

05.16.05
К 82

ЧЕЛЯБИНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

На правах рукописи

Кривенцов Александр Михайлович

НАУЧНЫЕ ОСНОВЫ, МЕТОДЫ РАСЧЕТОВ И СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ
ПРОЦЕССОВ ПРОКАТКИ ПРОФИЛЕЙ
В ДВУХ- И МНОГОВАЛКОВЫХ КАЛИБРАХ

Специальность 05.16.05-Обработка
металлов давлением

Автореферат диссертации
на соискание ученой степени доктора
технических наук

Челябинск-1993

Работа выполнена во ВНИИметмаш'е.

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Жадан В.Т.;
доктор технических наук, профессор
Никифоров Б.А.;
доктор технических наук, профессор
Шилов В.А.

Ведущее предприятие: Электрометаллургический завод
"Электросталь" им.И.Ф.Тевосяна.

Защита диссертации состоится " 2 " июня 1993 г. в 14 часов
на заседании специализированного совета Д 053.13.04 по защите
диссертаций на соискание ученой степени доктора технических
наук при Челябинском государственном техническом университете.
Адрес: 454080, г. Челябинск, проспект им. В.И. Ленина, 76.
С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ЧГТУ.
Автореферат разослан "20" апреля 1993 г.

Ученый секретарь
специализированного совета
Д 053.13.04
докт. физ.- мат. наук,
профессор

Д.А.Мирзаев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Прокат в современных условиях является основным конструкционным материалом и в значительной мере определяет технический прогресс общества. Главными направлениями развития его производства являются совершенствование структуры сортамента проката, повышение его качества и увеличение объема дефицитной продукции.

Рассматриваемая работа направлена на решение этих задач путем создания и внедрения новых эффективных процессов и оборудования.

Сортопрокатное производство развивается в настоящее время по двум основным направлениям—созданию процессов большой и малой производительности, причем последнее направление приобретает наибольшее распространение. Современные технологии включают, как правило, продольную, винтовую и планетарную прокатки в едином технологическом цикле, характеризуются одновременным использованием двух- и многостороннего обжатия, высокой и малой интенсивности деформации. Такие процессы являются менее изученными и имеют индивидуальную основу определения параметров процессов и оборудования в связи с чем задача создания единой основы для совершенствования различных процессов прокатки и выравнивания их уровня познаний является весьма актуальной. Эта проблема была и остается актуальной не только для прокатки, но и для всех процессов обработки металлов давлением.

Целью настоящей работы является создание единого метода для исследования и определения параметров прокатки профилей в двух- и многовалковых калибрах и на его основе совершенствование технологических процессов и оборудования.

Научная новизна. Разработан метод среднеинтегральной полосы, который в сравнении с известными решениями является наиболее универсальным и точным. Универсальность его достигнута за счет использования более общих характеристик—площадей и периметра, точность за счет более полного учета фактических условий деформации в очаге деформации.

Параметры прокатки определяются абсолютными и относитель-

ными характеристиками, из которых наибольшую ценность имеют последние, т.к. они сокращают число переменных. Современная теория прокатки базируется на критериях, представляющих собой соотношения одномерных величин. В работе найдены безразмерные комплексы, представляющие собой соотношения двумерных характеристик (площадей). Они точнее и определеннее характеризуют процессы продольной, поперечной и винтовой прокатки всевозможных профилей в любых калибрах двух- и многовалковых станков, позволяют разрабатывать единые методики расчета разных процессов, распространяют результаты теоретического и экспериментального исследования одного процесса на другой и тем самым взаимно выравнивают уровни их познаний, а также расширяют области использования ранее полученных уравнений. Предлагаемые соотношения применимы не только к различным видам прокатки, но и другим процессам ОМД, где деформация осуществляется поверхностями, что способствует развитию теории в других областях и обмену достижениями между ними. Наиболее эффективны критерии в сложных условиях деформации. В целом они углубляют изучение процессов и способствуют развитию теории прокатки.

Среднеинтегральная полоса и полученные критерии использованы при разработке метода конечных элементов. Таким образом создана единая эффективная основа для исследования и определения параметров двух- и многовалковой прокатки. При решении этих задач найдены также другие рациональные решения, содержащие научную новизну:

- в общем виде оценено влияние формы калибра и заготовки на уширение и момент прокатки, опережение, разнотолщинность, разноширинность и серповидность;

- установлено влияние материала полосы на уширение при теплой прокатке черных и цветных металлов;

- определено влияние многовалкового калибра на уширение, силовые параметры и опережение;

- найдено влияние поперечной деформации и внешних зон на момент прокатки;

- для расчета коэффициента трения получены более совершенные критерии, которые позволили разработать единую методику его определения для черных и цветных металлов в условиях горя-

чей, теплой и холодной деформации;

-установлены факторы, влияющие на разноширинность и разработан метод ее определения;

-найдено влияние исходной серповидности на конечную ее величину и др.

Реализация результатов работы. В результате проведенных теоретических и экспериментальных исследований разработаны методики расчета уширения, усилия и момента прокатки, коэффициента трения, опережения, разноширинности, серповидности и другие, которые учитывают наибольшее количество факторов, имеют более широкую область использования и являются более точными.

Созданные методики легли в основу разработки ряда технологий горячей, теплой и холодной прокатки сортовых и фасонных профилей из черных и цветных металлов, а именно:

-Процессов прокатки из легированных и высоколегированных сталей на проволочном ЛПА завода "Электросталь" им.Тевосяна.

-Процессов производства калиброванной шестигранной стали на метзаводе им.Серова.

-Процессов прокатки алюминиевой катанки на Таджикском алюминиевом заводе.

-Процессов прокатки сортовых и фасонных профилей из углеродистых марок сталей на стане 300 Донецкого метзавода.

-Процессов прокатки с малыми деформациями и формоизменениями на металлургических заводах "Электросталь" им.Тевосяна, "Серп и Молот" и ТадАЗе, а также другие процессы. Большинство технологий освоено впервые в отечественной и зарубежной практике.

Доля годового экономического эффекта в народном хозяйстве от освоенных разработок по состоянию на 1990 г. составляла свыше 1.0 млн.рублей.

Апробация работы. Основные результаты работы доложены и обсуждены на II, III и IV Всесоюзных научно-технических конференциях "Теоретические проблемы прокатного производства", на Всесоюзном научно-техническом семинаре "Формообразование деталей машин прокаткой прессованием и волочением", а также рассматривалась на ведущих кафедрах страны.

Публикации. Основное содержание диссертации отражено в 15

статьях и 8 авторских свидетельствах, перечень которых приведен в конце автореферата.

Объем диссертации. Работа изложена на 462 страницах, состоит из введения, 10 глав, выводов и приложения, содержит 141 рисунок, 61 таблицу, список использованных источников с 232 позициями.

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ, ПУТИ И СРЕДСТВА ЕЕ РЕШЕНИЯ

1.1. Современные тенденции развития процессов прокатки профилей

Современные технологии прокатки профилей развиваются по двум главным направлениям: создаются процессы для большого и малого объемов производства. Причем последние технологии получают наибольшее распространение. Оба направления широко используют принцип непрерывности в получении литых заготовок и последующей их прокатки, преследуют цели обеспечения высокого качества продукции и рентабельности производства. Другой особенностью современных технологий является использование в едином цикле разных процессов прокатки и даже других способов ОМД, при этом все большее распространение получает многосторонняя деформация обрабатываемого материала. Эти тенденции характерны для обеих направлений, но наиболее ярко они выражены в технологиях для малого объема производства.

Многосторонняя деформация используется для получения сортовых и фасонных профилей и первые сведения об ее применении относятся к середине прошлого века. В 1854 г. во Франции фирмой "Tranton Iron Co" был создан стан универсального типа и прокатана балка высотой 178 мм.

Прокатка-волочение тавровых профилей переменного сечения с применением трех- и четырехвалковых калибров разработана и осуществлена в 1947 г. А.И.Целиковым, Э.Р.Шором, Е.С.Рокотяном, А.Е.Гуревичем и В.А.Кругликовым.

И.М.Павлов предложил деформировать профили прямоугольного или квадратного сечений из малопластичных материалов в устройстве с четырехвалковым калибром.

В 1954 г. начаты работы по применению многовалковых калиб-

ров в Магнитогорском горно-металлургическом институте. На основе этих работ были предложены различные по форме многовалковые калибры, обладающие высокими степенями всесторонней деформации и исключаящие при этом переполнение калибров, что позволило рекомендовать ряд оригинальных направлений в применении трех- и четырехвалковых калибров при ОМД, в частности заменуковки труднодеформируемых сталей и сплавов прокаткой, получение калиброванной стали только прокаткой без волочения, получение биметаллической сталемедной катанки с равномерным распределением и надежным сцеплением лакирующего слоя с основным материалом, повышение точности сортовых профилей.

В Италии в 1957 г., а затем в Англии, Германии, США осуществлен способ "Properzi" для прокатки алюминиевой катанки в трехвалковых калибрах в сочетании с непрерывной разливкой. Позднее такие агрегаты, предназначенные для производства алюминиевой и медной катанки, стала выпускать итальянская фирма "Continuous".

В это же время в нашей стране ВНИИметмаш'ем и другими организациями начаты интенсивные работы по созданию и внедрению совмещенных с непрерывной разливкой процессов прокатки с многосторонним обжатием не только цветных, но и черных металлов. Это направление ВНИИметмаш развивает до настоящего времени.

В Германии в 1961 г. фирмой "Kocks" создана непрерывная линия, состоящая из 13 трехвалковых клетей, объединенных в два чистовых блока, для горячей прокатки стальной катанки диаметром 5,0 мм. Такие чистовые блоки с трехвалковыми клетями впоследствии были установлены в других странах.

В Челябинском государственном техническом университете разработано несколько конструкций клетей с многовалковыми калибрами. Создан комбинированный процесс прокатка - волочение с многосторонним обжатием заготовки.

В Болгарии разработаны и созданы установки с многовалковыми калибрами, которые предназначены для получения различных сортовых, фасонных, периодических и ребристых профилей, шлицевых валов и др.

В 1968 г. ДОННИИчермет начал работы по использованию мно-

госторонней деформации, главным образом в трехвалковых клетях, для повышения точности готовой продукции. Их разработки внедрены на нескольких металлургических предприятиях.

В конце шестидесятых и начале семидесятых годов фирма "Karl Fuhr" (Германия) начала изготавливать прокатные клетки с четырехвалковыми калибрами для всевозможных профилей с различным количеством приводных валков.

Австрийская фирма "Tilin Union" разработала технологию и оборудование по производству арматурной проволоки с повышенными прочностными и анкерными свойствами.

Одноклетевые станы с четырехвалковыми калибрами, предназначенные для прокатки фасонных профилей выпускаются в нашей стране а также за рубежом фирмами "Marshal Richards Barcro" (Англия), "Fenn" (США), "Karl Furh" (Германия), "Yoshida Kinen" (Япония) и др. Пятиклетевые непрерывные станы с четырехвалковыми калибрами, предназначенные для холодной прокатки проволоки выпускает фирма "Sket" (Германия).

В последующие периоды процессы многосторонней деформации при прокатке получили дальнейшее распространение. С одной стороны увеличивается количество рассматриваемых выше процессов, а с другой расширяются области их применения. Так значительно увеличилось количество трехвалковых станов, главным образом в составе литейно-прокатных агрегатов, для производства катанки и мелкого сорта из алюминия, меди и их сплавов. На подобном оборудовании в настоящее время производится большая часть этой продукции. Расширяется производство фланцевых профилей в универсальных клетях, что позволило повысить качественные показатели этой продукции. Все большее распространение получают трехвалковые калибрующие блоки. Расширяется марочный сортамент процессов с многосторонним обжатием. Например, станы конструкции фирмы "Kocks", предназначенные для получения прутков и проволочных заготовок из молибдена и вольфрама, установили фирмы "GTE Silvanva" и "General Electric" (США), фирма "Osram" (ФРГ), "Lamp Metals" (Англия) и другие. Фирмы "International Nickel" и "Driver-Harris Co" (США) используют станы с трехвалковыми калибрами для получения прутков из сплавов на основе никеля, а фирмы "Dynamet Inc." (США) и "Hitachi Metals" (Япо-

ния) - для получения прутков на основе никеля и титана.

Выше рассматривалась продольная прокатка сплошных профилей, но многосторонняя деформация применяется при производстве труб, полых и сплошных профилей постоянного и переменного сечений на трехвалковых станах винтовой прокатки, а также других процессах ОМД, например, волочении, прессовании, ротационной ковке, штамповке и других процессах.

Характеристика области многосторонней деформации была бы неполной, если не рассматривать прокатку в двух валках, в которой имеются примеры многостороннего обжатия при производстве сортовых и особенно фасонных профилей. Сюда следует отнести прокатку шестигранной, где обжатия происходит с четырех сторон, круглой и квадратной стали, особенно при холодной прокатке и горячем калибровании. Эти процессы характеризуются малым формоизменением и деформацией, а следовательно обжатием по большей части поверхности. Наиболее ярко выражена многосторонняя деформация при прокатке в закрытых калибрах, где она стремится к всесторонней деформации.

Таким образом, основными тенденциями развития современного прокатного производства профилей являются создание процессов большого и малого объема производства. Причем последние технологии получают наибольшее распространение. Особенностью современных технологий является также использование в едином цикле разных процессов прокатки и даже других способов ОМД, при этом все большее распространение получает многосторонняя деформация обрабатываемого материала.

1.2. Анализ методов расчета параметров прокатки в калибрах с двух- и многосторонним обжатиями

В теории прокатки как и в других областях науки вначале получены решения для наиболее простого варианта - прокатки прямоугольного профиля в гладких валках, а затем эти решения использовались в более сложных случаях прокатки в калибрах и для этих целей разработано несколько способов, суть которых свести расчет деформации фасонной полосы в калибре к расчету прямоугольника в гладких валках. Наиболее распространенными из

них являются методы приведенной и соответственной полос. У фасонной и соответствующей приведенной полос равны площади и ширины, у соответственной, разработанной А.Ф. Головиным - площади и соотношения сходственных сторон. Недостатком этих методов является не полный учет влияния формы калибра и заготовки, а также кинематики течения металла и граничных условий, что может привести к существенным погрешностям при расчетах деформаций и особенно силовых параметров. Эти недостатки метода приведенной полосы в значительной мере устранены благодаря работам А.И. Целикова, А.П. Чекмарева, М.С. Мутьева, М.А. Зайкова, В.Г. Дрозда, В.А. Николаева и других путем введения соответствующих поправочных коэффициентов, учитывающих влияние формы калибра. Идеи А.Ф. Головина развиты в работах В.С. Смирнова, И.Я. Тарновского, В.К. Смирнова, Н.Б. Давильбекова и других, что позволило повысить точность расчета. Благодаря своей простоте и надежности методы приведенной и соответственной полос до настоящего времени находят практическое применение.

Б.П. Бахтинов и М.М. Штернов для расчета вытяжных калибров двухвалковых станков предложили использовать метод описанных прямоугольников, а т.к. последний в таком виде приводит к несоответствию параметров деформации и нарушению закона постоянства объема все расчеты строят на фактических величинах поперечных сечений, т.е. фактически используют приведенную полосу.

Используя методы решения упрощенных дифференциальных уравнений на основе законов механики сплошных сред, А.П. Чекмарев, М.А. Зайков, А.А. Динник, М.Л. Зайцев и другие получили формулы для определения среднего контактного напряжения при прокатке в калибрах простой формы. Поскольку в решениях пренебрегают касательными напряжениями, то влияние внеконтактных зон на среднее давление учитывают при помощи эмпирических коэффициентов.

В.Н. Выдрин, Л.А. Барков и другие на основе закона сохранения энергии определили при известном формоизменении опережение металла, среднее давление и мощность деформации при прокатке в ящичных, ромбических, квадратных, овальных и круглых калибрах.

В.М. Клименко успешно применил метод интегральных работ для определения среднего давления при прокатке в ящичных ка-

либрах.

И.Я.Тарновский, А.А.Поздеев и Ю.С.Зыков на основе вариационного принципа минимума полной мощности решили задачу по определению уширения в системе калибров овал-квадрат. П.И.Полухин, Г.Я.Гун и В.С.Берковский применили вариационное уравнение при решении задач по прокатке в ромбических и овальных калибрах.

М.Я.Бровманом на основе метода характеристик получены уравнения для определения энергосиловых параметров при прокатке в калибрах.

В работах В.К.Смирнова, В.А.Шилова, Ю.В.Инатовича и др. определены интегральные характеристики формоизменения и энергосиловые параметры при прокатке в двухвалковых калибрах на основе вариационного принципа минимума полной мощности. Эти одни из первых работ, когда одновременно найдены характеристики формоизменения и энергосиловые параметры. При решении поставленных задач принято, что очаг деформации состоит из подконтактной и внеконтактных зон, границами очага деформации с "жесткими концами" являются соответствующие вертикальные плоскости, а деформируемый металл обладает свойствами жестко-пластической среды. Поле скоростей течения металла принято из гипотезы плоских сечений и прямых вертикалей. Кинематически возможное поле скоростей в очаге деформации определено с точностью до двух неизвестных величин: коэффициентов уширения и опережения, для определения которых использованы вариационное уравнение принципа минимума полной мощности для жестко-пластической среды и уравнение баланса мощности.

Отличительной положительной особенностью рассматриваемых работ является кроме того подробное рассмотрение условий захвата и устойчивости полос в процессе деформации, а также других ограничений и их определение при прокатке в калибрах.

Работы Г.Я.Гуна базируются на теории механики сплошных сред с использованием численных методов решений дифференциальных уравнений, при этом рассматривается широкий круг процессов ОМД, в том числе и прокатка, в частности решена задача прокатки на гладкой бочке с использованием метода конечных элементов и на основе метода комфортных отображений рассмотрено

пластическое течение в криволинейной полосе.

Статистической обработкой экспериментальных данных, полученных в промышленных условиях, В.С.Берковский и В.Б.Шишко получили формулы для расчета уширения и усилий при прокатке в двухвалковых калибрах.

В работах П.И.Полухина и А.Хензеля рекомендованы эмпирические зависимости для определения коэффициентов уширения и вытяжки в функциях сомножителей, учитывающих влияние прокатываемого материала, температуры, скорости, коэффициента трения и вида смазки, а также отношения радиуса валков к высоте полосы после прокатки.

Ю.Б.Бахтинов при определении параметров прокатки рекомендует использовать эквивалентную прямоугольную полосу, у которой ширина равна ширине фасонной полосы, а высота $h_э = \sqrt{c} \cdot h_{max}$.

Общая методика расчета параметров вытяжных калибров двухвалковой прокатки по рекомендациям С.А.Тулупова, Г.С. Гунна, В.Д.Онискива, В.А.Курджумовой, и К.Л.Радюкевича включает определение:

1. Точки первоначального контакта полосы с валками и ее координаты по вершине калибра.
2. Зоны развитого уширения.
3. Величины дополнительного обжатия по ширине калибра, которая является переменной величиной.
4. Величины коэффициента формоизменения для однократно и многократно обжимаемого металла по ширине калибра.
5. Доли однократно и многократно обжимаемого металла по ширине калибра.
6. Доли каждого вертикального столбика рассматриваемого сечения по ширине калибра к общему сечению.
7. Фактического коэффициента формоизменения по ширине калибра.
8. Среднего коэффициента обжатия всего деформируемого сечения.
9. Доли обжимаемых и не обжимаемых участков в момент захвата и изменение их соотношения по длине очага деформации.

10. Параметров очага деформации и соотношения протяженностей характерных участков длины очага деформации.

Определении параметров прокатки в процессах с многовалковыми калибрами посвящено значительно меньше работ.

Барков Л.А., Выдрин В.Н., В.В. Пастухов и В.В. Чернышев при определении параметров прокатки в трех- и четырехвалковых калибрах использовали энергетический метод, основанный на совместном применении законов сохранения и наименьшей полной энергии. Численная реализация математической модели осуществлена на ЭВМ. Для одновременного определения деформаций, кинематических и энергосиловых условий использован метод последовательных приближений, согласно которому действительное состояние полосы рассматривается как предельное. В.Г. Шеркунов использовал энергетический метод для определения параметров прокатки, волочения и прессования.

Во ВНИИметмаш'е разработана программа "Мега", в которой определение напряженно-деформированного состояния при прокатке и других процессах ОМД производится на основе метода конечных элементов (МКЭ). В рассматриваемой работе использован способ задания смешанных граничных условий, который позволяет одновременно учитывать образование зон прилипания и скольжения по дуге контакта. 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. Для определения температурного поля используется вариационная формулировка задачи.

Необходимо отметить, что непосредственно воспользоваться всеми численными методами не представляется возможным, т.к. полностью не опубликованы материалы для реализации расчетов на ЭВМ.

Из приведенных выше материалов можно сделать следующие выводы:

1. Определение параметров прокатки в настоящее время базируется на нескольких методах, а именно, основанных на совместном решении уравнений равновесия элемента полосы в очаге деформации и пластичности, линий скольжения, работ, на законах механики деформируемого твердого тела с использованием численных методов решений дифференциальных уравнений. Последнее нап-

равление получает преимущественное развитие ,т.к.позволяет найти не только внешние,но и внутренние характеристики деформации,но наибольшее распространение продолжают сохранять первые методы.

2.В большей степени изучены процессы двухвалковой прокатки и в значительно меньшей степени многовалковая прокатка.

3.Отсутствует единая основа для определения параметров прокатки с двух- и многосторонним обжатиями профилей.

1.3.Постановка задачи и пути ее решения

Ранее было установлено,что современное прокатное производство профилей развивается в направлении создания процессов с большим и малым объемом производства.Особенностью современных технологий является использование в едином цикле разных процессов прокатки и даже других способов ОМД,при этом все большее распространение получает многосторонняя деформация обрабатываемого материала,которая отличается большей сложностью и меньшей изученностью, ее параметры определяются по индивидуальным методикам.Этот недостаток свойственен и двухсторонней деформации и ,таким образом,каждый процесс разрабатывается по индивидуальным методикам,исключающим взаимный обмен теоретической и экспериментальной информацией.Кроме того многие важные вопросы,например,влияние формы калибра и заготовки,типа обрабатываемого материала и другие на различные параметры прокатки являются недостаточно изученными.

Из этих положений вытекают следующие задачи:

1.Найти новую более универсальную основу для совершенствования процессов прокатки с двух и многосторонней деформацией,которая позволяла бы разрабатывать единые методики расчета параметров прокатки и выровнять уровни их познаний.

2.Провести необходимые дополнительные теоретические разработки и экспериментальные исследования.

3.Разработать на новой основе методики расчета интегральных параметров,определяющих высотную,продольную и поперечную деформацию и создать,тем самым,комплексный единый метод для совершенствования процессов прокатки профилей с двух- и мно-

госторонним обжатиями.

Алгоритм решения поставленных задач приведен на рис.1.1. Он включает разработку новых и использование известных методов.

Вначале находится общая основа для совершенствования процессов с двух- и многосторонней деформацией - метод среднеинтегральной полосы (СИП) и на основе его разработан метод конечных элементов, которые станут базой для создания методов расчета. Параллельно им будут также использованы известные решения - совместное решение уравнений равновесия и пластичности, методы работ, конечных элементов и другие. Затем выявлены необходимые критерии и структуры расчетных уравнений, проведены расчеты и эксперименты, получены зависимости, разработаны и реализованы на ЭВМ алгоритмы расчетов.

1.4. Разработка общей основы для определения параметров прокатки профилей в двух- и многовалковых калибрах (рис.1.1)

Разработка единой основы для расчета характеристик деформации двух- и многовалковой прокатки требует принципиально нового подхода в выборе исходных предпосылок.

Базовыми параметрами любого процесса прокатки являются высоты и ширины до и после прокатки, а также радиус валков. При двухвалковой прокатке прямоугольных профилей в гладких валках они постоянны и очевидны. При деформации в калибрах они переменны и в расчет принимаются средние значения. В предыдущем разделе отмечалось, что известно несколько способов усреднения, которые базируются на ширине (приведенная полоса), отношении высоты к ширине (соответственная полоса) и площади поперечного сечения профиля. Приведенная и соответственная полосы, давая приемлемые результаты при двухвалковой прокатке, не применимы в многовалковой прокатке, т.к. ширина и отношение высоты к ширине в этом случае принципиально не верно трактуют фактические условия деформации.

Другим недостатком методов приведенной и соответственной

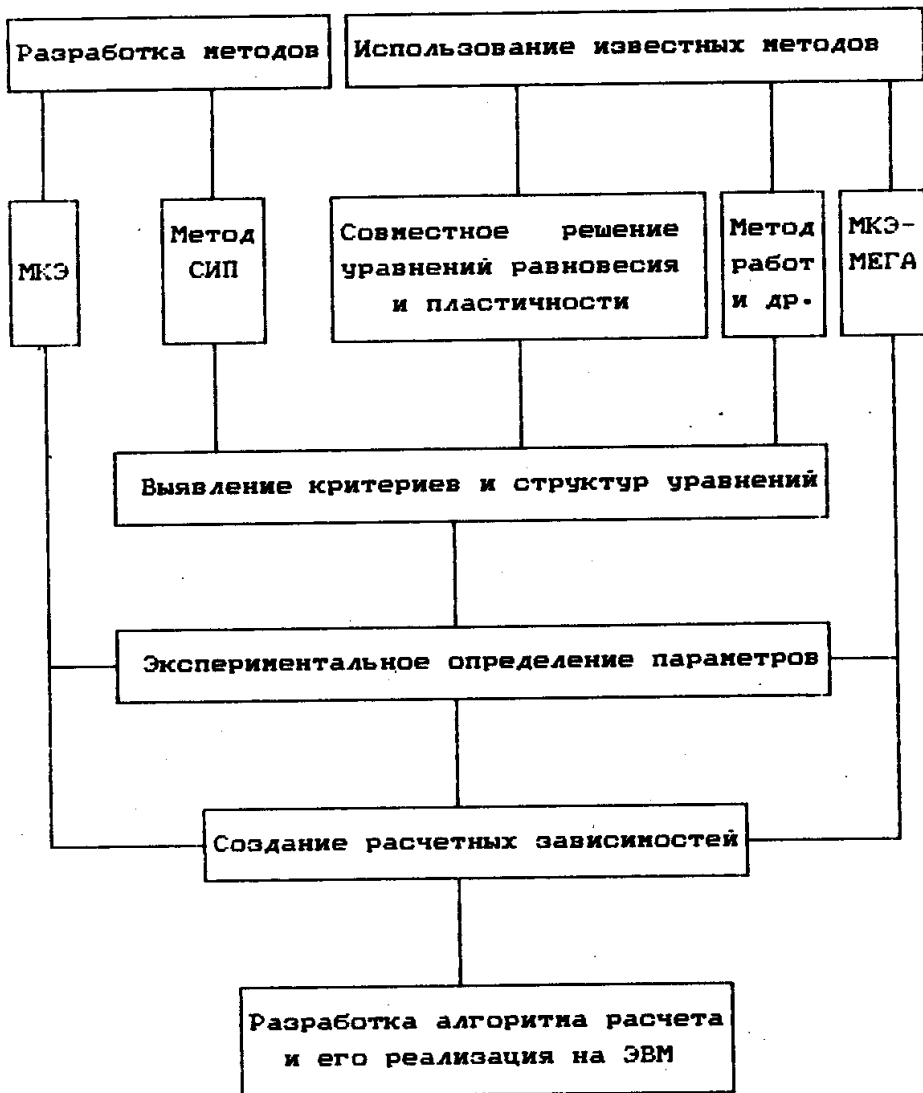


Рис.1.1. Алгоритм разработки методов для определения параметров прокатки

полос, а также других аналогичных способов усреднения, является не точный учет фактических условий деформации в очаге деформации из-за рассмотрения только сечений полос до и после очага деформации и игнорирования характера их изменения в самом очаге деформации.

Упомянутые недостатки можно устранить, если вместо ширины использовать более общую характеристику-проекцию периметра контакта прокатываемого материала с валками на выходе из очага деформации на ось прокатных валков при этом искомые уравнения будут иметь следующий первоначальный вид

$$h_{1cp} = \left(\int_0^{\pi/2} f h_1(b) db \right) / (\pi/2),$$

$$h_{2cp} = \left(\int_0^{\pi/2} f h_2(b) db \right) / (\pi/2),$$

$$R_{cp} = \left(\int_0^{\pi/2} f r(b) db \right) / (\pi/2),$$

где h_{1cp} , h_{2cp} и R_{cp} —средние высоты до и после прокатки и радиус валков;

$\pi/2$ —проекция периметра контакта металла с валками после прокатки на оси валков.

Выражения числителей в этих уравнениях представляют собой площади, поэтому

$$h_{1cp} = F'_1 / (\pi/2),$$

$$h_{2cp} = F_2 / (\pi/2),$$

$$R_{cp} = FR / \pi/2.$$

Здесь F'_1 —площадь поперечного сечения полосы до прокатки с учетом развития поперечной деформации в очаге деформации.

FR —площадь для определения среднего радиуса валков.

По физическому смыслу знаменатели в последних трех выражениях характеризуют ширину полосы после прокатки, тогда эти уравнения можно записать как

$$b_2 = \pi/2,$$

$$h_{1cp} = F_1/b_2, \quad (1.2)$$

$$h_{2cp} = F_2/b_2, \quad (1.3)$$

$$R_{cp} = FR/(2b_2). \quad (1.4)$$

В полученных уравнениях отсутствует характеристика периметра до прокатки. По аналогии с зависимостью (1.1)

$$b_1 = \Pi_1/2, \quad (1.5)$$

$$\Pi_1/2 = \Pi_2/2 - \Delta b, \quad (1.6)$$

где Δb — уширение.

Уравнения (1.1)–(1.5) являются характеристиками нового метода определения базовых параметров деформации — высот и ширин полос до и после прокатки, а также радиуса валков на основе прямоугольной полосы и усредненных параметров. Исходя из способа ее нахождения и физического смысла полоса названа среднеинтегральной (СИП), а метод — методом среднеинтегральной полосы. Параметры среднеинтегральной полосы найдены теоретическим путем, без допущений, поэтому точно определяют h_{1cp} , h_{2cp} , b_1 , b_2 и R_{cp} , а следовательно и зависящие от них величины, что видно на примере абсолютного Δh_{cp} и относительного $\Delta h_{cp}/h_{1cp}$ обжатий.

С одной стороны

$$h_{cp} = h_{1cp} - h_{2cp} = Fh/b_2,$$

с другой

$$h(b) = h_1(b) - h_2(b),$$

$$h_{cp} = \left(\int_0^{\Pi_2/2} h(b) db \right) / (\Pi_2/2) = \left(\int_0^{\Pi_2/2} h_1(b) db - \int_0^{\Pi_2/2} h_2(b) db \right) / (\Pi_2/2) =$$

$$= Fh / (\Pi_2/2),$$

а результат получается равный, т.к. в обоих вариантах относительное обжатие $E = Fh/F_1$, а $Fh = F_1 - F_2$.

Аналогичные результаты получаются для других параметров.

Проведенный в работе качественный и количественный анализ позволяет сделать вывод, что среднеинтегральная полоса является

наиболее универсальной и точной. Универсальность ее достигнута за счет использования более общих характеристик-площадей и периметров.точность-за счет более полного учета фактических условий деформации в очаге деформации.

Другие методы используют в своей основе более узкие характеристики-ширину и высоту,не достаточно полно учитывают условия деформации в очаге деформации,что в конечном итоге приводит к менее точным конечным результатам и ограниченной области использования методик.

Рассмотренные характеристики представляют собой абсолютные величины,но большую ценность в любой теории представляют относительные комплексы или критерии подобия,сокращающие количество необходимых переменных.

В настоящее время в теории прокатки практическое использование находят соотношения одномерных величин,например, $\Delta h/h_1, 2\pi l/\Delta h, l/h_{cp}, h_2/R, \Delta h/D, b_1/l$ и другие.Всего известно несколько десятков таких критериев. Критериев,основывающихся на соотношениях двух- и трехмерных величин значительно меньше.

Отношения площадей в прокатке используются при определении вытяжек,когда непосредственная деформация охватывает все сечение и часть его.Общим для этих вариантов является соотношение $\lambda = F_1/F_2$.

Соотношения площадей в качестве обобщенных коэффициентов деформации и критериев очага деформации $W_0/W^*, W_1/W^*, W_0/W_1, W_b/W_l, W_z/F, F/W_l$ рекомендованы Хайкиным Б.Е.. В этих выражениях W_0 и W_1 -начальная и конечная площади сечения полосы, W^* -площадь,общая для наложенных друг на друга начального и конечного сечений, W_b -сумма площадей проекций свободных поверхностей очага деформации на плоскость,перпендикулярную оси уширения, W_l -сумма площадей проекций торцевых поверхностей очага деформации на плоскость,перпендикулярную оси удлинения, W_z - "заземленная" площадь (при прокатке в гладких валках $W_z=0$,при прокатке в вытяжных калибрах W_z определяется как площадь тех частей конечного поперечного сечения полосы,которые контактируют со стенками калибра,а по высоте ограничены прямыми,параллельными оси уширения), F -контактная площадь.

Известные соотношения объемов имеют вид

$$U_b/U_h = A_b/A_h; U_i/U_h = A_i/A_h; U_s/U_h = A_s/A_h,$$

где индексы b, h, i и s характеризуют работы A , затрачиваемые на перемещение объемов металла \bar{U} в очаге деформации соответственно по ширине, высоте, а также в направлении зон отставания и опережения. Выражения использованы Бахтиновым Б.П. для вывода соответствующих уравнений в функции линейных величин и площадей.

Таким образом современная теория прокатки базируется, главным образом, на одномерных характеристиках, которые полностью не отражают фактические условия деформации.

Так, если предположить, что двух-, трех- и четырехвалковая прокатки характеризуются одинаковыми Δh и h_1 , то они должны иметь равные отношения $\Delta h/h_1$. Между тем фактические относительные обжатия в рассматриваемых вариантах различаются значительно.

Другим недостатком одномерных критериев является неопределенность некоторых параметров, например, неясно как находить отношение b_1/l при трехвалковой прокатке. В работе проведено изыскание более совершенных критериев. Поиск основывался на известных соотношениях одномерных величин и проводился в два этапа. На первом определялись истинные значения одномерных параметров, а на втором искомые критерии. В первую очередь найдены соотношения для относительного обжатия E , параметра δ , отношений l/h_{cp} , $\Delta h/D$, b_1/l и h_2/R . Их значения определяют высота полосы h_1 , абсолютное обжатие Δh , длина дуги захвата l , средняя по очагу деформации высота h_{cp} , диаметр валков D и ширина полосы до прокатки b_1 .

Эти характеристики кроме h_{cp} были рассмотрены выше, а

$$h_{cp} = (h_1 + h_2) / 2 = (F_1 + F_2) / (2b_2) = F_{cp} / b_2.$$

Путем деления соответствующих одномерных параметров получены искомые критерии

$$\begin{array}{ll} 1.7.1 \ E < F_h / F_1, & 1.7.2 \ \delta < \sqrt{F_x} / F_h, \\ 1.7.3 \ l / h_{cp} < F_x / (2F_{cp}), & 1.7.4 \ \Delta h / D < F_h / FR, \\ 1.7.5 \ b_1 / l < 2F_b b_2 / F_x, & 1.7.6 \ h_2 / R < 2F_2 / FR, \end{array} \quad (1.7)$$

где F_x —горизонтальная проекция контакта деформируемого материала с всеми валками;

$$F_{b1b2} = b_1 \cdot b_2.$$

Полученные соотношения наиболее полно характеризуют различные процессы прокатки и другие процессы ОМД. Одномерные критерии являются частным случаем двумерных соотношений, поэтому между ними поставлены знаки включения, а не равенства. Кроме рассмотренных выше одномерных критериев известны и другие, которые в соотношениях площадей имеют вид:

- | | |
|---|--|
| 1.8.1 $b_1/h_1 \leq F_{b1b2}/F'_1,$ | 1.8.2 $b_1/h_2 \leq F_{b1b2}/F_2,$ |
| 1.8.3 $h_1/R \leq 2F'_1/FR,$ | 1.8.4 $b_1/R \leq 2F_{b1b2}/FR,$ |
| 1.8.5 $\Delta h/R \leq 2F_h /FR$ | 1.8.6 $h_{cp}/R \leq 2F_{cp}/FR,$ |
| 1.8.7 $h_1/h_2 \leq F'_1/F_2,$ | 1.8.8 $\Delta h/h_2 \leq F_h/F_2, \quad (1.8)$ |
| 1.8.9 $\Delta h/h_{cp} \leq 2F_h/F_{cp},$ | 1.8.10 $l/h_1 \leq F_x/(2F'_1),$ |
| 1.8.11 $l/h_2 \leq F_x/(2F_2)$ | 1.8.12 $b_2/h_1 \leq F_{b2}/F'_1,$ |
| 1.8.13 $b_2/h_2 \leq F_{b2}/F_2,$ | 1.8.14 $b_2/R \leq 2F_{b2}/FR,$ |
| 1.8.15 $b_2/l \leq 2F_{b2}/F_x,$ | 1.8.16 $l/R \leq F_x/FR.$ |

Здесь

$$F_{b2} = b_2^2.$$

Полученные соотношения двумерных величин соблюдают принципы подобия и сохраняют количество критериев в системе.

Критерии (1.7) и (1.8) в сравнении с известными имеют несколько преимуществ:

1. Они точно и определенно характеризуют параметры прокатки вне зависимости от сложности процесса.

2. Соотношения площадей являются более универсальными и позволяют разрабатывать единые методики расчета параметров разных процессов.

3. Распространяют результаты теоретического и экспериментального исследований одного процесса на другой и тем самым выравнивают уровни их познания.

4. Расширяют области применения известных зависимостей.

5. Являясь более общими, они позволяют найти зависимости в функции одномерных величин.

б. Соотношения площадей применимы не только к разным видам прокатки, но и другим способам деформации и тем самым предоставляется возможность обмена достижениями в областях исследования и определения параметров различных процессов.

8. Критерии (1.7) и (1.8) могут применяться самостоятельно и совместно с другими критериями.

9. Наиболее эффективны соотношения площадей для сложных малоизученных процессов.

Недостатками полученных критериев являются:

1. Определение площадей сложнее, чем одномерных соотношений.

2. Методы расчета некоторых площадей, касающихся, главным образом, вертикальных проекций контакта металла с валками разработаны недостаточно.

Метод среднеинтегральной полосы и полученные критерии в качестве основы использованы в последующих работах и, в частности, при разработке метода конечных элементов.

1.5. Разработка метода конечных элементов (мкэ-сип)

Мкэ-сип предназначен для определения интегральных параметров прокатки. Алгоритм расчета по этому методу приведен на рис. 1.2.

Вначале вводятся условия деформации и назначается ширина полосы после прокатки. В первом приближении она принимается равной ширине предыдущего прохода. Далее происходит перевод режима деформации в модификацию среднеинтегральной полосы, математическое описание форм полос до, после прокатки, дискретизация области деформации на конечные вертикальные элементы и расчет уширения для каждого элемента в функции геометрических параметров очага деформации, ширины полосы, натяжений, прокатываемого материала, формы калибра и заготовки, упрочнения, текстуры и внеконтактных зон. Затем уширения элементов суммируются, находится ширина полосы после прокатки и сравнивается с первоначально заданной шириной. При несовпадении ширина полосы после прокатки принимается равной последнему полученному значению и расчет повторяется до совпадения с заданной точностью. После этого режим деформации является окончательно определенным и

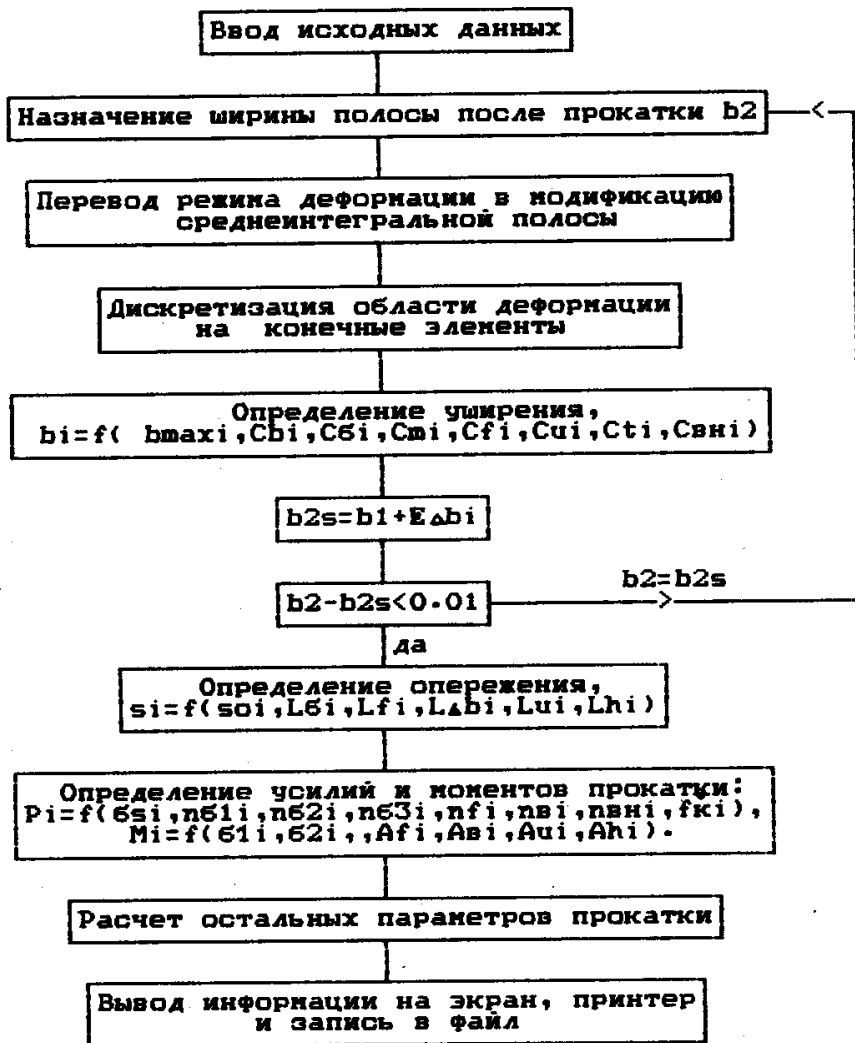


Рис.1.2. Алгоритм расчета интегральных параметров прокатки на основе методов конечных элементов и среднеинтегральной полосы

происходит расчет остальных параметров прокатки.

Алгоритм расчета мкэ-сип реализован на ЭВМ. Метод характеризуется высоким быстродействием, применим в случаях с двух- и многосторонним обжатиями и использован при разработке методик расчета всех основных параметров.

2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ УШИРЕНИЯ ПРИ ПРОКАТКЕ

Для определения уширения и других параметров прокатки использована единая структура расчетных зависимостей, в которой за основу берется главная характеристика, а влияние остальных факторов оценивается относительными этой главной характеристики функциями. При расчетах уширения за основу принято максимальное уширение Δb_{\max} , которое имеет место при прокатке прямоугольной полосы в гладких валках.

$$\Delta b = C_b \cdot C_{\delta} \cdot C_f \cdot C_m \cdot C_t \cdot C_u \cdot \Delta b_{\max}, \quad (2.1)$$

где $C_b, C_{\delta}, C_m, C_f, C_t$ и C_u - параметры, соответственно учитывающие влияние на уширение Δb ширины полосы, натяжения, материала прокатываемой полосы, формы калибра и заготовки, текстуры и упрочнения.

$$\Delta b_{\max} = ((1 - \sqrt{1-E})(1-1/\delta) + 1) / (1 - 0.25(1-1/\delta)(1 - \sqrt{1-E})). \quad (2.2)$$

$$C_b = k_1 \cdot (1-E)(b_1/b_{1k} - k_2) \exp(k_3 \cdot b_1/b_{1k}) + E. \quad (2.3)$$

$$k_1 = 2.84 + 3.91T/T_{\text{пл}},$$

$$k_2 = 0.3 + 0.4125T/T_{\text{пл}},$$

$$k_3 = -0.68 - 0.9375T/T_{\text{пл}},$$

где T и $T_{\text{пл}}$ - температуры прокатки и плавления.

$$b_{1k} = \Delta b_{\max} / ((1/\sqrt{1-E}) - 1).$$

Отличительной особенностью уравнения (2.3) является использование отношения b_1/b_{1k} , не b_1/l . Первое отношение характеризует влияние ширины полосы более правильно и при этом учитываются условия трения.

$$C_{\delta} = 1 - (\psi_1/(\delta-1) + \psi_2(\delta+1)) / (0.8 \ln(1/(1-E))), \quad (2.4)$$

$$\psi_1 = b_1/b_{\delta}; \quad \psi_2 = b_2/b_{\delta}.$$

Здесь b_1 и b_2 - переднее и заднее удельные натяжения;

δs -сопротивление деформации.

Действие натяжения на уширение двоякое, основное влияние оно оказывает через изменение напряженного состояния в очаге деформации и меньшее через утяжку поперечных размеров в меж-летевом промежутке. Выражение (2.4) учитывает оба эти фактора.

$$C_f = C_{f1} \cdot C_{f2}, \quad (2.5)$$

$$C_{f1} = 1 / (1 + \mu \cdot F_y / F_x); C_{f2} = 2 / n_v,$$

где F_y -суммарная вертикальная проекция контактной площади деформируемого материала;

n_v -количество валков, участвующих в деформации.

При прокатке в калибрах в сравнении с гладкой бочкой определение уширения значительно усложняется. Обжимаемый материал, встречая на своем пути боковые стенки калибра с изменяющимся диаметром валков перестает подчиняться закономерностям, введенным для случая свободного уширения и вынужден приобретать форму, образуемую калибром. В зависимости от формы калибра и заготовки полоса получает несвободное, стесненное или вынужденное уширение. Зависимость (2.5) учитывает эти закономерности.

$$C_m = 1 \dots 1.6. \quad (2.6)$$

Учет влияния материала полосы на уширение произведен на основании экспериментальных данных в зависимости от отношения $T/T_{пл}$. При холодной прокатке $C_m = 1$, при горячей прокатке $C_m = 1.3$ для высоколегированных сталей он достигает значений 1.6, для меди $C_m = 1.3$, для алюминия, цинка и никеля - 1.4, для бронз - 1.3..1.4 и для латуней - 1.4..1.5. При теплой прокатке в функции отношения $T/T_{пл}$ C_m принимает промежуточные между горячей и холодной прокаткой значения.

$$C_t = \exp(-1.2E_{\Sigma}), \quad (2.7)$$

где E_{Σ} -суммарное относительное обжатие.

$$C_u = 1 + 0.125 \Delta b \Delta h / (\delta s l \cdot \mu \cdot i). \quad (2.8)$$

Текстура и упрочнение оказывают влияние на уширение главным образом при холодной прокатке. Текстура уменьшает, а упрочнение увеличивает Δb .

Уравнение (2.1) прошло тщательную экспериментальную проверку в условиях двух- и многовалковой горячей, теплой и холодной прокатки черных и цветных металлов и имеет среднеквадра-

тичное отклонение $5.964.10^{-4}$, у формулы А.И.Целикова эта характеристика равна $2.428.10^{-2}$, Б.П.Бахтинова $1.848.10^{-2}$, т.е. выражение (2.1) является значительно более точным. На его основе разработано и реализовано несколько программ для проектирования оптимальных технологических процессов прокатки сортовых и фасонных профилей.

3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭНЕРГОСИЛОВЫХ ПАРАМЕТРОВ

3.1. Усилие и момент прокатки

На современном уровне рассматриваемый вопрос подробно рассмотрен при прокатке прямоугольных профилей в гладких валах. В меньшей степени изучена прокатка в калиброванных валах. Особенно мало материалов касается сложных калибров, а также процессов прокатки с большой неравномерностью деформации по ширине и высоте. Рассмотрение этих вопросов в работе уделено основное внимание.

В общем случае усилие прокатки

$$P = r_{cp} \cdot F_x,$$

а среднее контактное напряжение

$$r_{cp} = n_b' \cdot n_b'' \cdot n_b''' \cdot n_f \cdot n_b \cdot n_{вн} \cdot b_s,$$

где n_b' , n_b'' , n_b''' , n_f , n_b и $n_{вн}$ — параметры, соответственно учитывающие влияние на r_{cp} внешнего трения, внешних зон, натяжения, формы калибра и заготовки, ширины полосы и внеконтактных зон.

$$n_b' = 1 + 0.125 \cdot l/h_{cp},$$

$$n_b'' = (1 - (F_{отв}/F_{cp})^3) \cdot (n_b''_{сп} - 1) + 1.$$

$F_{отв}$ — площадь отверстия;

F_{cp} — площадь всего сечения;

$$-0.33$$

$n_b''_{сп} = (l/h_{cp})$ — параметр, учитывающий влияние внешних зон при прокатке профиля сплошного сечения.

$$n_b''' = 1 + b_1(1 + 1/\delta) + b_2(1 - 1/\delta) / (2r_{cp0}).$$

В последней формуле r_{cp0} равно среднему контактному напряжению без натяжения.

Формула

$$nf = 1 + \mu \cdot F_y / F_x$$

справедлива для простых и сложных профилей. Она учитывает влияние формы калибра и заготовки, а также условия трения.

Зависимость

$$n_b = 1.15 - 0.15 / (b_1 / b_{1k})$$

одновременно учитывает влияние среднего главного напряжения и изменение условий внешнего трения на усилие прокатки.

Влияние внеконтактных зон оценивается по уравнению

$$n_{вн} = 1 + (F_{вн} / F_1) \cdot ((1 + \pi / 2) / (n_b' \cdot n_b'' \cdot n_b''' \cdot n_f \cdot n_b) - 1).$$

Скорость деформации

$$U = U_2 (\lambda - 1) \ln(1 / (1 - E)) / (\lambda \cdot \ln \lambda - 1).$$

Важным моментом при определении усилий прокатки является расчет контактной площади, для определения которой предложено несколько методов и много различных зависимостей. Использование площадей позволяет получить одну универсальную зависимость

$$F_x = \sqrt{2F_h \cdot FR}.$$

Приведенные выше зависимости получены теоретическим путем, они справедливы для горячей, теплой и холодной прокатки.

Момент прокатки

$$M = n_v \cdot P \cdot \varphi \cdot l \mp M_b,$$

где n_v — количество валков, участвующих в деформации;

φ — коэффициент положения равнодействующей;

M_b — момент от усилий до и после прокатки.

$$\varphi = \varphi_0 \cdot A_f \cdot A_{\Delta b} \cdot A_u \cdot A_h \cdot A_b.$$

Здесь φ_0 — коэффициент положения равнодействующей при прокатке тонкой прямоугольной полосы в гладких валках;

$A_f, A_{\Delta b}, A_u, A_h$ и A_b — параметры, учитывающие влияние формы калибра и заготовки, уширения, упрочнения, высоты полосы и натяжения.

$$A_f = 1 + \mu \cdot F_y / F_x.$$

• Для оценки влияния уширения, которое уменьшает φ предложена формула

$$A_{\Delta b} = 2(\Delta b / b_1 + 3) / (3(\Delta b / b_1 + 2)).$$

Упрочнение также уменьшает φ

$$A_u = 2(\Delta b / b_{s1} + 3) / (3(\Delta b / b_{s1} + 2)).$$

Рост толщины полосы при прочих равных условиях приводит к увеличению коэффициента положения равнодействующей

$$Ah=1+F2/FR$$

Для оценки влияния натяжения получено выражение

$$Ab= 1+ (\psi 2-\psi 1)/((\delta-1)\ln(1/(1-E)))$$

3.2. Коэффициент трения при прокатке

В настоящее время коэффициент трения μ определяют расчетным и экспериментальными методами. Первый способ разработан для черных металлов, величина μ для цветных металлов находится по экспериментальным данным.

Полученные в работе зависимости пригодны для черных и цветных металлов при горячей, теплой и холодной прокатке. Расширение области расчета достигнуто за счет использования относительных вместо абсолютных величин. Рекомендуемые уравнения для расчета коэффициента трения при захвате имеют вид:

$$\mu = kv \cdot kc \cdot kvp \cdot (1.05 - 0.73 T/T_{пл}),$$

$$\mu = kv \cdot kc \cdot kvp \cdot (1.05 T/T_{пл} + 0.18).$$

Первая зависимость рекомендуется для области $T/T_{пл} > 0.5$, вторая при $T/T_{пл} < 0.5$. В последних двух формулах kv, kc и kvp обозначены параметры, учитывающие влияние скорости прокатки, смазки, материал валков и полосы. Эти характеристики наряду с температурой оказывают значительное влияние на коэффициент трения. Так $kv = 0.3 \dots 1$, приблизительно в тех же пределах изменяется величина $kc, kvp = 0.8 \dots 1$.

4. ОПЕРЕЖЕНИЕ ПРИ ПРОКАТКЕ

Для определения опережения использована структура зависимости, аналогичная другим параметрам

$$S = S_0 \cdot L_6 \cdot L_f \cdot L_{\Delta b} \cdot L_u \cdot L_h,$$

где S_0 —опережение при прокатке тонких и широких полос;

$L_6, L_f, L_{\Delta b}, L_u$ и L_h —параметры, учитывающие влияние на опережение натяжения, формы калибра и заготовки, уширения, упрочнения и высоты полосы.

2

$$S_0 = 0,25 (1 - 1/\delta) \cdot E / (1 - E),$$

$$L_b = 1 - (\psi_2 - \psi_1) / (\delta - 1) \ln(1 / (1 - E)),$$

2

$$L_f = ((\delta - n_f / n_{f1}) / (\delta - 1)),$$

$$L_{\Delta b} = (\lambda - 1) (1 - E) / E,$$

2

$$L_u = 0,44 \cdot ((\Delta b_s / b_{s1} + 3) / (\Delta b_s / b_{s1} + 2))$$

2

$$L_h = (1 + 2F_2 / FR)$$

$$n_{f1} = 1 + F_y / F_x$$

5. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРОЦЕССОВ ГОРЯЧЕЙ И ХОЛОДНОЙ ПРОКАТКИ

5.1. Разработка процессов горячей прокатки сортовых профилей из углеродистых сталей

Процессы прокатки сортовых профилей из углеродистых сталей разработаны для стана 300 Донецкого металлургического завода, на котором прокатываются круглые ϕ 12-30 мм и арматурные №18, 22 и 25 стали.

На стане применялась схема прокатки с малой универсальностью. Так чистовой овалный калибр использовался для одного, максимум двух смежных кругов, арматурные профили прокатывались по самостоятельной линии. Чистовые овалы имели различную конструкцию. Калибры 1-ой чистовой группы использовались трех типов: квадратные, плоские и ребровые овалы, причем для каждого овала запроектирован свой калибр и т.д.

ДМЗ и ВНИИметмашем разработана более универсальная калибровка, состоящая только из чередующихся овалных калибров и ребровых овалов. Конструкция последних отличается от применявшихся боковыми элементами ручьев, которые обеспечивают плавные очертания выходящей из калибра полосы, повышают ее устойчивость в следующем овалном калибре и уменьшают выработку его.

Разработанная система калибров обладает большей универсальностью. Общее количество калибров значительно сокраще-

но, что позволило уменьшить номенклатуру проводковой арматуры и режущего инструмента, сократить количество перевалок.

5.2. Разработка процессов горячей прокатки сортовых профилей из легированных и высоколегированных сталей.

Процессы прокатки легированных и высоколегированных сталей и сплавов разрабатывались для проволочного стана литейно-прокатного агрегата завода "Электросталь", спроектированного и изготовленного ВНИИметмаш'ем. На этом агрегате впервые в отечественной и зарубежной практике совмещена разливка с прокаткой высоколегированных сталей. Процесс прокатки на ЛПА также отличается новизной. В состав прокатного оборудования кроме планетарного стана входит блок клеток с общим приводом и расположением клеток под углом 45° , на котором впервые осуществлена прокатка легированных и высоколегированных сталей и сплавов.

В состав ЛПА входит агрегат непрерывного литья, плавильные машины, установка плазменной резки, индукционная подогревательная печь, задающая вертикальная клетка, планетарный стан, чистовая группа клеток и моталка. Режим работы ЛПА циклический.

Марочный сортамент агрегата включает стали X23M5T, X27M5T, ЭК33, 35ГС, 55СМ5ФА, ЭИ652, ЭИ702, X15H60, X20H80, 12X18H9M и другие. Режимы обжатий и калибровка валков разработаны для круглой и арматурной стали. Так как в сортаменте ЛПА преобладают высоколегированные марки, то расчет режима деформаций базировался на этой группе сталей. По этой причине выбрана система круг-овал-круг, которая обеспечивает требуемое качество готовой продукции. Так как планетарным станом прокатывается квадратная заготовка, то в первых двух проходах использована переходная система квадрат-овал-квадрат.

Легированные стали характеризуются различными свойствами, а следовательно и разными режимами деформации, а так как прокатка осуществляется в блоке клеток с общим приводом, где соотношения чисел оборотов валков являются заданными и имеется более узкий диапазон регулирования константы прокатки, то к определению параметров предъявляются высокие требования точ-

ности расчета.

5.3. Совершенствование процесса бесконечной прокатки

На Таджикском алюминиевом заводе с 1987 г. работают два литейно-прокатных агрегата алюминиевой катанки ЛПА-АК-8, разработанных ВНИИметмаш, на которых осуществляется производство катанки с 9 мм, прокатываемой со скоростью 12,7 м/с и сматываемой в бунты массой до 1,4 т.

В процессе эксплуатации станов ЛПА-АК-8 выявлены и реализованы резервы улучшения условий их работы и повышения качества готовой продукции.

Усовершенствована калибровка прокатных валков за счет количественных и качественных изменений ее. Принципиально изменена форма овала 1-ой клетки. Он принят несимметричным относительно горизонтальной оси, т.к. предназначен для обжатия трапециевидной заготовки. Его основные элементы имеют прямолинейную форму и производят равномерную деформацию по высоте, а боковые элементы более интенсивно сдерживают развитие поперечной деформации. Такая форма в сравнении с однорадиусным овалом улучшает условия захвата, центрирование и устойчивость заготовки, способствует повышению качественных показателей проката, делает меньшим и более равномерным износ ручьев.

При проектировании кругов изменена их форма и размеры. Форма максимально приближена к геометрическому кругу и вместе с тем уменьшена вероятность образования заката. Для улучшения геометрии круга разработана также специальная конструкция овалов. Реализация предложенных усовершенствований на ЛПА-АК-8 расширила диапазон регулирования режима деформации, улучшила условия деформации и геометрию катанки. Наиболее полно они проявляют себя при калибровании профилей, когда имеет место малые вытяжки. Опыт завода "Серп и Молот" показывает, что при прокатке кругов с 12-28 мм из легированных сталей горячее калибрование снижает колебание размеров в два и более раз. Калибрование эффективно и при холодной прокатке.

5.4. Разработка процессов холодной прокатки шестигранной стали размерами S11...30 и S32...65 мм

5.4.1. Общая характеристика процесса

Производство калиброванной шестигранной стали холодной прокаткой вместо волочения впервые организовано в нашей стране. Сведений об использовании аналогичной технологии за рубежом также не имеется. Новый процесс увеличивает производительность в 5-6 раз, экономит на 5...10% дефицитный металл и значительно снижает расходы по переделу.

Предельные отклонения размеров для шестигранников рассматриваемого диапазона находятся в пределах от 0 до 0,13 мм. Кривизна прутков должна быть не более 2...3 мм/п.м.

При предварительном проектировании было установлено, что для получения требуемого качества необходимо предусмотреть четыре прохода, при этом заготовка должна иметь повышенную точность. Если отклонения размеров заготовки будут находиться в пределах обычной точности действующих стандартов, то необходимо шесть проходов.

Принято высотную деформацию осуществлять в калиброванных валках (нечетные проходы), а обжатия по ширине производить на гладкой бочке (четные пропуски).

Для более интенсивного устранения разномерности подката обжатия по проходам принимались возможно меньшими. Минимальными они выбирались и с точки зрения получения наибольших резервных сил трения, т.к. четные клетки являются не приводными.

В принятом способе прокатки горизонтальные клетки осуществляют собственную деформацию и создают продольные усилия в полосе, необходимые для обжатия шестигранника в холостых вертикальных валках, поэтому деформации в соседних клетях должны быть согласованными.

Первая клеть кроме собственной деформации способствует обжатию во второй холостой клетке, третья осуществляет собственную деформацию и деформацию переднего конца в четвертой клетке, а также вытягивает задний конец полосы после выхода его из первой клетки.

Правильная машина кроме правки создает продольное, необходимое для деформации середины и заднего конца шестигранника в четвертой вертикальной клетки.

5.4.2. Состав основного оборудования и технологические требования к нему

Заготовки на стан подаются пакетами, которые должны разбираться и поштучно задаваться в стан, поэтому в составе оборудования должен быть предусмотрен дозатор. Иногда прутки имеют искривленные резкой концы, которые приводят к затруднительному и неправильному захвату полосы. Предотвратить это можно снятием фаски у переднего конца, что требует соответствующей машины.

Для стабильности захвата перед первой клетью должен быть предусмотрен задающий механизм.

В прокатное оборудование должно входить четыре клетки. Для компактности его вертикальные клетки приняты холостыми. Это также упрощает их конструкцию и повышает жесткость, что важно для получения в конечном итоге надлежащей точности. Расчетами установлено, что в этом случае жесткость клетки должна быть не менее 2800 кН/мм, биение валков не более 0,03 мм, а отклонения размеров заготовки не должны превышать 0,4 мм.

Процесс холодной прокатки прутковой стали сопровождается, как правило, повышенным в сравнении с горячей деформацией искривлением полосы. Поэтому в состав оборудования должна входить правильная машина. Кроме выполнения основной своей функции она должна вытягивать задний конец шестигранника из четвертой холостой клетки, поэтому должна быть установлена в линии стана и максимально приближена к последней клетки.

За правильной машиной устанавливаются карманы для сбора готовой продукции.

5.4.3. Характеристика стана 320

Конструкция стана разработана и изготовлена во ВНИИметмаш'е. В состав оборудования входят четыре клетки, раскладчик прутков, машина для обработки фасок, правильная машина, рольганги

и пакетирующие средства.

Прокатные клетки спроектированы с учетом особенностей холодной прокатки сортовой стали высокой точности. Их конструкция характеризуется объемным предварительным напряжением и высокой жесткостью в радиальном и осевом направлениях, а также малым биением валковой системы.

Горизонтальные и вертикальные клетки соответственно имеют следующие характеристики:

Диаметр валков, мм	320/310	320/310
Биение валковой системы, мм	<0.03	<0.03
Допустимое усилие прокатки, кН	450	270
Радиальная жесткость, кН/мм	3500	2800
Осевая жесткость, кН/мм	50	30
Масса клетки, кг	3000	2500

Скорость прокатки в зависимости от сортамента изменяется в пределах 0,8...2,0 м/с. Годовой объем производства составляет 20 тыс. т.

Стан 320 холодной прокатки шестигранной стали со второй половины 1990 года успешно эксплуатируется на металлургическом заводе им. А.К. Серова.

Стан 450, предназначенный для калибрования шестигранников 32...65 мм, аналогичен по конструкции стану 320. В настоящее время он находится в стадии изготовления.

6. ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Найдена новая и единая основа для определения параметров прокатки профилей в двух- и многовалковых калибрах-метод среднеинтегральной полосы, который является наиболее универсальным и точным. Универсальность его достигнута за счет использования более общих характеристик-площадей и периметров, точность-за счет более полного учета фактических условий деформации в очаге деформации.

2. Разработаны более совершенные критерии, представляющие собой различные соотношения двумерных величин, которые позволяют разрабатывать единые методики расчета параметров разных

процессов, выравнивают уровни их теоретических и экспериментальных исследований, расширяют область применения известных уравнений, уточняют расчет и имеют другие важные преимущества.

3. Среднеинтегральная полоса и полученные критерии использованы при разработке метода конечных элементов и таким образом создана комплексная эффективная основа для исследования и определения параметров двух- и многовалковой прокатки.

4. Проведено теоретическое и экспериментальное исследование процессов прокатки с двух- и многосторонним обжатием, в результате которого выявлены и определены новые факторы, влияющие на различные характеристики прокатки.

5. На основе метода среднеинтегральной полосы, полученных критериев, метода конечных элементов и проведенных исследований разработаны методики расчета всех основных параметров: уширения, усилий и моментов прокатки, межклетевых натяжений, коэффициента трения, опережения, неравномерной деформации, серповидности, точности прокатки и другие. Качественный анализ показал, что в сравнении с известными они учитывают наибольшее количество факторов и имеют более широкую область применения, а количественный, что они являются наиболее точными.

Таким образом, на единой основе создан комплексный метод для совершенствования процессов прокатки с двух- и многосторонним обжатиями.

6. Разработаны, исследованы и освоены восемь различных процессов на шести предприятиях черной и цветной металлургии, включающие горячую, теплую и холодную прокатку сортовых и фасонных профилей.

Большинство технологий освоено впервые в отечественной и зарубежной практике. Параметры процессов легли в основу создания соответствующего прокатного оборудования.

7. Доля годового экономического эффекта от внедрения разработок по состоянию на 1990 г. составила более 1 млн. руб.

7. ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНО В РАБОТАХ:

1. Кривенцов А. М. Двумерные критерии в теории прокатки. // Сб. науч. тр. ВНИИметмаш "Разработка и исследование оборудования

прокатных станов."-М.,1990.-С.63-74.

2.Кривенцов А.М.Влияние формы калибра и подката на параметры прокатки.//Сб."Разработка и исследование оборудования прокатных станов"-М.,1990.-С. 7-20.

3.Кривенцов А.М.Развитие теории прокатки на основе новых критериальных зависимостей//Тез. докл.IU Всесоюзной научно-технической конференции:Теоретические проблемы прокатного производства.-Днепропетровск,1988.

4.Кривенцов А.М.Определение энергосиловых параметров прокатки в калибрах двух- и многовалковых станов.//Сб.науч.тр.ВНИИметмаш Конструкция,расчет и исследование прокатных станов."-М.,ВНИИметмаш,1987.-С.65-74.

5.Кривенцов А.М.Коэффициент трения при горячей,холодной и теплой прокатке цветных и черных металлов.//Сб.науч.тр.ВНИИметмаш"Конструкция,расчет и исследование прокатных станов."-М.,ВНИИметмаш,1987.-С.75-81.

6.Кривенцов А.М.Расчет вытяжных калибров.//Сб.науч.тр.ВНИИметмаш "Создание и исследование прокатных станов",-М.,1980.-С.108-114.

7.Зюзин В.И.,Кривенцов А.М.Уширение при прокатке прямоугольных профилей на гладкой бочке.//Сб."Труды ВНИИметмаш".-1969,-N25.-С.46-59.

8.Зюзин В.И.,Кривенцов А.М.Уширение при прокатке в калибрах.//Сб."Труды ВНИИметмаш",-1970,-N28.-С.81-100.

9.Зюзин В.И.,Кривенцов А.М.Уширение при горячей прокатке с натяжением.Бюл.ЦНИИМ,1970,N1.С.38,39.

10.Зюзин В.И.,Кривенцов А.М. Дифференциальное уравнение удельного давления при прокатке полосы переменного сечения.//Сб.НИИИФОРМТЯЖМАШ.-1969.-1-69-1.-С.24-26.

11.Зюзин В.И.,Кривенцов А.М.Расчет поперечных параметров вала продольной периодической прокатки.//Сб."Труды ВНИИметмаш",-1970,-N25.-С.160-170.

12.Зюзин В.И.,Кривенцов А.М. Графоаналитический метод расчета профиля чистовых валков станов продольной периодической прокатки.Сб.НИИИФОРМТЯЖМАШ.-1972,1-71-23.-С.15-17.

13.Когос А.М.,Сиушев С.Х.,Кривенцов А.М. и др. Создание,исследование и освоение пятиклетевого стана холодной про-

катки коллекторных и прямоугольных полос из меди и ее сплавов. //Сб. "Труды ВНИИметмаш".-1976,-N46.-С.14-19.

14. Жучин В.Н., Вайсфельд А.А., Кривенцов А.М., Цветков А.Б. Освоение и исследование группы чистовых клетей проволочно-го литейно-прокатного агрегата. //Сб. научн. тр. ВНИИметмаш "Создание и исследование прокатных станов".-М., 1980.-С.13-20.

15. Звзин В.И., Бахтинов Ю.Б., Кривенцов А.М. и др. Изготовление специальных фасонных профилей переменного сечения. //Сб. НИИНОФОРМТЯЖМАШ, 1975, 1-75-15.

16. А.с. 495104. Прокатная клеть дуо для прокатки полос /А.М. Кривенцов и др. //Опубл. в Б.И., 1975,-N46.

17. А.с. 459889. Способ получения шестигранных профилей. /А.М. Кривенцов и др. // В открытой печати не публикуется.

18. А.с. 380379. Устройство для удержания высоких полос. /А.М. Кривенцов и др. //Опубл. в Б.И., 1973,-N21.

19. А.с. 804030. Устройство для стабилизации раствора валков прокатной клетки / А.М. Кривенцов и др. //Опубл. в Б.И., 1981.-N6.

20. А.с. 478631. Прокатный валок для профильной периодической прокатки /А.М. Кривенцов и др. //Опубл. в Б.И., 1975,-N28.

21. А.с. 2265050. Способ получения профилей переменного сечения с различными постоянными углами клиновидности в двух направлениях /Кривенцов А.М. и др. //Опубл. в Б.И., 1970,-N21.

22. А.с. 329939. Способ производства периодических профилей. /А.М. Кривенцов и др. //Опубл. в Б.И., 1972,-N8.

23. А.с. 209380. Способ производства периодических профилей. /А.М. Кривенцов и др. //Опубл. в Б.И., 1968,-N5.



Отпечатано во ВНИИметмаше.

Зак. 718 Тираж 100 экз.