

05.16.05

В 923

На правах рукописи



Выдрия Александр Владимирович

**ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ И МАТЕМАТИЧЕСКОЕ
МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ПРОКАТКИ С ЦЕЛЬЮ
ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА ПРОДУКЦИИ**

Специальность 05.16.05 – «Обработка металлов давлением»

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Работа выполнена в Южно-Уральском государственном университете.

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор Гун Г.С.,
доктор технических наук, профессор Коновалов А.В.,
доктор технических наук, профессор Смирнов В.К.

Ведущее предприятие – ОАО «Мечел».

Защита состоится 4 октября 2000 г., в 14 часов, на заседании диссертационного совета Д 053.13.04 при Южно-Уральском государственном университете по адресу: 454080, г. Челябинск, пр.им.В.И.Ленина, 76.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Южно-Уральского государственного университета.

Автореферат разослан 1 сентября 2000 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Мирзаев Д.А.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность. В настоящее время общемировые тенденции развития металлургии заключаются в гибком удовлетворении спроса и оптимизации технологии, снижении цен и повышении качества изделий. В новых экономических условиях промышленность России вынуждена прежде всего ориентироваться на качество металлопродукции, особенно когда эта продукция поступает на мировой рынок. От качества проката, как конечного продукта металлургического производства, во многом зависит эффективность в металлопотребляющих отраслях промышленности и, следовательно, его улучшение является важной задачей, стоящей перед всем хозяйственным комплексом страны. Экономические расчеты свидетельствуют о том, что улучшение качества металлопродукции значительно более эффективно, чем увеличение объема ее выпуска. Однако, в виду сложности процессов, происходящих при прокатке черных и цветных металлов, решены далеко не все проблемы, связанные с формированием качества металлопродукции. Особенно это касается теоретического описания происходящих процессов и их формализации. В то же время математические модели, адекватно описывающие процессы, протекающие в металле в процессе его формоизменения, могут служить базой для совершенствования существующих и разработки новых технологических процессов прокатки, обеспечивающих коренное улучшение качества проката. Таким образом, создание методологических основ теоретического анализа процессов формирования качества проката и разработка рекомендаций по их практическому использованию является актуальной задачей.

Работа выполнялась в рамках государственной научно-технической программы «Новые ресурсосберегающие и экологически чистые металлургические технологии», системы грантов Минобразования РФ, программ, выполняемых по единому заказ-наряду и финансируемых из средств государственного бюджета, а также по хоздоговорам с предприятиями Имаш УрО РАН (г.Екатеринбург), ЧТПЗ (г.Челябинск), ВСМПО (г.Верхняя Салда), ЗМЗ (г.Златоуст).

Цель и задачи работы. Дальнейшее развитие теоретических подходов к описанию процессов формирования качества металла при прокатке, разработка новых и применение наиболее современных методов математического моделирования для анализа конкретных процессов горячей и холодной прокатки.

Для достижения этой цели необходимо решить следующие задачи:

1. Разработать общие подходы к анализу процессов формирования качества проката на основе математического моделирования с учетом многообразия частных критериев качества.
2. Создать комплекс математических моделей и алгоритмов для описания структурных элементов системы «прокатный стан -полоса-система автоматического управления», участвующих в формировании качества прокатной продукции.

3. Разработать новые перспективные технические решения, обеспечивающие повышение качества проката.
4. На основе результатов теоретических исследований выработать рекомендации по их использованию в промышленных условиях с целью повышения качества продукции.

Научная новизна. Создана теоретическая база для разработки новых технических решений и математических моделей процессов формирования качества продукции при прокатке путем применения системного подхода к решению проблемы повышения качества проката. Впервые для математического описания процессов формирования качества проката предложена векторная модель и на ее основе сформулирован обобщенный критерий качества.

В работе предложен комплекс новых подходов к математическому моделированию структурных элементов системы «прокатный стан –полоса–система автоматического управления», среди которых можно выделить следующие:

1. Разработана общая схема анализа процессов прокатки, основанная на рассмотрении условий равновесия всего объема очага деформации относительно трех координатных осей, условий баланса и минимума мощностей, и позволяющая строить на единой основе математические модели для определения интегральных характеристик процесса прокатки на гладкой бочке и в калибрах, образованных произвольным числом валков, с учетом различных видов несимметрии процесса деформации.
2. Предложен новый подход к разработке математических моделей для определения контактных напряжений в общем случае несимметричной холодной прокатки полос, основанный на рассмотрении двух уравнений равновесия элементарного объема, выделенного в очаге деформации двумя поперечными сечениями. Разработан алгоритм численного решения задачи на основе метода конечных элементов, учитывающий реальный характер упрочнения материала в процессе деформации.
3. Предложена новая формулировка краевой задачи механики сплошных сред в виде системы из трех дифференциальных уравнений относительно двух функций тока и среднего нормального напряжения и впервые получена общая форма записи механических граничных условий. Разработаны общие принципы решения сформулированной краевой задачи с использованием методов Галеркина и конечных элементов.
4. Впервые предложена общая методика определения с помощью метода конечных элементов стрелы прогиба валков прокатных станков, позволяющая определять прогиб в любом поперечном сечении валка с учетом реальной формы элементов бочки.
5. Впервые предложено использовать метод конечных элементов для анализа динамических процессов в линиях приводов прокатных станков и разработана методика анализа движения двухмассовой системы, моделирующей линию привода валка прокатного стана, с учетом демпфирующих свойств линии привода и очага деформации.

6. Впервые использованы основные положения теории оптимального управления для построения модели управления нажимными винтами прокатного стана при регулировании толщины полосы.
7. В результате теоретического анализа процесса несимметричной прокатки полос выявлен механизм образования дефекта их плоскостности в виде желоба
8. Разработана феноменологическая модель для описания сопротивления металла пластической деформации впервые позволившая на единой основе определять изменение прочностных свойств металлов во всем температурно-скоростном диапазоне условий обработки давлением.

Достоверность. Научные результаты и выводы получены на основе теоретических исследований, выполненных с учетом фундаментальных положений теории обработки металлов давлением, механики сплошных сред и математического анализа. Они не противоречат существующей и полученной автором экспериментальной информации. Опробование в промышленных условиях рекомендаций, сформулированных на основе теоретических разработок, подтвердило их работоспособность и эффективность.

Практическая ценность. В результате решения поставленной научной проблемы разработаны методики теоретического и экспериментального анализа процессов прокатки, способы и устройства, позволяющие повысить качество прокатной продукции.

1. Разработана методика расчета усилия, кинематики и конечной толщины полосы при холодной прокатке, позволяющая определять величину продольной разнотолщинности полос и выполнять анализ путей повышения точности проката, в том числе с использованием различных видов несимметрии процесса. Методика оформлена в виде программного продукта.
2. Разработана методика расчета усилия и поля скоростей при сортовой прокатке, позволяющая анализировать в совокупности с известными математическими моделями влияние упругих деформаций клетки на размеры готового профиля. Методика оформлена в виде программного продукта.
3. Разработана методика определения радиуса кривизны желоба, возникающего при прокатке-волочении, и программа, позволяющая анализировать влияние технологических параметров процесса на величину желоба.
4. Разработана методика анализа напряженно-деформированного состояния при сортовой прокатке, позволяющая оценивать свободное формоизменение металла в разъеме калибра, напряженное состояние в очаге деформации и прогнозировать вероятность нарушения сплошности. Методика оформлена в виде программного продукта.
5. Разработана математическая модель, алгоритм и программа расчета формоизменения при получении плющеной ленты последовательно в монолитной и роликовой волоках, позволяющая существенно снизить трудоемкость определения режима обжатий для получения плющеной ленты с высокой точностью по ширине.

6. Разработана методика экспериментального исследования металлов и сплавов на пластометре, позволяющая минимизировать число опытов для определения сопротивления пластической деформации в широком диапазоне температурно-скоростных условий обработки давлением.
7. Разработаны способы прокатки и устройства, позволяющие повысить точность полос по толщине без применения прецизионных измерительных приборов и дорогостоящих САРТ полосы.
8. Разработана методика рационального построения технологического процесса производства холоднокатаных полос, обеспечивающего высокую точность размеров, профиля и формы полос, а также заданный уровень физико-механических свойств металла.

Апробация работы. Основные положения работы и отдельные ее результаты докладывались и обсуждались на Всесоюзной конференции «Новые технологические процессы прокатки, интенсифицирующие производство и повышающие качество продукции» (Челябинск, 1984); Всесоюзной конференции «Прогрессивные технологические процессы в производстве холоднокатаного листа» (Липецк, 1985); IV Всесоюзной конференции «Теоретические проблемы прокатного производства» (Днепропетровск, 1988); Всесоюзной конференции «Новые технологические процессы прокатки как средство интенсификации производства и повышения качества продукции» (Челябинск, 1989); Всероссийской конференции «Математическое моделирование технологических процессов обработки материалов давлением» (Пермь, 1990); Всесоюзной конференции «Новые технологические процессы и оборудование для получения моно- и многослойных профилей и лент из порошковых, литых и пластически деформированных материалов» (Сочи, 1991); Международной конференции «Черная металлургия России и стран СНГ в 21 веке» (Москва, 1994); Межгосударственной научно-технической конференции «Проблемы развития металлургии Урала на рубеже XXI века» (Магнитогорск, 1996); II Международной научно-технической конференции «Проблемы пластичности в технологии» (Орел, 1998); III Международном конгрессе прокатчиков (Липецк, 1999); V Международной научно-технической конференции «Теоретические проблемы прокатного производства» (Днепропетровск, 2000), а также на ежегодных научно-технических конференциях Южно-Уральского государственного университета (1981, 1985 – 2000).

Публикации. По теме диссертации опубликованы 18 статей, 1 методическое пособие, 9 тезисов докладов на Международных и Всесоюзных (Всероссийских) конференциях, получено 9 авторских свидетельств и 4 патента Российской Федерации, Италии, Швеции, Германии.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы из 229 наименований и содержит 361 страницу машинописного текста, 70 рисунков и 12 таблиц.

На защиту выносятся:

1. Методика анализа с позиций энергетической теории прокатки влияния граничных условий процесса на формоизменение металла, являющаяся

теоретической основой для разработки новых технологических процессов.

2. Методика анализа процессов формирования качества продукции при прокатке, основанная на векторном описании обобщенной характеристики качества.
3. Методика определения интегральных характеристик процесса прокатки, основанная на совместном рассмотрении условий равновесия моментов и сил, приложенных ко всему объему очага деформации, условий баланса и минимума мощностей.
4. Методика моделирования контактных напряжений и формоизменения в общем случае несимметричной холодной прокатки полос.
5. Новая постановка краевой задачи механики сплошных сред и методика ее решения.
6. Методика определения с помощью метода конечных элементов стрелы прогиба валков прокатных станов.
7. Методика анализа с помощью метода конечных элементов динамических процессов в линиях приводов прокатных станов.
8. Алгоритм оптимального управления нажимными винтами прокатного стана при регулировании толщины полосы.
9. Универсальная феноменологическая модель сопротивления металла пластической деформации, единая для всего температурно-скоростного диапазона условий обработки давлением.
10. Новые перспективные способы и устройства, обеспечивающие повышение точности проката за счет естественного перераспределения внешних энергетических потоков, подводимых к очагу деформации.
11. Предложения и технические решения по повышению точности полос при использовании известных способов прокатки.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, сформулирована цель и приведена общая характеристика работы.

1. Характеристики качества проката, методы его прогнозирования и улучшения (литературный обзор)

Для повышения качества проката необходимо иметь критерии его качества. С целью упорядочения многочисленных частных критериев качества предложены различные типы классификаций. Одним из наиболее удобных типов является иерархическая система, согласно которой все характеристики качества объединяются в группы: характеристики геометрии проката, характеристики состояния поверхности, характеристики структуры и свойств металла, организационные, экономические и потребительские критерии качества. Каждая груп-

па разбивается на подгруппы, а каждая подгруппа включает в себя, как правило, ряд частных критериев качества.

Большое количество критериев, характеризующих качество готовой металлопродукции, существенно осложняет задачу формализации процесса формирования качества, поэтому теоретический подход к решению проблемы повышения качества должен быть основан на системном анализе. В свою очередь, системный подход предполагает наличие обобщенного критерия качества, который, в частности, может быть критерием оптимизации. В настоящее время известны работы А. А. Беленького, Г. С. Гуна, В. Т. Жадана, Л. А. Кузнецова, С. Е. Рокотяна и др., в которых предложены различные варианты формулирования обобщенного критерия качества.

Одним из важнейших частных критериев качества готовой металлопродукции прокатного предела является точность геометрических размеров профилей. Для теоретического прогнозирования точности геометрических размеров используются статистические и аналитические методы анализа. Статистические методы применяли в своих работах В. С. Берковский, Ю. Д. Железнов, А. В. Зиновьев, С. Л. Коцарь и др. Аналитические методы анализа точности геометрических размеров проката использованы в работах М.Я.Бровмана, В. Г. Дукмасова, С. Л. Коцаря, И.М.Мееровича, В.П.Полухина, М. Г. Полякова, В. Ф. Потапкина, В. Н. Скороходова и др.

В настоящее время существуют следующие пути повышения точности геометрических размеров проката:

- установка прокатных клетей с высокой жесткостью или клетей, жесткость которых регулируется в зависимости от параметров процесса прокатки;
- применение эффективных систем автоматического регулирования геометрических размеров проката;
- установка отдельных прокатных клетей, обеспечивающих калибровку прокатываемых профилей;
- применение новых технологических процессов;
- рациональный выбор обжатий по клетям при непрерывной прокатке или по проходам при прокатки в одной клетке;
- совершенствование существующей технологии за счет стабилизации температуры полюс, применения роликовой арматуры, более тщательной настройки стана и т. п.

При рассмотрении формоизменения в процессе листовой прокатки основное внимание уделяется вопросам искривления полосы в различных плоскостях и различным видам неплоскостности. В настоящее время наибольшее внимание в научно-технической литературе уделяется вопросам нарушения плоскостности в виде коробления или волнистости полосы. Теория формоизменения для этих случаев изложена в работах В. Н. Выдрина, Г. Г. Григоряна, Ю. Д. Железнова, и др. Различие условий прокатки на противоположных контактных поверхностях очага деформации приводят к продольному изгибу полосы. Теоретическое описание происходящих при этом процессов дано в работах М. Я. Бровмана, В. Н. Выдрина, С. Л. Коцаря, В. Я. Тумаркина и др.

Для анализа формоизменения при сортовой прокатке прежде всего необходимо описать механику течения металла на внеконтактной боковой поверхности прокатываемого профиля, связанную с уширением (или с утяжкой) . В настоящее время для его определения наиболее широко применяются вариационные методы. Известны работы, выполненные в этом направлении Б. М. Илюковичем, К. И. Литвиновым, Ю. И. Няшиным, А. Н. Скороходовым, В. К. Смирновым, Б. Е. Хайкиным, В. А. Шиловым и др. Наряду с этим разрабатываются и другие подходы к анализу формоизменения при сортовой прокатке. В частности, в работах С. А. Тулупова предложено формоизменение описывать матрицей, преобразующей векторное представление исходного профиля в векторное представление готового профиля. Весьма перспективным для анализа формоизменения при сортовой прокатке является метод конечных элементов, который обладает гораздо большим числом степеней свободы при варьировании формы боковой поверхности профиля по сравнению с классическим вариационным методом..

Для обеспечения требуемой формы полос в настоящее время используют два основных способа: создание при прокатке условий, не приводящих к возникновению дефектов формы, и правка полос на отдельно стоящих агрегатах. Для получения полос с хорошей плоскостностью в процессе прокатки в основном применяют три метода:

- 1) использование валков с фиксированной формой образующей;
- 2) деформирующее и тепловое воздействие на форму образующей в процессе прокатки;
- 3) комбинированные методы.

Одним из основных направлений получения сортового проката заданной формы при непрерывной прокатке является использование надежных постоянно действующих систем и устройств для регулирования величины петли и натяжения. Существенное влияние на процесс формоизменения металла оказывает применяемая система калибровки валков. Повышению точности формы профиля способствует применение прокатных клетей с многовалковым калибром. Получить требуемую форму сортового профиля также можно на стадии отделочных операций, к которым, в частности относятся шлифование и полирование проката для получения особо чистой поверхности и точных размеров профиля, а также правка подката в тех случаях, когда предъявляются повышенные требования к допускаемой кривизне прутков.

Наиболее универсальными свойствами металлов, требования к которым оговариваются практически для всех видов прокатной продукции, являются прочностные и пластические свойства.

В настоящее время при анализе формирования прочностных свойств металла выделяют два случая: холодное и горячее деформирование. При холодной деформации основным фактором, определяющим величину сопротивления металла пластической деформации, считают степень деформации сдвига. При этом большинство авторов сходятся в том, что эта зависимость в области развитой пластической деформации может быть аппроксимирована степенной за-

висимостью. В случае горячей деформации на величину сопротивления металла пластической деформации наряду со степенью деформации сдвига заметное влияние оказывают также интенсивность скоростей деформаций и температура металла. Указанную зависимость наиболее часто аппроксимируют формулой, полученной на основе метода термомеханических коэффициентов. Для учета влияния истории нагружения сформулирован ряд соответствующих функционалов. Хорошую сходимость с опытными данными дает модель сопротивления металла пластической деформации, построенная с использованием теории идентификации динамических объектов.

Общепризнанной в настоящее время мерой пластических свойств металлов является степень деформации сдвига, накопленная к моменту разрушения. При этом наиболее полно исследована зависимость пластичности от характера напряженного состояния. Пластичность металлов при температурах горячей деформации неоднозначно зависит от термомеханических параметров процесса обработки давлением. Поэтому при исследовании пластичности металлов, деформируемых в горячем состоянии необходимо определять не только коэффициенты аппроксимации, но и вид аппроксимационной зависимости в каждом конкретном случае.

Управлять механическими свойствами металла при холодной деформации можно либо за счет управления интенсивностью упрочнения в процессе деформации, либо путем назначения соответствующих режимов термообработки. Оказывать влияние на прочностные свойства металлов при холодной деформации возможно также путем изменения цикличности деформации. Основными способами регулирования физико-механических свойств металлов при горячей деформации являются контролируемая прокатка и высокотемпературная термомеханическая обработка.

Качество поверхности катаных профилей определяется уровнем шероховатости и отсутствием поверхностных дефектов. Шероховатость поверхности, получаемая при деформации металла, определяется его свойствами, характером и степенью деформации, технологическими условиями. Чтобы улучшить чистоту поверхности листов, большое внимание при холодной прокатке уделяют системам смазки и охлаждения. Для удаления вкатаной окалины перед холодной прокаткой применяют травление и другие виды очистки поверхности. Поверхность сортового металла и труб должна иметь минимальную толщину обезуглероженного слоя при полном отсутствии всех поверхностных дефектов. Для этого применяют обточку, полировку или шлифовку прутков. Для формирования высококачественной поверхности на сортовом прокате необходимо прежде всего обеспечить высокую трещиностойчивость металла. В свою очередь прогнозировать пораженность раскатов дефектами, связанными с нарушением сплошности металла, позволяет теория разрушения, разработанная в трудах В.Л.Колмогорова, А.А.Богатова, Б.А.Мигачева, С.В.Смирнова и др.

2. Методологические основы анализа механизмов формирования качества прокатной продукции

Деформация металла при прокатке, а следовательно и формирование его качества, происходит в системе «прокатный стан – полоса – система автоматического управления». В связи с этим решение проблемы повышения качества проката целесообразно осуществлять с использованием системного подхода. Предлагаемый вариант анализа базируется на двух основополагающих принципах системного подхода: принципе целевой ориентации и использовании логико-математических моделей для теоретического анализа исследуемых процессов. Согласно принципу целевой ориентации для решения поставленной задачи применяются все доступные методы и средства, в том числе и разрабатываются новые. При разработке логико-математических моделей предлагается использовать принципы декомпозиции и иерархичности (рис.1). Окружающей средой для рассматриваемой системы являются технико-экономические условия производства, которые необходимо учитывать в качестве ограничивающих параметров.

Перспективной основой поиска новых технических решений, обеспечивающих повышение качества проката, может служить анализ граничных условий очага деформации с позиций энергетической теории прокатки. Граничные условия, в свою очередь, определяются режимами работы приводов машин и агрегатов прокатного стана, непосредственно оказывающих механическое воздействие на деформируемую полосу.

Одним из основных факторов, оказывающим влияние практически на все частные критерии качества при прокатке является степень деформации, определяемая, механизмом формирования конечных размеров проката. В связи с этим, выполнен анализ влияния на деформационные характеристики процесса режимов работы намоточно-размоточных устройств, которые определяют граничные условия на входе и выходе из очага деформации. При этом рассматривались режим заданных натяжений концов полосы (РЗН), режим заданных скоростей концов полосы (РЗС), режим заданного натяжения заднего и скорости переднего концов полосы (РЗНС), режим заданной скорости заднего и натяжения переднего концов полосы (РЗСН). Анализ механизма формирования геометрических размеров проката для рассматриваемых случаев удобно осуществлять с помощью диаграмм толщина полосы – усилие прокатки (рис.2). При этом линии 1, 5 на рис.2 соответствуют вертикальной жесткости клетки, линия 4 соответствует поперечной жесткости клетки, линии 2, 3 соответствуют жесткости полосы.

Изменение толщины подката при прокатке в РЗН приводит к увеличению усилия прокатки и к наведению продольной δh_{lx} и поперечной δh_{ly} разнотолщинности (рис.2а). Следовательно для обеспечения высокой точности полос при прокатке в РЗН необходимо использовать системы автоматического регулирования толщины и формы. С другой стороны, на стадии прокатного

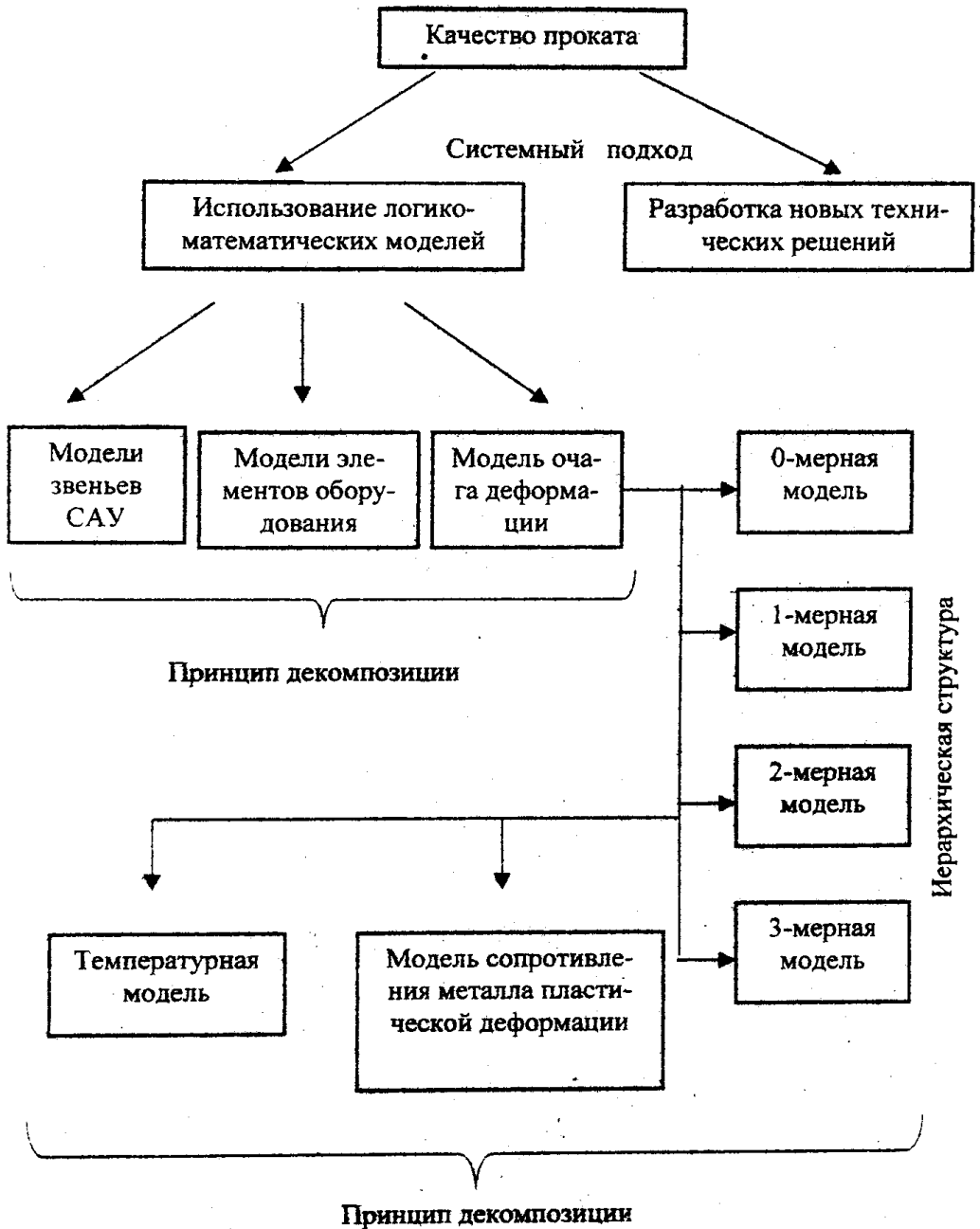


Рис.1. Схема системного подхода к решению задачи повышения качества проката

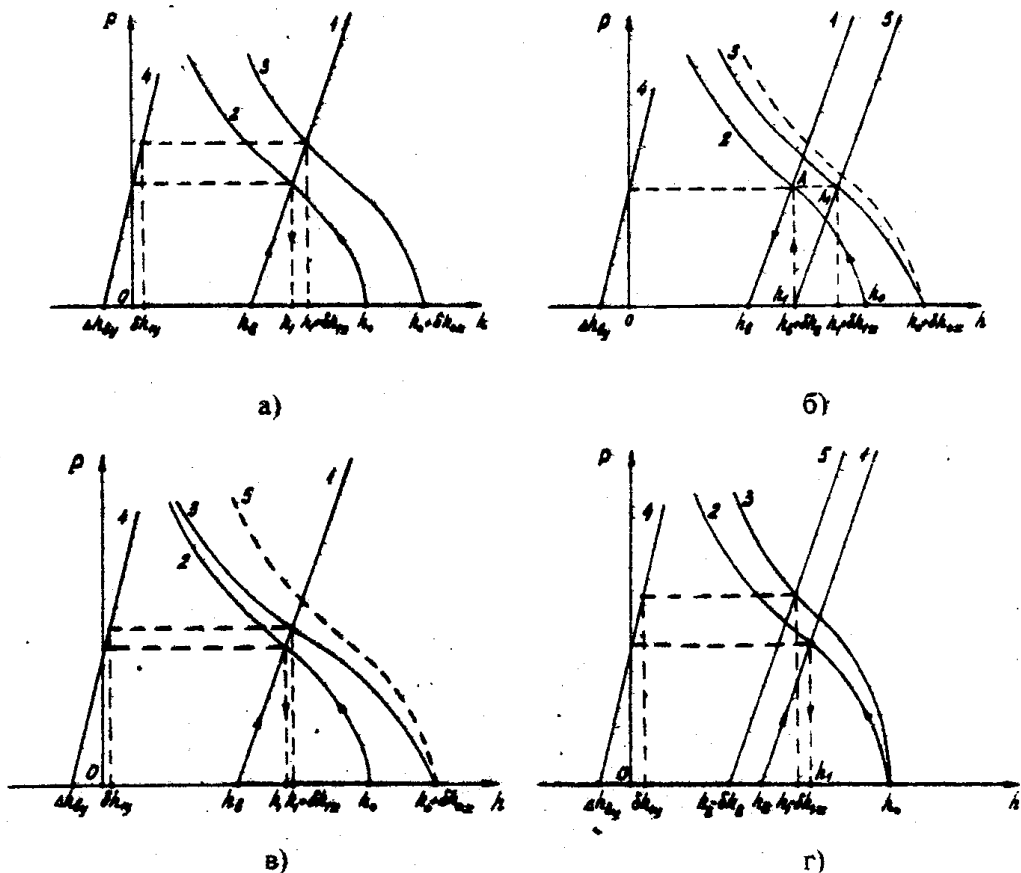


Рис. 2. Графическая интерпретация механизмов формирования толщины полосы

передела существует целый ряд производств, позволяющих осуществлять прокатку только в РЗН.

Характерной особенностью процесса прокатки в РЗС является то, что натяжные устройства обеспечивают постоянство скорости жестких концов полосы и, следовательно, стабильность или регулирование вытяжки по длине. Последнее обеспечивает стабильность или регулирование механических свойств металла, а также устраняет дефекты плоскостности. Вместе с тем прокатка в РЗС не позволяет без дополнительного регулирования устранять продольную разнотолщинность при изменении толщины подката (рис.26) Технически для осуществления прокатки в РЗС, как правило, требуется наличие натяжных станций, удлиняющих линию стана, и достаточно высокий уровень натяжений концов полосы.

Наряду с процессами РЗС и РЗН можно выделить смешанные режимы процесса прокатки, когда задается скорость одного и натяжение другого конца по-

лосы. При прокатке в РЗНС и при соответствующем выборе технологических параметров процесса можно добиться такого изменения переднего натяжения при изменении толщины подката, что усилие прокатки меняться не будет и, следовательно, не будет возникать продольной и поперечной разнотолщинности на готовой полосе (рис.2в). Однако этому процессу в определенной степени свойственны те же недостатки, что и процессу РЗС.

Вторым случаем смешанного режима процесса прокатки является прокатка в РЗСН. Особенностью этого режима является возможность устранения негативного влияния эксцентриситета валков на толщину полосы в продольном направлении. Вместе с тем, процесс РЗСН характеризуется тем, что эксцентриситет валков приводит к существенным колебаниям усилия прокатки, что способствует появлению поперечной разнотолщинности полос (рис.2г).

При разработке математических моделей процессов формирования качества в процессе прокатки качество полос целесообразно описывать векторной величиной q_1 , компонентами которой являются частные критерии качества. В этом случае математическая модель процесса формирования качества проката представляет собой преобразование вектора качества исходной заготовки q_0 в вектор качества готового профиля с помощью матричного оператора Q и может быть записана в виде

$$Qq_0 = q_1.$$

Параметрами оператора Q являются величины, характеризующие технологические и конструктивные особенности системы «прокатный стан – полоса – система автоматического управления». При таком подходе может быть поставлено и решено три типа задач:

1. Задача прогнозирования качественных характеристик готового проката при заданных характеристиках заготовки и заданных параметрах технологии и оборудования.
2. Задача определения параметров исходной заготовки, обеспечивающих при заданных параметрах технологии и оборудования требуемое качество готовой продукции.
3. Задача определения параметров матричного оператора, обеспечивающих получение из имеющейся заготовки готового проката с заданными характеристиками качества.

Для решения всех трех типов задач разработаны соответствующие алгоритмы.

Поскольку векторная модель позволяет давать комплексную оценку готовой продукции, учитывающую частные критерии качества, на ее основе сформулирован комплексный критерий качества K , позволяющий сравнивать между собой отдельные виды металлопроката и оценивать их соответствие предъявляемым требованиям. Для вычисления комплексного критерия качества получена формула

$$K = + \left(\prod_{i=1}^l k_{Bq}^{(i)} \right) \left(\sqrt{\beta_1 q_{11j} q_{11j} + \beta_2 q_{12j} q_{12j} + \beta_3 q_{13j} q_{13j}} \right),$$

где k_{Bij} – коэффициенты «вето»; β_{ij} – весовые коэффициенты; q_{11}, q_{12}, q_{13} – компоненты вектора качества, характеризующие геометрические размеры проката, качество металла и состояние поверхности.

Предложенный критерий качества представляет собой норму вектора качества q_1 и учитывает значимость отдельных частных критериев качества с помощью весовых коэффициентов, а также позволяет обнулить комплексный критерий качества с помощью коэффициента «вето» при выходе какого-либо частного критерия качества за рамки допустимых диапазонов. При этом комплексный критерий качества сформулирован таким образом, что с улучшением качества проката его значение возрастает.

3. Математическое моделирование процессов прокатки

Для определения вида матричного оператора Q векторного уравнения формирования качества проката необходимы математические модели, описывающие термомеханические процессы, протекающие в системе «прокатный стан – полоса – система автоматического управления».

При анализе процессов прокатки возникают различные задачи, отличающиеся друг от друга как по сложности математического описания, так и по объему учитываемых параметров. В связи с этим целесообразно использовать иерархическую структуру математических моделей (см. рис.1). В общем случае в структуре математических моделей можно выделить следующие уровни:

1. Модель для решения 0-мерных задач;
2. Модель для решения 1-мерных задач;
3. Модель для решения 3-мерных задач;
4. Модель сопротивления металла пластической деформации;
5. Температурная модель;
6. Модели элементов механического оборудования;
7. Алгоритмы, используемые в системах автоматического управления.

При решении задач, связанных с определением усилия прокатки, целесообразно использовать 0-мерную модель. В основу такой модели положена система уравнений, включающих:

- уравнение баланса мощностей, записанное для очага деформации;
- условия равновесия проекций сил приложенных ко всему объему очага деформации относительно трех координатных направлений;
- условия равновесия крутящих моментов приложенных ко всему объему очага деформации относительно трех координатных осей;
- условие минимума полной мощности.

Предлагаемый подход позволяет достаточно просто и точно определить усилие прокатки в самых разных случаях, в том числе при несимметричной прокатке полос и при прокатке в калибрах как двухвалковых, так и многовалковых. Другое преимущество метода заключается в том, что он позволяет выразить усилие прокатки или среднее контактное давление в явном виде, что, в свою

очередь, позволяет линеаризовать эти зависимости при их использовании в моделях более высокого уровня.

Разработанная методика применена для определения интегральных характеристик процесса прокатки простых сортовых профилей и несимметричной прокатки полос.

При определении среднего контактного давления p_c при прокатке простых сортовых профилей конечная формула получена на основе анализа условия равновесия проекций сил, приложенных к очагу деформации, на направление прокатки и имеет вид

$$p_c = \frac{\frac{1}{2} \left(\int_{S_1} \sigma_1 dS - \int_{S_0} \sigma_0 dS \right) + \int_{S_{k0}} \tau_x dS - \int_{S_{k1}} \tau_z dS}{2 \int_0^{\alpha_{0\max}} \int_0^{b_k(\alpha)} \frac{R(y) dy d\alpha}{\sqrt{1 + \left[\left(\frac{\partial z_k}{\partial y} \right)^2 + 1 \right] \operatorname{ctg}^2 \frac{\alpha_0}{2}}}}$$

где σ_1 и σ_0 – напряжения переднего и заднего напряжений; τ_x – продольная составляющая напряжения трения; R – радиус валков; b_k – граница контактной поверхности; z_k – функция, описывающая форму калибра; α_0 – угол захвата.

Полученная формула при этом содержит определенные интегралы, для определения пределов интегрирования которых необходимо знать ширину контактной поверхности и уравнение критической линии. С целью определения текущей ширины полосы используется условие минимума полной мощности, которое сведено к задаче по решению системы линейных уравнений путем линеаризации определяющих соотношений на основе метода последовательных приближений А.А.Ильюшина. Кинематически возможное поле скоростей при этом описано полиномиальными зависимостями с точностью до пяти варьируемых параметров, причем один из этих параметров определяется из уравнения баланса мощностей, а остальные – из условия минимума полной мощности. Для решения задачи с использованием ЭВМ разработаны алгоритм, реализующий метод последовательных приближений, и программа. Результаты расчетов по разработанной методике достаточно хорошо согласуются с экспериментальными данными и данными расчетов по другим наиболее современным методикам.

Математическая модель процесса несимметричной прокатки полос предназначена для определения интегральных характеристик процесса в условиях плоской деформации. Модель обеспечивает возможность анализа процессов прокатки в валках с различными упругими характеристиками, вращающимися как с одинаковыми, так и с разными окружными скоростями; рабочие валки могут иметь разные диаметры и условия трения на контакте с ними могут быть различны. При разработке математической модели холодной несимметричной прокатки для учета упругого сплющивания валков очаг деформации был разбит по длине на два участка (рис.3): входной, соответствующий основному обжатию полосы, и выходной, соответствующий проглаживанию полосы. Кроме того, при прокатке в валках неравного диаметра перед входом в очаг деформации выделяется изгибаемый участок полосы, а при неодинаковом сплющивании ра-

бочих валков на выходе из очага деформации также имеется изгибаемый участок полосы. При построении математической модели дуги, ограничивающие очаг деформации были заменены стягивающими их хордами. Для такой формы очага деформации определены все характеризующие его геометрические соотношения, построено поле скоростей и рассмотрены условия равновесия проекций сил на направление прокатки и направление, проходящее через оси рабочих валков. В свою очередь по полю скоростей определены составляющие уравнения баланса мощностей с учетом выбранной формы очага деформации. Кроме этого полученные выражения позволили записать уравнение конечной толщины полосы, учитывающее упругие деформации клетки и валков в виде

$$h_1 = \left(h_0 + \frac{P}{C_k} + \sum_{i=1}^n a_i \cos \varphi_i + R_1 + R_0 - \sqrt{R_1^2 - x_{11}^2} - \sqrt{R_0^2 - x_1^2} \right) \left(1 + \frac{\sigma_{s1}}{E_n} \right),$$

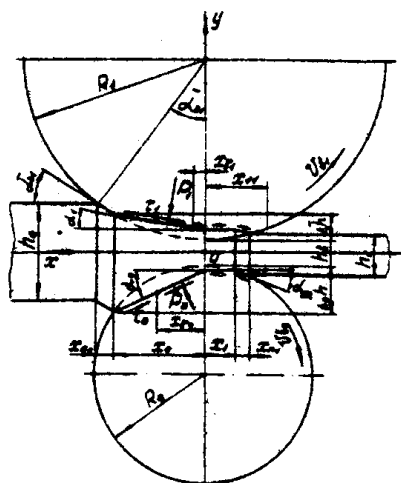


Рис. 3. Схема очага деформации при холодной несимметричной прокатке полосы

где h_0 – исходный межвалковый зазор; P – усилие прокатки; C_k – жесткость клетки; a_i, φ_i – параметры, учитывающие контактное сплющивание в валковом узле; R_1, R_0 – радиусы рабочих валков; σ_{s1} и E_n – сопротивление пластической деформации и модуль упругости полосы.

Разработанная в результате математическая модель представляет собой систему нелинейных уравнений, для решения которой разработан программный продукт, написанный на алгоритмическом языке Си++.

В качестве численного метода реализации математической модели использован метод Ньютона. Для оценки точности математической модели процесса несимметричной прокатки полос проведено экспериментальное исследование на прокатном стане ПВ-200 ЮУрГУ. Результаты сравнения экспериментальных и расчетных данных показали что их максимальное расхождение не превышает 20%, а средняя погрешность составляет 5%.

Математические модели для решения 1-мерных задач целесообразно строить для определения распределения контактных напряжений вдоль контактной поверхности. Результаты решения этой задачи, в свою очередь, могут быть использованы для прогнозирования шероховатости поверхности листов или для

определения характеристик дефектов плоскостности, свойственных несимметричным процессам прокатки.

В основу математической модели для определения нормальных контактных напряжений положен инженерный метод. Отличие предлагаемой методики от известных заключается в том, что в рассмотрение включены два уравнения равновесия относительно двух осей, что позволяет корректно учесть особенности, связанные разницей диаметров рабочих валков, разницей их окружных скоростей и упругих характеристик, а также связанные с различием условий трения на противоположных контактных поверхностях. При этом из рассмотрения уравнений равновесия относительно продольной оси очага деформации получены дифференциальные уравнения для определения давления p_0 на контакте с валком меньшего диаметра отдельно для закона трения Амонтона – Кулона и для закона трения Зибеля. Аналитическое решение этих дифференциальных уравнений при учете реального закона упрочнения металла в процессе прокатки становится невозможным, поэтому в работе предложен метод численного решения задачи основанный на методе конечных элементов. Для определения узловых значений контактного давления при этом использован метод наименьших квадратов. В результате задача сведена к решению системы линейных уравнений, для определения коэффициентов при неизвестных которой и свободных членов получены конечные формулы. Разбиение очага деформации по длине на конечные элементы осуществляется с учетом положения критических линий на противоположных контактных поверхностях, определяемых с помощью энергетического метода при заданной степени рассогласования окружных скоростей рабочих валков.

Рассмотрение условия равновесия относительно вертикальной оси очага деформации позволило получить соотношения между давлениями p_0 на контакте с валком меньшего диаметра и p_1 на контакте с валком большего диаметра в виде

$$p_1 = p_0 \pm \tau_0 \operatorname{tg} \alpha_0 \pm (-\tau_1 \operatorname{tg} \alpha_1).$$

$$p_1 = p_0 - \tau_1 \operatorname{tg} \alpha_1 - \tau_0 \operatorname{tg} \alpha_0,$$

где τ_1 и τ_0 – напряжения трения на контакте с валками большего и меньшего диаметра; α_1 и α_0 – углы наклона касательной к поверхности валка большего и меньшего диаметра.

Первая формула справедлива для зон отставания (знак «+») и опережения (знак «-»); вторая формула справедлива для зоны с противонаправленным действием сил трения.

Сравнение результатов расчета по разработанной методике для условий процесса прокатки – волочения с экспериментальными данными, полученными поляризационно – оптическим методом, показали их удовлетворительную сходимость.

В дальнейшем путем усовершенствования одномерной модели очага деформации получена модель, позволяющая определять деформационные, кинематические и энергосиловые параметры процесса прокатки с учетом уширения. Ре-

зультаты расчетов по этой методике хорошо согласуются с экспериментальными данными, а сама методика используется в учебном процессе, в частности при сравнении результатов, полученных на лабораторных работах и практических занятиях.

На основе одномерной модели очага деформации разработана инженерная методика оценки величины желобчатости полос, возникающей при несимметричной прокатке. При этом дано теоретическое обоснование известному из экспериментов факту, согласно которому нормальные напряжения на контакте с валком, имеющем большую окружную скорость, оказываются меньше, чем нормальные напряжения на контакте с валком, имеющем меньшую окружную скорость вращения. Механизм возникновения дефекта плоскостности в виде желобчатости полосы заключается в том, что в результате большего уровня нормальных напряжений на контакте с менее скоростным валком уширение слоев полосы, прилегающих к этой контактной поверхности, больше, чем уширение слоев полосы, прилегающих к противоположной контактной поверхности. Учесть эту разницу позволяет переход от напряженного состояния на контактной поверхности, определяемого с использованием одномерной модели очага деформации, с помощью физических уравнений к деформированному состоянию. Зная значения ширины приконтактных слоев полосы с использованием простых геометрических соотношений легко определить радиус кривизны желоба. Разработанная методика реализована в виде программы для ЭВМ, результаты расчетов по которой сравнивались с результатами эксперимента, выполненного на стане ПВ-200 ЮУрГУ. Результаты сравнения подтвердили адекватность разработанной математической модели и показали хорошую сходимость экспериментальных и расчетных данных.

При определении напряженного состояния и формоизменения металла в условиях неоднородного трехмерного течения необходимо решать полную систему уравнений механики сплошных сред. Вместе с тем проведенный анализ показал, что с помощью кинематических соотношений Коши компоненты тензора скоростей деформаций можно выразить через компоненты вектора скорости, после чего компоненты тензора напряжений выражаются с помощью физических уравнений связи напряженного и деформированного состояний через компоненты вектора скорости и среднее нормальное напряжение. После подстановки полученных выражений в дифференциальные уравнения равновесия получаем краевую задачу в виде системы уравнений, включающих три дифференциальных уравнения равновесия и условие несжимаемости. В то же время имеющийся опыт математического моделирования процессов прокатки показывает, что наиболее удобным способом удовлетворения условию несжимаемости является использование функций тока при построении поля скоростей. В этом случае в качестве механических переменных, подлежащих определению в результате решения краевой задачи, выступают две функции тока и среднее нормальное напряжение, а сама краевая задача имеет вид

$$\begin{cases} \left(\frac{T}{H}\right)^{(e)} \operatorname{div} \left(\vec{\operatorname{grad}} \frac{\partial \psi_1^{(e)}}{\partial z} \right) + \frac{\partial \sigma^{(e)}}{\partial x} = 0; \\ -\left(\frac{T}{H}\right)^{(e)} \operatorname{div} \left(\vec{\operatorname{grad}} \frac{\partial \psi_2^{(e)}}{\partial z} \right) + \frac{\partial \sigma^{(e)}}{\partial y} = 0; \\ \left(\frac{T}{H}\right)^{(e)} \operatorname{div} \left[\vec{\operatorname{grad}} \left(\frac{\partial \psi_2^{(e)}}{\partial y} - \frac{\partial \psi_1^{(e)}}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial \sigma^{(e)}}{\partial z} = 0, \end{cases}$$

где T – интенсивность касательных напряжений; H – интенсивность скоростей деформаций сдвига; ψ_1 и ψ_2 – функции тока; σ – среднее нормальное напряжение.

Численное решение краевой задачи выполнялось с привлечением метода Галеркина и метода конечных элементов. Постановка задачи выполнялась применительно к случаю процесса прокатки в четырехвалковом калибре с произвольной формой ручьев, нарезанных на валках. Такая схема является достаточно общей и может быть легко сведена к более простым случаям процесса, например, к прокатке в двух калиброванных валках или в валках с гладкой бочкой.

В общей постановке оператор полученной системы дифференциальных уравнений является нелинейным. В связи с этим была выполнена линейризация определяющих соотношений, основанная на том, что при разбиении очага деформации на конечные элементы в пределах каждого элемента можно считать, что $T/H = \text{const}$. С целью применения для решения задачи метода Галеркина построено n -ое приближение искомых функций в виде

$$\begin{aligned} \hat{\psi}_1^{(e)} &= a_0^{(e)} + a_1^{(e)}x + a_2^{(e)}y + a_3^{(e)}z + a_4^{(e)}x^2z; \\ \hat{\psi}_2^{(e)} &= b_0^{(e)} + b_1^{(e)}x + b_2^{(e)}y + b_3^{(e)}z + b_4^{(e)}xyz^2; \\ \hat{\sigma}^{(e)} &= c_0^{(e)} + c_1^{(e)}x + c_2^{(e)}y + c_3^{(e)}z + c_4^{(e)}x^2. \end{aligned}$$

При этом учитывалось, что, с одной стороны, метод конечных элементов позволяет использовать для аппроксимации искомых зависимостей в пределах конечного элемента достаточно простые формулы, однако, с другой стороны эти формулы не должны противоречить физическому смыслу задачи. Предложенный вариант полиномиальных зависимостей, обладающий свойством полноты в заданном координатном пространстве, а также обеспечивающий описание как линейных, так и сдвиговых деформаций внутри элемента содержит пять слагаемых. Последнее говорит о том, что при дискретизации очага деформации в этом случае необходимо использовать трехмерные комплекс-элементы в виде тетраэдров с пятью узлами, один из которых должен располагаться внутри тетраэдра.

При решении задачи методом Галеркина в качестве координатных функций, по отношению к которым выполняется ортогонизация вектора невязки краевой

задачи, выступают функции формы элементов, являющиеся трехмерными векторами.

Граничные условия, присущие процессу продольной прокатки, представляют собой сложные функциональные зависимости между механическими переменными. Эти граничные условия относятся к классу естественных граничных условий и поэтому должны удовлетворяться с использованием интегралов по границам очага деформации. Для получения таких интегралов к уравнениям, построенным на основе метода Галеркина и описывающим процессы, протекающие в объеме очага деформации, применена формула Остроградского – Гаусса, в результате чего в расчетные формулы вошли в качестве слагаемых как интегралы по объему очага деформации, так и интегралы по его поверхности. При этом был определен общий вид механических граничных условий краевой задачи теории обработки металлов давлением в виде

$$\frac{T}{H} \cdot \frac{\partial \vec{V}}{\partial n} = G(M) \quad \forall M \in S, ,$$

где n – направление нормали к поверхности очага деформации; $G(M)$ – явно заданная функция координат точки M , принадлежащей поверхности очага деформации S .

Приведена методика преобразования общего вида механических граничных условий к граничным условиям на поверхности с известным вектором поверхностного напряжения, на поверхности с известным вектором скорости и на поверхности с известным законом скольжения деформируемого металла относительно поверхности инструмента.

В результате проведенных преобразований краевая задача свелась к системе линейных уравнений, в качестве вектора неизвестных которой выступает вектор узловых значений искомых функций. При этом получены конечные выражения для вычисления коэффициентов системы линейных уравнений и компонент вектора свободных членов. Решение сформулированной краевой задачи должно осуществляться методом последовательных приближений. Краевая задача и алгоритм ее решения позволяют определять напряженно-деформированное состояние металла, а, следовательно, и его формозменение при прокатке в двух- и четырехвалковых калибрах, имеющих как гладкую бочку, так и нарезанные ручьи. При этом конкретная форма нарезанного калибра задается путем соответствующего задания координат узлов конечно-элементной сетки, принадлежащих контактной поверхности.

Для решения краевой задачи по определению напряженно-деформированного состояния металла в очаге деформации необходимо знать зависимость сопротивления металла пластической деформации от термомеханических параметров процесса прокатки и истории нагружения. С целью определения этой зависимости предложена феноменологическая модель, описывающая сопротивление металла пластической деформации в широком диапазоне изменения температурно-скоростных параметров процессов обработки металлов давлением. При конструировании модели за основу взят тот факт, что

величина сопротивления металла пластической деформации в любой момент времени определяется соотношением скоростей упрочнения и разупрочнения металла. Наряду с этим принята гипотеза о том, что физические механизмы упрочнения и разупрочнения не зависят от термомеханических параметров процесса пластического течения и, следовательно, описываются одними и теми же функциональными зависимостями во всем диапазоне температурно-скоростных условий процессов обработки металлов давлением. С учетом этого для определения скорости деформационного упрочнения металла использовалась степенная зависимость сопротивления металла пластической деформации от степени деформации, которая достаточно хорошо описывает процесс деформационного упрочнения при холодной деформации, когда можно считать, что разупрочняющие процессы полностью отсутствуют. Для определения скорости разупрочнения металла использовалась экспоненциальная зависимость, описывающая изменение остаточного упрочнения во время паузы между обжатиями, когда полностью отсутствует деформационное упрочнение. В этом случае аналитическое решение задачи получилось в виде интегрального уравнения, для решения которого предложен численный алгоритм, реализующий процесс вычисления сопротивления металла пластической деформации по шагам на основе полученного рекуррентного соотношения

$$\sigma_s = \sigma_{s0}(\theta_0) + \sum_{i=1}^m \left\{ a(\Lambda_i^n - \Lambda_{i-1}^n) + (\sigma_{s(i-1)} - \sigma_{s0}) \left(\exp \left[-\frac{\Delta l_i}{V_{i-1} k(\theta_i)} \right] - 1 \right) \right\},$$

где $\sigma_{s0}(\theta_0)$ – зависимость сопротивления пластической деформации исходного металла от температуры нагрева; a и n – эмпирические коэффициенты; Λ – накопленная степень деформации; Δl – отрезок траектории; V – скорость перемещения; $k(\theta)$ – зависимость коэффициента интенсивности разупрочнения от температуры.

В полученную формулу входят зависимости сопротивления металла пластической деформации в исходном состоянии и коэффициента, характеризующего интенсивность разупрочнения, от температуры металла. При выборе вида формулы, аппроксимирующей зависимость исходного сопротивления металла пластической деформации от температуры, во внимание было принято то, что при приближении температуры металла к температуре плавления сопротивление пластической деформации стремится к нулю, а при охлаждении металла его сопротивление пластической деформации повышается до некоторой характерной величины и при дальнейшем охлаждении практически не меняется. При выборе функции для аппроксимации зависимости коэффициента интенсивности разупрочнения от температуры считалось, что при стремлении температуры металла к температуре плавления коэффициент интенсивности разупрочнения должен стремиться к нулю, что соответствует мгновенному полному разупрочнению металла. С другой стороны, если условно принять, что при абсолютном нуле разупрочнение металла полностью отсутствует, то коэффициент интенсивности разупрочнения должен стремиться к бесконечности при стремлении температуры металла к абсолютному нулю. Полученные зависимости содержат

эмпирические коэффициенты, для экспериментального определения которых разработана методика, ориентированная на использование пластометров, позволяющих осуществлять дробное нагружение. Методика была опробована на пластометре ЧПИ-2 Южно-Уральского государственного университета при исследовании механических свойств стали 45 и при обработке литературных данных по свойствам сплава АМгб. Результаты эксперимента показали достаточную адекватность феноменологической модели наблюдаемым явлениям. Результаты расчета сопротивления металла пластической деформации по предложенной методике показали, что она дает удовлетворительные результаты даже при разбиении временного промежутка, соответствующего времени прохождения материальной частицы металла через очаг деформации, всего на два отрезка. Усредненные данные при этом практически совпадают с результатами расчетов по методике В.И.Зюзина.

На механические свойства металла и на характер его напряженно-деформированного состояния существенное влияние оказывает температура металла. В случае применения для решения механической части краевой задачи теории обработки металлов давлением метода конечных элементов температурную задачу также целесообразно решать этим методом, так как в этом случае можно использовать уже имеющуюся конечно-элементную сетку. В качестве примера в работе приведено решение дифференциального уравнения теплопроводности для случая остывания заготовки в паузах между обжатиями, выполненное на основе вариационного метода с привлечением метода конечных элементов. Также как и в рассмотренных выше случаях, решение сведено к решению системы линейных уравнений. При этом получены конечные формулы для вычисления коэффициентов при неизвестных, которыми являются узловые значения температуры, и компонент вектора свободных членов.

Существенное влияние на деформированное состояние, а, следовательно и на качество прокатываемых профилей оказывают упругие деформации элементов механического оборудования прокатных станов. Одним из видов такой упругой деформации является изгиб валков под действием усилия прокатки, оказывающий существенное влияние на формоизменение металла. В связи с тем, что уравнение упругой линии валка представляет собой дифференциальное уравнение четвертого порядка, для его численного решения также целесообразно использовать метод конечных элементов. При этом появляется возможность более корректно по сравнению с существующими методиками учитывать реальную форму элементов и бочки валка и действительный характер распределения приложенных нагрузок. Решение задачи осуществлялось с помощью метода наименьших квадратов, который позволил свести это решение к решению системы линейных уравнений относительно неизвестных узловых значений смещения осевой линии валка. При этом были получены конечные формулы для вычисления компонент матрицы коэффициентов при неизвестных

$$A_{km} = E \sum_{e=1}^n \int_{y_0^{(e)}}^{y_1^{(e)}} \left[J^{(e)}(y) \right]^2 \frac{d^4 N_i^{(e)}}{dy^4} \cdot \frac{d^4 N_m^{(e)}}{dy^4} dy$$

и компонент вектора свободных членов

$$E_k = \sum_{\alpha=1}^n \int_{y_k^{\alpha}} \int_{y_k^{\alpha}} J^{(\alpha)}(y) \bar{P}(y) \frac{d^4 N_k^{(\alpha)}}{dy^4} dy,$$

где E – модуль упругости материала валка; J – момент инерции сечения валка; P – погонное изгибающее усилие; $N^{(k)}$ – функция формы k -го элемента.

Для расчетов по предлагаемой методике составлена программа, позволяющая учитывать изменение момента инерции поперечного сечения валка вдоль его оси и задавать произвольный закон изменения нагрузки, приложенной к валку. В качестве примера с использованием разработанной программы выполнены расчеты стрелы прогиба опорного валка прокатного стана «кварто». Сравнение результатов расчета максимального прогиба валка по методу конечных элементов с результатами расчетов по известным методикам показали, что существующие методики дают заниженные значения максимального прогиба валка. Дальнейший анализ показал, что причиной этого является завышенная величина моментов инерции сечений валка на переходных участках от бочки к шейке валков. Полученная математическая модель может быть использована для определения требуемой профилировки валков листовых прокатных станков, для определения усилий противоизгиба и для оптимизации формы валков.

Регулирование скоростного режима работы валков является важной задачей автоматизации прокатных станков, способствующей повышению качества проката. Одним из основных параметров, характеризующим работу системы автоматического управления, является быстродействие, которое во многом определяется инерционностью исполнительных механизмов и устройств. Для количественного определения быстродействия системы автоматического управления решена задача, описывающая динамику вращательного движения в системе индивидуального привода валков прокатного стана. В этом случае задача сводится к описанию динамики движения двухмассовой системы, которая описывается системой двух дифференциальных уравнений второго порядка. Для достижения высокой точности решения этой системы использован метод конечных элементов. Узловые значения функций, описывающих изменение во времени углов закручивания вращающихся масс, при этом определялись с помощью метода наименьших квадратов. Невязка краевой задачи в этом случае представляет собой 2-мерный вектор, компоненты которого вычисляются по формулам

$$R_1^{(\alpha)} = I_1 \frac{d^2 \hat{\varphi}_1^{(\alpha)}}{dt^2} + q \left(\frac{d \hat{\varphi}_1^{(\alpha)}}{dt} - \frac{d \hat{\varphi}_2^{(\alpha)}}{dt} \right) + c_{12} (\hat{\varphi}_1^{(\alpha)} - \hat{\varphi}_2^{(\alpha)}) - \mu_1(t),$$

$$R_2^{(\alpha)} = I_2 \frac{d^2 \hat{\varphi}_2^{(\alpha)}}{dt^2} - q \left(\frac{d \hat{\varphi}_1^{(\alpha)}}{dt} - \frac{d \hat{\varphi}_2^{(\alpha)}}{dt} \right) - c_{12} (\hat{\varphi}_1^{(\alpha)} - \hat{\varphi}_2^{(\alpha)}) - \mu_2(t),$$

где I_1, I_2 – моменты инерции вращающихся масс; φ_1, φ_2 – углы закручивания вращающихся масс; q – коэффициент эквивалентного вязкого демпфирования в

линии привода; c_{12} – приведенная жесткость линии передач; μ_1 – крутящий момент на валу двигателя; μ_2 – момент технологического сопротивления.

В результате задача была сведена к решению системы линейных уравнений, получены конечные формулы для вычисления значений коэффициентов при неизвестных и компонент вектора свободных членов. При анализе динамики вращательного движения в линии привода валков учитывались демпфирующие свойства деформируемого металла. С этой целью на основе известных формул для определения момента прокатки получены формулы для определения коэффициентов вязкого и кинематического демпфирования, которые использовались при определении момента технологического сопротивления. Полученная математическая модель динамики вращательного движения двухмассовой системы, в отличие от существующих решений позволяет анализировать динамические процессы при любых законах изменения момента на валу двигателя и момента технологического сопротивления, и адаптирована к условиям взаимодействия с пластически деформируемым телом. С использованием полученной математической модели расчета динамики вращательного движения двухмассовой системы может быть определено время переходных процессов в линиях привода исполнительных механизмов прокатного стана при наличии возмущающих или управляющих воздействий. В результате появляется возможность сравнения различных каналов регулирования по быстродействию и выбора на этой основе оптимального канала воздействия, например, на различные частотные составляющие продольной разнотолщинности полос. С другой стороны, с использованием этой математической модели можно подбирать параметры механического оборудования прокатного стана, обеспечивающие требуемое быстродействие соответствующего исполнительного механизма.

В настоящее время в рамках общей теории оптимального управления движением разработана методика решения задачи поиска движения, оптимального с точки зрения наилучшего приближения к цели. Практическим приложением этой задачи является задача оптимизации качества продукции, которая рассмотрена с точки зрения повышения точности размеров проката. В виду сложности решения этой задачи в общей постановке, в качестве первого шага рассмотрена методика решения задачи по определению алгоритма автоматического регулирования толщины полосы за счет перемещения валков прокатного стана. При постановке задачи, так же как и при описании движения двухмассовой системы, учитывались демпфирующие свойства очага деформации. Уравнение движения полосы, положенное в основу математической модели, представляет собой дифференциальное уравнение второго порядка, которое путем соответствующей замены переменных приведено к канонической системе дифференциальных уравнений, описывающих движение линейных систем. При формулировке краевых условий считалось, что в начальный момент времени продольная разнотолщинность полосы отсутствует и положению системы, к которому необходимо максимально приблизиться в течение заданного промежутка времени, отвечает также полное отсутствие продольной разнотолщинности полосы. В соответствии с полученным решением для максимального

уменьшения продольной разнотолщинности система автоматического регулирования толщины должна работать в релейном режиме и в момент переключения изменять скорость перемещения нажимных винтов от максимально возможной до нулевой. Формула для определения момента переключения имеет вид

$$t = t_{\beta} - \frac{1}{2\sqrt{k}} \ln \frac{l_1 + l_2\sqrt{k}}{l_1 - l_2\sqrt{k}},$$

где t_{β} – время управления; k – коэффициент, учитывающий демпфирующие свойства очага деформации; l_1 и l_2 – компоненты вектора единичной нормали к поверхности области достижимости,

и содержит неизвестные компоненты вектора единичной нормали к поверхности области достижимости, которые находятся с использованием формулы Коши, являющейся аналитическим решением системы линейных дифференциальных уравнений. В итоге задача сводится к решению системы нелинейных уравнений, которое находится численно с использованием метода Ньютона.

Разработанный комплекс математических моделей может быть использован при анализе механизмов формирования качества проката в соответствии со схемой, представленной на рис.4.

4. Разработка способов и устройств для повышения точности горячекатаных и холоднокатаных полос

Одной из важнейших характеристик качества полосового проката является уровень продольной разнотолщинности, к появлению которой приводят возмущающие воздействия, сопровождающие процесс прокатки. При этом каждому возмущающему воздействию соответствует свой амплитудно-частотный диапазон продольной разнотолщинности. С целью разработки способов и устройств для снижения продольной разнотолщинности полос был выполнен с помощью разработанных математических моделей численный анализ эффективности различных каналов воздействия на конечную толщину полосы. Результаты расчетов показали, что из основных возмущающих воздействий наибольшее влияние на толщину полосы оказывает наследственная продольная разнотолщинность, а затем в порядке убывания степени влияния следуют колебания сопротивления металла пластической деформации, условий трения, ширины полосы. При этом во всех случаях влияние возмущений на конечную толщину полосы оказывается тем существенней, чем меньше жесткость прокатной клетки. Среди управляющих воздействий наиболее существенное влияние на конечную толщину полосы оказывает изменение межвалкового зазора. Несколько меньшее влияние оказывает регулирование заднего натяжения полосы, однако, степень влияния на конечную толщину полосы изменения межвалкового зазора и



Рис. 4. Схема связи математических моделей и характеристик качества проката

заднего натяжения существенно зависит от жесткости прокатной клетки. При этом уменьшение жесткости клетки снижает степень влияния на конечную толщину полосы межвалкового зазора и увеличивает степень влияния заднего натяжения. Меньшее влияние на конечную толщину полосы оказывает рассогласование окружных скоростей валков, причем в этом случае уменьшение жесткости прокатной клетки приводит к увеличению эффективности этого регулирующего воздействия. Соизмеримое, но несколько меньшее влияние на конечную толщину полосы оказывает уровень переднего натяжения. При этом уменьшение жесткости прокатной клетки также увеличивает степень влияния переднего натяжения на уровень продольной разнотолщинности полос.

В настоящее время для повышения точности геометрических размеров полос большое внимание уделяется процессам прокатки с кинематической несимметрией контактных граничных условий. При этом считается, что максимальный эффект по снижению усилия прокатки, а следовательно и по уменьшению продольной разнотолщинности полос, обеспечивает предельный случай несимметричной прокатки – процесс прокатки-волочения. Однако этот процесс не лишен недостатков, которые ограничивают область его применения. Анализ кинематики процесса прокатки, выполненный на основе 0-мерной модели очага деформации, показал, что при всех кинематических вариантах процесса прокатки, для которых справедливо соотношение $\gamma_1 + \gamma_0 = \alpha_0$ (где γ_1 и γ_0 – критические углы на ведущем и ведомом валках; α_0 – угол захвата) уровень усилия прокатки и натяжений концов полосы будет примерно соответствовать уровню этих параметров при прокатке-волочении. В то же время такой процесс обладает большей гибкостью за счет возможности варьирования скоростным режимом работы валков при прочих равных условиях, что позволяет расширить область его применения, в частности с целью обеспечения требуемых геометрических размеров полос.

Проведенный на основе энергетической теории прокатки анализ механизмов формирования конечной толщины полосы показал, что для устранения наследственной продольной разнотолщинности с малой амплитудой целесообразным является применение клетей, работающих в режиме поддержания постоянства заднего натяжения и скорости переднего конца полосы. В соответствии с этим предложен способ прокатки, согласно которому для снижения продольной разнотолщинности полос на каждом из рабочих валков поддерживают постоянную величину мощности на их бочках, а также поддерживают постоянным растягивающее усилие, прикладываемое к входному сечению полосы. Простейшим вариантом осуществления такого способа является деформация полосы в неприводных валках, когда мощность на валках всегда равна нулю. Этот вариант использован как составная часть при разработке способа деформации, обеспечивающим уменьшение продольной и поперечной разнотолщинности полос при сохранении их плоскостности. Деформацию полосы при этом осуществляют последовательно в двух группах валков, причем во второй группе процесс ведут с охватом валков полосой и рассогласованием окружных скоростей валков. Такая схема позволяет осуществлять в первой группе валков калибровку поло-

сы по толщине путем волочения за счет натяжения, создаваемого во второй группе валков. Экспериментальная проверка эффективности процесса деформации полосы в неприводных валках показала, что в процессе волочения частотный спектр продольной разнотолщинности не меняется, т.е. не наводится новой разнотолщинности к уже имевшейся, а все изменения разнотолщинности сводятся к уменьшению ее амплитуды. Численное моделирование процесса деформации полосы в неприводных валках, выполненное с использованием разработанных математических моделей, также показало, что эффективность выравнивания толщины полосы при волочении выше, чем при обычной прокатке в режиме заданных натяжений концов полосы.

Эффективность выравнивания наследственной продольной разнотолщинности путем деформации в неприводных валках возрастает с увеличением жесткости рабочей клетки. При этом в случае волочения появляются дополнительные возможности создания достаточно компактных и жестких клеток. В частности это связано с тем, что в виду отсутствия необходимости привода валков возможно применение валкового узла с уменьшенным количеством опорных валков и рабочими валками малого диаметра. Малые габариты валкового узла, в свою очередь, позволяют изготовить компактную станину с коротким контуром деформации, что приводит к увеличению жесткости клетки. Для дальнейшего повышения эффективности устранения наследственной продольной разнотолщинности полос предложена конструкция устройства для волочения, в которой подушки рабочих валков установлены в наклонных направляющих, сходящихся в направлении прокатки. В этом случае при увеличении толщины полосы на входе в очаг деформации, связанном, например с наследственной продольной разнотолщинностью проката, возрастает усилие переднего натяжения полосы и подушки рабочих валков перемещаются вдоль направляющих. В результате этого перемещения уменьшается межвалковый зазор, благодаря чему компенсируются упругие деформации клетки, вызванные изменением усилия действующего на валки.

В ряде случаев повышение точности полос по толщине целесообразно осуществлять в непрерывных технологических линиях, когда полоса сварена в бесконечную ленту. Как правило, в таких линиях полоса движется без натяжения. В то же время для повышения точности полос за счет волочения через неприводные валки необходимо создавать как минимум переднее натяжение. С другой стороны, при деформации полосы с клиновидным профилем поперечного сечения возникает тенденция к образованию серповидности, эффективным способом правки которой является процесс прокатки-волочения с охватом валков полосой. С учетом этого предложено устройство для деформации полосы, включающее последовательно расположенные клетку с неприводными валками и клетку прокатки-волочения с охватом валков полосой. При этом клетка прокатки-волочения, с одной стороны, улучшает форму полосы, а с другой стороны, за счет сил трения на дугах охвата создает натяжение, необходимое для волочения, а затем обеспечивает снижение натяжения до нуля на выходе из устройства. Вместе с тем для того, чтобы силы трения на дугах охвата полосой валков

клетки прокатки-волочения создавали натяжение, необходимое для волочения полосы, а затем уменьшали это натяжение до нуля, необходимы технические средства, обеспечивающие прижатие полосы к рабочему валку на дугах охвата. Одним из таких средств могут служить прижимные валки. Для определения конструктивных параметров клетки прокатки-волочения в этом случае получены формулы, позволяющие рассчитать усилие прижатия полосы прижимным валком и радиусы рабочего и прижимного валков, при которых полоса в месте прижатия не переходит в пластическое состояние. Практически в предложенном устройстве рекомендуется применять не более четырех прижимных валков. При этом прижимные валки целесообразно располагать таким образом, чтобы их оси и ось рабочего валка, к которому они прижимают полосу, лежали в одной плоскости, причем эта плоскость должна быть перпендикулярна плоскости, проходящей через оси рабочих валков клетки прокатки-волочения. Такая компоновка обеспечивает то, что усилие прижима полосы на дугах охвата не будет оказывать влияние на усилие прокатки-волочения, что упростит настройку клетки. Для проверки работоспособности такого устройства его работа была промоделирована на лабораторном стане ПВ-200 ЮУрГУ. Экспериментальные исследования показали, что предложенное устройство обеспечивает коэффициент выравнивания абсолютной продольной разнотолщинности 1,46 и коэффициент выравнивания относительной продольной разнотолщинности 1,39. Сравнительная прокатка полос в приводных валках при прочих равных условиях показала, что в этом случае наследственная продольная разнотолщинность не только не уменьшается, но и наводится дополнительная к уже существующей.

В ряде случаев прокатка с натяжением концов полосы является нецелесообразной как с технологической, так и с технической точек зрения. При этом остается только два канала воздействия на толщину полосы: изменение межвалкового зазора и изменение окружных скоростей рабочих валков. Анализ, выполненный с позиций энергетической теории прокатки, показал, что в этом случае для снижения продольной разнотолщинности полос целесообразно использовать процесс прокатки в клетке с индивидуальным приводом и с разными жесткостями приводов верхнего и нижнего валка. Простейшим вариантом такого процесса является прокатка с одним приводным валком. Экспериментальное исследование показало, что коэффициент выравнивания абсолютной продольной разнотолщинности при прокатке с одним приводным валком в 1,6 раза выше, чем при прокатке в двух приводных валках, а коэффициент выравнивания относительной продольной разнотолщинности при прокатке с одним приводным валком в 1,8 раза выше, чем при прокатке в двух приводных валках.

В настоящее время при построении систем автоматического регулирования толщины (САРТ) полосы используют один или несколько каналов воздействия на конечную толщину, причем увеличение числа каналов, как правило, повышает эффективность САРТ, так как каждый из них обладает своим оптимальным диапазоном регулирования толщины и быстродействием. Для наиболее полной реализации возможностей САРТ предлагается использовать реверсивные прокатные станы, имеющие натяжные устройства с входной и выходной

сторон стана и индивидуальный привод валков. Рабочая клеть такого стана должна быть оснащена основным гидравлическим нажимным устройством, обеспечивающим перемещение верхней половины всего валкового узла как единого целого, нажимным устройством, обеспечивающим поворот многоопорных эксцентрично установленных осей, на которых посажены опорные ролики, а также нажимными и уравнивающими устройствами, обеспечивающими перекачивание рабочих валков по бочке опорных валков. Предлагаемый прокатный стан, как объект автоматизации, обладает следующими каналами воздействия на конечную толщину полосы: переднее натяжение; заднее натяжение; рассогласование окружных скоростей рабочих валков; перемещение верхней половины валкового узла как единого целого; поворот эксцентриковых осей многоопорных систем; автономное перемещение рабочих валков.

5. Рекомендации по использованию теоретических результатов

Как правило, технологический процесс производства проката включает в себя ряд последовательных операций, связанных с нагревом и деформацией металла. Исходя из этого, предложены общие принципы построения технологии производства высококачественных профилей, которые могут служить основой для алгоритмизации процесса проектирования технологической схемы производства и определения ее параметров. В качестве основной идеи при этом является порядок построения технологического процесса таким образом, чтобы на каждом его этапе достигался требуемый уровень только одного из частных критериев качества, а последовательность операций была такой, чтобы последующие этапы не портили результаты, достигнутые на предыдущих. Очевидно, что рациональная схема построения технологического процесса при производстве различных типов профилей будет различна. Наиболее актуальным при этом является разработка подобной схемы для конечных стадий прокатного передела. В связи с этим рекомендуется технология получения холоднокатаных полос с регламентируемым уровнем качественных характеристик, включающая следующую последовательность операций:

- 1) холодная прокатка с регулированием толщины полосы, обеспечивающая требуемую точность готовых полос по толщине;
- 2) холодная прокатка или правка в режиме заданных скоростей концов полосы, обеспечивающая, с одной стороны, необходимую плоскостность и, с другой стороны, не наводящая дополнительную продольную разнотолщинность;
- 3) промежуточный рекристаллизационный отжиг полосы для снятия наклепа;
- 4) прокатка-волочение в режиме заданных скоростей концов полосы, которая обеспечивает максимальную однородность деформации по толщине полосы, не наводит дополнительную продольную разнотолщинность и не портит плоскостность полос;
- 5) рекристаллизационный отжиг, обеспечивающий однородность зеренной структуры металла;

б) дрессировка в режиме заданных скоростей концов подосы, обеспечивающая требуемый уровень механических свойств полосы.

Для построения технологического процесса по указанной схеме получены формулы для определения значений коэффициентов вытяжки полосы на каждом из этапов и методика распределения коэффициентов вытяжки по проходам в пределах отдельного этапа.

Горячекатаные и холоднокатаные полосы, как правило, имеют определенную величину продольной разнотолщинности. Эта разнотолщинность может укладываться в рамки, предусмотренные ГОСТами, но, тем не менее, ее снижение до минимально возможной величины позволяет обеспечить существенную экономию металла при производстве изделий из полос. Известно, что наиболее благоприятные условия для получения полосы с минимальной разнотолщинностью обеспечиваются при бесконечном способе прокатки на станах с гидравлическими нажимными устройствами и управлением процессом прокатки от УВМ. Однако такие станы являются дорогими и сложными агрегатами и их применение только для калибровки толщины полос в большинстве случаев не целесообразно. Поэтому предлагается использовать для этих целей способы и устройства, обладающие свойствами саморегулирования толщины полос, в том числе предложенные в данной работе. С учетом полученных результатов разработаны предложения по калибровке толщины штрипса и лент для условий Челябинского трубопрокатного завода, Северского трубного завода, Кировского завода ОЦМ и завода Миассэлектроаппарат. При этом, в частности, для калибровки толщины латунных лент на Кировском заводе ОЦМ и лент из алюминиевых сплавов на заводе Миассэлектроаппарат рекомендовано применять процесс волочения через неподвижные валки на отдельно стоящем агрегате. Калибровку толщины штрипса, предназначенного для производства сварных труб, рекомендуется осуществлять в технологических линиях. Для этих целей в условиях Северского трубного завода предложено использовать процесс волочения через неприводные валки с последующей прокаткой-волочением, а в условиях Челябинского трубопрокатного завода предложено использовать прокатку в клетях с одним приводным валком.

С использованием трехмерной математической модели очага деформации разработаны рекомендации по назначению режима обжатий при производстве плющеной ленты путем последовательной деформации в монолитной и роликовой волоках в условиях Златоустовского металлургического завода. При этом была выполнена экспериментальная проверка конечно-элементной модели напряженно-деформированного состояния при плющении проволоки в роликовой волоке, которая показала хорошее совпадение экспериментальных и расчетных данных. Для определения требуемого режима обжатий разработан алгоритм, включающий определение по известным формулам усилия, необходимого для волочения в монолитной волоке, и определение по разработанной на основе метода конечных элементов математической модели уширения при плющении в роликовой волоке. Технология, построенная с учетом сделанных рекомендаций, обеспечила устойчивое протекание процесса волочения, получение требуемых

механических свойств готовой ленты и получение требуемых размеров по ширине при свободном формоизменении кромок.

На основе феноменологической теории разрушения металлов при ОМД выполнен анализ условий прокатки прутков из титанового сплава $Ti+8\%Al+1\%Mo+1\%V$ на стане 450 АО ВСМПО, на поверхности которых при прокатке по существующей схеме калибровки наблюдались разрывы. С этой целью выполнены пластометрические испытания, позволившие построить кривые упрочнения и диаграммы пластичности титанового сплава в диапазоне температур 900...1050 °С, а также с использованием трехмерной конечно-элементной математической модели определено напряженно-деформированное состояние при прокатке прутков. В процессе математического моделирования проанализированы шесть основных схем калибровки, прежде всего с точки зрения характера напряженного состояния поверхностных слоев профиля. Полученные закономерности учтены при разработке калибровки валков и режима обжатий на стане 450 АО ВСМПО. Опытная прокатка с использованием новой калибровки и рассчитанных режимов обжатий позволила получить круглые профили из титанового сплава без разрывов на поверхности.

Заключение

На основе выполненных в работе исследований разработаны теоретические положения, совокупность которых можно квалифицировать как достижение в развитии методов анализа и математического моделирования процессов прокатки, обеспечивающих получение высококачественной продукции широкого сортамента. При этом, в частности, получены следующие результаты:

1. На основе принципов системного подхода определены перспективные пути решения проблемы повышения качества проката, к которым относятся, в частности, разработка новых технологических процессов и устройств, а также создание соответствующих математических моделей. С целью создания теоретической основы для поиска новых технических решений выполнен всесторонний анализ граничных условий процесса прокатки, позволивший, в частности, найти дополнительные резервы для повышения точности проката. Для использования в качестве единой основы при создании математических моделей предложена векторная модель формирования качества проката, позволяющая учесть все многообразие требований, предъявляемых к продукции прокатного передела.
2. Разработан комплекс математических моделей различной степени сложности для анализа процессов формоизменения металла при прокатке. При этом на основе обобщения и развития известных решений сформулирован энергостатический метод определения интегральных характеристик процесса прокатки, с применением которого разработаны алгоритмы и программы для расчета усилия и конечных размеров при прокатке простых сортовых профилей и несимметричной холодной прокатке полос. Применение инженерного метода совместно с методом конечных элемен-

тов и с учетом особенностей процесса несимметричной прокатки позволило разработать математическую модель и программу для расчета дефекта плоскостности, получившего название «желоб», а также программ, используемых в учебном процессе. На основе метода Галеркина и метода конечных элементов создана математическая модель для определения трехмерного напряженно-деформированного состояния при прокатке в двух- и четырехвалковых калибрах. При этом получена общая формулировка краевой задачи, сформулированы механические граничные условия в общем виде и получены конечные формулы для вычисления коэффициентов и свободных членов системы линейных уравнений, к которой в конечном итоге сведено решение задачи.

3. Разработана феноменологическая модель сопротивления металлов пластической деформации единая для всего температурно-скоростного диапазона процессов прокатки. С целью ее практического применения предложен алгоритм численного определения сопротивления металлов пластической деформации и методика экспериментального определения коэффициентов модели с использованием пластометра.
4. Для анализа влияния конструкции оборудования прокатных станков на качество проката разработаны с использованием метода конечных элементов алгоритмы и программы для определения прогиба валков, учитывающие их реальную форму, и определения быстродействия систем управления приводом валков, учитывающие упругие и демпфирующие свойства линии привода и очага деформации. На основе принципа минимакса Н.Н.Красовского сформулирован алгоритм поиска оптимального управления приводом нажимного устройства при регулировании толщины полосы.
5. На основе анализа граничных условий процесса прокатки разработаны на уровне изобретений новые способы и устройства, обеспечивающие регулирование толщины полос с использованием внутренних механизмов процесса прокатки и не требующие прецизионных датчиков толщины полосы. Разработаны рекомендации по применению этих способов и устройств для калибровки толщины полос из цветных металлов и сплавов, а также для калибровки толщины штрипса в линиях трубосварочных агрегатов. Предварительный анализ показал, что применение предложенных технических решений позволит увеличить выход годного до 3%.
6. Сравнение результатов расчета, полученных с использованием трехмерной модели очага деформации с экспериментальными данными по формоизменению при плющении проволоки в роликовой волоке показало их хорошее совпадение. Это позволило использовать математическую модель для анализа плющения проволоки последовательно в монолитной и роликовой волоках. Эффективность использования математической модели выразилась в существенном снижении трудоемкости при определении режима обжатий, в частности, при разработке технологии плющения

проволами в условиях термокалибровочного цеха ОАО «Златоустовский металлургический завод».

7. Применение разработанной трехмерной математической модели очага деформации совместно с теорией разрушения металлов В.Л.Колмогорова и др. позволило проанализировать причины, приводящие к появлению рванин на поверхности профилей при сортовой прокатке. Использование полученных закономерностей при разработке калибровки валков и режимов обжатий позволило исключить растрескивание поверхности при прокатке круглых прутков из титановых сплавов в условиях стана 450 АО ВСМПО (г. Верхняя Салда).

Основные положения диссертации опубликованы
в следующих работах

1. Выдрин А.В. О вариациях процесса прокатки-волочения //Теория и технология прокатки: Сб. научн. тр. – Челябинск: ЧПИ, 1979. – С.52 – 58.
2. Выдрин А.В., Выдрин В.Н. Система уравнений и режимы процесса прокатки //Обработка металлов давлением: Сб. научн. тр. – Свердловск: УПИ, 1983. – С.43 – 48.
3. Выдрин А.В. Математическая модель дрессировки в неприводных валках //Обработка металлов давлением. Сб. научн. тр. – Свердловск: УПИ, 1984. – С.63 – 67.
4. Выдрин А.В. Область энергосиловых параметров процесса прокатки //Теория и технология прокатки. Сб. научн. тр. – Челябинск: ЧПИ, 1984. – С.23 – 30.
5. Судаков Н.В., Выдрин А.В., Новиков А.Г., Колмогоров В.Л. Исследование процесса прокатки в режиме заданных скоростей на границах очага деформации // Новые технологические процессы прокатки, интенсифицирующие производство и повышающие качество продукции: Тез. докл. Всесоюз. науч. конф. – Челябинск: ЧПИ, 1984. – С.88
6. Судаков Н.В., Выдрин А.В., Новиков А.Г. Теоретическое и экспериментальное исследование процесса прокатки в режиме заданных скоростей полосы на границах очага деформации //Прогрессивные технологические процессы в производстве холоднокатаного листа: Тез. докл. Всесоюз. науч. конф. – Липецк: ЛПИ, 1985. – С.22.
7. Выдрин А.В. Определение ширины полосы при прокатке по полю скоростей //Изв. вузов. Чер. металлургия.– 1987.– №11. – С.148–149.
8. Колмогоров В.Л., Выдрин А.В. Определение напряженно-деформированного состояния полосы при прокатке вариационным методом //Изв. вузов. Чер. металлургия.– 1988.– №8. – С.46–49.
9. Выдрин А.В. Пластичность металла при холодной прокатке полос //Теоретические проблемы прокатного производства: Тез. докл. Всесоюз. науч. конф. – Днепропетровск: ДМетИ, 1988. – С.65–66.

10. Судаков Н.В., Выдрин А.В. Жесткость клетей станов для прокатки в режиме заданных скоростей полосы //Изв. вузов. Чер. металлургия. – 1989. – №1. – С.84–86.
11. Исследование продольной разнотолщинности ленты при волочении через неприводные валки/ А.В.Выдрин, А.В.Тропотов, И.Т.Тоцкий и др. //Теория и технология прокатки: Сб. научн. тр.– Челябинск: ЧПИ, 1989. – С.58–64.
12. Выдрин А.В. Влияние режима обжатий на пластичность металла полос //Новые технологические процессы прокатки как средство интенсификации производства и повышения качества продукции: Тез. докл. Всесоюз. науч. конф. – Челябинск: ЧПИ, 1989. – С.70–71.
13. Выдрин А.В. Оценка пластичности металла при холодной прокатке полос //Zecz. nauk. Met. i odlew./АСН Krakowie, 1989, №123.
14. Выдрин А.В. Методика определения напряженно-деформированного состояния очага деформации при холодной прокатке полос //Обработка металлов давлением: Сб. научн. тр.– Свердловск: УПИ, 1990. – С.4–8.
15. Выдрин А.В. Энергостатический метод расчета усилия прокатки //Математическое моделирование технологических процессов обработки материалов давлением: Тез. докл. Респ. науч. конф. – Пермь: ППИ, 1990. – С.77.
16. Выдрин А.В., Агеев Л.М., Ильичев В.Г. Способы и устройства для калибровки толщины полос //Новые технологические процессы и оборудование для получения моно- и многослойных профилей и лент из порошковых, литых и пластически деформированных материалов: Тез. докл. Всесоюз. науч. конф. – Сочи: УДНТП, 1991. – С.11–12.
17. Дукмасов В.Г., Выдрин А.В. Комплекс программных средств для анализа новых ресурсосберегающих и экологически чистых процессов прокатки //Черная металлургия России и стран СНГ в 21 веке: Тез. докл. Международной науч. конф. – Москва, 1994. – С.183–184.
18. Агеев Л.М., Выдрин А.В. Расчет на ЭВМ кинематических и энергосиловых параметров процесса продольной прокатки. – Челябинск: ЧПИ, 1995. – 17с.
19. Выдрин А.В. Перспективные направления развития теории и математического моделирования процессов формирования размеров и формы полос при прокатке //Проблемы развития металлургии Урала на рубеже XXI века: Тез. докл. Межгос. научн. конф. – Магнитогорск: МГМА, 1996. – С.91–92.
20. Выдрин А.В. Инженерная методика оценки желобчатости полос при прокатке-волочении //Изв. вузов. Чер. металлургия. – 1997. – №5. – С.40–43.
21. Выдрин А.В., Соловьев А.А. Математическая модель процесса несимметричной прокатки полос //Обработка сплошных и слонстых материалов: Сб. научн. тр.– Магнитогорск: МГМА, 1998. – С.30–39.

22. Дукмасов В.Г., Выдрин А.В. Векторная модель формирования геометрических размеров полос //Изв. вузов. Чер. металлургия.– 1998.– №3. – С.31–35.
23. Дукмасов В.Г., Выдрин А.В., Нестеров О.А. Алгоритм определения статических и кинематических параметров прокатки сортовых профилей высокой точности //Проблемы пластичности в технологии: Тез. докл. Международной научн. конф. – Орел: ОрелГТУ, 1998. – С.97.
24. Выдрин А.В. Конечно-элементная модель очага деформации при продольной прокатке /Южно-Уральский гос. ун-т. Челябинск, 1999. 22с. Деп. в ВИНТИ 02.06.99, №1765-В99.
25. Выдрин А.В., Дукмасов В.Г., Нестеров О.А. Алгоритм определения усилия при прокатке простых сортовых профилей // Обработка сплошных и слоистых материалов: Сб. научн.тр.– Магнитогорск: МГТУ, 1999. – С.11–18.
26. Дукмасов В.Г., Выдрин А.В., Баричко Б.В. и др. Уширение металла при плющении проволоки /Южно-Уральский гос. ун-т. Челябинск, 1999. 11с. Деп. в ВИНТИ 17.11.99, №3398-В99.
27. Выдрин А.В. Применение математических моделей для анализа процессов формирования качества проката //Металлургическая и горнорудная промышленность.– 2000.– №8–9. – С.68–70.
28. Дукмасов В.Г., Иосифов Ю.М., Выдрин А.В., Серебряков С.В. Алгоритм расчета упругой деформации профилированных прокатных валков //Металлургическая и горнорудная промышленность.– 2000.– №8–9. – С.179.
29. А.с. 904232 (СССР). Способ регулирования профиля полосы и рабочая клеть для его осуществления.
30. А.с. 1089817 (СССР). Способ деформации полосы между валками.
31. А.с. 1306609 (СССР). Комплект валков многовалковой клетки.
32. А.с. 1314519 (СССР). Способ прокатки.
33. А.с. 1318327 (СССР). Устройство для глубокой вытяжки.
34. А.с. 1423199 (СССР). Прокатный стан.
35. А.с. 1600871 (СССР). Способ деформации полосы и прокатный стан для его осуществления.
36. А.с. 1696036 (СССР). Способ изготовления сварных прямошовных труб.
37. А.с. 1839118 (СССР). Способ прокатки металлической полосы.
38. Пат. 2057606 (РФ). Способ изготовления профилей.
39. Пат. 1183250 (Италия). Способ регулирования профиля полосы и рабочая клеть.
40. Пат. 8500493 (Швеция). Способ регулирования профиля полосы и рабочая клеть.
41. Пат. 2057606 (ФРГ). Способ регулирования профиля полосы и рабочая клеть.