

**На правах рукописи**

**КОЛЯСОВ ДМИТРИЙ ВЛАДИМИРОВИЧ**

**ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ  
ПРОКАТКИ КАТАНКИ С ЦЕЛЬЮ РАСШИРЕНИЯ  
СОРТАМЕНТА**

**Специальность 05.16.05 - Обработка металлов давлением**

**АВТОРЕФЕРАТ**

**диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук**

**Москва - 2006**

Работа выполнена в Ордена Трудового Красного Знамени научно-исследовательском, проектном и конструкторском институте сплавов и обработки цветных металлов ОАО «Институт Цветметобработка».

Научный руководитель кандидат технических наук,  
доцент  
Сивак Борис Александрович

Научный консультант доктор экономических наук,  
кандидат технических наук,  
старший научный сотрудник  
Райков Юрий Николаевич

Официальные оппоненты: доктор технических наук,  
профессор  
Чиченев Николай Алексеевич

кандидат технических наук  
Трайно Александр Иванович

Ведущее предприятие: ОАО Московский металлургический  
завод «Серп и молот», г. Москва

Защита состоится « 14 » декабря 2006 г. в 15<sup>30</sup> на заседании диссертационного совета Д 217.038.01 в ОАО «Институт Цветметобработка» по адресу: 119017, г. Москва, Пыжевский пер., дом 5.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОАО «Институт Цветметобработка».

Автореферат разослан « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2006 года.

Ученый секретарь  
диссертационного совета

Калмыкова Э.Н.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** Современное прокатное производство, наряду с ростом производительности, требует одновременного освоения новых видов проката и улучшения качества выпускаемой продукции. Конкурентоспособность проката характеризуется качеством непосредственно продукции и технологического процесса производства.

Наряду с введением в строй на российских металлургических заводах все большего количества новых современных прокатных станков, на ряде металлургических предприятий отсутствует возможность проведения коренной реконструкции с заменой всего устаревшего оборудования. При этом предприятие сталкивается со сложной технологической проблемой, связанной с необходимостью обеспечивать требуемый уровень качества продукции и широкий профильно-марочный сортамент. В том случае, если данная проблема не находит своего решения, то сортовые и проволочные станы, не позволяющие обеспечивать выпуск проката, отвечающего современным требованиям, неизбежно консервируются или демонтируются, теряя традиционные рынки сбыта продукции.

В качестве одного из малобюджетных вариантов улучшения качества продукции (помимо совершенствования систем управления, методов контроля производимой продукции и других аспектов контроля качества) можно рассматривать совершенствование технологии производства.

При этом важнейшими вопросами совершенствования технологии для проволочных станков с двух- и многовалковыми калибрами являются расширение сортамента на основе совершенствования технологических возможностей калибровок валков и оборудования, а так же режимов прокатки и новых методик эксплуатации валкового парка, особенно при использовании дорогостоящих прокатных шайб в клетях с многовалковыми калибрами.

Решение этих вопросов во многом зависит от соответствующих математических моделей, поэтому разработка и применение таких моделей в условиях проволочных станков для повышения эффективности производства бунтового круглого проката и катанки является актуальным.

**Цель и задачи исследования.** Целью работы является расширение сортамента проволочных станков на основе математического моделирования и совершенствования технологических режимов прокатки катанки, а также эксплуатации калибровок.

Указанная цель реализуется путём решения следующих задач:

- создание универсальной математической модели проволочных станков, учитывающей особенности прокатки в двух- и трехвалковых калибрах;

- обоснование возможных эффективных технологических схем производства профилей простой формы на основе методик расчета показателей формоизменения и энергосиловых параметров;
- совершенствование действующих технологических режимов прокатки и разработки новой методики в организации эксплуатации калибровки.

**Научная новизна** работы заключается в следующем:

1. Разработана модель калибровки непрерывного стана, впервые позволившая осуществлять «сквозное» моделирование всей калибровки как в двух- так и в трех- валковых калибрах для комплексного расчета геометрических и энергосиловых параметров прокатки.
2. На основе экспериментальных исследований установлены особенности температурных режимов прокатки на проволочных станах в клетях с двух- и трехвалковыми калибрами.
3. На основе матричного подхода разработан принцип описания и учета состояния валковых шайб в блоках трехвалковых калибров, как основного критерия оценки дальнейшей пригодности шайбы в занимаемой позиции.

**Практическая ценность** работы состоит в следующем:

1. С помощью разработанного программного продукта, позволяющего проводить расчет и анализ параметров формоизменения и энергозатрат при прокатке в калибрах простой формы оценена возможность расширения марочного и размерного сортамента, рассчитаны калибровки для прокатки новых круглых профилей диаметрами 11, 13, 14 и 15 мм для условий стана 300 №3 ОАО «ММК», выданы рекомендации;
2. Разработаны технологические рекомендации, заключающиеся в определении схемы движения прокатных шайб для условий стана 300 №3 ОАО «ММК».
3. Разработан режим обжатий, который позволяет устранить возникновение таких поверхностных дефектов, как закат и невыполнения профиля, при прокатке термоупрочненной арматуры на стане 250 №2 ОАО «ММК».

**Реализация работы.**

- Промышленное применение для условий сортопрокатных станов 300 №3, 250 №2 ОАО «ММК» разработанного программного продукта, повышающее результативность поиска рациональных решений (калибровка, режим прокатки, разработка новых видов продукции). Использование в вальцешлифовальном отделении для условий стана

300 №3 ОАО «ММК» программного продукта по эффективному применению прокатных валков (шайб).

– Использование на сортовом стане 250 №2 ОАО «ММК» режима обжатий при прокатке термоупрочненной арматуры с целенаправленным промежуточным охлаждением раската.

**Апробация работы.** Основные положения диссертационной работы изложены и обсуждены на международной (Магнитогорск 2004 г.), трёх всероссийских (Липецк 2001 г., Пенза 2001 г., Магнитогорск 2005 г.), региональной (Магнитогорск 2003 г.) и ежегодной (Магнитогорск 2003 г.) научно-технических конференциях.

**Публикации.** По теме диссертации опубликованы: свидетельство об официальной регистрации базы данных и 7 научных публикаций.

**Структура и объём работы.** Диссертация изложена на 106 страницах (не включая приложения) машинописного текста, содержит 17 таблиц, 43 рисунка и состоит из введения, 4 глав, заключения и 3 приложений. Библиографический список включает 102 наименования.

### СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы исследования, сформулированы направление, цель и задачи работы.

**В первой главе** проведен анализ современных аспектов математического моделирования с учетом сформировавшихся мировых требований к системам автоматизированного управления качеством для повышения его уровня.

Для качественного улучшения возможностей сортопрокатного передела наиболее очевидным представлялся путь быстрой замены подавляющего большинства устаревших станов на новые высокотехнологичные. Новые рыночные условия инвестирования в проекты реконструкции показали, что наиболее реалистичным является путь поэтапной модернизации прокатного передела с коренным изменением технологической структуры и идеологии производства. В сложившихся условиях на большинстве металлургических предприятий требуется решение задач повышения эффективности производства проката как за счет внутренних технологических резервов, так и в результате повышения технического уровня производства. Наиболее актуальна такая постановка вопроса для отечественного сортопрокатного производства, где срок эксплуатации многих станов превышает 50-60 лет.

Поэтому в современных условиях можно выделить два основных направления производственно-технологических решений, повышающих эффективность производства сортового проката.

К первому направлению можно отнести технические и технологические решения, позволяющие повысить эффективность получения и качество сортовых профилей на действующих, но морально устаревших

станах и отличающиеся при этом низкими капиталовложениями. Другими словами, это малозатратные способы продления срока службы устаревших станов путем повышения качества продукции за счет использования технологических резервов и нетрадиционных технологических режимов.

Второе направление охватывает технические и технологические решения по модернизации действующих и разработке новых сортовых станов. Здесь особую важность приобретают современные методы компоновки технологической схемы, управления точностью, рационализации энергозатрат с целью максимально эффективного использования современных технологических процессов и оборудования, а значит, наиболее эффективной отдачи капиталовложений.

Для первого направления характерно, прежде всего, выявление и использование технологических резервов калибровки валков, а также температурно-скоростных условий прокатки. Для второго направления наиболее важна разработка систем анализа технологических схем прокатки и управления точностью профилей, а так же выработка на их основе эффективных технологических режимов прокатки. Оба эти направления позволяют управлять качеством готовой продукции, как на стадии проектирования, так и на стадии внедрения.

Современные тенденции совершенствования производства формируют требования к разрабатываемым технологическим решениям, которые заключаются в построении алгоритма улучшения существующих и разработке новых режимов прокатки сортовых профилей, включая катанку.

Рассмотрены методики расчета формоизменения, из которых особо выделен и в дальнейшем использован в исследовании структурноматричный подход к моделированию процессов сортовой прокатки.

Определены основные характеристики, оказывающие наибольшее влияние на формирование качества геометрии сортопрокатной продукции. Ими оказались: температура при прокатке, сопротивление деформации, и уровень заполнения металлом калибра, зависящий от процесса формоизменения.

Результатом анализа аспектов математического моделирования стало определение направления исследований, в котором выделены следующие основные этапы:

- формирование универсальной математической модели проволочного стана, учитывающей особенности как двух- так и трехвалковых калибров;
- моделирование технологических режимов с целью расширения марочного и типоразмерного сортамента морально устаревших сортовых станов
- анализ технологических схем прокатки

**Во второй главе** описывается создание компьютерной модели для моделирования процесса сортовой прокатки проволочного стана с двух и трех валковыми калибрами.

Для компьютерного моделирования процесса прокатки на сортовых и проволочных станах была использована матричная модель формоизменения металла в калибрах, структурно-матричный подход при моделировании сортовых станов, а также методики расчета показателей формоизменения и энергосиловых параметров, основанные на использовании принципа наименьшего сопротивления.

Для описания калибровки и прокатываемых сечений, а также для расчета площадей и других параметров очага деформации с учетом элементов формы калибров в данной работе использован векторно-матричный подход, разработанный О. Н. Тулуповым и А.Б. Моллером и широко используемый для решения задач совершенствования калибровки валков. Этот подход позволяет универсальным способом представлять различные калибры в виде однотипных числовых массивов – матриц.

Принцип наименьшего сопротивления был интегрирован в структурно-матричную модель по методикам Тулупова О.Н. и Кинзина Д.И. Данная интеграция позволила в полной мере использовать достоинства матричной модели, и вместе с тем дополнить ее рядом важных физических принципов, которые делают ее максимально приближенной к реальному процессу прокатки. Это дает возможность применять структурно-матричную модель не только как дополнение к уже существующим методикам и для совершенствования существующих технологических процессов, но и как самостоятельную методику для разработки технологии сортовой прокатки.

Однако для практического применения указанных подходов было необходимо дополнить модель характеристиками реологических свойств металла. При этом стояла задача с одной стороны обеспечить быстрый и надежный расчет при сохранении универсальности алгоритма, а с другой – обеспечить в расчете соответствие реологических свойств металла фактическим условиям для различных технологических ситуаций.

С этой целью в работе для широкого сортамента сталей были определены значения базового сопротивления металла пластическому деформированию и по методике Л.В. Андреюка установлены реологические свойства (зависимости отражающие влияние температуры прокатки, скорости и степени деформации на сопротивление деформации).

Для решения температурной задачи была проведена серия экспериментов и расчетов и установлены зависимости, характеризующие температуру в клетях проволочных станов, как с двух- так и с трехвалковыми калибрами.

Целью разработки компьютерной модели являлась получение инструмента, позволяющего оперативно моделировать процесс формоизменения на стане с двух- или трехвалковыми калибрами с возможностью расчета формоизменения и энергосиловых параметров и учета технологических условий прокатки (износ калибров в процессе прокатки, температуры прокатки, марки прокатываемой стали и т.д.) (рис.4).

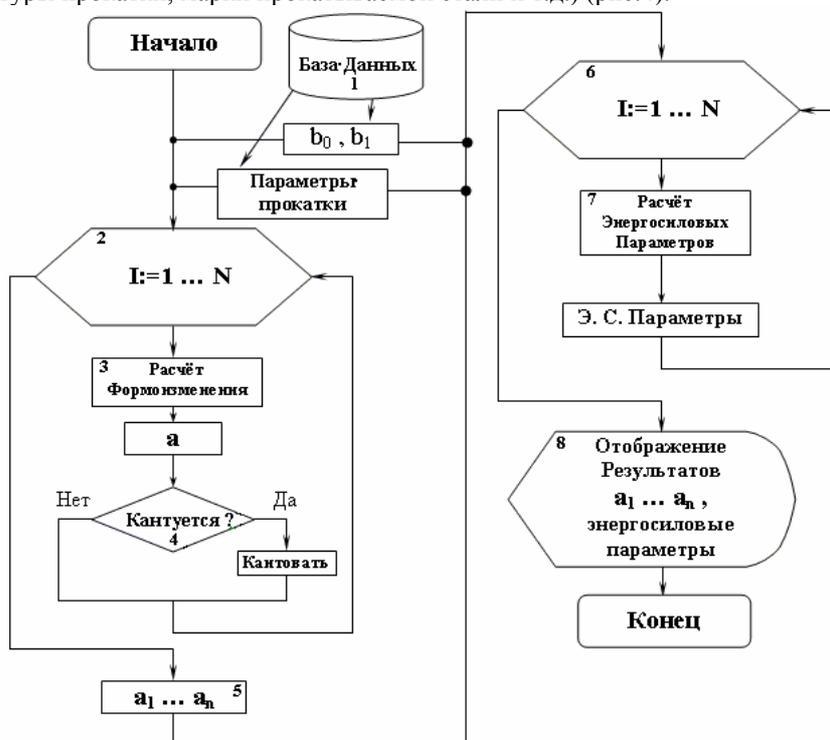


Рис. 4. Базовый алгоритм расчёта формоизменения и энергосиловых параметров проволочного стана с двух и трёх валковыми системами калибров

Обозначения блоков расчётов:

1. база данных содержащая исходные значения векторного описания профиля заготовки, калибров клетей прокатного стана и технологические параметры прокатки;

2. цикл расчёта формоизменения металла в калибрах всех клетей исследуемого стана (рис. 5);

3. расчёт формоизменения на основе структурно-матричного подхода;

4. проверка кантовки раската, относительно рабочих валков, перед следующей клетью;

5. массив, описывающий профили сечений выходящего из клетки металла;

6. вычисление энергосиловых параметров для каждой из клеток стана с учётом формоизменения, а также технологических параметров прокатки (рис. 6);

7. вывод полученных результатов на экран, файл или печать.

Модель позволяет осуществлять «сквозное» моделирование формоизменения (рис. 5) во всех прокатных клетях при изменении технологических параметров и рассчитывать энергосиловые параметры прокатки (рис. 6).

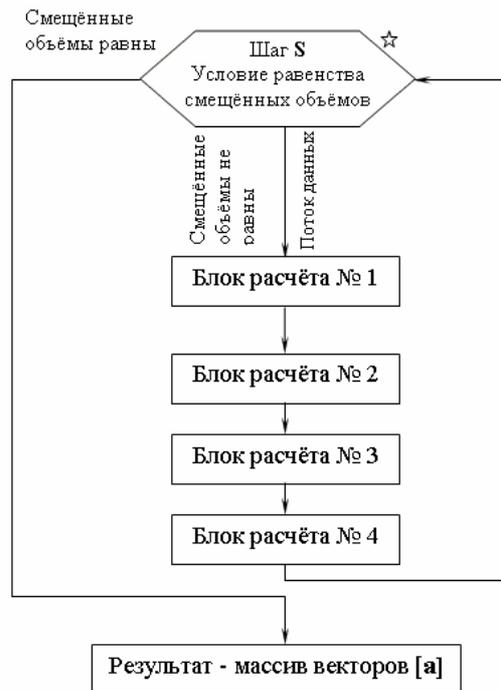


Рис. 5. Алгоритм расчёта формоизменения

Обозначения блоков расчётов:

1. перевод полярных координат в декартовы и создание вспомогательных массивов векторов;
  2. определение формы очага деформации с учётом влияния вычисленных: коэффициента вытяжки, радиуса валка, размеров площади контакта металла с валками, температуры и предела текучести;
  3. учёт влияния продольных сил (подпора и натяжения);
  4. вычисление площади поперечного сечения исходного и конечного профилей с учётом влияния коэффициентов трения, стеснения и Лоде, при анализе смещённого объёма;
- ☆ цикл с пост условием проверки приближенного равенства смещённых объёмов. Точность данного расчёта зависит от шага S.

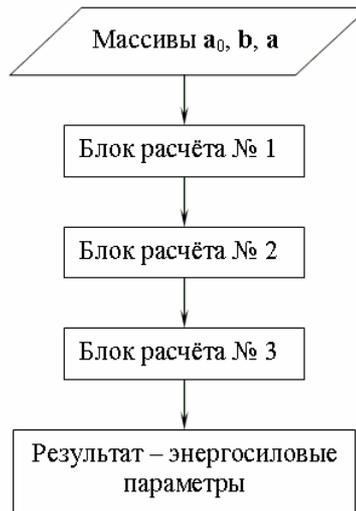


Рис. 6. Алгоритм расчёта энергосиловых параметров

Обозначения блоков расчётов:

1. обработка входящих массивов (перевод в декартовую систему координат) и подготовка вспомогательных переменных;
2. блок расчёта: угла контакта металла с валком, площади поперечного сечения и скорости деформации по слоям;
3. вычисление усилия прокатки и среднего вертикального напряжения с учётом влияния обжатия, сопротивления металла пластической деформации, продольных сил, коэффициентов Лоде, трения и дополнительных коэффициентов.

Программное обеспечение позволяет вычислить величину заполнения калибров и соответствующую нагрузку на оборудование всех клеток рассматриваемого стана, при заданных параметрах прокатки за короткий промежуток времени (процессор Pentium 4, время расчёта 1,5 сек). Таким образом, после проведения расчётов, появляется возможность довольно достоверно прогнозировать получаемые геометрические и энергетические показатели производимого проката.

Разработанный пакет “Derag” имеет удобный интерфейс для быстрой подготовки и отладки баз данных (рис. 7).

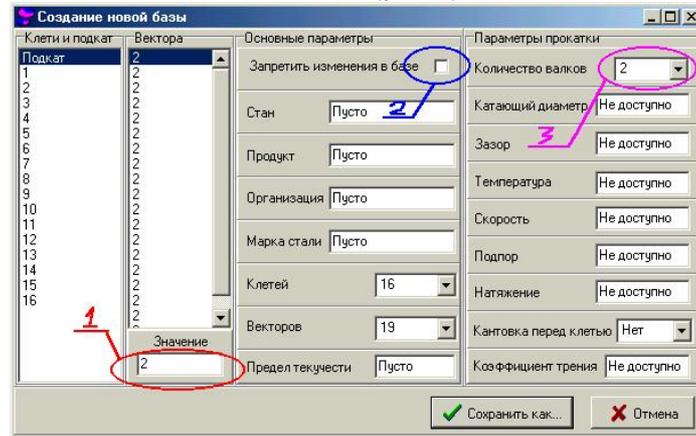


Рис. 7. Окно создания базы данных

Существует возможность, наряду с графическим отображением результатов (рис. 8), сохранить итоги расчёта (рис. 9) в файл формата WEB страницы, что упрощает дальнейшую работу с ними.

Имеется ряд ограничений при использовании данного продукта. Количество описывающих контур калибра векторов должно быть не меньше 10 и не более 200. Система калибров должна состоять из двух или трёх прокатных валков, при этом векторное описание должно согласовываться с осями симметрии.

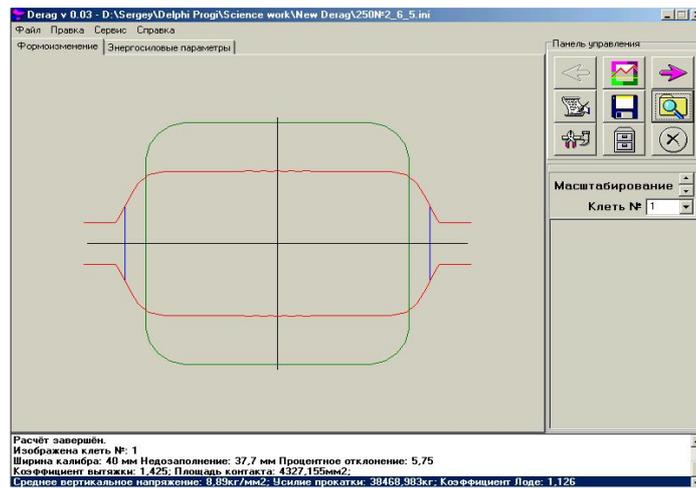


Рис.8. Результаты расчёта формоизменения

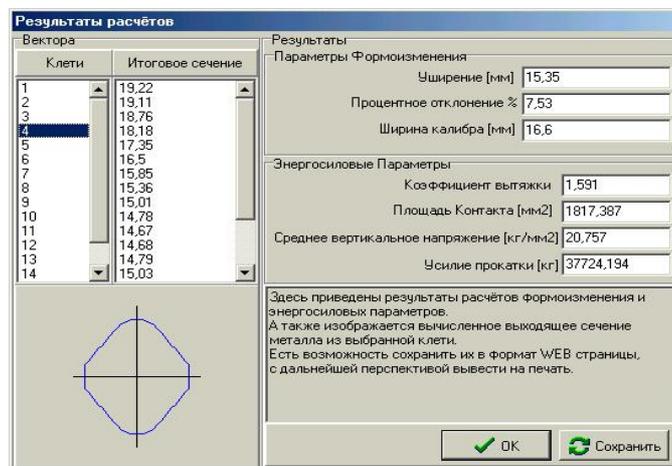


Рис.9. Окно результатов расчёта

С целью сравнительного анализа разработанной модели были рассмотрены результаты расчётов вытяжки в черновых клетях мелкосортного стана 250 №2 ОАО “ММК”. Для сравнения взята математическая модель Тулупова О. Н. – Моллера А. Б. (адаптивная настройка непрерывных групп сортовых станов, программное средство SORT), и требования указанные в ТИ 101-П-СЦ-12-99 ОАО “ММК”. Результаты приведены ниже:

Сравнение результатов расчета

Вытяжка						
Модель	Черновые клетки стана 250 №2 ОАО «ММК»					
	1	2	3	4	5	6
Предлагаемая (Derag)	1,43	1,51	1,45	1,49	1,38	1,43
SORT	1,45	1,48	1,48	1,55	1,32	1,61
ТИ 101-П-СЦ-12-99	1,5	1,5	1,52	1,45	1,55	1,42

Проведённое сравнение позволяет утверждать, что разработанная модель позволяет прогнозировать технологические параметры формоизменения.

В работе представлена методика и приемы эффективного использования разработанного программного продукта «Derag».

**В третьей главе** поставлены и решены задачи моделирования прокатки катанки на проволочных станах при расширении марочного и размерного сортамента.

С целью определения диапазона технологических возможностей для стана 300 №3 был проведен анализ перспектив потребления катанки из различных марок стали на рынке России и внешних рынках. В ходе анализа установлено, что наиболее ликвидной является катанка из качественных углеродистых и легированных марок стали для производства метизов, а также, из качественных низкоуглеродистых сталей, в частности, для производства электродов и сварочной проволоки.

На основании анализа зарубежных данных материалов установлено, что фирма «KOCKS» активно развивает оборудование и технологию прокатки в блоках с трехвалковыми калибрами по причине высокой устойчивости процесса прокатки трехвалковых блоков к прокатке сталей с различными механическими свойствами, включая труднодеформируемые.

На основании анализа исследований Полякова М.Г. и др. установлено, что схема деформации в трехвалковых калибрах отличается всесторонним обжатием, что увеличивает пластические свойства деформируемого металла в очаге деформации.

Исходя из этого требовалась проверка технологических возможностей стана 300 №3 ОАО «ММК» с точки зрения прокатки катанки из стали широкого марочного сортамента.

По разработанной математической модели прокатки металла, применимой как для двухвалковых, так и для трехвалковых калибров проведены расчеты усилия прокатки и моментов прокатки по всем профилям из действующего и планируемого сортамента размеров катанки для двадцати одной марки стали. Для расчетов были выбраны стали, имеющие различное сопротивление пластической деформации - от низкоуглеродистых (СтЗсп) до легированных (Р18).

Расчет осуществлялся для каждой клетки при прокатке каждого профилеразмера из каждой марки стали (из выбранных). В результате были рассмотрены 147 технологических режимов. Примеры расчетных значений усилий прокатки представлены на рисунках 11-13 соответственно. Для удобства восприятия информации (на графике присутствовали 21 кривая) расчетные данные были объединены в группы: первая группа – стали с базовым сопротивлением пластической деформации до 90 МПа кг/мм<sup>2</sup> (СтЗсп, 10, 15, 20, 25, 40, 45, 08кп); вторая группа - стали с базовым сопротивлением пластической деформации от 90 МПа до 150 МПа (14ГН, 15ХСНД, 30ХГСА, 40Х, 45Х, 45ХН, 60С2, У12, ШХ15, 12Х18Н9Т); третья группа - стали с базовым сопротивлением пластической деформации более 150 МПа (Р18, ХН78Г).

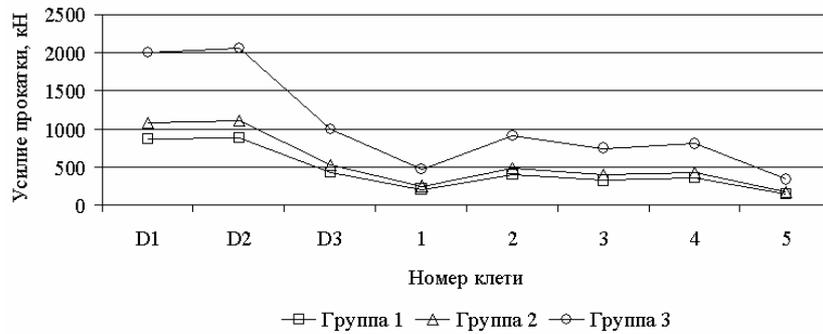


Рис. 11. Усилия прокатки по клетям блоков «45» и «500» для круглого профиля диаметром 5,5 мм

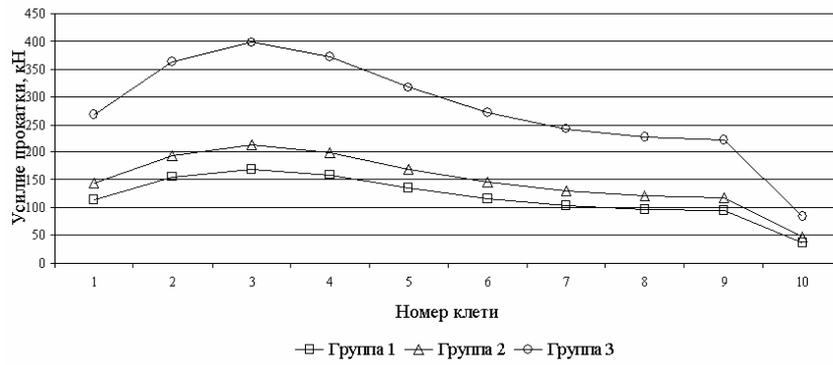


Рис. 12. Усилия прокатки по клетям блока «370» для круглого профиля диаметром 5,5 мм

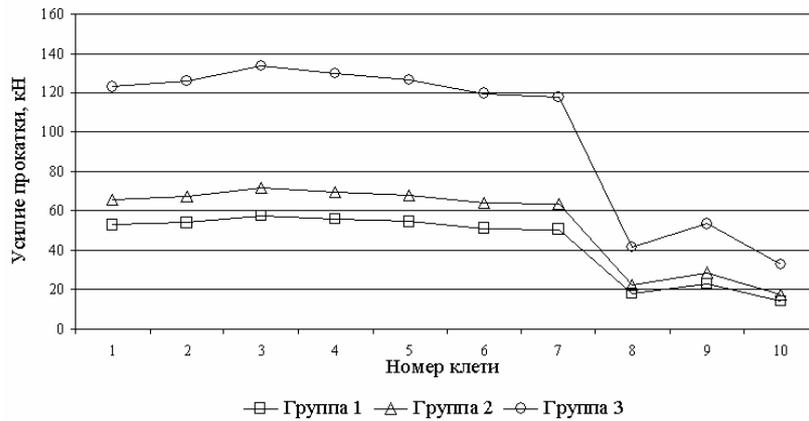


Рис. 13. Усилия прокатки по клетям блока «290» для круглого профиля диаметром 5,5 мм

В процессе расчета оценивалась возможность обеспечения указанных параметров на стане. По рассчитанным данным была проведена оценка допустимых нагрузок на оборудование клетей при прокатке всех исследованных марок стали и всех профилей по условию превышения максимально допустимых значений усилия прокатки. Сравнение расчетных нагрузок с допустимыми сделано на основании данных документации фирмы «KOCKS» о допустимых моментах в клетях блоков. Например, для блока «370» в клетях 1-5 допустимый момент составляет 30кН·м, а в клетях 6-10 – 20кН·м; все расчетные значения не превышают этот предел,

за исключением превышения значений по некоторым клетям блока «370» для схемы прокатки катанки диаметром 7 мм при прокатке сталей 3-й группы и при прокатке катанки диаметрами 8, 10, 16 мм из наиболее труднодеформируемой из рассмотренных сталей – ХН78Т. Это объясняется использованием меньшего числа клеток в перечисленных схемах прокатки и может быть устранено путем введения большего числа клеток и коррекцией схемы калибровки. Для всех остальных клеток блоков «45», «500» и «290» превышений допустимых значений не отмечено. Сделано заключение о технологической возможности прокатки профилей из широкого марочного сортамента сталей, включая труднодеформируемые.

На основании результатов сделан вывод о возможности прокатки всех профилей из сортамента стана (из всех исследованных сталей). Кроме этого даны предложения о включении в сортамент стана профилей промежуточных диаметров, которые также технологически возможно прокатывать не только из углеродистых, но и из специальных сталей.

Существующая ранее калибровка была разработана фирмой «KOCKS» – производителем оборудования стана. Данная калибровка обеспечивает прокатку круглых профилей диаметрами 5,5, 6, 6,5, 7, 8, 9, 10, 12 и 16 мм. В данном диапазоне размеров, согласно ГОСТ 2590, есть еще круглые профили диаметрами 11, 13, 14 и 15 мм, прокатка которых является возможной, так как эти размеры находятся между минимальным и максимальным диаметром кругов прокатываемых на стане. В связи с этим были разработаны калибровки для этих дополнительных профилей.

Схема калибровки для новых кругов была выбрана такой же, как и для существующих, то есть круглый чистовой калибр, предчистовой – стрелчатый треугольник, остальные калибры треугольные. Дальнейший расчет калибровки сводился к определению размеров калибров, которые обеспечивают получение необходимого профиля, соблюдение константы прокатки, а также рациональную переточку и схему движения прокатных шайб.

Разработаны технологические рекомендации, заключающиеся в определении скоростного режима и схемы движения прокатных шайб, что позволило эффективно использовать полученные результаты обслуживающему персоналу стана при освоении новых профилей.

Основной задачей моделирования технологических режимов прокатки катанки на стане 250 №2 ОАО «ММК» являлось получение арматуры малых диаметров и катанки-подката для производства холоднодеформированной арматуры. Для обеспечения производства этих видов продукции необходимо получить при ускоренном охлаждении (термоупрочнении) раската после прохождения линии ускоренного охлаждения темпера-

туры 600-650 °С. Использование только линии водяного охлаждения в условиях данного стана не позволяет обеспечить необходимые механические свойства прокатываемой арматуры. Технический результат был достигнут тем, что охлаждение раската начинают не в линии ускоренного охлаждения, а за 10-й клетью при помощи форсунки, установленной на выходе из валков.

Последствием использования подстуживания является повышение нагрузок на оборудование и понижение способности металла деформироваться в продольном направлении, то есть снижается вытяжка, повышается усилие прокатки и уширение металла в калибре. При понижении температуры металла происходит переполнение калибров, и на полосе образуются заусенцы.

Поэтому было необходимо скорректировать параметры калибровки таким образом, чтобы при промежуточном подстуживании обеспечить заданные геометрические размеры профиля в клетях 11-16, исключив образование поверхностных дефектов, вызванных переполнением калибров.

Было установлено, что наибольшее влияние на образование продольных дефектов оказывают геометрические параметры профиля в клетях 8 и 10 (равноосные квадратные калибры шириной 14,3 и 11,9 мм соответственно). При моделировании были подготовлены варианты данных с измененными элементами указанных калибров при помощи AutoCAD в векторном виде. При этом ширина калибров варьировалась в пределах 14,3...16,5 мм для 8-й и 11,9...12,5 мм для 10-й клетей.

При помощи разработанного программного продукта “Derag” была проведена серия комплексных расчетов геометрических и энергосиловых параметров деформации в клетях стана 250 №2. Всего было исследовано 16 вариантов измененной схемы прокатки с различным сочетанием ширины калибров 8-й и 10-й клетей. В результате было установлено, что увеличение ширины калибров в указанных клетях частично влияет на конечное формоизменение в чистовых калибрах, однако позволяет уменьшить вероятность образования продольных дефектов (переполнения) в клетях 8 – 11.

На основании результатов моделирования был выбран рациональный вариант корректировки калибров стана 250 №2, которая изображена на рисунке 14.

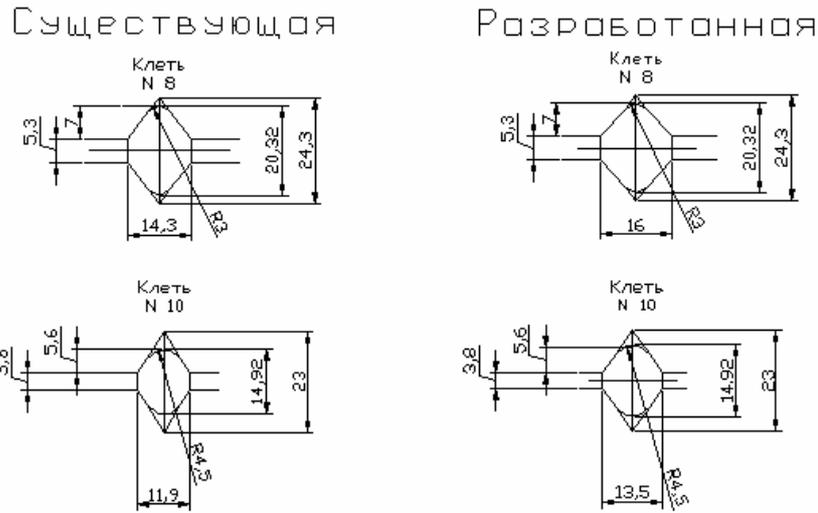


Рис. 14. Калибровка 8 и 10 клетей проволочного стана 250№2

**Четвертая глава посвящена разработке** методик и программного обеспечения, обеспечивающего рациональное использование калибровки валков на проволочном стане с трехвалковыми калибрами, а именно использование валковых шайб.

На основании данных технической документации стана KOCKS, связанной с эксплуатацией валковых шайб, систематизированы основные эксплуатационные режимы для блоков "500", "370", "290", изучены схемы перехода шайб по клетям блоков в процессе эксплуатации, рассмотрены и сформированы основные циклы обращения шайбы при переточках и перемещении по позициям блоков.

На базе структурно-матричного подхода получены матрицы, характеризующие износ валка, путем вычитания компонентов матрицы [a] из компонентов  $b_f$ , характеризующих контур изношенного калибра

$$a_n = b_f - a.$$

Полученный вектор  $a_n$  отображает как величину износа в середине ручья, так и его распределение по контуру.

Известные данные о характеристиках износа калибров переведены в матричный вид путем преобразования профиля изношенного калибра в соответствующий ему вектор. Была предложена и реализована методика представления, учета и анализа износа при подготовке данных для модели управления при которой находится усредненная величина поправки к ра-

диус-вектору, описывающему конкретную точку калибра для выбранного периода настройки и формируется база данных по количеству прокатанного металла с соответствующими компонентами матриц, характеризующих износ.

Далее в рассматриваемой адаптивной модели определение матрицы износа базируется на использовании предложенного А. Б. Моллером показателя единичного износа для каждого радиус-вектора. Формула для расчета показателя  $U_{in}$  имеет следующий вид:

$$U_{in} = \frac{1}{S} \left( \sum_{s=2}^g \frac{b_{ins} - b_{ins-1}}{p_s - p_{s-1}} \right),$$

где  $S$  - количество изношенных и измеренных контуров рассматриваемого калибра;

$p$  - тоннаж, соответствующий контуру изношенного калибра;

$i$  – номер радиус вектора, согласно матричной модели калибра  $n$ .

Используя показатель единичного износа по всему периоду эксплуатации шайбы, можно путем его умножения на количество прокатанных тонн определять величину радиус-вектора в любой промежуток времени.

Используя программное обеспечение, описанное в главе 2 можно рассчитывать формоизменение металла в калибре в текущий момент времени; (с учетом фактического, т.е. автоматически рассчитанного на данный момент времени, износа), определять степень износа валковых шайб по количеству прокатанных тонн металла; моделировать возможные варианты применения частично изношенной шайбы в различных рабочих позициях в зависимости от режима прокатки и текущего размера шайб.

Последовательности перевалки шайб в каждом из блоков формализованы в виде технологических карт. Принцип постепенного перехода шайбы из позиции в позицию в рамках группы клеток основывается на обеспечении максимальной эффективности использования прокатной шайбы (минимальные отходы при перешлифовке).

Прокатные шайбы – дорогостоящее сменное оборудование, поэтому в целях экономии необходимо наиболее эффективно управлять их расходом. Существенными факторами, влияющими на увеличение срока службы валков, являются: сортамент проката, планирование производства, а также материал изготовления валков. Благодаря тому, что клетки являются взаимозаменяемыми, валки могут быть перешлифованы при износе калибра на больший калибр, и быть установлены в группе на одну клетку против хода прокатки (на одну позицию). В случае адекватной программы прокатки валки могут быть перешлифованы на следующую большую калибровку без необходимости извлечения валков из клеток.

Если производство планируется и управляется с учетом этого фактора, то расход валков может быть соответственно сокращен.

На основании разработанной модели в диссертации предложен комплекс таблиц и система рекомендаций по перевалке клетей и валковых шайб для стана 300 №3 ОАО «ММК», а также создана база данных и программное обеспечение для реализации этих задач.

Указанные результаты были использованы при эксплуатации стана для рационального использования калибров, планирования программ прокатки и освоения нового сортамента.

### **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

1. Усовершенствованы элементы структурно-матричного моделирования технологических процессов прокатки. Произведена оценка влияния температуры на формоизменение при использовании промежуточного охлаждения. Это позволило повысить качество геометрии сортовой продукции и реализовать его в виде программных средств.

2. Разработан программный продукт для расчёта формоизменения и энергосиловых параметров сортовых станов с двух и трёх валковыми системами калибров. Разработанная математическая модель является дополнением к инструменту управления процессом прокатки на этапах проектирования и производства.

3. Проведён анализ технологических режимов прокатки новых видов продукции на проволочных станах ОАО «ММК» и предоставлен комплекс рекомендаций по следующим профилям: для условий стана 300 №3 – катанка диаметрами 5,5; 6,0; 6,5; 7,0; 8,0 мм и круглая сталь диаметрами 10,0 и 16,0 мм широкого марочного сортамента.

4. На основании результатов моделирования установлена техническая возможность и рассчитаны технологические режимы прокатки катанки широкого марочного сортамента сталей на стане 300 №3 ОАО «ММК».

5. На основании моделирования зависимости формоизменения от снижения температуры в межклетевых промежутках усовершенствован режим обжатий при прокатке термоупрочненной арматуры диаметром 6,5 мм на стане 250 №2 ОАО «ММК».

6. Разработана методика прогнозирования формоизменения металла при прокатке в трехвалковых калибрах с учетом износа, с целью определения размеров получаемого профиля. Реализован принцип построения карт переходов валковых шайб по позициям клетей и профилерам, в зависимости от «пригодного» диаметра шайбы, ее материала изготовления и типа применяемой клетки. Разработано программное обеспечение и

базы данных по эксплуатации валковых шайб с возможностью оценки вариантов дальнейшей их эксплуатации.

**Основное содержание диссертации опубликовано в работах:**

1. Тулупов О.Н., Моллер А.Б., Колясов Д.В. и др. Новые решения в моделировании процессов сортовой прокатки на основе структурно-матричного подхода и его приложений // Производство проката. 2004. №7. с. 19-26. **(рецензируемое издание).**
2. Колясов Д.В., Сивак Б.А., Райков Ю.Н., Тулупов О.Н., Левандовский С.А. Разработка программного обеспечения для моделирования процесса сортовой прокатки // Оборудование. Технический альманах. №2. – 2006 - С.36-39.
3. Салганик В.М., Тулупов Д.Н., Колясов Д.В. Экспериментальное исследование особенностей конечной деформации при сортовой прокатке с натяжением // Моделирование и развитие процессов обработки металлов давлением: Сборник научных трудов аспирантов и соискателей. Магнитогорск: МГТУ, 2000, с- 152-160.
4. Тулупов Д.Н., Колясов Д.В. Определение уширения в калибрах при сортовой прокатке с натяжением // Новые материалы: получение и технологии обработки: Сб. тезисов докладов Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. Красноярск, КГАЦМиЗ, 2001, с- 318.
5. Тулупов О.Н., Моллер А.Б., Колясов Д.В., Кинзин Д.И., Симаков Ю.В., Величкин В.В. Использование структурно-матричной модели для прогнозирования энергозатрат при прокатке катанки из различных марок стали на проволочном стане с трёхвалковыми калибрами // Современная металлургия начала нового тысячелетия. Сб. науч. тр. Липецк, ЛГТУ, 2001. С. 81-83.
6. Тулупов О.Н., Колясов Д.В., Моллер А.Б., Кинзин Д.И., Завьялов А.А., Симаков Ю.В. Моделирование технологических возможностей для условий стана 300№3 ОАО "ММК" и рационального использования валковых шайб при прокатке катанки из широкого марочного сортамента сталей // Моделирование и развитие процессов ОМД: Межрегиональный сборник научных трудов. Магнитогорск, МГТУ, 2002 г., с 208-213
7. Колясов Д.В. Опыт моделирования технологических режимов прокатки катанки с целью расширения сортамента проволочного стана // Моделирование и развитие технологических процессов: Сб. науч. тр.- Магнитогорск: МГТУ, 2004.-С.58-62.

8. Свидетельство 2006620136 РФ. База данных технологических параметров сортовых станов // О.Н. Тулупов, А.Б. Моллер, Д.В. Колясов и др. 18.05.2006. **(рецензируемое издание)**.
9. Райков Ю.Н., Сивак Б.А., Колясов Д.В. Совершенствование прокатки катанки // Заготовительные производства в машиностроении. 2006 г. № 10. с 32-35.