапеции заменяются прямолинейными. Площадь каждой прямолинейной трапеции, построенной на частичном интервале, равна полусумме площадей, соответствующих этому интервалу прямоугольников

$$S_1^i = \Delta x \frac{P_{OT}^{(x_1)} + P_{OT}^{(i+1)}}{2}$$

Суммируя эти площади, получим

$$P_{OT1} = S_1 + S_2 + S_3 + \dots + S_{i-1}$$

$$\text{или } P_{OT1} = \Delta x \left[\frac{P_{OT}^{(x_1)} + P_{OT}^{(x_1)}}{2} + P_{OT}^{(x_2)} + P_{OT}^{(x_3)} + \dots + P_{OT}^{(x_{i-1})} \right] \quad (12)$$

Результат будет тем более точен, чем больше взято число частичных интервалов n . В конечном итоге получим таблицы $n+1$ значений определенных интегралов (IO): $P_{OT1}, P_{OT2}, \dots, P_{OTn+1}$. При этом $P_{OT1} = P_0$, где P_0 - давление в точке входа металла в валки.

Для зоны опережения интегральное уравнение (II) решается численным интегрированием аналогично, начиная от точки выхода металла. Результаты представляются последовательностью $n+1$ значениями определенных интегралов (II): $P_{OП1}, P_{OП2}, \dots, P_{OПn+1}$. При этом $P_{OПn+1} = P_1$, где P_1 - давление в точке выхода.

При интегрировании дуга разделена на 100 частей, что обеспечивает высокую точность. Две полученных последовательности значений сравниваются и подбирается наименьшая из них, то есть получаем одну последовательность, представляющую $n+1$ значений давления по дуге контакта от точки входа до точки выхода металла. Обозначим эту последовательность через $P_{x1}, P_{x2}, \dots, P_{xn+1}$.

В диссертации показано, что для построения эпюры достаточно взять 21 равноудаленное значение давления, то есть через каждые 5 шагов вычисления.

На основании теоретических разработок составлены алгоритм, блок-схема и программа определения контактных напряжений при холодной прокатке тонких полос по второй модели.

Полученные результаты сравнили с эпюрами, полученными по первой математической модели. Сделаны следующие выводы:

Использование законов трения Амонтона и Зибеля вместе с учетом действительного закона упрочнения, представлением дуги контакта в виде экспоненциальной кривой приводит почти к одинаковым результатам при коэффициентах трения $f=0,03-0,15$.

Учет действительного закона упрочнения вместе с применением закона трения Зибеля, где контактные напряжения трения непосредственно зависят от упрочнения, позволяет получить выпуклые эпюры.

Закон трения Зибеля приводит к значительному упрощению схемы вычисления, решение уравнения (4) можно получить с любой

точностью.

Установлено, что для расчета энергосиловых параметров процесса холодной прокатки наилучшие результаты дает использование решения системы уравнений (4), (6), (7) и (9).

4. СРАВНЕНИЕ ЭПЮР ДАВЛЕНИЯ, РАССЧИТАННЫХ ПО УТОЧНЕННОЙ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ С ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫМИ ДАННЫМИ

Чтобы подтвердить достоверность полученных результатов, в диссертации использованы экспериментальные данные А.А.Королева, полученные им в условиях опытной прокатки. А.А.Королев проводил эксперимент на стане дуо 250 мм, установленном в прокатной лаборатории ЦНИИТМАШа, прокатал несколько тысяч образцов различной толщины и ширины, представил более ста опытных эпюр.

Материал образцов: отожженный лист углеродистой стали толщиной 1,95 и 2 мм шириной 20-50 мм, длиной 200-300 мм. При прокатке с натяжением применяли рулонную стальную ленту шириной 30-50 мм, толщиной 1-2 мм. Для обеспечения двухмерной деформации было принято отношение ширины к толщине образцов $b/h=10-20$.

Сопrotивление деформации полосы в точке выхода металла из валков рассчитано по формуле (2). Так как в опытах использовали стальные полосы из сталей 10 и 08кп, то соответственно выбрали коэффициенты $\mu=40,8$ и $n=0,54$.

В литературе, где представлены опытные эпюры распределения контактных напряжений, нет сведений о коэффициентах трения и условиях прокатки, по которым можно было бы их определить. Существуют табличные значения, графики, а также формулы для определения коэффициента трения. В своих экспериментах А.А.Королев прокатывал образцы без смазки, поэтому выбор производили для прокатки в сухих валках.

В лаборатории кафедры прокатного производства Празовского государственного технического университета проводили опытную прокатку для условий, которые принял А.А.Королев. По расчетным данным рекомендуем принять коэффициент трения, равный $\mu=0,11$.

Для построения теоретических эпюр были составлены программы расчета и построения эпюр контактных напряжений с помощью разработанной математической модели для условий прокатки, которые описаны в таблице. В эту программу были введены также экспериментальные данные, полученные А.А.Королевым для сравнения

с теоретическими.

Технологические параметры опытной прокатки без натяжения, с задним натяжением представлены в следующей таблице

		а	б	в	г
Диаметр рабочих валков	мм	248,6	248,6	248,6	248,6
Толщина полосы	н	2,0	2,0	2,0	2,0
Обжатие	ε	0,50	0,55	0,57	0,59
Заднее натяжение σ_0	МПа	0,00	77	136	227
Перед. натяжение σ_1	МПа	0,0	0,0	0,0	0,0
Теоретическая длина дуги контакта L_D	мм	11,5	11,7	12,0	12,2

На рис.3 показаны эпюры, полученные опытным путем А.А.Королева и эпюры, рассчитанные теоретически по уточненной математической модели.

Рассчитанные эпюры имеют выпуклую форму, качественно и количественно близки к опытным.

Применение уточненной математической модели позволяет точнее решить дифференциальное уравнение прокатки и уменьшить погрешность расчета основных параметров прокатки.

5. РАСЧЕТ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ПРОКАТКИ С ПОМОЩЬЮ УТОЧНЕННОЙ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

Формула определения среднего давления прокатки зависит от решения дифференциального уравнения прокатки p_x и получается из интегрального уравнения

$$P_{\text{ср}} = \frac{1}{L_D} \left[\int_0^{L_D} p_x(x) dx + \int_{L_D}^{L_D} p_x(x) dx \right], \quad (13)$$

где p_x текущее давление металла на валки. Из полученных эпюр контактных напряжений графическим путем можно определить положение нейтрального сечения, равнодействующую, численно равную площади эпюры, и плечо момента, равное расстоянию от сечения выхода металла до центра тяжести этих эпюр. При определении силы и момента прокатки этим способом нет необходимости вывода формулы для нейтрального сечения, которая обычно выведена с грубым упрощением и приводит к завышению расчетных значений.

При численной реализации уравнения прокатки решение является

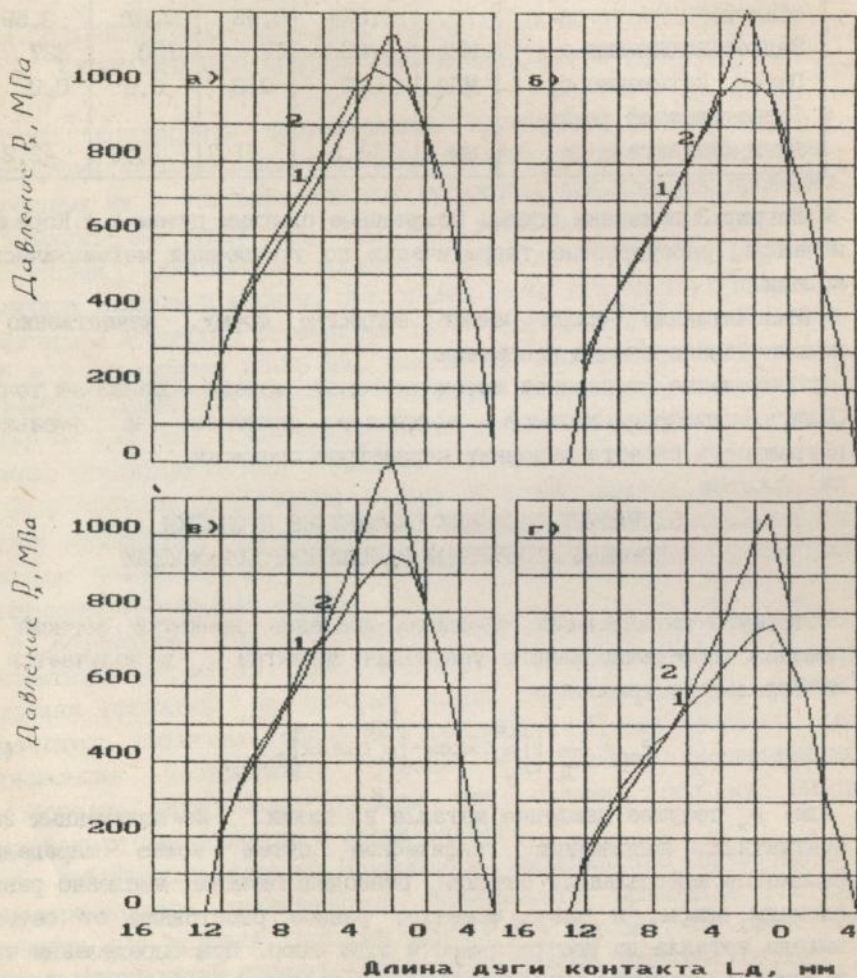


Рис.3 Эпюры давления металла на валки: 1-опытные по данным Я.Я.Королева; 2-рассчитанные по уточненной математической модели.

дискретной функцией с значениями $P_{x1}, P_{x2}, \dots, P_{xn+1}$. Поэтому интеграл определяют приближенно по формуле

$$P = \Delta x \left[\frac{P_{x1} + P_{x2}}{2} + \frac{P_{x2} + P_{x3}}{2} + \dots + \frac{P_{xn} + P_{xn+1}}{2} \right]$$

или
$$P = \Delta x \left[\frac{P_{x1} + P_{xn+1}}{2} + P_{x2} + P_{x3} \dots P_{xn} \right]. \quad (14)$$

Среднее давление равняется отношению силы прокатки к длине очага деформации

$$P_{cp} = \frac{P}{L_d}$$

Момент прокатки определяется из выражений

$$M = P \cdot a,$$

где a - плечо момента.

Плечо момента сил определяют из эпюр давления, принимая, что вертикальная составляющая равнодействующей проходит через центр их тяжести. По шагам вычисления эпюра разбивается на ряд площадей, близких к правильным фигурам. Графическим путем определяем местонахождение центра тяжести каждой из фигур, начиная от сечения выхода металла из валков

$$0,5\Delta x; 1,5\Delta x; 2,5\Delta x; 3,5\Delta x; \dots (n-0,5)\Delta x.$$

Затем по выражению

$$P a = \Delta x \cdot \left[\frac{P_{xn+1} + P_{xn}}{2} \cdot 0,5\Delta x + \frac{P_{xn} + P_{xn-1}}{2} \cdot 1,5\Delta x + \dots + \frac{P_{x2} + P_{x1}}{2} \cdot (n-0,5)\Delta x \right],$$

или $a = \frac{\Delta x}{P} \left[\frac{P_{xn+1}}{4} + 1 \cdot P_{xn} + 2 \cdot P_{xn-1} \dots + (n-1) P_{x2} + \frac{P_{x1}}{2} \cdot (n-0,5) \right]$ подсчитывается расстояние от центра тяжести эпюры давления (длина плеча момента) до сечения выхода.

По формуле Хичкока расчетная длина дуги контакта, как установлено многими экспериментальными исследованиями, значительно меньше длины дуги контакта, определяемой опытным путем (на 23,5-32,6%), поэтому длину сплюсненной дуги контакта в условиях холодной прокатки правильнее рассчитывать по зависимости, рекомендованной Д.И. Старченко

$$L_{dc} = 1/4 \cdot \left(\sqrt{\frac{P_{cp} \cdot R_c}{95000}} + \sqrt{\frac{P_{cp} \cdot R_c}{95000} + 4 \sqrt{R_c (\Delta h + \frac{P_{cp}}{95000} \sqrt{R_c \cdot \Delta h})}} \right)^2, \quad (15)$$

где $R_c = L_{dc}^2 / \Delta h$.

Зависимость получена при рассмотрении деформации рабочих валков как упругого сжатия цилиндра в контакте с плоской плитой, а не двух цилиндров, как это предложено Хичкоком. В этом случае ширина контактной площадки будет вдвое больше, чем при сжатии двух цилиндров.

Такие взаимосвязанные расчеты выполняются способом итерации по

специально разработанному алгоритму. На основании теоретических исследований разработанный алгоритм определения среднего давления и других параметров предусматривает следующую последовательность:

- 1) задаем условия прокатки $n; \lambda; \sigma_0; f; \Pi; n; D$;
- 2) принимаем, что валки абсолютно твердые, из условий прокатки определяются технологические параметры без учета упругого сплющивания валков $\Delta h; L_{Д}; \sigma_{T1}; k_0; k_1; h; \xi_0; \xi_1$;
- 3) считаем, что $L_{ДС}$ на 10-15% больше $L_{Д}$;
- 4) вычисляем коэффициент t по уравнению (8), итерацией задавая в качестве первого значения $1/L_{ДС}$;
- 5) по значениям Δh и $L_{ДС}$ определяем текущую высоту полосы h_x и тангенс угла контактной поверхности $t_{\varphi x}$ по формулам (6) и (7);
- 6) решаем уравнение прокатки (4) методом численного интегрирования. Для этого длина очага деформации разбивается на 100 частей (чем меньше шаг вычисления, тем точнее получается решение). Вычисляем функцию $d p_x / dx$ на каждой точке дуги контакта для зоны отставания и опережения. По дискретным функциям $d p_x / dx$ численно определяем давление металла на валки, как определенные интегралы от точки входа и выхода полосы по формуле (12). Два полученных значения сравнивают и выбирают наименьшее из них. В результате получается ряд 101 значения давления распределенных по дуге контакта;
- 7) по эпюре давления определяют силу прокатки по формуле (14) и среднее давление также численным интегрированием;
- 8) определяют длину дуги контакта с учетом сплющивания валков по формуле (15);
- 9) расчет повторяют от пункта 4 до заданной точности для $L_{ДС}$;
- 10) определяют толщину нейтрального сечения, опережение, плечо момента и момент прокатки.

Разработаны блок-схема и программа расчета среднего давления и коэффициента опережения по уточненной математической модели и по методикам А.И.Целикова, А.В.Третьякова-Б.Е.Локшина и А.А.Королева для условий опытной прокатки стальной полосы размером 1,95x30 мм. Расчет был приведен для случаев прокатки без натяжения, с задним и передним натяжениями. Полученные данные сравнивали с опытными.

Разработаны также способ, алгоритм и программа определения толщины нейтрального сечения по известным методикам. Рассчитанные коэффициенты опережения по разным методикам также были сравнены с опытными данными А.А.Королева (рис.4).

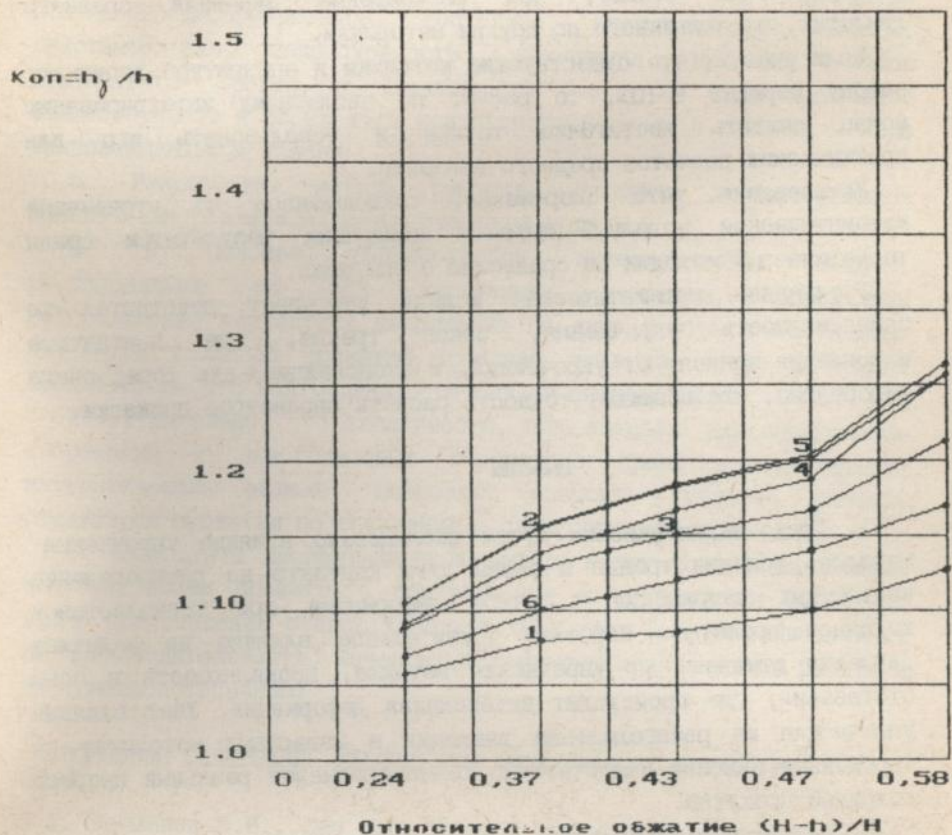


Рис. 4 Зависимость коэффициента опережения $K_{оп} = h_g/h$ от относительного обжатия: 1-опытная по данным А. П. Королева; теоретические по методике: 2-А. И. Целикова; 3-А. В. Третьякова; 4-А. А. Королева; 5-В. И. Капланова; 6-по уточненной математической модели для условий опытной холодной прокатки полос из стали 10 размером $1,9 \times 30$ мм; $D=248,6$ мм; без натяжения, при коэффициенте трения $f=0,11$.

Установлено, что расхождение между экспериментальными и расчетными данными среднего давления по методу численного интегрирования меньше, чем расхождение значений среднего давления, рассчитанного по другим методикам.

Если учесть, что существующие методики и аппаратура допускают ошибку порядка 5-10%, то расчет по численному интегрированию можно считать достаточно точным и использовать его для практических расчетов среднего давления.

Установлено, что опережение, определенное по уточненной математической модели, является наилучшим результатом среди теоретических методик по сравнению с опытными.

Уточненная математическая модель учитывает действительную закономерность упрочнения, закон трения, где контактные напряжения зависят от упрочнения, и экспоненциальную форму очага деформации, что повышает точность расчета параметров прокатки.

ВЫВОДЫ

1. Графо-аналитическим путем исследовано влияние упрочнения металла, условия трения и формы дуги контакта на распределение контактных напряжений в очаге деформаций при тонколистовой холодной прокатке. Наиболее значительное влияние на величину давления отмечено от упрочнения металла, проявляющееся в зоне отставания, где происходит интенсивная деформация. Учет влияния упрочнения на распределение давления в известных методиках по упрощенным законам недостаточно точно описывает реальный процесс холодной прокатки.

2. В условиях деформации с упрочнением металла для повышения точности расчета энергосиловых параметров предложено использовать закон трения Зибеля в зависимости от закономерности упрочнения, который обеспечивает более точные результаты в различных условиях прокатки и позволяет применить простой способ решения.

3. С целью утверждения достоверности закона трения в зависимости от упрочнения были выведены аналитические формулы определения контактных напряжений для условий прокатки с учетом упрочнения металла и условия трения по постоянному, прямолинейному и параболическому законам, которые являются дополнением возможных решений уравнения прокатки.

4. Разработана математическая модель процесса холодной

прокатки. Основу модели составляют зависимости, характеризующие напряженно-деформационное состояние прокатываемой полосы: действительная закономерность упрочнения металла, закон контактного трения в зависимости от этой действительной закономерности и форма дуги контактного металла с валками в виде экспоненциальной кривой.

5. Разработаны методы решения, алгоритм и программное обеспечение реализации математической модели.

6. С помощью разработанной математической модели, реализованной на ЭВМ численными методами, определены распределение контактных напряжений по дуге контакта и основные параметры холодной прокатки (среднее давление, сила и момент прокатки, высота нейтрального сечения и опережение).

7. Установлено, что зависимости, предложенные для определения опережения и энергосиловых параметров прокатки (уточненная математическая модель) позволяют повысить точность расчета параметров прокатки по сравнению с существующими моделями.

8. Результаты диссертационной работы могут быть использованы конструкторами прокатного оборудования и технологами прокатных цехов при создании станов холодной прокатки, выбора рациональных по производительности, качеству и энергозатратам режимов работы и их совершенствованию.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНО В РАБОТАХ:

1. Капланов В.И., Дао Минь Нгынг, Теоретическое исследование влияния упрочнения и трения на распределение давления в очаге деформации при холодной тонколистовой прокатке. -Мариуполь, 1995. -Деп. II.05.95, в Укр ИНТЭИ, № I2I2. -I7с.

2. Капланов В.И., Дао Минь Нгынг, Современная теория распределения давления металла на валки при листовой прокатке // Вестник Приазовского гос. техн. университета /ПТУ. -Мариуполь, 1995. -Вып. I. -С. 64-71.

3. Капланов В.И., Дао Минь Нгынг, Контактные напряжения при холодной тонколистовой прокатке // Acta Metallurgica Slovaca: Mimoriadne cislo special issue. -Kosice, 1996. -№2. -С. I7-20.

4. Капланов В.И., Дао Минь Нгынг, Теоретическое исследование давления металла на валки при холодной тонколистовой прокатке // Тезисы докладов III региональной научно-технической конференции:

Труды Приазовского государственного технического университета.
-Мариуполь, 1995. -Т.IV, Часть 2. -С 4.

АНОТАЦІЯ

Дào Minh Ngung "Теоретичне дослідження розподілу контактних напруг в осередку деформації при тонкалистовій холодній прокатці".

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.03.05 -"Процеси і машини обробки тиском".

Донецький державний технічний університет. Донецьк, 1996.

Основний зміст роботи опубліковано в 4 статтях в науково-технічних збірниках.

В дисертації наведено аналіз відомих методик визначення контактних напруг, теоретично досліджено вплив зміщення металу, умови тертя та форми контакту смуги з валками на форму епюри тиску. Обґрунтована необхідність урахування основних факторів в їх взаємозв'язку

Розроблена витончена математична модель осередку деформації холодної прокатки з урахуванням дійсної закономірності зміщення металу по дужці контакту, закону тертя в залежності від цієї дійсної закономірності і представлення форми дуги контакту у вигляді експоненціальної кривої.

За допомогою витонченої математичної моделі, численним методом визначено основні енергосилові параметри холодної прокатки тонких смуг з більш високою точністю в порівнянні з відомими методиками.

ABSTRACT

Dao Minh Ngung "Theoretical research of distribution contact tension in deformation zone of cold steel strip rolling"

This dissertation is to obtain a scientific degree of the candidate of technical sciences on a speciality 05.03.05 -"Processes and Machines of processing by Pressure".

Donetsk State Technical University, Donetsk, 1996.

the main contents of the work is published in 4 articles in the technological collections.

On the dissertation the analysis of known techniques for

definition of contact tension is indicated, influence of hardening of a metal, condition of friction and form of contact of a band with rolls on the form drafts of pressure is theoretically investigated.

Necessity of the account of the main factors and their interrelation is justified.

Specified mathematical model of the hearth of deformation cold rolling in view of valid law of hardening of a metal on an arch of contact, law of friction depending on this valid dependence and representation of the form of an arch of contact in a kind of exponential function.

With the help of specified mathematical model parameters of cold strip rolling are determined by numerical methods in comparison with known techniques.

Stankov

43556
AB 35.596