

1562360

На правах рукописи

МАШКОВА Надежда Николаевна

**РАЗРАБОТКА И ПРАКТИЧЕСКОЕ
ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА АНАЛИЗА
НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ
МЕТАЛЛА ДЛЯ ПРОЦЕССОВ ГОРЯЧЕЙ
СОРТОВОЙ ПРОКАТКИ**

**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 1999

Работа выполнена в Московском Государственном институте стали и сплавов (Технологическом Университете) и Московском институте электроники и математики (Технический Университет).

Научные руководители:

доктор технических наук, профессор ЧУМАЧЕНКО Е. Н.,
доктор технических наук ЛИСИН В. С.

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор БРИНЗА В. В.,
кандидат технических наук, доцент БОРИСОВ А. П.

Ведущее предприятие ОАО «Электросталь».

Защита состоится « 19 » мая . . . 1999 г.

и диссертационного совета
Государственном Техническом
и по адресу 107005, г. Москва,

комиться в библиотеке МГТУ
авок: 267-09-63.

» апреля . . . 1999 г.

1562360

онного совета
оцент, к. т. н. ШУБИ

НТБ МГТУ им. Н. Э. Баумана



1562360

Машкова Н. Н. Разработка и

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. В условиях современного рынка и жесткой конкуренции важное место принадлежит расширению и совершенствованию профильного и марочного сортамента проката и повышению его качества, наиболее полному использованию возможностей установленного оборудования. Все чаще возникает необходимость в производстве малых партий проката, новых для отечественных прокатных цехов, требующих модернизации существующих и разработки новых калибровок валков, позволяющих оперативно решать поставленные задачи.

Промышленные экспериментальные исследования в этой области чрезвычайно дорогостоящи, и не всегда возможны в производственных условиях. Значительная трудоемкость таких исследований и недостаточная полнота имеющихся в литературе экспериментальных данных по прокатке в калибрах замедляет и делает более дорогой разработку новых технологических процессов и усовершенствование существующих.

Одним из вариантов решения этой проблемы является создание компьютерной системы, моделирующей процесс деформирования металла при прокатке в калибрах и позволяющей избежать трудоемких и дорогостоящих промышленных экспериментов, связанных с получением необходимой информации для разработки наиболее рациональной технологии прокатки.

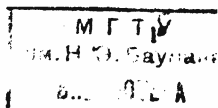
Существующие модели прокатки в калибрах либо не дают в достаточном объеме необходимую информацию о дифференциальных характеристиках напряженно-деформированного состояния (НДС) в очаге деформации, не учитывая влияния на процесс элементов калибров, либо требуют для реализации вычислений слишком много времени, мощной и дорогостоящей вычислительной техники, что существенно ограничивает возможности их применения для исследования и проектирования технологических процессов в реальных условиях.

Таким образом, становится актуальной разработка математической модели прокатки в калибрах, наиболее полно и адекватно отражающей процессы, протекающие в деформируемой полосе. При этом возникает потребность в компьютерных программах, обеспечивающих достаточное быстродействие, учитывающих особенности сортовой прокатки, позволяющих анализировать явления, происходящие в очаге деформации, и на основе их анализа проектировать новые и модернизировать действующие калибровки валков в условиях калибровочного бюро сортопрокатного цеха.

Целью настоящей работы является создание и реализация на ЭВМ математической модели НДС в очаге деформации при прокатке сортовых профилей и исследование с её применением влияния на качество проката параметров формоизменения и напряженного состояния металла для использования при проектировании в интерактивном режиме технологических процессов.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

- С использованием методов механики сплошной среды и вычислительных методов разработать модель изотермического установившегося процесса прокатки в вытяжных калибрах, дающую наиболее полную информацию об интегральных и дифференциальных характеристиках напряженно-деформированного состояния, отличающуюся при этом достаточно высоким быстродействием.



- С использованием современных ЭВМ на основе этой модели разработать и реализовать вычислительную систему, позволяющую с помощью графического и численного представления полученной информации анализировать заполнение калибра, энергосиловые параметры и дифференциальные характеристики напряженно-деформированного состояния в геометрическом очаге деформации и оценить их влияние на качество проката.
- Исследовать устойчивость получаемого численного решения.
- С использованием предложенной модели выполнить комплекс расчетных экспериментов и провести сравнительный анализ результатов с параметрами действующих калибровок валков и данными лабораторных исследований, а также с результатами, полученными при использовании вычислительных систем зарубежными исследователями и опубликованными в технической литературе. Оценить достоверность получаемых расчетных результатов.
- Для широкого диапазона варьирования геометрических и технологических параметров исследовать основные закономерности процесса прокатки в вытяжных калибрах.
- Разработать методику анализа, поиска и уточнения формы промежуточных калибров при расчете вытяжных систем, обеспечивающих качество готового проката и экономию энергоресурсов.

Научная новизна.

Разработана модификация полуаналитического метода конечных элементов для решения объемной задачи прокатки и алгоритм построения пространственного НДС полосы в очаге деформации при установившемся режиме прокатки в калибрах.

В интерактивном режиме в рамках общей постановки задачи с учетом влияния параметров процесса, реологических свойств металла, условий трения в продольном и поперечном направлениях, неравномерности деформаций в поперечном сечении разработан алгоритм решения, позволяющий получить не только интегральные характеристики процесса (коэффициент вытяжки, уширение, распределение контактных давлений, усилие и момент прокатки и др.), но также дифференциальные характеристики НДС полосы, что позволяет осуществлять целенаправленный научный поиск рациональных технологических параметров процесса, а также форм и размеров полосы и калибров.

Достоверность основных положений диссертации обеспечена строгостью постановки задачи и применением современных обоснованных, сходящихся и устойчивых вычислительных методов и приемов механики сплошной среды; подтверждается сравнительным анализом результатов расчёта и данных лабораторных и промышленных экспериментальных исследований; сопоставлением полученных решений с результатами решения подобных задач другими авторами; практическим применением системы в промышленности.

Практическая значимость и реализация работы.

- разработан комплекс вычислительных программ для компьютерного моделирования и исследования процесса прокатки в вытяжных калибрах в широком диапазоне конструктивных и технологических параметров, дающий возможность существенно сократить количество трудоемких промышленных экспериментов, ускорить разработку рациональных технологических режимов, включая калибровки валков, обеспечивающий

ввод исходных данных, все вычисления по предложенным алгоритмам и наглядный графический вывод результатов расчетов;

- предложена методика анализа калибровки валков с использованием вычислительной системы SPLEN-S (Rolling), алгоритм поиска и уточнения наиболее рациональной формы промежуточных калибров;
- опытно-промышленное опробование системы выполнено в калибровочном бюро АО “ММК” на действующих калибровках сортовых станов 500, 300-2, 250-1 и проволочного стана 250-2 АО “ММК”. Полученные результаты расчета обладают высокой степенью достоверности, а пользовательский интерфейс и графические возможности представления результатов удобны пользователю. Вычислительная система SPLEN-S (Rolling) использовалась в течении 1995-1997 гг. при разработке и совершенствовании калибровок на сортопрокатных станах АО “ММК”;
- вычислительная система использована при разработке промышленной калибровки валков на сортопрокатном стане 320/250 завода “Серп и Молот” для прокатки полосы 18×36 мм из стали Ст 35.

Апробация работы. Материалы диссертации докладывались на научном семинаре кафедры РК-5 “Сопротивление материалов” МГТУ им. Н.Э. Баумана, II международной научно-технической конференции “Моделирование и исследование сложных систем” в г. Кашира в 1998 г., на научной конференции студентов и молодых ученых МИСиС в 1996 г., на международной научной конференции студентов и молодых ученых “Ломоносов-96” в МГУ.

Публикации. По основному содержанию диссертации опубликовано 6 статей в технических журналах и сборниках.

Объем работы. Диссертация состоит из введения, 5 глав и выводов, изложена на 198 страницах машинописного текста, включает 10 таблиц, 63 рисунка, 3 приложения, библиографический список из 160 наименований.

ОБЗОР СУЩЕСТВУЮЩИХ МОДЕЛЕЙ ПРОКАТКИ.

В настоящее время одним из основных направлений исследований, связанных с моделированием процессов прокатки, является развитие статистических моделей, отражающих опыт проектирования и промышленного освоения калибров и часто учитывающих большое количество факторов. Именно на таких моделях и формулах, в сочетании с инженерными методами моделирования для определения энерго-силовых параметров, основано большинство появившихся в последнее время пакетов программ, предназначенных для проектирования и оптимизации калибровок валков.

Другое направление — развитие методов и алгоритмов, позволяющих моделировать процессы, происходящие в очаге деформации и предсказывать формоизменение металла в процессе деформирования. Часть информации позволяют получить методы линий скольжения и функций тока, развитие которых продолжается. Но необходимые для решения этими методами допущения существенно сужают круг задач и не позволяют изучать сложное течение металла, возникающее при прокатке в калибрах.

Более широкий класс задач позволяют решать вариационные методы моделирования. Вариационные методы теории пластичности широко применялись для исследования процесса прокатки Г.А. Смирновым-Аляевым, П.И. Полухиным, В.М. Клименко, Д.И. Балонем, Б.М. Илюковичем, А.Н. Скороходовым, Г.Я. Гуном, В.К. Смирновым, В.Л. Колмогоровым, В.М. Бровманом и другими исследователями. Вариационная постановка задач не ставит каких-либо ограничений на реологические свойства среды, форму рабочего инструмента и очага деформации. Появилась возможность учета зависимости механических свойств среды от деформации, скорости деформации и температуры в очаге деформации.

Обзор численных методов, используемых для решения задач ОМД, показал, что наиболее эффективным при решении поставленной задачи является метод конечных элементов. Этот метод занял достойное место и успешно использовался для моделирования прокатки в работах отечественных и зарубежных авторов. Однако, существующие модели в основном описывают процесс прокатки в гладких валах, а в тех случаях, когда описывают сложный трехмерный процесс, требуют для вычисления значительных затрат времени и мощной вычислительной техники.

МЕТОДИКА РАСЧЕТА ДЕФОРМАЦИОННЫХ И ЭНЕРГОСИЛОВЫХ ПАРАМЕТРОВ ПРОКАТКИ СОРТОВЫХ ПРОФИЛЕЙ.

Объемное напряженно-деформированное состояние описывается следующей системой уравнений

$$\begin{cases} \sigma_{ij,j} = 0 \\ \sigma_{ij} = \mu \cdot (v_{i,j} + v_{j,i}) + [(K \cdot \Delta t - \frac{2}{3} \mu) \cdot v_{p,p} + \sigma^*] \cdot \delta_{ij} \end{cases} \quad i, j = \overline{1,3}. \quad (1)$$

Уравнения (1) с граничными условиями, заданными либо в напряжениях, либо в скоростях, либо смешанного типа на разных участках границы деформируемого тела, составляют замкнутую систему уравнений механики твердого деформируемого тела.

При выводе уравнения механического состояния использовались следующие положения и соотношения:

- соотношения Навье, связывающие компоненты тензора скорости деформаций $\dot{\epsilon}_{ij}$ с компонентами вектора скорости перемещения частиц v_i .

$$\dot{\epsilon}_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right); \quad (2)$$

- тензорные свойства материалов, обладающих скоростной чувствительностью, совпадают со свойствами нелинейных изотропных вязких жидкостей;
- средние напряжения рассчитываются из соотношения

$$\sigma = K \cdot \int_0^t \dot{\epsilon} dt = \sigma^* + K \cdot \Delta t \cdot \dot{\epsilon}; \quad (3)$$

- поле температур T в рассматриваемых задачах предполагается известным, и поэтому уравнения механики сплошной среды становятся замкнутыми только на основании связи $\sigma_u = \Phi(\dot{\varepsilon}_u, \varepsilon_u, T)$, где ε_u и T выполняют роль параметров.

Приближённое решение строится методом гидродинамических аналогий.

Реализация в полном объеме вычислений по поиску трёхмерного НДС ведет к большому объёму вычислительных операций и требует много времени, даже при нынешнем высоком уровне развития вычислительной техники. Поэтому, при создании модели стояла задача построения системы, которая может работать в реальном режиме времени, позволяя оптимизировать процесс, рассчитывая большое количество вариантов.

С целью повышения быстродействия алгоритма, построенного для решения рассмотренной системы уравнений (1) с заданными граничными условиями, предложено использовать идеи полуаналитического метода конечных элементов.

Предполагается, что для произвольного элемента очага деформации Δz достаточно малой толщины dz , величина $\dot{\varepsilon}_z$, характеризующая скорость относительного удлинения волокон в элементе толщиной dz , постоянна $\dot{\varepsilon}_z|_{z=\bar{z}} = C$. При этом в каждом сечении $z = \bar{z}$ константа C имеет свое значение.

Показано, что в любом фиксированном элементе Δz компоненты скоростей перемещений частиц элемента Δz относительно поверхности валков, имеют вид:

$$v_x = v_x(x, y), \quad v_y = v_y(x, y), \quad v_z = C \cdot \bar{z}, \quad \bar{z} \in [z, z + \Delta z]$$

То есть, трёхмерное поле скоростей элемента Δz разбивается на две составляющие. Поле скоростей $\{v_x, v_y\}$ в сечении, перпендикулярном направлению прокатки, получается из конечно-элементной аппроксимации. Другая составляющая — компонента скорости v_z в направлении прокатки, вычисляется с помощью итерационной процедуры при поиске константы C , описанной далее.

Таким образом, исходная объёмная задача для элемента Δz приведена к “обобщённой” двумерной задаче, которая, в предположении, что константа C известна, может быть решена с использованием метода конечных элементов.

В продольном и поперечном направлении возможно принять один из трех вариантов закона трения между валками и обрабатываемым металлом: закон Кулона, Зибеля или формулу Леванова

$$\tau^A = k_{mp} \cdot 0.58 \cdot \sigma_u \cdot (1 - e^{-1.25 \frac{P}{\sigma_u}}),$$

где σ_u — интенсивность напряжений в приконтактном слое; k_{mp} — обобщенная характеристика контактной поверхности, учитывающая её шероховатость, наличие, характер и толщину смазки, адгезионные свойства пары деформируемый металл-инструмент, наличие окисных пленок, температуру на контакте и другое.

Очаг деформации в продольном направлении разбивается на две зоны, в которых сила трения имеет противоположное направление (рис.1а). Предполагается, что конфигурация и положение нейтрального сечения, являющегося границей этих зон, известно на начало моделирования и вычисляется при задании исходных дан-

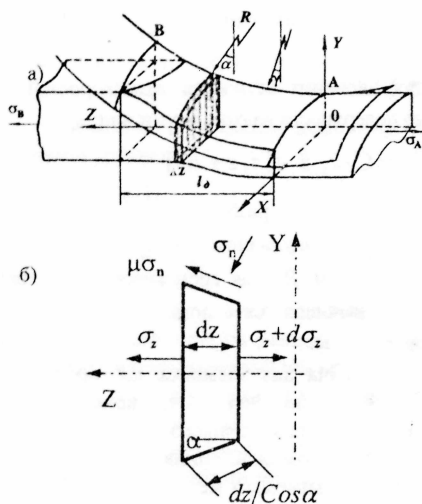
ных до определения НДС металла. Для определения формы и положения нейтрального сечения предложен алгоритм.

Рассмотрен общий случай прокатки с передним и задним натяжением, характерный для продольной прокатки на непрерывных станах. Напряжения растяжения, возникающие в прокатываемой полосе, обозначены через σ_z при входе в валки, когда $z = l_0$, и σ_A на выходе из них, когда $z = 0$ (см. рис. 1а). Тогда

$$\sigma_z^H = \sigma_A + (\sigma_B - \sigma_A) \cdot \frac{1}{l_0} \cdot z, \quad (4)$$

где σ_z^H — напряжение, возникающее в элементе Δz полосы из-за действия напряжений на входе в очаг деформации и на выходе из него;

$z = l_0$ — координата захвата полосы валками.



Рассмотрим силы и напряжения, действующие на элемент, выделенный сечениями z и $z + dz$, изображенный на рис. 1б.

Уравнение равновесия сил, действующих на элемент Δz в проекции на ось Oz имеет вид:

$$\frac{\partial \sigma_z}{\partial z} = 0. \quad (5)$$

Рис. 1

- а) схема очага деформации при продольной прокатке;
б) напряжения, действующие при продольной прокатке на слой бесконечно малой толщины.

После интегрирования его по объему элемента, выделенного сечениями z и $z + dz$, получим:

$$\int_S (\sigma_z - \sigma_z^H) dx dy + \int_\Gamma (\sigma_n \mp \tau_z) d\Gamma = 0, \quad (6)$$

где σ_n, τ — нормальное и касательное напряжения, соответственно, действующие на элемент боковой поверхности $d\Gamma$;

σ_n, τ_z — соответствующие проекции этих напряжений на ось Oz ;

σ_z^H — напряжение, возникающее из-за воздействия концов полосы;

S — поперечное сечение полосы прокатываемого металла.

Полагая толщину элементарного объема единичной, окончательно получим.

$$\int_S \sigma_z dx dy \pm 2\mu \int_{\Gamma} \sigma_n dl + 2tg\alpha \int_{\Gamma} \sigma_n dl - \sigma_z^H \cdot S = 0. \quad (7)$$

Знак “плюс” берется для зоны опережения, а “минус” — для зоны отставания.

Также предполагается, что обрабатываемая полоса не содержит инородных включений и пустот, то есть полоса однородна. Материал полосы изотропный.

В модели рассматривается процесс горячей прокатки. Это позволяет считать возникающие при прокатке контактные давления относительно низкими, что дает возможность пренебречь деформацией валков.

При определении распределения напряжений в элементе Δz принято, что угол α мал (см. рис. 1а), поэтому вместо пространственно ориентированного вектора σ_n можно использовать его проекцию на плоскость, ортогональную направлению прокатки.

Для построения пространственного НДС очага деформации по длине разделим на m частей поперечными сечениями, в каждом из которых при $z = z_k = \text{Const}$ определяется величина $\dot{\epsilon}_z : \dot{\epsilon}_z^k \Big|_{z=z_k} = C_k$.

Алгоритм решения пространственной задачи (рис. 2) для каждого отдельного элемента Δz_k основан на поиске нуля функционала

$$\Phi(C_k) = \int_S \sigma_z dx dy + 2(tg\alpha \pm \mu) \int_{\Gamma} \sigma_n dl - \sigma_z^H \cdot S, \quad (8)$$

полученного из уравнения равновесия (5), спроектированного на направление прокатки. С помощью метода конечных элементов определяются напряжения в элементе Δz_k при фиксированном C_k , а затем вычисляется значение функционала $\Phi(C)$ (8), т. е. если его абсолютное значение не достаточно близко к нулю, НДС продолжается с изменённой константой C_k . По полученному решению, удовлетворяющему условию

$$|\Phi(C_k)| \leq \varepsilon, \quad (9)$$

определяется конфигурация сечения полосы, являющаяся начальной для следующего этапа деформирования. В работе показано, что константа C_k , обеспечивающая условие (9), всегда существует.

Окончательно скорость продольного перемещения частиц в произвольном сечении $z = \tilde{z}$ очага деформации определяется соотношением

$$v_z^k = C_k \cdot \tilde{z} + f_k(z),$$

где $\tilde{z} \in \Delta z_k$;

$f_k(z)$ — скорость перемещения элемента Δz_k как твердого тела.

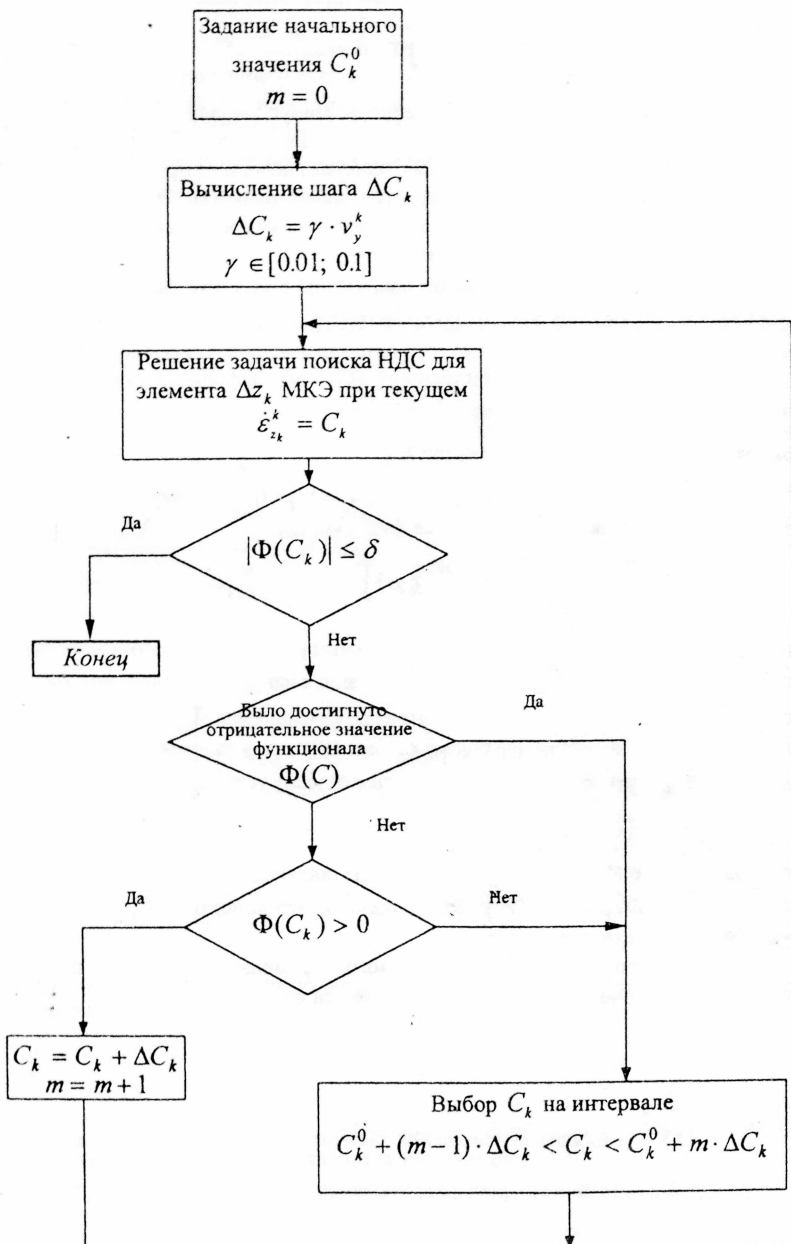


Рис. 2. Алгоритм быстрого поиска константы C_k для элемента Δz_k очага деформации.

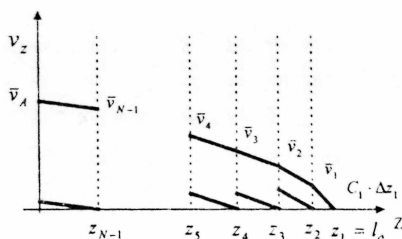


Рис. 3. Схема предварительного построения графика продольных скоростей частиц полосы.

На входе в очаг деформации $f_0(l_0) = v_0$ (рис. 3).

При выборе направления действия силы трения для задания граничных условий на контакте полосы с валком использован алгоритм для предварительного определения формы и положения нейтрального сечения, предложенный в работе.

Также, для построения решения в элементе объема Δz_k учитывается изменение контура сечения вала при переходе от одного элемента объема Δz_k к следующему:

$$y_k^p = (R + h) - \sqrt{((R + h) - y_0^p)^2 - (z_k)^2}$$

В соответствии с полученным изменением контура сечения определяется координата $z = l_0$ точки захвата полосы вальцами, а также вычисляется вертикальная составляющая скорости движения точек поверхности калибра.

Полученная в процессе расчета информация о напряженном состоянии очага деформации используется для определения усилия прокатки и момента прокатки.

В модели возможно применение различных вариантов аппроксимации свойств обрабатываемого металла. Они могут быть заданы как в аналитической форме

$$\sigma = A + B \cdot \varepsilon_n^l \cdot \dot{\varepsilon}_n^m,$$

где A, B, l, m — коэффициенты, соответствующие материалу, так и с помощью специальной процедуры, кусочно-линейно аппроксимирующей данные о свойствах, занесенные в файл-таблицу.

СТРУКТУРА И ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПАКЕТА SPLEN-S (Rolling).

С использованием разработанных алгоритмов проведена модификация программного комплекса SPLEN и в результате разработан комплекс программ SPLEN-S (Rolling).

Комплекс программ позволяет задать форму калибра и поперечного сечения полосы произвольной конфигурации и получить конечно-элементное разбиение этого сечения, а потом на основе информации о радиусе R и угловой скорости ω валков, свойствах прокатываемого металла, температуры полосы, заданной величины заднего и переднего натяжения рассчитывать и анализировать НДС металла и заполнение калибра.

Во время вычислений промежуточные результаты расчета выводятся на экран в виде поля распределения одной из заданных величин. На каждом этапе продвижения полосы через очаг деформации на экране изображается одно из следующих полей: интенсивности ско-

ростей деформации $\dot{\epsilon}_u$, интенсивности напряжений σ_u , средних скоростей деформаций $\dot{\epsilon}_{cp}$, средних напряжений σ_{cp} , интенсивности деформаций ϵ_u , либо деформированная сетка конечных элементов. Возможно также получить информацию о численном значении следующих величин $\dot{\epsilon}_u, \sigma_u, \dot{\epsilon}_{cp}, \sigma_{cp}, v_x, v_y, \epsilon_u$ в любом элементе, а также значений $\sigma_n, \sigma_r, \sigma_{\theta}, v_x, v_y$ в любом узле конечно-элементного разбиения.

По окончании расчётов предоставляются широкие возможности визуализации полученных результатов, облегчающие их анализ. Таким образом, с помощью пакета программ можно просмотреть, оценить и вывести на печать деформированную сетку конечных элементов, изображение поля гидростатических давлений, поля интенсивности скоростей деформаций, поля интенсивности деформаций, поля напряжений, деформаций и скоростей деформаций на любом этапе деформирования, а также заполнение калибра с выводом информации об основных размерах раската (высота, ширина и площадь поперечного сечения полосы до и после прокатки, длина очага деформации, относительное заполнение калибра). Кроме того, система позволяет проследить процесс изменения продольной скорости деформации и распределения усилия вдоль очага деформации.

Разработанная система вывода информации для SPLEN-S (Rolling) — открытого типа, в нее могут быть добавлены любые дополнительные режимы обработки и представления результатов.

МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПРОКАТКИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КОМПЛЕКСА ПРОГРАММ SPLEN-S (Rolling)

Известно, что при разработке вычислительных систем, как и при всех теоретических исследованиях сложных технологических процессов и их математическом моделировании, основным критерием их достоверности и возможности использования в практических расчетах, наряду с корректностью постановки задачи и анализом сходности предлагаемых методов решения, является совпадение получаемых результатов с экспериментальными исследованиями реальных физических процессов.

Для проверки достоверности приведённых алгоритмов использованы экспериментальные данные, полученные в опытах по исследованию напряжённого состояния металла при прокатке свинцовых образцов прямоугольного сечения в гладких валках на лабораторном стане МГМИ.

Основным критерием оценки достоверности модели служила правильность определения формоизменения полосы. Анализ результатов расчета показал вполне приемлемую точность модели. Максимальное отклонение параметров, характеризующих геометрию полосы при выходе из очага деформации не превысило 6,6 %, а по коэффициенту вытяжки 6,2 %. При этом наблюдаемое в эксперименте двойное и одинарное бочкообразование четко прослеживается и в результатах расчета.

Для оценки достоверности модели для условий прокатки в калибрах сравнивались характерные размеры темплетов, полученных на стане 260 завода "Красный Октябрь", и соответствующие экспериментальные значения вытяжки с размерами поперечных сечений полосы и вытяжкой, полученными при расчетах (экспериментальные данные получены В.А. Чередниковым).

Расчётный эксперимент был поставлен так, что в качестве исходной принималась полоса с сечением, полученным из расчета предыдущего прохода. При передаче полосы из одного калибра в другой геометрия полосы не корректировалась. Таким образом, на каждом последующем проходе геометрические размеры подката содержали все погрешности расчетов, полученные на предыдущих проходах. Однако и при стандартных допущениях ошибка в определении площади сечения конечной полосы после 16 прохода составила 4,12 %, а общая расчётная вытяжка по всем проходам практически совпала с экспериментальной.

Во втором случае для некоторых произвольно выбранных проходов в качестве подката брались полосы с геометрическими размерами, соответствующими фактическим. Было проверено, насколько точно вычисляется форма и размеры поперечного сечения полосы на отдельно взятом переходе без наложения накопленной ошибки. Полученные отклонения расчетных результатов от фактических составили не более 7 %.

Сравнение расчётных и экспериментальных усилий прокатки также показало хорошую адекватность модели реальному процессу. Максимальное отклонение расчётного результата от полученного в производственных условиях не превысило 6,5 %.

Представляет также интерес сравнение результатов, полученных с помощью различных моделей, использующих идеи метода конечных элементов.

Наиболее близкой к настоящей работе оказалась работа, выполненная Дж. Парком и Ш. Охом (Park J.J., Oh S.I.), в которой создана трехмерная модель прокатки в калибрах, реализованная в программе SHPROL на основе метода конечных элементов. С помощью пакета SPLEN-S (Rolling) были поставлены численные эксперименты, аналогичные проведённым с помощью SHPROL в *Battelle Columbus Division*.

Для исследований при прокатке использовался материал AISI-1045, физические свойства которого при температуре 1100 °C (2010 °F) могут быть описаны зависимостью $\sigma_u = 62,74 \cdot \epsilon_u^{0,16}$ (МПа). Изменением температуры в процессе прокатки пренебрегали.

В двух расчётных экспериментах на вход подавалась полоса прямоугольного сечения 50,8 мм × 50,8 мм, частота вращения валков составляла 6 оборотов в минуту. В первом случае полоса прокатывалась в гладких валках радиусом 50,8 мм, с зазором между валками 45,72 мм, то есть относительное обжатие составило 10 %. Во втором случае осуществлялась прокатка в овальном калибре с тем же относительным обжатием.

Проведённый с использованием пакета SPLEN-S (Rolling) расчёт показал, что при установившемся процессе полученная форма поперечного сечения полосы совпадает с формой, полученной с использованием SHPROL. Хорошей иллюстрацией формоизменения полос, полученного с помощью сравниваемых пакетов программ, является рис. 4, на котором изображены полосы с деформированной сеткой конечных элементов.

Более того, расчётные поля интенсивности деформации при установившемся процессе, полученные пакетом SHPROL, и аналогичный результат полученный с помощью SPLEN-S (Rolling), практически совпали. На рис. 5 приведен пример поля, возникающего при прокатке в калибре. В обоих случаях величина интенсивности деформации возрастает почти линейно в диагональном направлении от центра поперечного сечения полосы к углу, который первым приходит в контакт с валком. Очевидно, что полученные нами результаты достаточно хорошо согласуются с результатами, полученными Дж. Парком и Ш. Охом.

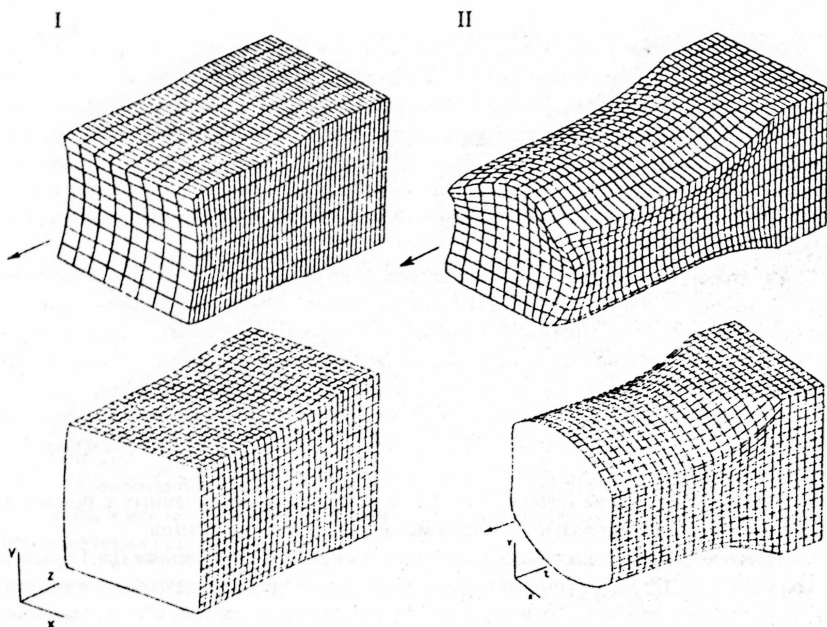


Рис. 4 Деформированная сетка конечных элементов при прокатке полосы квадратного сечения в гладких валках (I) и в овальном калибре (II)
 а) полученная с помощью SHPROL;
 б) полученная с помощью SPLEN-S (Rolling).

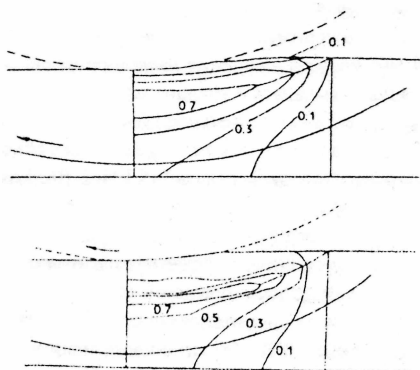


Рис. 5. Распределение интенсивности скорости деформации в очаге деформации на поверхности прокатываемой полосы при прокатке в овальном калибре
 а) полученное с помощью SHPROL;
 б) полученное с помощью SPLEN-S (Rolling).

Расчёт пакетом SHPROL был выполнен на компьютере VAX-11/750 для четверти полосы, включая концы полосы, где наблюдается неустановившееся течение металла. Расчёты НДС пакетом SPLEN-S (Rolling) выполнялись по максимально приближенным данным и обеспечили близкую точность результатов на участке установившегося течения металла. При этом время расчётов пакетом SPLEN-S (Rolling) на PC Pentium-100 на три порядка меньше, чем указанное авторами SHPROL.

Исследовано влияние количества элементов разбиения очага деформации на точность результатов расчёта.

Путем математического моделирования с варьированием в широких пределах геометрических параметров, температурно-скоростного режима процесса, условий трения и натяжения полосы исследовано их влияние на формоизменение и напряжённое состояние металла, а также выполнен анализ связи напряженного состояния очага деформации и характера течения металла.

Получено, что зависимость коэффициента вытяжки от радиуса валков при сохранении линейной касательной скорости поверхности валка не монотонная функция. Таким образом, можно определить радиус валков при котором достигается максимальная вытяжка. Радиус валков оказывает также влияние на величину сжимающих средних напряжений в полосе. Чем больше радиус, тем выше значение сжимающих напряжений, тем глубже прорабатывается полоса. Изменение температуры полосы также оказывает влияние на напряжённое состояние. С ростом температуры уменьшается величина интенсивности напряжений, а также сжимающих и растягивающих средних напряжений. Поле этих величин становится более равномерным.

ПРИМЕНЕНИЕ ПАКЕТА SPLEN-S (Rolling) ДЛЯ АНАЛИЗА И СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ КАЛИБРОВОК ВАЛКОВ.

При разработке новой промышленной калибровки валков на сортопрокатном стане 320/250 завода "Серп и Молот" для прокатки полосовой стали размером 18×36 мм из стали Ст35 выполнено имитационное моделирование и предварительный анализ с использованием вычислительной системы SPLEN-S (Rolling).

На основе результатов предварительного расчёта и пробной прокатки по существующей калибровке валков были определены недостатки формы конечного профиля и настроены параметры модели. С целью получения готового проката заданной формы, при моделировании варьировались форма промежуточных калибров, настройка стана и проводилось численное прогнозирование формообразования боковой поверхности в чистовом проходе. В соответствии с разработанным алгоритмом численного опробования калибровки, поиска и уточнения формы промежуточных калибров (рис. 6) был осуществлён направленный поиск рациональной геометрии калибров. Получено расчётное сечение полосы, наиболее точно соответствующее требованиям ГОСТ 103-76. На основании анализа выданы рекомендации о внесении в исходную калибровку изменений, обеспечивающих получение готового проката требуемого качества.

По измененной калибровке валков была проведена прокатка, в результате которой получена полоса, удовлетворяющая всем заданным требованиям ГОСТ. При этом отклонение расчётных результатов от контура и размеров темплета не превысило 1,5 %.

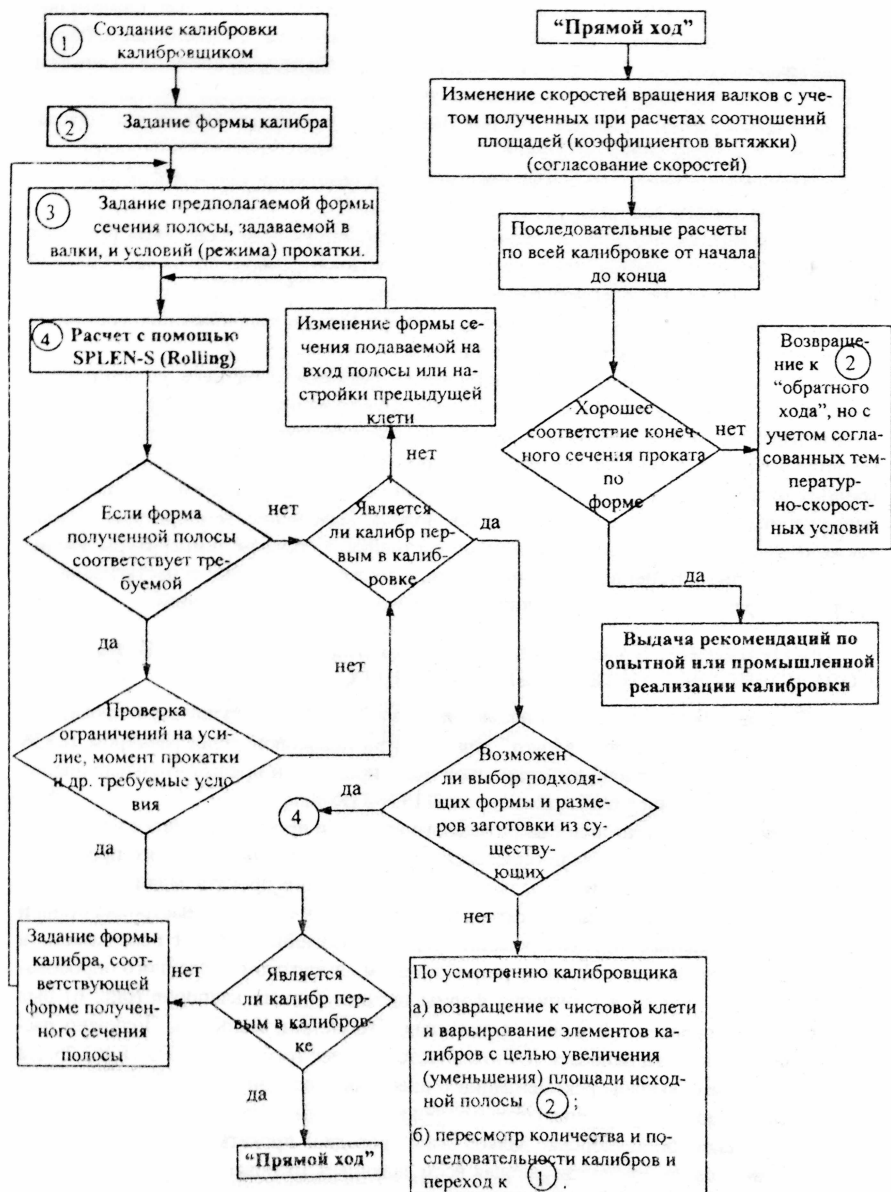


Рис. 6. Технологическая схема апробирования и изменения калибровки с целью получения качественного проката

Применение результатов расчетов вычислительной системы SPLEN-S (Rolling) при разработке калибровки полосовой стали позволило уже на этапе проектирования внести в калибровку изменения и избежать трудоемких переточек валков.

Вычислительная система системы SPLEN-S (Rolling) была передана для опытно-промышленного опробования и независимой экспертизы специалистам калибровочного бюро Магнитогорского металлургического комбината. Система использовалась в течении 1995-1997 гг. в калибровочном бюро завода при разработке и совершенствовании калибровок валков на сортопрокатных станах АО «ММК», а также для проверки разрабатываемых калибровок валков на возможность возникновения дефектов в прокате.

Результаты проведенных совместно исследований показали, что вычислительная система позволяет прогнозировать формоизменение металла, а также на основе расчёта и анализа напряжённо-деформированного состояния в очаге деформации реализовать алгоритм поиска промежуточных калибров, обеспечивающих заданное качество конечного продукта.

Основные выводы.

1. Разработана математическая модель пространственного течения нелинейной сплошной среды с заранее неизвестными границами, под воздействием внешней нагрузки, моделирующей прокатку в калибрах с учетом трения в поперечном и продольном направлении. Построен алгоритм решения, основанный на полуаналитическом методе конечных элементов, ориентированный на исследование напряженно-деформированного состояния (НДС) металла в очаге деформации.
2. Разработана вычислительная система SPLEN-S (Rolling), реализованная на IBM-совместимых персональных компьютерах, позволяющая осуществлять направленный поиск рационального решения по выбору геометрии калибров, а также технологических параметров процесса, с целью получения готового проката заданной формы и с требуемым качеством, обеспечивающих экономию энергозатрат. Высокий уровень автоматизации подготовки данных и наглядная форма представления результатов делают вычислительную систему SPLEN-S (Rolling) удобным инструментом для исследователей, конструкторов и разработчиков технологических процессов, работающих над созданием новых, в том числе нетрадиционных, и совершенствованием действующих калибровок валков.
4. На основе серии численных экспериментов исследовано влияние условий прокатки на кинематику течения и НДС металла в очаге деформации. Получены известные из литературы закономерности теории прокатки. Анализ быстродействия алгоритма, точности и устойчивости результатов вычислений показал его применимость для использования в исследовательских работах и в промышленных условиях и возможность в приемлемые сроки получать результаты для теоретического анализа полей напряжений, деформаций, скоростей деформаций.
5. Анализ сравнения результатов расчета по модели с данными экспериментального исследования, полученным для действующих промышленных калибровок валков отечественных станов и в лабораторных условиях, а также с известными решениями задачи прокатки, полученными другими авторами, показал адекватность модели реальному процессу в широком диапазоне изменения технологических параметров.

6. Предложена методика анализа калибровки валков, поиска и уточнения наиболее рациональной формы промежуточных калибров с использованием вычислительной системы SPLEN-S (Rolling).
7. Вычислительная система использована при разработке новой калибровки валков сортопрокатного стана 320/250 завода "Серп и Молот" для прокатки полосы 18×36 мм из стали Ст 35. Варьированием формы промежуточных калибров было получено расчетное сечение полосы, наиболее точно соответствующее требованиям ГОСТ 103-76 к полосовой стали. На основе расчетных результатов в исходную калибровку внесены изменения.
8. Опытнo-промышленное опробование системы выполнено в калибровочном бюро АО "ММК" на действующих калибровках сортовых станов 500, 300-2, 250-1 и проволочного стана 250-2 АО "ММК". Полученные результаты расчета обладают высокой степенью достоверности, а пользовательский интерфейс и графические возможности представления результатов удобны пользователю. Вычислительная система SPLEN-S (Rolling) использовалась в течении 1995-1997 гг. при разработке и совершенствовании калибровок на сортопрокатных станах АО "ММК".

Основное содержание диссертации отражено в следующих работах:

1. Тулупов С.А., Чумаченко Е.Н., Машкова Н.Н. Об одном алгоритме приближенного анализа объёмного течения металла при прокатке // Изв. вузов. Черная металлургия. — 1994. — № 11. — С. 26-27.
2. Моделирование процесса прокатки в калибрах / Е.Н. Чумаченко, Н.Н. Машкова, В.А. Черединых и др. // Изв. вузов. Черная металлургия. — 1996. — № 11. — С. 37-42.
3. Машкова Н.Н., Чумаченко Е.Н. Определение нейтрального сечения и поверхности контакта при моделировании процесса прокатки в калибрах // Изв. вузов. Черная металлургия. — 1997 — № 1. — С. 33-36.
4. Машкова Н.Н. Вычислительная система для исследования напряженно-деформированного состояния металла при прокатке в калибрах // 50^я научная конференция студентов института: Тез. докладов. — М.: МИСиС, 1996. — С. 47-48.
5. Применение конечно-элементного анализа к процессу прокатки в калибрах / Е.Н.Чумаченко, Н.Н. Машкова, С.А. Тулупов и др. // Вестник машиностроения. — 1998. — № 3. — С. 35-43.
6. Чумаченко Е.Н., Майборода В.П., Машкова Н.Н. Математическое моделирование НДС в очаге деформации и оптимизация переходов при прокатке на мелкосортных станах // Моделирование и исследование сложных систем. — М.: МГАПИ, 1998. — Ч. 3. — С. 556-563.