

211 449084
Министерство высшего и среднего специального образования СССР

— * —
Московское ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции и
ордена Трудового Красного Знамени высшее техническое
училище имени Н.Э. Баумана

На правах рукописи

Калмыков Виталий Валентинович

УДК 621.77.01.014

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ РАСЧЕТА ФОРМОИЗМЕНЕНИЯ И ЭНЕРГОСИЛОВЫХ
ПАРАМЕТРОВ ПРИ ГОРЯЧЕЙ ПРОКАТКЕ ПОЛОС
(НА ОСНОВЕ МЕТОДА КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ)

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 - 1987

Работа выполнена в Московском ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции и ордена Трудового Красного Знамени высшем техническом училище им. Н.Э. Баумана и во Всесоюзном научно-исследовательском и проектно-конструкторском институте металлургического машиностроения им. А.И. Целикова.

Научный руководитель - академик Целиков А.И.

Официальные оппоненты: доктор технических наук,
профессор ЛУГОВСКОЙ В.М.
кандидат технических наук,
РОКОТЯН С.Е.

Ведущее предприятие - ПО "Новокраматорский
машиностроительный завод",
министерство тяжелого и
транспортного машиностроения

Защита диссертации состоится "___" _____ 1987 г.
в ___ на заседании специализированного Совета К 053.15.13 в
Московском _____ Ордена Октябрьской Революции и ордена
Трудового Красного Знамени _____ иилище имени
Н.Э. Баумана _____ инская ул., 5.
_____ печать, просьба

в _____
и _____
_____ в библиотеке МВТУ

7 г.

И.Н. Щубин

М 449024

Тираж 100 экз.

Н.Э. Баумана

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. XXVII съезд КПСС поставил перед металлургическим машиностроением и черной металлургией задачу коренного улучшения качества,увеличения выпуска эффективных и экономичных видов металлопродукции за счет совершенствования действующего и создания нового оборудования, разработки и внедрения прогрессивных технологических процессов.

Решение этой задачи неразрывно связано с дальнейшим развитием теории прокатки, т.к. существующие методы расчета формоизменения и энергосиловых параметров прокатки дают недостаточно информации для выбора рациональных конструктивных и технологических параметров рабочих клетей.

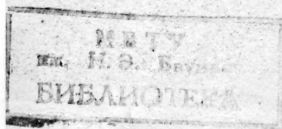
М449027
Вместе с тем разработка новых технологических процессов (редуцирование непрерывнолитых слэбов перед черновой группой клетей НПС, асимметричная прокатка, прокатка деталей машиностроения и т.д.) и создание соответствующих машин прокатных станов требуют всестороннего исследования плоского и объемного напряженно-деформированного состояния металла в очаге деформации для переходных и установившихся режимов прокатки, что возможно только с помощью современных математических методов и ЭВМ.

В связи с этим разработка эффективной методики расчета плоского и объемного напряженно-деформированного состояния металла для неустановившегося и установившегося режимов прокатки является актуальной.

Цель работы. Разработка методики расчета формоизменения и энергосиловых параметров при горячей прокатке полос, которая позволяет определять плоское и объемное напряженно-деформированное состояние металла в очаге деформации для неустановившегося и установившегося режимов прокатки.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Разработана новая методика определения плоского и объемного напряженно-деформированного состояния металла при прокатке (на основе метода конечных элементов), которая в отличие от существующих методов теории прокатки не требует предварительных допущений относительно вида напряженного состояния, позволяет использовать реальные свойства металла с учетом упрочнения и разупрочнения при многоступенчатом нагружении, исследовать уста-



новившийся и неустановившийся режимы для симметричных и асимметричных процессов прокатки.

2. Предложен новый способ задания граничных условий в процессах СМД, который позволяет одновременно учитывать образование зон прилипания и скольжения на контактной поверхности с валком, определить контактные напряжения, длину и расположение зон прилипания и скольжения, усилие и момент прокатки при захвате и установившемся режиме прокатки.

3. Получены новые характеристики объемного напряженно-деформированного состояния слябов от параметров процесса прокатки в вертикальных валках.

4. Впервые получены теоретические зависимости энергосиловых параметров асимметричной прокатки от технологических и конструктивных факторов, действующих одновременно (скоростная асимметрия, валковая асимметрия, контактная асимметрия).

Практическая ценность. Разработанная методика расчета напряженно-деформированного состояния металла позволяет моделировать процесс симметричной и асимметричной прокатки в условиях плоской и трехмерной деформации для неустановившегося и установившегося режимов в широком диапазоне изменения конструктивных и технологических параметров, что дает возможность существенно сократить количество трудоемких экспериментов, ускорить разработку оптимальных технологических режимов и алгоритмов управления прокаткой полос на современных НШС.

Разработанный пакет программ, реализованный на ЭВМ серии ЕС, используется для определения оптимальных параметров прокатки на НШС и толстолистовых станах, а также в системах автоматизированного проектирования металлургического оборудования.

Реализация работы. Результаты и рекомендации, предложенные в работе, использованы в НПО ВНИИМЕТМАШ им. А.И. Целикова и НКМЗ им. В.И. Ленина при реконструкции стана 2000 НЛМК, реконструкции приводов стана 2500 ММК, проектировании нового широкополосного стана 2500 НЛМК.

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертационной работы доложены на научных семинарах кафедры "Автоматизированные металлургические машины и агрегаты" МВТУ им. Н.Э. Баумана (1983 г., 1986 г.), научно-техническом семинаре ЦНИИЧЕРМЕТ им. И.П. Бардина (1984 г.), Всесоюзной конференции прокатчиков

"Новые технологические процессы прокатки, интенсифицирующие производство и повышающие качество продукции" г. Челябинск, (1984 г.), III Всесоюзной конференции по расчетам на прочность металлургических машин г. Жданов (1985 г.), научно-техническом семинаре ВНИИМЕТМАШ им. А.И. Целикова (1986 г.).

Публикации. Содержание основных разделов диссертации отражено в 8 публикациях.

Объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, общих выводов и результатов, а также приложений. Она изложена на 118 страницах машинописного текста, содержит 77 рисунков, 4 таблицы, список литературы из 108 наименований.

Глава I МЕТОДЫ РАСЧЕТА ФОРМОИЗМЕНЕНИЯ И ЭНЕРГОСИЛОВЫХ ПАРАМЕТРОВ ПРИ ПРОКАТКЕ

Современные методы теории прокатки, основанные на одномерных и двумерных моделях процесса пластической деформации, позволяют определить главным образом интегральные характеристики напряженно-деформированного состояния металла в очаге деформации: вытяжку, уширение, усилие и момент прокатки и т.д. Большой вклад в современное состояние теории прокатки внесли советские ученые: А.И. Целиков, П.И. Полухин, А.П. Чекмарев, И.Я. Тарновский, В.С. Смирнов, А.А. Королев, В.Л. Колмогоров, В.Н. Выдрин, В.П. Полухин и др.

Вместе с тем сегодня существует множество практических вопросов, связанных в первую очередь с повышением качества проката и увеличением выпуска наиболее экономичных видов металлопродукции, решение которых требует более полной и достоверной информации о неоднородном напряженно-деформированном состоянии металла при прокатке, чем дают одномерные модели.

Поэтому многие авторы используют двумерные модели напряженно-деформированного состояния при прокатке. Например, при прокатке высоких полос на толстолистовых и в черновых клетях широкополосных станов рассматривается плоскодеформированное состояние без учета уширения. Основным методом решения таких задач является метод характеристик (линий скольжения), который в силу заложенных в него допущений, существенно упрощает реальные условия прокатки. Например, замена дуги контакта хордой сводит исходную задачу к осадке полосы в косых бойках. Использование

модели жестко-пластической среды не позволяет учитывать процессы упрочнения и разупрочнения при многоступенчатом нагружении, а также приводит к появлению разрывов в напряжениях при переходе от упругой области к пластической и т.д.

Для определения напряженно-деформированного состояния металла при прокатке широко применяются вариационные принципы механики. Наибольшее распространение получил принцип возможных изменений деформированного состояния в перемещениях или в скоростях перемещений. Для численной реализации вариационных уравнений используются обычно прямые методы вариационного исчисления, например, метод

Ритца, с помощью которого решение вариационной задачи сводится к решению системы алгебраических уравнений. Для задач пластического деформирования минимизируемый функционал является неквадратичным, поэтому система алгебраических уравнений нелинейна и решение ее связано со значительными математическими трудностями.

Дальнейшим развитием применения вариационных методов можно рассматривать метод конечных элементов (МКЭ), который является обобщением метода Ритца. Основное преимущество МКЭ состоит в том, что с помощью достаточно малых элементов можно аппроксимировать поле перемещений или скоростей для сколь угодно сложной формы очага деформации, при этом координатные функции имеют простой вид, а варьируемые параметры ясны физический смысл.

Применение МКЭ в теории прокатки требует достоверных данных о механических свойствах сталей и сплавов, которые должны учитывать влияние температуры, степени и скорости деформации, определять величину сопротивления деформации с учетом упрочнения и разупрочнения при многоступенчатом нагружении.

Глава 2 ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ МЕТАЛЛА ПРИ ПРОКАТКЕ

Определение объемного напряженно-деформированного состояния металла при прокатке связано со значительными математическими трудностями, которые, как правило, не удается преодолеть с помощью существующих методов теории прокатки. Известные попытки решения объемной задачи основаны на усреднении напряжений и деформаций по толщине полосы, при этом толщина считается постоянной вдоль одной или даже двух координат, т.е. процесс прокатки сводится к плоской

осадке. Полученные результаты дают лишь качественные оценки контактных напряжений и уширения полосы.

В общем трехмерном случае частицы металла при прокатке движутся вдоль всех осей X, Y, Z , с соответствующими компонентами перемещений u_x, u_y, u_z . При развитых пластических деформациях задача решается обычно по шагам в приращениях перемещений или в скоростях.

Основные уравнения объемной задачи в приращениях перемещений без учета инерционных эффектов имеют вид (для компактности записи используется тензорная форма уравнений)*

$$\begin{aligned} d\sigma_{ij}, j=0; \\ d\sigma_{ij} &= 2G(d\varepsilon_{ij} + \delta_{ij} d\varepsilon_{kk}) - s_{ij} \frac{s_{kk} d\varepsilon_{kk}}{\rho} \omega; \\ d\varepsilon_{ij} &= (du_{i,j} + du_{j,i})/2; \\ \sigma_{ii} &= (\frac{2}{3} s_{ij} s_{ij})^{1/2}; s_{ij} = \sigma_{ij} - \delta_{ij} \sigma; \sigma = \frac{1}{3} \sigma_{ij} \delta_{ij}, (i, j = 1, 2, 3) \end{aligned} \quad (I)$$

где $\rho = \frac{2}{3} \sigma_{ii}^2 (1 + \frac{H}{3G})$; σ_{ii} — интенсивность напряжений; $\sigma_{ij}, \varepsilon_{ij}$, — компоненты тензоров напряжений и деформаций; s_{ij} — компоненты девиатора напряжений; δ_{ij} — символ Кронекера; $H = \frac{\partial \sigma_{ii}}{\partial \varepsilon_{pp}}$; $G = \frac{E}{2(1+\nu)}$ — модуль сдвига (E — модуль Юнга, ν — коэффициент Пуассона); u_i — компоненты перемещений;

$$\omega = \begin{cases} 1 & \text{— для пластических зон;} \\ 0 & \text{— для упругих зон.} \end{cases}$$

Решение системы (I) должно удовлетворять граничным условиям на контактной и свободной поверхностях. На контактной поверхности обычно заданы нормальная составляющая перемещений и касательная составляющая нагрузки (силы трения).

Задача является упруго-пластической, т.к. до входа в очаг деформации и после него металлы находятся в упругом состоянии, а внутри очага деформации в пластическом. При этом учитывается многократная нагрузка и разгрузка как внутри, так и вне геометрического очага деформации.

Выбор достаточно малых приращений перемещений в системе уравнений (I) позволяет свести исходную нелинейную задачу к некоторой последовательности упругих задач за счет линеаризации соотношений $d\sigma - d\varepsilon$ на каждом шаге нагружения.

* дифференцирование по координатам обозначается запятой на уровне индексов, после которой следует индекс этой координаты, с учетом правила суммирования по повторяющимся индексам

В соответствии с МКЭ полоса разделяется на некоторое число достаточно малых элементов в качестве которых используются обычно для плоской задачи — треугольники, для объемной — тетраэдры. Число элементов и узлов конечноэлементной сетки зависит от требуемой точности и вычислительных ресурсов ЭВМ (объем памяти, быстродействие и т.д.). При захвате полосы валками происходит деформация элементов в соответствии с действительными траекториями течения металла в продольном и поперечных направлениях.

Функции приращения перемещений внутри каждого элемента определяются через узловые значения в виде

$$\{\Delta u\}^n = [N] \{\Delta u\}^n, \quad (2)$$

где $[N]$ — функции формы, обеспечивающие непрерывность поля приращений перемещений в узлах и на границах со смежными элементами; $\{\Delta u\}^n$ — вектор приращений узловых перемещений n -го элемента.

Вектор приращения деформации n -го элемента имеет вид

$$\{\Delta \varepsilon\}^n = [B] \{\Delta u\}^n \quad (3)$$

где $[B]$ — матрица геометрических соотношений между деформациями и перемещениями (условия Коши).

Вектор приращения напряжений n -го элемента определяется как

$$\{\Delta \sigma\} = \begin{cases} [D] \{\Delta \varepsilon\}^n & \text{— для упругих элементов} \\ [D_p] \{\Delta \varepsilon\}^n & \text{— для пластических элементов} \end{cases} \quad (4)$$

где $[D]$ и $[D_p]$ упругая и упруго-пластическая матрицы.

Система разрешающих уравнений для определения полного вектора приращений узловых перемещений на каждом шаге нагружения имеет вид

$$[K] \{\Delta u\} = \{\Delta F\} \quad (5)$$

где $\{\Delta F\}$ — вектор приращения нагрузки; $[K] = \sum_{n=1}^M [K]^n$ — полная матрица жесткости, равная сумме подматриц для каждого элемента, которая определяется как

$$[K]^n = \begin{cases} [B]^T [D] [B] V & \text{— для упругих элементов} \\ [B]^T [D_p] [B] V & \text{— для пластических элементов,} \end{cases} \quad (6)$$

где V — объем тетраэдра.

Текущие значения узловых перемещений, деформаций и напряжений каждого элемента на q -м шаге нагружения определяются путем суммирования соответствующих значений после предыдущего шага с полученными приращениями деформаций, напряжений и перемещений

$$\{\varepsilon\}_q = \{\varepsilon\}_{q-1} + \{\Delta\varepsilon\}_q \quad (7)$$

$$\{\sigma\}_q = \{\sigma\}_{q-1} + \{\Delta\sigma\}_q \quad (8)$$

$$\{u\}_q = \{u\}_{q-1} + \{\Delta u\}_q \quad (9)$$

Величина приращения нагрузки или приращения перемещений в уравнении (5) выбирается с учетом граничных условий таким образом, чтобы соответствующие приращения деформаций и напряжений удовлетворяли уравнениям пластического течения, т.е. были достаточно малыми величинами.

Приведение упругих элементов к пластическому состоянию осуществляется с помощью коэффициентов приведения, которые определяются для каждого упругого элемента следующим образом

$$\sigma_u^* = \sigma_T, \quad (10)$$

где σ_T — текущее значение сопротивления деформации металла с учетом упрочнения и разупрочнения; σ_u^* — интенсивность напряжений в элементе, приводимом к пластическому состоянию.

Для трехмерной задачи

$$\sigma_u^* = \frac{1}{2} \sqrt{[(\sigma_x + \beta \Delta \sigma_x) - (\sigma_y + \beta \Delta \sigma_y)]^2 + [(\sigma_y + \beta \Delta \sigma_y) - (\sigma_z + \beta \Delta \sigma_z)]^2 + [(\sigma_z + \beta \Delta \sigma_z) - (\sigma_x + \beta \Delta \sigma_x)]^2 + 6(\tau_{xy} + \beta \Delta \tau_{xy})^2 + 6(\tau_{yz} + \beta \Delta \tau_{yz})^2 + 6(\tau_{zx} + \beta \Delta \tau_{zx})^2} \quad (11)$$

Выбирая на каждом шаге упругий элемент с минимальным значением коэффициента приведения, его переводят в пластическое состояние, для чего приращения перемещений, деформаций и напряжений, полученные на данном шаге, умножают на $\beta_{\min}$ и суммируют с соответствующими текущими значениями. Это позволяет проследивать картину образования и развития пластической области в очаге деформации и внешних зонах при захвате полосы валками и установившемся режиме прокатки, что важно знать при выборе рациональных режимов обжатий. Расчет продолжается от начала захвата полосы валками до тех пор пока не стабилизируются значения усилия и момента прокатки, что обычно происходит, когда длина передней внешней зоны достигает $(1,5+2,0) l_g$.

Результаты расчета энергосиловых параметров и формоизменения в процессах прокатки существенным образом зависят от вида и способа задания граничных условий на контактной поверхности полосы с валками.

В данной работе предложен новый способ задания граничных условий, который позволяет, в отличие от существующих работ,

учитывать изменение вида граничных условий на контактной поверхности при захвате полосы валками, определить контактные напряжения, длину и расположение зон прилипания и скольжения при установившемся режиме. При этом используется гипотеза о том, что любая материальная точка на контактной поверхности может находиться в одном из двух состояний – прилипания или скольжения. Критерием состояния точки является величина отношения касательных напряжений к нормальным в данной точке. Величина критерия состояния $A = f(p, \sigma_s, \dots)$, являющаяся в общем случае функцией нормальных напряжений, предела текучести приконтактного слоя, шероховатости инструмента и т.д., определяется по данным работ Леванова А.Н.

Граничные условия на контактной поверхности с валком задаются в соответствии с предложенным способом следующим образом

$$\text{если } \tau < \tau_s \text{ и } \tau/p \leq A, \text{ то } \begin{cases} \Delta u_n = 0 \\ \Delta u_\tau = u^* \end{cases}, \quad (I2)$$

$$\text{если } \tau = \tau_s \text{ или } \tau/p > A, \text{ то } \begin{cases} \Delta u_n = 0 \\ \Delta u_\tau = 0 \end{cases}, \quad (I3)$$

где $\Delta u_\tau, \Delta u_n$ – приращения касательных и нормальных перемещений; u^* – перемещение контактной точки с валком как жесткого целого; p, τ – нормальные и касательные напряжения; $\Delta \tau$ – приращения касательных напряжений.

Граничные условия (I2)–(I3) задаются в каждой контактной точке, которая в зависимости от соотношения величин τ/p и A находится в состоянии прилипания или скольжения, при этом всегда $\tau \leq \tau_s$.

В дополнение к коэффициентам приведения упругих элементов в пластическое состояние β вводится коэффициент приведения ψ , который регулирует величину приращений перемещений на данном шаге решения для каждой контактной точки. На следующем шаге точка с минимальным значением этого коэффициента переводится из состояния прилипания в скольжение или наоборот в зависимости от ее первоначального состояния. Для i -го узла на контактной поверхности коэффициент приведения ψ определяется следующим образом

$$\left| \frac{p_{ci} + \psi_i \Delta p_{ci}}{p_{ni} + \psi_i \Delta p_{ni}} \right| = A \quad (I4)$$

где $P_{ti}, \Delta P_{ti}, P_{ni}, \Delta P_{ni}$ — соответственно нормальные и касательные усилия и их приращения.

Исследование влияния контактного взаимодействия на энергосиловые параметры и формоизменение при прокатке и осадке показало, что усилие, бочкообразность и величина контактной поверхности при осадке, усилие и момент прокатки, контактные напряжения, полученные теоретическим путем, совпадают с соответствующими экспериментальными данными с точностью до 15%.

Глава 3 РАСЧЕТ ФОРМОИЗМЕНЕНИЯ И ЭНЕРГОСИЛОВЫХ ПАРАМЕТРОВ ПРИ ПРОКАТКЕ В ЧЕРНОВЫХ КЛЕТЯХ НШС (ПЛОСКАЯ ЗАДАЧА)

В данной главе рассмотрено применение МКЭ для решения плоской задачи прокатки толстых полос в первых черновых клетях стана 2000 НЛМК, где уширением полосы по сравнению с деформацией в двух других направлениях можно пренебречь. Для прокатки в черновых клетях НШС характерна существенная неравномерность распределения напряжений и деформаций, что оказывает значительное влияние на качество раската при прокатке в чистовых клетях, т.к. возникающие внутри полосы растягивающие напряжения могут привести к разрывам металла, что особенно опасно для непрерывнолитых слэбов.

Рассмотрена прокатка полос с окончательными размерами 3,9х1880 мм, составляющих 20% сортамента стана 2000. Начальные размеры полосы 240х1920 мм, материал Ст.3сп, температура прокатки полосы 1180°C.

Определены энергосиловые параметры, коэффициенты плеча, изменение формы переднего конца полосы, поле интенсивностей напряжений и деформаций, гидростатического давления от величины обжатий, диаметра валков, параметра l_g / H_{co} для захвата полосы и установившегося режима прокатки, где в частности установлено:

1. Максимальное искажение формы переднего конца полосы имеет место при угле захвата $\sim 0,7 \alpha_{зах}$, причем для установившегося режима оно вдвое меньше, чем при захвате.

2. При обжатии 3–9% внутри полосы образуются три зоны с растягивающими средними напряжениями (гидростатическим давлением), две из которых расположены на входе и выходе из валков, а третья — наиболее обширная, вдоль оси симметрии. Размер этой

зоны по высоте достигает 40% Н.

3. Величина максимальных растягивающих напряжений в центре полосы существенно зависит от величины обжатия, при этом для обжатия более 8-9% растягивающие напряжения переходят в сжимающие.

4. Размеры фактического очага деформации при установившемся режиме прокатки, который наступает, когда длина передней внешней зоны равна или превышает величину $0,4 \sqrt{g}$, в 1,5-2,0 раза превосходит размеры геометрического очага деформации.

Представленные результаты расчета формоизменения и энергосиловых параметров с помощью МКЭ при прокатке в черновых клетях стана 2000 НЛМК дают более полную и достоверную информацию о напряженно-деформированном состоянии металла при захвате и установившемся режиме, чем другие методы теории прокатки. Это позволяет использовать разработанную методику при выборе рациональных режимов прокатки, которые обеспечивают повышение качества продукции и выход годного.

Глава 4 РАСЧЕТ ЭНЕРГОСИЛОВЫХ ПАРАМЕТРОВ И ФОРМОИЗМЕНЕНИЯ ПРИ ПРОКАТКЕ В ВЕРТИКАЛЬНЫХ ВАЛКАХ (ОБЪЕМНАЯ ЗАДАЧА)

Вертикальные валки черновой группы клетей НШС и толстолистовых станов предназначены для калибровки полосы по ширине, удаления окалины с боковой поверхности слэбов и получения качественных кромок. Прокатка в вертикальных валках характеризуется значительной неравномерностью распределения напряжений и деформаций по толщине, ширине и длине раската, т.е. с точки зрения теории прокатки представляет собой объемную задачу.

Характерной особенностью прокатки слэбов в вертикальных валках является локализация пластической деформации у контактной поверхности, что приводит к значительному утолщению полосы вблизи боковых кромок и уменьшению продольной деформации средних по ширине слоев металла. Локализация пластической деформации у контактной поверхности существенно влияет на формоизменение и энергосиловые параметры, которые значительно отличаются от соответствующих величин при прокатке с вытяжкой.

В связи с этим исследование формоизменения и энергосиловых параметров при прокатке в вертикальных валках представляет большой практический интерес, т.к. позволяет определить ра-

циональные конструктивные и технологические параметры, обеспечивающие получение требуемой ширины полосы и снижение обреза.

Используемые на практике зависимости для определения параметров прокатки в вертикальных валках получены, как правило, путем обработки экспериментальных данных, которые справедливы только для конкретного стана. Существующие теоретические решения данной задачи получены в основном с помощью метода линий скольжения на основе значительного упрощения реальных условий прокатки, поэтому достоверность полученных результатов невысока.

В данной главе представлены результаты расчета объемного напряженно-деформированного состояния слябов при захвате и установившемся режиме прокатки в вертикальной клетке стана 2800 ОХМК и редуцирующей клетки стана 2000 НЛМК, материал слябов — сталь 14ГН, Ст.Зсп, 08Г2СФБ, ширина полосы 800+2400 мм, высота слябов 160+350 мм, диаметр валков 800+1200 мм, температура прокатки 1180°C, обжатия по ширине 1+8%.

Определены энергосиловые параметры, контактные напряжения, трехмерные поля интенсивностей напряжений и деформаций, гидростатического давления, форма переднего конца полосы, форма боковой поверхности полосы, величина наплывов металла вблизи контактной поверхности.

При этом установлено:

1. Влияние диаметра валков на усилие прокатки в вертикальных валках при обжатии 1+3% небольшое. При увеличении обжатия до 8% изменение усилия с увеличением диаметра от 800 до 1200 мм составляет около 15%.

2. При обжатии по ширине 1+8% внутри полосы образуется зона с растягивающими средними напряжениями, имеющая размеры до 2,5 ϵ_g в длину и примерно 0,5В в ширину, при этом с увеличением обжатия уровень растягивающих напряжений уменьшается, а область растягивающих напряжений перемещается в сторону выхода металла из валков, увеличиваясь в размерах по ширине и уменьшаясь в длину. Максимальный размер области растягивающих напряжений в ширину равен 0,7 В. Максимальный уровень растягивающих напряжений составляет 0,8 σ_s .

3. Максимальное утолщение слябов, возникающее на расстоянии 25+35 мм от контактной поверхности, равно 13-16%, при этом образуется утяжка по ширине переднего конца порядка 3+5%. Максимальная толщина наплывов в 3+5 раз больше, чем относительное

обжатие по ширине, что приводит к уменьшению вытяжки за счет приконтактного утолщения.

Полученные закономерности изменения формы переднего конца и горизонтальной свободной поверхности сляба при прокатке в вертикальных валках позволяют более точно оценить неравномерное утолщение и удлинение по ширине и длине сляба, что необходимо для разработки рекомендаций по снижению обреза и уменьшению брака.

Глава 5 РАСЧЕТ ЭНЕРГОСИЛОВЫХ ПАРАМЕТРОВ ПРИ АСИММЕТРИЧНОЙ ГОРЯЧЕЙ ПРОКАТКЕ

Внедрение асимметричных режимов прокатки на непрерывных широкополосных станах обеспечивает снижение усилия прокатки, повышение точности и качества готовой продукции. Применение асимметричной прокатки с рассогласованием скоростей валков наиболее эффективно для клетей с индивидуальным приводом. Особенностью реализации скоростной асимметрии при горячей прокатке является перераспределение моментов между валками, что приводит к значительной перегрузке ведущего валка по сравнению с обычными режимами прокатки, а также изгиб концов раската, затрудняющий его захват в последующих пропусках и заправку его в моталку.

Выбор рациональных режимов асимметричной прокатки и освоение их на толстолистовых и непрерывных широкополосных станах требуют теоретического и экспериментального исследования энергосиловых параметров и формоизменения в условиях скоростной, геометрической и других видов асимметрии. Как известно, экспериментальные исследования весьма трудоемки и ограничены условиями работы и сортаментом того стана, где они получены.

Теоретический анализ процессов асимметричной прокатки, как правило, основан на применении теории симметричной прокатки. С этой целью асимметричная прокатка рассматривается как совокупность двух симметричных процессов для ведущего и ведомого валков в отдельности.

В данной работе для исследования режимов асимметричной прокатки использована разработанная методика на основе МКЭ в сочетании с новым способом задания граничных условий, который рассмотрен в главе 2. Это позволяет определить напряженно-деформированное состояние металла при наличии кинематической, геомет-

рической и других видов асимметрии (рассогласование скоростей валков, сдвиг валков вдоль оси прокатки, разные условия контактного трения на валках и т.д.).

В данной главе диссертации исследовано влияние скоростной асимметрии на энергосиловые параметры прокатки в чистовых проходах стана 3000 ЖМК им. Ильича и в 12 чистовой клетки стана 2000 НЛМК, проект реконструкции которой для реализации асимметричных режимов разработан НКМЗ.

В результате исследования получены зависимости для усилия и моментов прокатки, касательных и нормальных контактных напряжений на ведомом и ведущем валках от величины рассогласования скоростей, степени деформации, отношения $v_g / v_{ср}$, для установившегося и не установившегося режимов прокатки.

При исследовании прокатки с рассогласованием скоростей в 12 клетки стана 2000 НЛМК в частности установлено:

1. При асимметричной прокатке в очаге деформации имеет место зона с разнонаправленными касательными напряжениями, причем размеры ее составляют 20+40% от длины дуги захвата при рассогласовании скоростей валков 2+6%.

2. При рассогласовании скоростей $\Delta V = 6\%$ зона опережения на ведущем валке исчезает.

3. Оптимальное значение величины рассогласования скоростей валков лежит в диапазоне 5+10%, причем меньшие значения рассогласования скоростей соответствуют меньшей степени деформации полосы.

Представленные закономерности энергосиловых параметров при асимметричной прокатке позволяют получить зависимости, необходимые для системы регулирования величиной рассогласования скоростей валков для уменьшения (увеличения) усилия прокатки с целью повышения планшетности и качества поверхности полосы.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ

1. Разработана новая методика расчета формоизменения и энергосиловых параметров прокатки, которая позволяет определять плоское и объемное напряженно-деформированное состояние раската при захвате и установившемся режиме с учетом смешанных граничных условий на контактной поверхности. В основу методики

положен метод конечных элементов.

2. На основании разработанной методики создан комплекс программ расчета плоского и объемного напряженно-деформированного состояния металла при прокатке. Программы написаны на языке ФОРТРАН-4 для ЭВМ серии ЕС.

3. Предложен новый способ задания смешанных граничных условий для плоской и объемной задач теории прокатки, который позволяет определять контактные напряжения, длину и расположение зон прилипания и скольжения, усилие и момент прокатки при захвате и установившемся режиме.

4. Анализ напряженно-деформированного состояния металла при прокатке в черновых клетях НШС показал:

4.1. в момент захвата при прокатке полосы происходит деформация только приконтактных слоев металла, что вызывает интенсивное растяжение внутренних слоев, следствием чего может быть образование внутренних разрывов металла и расслоений при захвате;

4.2. максимальное искажение формы переднего конца полосы имеет место при угле захвата порядка 0,7 от полного, причем оно вдвое больше, чем для установившегося режима;

4.3. величина максимальных растягивающих средних напряжений в центре полосы наиболее сильно зависит от величины обжатий, достигая величины до 0,8 σ_s , при этом для рассмотренных полос зона с растягивающими напряжениями исчезает при обжатии более 8+10%;

4.4. размеры фактического очага деформации при установившемся режиме прокатки в 1,5-2,0 раза превосходят размеры геометрического очага деформации, что подтверждает существование внеконтактной пластической деформации.

5. Исследование режимов прокатки в вертикальных валках станов 2800 и стана 2000 показало:

5.1. при обжатии полос по ширине внутри металла образуются три зоны с растягивающими средними напряжениями, одна из которых расположена в центре сляба, а две другие в приконтактных зонах на входе и выходе из валков. Максимальное значение растягивающих средних напряжений может достигать величины σ_s , что может привести к появлению внутренних разрывов при прокатке непрерывнолитых слябов;

5.2. величина максимального приконтактного утолщения (толщина наплывов) практически пропорциональна величине обжатия, достигая 15% от толщины сляба, влияние диаметра валков на величину наплывов незначительное. При обжатии более 3+4% на оси сляба образуется утяжка по толщине, величина которой равна примерно 10% от толщины наплывов;

5.3. полученные результаты позволяют определить форму боковой поверхности и переднего конца сляба, что необходимо для выбора оптимальной величины обжатий в вертикальных валках.

6. Исследование параметров асимметричной прокатки толстых полос на стане 3000 и тонких полос на стане 2000 показало:

6.1. наиболее эффективным способом реализации асимметричных режимов прокатки является рассогласование скоростей рабочих валков;

6.2. оптимальное значение величины рассогласования скоростей валков лежит в диапазоне 5+10%, где меньшие значения рассогласования скоростей соответствуют меньшей степени деформации полосы;

6.3. при оптимальной величине рассогласования скоростей валков уменьшение усилия прокатки может составить 10+20% от усилия прокатки в симметричном режиме.

7. Результаты и рекомендации, предложенные в диссертации, использованы в НПО ВНИИметмаш им. А.И. Целикова и НКМЗ им.В.И. Ленина при реконструкции первой черновой и седьмой чистой клетки стана 2000 НЛМК, реконструкции привода реверсивной клетки стана 2500 ММК, проектировании приводов нового широкополосного стана 2500 НЛМК.

8. Ожидаемый экономический эффект от внедрения результатов работы на стане 2000 НЛМК составляет 821000 руб.

Основное содержание диссертации отражено в следующих работах:

1). Калмыков В.В., Ананьев И.Н., Белянинов В.К. Расчет энергосиловых параметров прокатки при захвате // Изв. ВУЗов Машиностроение. - 1983. - № 10. - С.106-109.

2). Объемные задачи теории прокатки / А.И. Целиков, В.К. Белянинов, И.Н. Ананьев, В.В. Калмыков // Тр. МВТУ им. Н.Э. Баумана. - 1984. - Вып. 412. - С.8-24.

3). Расчет энергосиловых параметров и формоизменения при прокатке в черновых клетях широкополосных станов методом конечных элементов / В.В. Калмыков, И.Н. Ананьев, В.К. Белянинов, Ю.П. Шинкаревич, О.Ф. Байрамов // Тр. МВТУ им. Н.Э. Баумана. - 1984. - Вып. 412. - С.57-67.

4). Калмыков В.В., Ананьев И.Н., Белянинов В.К. Расчет энергосиловых параметров и формоизменения при прокатке в черновых клетях листовых станов // Новые технологические процессы прокатки, интенсифицирующие производство и повышающие качество продукции: Тезисы докладов / Отв. ред. Выдрин В.Н. - Челябинск: ЧПИ, 1984. Ч.1. - С.78-79.

5). Влияние режимов асимметричной прокатки на напряженно-деформированное состояние и прочность рабочих валков чистовых клетей НШС / И.Н. Ананьев, В.В. Калмыков, А.А. Филатов, П.С. Гринчук, Э.П. Каретный // III Всесоюзная конференция по расчетам на прочность металлургических машин: Тезисы докладов, Ч.1. - М. : ЦНИИТЭИтяжмаш, 1985. - С.28-29.

6). Расчет напряженно-деформированного состояния шейки рабочих валков методом конечных элементов / И.Н. Ананьев, В.В. Калмыков, Е.Н. Чумаченко, М.М. Ванинский // III Всесоюзная конференция по расчетам на прочность металлургических машин: Тезисы докладов, Ч.1. - М.: ЦНИИТЭИтяжмаш, 1985. - С.100-101.

7). Калмыков В.В., Чумаченко Е.Н., Ананьев И.Н. Способ задания граничных условий при решении задач обработки металлов давлением // Изв. ВУЗов. Машиностроение. - 1985. - № 12. - С.122-125.

8). Ананьев И.Н., Калмыков В.В. Расчет объемного напряженно-деформированного состояния слэбов при прокатке в вертикальных валках // Изв. АН СССР Металлы. - 1986. - № 4. - С.60-65.

В.К. Белянинов

