

ГОСУДАРСТВЕННОЕ ВЫСШЕЕ УЧЕБНОЕ ЗАВЕДЕНИЕ
«ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

ПРИХОДЬКО ИГОРЬ ЮРЬЕВИЧ

УДК 621.771.23/24:681.5.015:002.2

**РАЗВИТИЕ И РЕАЛИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИИ, МЕТОДОВ РАСЧЁТА
И УПРАВЛЕНИЯ ПАРАМЕТРАМИ ПРОЦЕССОВ ПРОИЗВОДСТВА
ХОЛОДНОКАТАНЫХ ПОЛОС С ВЫСОКОЙ ПЛОСКОСТНОСТЬЮ
И КАЧЕСТВЕННОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ**

Специальность 05.03.05 - “Процессы и машины обработки давлением”

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание научной степени
доктора технических наук

Донецк - 2010

Диссертацией является рукопись.

Работа выполнена в Институте чёрной металлургии им. З.И.Некрасова
Национальной Академии наук Украины.

Научный консультант - доктор технических наук, профессор,
член-корреспондент НАН Украины
МАЗУР Валерий Леонидович,
Физико-технологический институт металлов и сплавов
НАНУ (г. Киев), главный научный сотрудник.

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
ВАСИЛЕВ Янаки Димитров,
Национальная металлургическая Академия Украины
(г. Днепропетровск), профессор кафедры «Обработка
металлов давлением»;

доктор технических наук, профессор
НИКОЛАЕВ Виктор Александрович,
Запорожская государственная инженерная академия
(г. Запорожье), профессор кафедры «Обработка
металлов давлением»;

доктор технических наук, профессор
КАПЛАНОВ Василий Ильич,
Приазовский государственный технический универси-
тет (г. Мариуполь), заведующий кафедрой «Обработка
металлов давлением».

Защита состоится 03 июня 2010 г. в 12 часов на заседании специализированного
учёного совета Д 11.052.01 Государственного высшего учебного заведения «Донецкий
национальный технический университет» по адресу: 83001, г. Донецк, ул. Артёма, 58,
I учебный корпус, малый актовй зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Государственного высшего
учебного заведения «Донецкий национальный технический университет» по адресу:
83001, г. Донецк, ул. Артёма, 58, II учебный корпус.

Автореферат разослан 29 апреля 2010 г.

Учёный секретарь
специализированного учёного совета
Д 11.052.01, д.т.н., проф.



Яковченко А.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Качество металлопродукции и, в частности, холоднокатаного полосового проката является решающим фактором конкурентоспособности продукции многих отраслей промышленности. В свою очередь качество продукции определяется уровнем технологии. Повышение качества достигается, в основном, путём расширения круга задач, решаемых автоматическими системами управления, и разработкой оборудования с новыми возможностями управления качеством. Стабильность характеристик качества металлопродукции во многом определяется стабильностью технологических процессов её производства. С этой точки зрения перспективен анализ их вероятностных аспектов.

Интенсификация скоростных режимов холодной прокатки и уменьшение средней толщины холоднокатаных полос в сортаменте большинства станов усилили влияние динамического и температурного факторов процесса на показатели качества готовых полос. Основными причинами, препятствующими достижению высокой скорости процесса, являются: нестабильность технологической смазки в очаге деформации (ОД) вследствие увеличения тепловыделения и вибрации, возникающие при высокой скорости. Теоретические и прикладные исследования, направленные на разработку эффективных систем предупреждения и контроля вибраций на станах, являются актуальными.

Важным фактором улучшения качества холоднокатаных полос в крупногабаритных рулонах является формирование в них оптимального температурно-напряжённого состояния. В противном случае появляются дефекты поверхности полос, что не позволяет в полной мере использовать степень непрерывности процессов, снижает их производительность и увеличивает отсортировку готовой продукции.

Для повышения конкурентоспособности листопрокатной продукции необходимо освоение новых её видов с повышенными требованиями к качеству, а также снижение энергозатрат. Для создания технологий, обеспечивающих достижение этой цели, требуются новые знания о характере, совокупности и степени влияния факторов, действующих в условиях интенсивных процессов холодной прокатки полос.

Следовательно, выявление закономерностей процессов прокатки и дрессировки, их научное обоснование, определение возможностей улучшения макро- и микрогеометрических характеристик полос, разработка методов расчёта параметров и оптимизации процессов, алгоритмов и систем автоматического управления, эффективных технологических приёмов, создание новых устройств и оборудования представляют собой актуальную проблему, имеющую важное научное и практическое значение.

Связь работы с научными программами, планами, темами. Работа выполнялась в соответствии с тематическими планами Института чёрной металлургии (ИЧМ) Министерства чёрной металлургии СССР (до 1991 г.), соответствовавшими Координационным планам научно-технического направления "Производство горячекатаной и холоднокатаной тонколистовой стали", хозяйственным договорам ИЧМ НАН Украины (с 1992 г.), заказам Министерства промышленности и промышленной политики Украины (1994 – 1997, 2004–2006 гг.), а также в рамках бюджетной и по-

исковой тематики ИЧМ НАН Украины. Номера государственной регистрации наиболее важных НИР, в рамках которых выполнялась диссертация, и выполнением которых автор руководил или был ответственным исполнителем: UA01014315P, 0105U006846, 0106U003787, 0105U006846, 0107U001699, 0107U001716, 0104U005552.

Цель и задачи исследования. Развитие научных основ и реализация методов управления плоскостностью, состоянием поверхности, толщиной полос, совершенствование технологических процессов производства холоднокатаных полос на высокоскоростных станах на основе установленных новых закономерностей влияния на указанные показатели качества основных факторов процессов, температурных и динамических эффектов.

Для достижения поставленной цели сформулированы и решены следующие научно-технические задачи:

1. Развитие, реализация в специализированных средствах компьютерного моделирования методов расчёта и оптимизации процессов холодной прокатки, смотки в рулоны, отжига и дрессировки тонколистовой стали.
2. Развитие теории и технологии управления поперечным профилем и плоскостностью полос на современных листопрокатных станах.
3. Разработка и внедрение рекомендаций, повышающих стабильность процесса и снижающих обрывность полос при непрерывной холодной прокатке.
4. Определение условий реализации процесса холодной прокатки тонких полос с минимальными силой и мощностью.
5. Установление комплекса факторов, закономерностей их изменения и влияния на условия слипания и проскальзывания витков полосы в плотно смотанных рулонах, разработка и внедрение технологии, предупреждающей обусловленные этим дефекты поверхности.
6. Разработка методологии научно-технического аудита листопрокатных станов.
7. Разработка рекомендаций, методов и промышленных систем управления, обеспечивающих высокую точность по толщине, плоскостности, улучшенное состояние поверхности полос, снижение вибраций и повышение производительности станов в условиях высокоскоростной непрерывной холодной прокатки и дрессировки.

Объект исследования. Технологические процессы и оборудование для массового производства тонких холоднокатаных полос на высокоскоростных промышленных станах.

Предмет исследования. Механизмы формирования напряженно-деформированного состояния металла и показателей его качества (точности по толщине, плоскостности и состояния поверхности) в процессах холодной прокатки и дрессировки полос с учётом температурных, динамических эффектов и факторов стабильности.

Методы исследования. Теоретические исследования основывались на классических положениях теории упругости, пластичности, прокатки, инженерных, численных подходах, методах решения оптимизационных задач и математической статистики. Экспериментальные исследования состояли в физическом моделировании в лабораторных и промышленных условиях с использованием методов термогра-

фии, тензометрии, пластометрии, определения топографии охлаждения валков, оценки геометрических характеристик, в том числе плоскостности, состояния поверхности, механических свойств и других показателей качества холоднокатаных полос.

Научная новизна полученных результатов. Научную новизну диссертации составляют следующие её положения.

1. Впервые теоретически и экспериментально установлено влияние температуры холоднокатаных полос при смотке на напряжённое состояние рулонов и формирование дефектов поверхности полос.

При монотонном или резком *возрастании* температуры полосы (на 30-50 °С) в ходе смотки внешний более горячий слой витков при остывании рулона сжимает более холодный внутренний, а более холодный внутренний, разогреваясь от горячего внешнего, расширяется, при этом формируется пик сжимающих межвитковых давлений в переходном слое витков (где происходило изменение температуры) и повышенные давления в смежных слоях, соизмеримых по толщине. Вследствие слипания витков в переходной температурной области формируются дефекты поверхности полос (такие как линии перегиба полос при размотке рулонов после копакового отжига).

При монотонном или резком *уменьшении* температуры полосы на 30-50 °С при смотке внутренний более горячий слой витков при остывании рулона и усреднении в нём температуры сжимается, а следующий за ним слой витков, разогреваясь от внутреннего, расширяется, при этом в переходной области формируется распушенный слой витков. Это приводит к проскальзыванию, царапанию поверхности полос в переходном слое витков и осевому смещению слоёв витков при размотке рулона.

2. Впервые установлен механизм процесса термоправки полос.

Неравномерное распределение температуры по ширине полос в диапазоне до 10-30 °С при холодной прокатке вызывает после их остывания изменение плоскостности. Более горячие продольные «волокна» после усреднения температуры по ширине полосы сокращаются в длине, а более холодные – удлиняются. Это делает возможной термоправку полосы с достижением ею плоской формы за счёт получения требуемого распределения целевой кривой плоскостности, температуры t по ширине полосы путём зонного охлаждения валков и полосы в зависимости от плоскостности, которая на стане контролируется в режиме реального времени. Установлена следующая зависимость плоскостности II [IU] от температуры и профиля наружной образующей рулона по ширине полосы: $II_i = \{ \Delta R_i / R + \alpha (t_{cp} - t_i) \} \times 10^5$ (где ΔR_i – отклонение на i -том участке по ширине полосы текущего радиуса рулона от среднего R ; α – коэффициент температурного расширения материала полосы, °С⁻¹), которая положена в основу термоправки полос после их полного остывания.

На основе температурного эффекта и эффекта искажения результатов измерения плоскостности полос под натяжением (вследствие неравномерности радиуса по ширине рулона) разработан новый метод управления плоскостностью полос, основанный на одновременном контроле их плоскостности, температуры и профиля наружной образующей рулонов по мере смотки.

3. Впервые для условий холодной прокатки полос со смазкой предложена

зависимость теплового состояния валков и полосы от критерия, характеризующего полноту контакта валков и полосы, который равен отношению площади участков очага деформации с граничным трением к общей площади очага.

На основе теории прокатки с учётом гидродинамических эффектов смазки, коэффициент смешанного (полужидкостного) трения представляет собой сумму произведений коэффициента граничного и жидкостного трения на доли площади соответствующих участков в очаге деформации. Поэтому различие в клетях стана значений коэффициента трения при прокатке характеризует и различие полноты контакта. А различие полноты контакта определяет различие условий теплообмена валков и полосы в очаге деформации как отдельный фактор. Её увеличение вызывает уменьшение температуры полосы и увеличение температуры валков на выходе из очага деформации вследствие интенсификации теплообмена с рабочими валками, имеющими более низкую температуру. При изменении скорости прокатки конкурирующее опережающее влияние на температуру полосы оказывает коэффициент трения.

Установленные закономерности использованы для обеспечения заданного теплового напора смазочно-охлаждающей жидкости (СОЖ), величина которого (5-15°C) обеспечивает эффективное управление плоскостностью полос селективным охлаждением валков.

4. Впервые установлена закономерность лавинообразного усиления вибраций непрерывного стана холодной прокатки полос при условии, что за 1-3 с до этого имеет место устойчивая взаимосвязь колебаний опорных валков в 2-х – 4-х последних смежных клетях в диапазоне частот 90-150 Гц, при которой вертикальные колебания верхнего и нижнего комплектов валков каждой клетки находятся в противофазе и, одновременно, в смежных клетях фазы колебаний валков совпадают. Упреждающее в течение 0,15-0,35 секунд уменьшение скорости прокатки на 10-15 м/мин блокирует лавинообразное развитие вибрации стана, в результате чего прокатка осуществляется на повышенной средней скорости. Уменьшение скорости прокатки в клетях с наибольшей интенсивностью вибрации и, соответственно, снижение заднего натяжения на 5-10 Н/мм² также способствует блокированию усиления вибрации. Отличием разработанного нового метода надёжного обнаружения опасных в динамическом отношении состояний непрерывного стана холодной прокатки является контроль: уровней спектра вибрации в вычисленном диапазоне частот (как фактора интенсивности вибрации), тесноты связей колебаний валков в смежных клетях (как характерной закономерности их лавинообразного развития), баланса горизонтальных сил, действующих на рабочие валки (как фактора устойчивого их горизонтального положения без раскрытия зазоров), значений нейтрального угла и опережения в очаге деформации (как фактора стабильности процесса).

Выявленные закономерности и установленные на основании результатов экспериментов ограничения обеспечивают высокую (достигающую 95%) вероятность идентификации начала фазы лавинообразного развития вибраций непрерывного стана за 1–3 секунд до этого момента.

5. Усовершенствован метод оптимизации деформационного режима многопроходной прокатки при заданных начальной и конечной толщинах полосы.

Метод обеспечивает решение задачи поиска такого деформационного режима прокатки, при котором достигаются заданные значения оптимизируемых параметров процесса в отдельных клетях (проходах) и заданные соотношения между этими параметрами в других клетях (проходах) с учётом ограничений. После каждой предварительной коррекции одновременно всех частных обжатий в функции оптимизируемых параметров процесса производится процедура их уточнения, обеспечивающая сохранение соотношения между степенями деформации и, одновременно, общую суммарную степень деформации. Метод отличается тем, что не предполагает множества предварительных расчётов для отыскания оптимального решения. С его использованием могут быть обеспечены заданные соотношения по проходам между силой, моментом, мощностью, удельной энергоёмкостью процесса многопроходной прокатки, температурой или станочной выпуклостью валков по клетям, между величинами относительной поперечной разнотолщинности полосы при прокатке, коэффициента трения, тангенциальных сил на рабочих валках, интенсивности вибрации клеток и других параметров процессов непрерывной или многопроходной реверсивной прокатки, монотонно зависящих от степени деформации полосы. Число итерационных циклов (3–7) расчёта параметров процесса не зависит от числа клеток стана (пропусков полосы).

Использование метода обеспечивает возможность оперативного управления стратегией многопроходной прокатки, повышения стабильности процесса прокатки, плоскостности прокатываемых полос, производительности стана, снижения вибраций стана, уменьшения энергоёмкости технологического процесса.

6. Усовершенствован метод расчёта промежуточных толщин и межклетевых натяжений по параметрам настройки непрерывного стана, а также получила дальнейшее развитие детерминированно-вероятностная математическая модель процесса непрерывной холодной прокатки полос.

Решение обратной задачи с двумя неизвестными параметрами по клетям (толщины и межклетевые натяжения) реализовано в виде последовательного решения прямой задачи (определение по клетям позиций нажимных устройств и скоростей валков). При этом искомые изначально неизвестные параметры решения обратной задачи одновременно целенаправленно корректируются (с использованием полученных математических выражений) с достижением соответствия этих параметров (с заданной точностью) результатам решения прямой задачи. Такой метод позволяет использовать алгоритмы расчёта энергосиловых и кинематических параметров очага деформации любой сложности.

Математическая модель процесса непрерывной холодной прокатки позволяет осуществлять вероятностные оценки изменения энергосиловых параметров процесса, а также толщины прокатываемых полос на различных этапах прокатки (разгон стана, установившийся процесс, замедление стана). Она учитывает как комплекс ранее учтённых факторов, имеющих стохастическую природу (исходную разнотолщинность, шероховатость поверхности подката, химический состав и параметры структуры стали, температуру и концентрацию СОЖ), биение валковых систем клеток, так и дополнительные факторы: на каждом шаге моделирования процесса, где случайные аргументы изменяются в заданных диапазонах и с заданными законами распределения, используется детерминированный метод расчёта и реализации

управляющих воздействий, моделирующий автоматическое управление толщиной и натяжением полосы с учётом временного и транспортного запаздывания.

Использование математической модели позволяет определять параметры стабильности процесса прокатки, параметры проектируемого оборудования станов, а также определять режимы прокатки, при которых управление толщиной, натяжением и плоскостностью полос наиболее эффективно.

7. Получили дальнейшее развитие представления о раскатываемости локальных утолщений поперечного профиля подката в процессе непрерывной холодной прокатки тонких полос.

Показано, что в зависимости от конечной толщины полосы и силовых условий холодной прокатки локальная неплоскостность бывает двух различных видов – местная волнистость и «жёлоб». Отличие указанных видов локальной неплоскостности заключается в ортогональных направлениях потери устойчивости полосой и в механизмах образования дефектов. Установлено, что при холодной прокатке полосы на участках, имеющих значительные ($>0,3-0,5\%$ от толщины H) по величине локальные утолщения поперечного профиля подката ($H < 2,5$ мм) наблюдается пониженная вытяжка и локальные растягивающие напряжения, а не сжимающие, как в случае образования местной волнистости. Эффект связан с формированием на наружной образующей сматываемого рулона локального возвышения. Действие локально приложенной по ширине полосы растягивающей силы (вследствие повышенной скорости движения полосы на этом участке) распространяется по ширине натянутой плоской холоднокатаной полосы. В точках на плоскости полосы (между выходом из очага деформации и наружной образующей рулона с локальным утолщением), находящихся вне линии действия результирующей силы возникают поперечные составляющие, стремящиеся вызвать потерю устойчивости полосы вдоль её ширины (складки или «жёлоб»). В случае местной волнистости средняя сила прокатки в клетях стана должна быть увеличена, а в случае образования «жёлоба» – уменьшена.

Целевая кривая неравномерности вытяжек на участке локального утолщения должна при прокатке полос перед отжигом в колпаковых печах повторять текущее отношение профиля наружной образующей рулона (с формируемым локальным возвышением) к его радиусу, благодаря чему устраняется участок с максимумом межвитковых давлений в месте локального утолщения, снижается вероятность местного слипания витков при отжиге и образования линий перегиба при размотке рулонов. А при прокатке с отжигом в агрегатах непрерывного действия – повторять этот профиль с обратным знаком, чтобы скомпенсировать искажение измеренной на этом участке плоскостности полосы, вызванное неравномерностью скорости и натяжения плоской полосы по ширине при смотке рулона.

8. Впервые выявлены закономерности реализации процесса холодной прокатки тонких полос: с минимальной силой или с минимальными энергозатратами.

Установлено, что в условиях, приближающихся к пределу выкатываемости при холодной прокатке, решающую роль играет не только длина упругодеформированной дуги контакта валков и полосы, но и протяженность участка относительно постоянной толщины, где минимальны энергия деформации и сил трения, а также положение этого участка относительно прямой, соединяющей центры вращения вал-

ков. При уменьшении толщины и повышении напряжения течения материала прокатываемой полосы с увеличением длины дуги контакта в срединной области ОД формируется и расширяется участок с относительно постоянной толщиной полосы. Участок, становясь всё более симметричным относительно линии, соединяющей центры вращения валков, приводит к обратной зависимости силы и момента прокатки от начальной толщины прокатываемых полос, в результате чего при возрастании силы прокатки момент и мощность уменьшаются. При непрерывной холодной прокатке полос с одинаковыми межклетевыми удельными натяжениями имеет место обратная связь средней силы и суммарной мощности прокатки.

Выявленные закономерности позволили целенаправленно определять наименее энергоёмкие деформационные режимы многопроходной холодной прокатки при заданных величинах натяжений, режим которых, с учётом ограничений, подчинён повышению скорости прокатки и уменьшению обрывности полос.

Практическое значение полученных результатов.

1. Разработана и внедрена в условиях дрессировочного стана ДС-1 НЛМК новая система автоматического регулирования плоскостности (САРП) полос с использованием бесконтактных методов измерения плоскостности и температуры полосы, позволившая достичь эффекта термоправки и улучшить плоскостность готовых полос на 10–30%.

2. Разработана и внедрена в условиях СБП 2030 НЛМК новая автоматическая система контроля вибраций (СКВ) и управления скоростью стана холодной прокатки, позволившая повысить среднюю скорость прокатки тонких (до 0,7 мм) полос на 8–11% без развития вибраций стана и возникновения повышенной высокочастотной продольной разнотолщинности полос.

3. Разработанные методы и алгоритмы расчёта параметров, оптимизации процессов производства холоднокатаных полос реализованы в специализированных компьютерных системах, представляющих собой эффективный инструмент для исследований и использующихся при проведении научно-технических аудитов технологии процессов производства тонколистового проката, решении актуальных практических задач, в целях обучения и повышения квалификации инженерного персонала машиностроительных предприятий и предприятий листопрокатного комплекса. Компьютерные системы защищены тремя свидетельствами о регистрации авторского права на произведение. Системы используются на предприятиях Украины, России, Германии, в частности, НЛМК, НКМЗ, ИЧМ, Зундвиг.

4. С использованием разработанных компьютерных систем определены или уточнены рациональные значения принципиальных параметров оборудования модернизируемых и новых станов, включая реверсивный стан для прокатки высококремнистой электротехнической стали НЛМК (максимальный крутящий момент и мощность привода, диаметр опорных валков, максимальная скорость прокатки).

5. На основе разработанных компьютерных систем и методов экспериментальных исследований разработана методология научно-технических аудитов листопрокатных станов. В результате проведения научно-технических аудитов систем охлаждения валков ШСГП 2000 (ММК), 2000 (НЛМК) и подачи СОЖ в клетки НСХП 1400 (НЛМК) разработаны предложения по повышению их эффективности, которые реализованы в промышленных условиях.

6. На основе результатов теоретических и экспериментальных исследований разработаны и внедрены в производственную практику новые технические решения, технологические и организационные мероприятия, обеспечившие повышение плоскостности полос, стабильности процесса прокатки и производительности станов. В их числе:

- новые методы и способы создания условий, при которых управление плоскостностью прокатываемых полос наиболее эффективно (патенты Российской Федерации (РФ) 2190488, 2190489, 2212962, 2212963, 2225272); повышена эффективность регулирования плоскостности полос селективным охлаждением валков, за счёт чего были освоены новые виды продукции;

- новые способы холодной прокатки полос в многоклетевом стане, обеспечившие увеличение средней скорости прокатки без возникновения резонансной вибрации стана (патенты РФ 2212289 и 2338609);

- новое устройство регулирования плоскостности полос (патент РФ 2211102), позволившее повысить точность регулирования и плоскостность готовых полос;

- способ производства рулонного полосового проката (патент РФ 2236917), обеспечивший за счёт снижения температуры полос при смотке их в рулоны термическую разгрузку рулонов в колпаковой печи и снижение вероятности сваривания витков в ходе отжига.

Технологические разработки обеспечены соответствующей нормативно-технической документацией, в соответствии с которой разработанные решения могут быть использованы на листопрокатных комплексах.

Личный вклад соискателя. В результатах исследований, материалы которых опубликованы в соавторстве, автором диссертации осуществлены: постановка научно-технических задач; разработка методов их решения; получение данных, их анализ и обобщение результатов; планирование и анализ экспериментов; участие в разработке нормативно-технической документации и внедрении разработок в практику. При создании специализированных компьютерных систем и систем управления качеством листопрокатной продукции автор формулировал проблему и задачи, руководил построением структуры, отработкой предложенных им методов и разработанных алгоритмов.

Апробация результатов диссертации. Основные положения работы доложены, обсуждены и одобрены на международной конференции «Металлургическое, прокатное и кузнечно-прессовое оборудование производства АО НКМЗ. Перспективы развития» (г. Краматорск, 1996 г.); VI международной научно-технической конференции "Машиностроение и техносфера на рубеже XXI века" (г. Севастополь, 1999 г.); 3-м, 4-м, 5-м, 6-м и 7-м Конгрессах прокатчиков в 1999 г. (г. Липецк), 2001 (г. Магнитогорск), 2003 (г. Череповец), 2005 (г. Липецк), 2007 (г. Москва) годах, соответственно; международной научно-технической конференции «Пластическая деформация металлов» (Днепропетровск, 2000 г.); международной научно-технической конференции «Теория и практика производства проката» (г. Липецк, 2001 г.); научно-технических конференциях «Новые достижения и перспективы развития процессов и машин обработки давлением» (г. Краматорск, 2001, 2003 г.); научно-технической конференции "Материалы и покрытия в экстремальных услови-

ях: исследования, применение, экологически чистые технологии производства и утилизации изделий» (г. Кацивели-Понизовка, 2002 г.); международной научно-технической конференции «Пластическая деформация металлов», посвящённой 100-летию со дня рождения академика А.П.Чекмарёва (г. Днепропетровск, 2002 г.); международной научно-технической конференции «Теория и практика производства проката» (г. Липецк, 2005 г.); тринадцатой ежегодной международной конференции «Современные методы и средства неразрушающего контроля и технической диагностики» (г. Ялта, 2005 г.); международной научно-технической конференции «Научные новости. Современные проблемы металлургии. Пластическая деформация металлов» (г. Днепропетровск, 2005 г.); научно-технической конференции «Вибрация машин. Измерение, снижение, защита» (г. Донецк, 2005 г.); международной научно-технической конференции «Вибрации в прокатных станах» (г. Лондон, 2006 г.); международной научно-практической конференции «ИНТЕХМЕТ-2008. Инновационные достижения и решения для совершенствования технологических процессов на предприятиях горно-металлургического комплекса» (г. Санкт-Петербург, 2008 г.); технических советах исследовательского и испытательного Института Восточно-Словацкого металлургического комбината (г. Кошице, Словакия, 1997 г.), проектно-конструкторских и производственных предприятий «Фрёлинг» (г. Ольпе, Германия, 2001 г.), «Даниели» (г. Бутрио, Италия, 2001 г.), «Лехлер» (г. Метзинген, Германия, 2004 г.), «Зундвиг» (г. Хемер, Германия, 2007 г.); объединённом семинаре кафедры обработки металлов давлением Национальной металлургической Академии Украины, и прокатных отделов Института чёрной металлургии НАН Украины (г. Днепропетровск, 2007 г.), расширенном научном семинаре кафедры «Автоматизированные металлургические машины и оборудование» Донбасской государственной машиностроительной Академии (г. Краматорск, 2007 г.), расширенном научном семинаре кафедры «Обработка металлов давлением» Донецкого национального технического университета (г. Донецк, 2010 г.).

Публикации. По теме диссертации опубликована 71 научная работа. Основные положения диссертационной работы изложены в 63-х публикациях, в том числе 1-й монографии, 22-х статьях научных журналов, 4-х статьях сборников научных трудов, 13-ти статьях сборников трудов научно-технических конференций и конгрессов, 8-ми авторских свидетельствах СССР, 9-ти патентах РФ. Без соавторов опубликована одна статья. В специальных научных изданиях, включённых в перечень ВАК Украины, опубликовано 28 статей.

Структура диссертации. Диссертация состоит из введения, семи разделов, выводов, списка использованных источников из 281 наименований и 6 приложений. Полный объём работы составляет 460 страниц, общий объём – 300 страниц. Приложения – отдельная книга на 313 страницах. В разделах диссертации присутствует 170 рисунков и 35 таблиц, размещённых на отдельных 131 страницах.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первом разделе «Технологии, оборудование и методы расчета процессов производства холоднокатаных полос (состояние вопроса), выбор направления исследования» изложен анализ существующих технологий, оборудования и методов

расчётов параметров процессов производства холоднокатаных полос, сформулированы направления и задачи исследования. В существующих методах измерения и расчёта параметров процессов, технологиях массового производства холоднокатаных полос на высокоскоростных станах не учитываются в полной мере закономерности влияния температурных и динамических эффектов, факторов стабильности на показатели качества полос. Поэтому основное направление исследования состоит в изучении: влияния *температурных эффектов* в процессах производства холоднокатаных полос при формировании плоскостности и состояния поверхности холоднокатаного полосового проката; влияния *стабильности* и *динамики* высокоскоростных процессов производства холоднокатаных полос на их плоскостность, состояние поверхности и производительность. На основе выполненного анализа сформулированы задачи и пути развития технологии, методов расчёта и управления параметрами процессов производства холоднокатаных полос с высокой плоскостностью и качественной поверхностью.

Во втором разделе «Развитие методов расчёта и оптимизации параметров процессов производства холоднокатаных полос» представлены следующие элементы развития методов расчёта.

Напряжение течения металла при холодной прокатке. Для определения напряжения течения сталей и сплавов используются различные установки, позволяющие моделировать условия деформации полос на действующих листопрокатных станах в широком диапазоне изменения степени, температуры и скорости деформации (например, пластометр и установка Гопкинсона). Различная дискретизация получаемых данных вызывает затруднения их объединения в единый массив. Статистическая обработка «размывает» экспериментальные данные, имеющиеся в ограниченном количестве и носящие немонокотонный характер. В частности, изменение реологических свойств электротехнических сталей высоких групп легирования в условиях холодной прокатки полос имеет весьма сложный характер. Описать эти закономерности функциями определенного вида невозможно. Каждый из коэффициентов, выражающий влияние одного фактора, зависит от двух других.

Если представить себе параллелепипед, на осях которого с определённой дискретностью (соответствующей условиям испытаний) отложены значения степени, температуры и скорости деформации, а в узлах полученной «решётки» записаны экспериментальные значения напряжения течения, то организованные подобным образом экспериментальные данные будут являться основой модели. Значения напряжения течения в любом небольшом объёме между плоскостями, проходящими через узлы с экспериментальными данными, могут быть найдены методами трёхмерной линейной, квадратичной или кубической интерполяции. Схема вычисления значения функции в точке (e_x, U_x, T_x) по 8-ми соседним с ней точкам реализована последовательностью 7-ми интерполяций.

Экспериментальные данные, полученные на различных установках при различных условиях испытаний необходимо объединять, но в связи с различной дискретизацией переменных при объединении таких данных в один массив в области определения функции $s = f(e, U, T)$ возникает множество точек, в которых значения функции неизвестны. В большинстве случаев функция в этих точках может быть восстановлена по уже известным значениям. Интерполируя по каждой паре точек, можно по-

лучить различные значения функции, поэтому окончательный выбор пары для вычисления функции производится, исходя из условий: 1) значение функции в обеих точках должно быть известно; 2) для каждой пары вычисляется параметр K ; 3) для пары $(s_0; s_1)$ $K = |T_1 - T_0| / T_K$, для пары $(s_0; s_1)$ $K = |\varepsilon_3 - \varepsilon_2| / \varepsilon_n$, для пары $(s_4; s_5)$ $K = |U_5 - U_4| / U_m$. Выбирается пара, для которой значение K минимально.

Коэффициент трения при холодной прокатке. Предложен метод и реализован алгоритм расчёта коэффициента трения при холодной прокатке полос на основе известных компонентов эмпирических зависимостей влияния факторов: типа эмульсола, скорости прокатки, вязкости эмульсола, концентрации, температуры и захватываемости эмульсии, зависящей от угла гидродинамического клина, шероховатости поверхности валков, полосы, давления во входном сечении ОД.

На основе предложенной В.Л.Мазуром и В.И.Тимошенко теории прокатки, учитывающей гидродинамические эффекты смазки, построен универсальный алгоритм расчёта коэффициента полужидкостного трения в условиях прокатки с малыми и большими обжатиями в гладких и шероховатых валках. Оценены закономерности изменения коэффициента трения в зависимости от определяющих факторов прокатки – скорости, степени деформации, шероховатости поверхности валков и полосы, температуры и вязкости смазки. Решение предусматривает одновременный расчёт шероховатости поверхности прокатываемой полосы и определение соотношения участков граничного и жидкостного трения в ОД, как фактора полноты контакта валков и полосы в ОД.

Температура полосы в ОД. Усовершенствован метод расчёта температуры полосы в ОД. Помимо работы деформации и работы сил контактного трения дополнительно учтена теплопередача от полосы к валкам через слой смазки, являющийся термическим сопротивлением в ОД. Установлено влияние полноты контакта валков и полосы в ОД на температуру рабочих валков и полосы. При изменении скорости прокатки конкурирующее опережающее (по сравнению с фактором полноты контакта) влияние на температуру полосы оказывает коэффициент трения. Установлено также влияние некруглой формы дуги контакта в ОД на температуру полосы.

Температура валков. Установлено, что использование известных методов расчёта среднемассовой температуры шероховатых рабочих валков при холодной прокатке с малыми обжатиями в последней клетке непрерывного стана вызывает существенные погрешности. Влияние шероховатости поверхности валков на их температуру проявляется в одновременном комплексном влиянии тепловыделения от работы сил трения, теплообмена между полосой и валками, а также охлаждения валков эмульсией. Теоретически установлено и экспериментально подтверждено влияние полноты контакта полосы и валков в ОД на коэффициент контактного теплообмена как отдельного фактора. Её увеличение вызывает уменьшение температуры полосы и увеличение температуры валков на выходе из ОД вследствие интенсификации теплообмена с рабочими валками, имеющими более низкую температуру. Уточнённая таким образом модель теплообмена в ОД при прочих известных условиях, а также уточнённые фактические параметры и топография орошения валков, обеспечили повышение точности расчётов температуры валков от ± 3 – 5 до $\pm 2,5$ °С во всех клетях непрерывного стана. Необходимая поправка к коэффициенту контактного теплообмена описывается отношением площади участков граничного трения к общей пло-

щади контакта со смешанным трением. Это отношение приближённо соответствует отношению коэффициента полужидкостного трения к коэффициенту граничного трения при прокатке.

Модели процессов прокатки. Усовершенствована и реализована в компьютерной системе численная математическая модель процесса холодной прокатки, учитывающая некруглую форму дуги контакта, эллиптические зоны упругого сжатия на входе и восстановления валков и полосы на выходе из ОД. Отличительными признаками разработанного метода расчёта контактных напряжений является решение основного дифференциального уравнения прокатки в продольных напряжениях, что справедливо как для зоны пластической деформации, так и упругих или упруго-пластических зон в ОД. Для расчёта крутящего момента на валках определяются составляющие момента сил, действующих в ОД относительно мгновенного центра вращения валков, который расположен на дуге контакта валка и полосы в точке пересечения этой дуги с прямой линией, соединяющей фактические центры вращения рабочих валков. Такой подход позволяет учесть влияние некруглой формы дуги контакта с участком практически неизменной толщины полосы в ОД. Этот, а также энергетический подход позволяют моделировать известный эффект снижения момента прокатки с уменьшением толщины полосы в условиях возрастания силы прокатки. Исходя из энергетического подхода к определению момента прокатки: $M = R \cdot h \cdot S(E_d + E_T + E_H)$, где R – радиус валка, h – толщина полосы, S – опережение, E_d, E_T, E_H – соответственно, энергия деформации, сил трения и результирующей сил натяжения. При прочих равных условиях формирование в ОД зоны практически неизменной толщины полосы снижает интегральную энергию сил трения. Это позволяет определять условия эффективного осуществления процесса прокатки с минимальным моментом, который является фактором удельной энергоёмкости процесса.

Разработан метод и алгоритм адаптации модели процесса холодной прокатки (по параметрам: сила, момент прокатки и опережение S), отличающиеся этапами выполнения процедуры. На первом этапе определяют поправку к среднему давлению в ОД, а на втором этапе применяют первую поправку и определяют поправки к коэффициенту приложения равнодействующей силы в ОД, а также к величине $(0,1+S)$. Преимущества использования адаптируемого параметра $(0,1+S)$ состоят в обеспечении возможности адаптации величины опережения в случаях его отрицательных значений или близких к нулю (по сравнению с параметром S), а также в повышении точности адаптации в сравнении с параметром $(1+S)$.

Разработан новый метод и алгоритм расчёта промежуточных толщин и межклетевых натяжений по параметрам настройки непрерывного стана. Идея метода состоит в определении таких величин толщины и натяжения, при которых расчётные параметры настройки непрерывного стана совпадают с заданными. В качестве начальных условий приняты натяжения на входе в стан и выходе из него, секундный расход металла и параметры настройки стана. Метод предполагает использование нелинейных моделей и алгоритмов расчёта параметров процесса прокатки, включая численные модели.

Алгоритм предусматривает этапы расчёта.

1. Исходя из известных начальной толщины и скорости полосы на входе в стан, задают ориентировочные толщины полосы на выходе каждой i -той клетки, межклетевых

тевые натяжения и затем рассчитывают силовые и кинематические параметры процесса прокатки в каждой клетке, а также соответствующие параметры настройки стана (внутренний итерационный контур).

2. Сравнивают рассчитанные параметры настройки стана с заданными и корректируют при первоначально заданных межклетевых натяжениях толщины полосы и пропускные способности клеток в функции отношения заданной скорости валков v_z к расчётной v_p

$$vh_i = vh'_i \left[1 + k_y \left(\frac{v_{zi}}{v_{pi}} - 1 \right) \right], \quad (1)$$

где vh'_i — пропускная способность на предыдущем шаге (первоначально равна заданной, одинаковой для всех клеток); k_y — коэффициент релаксации (в первом приближении принимается равным 0,5). При этом степень деформации корректируют по зависимости

$$e_i = e'_i [1 + k_y (k_{ci} - 1)], \quad (2)$$

где e'_i — степень деформации на предыдущем шаге; k_{ci} — коэффициент коррекции, который для первой клетки определяют по формуле

$$k_{c1} = \frac{Z_{p1} + P_{\max 1} / C_{k1}}{Z_{z1} + P_{\max 1} / C_{k1}}, \quad (3)$$

а для последующих клеток по формуле

$$k_{ci} = 0,4 \frac{v_{zi}}{v_{pi}} + 0,6 \left(\frac{Z_{pi} + P_{\max i} / C_{ki}}{Z_{zi} + P_{\max i} / C_{ki}} \right), \quad (4)$$

где Z_p , Z_z — соответственно, расчётная и заданная позиции нажимных устройств; $P_{\max}$ — максимальная сила прокатки в клетке; C_k — модуль жёсткости клетки. Вычисления второго этапа составляют средний итерационный контур, в который вложен первый.

3. Сравнивают рассчитанные секундные расходы по клеткам. Для более быстрого и точного решения на заключительном этапе определяют влияние заднего натяжения на толщину полосы на выходе и, соответственно, секундный расход проката. Приращение заднего межклетевого натяжения ΔT для выравнивания секундных расходов (скорость полосы при известной толщине на входе в стан является также величиной искомой) вычисляют по зависимости

$$\Delta T_i = - \left[1 + k_t \left[\frac{\Delta p_{cpi}}{a_i - g_i / a_i} - 1 \right] \right], \quad (5)$$

где k_t — коэффициент усиления ($k_t = 0,5-1,5$); α_i — угол контакта валков с полосой; γ_i — нейтральный угол; Δp_{cpi} — требуемое приращение среднего контактного давления в ОД i -той клетки, вычисляемое по зависимости

$$\Delta p_{cpi} = C_{ki} \frac{vh_{i-1} - vh_i}{v_{i-1} B l_{di}}, \quad (6)$$

где vh_{i-1} , vh_i — секундный расход металла на выходе, соответственно, из предыдущей и исследуемой клетки; v_{i-1} — скорость полосы на входе в клетку; B — ширина полосы; l_d — длина дуги контакта в i -той клетке.

Вычисления третьего этапа составляют внешний итерационный контур, включающий первые два. Вычисления прекращаются по критерию равенства секундных

расходов металла по клетям с заданной точностью. Задача не имеет решения, если в ходе расчёта межклетевые натяжения либо превысили предел прочности полосы, либо получились отрицательными.

Разработана детерминировано-вероятностная математическая модель процесса непрерывной холодной прокатки, учитывающая наиболее значимые факторы неустойчивости процесса прокатки (разнотолщинность полосы на входе, разноширинность, изменение химического состава стали и, как следствие, изменение напряжения её течения, условия трения при прокатке, как функцию концентрации, температуры эмульсии и шероховатости поверхности подката, биение валков), а также транспортное запаздывание и закономерности работы системы автоматического регулирования толщины и натяжения полосы. Модель позволяет прогнозировать параметры неустойчивости процесса непрерывной прокатки, отрабатывать алгоритмы управления процессом, а также прогнозировать разнотолщинность прокатываемых полос.

Алгоритм оптимизации режима обжатий. Алгоритм разработан на основе итерационного метода оптимизации режима обжатий, согласно заданному коэффициентом k_i распределению нагрузок (или иных параметров отклика) по клетям стана Q_i . При корректировке обжатий в клетях стана (пропусках полосы) предположили пропорциональную зависимость нагрузки от степени деформации.

Начиная со 2-го шага итерационного процесса, новое распределение обжатий e_i'' в каждой i -той клетки рассчитывается по формуле

$$e_i'' = e_i' \left[1 + k_i'' k_p \left(\frac{Q_{cp} k_i}{Q_i} - 1 \right) \right], \quad (7)$$

где k_p – коэффициент релаксации $k_p = 0,5-1$; Q_{cp} – условная средняя нагрузка по стану.

Для учёта возможного обратного влияния обжатия на нагрузку предусмотрена возможность смены знака приращения степени деформации по результатам предыдущего итерационного шага

$$k_i'' = \text{sign}\{(Q_i'' - Q_i')(e_i'' - e_i')\}. \quad (8)$$

С помощью полученных соотношений ориентировочные обжатия e_{oi}'' пересчитывают в фактические e_i'' и проводят очередной расчёт нагрузок Q_i'' . На основании полученных значений Q_i'' снова корректируют обжатия с использованием метода коррекции обжатий.

Итерационная процедура оптимизации повторяется до тех пор, пока не будет достигнута заданная точность критерия оптимальности. Число итераций (до 3-х – 7-ми) практически не зависит от числа клетей стана (пропусков полосы). Для реверсивной прокатки реализован алгоритм расчёта деформационно-скоростного режима прокатки, обеспечивающего одновременно заданные соотношения силы, а также мощности прокатки за счёт независимой коррекции скорости прокатки в пропусках.

Разработанный алгоритм позволяет одновременно с оптимизацией деформационного режима непрерывной прокатки и режима натяжений обеспечить прокатку с заданными опережениями или достичь гарантированного поджатия подушек рабочих валков в одном направлении. Эти подзадачи оптимизации направлены на опре-

деление условий осуществления процесса без пробуксовок валков и возникновения вибраций стана.

Разработаны принципы, метод и алгоритм совмещённого регулирования толщины, натяжения и плоскостности полосы воздействием на скорости вращения, позицию нажимного устройства, осевую сдвижку и принудительный изгиб валков. Алгоритм многопараметрической оптимизации, реализованный методом численного приближенного решения систем нелинейных уравнений, учитывает ограничения, связанные со скоростными возможностями исполнительных устройств, а также их текущее положение.

Температурное и напряжённно-деформированное состояние рулонов. Разработан метод расчёта изменения температурного поля и напряженно-деформированного состояния рулонов при их смотке, снятии с барабана моталки и остывании. Метод учитывает условия неизотермического состояния рулонов в процессе смотки полос, а также взаимного влияния межвитковых давлений и термических сопротивлений на поле напряжений в рулонах при их последующем отжиге.

Представляя перемещение поверхности i -го слоя как сумму перемещений под воздействием наружного и внутреннего контактных давлений u_{iq} , а также температурных напряжений u_{iT} , вычисляют перемещение слоя $u_i = u_{iq} + u_{iT}$. Определение u_{iq} сведено к решению известной задачи о напряженно-деформированном состоянии цилиндра, находящегося под действием внутреннего и внешнего давления (задачи Ламе). Для определения u_{iT} использовали решение задачи о плоском напряженно-деформированном состоянии цилиндра при переменном температурном поле

$$u_{i,T}^B = \frac{2a_T r_{i-1} r_{i-1}}{1 - r_{i-1}^2} \int_{r_{i-1}}^1 (T - T_0) r dr ; \quad u_{i,T}^H = \frac{2a_T r_i}{1 - r_{i-1}^2} \int_{r_{i-1}}^1 (T - T_0) r dr . \quad (9)$$

Здесь $r_{i-1} = r_{i-1} / r_i$, T_0 – начальный уровень температуры в i -ом слое. С учётом полученного выражения для u_{iT}

$$u_{iq}^H = u_{i+1,q}^B - d_i(q) + a_T r_i (T_{i+1} - T_i), i = N-1, \quad (10)$$

где T_i – среднее значение температуры по толщине i -го слоя.

Подставляя в (10) $u_{i+1,q}^B$ и $u_{i,q}^H$, определенные с помощью решения задачи Ламе, получили

$$A_i q_{i+1} - D_i q_i + B_i q_{i-1} = F_i, i=2, N, \quad (11)$$

где

$$A_i = \frac{2 r_{i-1}^2}{r_i - r_{i-1}}, \quad D_i = \frac{r_{i-1}^2 + r_i^2}{r_i - r_{i-1}} + \frac{r_i^2 + r_{i+1}^2}{r_{i+1} - r_i}, \quad B_i = \frac{2 r_{i+1}^2}{r_{i+1} - r_i}, \quad (12)$$

$$F_i = \frac{E d_i}{r_i} - a_T E (T_{i-1} - T_i), \quad i = 2, N.$$

Для определения изменения напряжений ($Dq_{ij} = q_{ij-1} - q_{ij}$), вызванного намоткой j -го витка в рулоне, состоящем из $(j-1)$ -го витков, получили систему уравнений типа (11), записанную для Dq_{ij-1} , Dq_{ij} , Dq_{ij+1} при $F_i=0$.

На внешней границе рулона из условия равновесия верхнего j -того витка

$$\Delta q_{i-1,j} = s_j^* h_j / r_{j-1}. \quad (13)$$

При построении пространственной модели рассматривали виток как элемент цилиндрической оболочки и воспользовались теорией тонких оболочек.

На основании экспериментальных данных получена новая эмпирическая зависимость удельной силы разъединения витков полосы после нагрева рулона во время отжига

$$q=[1-0,67(Ra-0,5)]6,258 \cdot 10^{-7} p^{0,6368} \tau^{0,4642} \exp(0,01847 \cdot T), \quad (14)$$

где p – межвитковое давление, Н/мм²; T – максимальная температура нагрева, °С; τ – продолжительность действия температуры T , мин; Ra – шероховатость поверхности полосы, мкм. Диапазоны параметров, в которых применима зависимость: $p=0-50$ Н/мм²; $\tau=0-180$ мин; $T=600-730$ °С; $Ra=0,5-1,7$ мкм.

На основании опытных данных классифицировали уровни удельных сил разъединения q , соответствующих безопасному уровню ($q < 3$), схватыванию ($q = 3-9$), слипанию ($q = 9-15$) и свариванию ($q > 15$ Н/мм²), замкнув, тем самым, задачу математической формализации критериев. Разработан и реализован алгоритм расчёта, учитывающий динамику изменения указанных факторов при колпаковом отжиге.

Методы расчёта и управления тепловым профилем валков селективной подачи эмульсии. В основу метода расчёта положены двумерное уравнение теплопроводности и плоская задача теории упругости. Граничные условия приняты из условий симметрии, неразрывности поля температур и тепловых потоков по тангенциальной координате, а также охлаждения торцов валка на воздухе. Температурное поле валка условно разделено на две составляющие: осесимметричное поле температур в основной массе валка и циклическую составляющую от поверхности вглубь валка на 1 – 3 % его радиуса. Для расчета температурного поля определяли усреднённый по образующей валка коэффициент теплопередачи от валка к СОЖ ($\alpha_{\text{СОЖ}}$) и коэффициент теплопередачи от валка к воздуху $\alpha_{\text{в}}$. Для получения значений тепловых потоков и температуры поверхностного слоя решали контактную задачу теплообмена полосы и поверхностного слоя валка. При этом предполагали, что глубина проникновения тепла в валок за время прохождения образующей бочки валка ОД незначительна. Расчёт интегральных коэффициентов теплоотдачи в зонах активного охлаждения осуществляли на основе известных решений в зависимости от плотности орошения, скорости истечения жидкости из форсунок (или давления в коллекторе), расстояния от форсунок до валка, а также в зависимости от разности температуры охладителя и поверхности валка.

Решение дифференциальных уравнений с граничными и начальными условиями для определения поля температуры T в разностной сетке сечения валка находили методом конечных разностей. Использовали математический аппарат теории плоской термоупругости в квазистационарной постановке.

Основная математическая зависимость, используемая в алгоритме управления тепловым профилем валков, выражает взаимосвязь текущего и заданного расхода СОЖ по зонам в функции отношения фактического и требуемого теплового профилей валка в соответствующих точках (i) по длине его активной образующей, коэффициента релаксации, выраженного в виде соотношения временных интервалов между управляющими воздействиями к времени стабилизации результатов управляющих воздействий, а также взаимосвязи температуры эмульсии ($T_{\text{эм}}$) и средней температуры валка ($T_{\text{ср.в } i}$) в i -том сечении по длине бочки

$$Q_{2i} = Q_{1i} \left[1 + \frac{t_{\text{рег}}}{t_{\text{стаб}}} \left\{ \left(\frac{\Delta D_{\text{факт } i}}{\Delta D_{\text{треб } i}} \right)^{\text{sign}(T_{\text{сп.в } i} - T_{\text{эм}})} - 1 \right\} \right], \quad (15)$$

где Q_{2i} – заданный расход СОЖ для текущего временного интервала; Q_{1i} – фактический расход СОЖ на предыдущем временном интервале; $t_{\text{рег}}$ – временной интервал между управляющими воздействиями; $t_{\text{стаб}}$ – время стабилизации результатов регулирующего воздействия; $\Delta D_{\text{факт } i}$ – фактический тепловой профиль валка; $\Delta D_{\text{треб } i}$ – требуемый тепловой профиль валка.

Вибрации непрерывных станов холодной прокатки. Разработан метод расчёта вертикальных колебаний валковых узлов клеток кварто непрерывного стана с учётом взаимодействия клеток через натяжение полосы и транспортного запаздывания, а также формируемого вследствие этих колебаний изменения толщины полосы.

В качестве основной расчетной схемы вертикальных колебаний отдельной клетки прокатного стана выбрана система четырех масс (два рабочих и два опорных валка в сборе с подушками каждый), соединенных упруго-диссипативными связями. Расчетная схема межклетевого промежутка представляет собой невесомую полосу, находящуюся под действием растягивающих сил натяжения.

Использовали уравнения Лагранжа второго рода. Система дифференциальных уравнений, описывающих вертикальные колебания элементов валкового узла кварто k -той клетки прокатного стана в процессе непрерывной холодной прокатки полосы, в общем виде

$$m_i \ddot{x}_i + \sum_{j=0}^4 c_{ij} (x_i - x_j) + \sum_{j=0}^4 b_{ij} (\dot{x}_i - \dot{x}_j) = P_k + \Delta P_k (\Delta e_k, \Delta T_k), \quad (16)$$

где m_i – масса i -го элемента клетки $i = \overline{1,4}$; c_{ij} – коэффициенты жесткости соединения i -го и j -го элементов, $i^1 j$; b_{ij} – коэффициенты демпфирования в соединении i -го и j -го элементов; P_k – сила прокатки в клетке, действующее на рабочие валки; ΔP_k – изменение силы прокатки в клетке; Δe_k – биения рабочих и опорных валков; ΔT_k – разность сил переднего и заднего натяжений полосы, действующих в клетке.

Предложенный метод расчёта вертикальных колебаний элементов валковых узлов клеток прокатного стана в процессе холодной прокатки предполагает решение системы $(4n+n-1)$ нелинейных дифференциальных уравнений вида (16), где n – число клеток стана. Использовали численное решение дифференциальных уравнений и метод Элкинса, обычно применяемый при решении задач динамики взаимодействия и микропроскальзывания колеса и рельса. Учитывали воздействие последовательно формируемой в клетках стана продольной разнотолщинности полосы с учетом транспортного запаздывания, а также эксцентриситет валков.

На основании получивших развитие методов расчёта и алгоритмов разработаны средства компьютерного моделирования для проведения исследований различного рода от проектирования параметров технологии и оборудования, проведения научно-технических аудитов процессов, технологии и оборудования до автоматического управления процессами прокатки. В частности, созданы компьютерные системы WinColdRolling ©, CoilTemper3D, HRSPProfileControl, TRollCS ©, TRollHSM ©, RollPreflaw, TrollAB, HRSPProfileAnalysis, FlatnessAnalysis, Production, а также систе-

мы управления: система контроля вибрации и управления скоростью 5-тиклетевого стана 2030 НЛМК и система автоматического регулирования плоскостности (САРП) полос дрессировочного стана ДС-1 НЛМК.

В третьем разделе «Исследование стабильности процесса непрерывной холодной прокатки полос» представлен разработанный метод математического моделирования процесса прокатки, позволяющий оценивать стабильность технологии, принятой для непрерывных станов холодной прокатки (НСХП), на которых отсутствует или работает система автоматического регулирования толщины (САРТ). В результате моделирования установлено, что наибольшая нестабильность силы прокатки наблюдается в последних клетях НСХП, момента и мощности прокатки – в первых клетях. Для прокатки тонких ($h < 1$ мм) полос с минимальной неплоскостностью, а также сравнительно толстых полос ($h = 2-3$ мм), рекомендованы соответствующие алгоритмы работы САРТ. Предложен алгоритм работы САРТ, обеспечивающий более высокую стабильность процесса прокатки (меньшие величины вариаций энерго-силовых параметров), уменьшение разнотолщинности и неплоскостности полос.

Выполнен анализ стабильности процесса прокатки на 4-х клетевом стане 1400 НЛМК и обрывности прокатываемых полос. Выявлены возможности уменьшения обрывности полос при прокатке наиболее проблемного в этом смысле металла толщиной 0,48 мм из высококремнистой ($[Si] \approx 4\%$) стали.

Предложенный технологический режим прокатки полос из высококремнистой стали толщиной 0,48 мм с повышением до 40% частного обжатия в 4-й клетке стана позволил повысить стабильность процесса прокатки, снизить вероятность порывов полос. Снижение обрывности полос достигнуто за счет повышения толщины полосы, транспортируемой в линии стана, а также снижения удельных натяжений полосы, особенно в последнем межклетевом промежутке. Дополнительное преимущество режима – снижение скорости движения полосы в межклетевых промежутках и скорости валков (при одной и той же скорости прокатки), за счет чего снижается вероятность повреждения валков клетки, следующей за местом обрыва. Анализ результатов масштабного промышленного эксперимента показал, что предложенный режим прокатки полос повысил стабильность процесса прокатки. Уменьшена обрывность полос по сравнению с базовым уровнем с 30,8% до 22%, то есть на 7,2% абсолютных и 28,5% относительных.

В четвертом разделе «Условия реализации процесса холодной прокатки с минимальными силой и мощностью» эффективность процесса прокатки в единичной клетке рассмотрена с позиций максимальной обжимной способности, соответствующей условиям осуществления процесса с минимальной силой, и с позиций минимальных удельных затрат энергии, соответствующей условиям прокатки с минимальным крутящим моментом. Установлено, что решающую роль играет не столько закономерности изменения длины упругодеформированной линии контакта валков и полосы, сколько профиль этой линии с участком относительно постоянной толщины и его положение относительно прямой, соединяющей центры вращения валков, а также нейтрального сечения, что приводит к обратной зависимости силы и суммарного момента прокатки в зависимости от начальной толщины прокатываемых полос. С уменьшением начальной толщины полосы и приближении к пределу выкатываемости при прочих равных условиях сила прокатки и опережение полосы

возрастают, а момент прокатки – уменьшается.

Установлено, что наименее энергоемкие режимы непрерывной холодной прокатки (с минимальной суммарной мощностью) осуществляются в случаях близкого к равномерному распределению по клетям стана *силы прокатки* при одинаковых удельных натяжениях полосы в межклетевых промежутках. А наиболее энергоемкими являются деформационные режимы, при которых прокатные клетки по мощности прокатки загружены примерно одинаково.

В пятом разделе «Развитие методов управления поперечным профилем и плоскостностью полос на современных станах» на представительных массивах данных экспериментально установлено, что эффективно работающий канал воздействия на плоскостность полос селективным охлаждением валков может в два раза улучшить показатели работы системы автоматического регулирования плоскостности. То есть, примерно половина отклонений от неплоскостности зависит от того работает этот канал эффективно или не работает. В условиях пятиклетевого стана 2030 НЛМК в 2000-2001 гг. были установлены причины малоэффективной работы канала селективного охлаждения валков и определены основные пути повышения его эффективности. Это: повышение разогрева полосы в последней клетке за счёт регламентирования силы прокатки; повышение температуры входящей в клетку полосы за счёт оптимизации (снижения) расходов СОЖ в предыдущих клетях; повышение полноты непосредственного граничного контакта между поверхностью полосы и валков за счёт увеличения силы прокатки и шероховатости валков.

Впервые установлено, что при прокатке с абсолютными обжатыми, меньшими или равными величине шероховатости насечённых валков (например, при прокатке полос толщиной 0,5 мм в валках с шероховатостью $Ra=3,5$ мкм и обжатыми 2–5 %) весьма существенным фактором, определяющим уровень разогрева валков, является полнота их контакта с полосой. При более высоких степенях деформации решающая роль принадлежит работе деформации и работе сил контактного трения. Установлено, что в условиях малых (до 5%) относительных обжатий при повышении шероховатости поверхности валков возрастает полнота их непосредственного граничного контакта с полосой в ОД, несмотря на то, что отношение абсолютного обжатия к приведенной высоте микронеровностей поверхностей валков и полосы уменьшается.

Экспериментально установлено, что условием эффективного регулирования плоскостности полос их зонным охлаждением является наличие существенного (5–15°C) и стабильного теплового напора СОЖ, что особенно сложно достигается при прокатке с обжатыми $\varepsilon=1-5\%$ в последней клетке. Применение столь малых обжатий в последней клетке стана продиктовано особенностями технологии ведения процесса непрерывной прокатки с обеспечением при регулировании одновременно минимальных отклонений толщины, плоскостности и шероховатости поверхности полос. Такие режимы обжатий на пятиклетевых высокопроизводительных станах общеприняты и являются рациональными.

Для обеспечения эффективного регулирования плоскостности полос селективным охлаждением рабочих валков последней клетки за счёт повышения их теплосо-
 держания погонную (на единицу ширины полосы) силу в этой клетке необходимо задавать в зависимости от скорости прокатки и толщины прокатываемой полосы, ис-

ходя из выражения

$$P_{noz} = k_D \{1,24 \cdot e^{-0,4(h_5-0,35)} \cdot [1 - 0,11 \cdot \arctg(u - 15)] + 0,2 \cdot (h_5 - 0,35)\}, \quad (17)$$

где $P_{noz} = P/B$ – погонная сила прокатки в последней клетке, кН/мм; P – сила прокатки, кН; B – ширина полосы, мм; h_5 – толщина полосы за 5-ой клетью, мм; $k_D=9,5-10$ – коэффициент, зависящий от диаметра валков; u – скорость прокатки, м/с.

В процессе прокатки расход СОЖ в группе клетей, предшествующей последней клетке, определяют по зависимости

$$Q_1 = Q_2 \cdot \left[1 + k \cdot \left(\frac{\Delta t_o}{\Delta t_{mp}} - 1 \right) \right], \quad (18)$$

где Q_1 – суммарный расход СОЖ в клетях, предшествующих последней клетке, на текущем временном шаге, м³/ч; Q_2 – суммарный расход СОЖ в клетях, предшествующих последней клетке, на предыдущем временном шаге, м³/ч; $k=0,001-0,5$ – коэффициент, безразмерный; Δt_o – действительная разность температуры рабочих валков последней клетки и температуры подаваемой на них СОЖ, °С; Δt_{mp} – требуемая разность температуры рабочих валков последней клетки и температуры подаваемой на них СОЖ (требуемую разность температур Δt_{mp} устанавливают в пределах 5–30 °С).

В условиях, когда стан холодной прокатки не оснащён датчиками температуры рабочих валков, предложено в зависимости (18) использовать данные о разнице Δt_o температуры СОЖ на входе в клетки и выходе из них. При этом требуемую разность температур Δt_{mp} устанавливают в пределах 3–14 °С.

Выявленные закономерности послужили основой для создания новых технических решений с целью повышения эффективности регулирования плоскостности полос селективным охлаждением валков (патенты РФ 2190488, 2190489, 2212289, 2212962, 2212963, 2225272). Итогом использования комплекса мероприятий было достижение необходимой разности температур СОЖ и валков, составившей 5–15 °С и обеспечившей достаточную эффективность регулирования плоскостности полосы. В результате средняя ошибка плоскостности примерно вдвое снизилась и составила 1,8–2,5 IU, существенно снизилась отбраковка полос по дефектам плоскостности.

Экспериментально установлено наличие существенной, достигающей по нашим данным 10–30 °С, неравномерности распределения температуры по ширине полосы при холодной прокатке с использованием зонного охлаждения валков. На станах холодной прокатки изменение температуры по ширине полосы связано, в первую очередь, с различием подачи СОЖ на валки и полосу по её ширине. На дрессировочных станах неравномерность температуры достигает 5–10 °С, что связано с неравномерностью температурных полей в рулоне после колпакового отжига и неполного остывания рулонов, а также с неодинаковыми условиями теплообмена торцов рулона при остывании и транспортировании в вертикальном положении.

Впервые установлено количественное влияние неравномерности распределения температуры по ширине полосы при холодной прокатке на её плоскостность после естественного выравнивания температуры. Для компенсации этого эффекта предложено измерять температуру на тех же участках по ширине полосы, где измеряется

плоскостность, и вносить поправку в целевую кривую плоскостности. Для повышения точности и эффективности регулирования плоскостности полос зонным охлаждением рабочих валков разработано новое устройство (патент РФ 2211102), реализованное в действующей САРП.

Установлено, что в зависимости от толщины готовой полосы локальные утолщения профиля подката приводят к локальной неплоскостности двух принципиально различных видов, отличающихся механизмом образования и направлениями потери устойчивости полосы. При прокатке полос наиболее тонкого сортамента на стане 2030 в местах локальных утолщений профиля подката в холоднокатаной полосе формируются пониженные вытяжки и локальные растягивающие напряжения. Вследствие местных повышенных натяжений смотки в местах локализаций утолщений и растягивающих напряжений возрастающие межвитковые давления приводят к свариванию металла по жёлобу.

На основании результатов анализа преимуществ и недостатков известных систем измерения и систем автоматического регулирования плоскостности полос, а также разработанного комплекса технических решений и результатов исследований создана система автоматического регулирования плоскостности полос нового поколения. Учтены температурные эффекты и дополнительные факторы, имеющие важное практическое значение для обеспечения высоких показателей плоскостности холоднокатаных полос. А именно: учтено влияние распределения температуры по ширине полосы на плоскостность готовой продукции. В зависимости от распределения отклонения температуры по ширине полосы от среднего значения путём коррекции целевой кривой плоскостности после полного остывания полосы достигается эффект термоправки; реализованы алгоритмы работы непрерывного стана, обеспечивающие создание необходимого (5–15°C) теплового напора СОЖ при прокатке тонких полос в последней клетке с малыми (до 5%) частными обжатиями; учтены физические закономерности воздействий селективным охлаждением валков в процессе их разогрева, когда СОЖ, по сути, является смазочно-нагревающей жидкостью (см. зависимость (15)); обеспечена стабильность теплового состояния валков при их селективном охлаждении; учтено влияние формы поперечного сечения горячекатаного подката и, соответственно, профиля наружной образующей рулона, влияние которого искажает измеренную плоскостность полосы и должно учитываться в целевой кривой плоскостности, задаваемой системе регулирования наработку; реализована технология создания оптимального объёмного напряженного состояния рулонов холоднокатаных полос в зависимости от их назначения. Учтено, что оптимальный закон изменения натяжения полосы зависит от её плоскостности и наоборот – оптимальная целевая кривая плоскостности зависит от профиля наружной образующей рулона, обусловленного, в том числе, его напряжённо-деформированным состоянием.

В САРП использован бесконтактный оптический принцип и система измерения плоскостности (основанная на высокоточном измерении продольных углов поверхности полосы по ширине), которая легко встраивается в существующие агрегаты, формирующие плоскостность производимой тонколистовой продукции.

Первый созданный в СНГ промышленный образец системы, адаптированный к условиям дрессировочного стана ДС-1 НЛМК, в мае 2009 г. внедрён в промышлен-

ную эксплуатацию и обеспечил улучшение плоскостности полос. В период проведения гарантийных испытаний системы средневзвешенная амплитуда неплоскостности уменьшилась от 3,4 до 2,84 мм, то есть примерно на 20%. Сократилась отсортировка полос по неплоскостности.

В шестом разделе «Теоретические, экспериментальные исследования и реализация разработок, предупреждающих образование дефектов, обусловленных слипанием и проскальзыванием витков полос в рулонах» напряжённо-деформированное состояние рулонов рассчитывали как с учётом изменения неплотности прилегания, так и в предположении идеального прилегания витков. При плотном прилегании витков, давление на барабан и межвитковые давления в рулоне, снятом с барабана моталки, существенно (на порядок) превышают соответствующие значения в рулоне полосы с шероховатой поверхностью. Смятие микронеровностей на поверхности полосы приводит к уменьшению межвитковых давлений при намотке на барабан почти в десять раз. После снятия рулона с барабана, вследствие упругого восстановления степени неплотности прилегания, в основной части рулона давление остается таким же, как и в рулоне на барабане. При этом уровень межвитковых давлений примерно в полтора раза меньше, чем давление на барабане.

В процессе охлаждения рулона полосы с идеально гладкой поверхностью могут возникать термические напряжения, соизмеримые с давлением рулона на барабан моталки и достигающие величины удельного натяжения полосы при смотке. Неплотное прилегание витков, обусловленное шероховатостью поверхности полосы, приводит к существенному снижению межвитковых давлений в рулоне после его снятия с барабана и, как следствие, к существенному (в три – четыре раза) снижению термических напряжений, возникающих при охлаждении рулона. В то же время наличие шероховатости приводит к появлению термических сопротивлений при контактировании поверхностей смежных витков, что при остывании рулона увеличивает температурные градиенты и уровень термических напряжений. При теплоотводе через торцы рулона влияние термических сопротивлений сказывается только вблизи наружных и внутренних витков. Это приводит к тому, что возрастание термических напряжений имеет место только в периферийных витках, где в изотермическом рулоне происходит резкое снижение межвитковых давлений до нуля. В основной части рулона шероховатость полосы способствует более плавному распределению температур и снижению термических напряжений.

Факторами, вызывающими наиболее существенное изменение температуры сматываемых в рулоны полос, являются скорость прокатки и количество СОЖ, подаваемой в клетки стана в процессе прокатки. В условиях 5-ти клетового стана 2030 экспериментально определены возможные изменения температуры по длине полосы (в пределах рулона) в зависимости от скорости прокатки и расходов СОЖ. Расчёты показывают, что скачкообразное изменение температуры полосы на $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ в процессе намотки рулона после последующего усреднения температуры в рулоне эквивалентно скачкообразному изменению натяжения смотки на 126 Н/мм^2 (при коэффициенте температурного расширения $\alpha = 1,2 \cdot 10^{-5}\text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ и модуле упругости материала полосы $E = 210\text{ кН/мм}^2$).

В процессе прокатки полос происходят замедления стана для пропуска сварных швов, бывают торможения, остановки стана, связанные с переполнением накопителя

полосы, после которых следует интенсивный разгон стана до рабочей скорости. Это сопровождается значительным изменением температуры полосы, существенно влияющим на напряжённо-деформированное состояние рулонов, склонность витков к свариванию при отжиге металла, проскальзывание витков при размотке полос на дрессировочном стане, образование дефектов "линии перегиба".

Указанные эффекты исследовали при прокатке полос размерами $0,7 \times 1240$ мм из подката толщиной 3 мм (сталь 08Ю) по схемам *а, б*, представленным на рис. 1. Изменение скорости прокатки по сравнению со скоростью установившегося процесса производили на 1/3 части общего числа витков полосы сматываемого рулона. Схема *а* выбрана для целенаправленного выявления условий появления сваривания витков и дефектов «линии перегиба», схема *б* – для выявления осевого смещения витков в процессе размотки рулонов на дрессировочном стане.

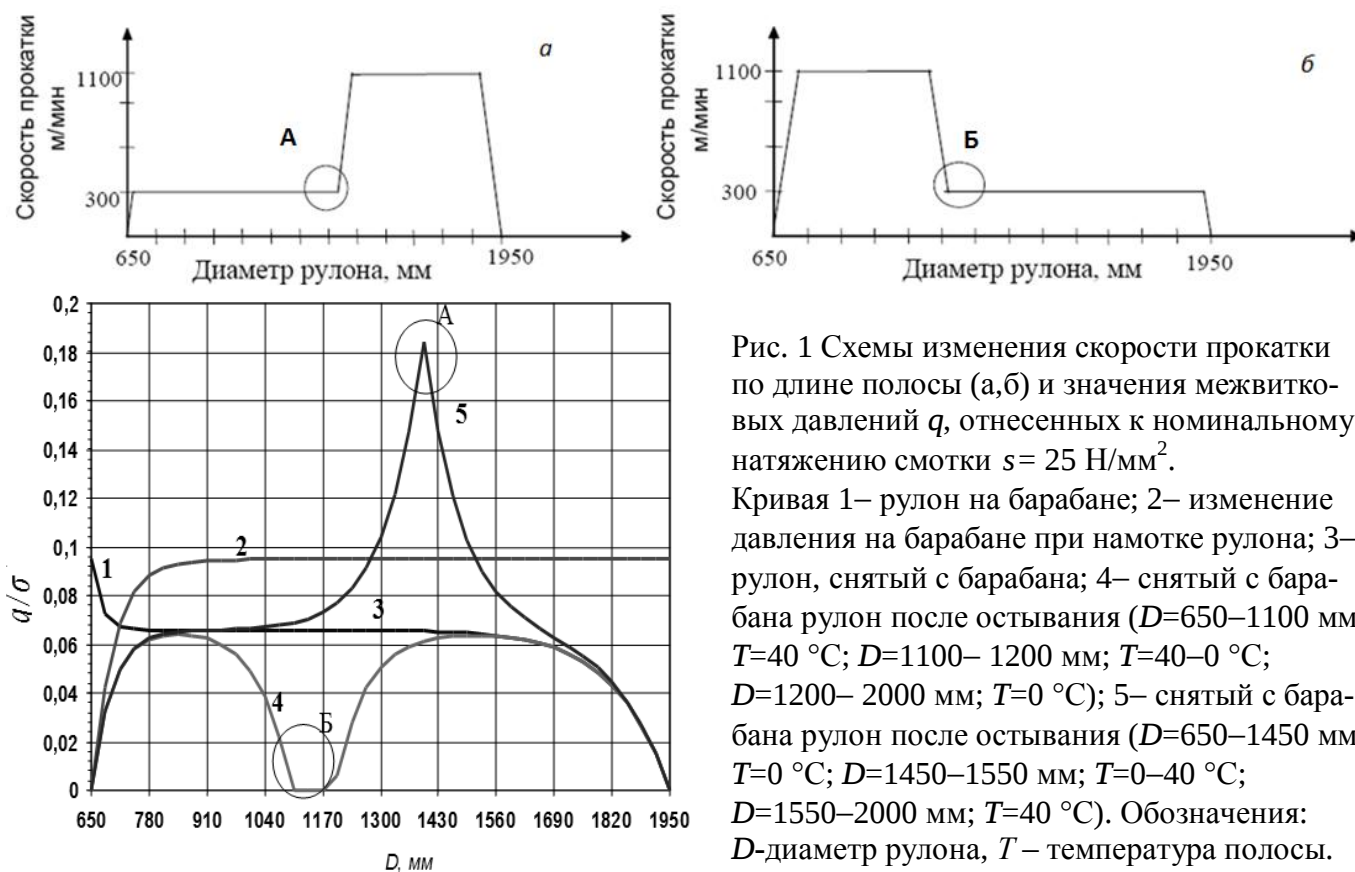


Рис. 1 Схемы изменения скорости прокатки по длине полосы (*а, б*) и значения межвитковых давлений q , отнесенных к номинальному натяжению смотки $s = 25$ Н/мм².

Кривая 1– рулон на барабане; 2– изменение давления на барабане при намотке рулона; 3– рулон, снятый с барабана; 4– снятый с барабана рулон после остывания ($D=650-1100$ мм; $T=40$ °С; $D=1100-1200$ мм; $T=40-0$ °С; $D=1200-2000$ мм; $T=0$ °С); 5– снятый с барабана рулон после остывания ($D=650-1450$ мм; $T=0$ °С; $D=1450-1550$ мм; $T=0-40$ °С; $D=1550-2000$ мм; $T=40$ °С). Обозначения: D –диаметр рулона, T – температура полосы.

Рулоны отжигали в колпаковых печах с назначением опытного металла на группу вытяжки ВОСВ. В процессе размотки рулонов при дрессировке на полосах, прокатанных по схеме *б* с натяжением на моталке 21 Н/мм² выявлено осевое смещение витков величиной $10-15$ мм в ожидаемом месте – переходе (область Б на рис. 1) от высокой скорости прокатки (1080 м/мин) к низкой (300 м/мин). При размотке рулонов, прокатанных по схеме *а*, выявлены дефекты «линии перегиба» в ожидаемом месте – переходе с низкой скорости (300 м/мин) установившегося процесса прокатки к высокой скорости (1080 м/мин) в наружной 1/3 части витков рулона (область А на рис. 1). Появление линий перегиба в этих случаях объясняется дополнительным повышенным межвитковым давлением, вызванным сжимающей нагрузкой внешнего более нагретого слоя витков полосы на внутренние более холодные витки в про-

цессе выравнивания температуры в рулоне на окончательной стадии его выдержки и начальной стадии охлаждения при отжиге.

На основании установленных закономерностей разработан новый способ (патент РФ 2236917) рулонного производства полосового проката и проведено его опытно-промышленное опробование. Способ предусматривает снижение температуры по длине сматываемой полосы, причем разность между температурой полосы в начале и в конце намотки устанавливают в диапазоне 5–100 °С. После усреднения температуры витков в рулоне, в процессе которого внутренние первоначально более горячие витки, остывая, сокращаются в длине, а наружные, изначально более холодные, нагреваясь, дополнительно удлиняются. За счет этого плотность намотки уменьшается и снижается склонность витков полосы к слипанию-свариванию. Усреднение температур и ослабление плотности намотки происходит, когда рулон находится в вертикальном положении в колпаковой печи. В этот период исключается проседание рулона под действием собственной массы.

В седьмом разделе «Проблемы высокоскоростной непрерывной холодной прокатки полос и методы, обеспечивающие их высокую точность, состояние поверхности и производительность» установлено влияние основных технологических параметров на величину максимальной скорости, при которой процесс непрерывной холодной прокатки устойчив. Уменьшение уровня межклетевых натяжений на каждые 10 Н/мм² в последних одном – двух межклетевых промежутках (с учётом технологических ограничений) приводит к увеличению пороговой скорости примерно на 10–20 м/мин.

Решена задача оптимизации режима натяжений с целью обеспечения непрерывной прокатки с величинами опережения (не менее 0,2–0,5%), исключающими периодические пробуксовки валков и развитие вибраций. Определены деформационно-силовые режимы процесса, гарантирующие прижатие рабочих валков и одностороннюю выборку зазоров вдоль направления прокатки (патент РФ 2225272), что повышает скоростной порог возникновения вибраций.

Разработанная система контроля вибрации и управления скоростью стана позволяет косвенным путем по сигналам вибрации определять размах продольных периодических изменений толщины полосы для обнаружения выхода из допусков в процессе прокатки, что позволяет оператору немедленно устранить дефекты, например, путём снижения скорости.

На основании установленных величин и периодичности изменения толщины полос (до 60–80 мкм с шагом 20–160 мм) и шероховатости их поверхности (на 2–4 мкм) при резонансной вибрации стана, вызывающей возникновение дефекта поверхности «теневые полосы», реализована функция его прогнозирования. Реализация этой функции мониторинга в СКВ позволила своевременно предпринимать меры по устранению названных дефектов поверхности.

Выполнен анализ известных методов обнаружения резонансных вибраций непрерывных станов. Предложены методы контроля динамически опасных режимов непрерывной холодной прокатки на основе контроля баланса горизонтальных сил, действующих на подушки рабочих валков, значений нейтрального угла, опережения в очаге деформации, уровней спектра вибрации в вычисленном диапазоне частот, а

также связей колебаний валков в смежных клетях (патент РФ 2338609).

Впервые разработаны и реализованы на промышленном стане методы надёжного (в 95% случаев) раннего (за 1–3 с) обнаружения опасной в динамическом отношении ситуации на непрерывном стане холодной прокатки и автоматического управления скоростью прокатки, обеспечившие повышение средней скорости прокатки полос виброопасного (толщинами менее 0,6–0,7 мм) сортамента на 11%, увеличение максимально достигнутой скорости прокатки на 8%.

ВЫВОДЫ

В диссертации решена актуальная научно-техническая проблема создания и реализации методов стабильного обеспечения улучшенных показателей плоскостности и состояния поверхности тонких холоднокатаных стальных полос в условиях их массового производства на высокоскоростных промышленных станах на основе установленных новых закономерностей влияния на указанные показатели качества основных факторов процессов, температурных и динамических эффектов.

1. Установлено, что решение сформулированной проблемы необходимо осуществлять путём: совершенствования технологических режимов производства полос на основе развития методов расчёта и их реализации в современных средствах компьютерного моделирования; создания и внедрения решений, повышающих стабильность процессов прокатки полос; развития технологических основ управления плоскостностью полос на современных станах, учитывающих дополнительные важные влияющие факторы; создания систем контроля вибраций и управления режимами прокатки на высокоскоростных станах; изучения закономерностей формирования дефектов поверхности полос, связанных с тепловыми эффектами; установления комплекса влияющих факторов, закономерностей их изменения и влияния на условия возникновения слипания, следов перегибов и проскальзывания витков плотно смотанных рулонов; создания действующих промышленных систем автоматического управления, обеспечивающих высокую плоскостность, улучшение качества поверхности полос, снижение вибраций и повышение производительности станов в условиях высокоскоростной непрерывной холодной прокатки и дрессировки полос.

2. Разработан новый метод расчёта напряжения течения материала полосы в процессе прокатки, учитывающий немонотонные сложные зависимости реологических свойств металлов и сплавов от факторов деформирования в различном их сочетании, базирующийся на интер- и экстраполяции многомерных *отдельных* массивов экспериментальных данных, полученных на различных установках с различной дискретностью и в ограниченном количестве. Метод отличается способом объединения этих массивов данных при формировании сгущённых узлов интерполяции, при котором оказываются неизвестными значения в отдельных узлах. На основе реализованного в разработанной компьютерной системе WinColdRolling метода и экспериментальных данных о напряжении течения высококремнистой электротехнической (0401) и трансформаторной (ЭЗА) сталей, определены режимы непрерывной холодной прокатки полос толщиной 0,48 мм из высококремнистых ($[\text{Si}] \approx 4\%$) сталей. Обрывность полос снижена в 1,5 раза.

3. Впервые установлена и экспериментально доказана значимость влияния тем-

пературы смотки холоднокатаной полосы на напряжённно-деформированное состояние рулонов, что позволило предложить снижение температуры холоднокатаной полосы при смотке рулона (патент РФ 2236917), создающее предпосылки его термической разгрузки и снижения вероятности слипания и сваривания витков в процессе колпакового отжига. В результате обеспечено повышение выхода годного первой группы отделки поверхности на 1,5–2 % и повышение производительности дрессировочного стана на 1%. Впервые предложено количественное описание механизма влияния шероховатости поверхности холоднокатаной полосы на образование дефектов поверхности. Разработанные новые методы расчёта объёмного температурного и напряжённного состояния рулонов дополнительно учитывают условия исходного неизотермического состояния рулона в процессе намотки, а также взаимное влияние межвитковых давлений и термических сопротивлений в ходе термообработки рулона. Они реализованы в специализированной компьютерной системе CoilTemper3D, позволяющей прогнозировать возникновение дефектов поверхности полос, а также совершенствовать технологические режимы производства полос в рулонах.

4. Вследствие использования на пятиклетевых НСХП малых относительных обжатий ($\epsilon=1-5\%$) в последней клетке разница между температурой рабочих валков и СОЖ минимальна, что резко снижает эффективность работы систем селективного охлаждения валков. Впервые определено, что основными путями повышения эффективности работы систем селективной подачи СОЖ являются: повышение разогрева полосы в последней клетке за счёт применения регламентируемой повышенной силы прокатки; повышение температуры входящей в клетку полосы за счёт оптимизации (снижения) расходов СОЖ в предыдущих клетках; повышение полноты непосредственного граничного контакта между полосой и валками за счёт применения повышенной силы прокатки и шероховатости валков. Разработан новый метод расчёта температурных условий прокатки, теплового состояния и теплового профиля валков, дополнительно учитывающие полноту контакта полосы и валков в ОД, а также фактические условия их охлаждения, определённые с использованием оригинального метода выявления следов воздействия форсунок. Экспериментально установлено, что основным условием эффективного регулирования плоскостности полос селективным охлаждением валков является наличие стабильной разницы температур между СОЖ и рабочими валками. Она должна находиться в пределах 5–15°C. Предложены новые эмпирические зависимости погонной силы прокатки от скорости прокатки и толщины прокатываемой полосы, в результате использования которых достигается эффективное регулирование плоскостности полос селективным охлаждением рабочих валков последней клетки. Полученные зависимости использованы при создании и внедрении новых технических решений (патенты РФ 2190488, 2190489, 2212289, 2212962, 2212963, 2225272), в результате чего достигнуты необходимая разница температур СОЖ и валков, составившая 5–15 °С, снижение до 1,8–2,5 IU (примерно в 2 раза) средней ошибки плоскостности полос, снижение отбраковки полос по дефектам плоскостности.

5. Впервые экспериментально установлено значимое влияние неравномерности распределения температуры по ширине полосы при холодной прокатке (оцениваемое, по нашим данным, 10–30°C) на плоскостность полосы после естественного вы-

равнивания температуры. Для компенсации этого эффекта предложено в процессе прокатки и регулирования плоскостности вносить поправку в целевую кривую плоскостности для достижения после выравнивания температуры эффекта термоправки (патент РФ 2211102). Разработана новая система автоматического регулирования плоскостности холоднокатаных полос. В условиях дрессировочного стана ДС-1 НЛМК внедрена в постоянную промышленную эксплуатацию первая созданная в СНГ и адаптированная для условий дрессировочных станов система автоматического регулирования плоскостности (САРП) полос с использованием бесконтактных методов измерения плоскостности и температуры полосы, позволившая достичь эффекта их термоправки и в значительной мере (в среднем на 20%) улучшить плоскостность готовых полос.

6. Разработаны новые методы надёжного обнаружения опасных в динамическом отношении ситуаций и управления скоростью непрерывного стана холодной прокатки. Отличительными особенностями методов являются контроль баланса горизонтальных сил, действующих на рабочие валки, значений нейтрального угла и опережения в очаге деформации, уровней спектра вибрации в вычисленном диапазоне частот, а также связей колебаний валков в смежных клетях (патенты РФ 2212289 и 2338609). Указанные закономерности математически формализованы и сведены в новый критерий, обеспечивший высокую (достигающую 95%) вероятность идентификации начала фазы лавинообразного развития вибраций непрерывного стана за 1–3 секунд до их спонтанного усиления. Разработана и внедрена в условиях пятиклетевого стана 2030 НЛМК новая автоматическая система контроля вибраций и управления скоростью стана холодной прокатки, позволившая повысить среднюю скорость прокатки тонких (0,7 мм и меньше) полос на 8–11% без развития вибраций стана и, как следствие, - возникновения повышенной высокочастотной продольной разнотолщинности и дефектов поверхности полос типа «теневые полосы».

7. Разработан новый итерационный метод оптимизации процесса многопроходной прокатки, учитывающий обратную зависимость энергосиловых параметров от величины обжата. Разработана детерминировано-вероятностная математическая модель процесса непрерывной холодной прокатки, включающая новый метод расчёта промежуточных толщин и межклетевых натяжений в зависимости от настройки непрерывного стана, учитывающая транспортное запаздывание и основные закономерности работы систем автоматического регулирования. Методы реализованы в специализированной компьютерной системе для расчёта и оптимизации параметров многопроходной прокатки WinColdRolling.

8. Развита представления о раскатываемости локальных утолщений поперечного профиля подката в процессе непрерывной холодной прокатки. Показано, что в зависимости от конечной толщины полосы и силовых условий холодной прокатки «локальная неплоскостность» бывает двух различных видов - местная волнистость и «жёлоб», при этом отличие заключается в направлениях потери устойчивости полосой и в механизмах образования дефектов. Разработаны методы совершенствования процессов холодной прокатки с точки зрения раскатываемости локальных утолщений профиля подката путём воздействия на деформационно-силовые условия холодной прокатки и смотки полос в рулоны.

9. Установлены новые закономерности и условия реализации процесса холод-

ной прокатки с минимальной силой и минимальными энергозатратами в отдельной клетке, а также непрерывной группе клеток. Впервые установлено, что условия процесса непрерывной холодной прокатки тонких полос с минимальной силой и затратами энергии – альтернативны. Это позволило сформулировать новый критерий оптимизации и целенаправленно определять наименее энергоёмкие режимы многопроходной холодной прокатки при заданных величинах натяжений, режим которых подчинён повышению пороговой скорости прокатки без вибраций стана.

10. Разработанные методы и алгоритмы расчёта параметров, оптимизации процессов производства холоднокатаных полос реализованы в 10-ти компьютерных системах для инженерных расчётов параметров и оптимизации процессов прокатки, смотки, отжига рулонов, дрессировки полос и управления тепловым состоянием валков. Системы используются на предприятиях Украины, России, Германии, в частности, НЛМК, НКМЗ, ИЧМ, Лехлер и Зундвиг. Применение разработанных компьютерных систем позволило определить или уточнить рациональные значения некоторых принципиальных параметров оборудования модернизируемых и новых станов, включая реверсивные станы для прокатки высококремнистой электротехнической стали НЛМК и ВИЗ-Стали.

11. Технологические разработки обеспечены соответствующей нормативно-технической документацией, в соответствии с которой разработанные решения используются на листопрокатных комплексах. Суммарный объём металлопроката, произведенного с использованием разработанных в диссертационной работе новых технических решений, технологий и систем управления, в 2000-2010 годах составил 1,2 млн. тонн. Подтверждённый экономический эффект получен в размере 2274 тыс. грн. (доля автора). Также дополнительно определён ожидаемый экономический эффект в размере 3210 тыс. грн. (доля автора).

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Управление качеством тонколистового проката / [В. Л. Мазур, А. М. Сафьян, И. Ю. Приходько, А. И. Яценко]. – К.: Техника, 1997. – 384 с.
2. Сафьян А. М. Особенности использования осевой сдвижки валков в условиях непрерывного стана кварто холодной прокатки / А. М. Сафьян, И. Ю. Приходько // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 1992. – № 1. – С. 23 – 24.
3. Сафьян А. М. Компьютерная система расчёта параметров и оптимизации процесса холодной полосовой прокатки. Часть 1./ А. М. Сафьян, И. Ю. Приходько // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 1995. – №3. – С. 22 – 25.
4. Сафьян А. М. Компьютерная система расчёта параметров и оптимизации процесса холодной полосовой прокатки. Часть 2. / А. М. Сафьян, И. Ю. Приходько // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 1996. – №1. – С. 29 – 33.
5. Сафьян А. М. Компьютерная система расчёта параметров и оптимизации процесса холодной полосовой прокатки. Часть 3. / А. М. Сафьян, И. Ю. Приходько // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 1996. – №2. – С. 24 – 25.
6. Сафьян А. М. Управление поперечным профилем и плоскостностью полос при прокатке / А. М. Сафьян, И. Ю. Приходько // *Пластическая деформация металлов и сплавов*. – М.: МИСиС. – 1996. – С. 337 – 345.
7. Сафьян А. М. Выбор и расчет рациональных профилировок валков станов

холодной прокатки / А. М. Сафьян, И. Ю. Приходько, Е. А. Парсенюк // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 1996. – №3 – 4. – С. 28 – 31.

8. Сафьян А. М. Разработка принципов совмещённого управления толщиной и плоскостностью при непрерывной холодной прокатке / А. М. Сафьян, И. Ю. Приходько // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 1997. – №3. – С. 42 – 45.

9. Приходько И. Ю. Сравнительный анализ и выбор зависимостей для определения сопротивления деформации при холодной прокатке стальных полос / И. Ю. Приходько, А. А. Сергеенко // *Фундаментальные и прикладные проблемы чёрной металлургии: сб. научн. трудов ИЧМ НАН Украины. Вып. 11.* – Днепропетровск: «Визион». – 2005. — С. 142 – 154.

10. Приходько И. Ю. Метод определения сопротивления деформации материалов со сложной зависимостью реологических свойств от параметров деформирования / И. Ю. Приходько, А. А. Сергеенко, В. В. Разносилин // *Фундаментальные и прикладные проблемы чёрной металлургии: сб. научн. трудов ИЧМ НАН Украины. Вып. 14.* – Днепропетровск: «Визион». – 2007. – С. 187 – 193.

11. Голубченко А. К. Анализ влияния работы системы автоматического регулирования толщины полосы и натяжения в процессе непрерывной холодной прокатки полос на основе имитационного моделирования / А. К. Голубченко, В. Л. Мазур, И. Ю. Приходько // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 1994. – № 4. – С. 19 – 24.

12. Голубченко А. К. Стабильность технологии прокатки полосовой стали / А. К. Голубченко, В. Л. Мазур, И. Ю. Приходько // *Сталь*. – 1993. – №8. – С. 52 – 55.

13. Голубченко А. К. Повышение стабильности непрерывной холодной прокатки и эффективности работы системы автоматического регулирования толщины и натяжения полосы / А. К. Голубченко, В. Л. Мазур, И. Ю. Приходько // *Сталь*. – 1996. – №10. – С. 32 – 36.

14. Приходько И. Ю. Совокупное воздействие на толщину и плоскостность полос при холодной прокатке современными средствами регулирования / И. Ю. Приходько, А. М. Сафьян, В. С. Куцин // *Производство проката*. – 1999. – №2. – С. 41 – 46.

15. Сафьян А. М. Влияние остаточных напряжений в широкополосной стали на плоскостность штрипса после продольного роспуска / А. М. Сафьян, И. Ю. Приходько, В. С. Куцин // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 2000. – №1. – С. 37 – 42.

16. Приходько И. Ю. Совмещённое регулирование толщины, натяжения и плоскостности полос при холодной прокатке современными средствами регулирования с учётом скоростных характеристик исполнительных механизмов / И. Ю. Приходько, А. М. Сафьян, В. С. Куцин // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 2000. – №2. – С. 32 – 35.

17. Приходько И. Ю. К вопросу расчёта среднего контактного давления в очаге деформации / И. Ю. Приходько, А. М. Сафьян, В. С. Куцин // *Теория и практика производства проката*. – 2001. – №1. – С. 130 – 136.

18. Доманти С. Оптимизация работы прокатных станов с помощью математических моделей / С. Доманти, Д. Эдвардс, И. Приходько, П. Томас, Д. Восс // *Новые достижения и перспективы развития процессов и машин обработки давлением*. – Краматорск. – 2001. – С. 78 – 82.

19. Чернов П. П. Исследование эффективности системы регулирования плоскостности полос зонным охлаждением рабочих валков. Часть 1 / П. П. Чернов, А. М. Сафьян, И. Ю. Приходько, В. В. Акишин, В. П. Сосулин // Производство проката. – 2001. – №9. – С. 32 – 34.
20. Чернов П. П. Исследование эффективности системы регулирования плоскостности полос зонным охлаждением рабочих валков. Часть 2 / П. П. Чернов, А. М. Сафьян, И. Ю. Приходько, В. В. Акишин, В. П. Сосулин // Производство проката. – 2001. – №10. – С. 31 – 35.
21. Чернов П. П. Исследование эффективности системы регулирования плоскостности полос зонным охлаждением рабочих валков. Часть 3 / П. П. Чернов, А. М. Сафьян, И. Ю. Приходько, В. В. Акишин, В. П. Сосулин // Производство проката. – 2002. – №4. – С. 15 – 17.
22. Чернов П. П. Исследование эффективности системы регулирования плоскостности полос зонным охлаждением рабочих валков. Часть 4 / П. П. Чернов, А. М. Сафьян, И. Ю. Приходько, В. В. Акишин, В. П. Сосулин // Производство проката. – 2002. – №5. – С. 14 – 17.
23. Приходько И. Ю. Оценка тепловых условий холодной прокатки полос с учётом полноты контакта рабочих валков и полосы в очаге деформации / И. Ю. Приходько, А. М. Сафьян, П. П. Чернов, В. В. Акишин // Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии: сб. научн. трудов ИЧМ НАН Украины. Вып. 4. – К.: Наукова думка. – 2001. – С. 182 – 187.
24. Приходько И. Ю. Предпосылки и перспективы реализации процесса холодной прокатки с минимальной силой и мощностью для дополнительного снижения энергозатрат / И. Ю. Приходько, А. М. Сафьян, А. В. Ноговицын, В. В. Акишин // Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии: сб. научн. трудов ИЧМ НАН Украины. Вып. 4. – К.: Наукова думка. – 2001. – С. 170 – 182.
25. Горбунков С. Г. Методы расчета обжатия при многопроходной прокатке / С. Г. Горбунков, И. Ю. Приходько, А. В. Ноговицын // Металл и литьё Украины. – 1995. – № 6. – С. 23 – 28.
26. Приходько И. Ю. О механизме влияния шероховатой поверхности холоднокатаных полос на условия слипания витков рулонов при отжиге и образование дефектов поверхности / И. Ю. Приходько, В. И. Тимошенко, П. П. Чернов, А. М. Сафьян, В. В. Акишин // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2002. – № 8 – 9. – С. 92 – 101.
27. Приходько И. Ю. Система контроля и методы снижения резонансных вибраций на непрерывных станах холодной прокатки полос: / И. Ю. Приходько, П. В. Крот, Е. А. Парсенюк, К. В. Соловьёв, В. В. Акишин // Фундаментальные и прикладные проблемы чёрной металлургии: сб. научн. трудов ИЧМ НАН Украины. Вып. 12. – Днепропетровск: «Визион». – 2006. – С. 232 – 244.
28. Чернов П. П. Использование системы мониторинга вибрации для повышения скорости станов холодной прокатки / П. П. Чернов, Ю. И. Ларин, В. А. Пименов, А. П. Долматов, И. Ю. Приходько, П. В. Крот, В. В. Акишин, Е. А. Парсенюк // Теория и практика производства проката. Часть 2. – Липецк: ЛГТУ. – 2005. – С. 116 – 120.
29. Приходько И. Ю. Моделирование процессов эффективного охлаждения валков листопрокатных станов / И. Ю. Приходько, С. А. Воробей, С. Е. Шатохин // Сталь. – 2005. – №1 – С. 72 – 77.

30. Приходько И. Ю. Управление тепловым профилем валков и плоскостностью полос селективной подачей эмульсии / И. Ю. Приходько, П. П. Чернов, С. Е. Шатохин // Сталь. – 2006. – С. 87 – 93.

31. Приходько И. Ю. Система автоматического регулирования плоскостности полос и температуры с использованием бесконтактных методов измерения / И. Ю. Приходько, П. П. Чернов, В. В. Разносилин, А. А. Сергеенко, С. В. Трусилло, В. А. Агуреев, А. И. Соболев, Е. А. Парсенюк, Ю. А. Цуканов // Сталь. – 2009. – №3. – С. 41 – 45.

32. Приходько И. Ю. Первая отечественная система автоматического регулирования плоскостности полос с использованием бесконтактных методов измерения плоскостности и температуры / И. Ю. Приходько, П. П. Чернов, В. В. Разносилин, А. А. Сергеенко, С. В. Трусилло, В. А. Агуреев, А. И. Соболев, Е. А. Парсенюк, Ю. А. Цуканов // Фундаментальные и прикладные проблемы чёрной металлургии: сб. научн. трудов ИЧМ НАН Украины. Вып. 19. – К.: Наукова думка. – 2009. – С. 206 – 218.

33. Крот П. В. Системы мониторинга вибрации и диагностики станов холодной прокатки / П. В. Крот, И. Ю. Приходько, К. В. Соловьев // Вибрация машин. Измерение, снижение, защита. Вып. 1. – Донецк. – Май 2005. – С. 17 – 20.

34. Чернов П. П. Исследование влияния температуры смотки полос в рулоны при холодной прокатке на образование дефектов поверхности полос / П. П. Чернов, И. Ю. Приходько, В. Н. Скороходов, В. В. Акишин, А. М. Сафьян // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2002. – № 8 – 9. – С. 102 – 108.

35. Болтен Г. Аудит работы прокатных станов / Г. Болтен, Р. Дэвис, Д. Эдвардс, И. Приходько, Г. Волэс // Труды 5-го конгресса прокатчиков, г. Череповец, 21 – 24 октября 2003. – М.: АО Черметинформация, 2004. – С. 155 – 165.

36. Приходько И. Ю. Vibration monitoring system and the new methods of chatter early diagnostics for tandem mill control // И. Ю. Приходько, П. В. Крот, К. В. Соловьев, Е. А. Парсенюк, П. П. Чернов, В. А. Пименов, А. П. Долматов, А. В. Харин // Материалы Лондонской конференции «Вибрации в прокатных станах», г. Лондон. – 9 ноября 2006. – С. 87 – 106.

37. Krot P. V. Regenerative chatter vibrations control in the tandem cold rolling mills / P. V. Krot, I. Y. Prihodko, P. P. Chernov // 4th European Conference on Structural Control (ECSC 2008). Institute of Problems in Mechanical Engineering RAS, St. Petersburg, Russia. – September 8 – 12, 2008. – pp. 428 – 437.

38. Патент 2190488 Российская Федерация, В21 В 1/28. Способ холодной прокатки полос в непрерывном многоклетевом стане / Скороходов В. Н., Чернов П. П., Сафьян А. М., Парсенюк Е. А., Акишин В. В., Приходько И. Ю., Долматов А. П., Рубанов В. П.; заявитель и патентообладатель ОАО «НЛМК»; заявл. 26.07.2001; опубл. 10.10.2002, Бюл. № 28.

39. Патент 2190489 Российская Федерация, В21 В 1/28. Способ холодной прокатки в непрерывном многоклетевом стане / Скороходов В. Н., Чернов П. П., Акишин В. В., Сафьян А. М., Приходько И. Ю., Парсенюк Е. А., Ларин Ю. И., Долматов А. П., Рубанов В. П.; заявитель и патентообладатель ОАО «НЛМК»; заявл. 26.07.2001; опубл. 10.10.2002, Бюл. № 28.

40. Патент 2212289 Российская Федерация, В21 В 1/28. Способ непрерывной холодной прокатки полос в многоклетевом стане / Настич В. П., Чернов П. П., При-

ходько И. Ю., Сафьян А. М., Акишин В. В., Парсенюк Е. А., Ракитин С. А., Долматов А. П., Рубанов В. П.; заявитель и патентообладатель ОАО «НЛМК»; заявл. 25.12.2001; опубл. 20.09.2003, Бюл. № 26.

41. Патент 2212962 Российская Федерация, В21 В 1/28. Способ холодной прокатки полос в непрерывном многоклетевом стане / Чернов П. П., Акишин В. В., Парсенюк Е. А., Скороходов В. Н., Приходько И. Ю., Сафьян А. М., Долматов А. П., Рубанов В. П.; заявитель и патентообладатель ОАО «НЛМК»; заявл. 25.12.2001; опубл. 27.09.2003, Бюл. № 27.

42. Патент 2212963 Российская Федерация, В21 В 1/28. Способ холодной прокатки полос в непрерывном многоклетевом стане / Чернов П. П., Приходько И. Ю., Сафьян А. М., Акишин В. В., Парсенюк Е. А., Долматов А. П., Рубанов В. П.; заявитель и патентообладатель ОАО «НЛМК»; заявл. 25.12.2001; опубл. 27.09.2003, Бюл. № 27.

43. Патент 2211102 Российская Федерация, В21 В 37/28. Устройство для измерения и регулирования плоскостности полос в процессе прокатки / Приходько И. Ю., Скороходов В. Н., Чернов П. П., Акишин В. В., Парсенюк Е. А., Сафьян А. М., Долматов А. П.; заявитель и патентообладатель ОАО «НЛМК»; заявл. 10.3.2002; опубл. 27.08.2003, Бюл. № 24.

44. Патент 2225272 Российская Федерация, В21 В 1/28. Способ холодной прокатки полос в многоклетевом стане / Приходько И. Ю., Настич В. П., Чернов П. П., Акишин В. В., Пименов В. А., Парсенюк Е. А., Сафьян А. М., Долматов А. П., Рубанов В. П.; заявитель и патентообладатель ОАО «НЛМК»; заявл. 30.5.2002; опубл. 10.03.2004, Бюл. № 7.

45. Патент 2236917 Российская Федерация, В21 В 1/22. Способ производства рулонного полосового проката / Приходько И. Ю., Скороходов В. Н., Настич В. П., Чернов П. П., Акишин В. В., Парсенюк Е. А., Тимошенко В. И., Долматов А. П., Синельников В. Н., Рубанов В. П.; заявитель и патентообладатель ОАО «НЛМК»; заявл. 08.09.2003; опубл. 27.09.2004, Бюл. № 27.

46. Патент 2338609 Российская Федерация, В21 В 37/00. Способ диагностики резонансной вибрации и управления многоклетевым станом холодной прокатки полос и устройство для его осуществления / Крот П. В., Приходько И. Ю., Парсенюк Е. А., Пименов В. А., Соловьев К. В., Долматов А. П., Акишин В. В., Шалахов С. Г.; заявитель и патентообладатель ОАО «НЛМК». – №2007100443/02; заявл. 09.02.2007; опубл. 20.12.2008, Бюл. № 32.

47. А. с. 1435332 СССР, МКИ В 21 В 1/22, 13/14. Способ прокатки полос / А. М. Сафьян, И. Ю. Приходько, В. Л. Мазур (СССР). – №4162662/23-02; заявл. 15.12.86; опубл. 07.11.88, Бюл. №4.

48. А. с. 1597242 СССР, МКИ В 21 В 1/22, 27/02. Комплект рабочих валков чистой клетки полосового стана и способ прокатки полос в рабочих валках чистой клетки полосового стана / И. Ю. Приходько, В. Л. Мазур, А. М. Сафьян, В. И. Ивашин (СССР). – №4453447/27-02; заявл. 04.07.88; опубл. 07.10.90, Бюл. №37.

49. А. с. 1643132 СССР, МКИ В 21 В 47/18. Способ размотки полосы из рулона перед дрессировочным станом / В. Н. Свириденко, Е. А. Парсенюк, А. М. Сафьян, В. Л. Мазур, В. В. Акишин, И. Ю. Приходько, Е. И. Булатников, С. С. Колпаков, Ю. А. Цуканов, А. И. Ульяничев, Г. И. Бугаков (СССР). – №4621653/27; заявл. 19.12.88; опубл. 23.04.91, Бюл. №15.

50. А. с. 1680396 СССР, МКИ В 21 В 27/02. Комплект валков клетки кварто не-

прерывного полосового стана холодной прокатки / И. Ю. Приходько, А. В. Ноговицын, А. М. Сафьян, В. Л. Мазур, В. В. Акишин, В. Н. Свириденко, Е. И. Булатников, С. С. Колпаков, Ю. А. Цуканов, Г. И. Бугаков (СССР). – №4646593/02; заявл. 19.12.88; опубл. 30.09.91, Бюл. №36.

51. А. с. 1713696 СССР, МКИ⁴ В 21 В 1/22. Узел валков прокатной клетки кварто полосового стана / И. Ю. Приходько, В. Л. Мазур, А. М. Сафьян, Б. П. Колесниченко, В. И. Ивашин, С. Г. Горбунков, А. И. Стариков, В. А. Масленников, В. П. Рузаков, Ю. А. Токарев, Т. В. Челенко (СССР). – №4762533/02; заявл. 27.189; опубл. 23.02.92, Бюл. №7.

52. А. с. 1667954 СССР, МКИ⁴ В21В 01/22. Способ холодной прокатки полос в клетки кварто / В. Д. Петров, И. Ю. Приходько, А. А. Кузьминов, В. П. Загреков, П. Б. Горелик (СССР). – №4731631/02; заявл. 28.08.89; опубл. 07.08.91, Бюл. № 29.

53. Приходько И. Ю. Изменение силовых параметров процесса высокоскоростной холодной прокатки тонких полос с подачей технологической смазки в условиях, приближающихся к пределу выкатываемости / И. Ю. Приходько, А. В. Ноговицын, А. М. Сафьян, С. Г. Горбунков // Труды 3-го конгресса прокатчиков, г. Липецк, 19 – 22 октября 1999 г. – М.: АО Черметинформация, 1999. – С. 209 – 221.

54. Приходько И. Ю. Влияние закономерности изменения контакта валков и полосы на тепловые условия холодной прокатки / И. Ю. Приходько, П. П. Чернов, А. М. Сафьян, В. В. Акишин // Труды 4-го конгресса прокатчиков, часть 1, г. Магнитогорск, 16 – 19 октября 2001 г. – М.: АО Черметинформация, 2002. – С. 221 – 225.

55. Воробей С. А. Моделирование температурного режима рабочих валков широкополосного стана горячей прокатки / С. А. Воробей, И. Ю. Приходько // Научные новости. Современные проблемы металлургии. Пластическая деформация металлов, том 8, г. Днепропетровск, 2005. – С. 232 – 235.

56. Приходько И. Ю. Управление тепловым профилем валков зонной подачей СОЖ / И. Ю. Приходько // Труды 5-го конгресса прокатчиков, г. Череповец, 21 – 24 октября 2003. – М.: АО Черметинформация, 2004. – С. 113 – 122.

57. Приходько И. Ю. Исследование влияния режимов смотки и отжига полос на условия слипания-сваривания витков рулонов / И. Ю. Приходько, П. П. Чернов, В. И. Тимошенко, В. В. Акишин // Труды 5-го конгресса прокатчиков, г. Череповец, 21 – 24 октября 2003. – М.: АО Черметинформация, 2004. – С. 152 – 155.

58. Приходько И. Ю. Оптимизация температурного и напряженно-деформированного состояния рулонов в ходе холодной прокатки и колпакового отжига с помощью компьютерного моделирования / И. Ю. Приходько, П. П. Чернов, В. И. Тимошенко, В. В. Акишин // Труды 5-го конгресса прокатчиков, г. Череповец, 21 – 24 октября 2003 г. – М.: АО Черметинформация, 2004. – С. 124 – 127.

59. Чернов П. П. Возможные решения задачи повышения скорости непрерывной холодной прокатки полос / П. П. Чернов, И. Ю. Приходько, П. В. Крот, Е. А. Парсенюк, В. А. Пименов, А. П. Долматов, В. В. Акишин // Труды 6-го конгресса прокатчиков, г. Липецк, 19 – 21 октября 2005. – М.: АО Черметинформация, 2005. – т. 2. – С. 152 – 158.

60. Приходько И. Ю. Исследование эффективности работы системы охлаждения валков ШСГП 2000 НЛМК / И. Ю. Приходько, С. А. Воробей, П. П. Чернов, М. Ю. Поляков, С. И. Мазур, А. Г. Савочкин // Труды 6-го конгресса прокатчиков,

г. Липецк, 19 – 21 октября 2005. – М.: АО Черметинформация, 2005. – т. 2. – С. 85 – 96.

61. Приходько И. Ю. Методология научно-технического аудита системы охлаждения валков широкополосного стана горячей прокатки / И. Ю. Приходько, С. А. Воробей, С. Е. Шатохин, С. А. Лебедев, И. В. Казаков // Труды 6-го конгресса прокатчиков, г. Липецк, 19 – 21 октября 2005 г. – М.: АО Черметинформация, 2005. – т.2. – С. 97 – 104.

62. Приходько И. Ю. Система контроля резонансных вибраций непрерывного стана холодной прокатки полос / И. Ю. Приходько, П. В. Крот, Е. А. Парсенюк, К. В. Соловьёв, П. П. Чернов, В. А. Пименов, А. П. Долматов, С. Г. Шалахов // Сб. трудов I-ой международной научно-практической конференции «ИНТЕХМЕТ-2008. Инновационные достижения и решения для совершенствования технологических процессов на предприятиях горно-металлургического комплекса», 9 – 10 сентября 2008. – Санкт-Петербург. – 2008. – С.397 – 404.

63. Крот П. В. Управление параметрами прокатки в условиях повышенных уровней вибрации клетей непрерывного стана / П. В. Крот, И. Ю. Приходько, Е. А. Парсенюк, П. П. Чернов, В. А. Пименов, А. П. Долматов, А. В. Харин // Сб. тр. Международной н-т конференции: «Теория и практика производства листового проката», 29 – 30 мая 2008. – Липецк: ЛГТУ. 2008. – С. 74 – 80.

Личный вклад автора в работах, опубликованных в соавторстве.

В монографии [1] автор по материалам собственных исследований и опубликованных в литературе материалов подготовил подразделы о критериях, методах расчёта обжатий и оптимизации процессов многопроходной прокатки (также в [3–5,13,24,25]), упругих деформациях валковых узлов с учётом изменения взаимной ориентации валков, о компьютерных системах расчёта параметров и оптимизации процесса холодной прокатки (также [3–5]), а также прогнозирования и управления поперечным профилем и формой полос (также [6]), о методах профилирования валков [7], в соавторстве – о развитии способов прокатки с перекрещиванием [6,47] и осевой сдвижкой валков [2, 6,48,51]. В работах [8,14,16] автору принадлежит математическое описание совмещенного управления толщиной, натяжением и плоскостностью полос с учётом скоростных возможностей исполнительных устройств, обоснование выбора базовых зависимостей. В работах [19–23,30,31,38–42,56,60] – автору принадлежат основные концептуальные решения задачи повышения эффективности систем управления плоскостностью полос селективным охлаждением валков. В работах [33,36,37,44,46,59,62,63] – разработка методов надёжного обнаружения опасных в динамическом отношении ситуаций и алгоритмов управления скоростью непрерывного стана холодной прокатки. В работах [30–32,43,56] – разработка методов и алгоритмов управления плоскостностью полос с учётом данных о температуре. В работах [26,34,45,57,58] – теоретическое обоснование, создание математических моделей, а также участие в проведении экспериментальных исследований и анализ полученных результатов, формулирование и количественное описание механизма влияния шероховатой поверхности, температурных эффектов прокатки и смотки и их влияние на плоскостность и состояние поверхности полос [58]. В работах [38–52] – разработка основных отличительных признаков технических решений.

АНОТАЦІЯ

Приходько І.Ю. Розвиток і реалізація технології, методів розрахунку й управління параметрами процесів виробництва холоднокатаних штаб із високою площинністю та якісною поверхнею. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.03.05 – “Процеси та машини обробки тиском”. – Державний вищий навчальний заклад “Донецький національний технічний університет”, Донецьк, 2010.

У дисертації вирішена актуальна науково-технічна проблема створення й реалізації методів стабільного забезпечення поліпшених показників площинності й стану поверхні тонких холоднокатаних сталевих штаб в умовах їх масового виробництва на високошвидкісних промислових станах на основі встановлених нових закономірностей впливу на зазначені показники якості основних факторів процесів, температурних і динамічних ефектів.

Результати роботи впроваджені у виробничу практику у вигляді нових технічних рішень, технологічних і організаційних заходів, у комплексі комп'ютерних систем для інженерних розрахунків і автоматизованого проектування, а також у діючих системах управління якістю – системі контролю вібрації й управління швидкістю безперервних станів холодної прокатки й першій створеній в СНД системі автоматичного регулювання площинності штаб нового покоління з використанням безконтактних методів виміру температури й площинності штаб.

Ключові слова: холоднокатаний штабовий прокат, температурні ефекти, системи управління, напружений стан, валки, рулони, показники якості: точність, площинність, стан і дефекти поверхні.

АННОТАЦИЯ

Приходько И.Ю. Развитие и реализация технологии, методов расчёта и управления параметрами процессов производства холоднокатаных полос с высокой плоскостностью и качественной поверхностью. – Рукопись.

Диссертация на соискание научной степени доктора технических наук по специальности 05.03.05 – Процессы и машины обработки давлением. – Государственное высшее учебное заведение “Донецкий национальный технический университет”, Донецк, 2010.

В диссертации решена актуальная научно-техническая проблема создания и реализации методов стабильного обеспечения улучшенных показателей плоскостности и состояния поверхности тонких холоднокатаных стальных полос в условиях их массового производства на высокоскоростных промышленных станах на основе установленных новых закономерностей влияния на указанные показатели качества основных факторов процессов, температурных и динамических эффектов.

Температурные эффекты. Установлено количественное влияние температурных эффектов, сопровождающих высокоскоростные процессы производства холоднокатаных полос, а именно – влияние полей температур, формируемых в полосе в процессах прокатки, на плоскостность готовой продукции; влияние закономерностей изменения температуры при смотке холоднокатаных полос на напряженное со-

стояние рулонов и формирование дефектов поверхности полос; влияние закономерностей изменения температурно-скоростных, деформационно-силовых параметров процесса непрерывной холодной прокатки на условия теплоотвода и эффективность управления плоскостностью полос селективным охлаждением рабочих валков в последней клети стана.

Новые общие закономерности и механизмы. Установлены новые общие закономерности процесса холодной прокатки в отдельной клети и непрерывной группе, доказывающие альтернативный характер условий осуществления процесса холодной прокатки тонких полос с минимальной силой или мощностью. Впервые получил количественное выражение механизм влияния величины шероховатости поверхности холоднокатаной полосы на формирование дефектов поверхности полос, связанных со слипанием витков в рулоне в процессе отжига, а также проскальзыванием витков при размотке рулонов.

Новые методы расчёта. Разработан метод расчёта напряжения течения материала полосы в процессе прокатки, наиболее точно учитывающий немономонные сложные зависимости реологических свойств металлов и сплавов от факторов деформирования в различном их сочетании, базирующийся на интер- и экстраполяции многомерных отдельных массивов экспериментальных данных, полученных с различной дискретностью. Разработана трёхмерная модель упруго-напряжённого состояния рулона после смотки и в процессе высокотемпературной обработки, учитывающая исходные неизотермические условия смотки полосы. Разработаны новые критерий, метод оптимизации деформационных режимов многопроходной прокатки, метод расчёта технологических параметров непрерывной прокатки по параметрам настройки стана, метод расчёта температурных условий прокатки, теплового состояния и теплового профиля валков, учитывающие полноту контакта полосы и валков в ОД, а также фактические условия их охлаждения, определённые с использованием оригинального метода определения следов воздействия форсунок. Метод расчёта параметров вертикальных колебаний элементов клети кварто с прогнозированием условий их лавинообразного развития, а также критерий предельно опасного в динамическом отношении состояния непрерывного стана.

Новые средства компьютерного моделирования. Разработан комплекс из 10-ти компьютерных систем для инженерных расчётов параметров и оптимизации процессов прокатки, смотки, отжига рулонов, дрессировки полос и управления тепловым состоянием валков, являющихся эффективным инструментом для научных исследований процессов, проведения научно-технических аудитов технологии и оборудования, а также решения актуальных практических задач.

Новые системы автоматического управления процессами прокатки. Разработаны и внедрены в постоянную промышленную эксплуатацию система контроля вибрации и автоматического управления скоростью непрерывного стана холодной прокатки 2030 ОАО «НЛМК» в зависимости от уровня и закономерностей развития опасных вибраций, а также первая созданная в СНГ система автоматического управления плоскостностью полос на дрессировочном стане 2030 ОАО «НЛМК» с

использованием бесконтактных методов измерения плоскостности и температуры полос с достижением эффекта термоправки после остывания.

Новые элементы технологии, технические решения и их эффективность. Разработан и внедрён в промышленное производство комплекс новых запатентованных технических и технологических решений, обеспечивших улучшение плоскостности, состояние поверхности полос, стабильность процесса прокатки, а также освоение новых видов продукции с суммарным подтверждённым экономическим эффектом 2274 тыс. грн. (доля автора). Дополнительно определён ожидаемый экономический эффект в размере 3210 тыс. грн. (доля автора).

Ключевые слова: холоднокатаный полосовой прокат, температурные эффекты, системы управления, напряжённое состояние, валки, рулоны, показатели качества: точность, плоскостность, состояние и дефекты поверхности.

ABSTRACT

Igor Yu. Prykhodko. Technology, Calculation Methods and Parameters Control Development and Implementation for the Production Processes Dedicated to Manufacturing Cold-Rolled Strips of High Flatness and High Quality of Surface. – Manuscript.

Doctoral Thesis on the specialist field “Processes and Machines for Pressure Shaping”. The State higher educational institution “Donetsk National Technical University”, Donetsk, 2010.

The Doctoral Thesis resolves the scientific and engineering problem of current interest: development and implementation of methods for stable ensuring enhanced surface state and flatness for thin cold-rolled steel strips under condition of mass production at industrial high-speed rolling mills, basing on established new laws reflecting the influence of the process parameters variation, temperature and dynamics effects.

Results of this work are implemented into industry practice in the form of new technical solutions, technological and institutional arrangements as a complex of computer systems for engineering computer-aided design and calculations, as well as in the actual quality control systems, vibration and speed control system for continuous strips cold-rolling mills, and in the new-generation automatic flatness control system, which uses noncontact methods of strips temperature and flatness measurement being the first system of such kind in CIS countries.

Keywords: strip steel cold-rolled stock, thermal effects, control systems, stress condition, rolls, coils, quality factors: accuracy, flatness, surface state and defects.