М298675

НА ДОМ НЕ ВЫДАЕТСЯ

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ СССР

М О С К О В С К О Е

ордена Ленина и ордена Трудового Красного Знамени высшее техническое училище имени Н.Э.Баумана

ГАРБЕР Эдуард Александрович

На правах рукописи

ТЕОРИЯ УПРАВЛЕНИЯ ТЕПЛОВЫМ РЕЖИМОМ СТАНОВ ХОЛОДНОЙ ПРОКАТКИ

05.03.05 - Технология и машины обработки давлением

А в т о р е ф е р а т

диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук

Москва - 1976

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ СССР

МОСКОВСКОЕ

ордена Ленина и ордена Трудового Красного Знамени высшее техническое училище имени Н.Э.Баумана

ГАРБЕР Эдуард Александрович

На правах рукописи

ТЕОРИЯ УПРАВЛЕНИЯ ТЕПЛОВЫМ РЕЖИМОМ СТАНОВ ХОЛОДНОЙ ПРОКАТКИ

05.03.05 - Технология и машины обработки давлением

1129861-45

А в т о р е ф е р а т

диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук

Москва - 1976

НТБ МГТУ им. Н.Э. Баумана
1298675
Гарбер Э.А. Теория управле

Работа выполнена на Уралмашзаводе, в Северо-Западном заочном политехническом институте и на металлургических заводах СССР

Официальные оппоненты:

профессор доктор технических наук Татарин П.К.

профессор доктор технических наук Железнов Ю.Д.

профессор доктор технических наук Коздоба Л.А.

Ведущее предприятие: завод "Запорожсталь"

Защита состоится _____

на заседании Специализированного совета № Д-33/5 по защите докторских диссертаций при МВТУ им. Н.Э.Баумана по адресу г.Москва 107005, 2-я Бауманская, д.5

Ваши отзывы в 2-х экземплярах, заверенные печатью, просим высылать по указанному адресу.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МВТУ им. Н.Э.Баумана.

Автореферат разослан . . . . . 1976 г.

Ученый секретарь специализированного Совета

МЛ-137803

Подп. к печати 18.II.76 Тип.МВТУ Зак. 1997 Тираж 100 экз.

МВТУ им. Н.Э. Баумана БИБЛИОТЕКА

ФУНДАМЕНТАЛЬНАЯ

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. XXУ съезд КПСС поставил задачу увеличить в I0-й пятилетке в I,5-2 раза выпуск эффективных видов металлопродукции, в том числе холоднокатаного листового проката; кроме того, за счет улучшения качества и расширения сортамента проката намечено сэкономить в 1980 г. 5-6 млн т металла.

Для решения этих важных задач необходимо дальнейшее совершенствование конструкции современных станов холодной прокатки и технологического процесса производств на этих станах тонких полос и листов высокого качества.

Одним из важнейших факторов, определяющих эффективность производства и качества продукции станов холодной прокатки, является их тепловой режим. Проблема управления тепловым режимом станов холодной прокатки (в том числе - тепловым профилем их валков) является весьма актуальной, так как от её решения зависят повышение производительности и скорости прокатки, стабильность параметров технологического процесса, планшетность проката и стойкость основного инструмента - прокатных валков.

При конструировании на Уралмашзаводе новых высокопроизводительных станов холодной прокатки возникла необходимость разработки научно обоснованных рекомендаций для определения параметров систем их охлаждения и, прежде всего, расхода охлаждающей жидкости, обеспечивающего поддержание стабильного теплового режима и заданного теплового профиля валков. Кроме того, в связи с задачей комплексной автоматизации станов, необходимо было разработать технологические основы управления тепловым режимом, сформулировать технические требования к средствам контроля температуры и теплового профиля валков и расхода охлаждающей жидкости, а также к системам управления этими параметрами. Указанные вопросы не были освещены с достаточной полнотой ни в отечественной, ни в зарубежной литературе.

Цель исследования. Целью исследования являлась разработка технологических основ теории управления тепловым режимом станов холодной прокатки. Конкретно решались следующие задачи:

I. Разработка комплекса математических моделей теплового режима станов холодной прокатки и дрессировки тонких полос, включающих расчёт, на основе теплового баланса, в функции технологических параметров, следующих переменных во времени тепловых параметров:

- температура прокатываемой (дрессируемой) полосы по пропускам;
- температура и тепловой профиль рабочих и опорных валков
- расход охлаждающей жидкости в единицу времени, с учётом её теплофизических свойств и конструкции устройств для распределения её по длине бочки валков.

2. Реализация разработанных математических моделей в расчётно-конструкторской практике КБ, НИИ и заводов, в том числе - с применением ЭЦВМ, теоретическое исследование моделей при изменении в широком диапазоне технологических и конструктивных параметров прокатных и дрессировочных станов, разработка на этой основе технических требований к системам охлаждения, контроля и регулирования теплового режима вновь проектируемых станов.

3. Исследование теплового режима и технологии теплового профилирования валков на действующих станах, в сочетании со смежными методами профилирования - принудительным изгибом валков и их предварительной калибровкой; проверка и уточнение разработанной теории, разработка технологических основ оптимального сочетания разных методов профилирования.

4. Разработка, промышленная проверка и внедрение на действующих станах средств контроля параметров теплового режима и систем управления тепловой профилировкой валков.

Методы исследования. При разработке математической модели теплового режима использован метод совместного решения системы уравнений теплового баланса процесса холодной прокатки с уравнением теплопроводности прокатных валков, а также метод электротепловой аналогии. Сочетание этих двух методов позволило довести до численной реализации задачу расчёта нестационарного температурного поля и переменных тепловых деформаций валков, с

учётом реальной конфигурации их бочки и шеек, исходя из режимов прокатки и конструктивных параметров стана.

Теоретическое исследование модели теплового режима осуществлялось на ЭЦВМ путем варьирования в широком диапазоне технологических возмущений и управляющих воздействий.

Проверка расчётных результатов осуществлялась, путем широких экспериментальных исследований на действующих станах, при одновременной синхронной записи технологических и тепловых параметров, а также на лабораторных моделях.

Научная новизна. Для определения температурных полей и тепловых деформаций прокатных валков в радиальной плоскости использовано уравнение теплопроводности цилиндра с граничными условиями первого рода в виде ломаной линии, угловые коэффициенты отрезков которой заранее не известны. Определение этих угловых коэффициентов осуществляется путем решения для каждого отрезка ломаной (начиная с первого) системы уравнений теплового баланса, связывающей конструктивные параметры стана и режимы прокатки (дрессировки) с параметрами его теплового режима и системы охлаждения. В результате последовательных решений этой сиотемы вычисляются значения температуры полосы, рабочих и опорных валков в середине бочки, переменные во времени. Переход к крайним участкам бочки осуществляется на основе зависимостей, полученных методом электрического моделирования. В результате впервые в теории и практике листовой прокатки разработана математическая модель, связывающая технологические возмущения (переменные режимы прокатки) и управляющие воздействия (расход и температуру охлаждающей жидкости) с управляемыми параметрами теплового режима станов холодной прокатки (дрессировки) – переменными во времени температурой и тепловым профилем валков, а также температурой полосы по пропускам.

На основе исследования разработанной модели установлены не известные ранее закономерности теплового режима станов холодной прокатки и дрессировки: зависимости параметров теплового режима от скорости, диаметров валков, температуры подката, охлаждающей жидкости, окружающей среды и подшипников, интенсивности конвективного и контактного теплообмена полосы и валков, режимов прокатки. Установлен непараболический характер формы кривой теплового профиля валков.

Практическая ценность. В результате проведенных исследований разработана система автоматизированной подачи эмульсии (САПЭ) для теплового профилирования валков станов холодной прокатки, в которой реализован способ управления, защищенный авторским свидетельством на изобретение № 275961. САПЭ впервые в СССР внедрена на действующем 4-х клетевом стане 1700, а также в проектах ряда новых станов, разработанных Уралмашзаводом. В составе САПЭ введены в эксплуатацию датчики стационарного контроля температуры валков (ДТВ-УЗТМ).

Внедрение и промышленное освоение САПЭ позволило повысить производительность действующего стана и уменьшить отсортировку холоднокатаных листов по дефектам формы.

Разработаны, испытаны и внедрены на нескольких станах ССС новые калибровки рабочих и опорных валков, компенсирующие несоответствие формы кривых тепловых и упругих деформаций. Калибровка опорных валков защищена авторским свидетельством на изобретение № 381436. С внедрением новых калибровок повысился уровень стабилизации технологических процессов, уменьшились отсортировка листов по дефектам формы и расход валков. Общий экономический эффект от внедрения результатов работы в производство, подтвержденный предприятиями, составил 800 тыс. руб. в год.

Ряд результатов работы внедрен в расчётно-конструкторскую практику НИИ, КБ и заводов: на Уралмашзаводе внедрен руководящий материал по расчёту теплового режима и мощности систем охлаждения станов холодной прокатки; на Ждановском металлургическом заводе им. Ильича внедрен руководящий материал по расчёту теплового режима дрессировочных станов; Институт проблем управления АН СССР принял математическую модель теплового профиля валков в качестве технологической основы алгоритма управления тепловой профилировкой в АСУ ТП с УВМ, разрабатываемой для ряда станов холодной прокатки.

Апробация работы. Результаты работы многократно докладывались на конференциях (Всесоюзная конференция по валкам холодной прокатки, Москва, ЦНИИТМАШ, 1966 г., II, III, IУ и У (межвузовская) конференции НТО ордена Ленина Череповецкого металлургического завода и Череповецкого филиала СЗПИ 1971-1975 гг., республиканская конференция "Точная прокатка" в г. Донецке, 1972 г. и др.) на научно-технических советах и научных семинарах конструкторского отдела Уралмашзавода, лаборатории пластических деформаций

Государственного научно-исследовательского института машиноведения, кафедр пластической обработки металлов, машин и технологии обработки металлов давлением Ленинградского политехнического института им. М.И.Калинина, ЦЗЛ Ждановского завода им.Ильича и других организаций.

Основное содержание работы опубликовано в 4-х книгах, выпущенных издательствами "Металлургия" и "Машиностроение", в более чем 40 статьях, напечатанных в центральных журналах и научно-технических сборниках.

Объем работы. Диссертация изложена на 294 страницах машинописного текста, содержит введение, шесть глав и общие выводы, включает, кроме текста, 166 рисунков, 19 таблиц, 65 стр. приложений и список литературы из 128 наименований.

ВВЕДЕНИЕ

Проблема улучшения качества холоднокатаной листовой стали и повышения технико-экономической эффективности её производства является многогранной и зависит от целого ряда взаимосвязанных факторов: конструктивных параметров оборудования, оснащенности его контрольно-измерительными приборами и средствами автоматизации, качества подката, научно-обоснованного выбора оптимальных технологических режимов, точности настройки, мастерства обслуживающего персонала и т.д.

За последнее десятилетие в производстве тонких полос и листов в СССР достигнуты определенные успехи: введены в действие новые автоматизированные станы, улучшена технология, освоены более высокие скорости прокатки, повысилось качество металла, освоено производство листов с суженными допусками, по I-й группе отделки поверхности. Тем не менее отсортировка листов, имеющих отклонения от заданных показателей качества и точности, еще весьма существенна. Разработанные и введенные в действие с 1972 года новые стандарты на листовую сталь предусматривают еще более высокие требования к штампуемости листа, его плоскостности и качеству поверхности. Ряд отраслей промышленности, потребляющих листовую продукцию, выдвигает перспективные требования, в которых обосновывается необходимость сужения не менее чем в 2 раза допусков на неплоскостность, предусмотренных действующими ГОСТами. Для выполнения этих требований должен быть достигнут еще более высокий уровень стабилизации технологии на всех

переделах и оптимизации управления режимами работы оборудования

Решение этих весьма сложных задач вызывает необходимость дальнейшего развития теоретических и экспериментальных исследований технологии и оборудования листопрокатного производства, совершенствования методов моделирования и управления процессами прокатки.

Теория тонколистовой прокатки базируется на основных положениях теории пластичности и обработки металлов давлением, получившей свое развитие в трудах крупнейших советских ученых А.И.Целикова, А.П.Чекмарева, И.М.Павлова, В.С.Смирнова, А.А.Ильюшина, В.П.Северденко, П.И.Полухина, А.А.Королева, А.Д.Томленова, И.Я.Тарновского, К.Н.Шевченко и других.

Большой вклад в развитие теории, совершенствование технологии листовой прокатки и методов расчёта листопрокатного оборудования внесли советские и зарубежные учёные Н.Н.Дружинин, Е.С.Рокотян, А.В.Третьяков, И.М.Меерович, М.М.Сафьян, П.И.Грудев, В.Н.Выдрин, Н.П.Громов, В.П.Полухин, Ю.Д.Железнов, М.А.Беняковский, Е.М.Третьяков, Е.К.Ларке, В.К.Пирсон и многие другие.

Однако в теории и практике листопрокатного производства имеется ряд нерешенных проблем, сдерживающих дальнейшее улучшение качества, повышение точности проката и стабилизацию технологических режимов, препятствующих увеличению скоростей прокатки и производительности станов.

К их числу относится проблема управления тепловым режимом станов холодной прокатки и дрессировки тонких полос. Колебания температуры полосы и валков, вызываемые целым рядом причин, приводят к нестабильности механических свойств по длине и ширине полосы, к изменениям профиля валков и неравномерности их износа, увеличивают отсортировку листов по дефектам формы – коробоватости, волнистости и серповидности. Изменение условий нагрева и охлаждения валков, недостаточное количество охлаждающей жидкости могут вызывать перегревы и преждевременный выход валков из строя.

Эффективность современных быстродействующих систем регулирования размеров и формы полосы также во многом зависит от стабильности теплового режима стана и профиля прокатных валков. Колебания тепловой составляющей профиля вносят дополнительные возмущения в работу этих систем, ухудшают качество их настройки, влияют на коэффициенты усиления регуляторов. Для стабилиза-

ции и совершенствования теплового режима необходимо исследовать зависимости его от конструктивных и технологических параметров станов: скорости прокатки, режимов обжатий, диаметров валков, профилеразмера и механических свойств проката, расхода, температуры и теплофизических свойств охлаждающей жидкости и др. Диапазоны исследуемых параметров должны быть достаточно широкими, чтобы охватывать не только действующие, но и вновь проектируемые станы с более высокими скоростями и интенсивными режимами прокатки. Такое исследование можно осуществить лишь на основе математического описания закономерностей теплового баланса стана и формирования теплового профиля его валков.

Однако такое математическое описание в технической литературе отсутствовало. Достаточно указать, что до середины 60-х годов не имелось научно обоснованной методики определения расхода жидкости, охлаждающей валки и полосу, необходимого для стабильной работы стана холодной прокатки. Отсутствовали методы расчёта температуры полосы и валков в функции режимов холодной прокатки. Известные методы теплового расчёта станов горячей прокатки (М.И.Сафьян, Ю.Д.Железнов, Б.А.Цифринович, Ю.В.Коновалов, А.Н.Шичков и др.) использовать для станов холодной прокатки было невозможно, так как температура валков этими методами либо вообще не вычислялась, либо определялась в зависимости от известной температуры полос. Характерная особенность процессов при холодной прокатке состоит в том, что температура полосы заранее не известна, она взаимосвязана с температурой валков и обе эти температуры определяются, главным образом, режимами прокатки и охлаждения. Поэтому для разработки технологических основ теории управления тепловым режимом станов холодной прокатки требовался принципиально иной подход.

В данной работе изложены результаты теоретических и экспериментальных исследований температурного режима, теплового баланса и теплового профиля валков станов холодной прокатки и дрессировки тонких полос, выполненных автором в 1964-1976 гг. в инженерно-конструкторской лаборатории прокатных станов НИИТяжМаша Уралмашзавода под руководством доктора технических наук профессора А.В.Третьякова и в Череповецком филиале Северо-Западного политехнического института (СЗПИ) в качестве руководителя и ответственного исполнителя ряда научно-исследовательских работ, проводившихся на Череповецком, Ждановском им. Ильича и других металлургических заводах.

Разработка и исследование комплекса математических моделей теплового режима станов холодной прокатки и дрессировки, а также экспериментальные исследования, представленные в диссертации, позволили расширить и углубить существовавшие представления о тепловых процессах и формировании профиля валков при тонколистовой прокатке, усовершенствовать конструкцию и технологические режимы действующих станов, разработать новые станы с более высокими технико-экономическими показателями, повысить качество проката.

ГЛАВА I. НЕСТАБИЛЬНОСТЬ ПАРАМЕТРОВ ТОНКОЛИСТОВЫХ СТАНОВ И ПРОФИЛЬ ПРОКАТНЫХ ВАЛКОВ

Характерной особенностью процессов прокатки и дрессировки на современных тонколистовых станах является противоречие между растущими требованиями к стабилизации основных контролируемых показателей качества проката – механических свойств, отделки поверхности, толщины, профиля, планшетности – и возрастающей нестабильностью ряда существенных параметров технологии.

Рост нестабильности обусловлен увеличением производительности, интенсификацией режимов прокатки и разнообразием сортамента, расширяющегося по мере освоения новых марок сталей и профилеразмеров готовой продукции, а также прерывным характером производства, особенно на прокатных переделах.

Результаты комплексного анализа нестабильности размеров и формы тонколистового проката, постановка и решение задачи их стабилизации путем управления исполнительными механизмами станов наиболее полно изложены в работах Н.Н.Дружинина, И.М.Мееровича и Ю.Д.Железнова. Выполненные отечественными и зарубежными учеными работы по уменьшению нестабильности параметров и повышению точности проката внесли крупный вклад в совершенствование технологии, оборудования и методов управления процессами тонколистовой прокатки. Так, в СССР в результате разработки ВНИИМЕТМАШа, Уралмашзавода, Института стали и сплавов и других организаций были созданы и внедрены системы автоматического регулирования толщины (САРТ), профиля и формы полос (САРПФ), которые уменьшили отсортировку металла по толщине и неплоскостности, позволили увеличить производительность оборудования.

Однако современное развитие производства тонколистового проката, повышение требований к его точности и качеству, к уровню автоматизации станов выдвигают задачу дальнейшего изучения факторов нестабильности технологии и особенностей работы станов как объектов управления точностью и качеством полос.

Важная особенность производства тонких полос и листов в современных цехах холодной прокатки, ранее мало изученная, заключается в том, что нестабильность технологических параметров на предшествующих переделах окончательно проявляется в виде отсортировки листов в пониженные сорта и группы по различным причинам после заключительной технологической операции – дрессировки, которая, таким образом, служит своеобразным критерием существенности того или иного отклонения от заданной технологии.

Практикой работы и специальными исследованиями установлены весьма узкие пределы оптимальных обжатий при дрессировке малоуглеродистой конструкционной стали: $\varepsilon = 0{,}8\text{–}1{,}2\%$. Соблюдение этого диапазона обжатий позволяет обеспечить металлу наилучшие пластические свойства, но в то же время существенно ограничивает возможности управления плоскостностью полос во время дрессировки.

В результате экспериментальных и статистических исследований работы дрессировочного стана 1700 Ждановского завода им. Ильича установлено, что при отсутствии систем стабилизации вытяжек по длине и ширине полосы вероятность дрессировки в указанном диапазоне обжатий плоских полос, не имеющих дефектов формы, составляет лишь 40–80%. Стремление поддержать заданное обжатие вступает в противоречие с задачей обеспечения плоскостности полосы. Наибольшее влияние на нестабильность обжатия и неплоскостность дрессируемых полос оказывают: колебания толщины, скорости и механических свойств по длине подката, зависящие от нестабильности технологии выплавки и разливки стали, её горячей и холодной прокатки, широкий диапазон значений жесткости профиля дрессируемых полос различного сортамента, неплоскостность подката, износ валков и колебания их теплового профиля. Исследования показали, что эффективная компенсация отклонений от заданного профиля валков, вызванных неравномерным износом и нагревом по длине бочки, невозможны с помощью имевшихся на станах средств и методов управления технологическим процессом.

Выполненные в 1970–1972 гг. массовые измерения профиля

изношенных рабочих и опорных валков 4-х клетевых и дрессировочных станов 1700 цехов холодной прокатки и чистовых непрерывных групп 1700 цехов горячей прокатки Череповецкого и Ждановского металлургических заводов позволили установить общую для большинства валков закономерность: наличие местных выработок в пределах ширины полосы на расстояниях 50-200 мм от боковых кромок. Указанная неравномерность выработки, являющаяся существенным фактором нестабильности технологии, не находила объяснения с помощью известных моделей процесса тонколистовой прокатки, в связи с чем не имелось научно обоснованных рекомендаций для ее уменьшения и устранения.

Помимо неравномерности выработки, износ опорных валков является одной из главных причин, обуславливающих периодичность изменения шлифовочного профиля рабочих валков, даже при прокатке полос одного профилеразмера. Это требует наличия большого парка валков перед станом, снижает его производительность и увеличивает расход валков. Поэтому одной из важных задач по стабилизации процессов прокатки является разработка методов автоматической компенсации выработки опорных валков в течение каждой кампании их работы.

Тепловая составляющая профиля валковой системы, а отличие от выработки, существенно изменяется в пределах одной кампании рабочих валков, нарушая стабильность режимов прокатки и ухудшая форму полосы.

В период с 1965 по 1972 гг. нами были исследованы тепловые режимы станов холодной прокатки "740" и "425" Новосибирского завода им. Кузьмина, 4-х клетевых и дрессировочных 1700 Череповецкого и Ждановского им.Ильича металлургических заводов, пятиклетевого 1200 Магнитогорского комбината, а также чистовых непрерывных групп 1700 станов горячей прокатки листопрокатных цехов Череповецкого и Ждановского заводов.

В результате установлено, что динамика температурного режима и теплового профиля валков при прокатке и дрессировке является одним из существенных факторов нестабильности технологии; при этом наибольшее влияние на колебания температуры валков оказывают колебания скорости прокатки и температуры подката. На основании проведенных исследований было доказано, что управление тепловым режимом станов холодной прокатки путем

регулируемой подачи охлаждающей жидкости является необходимым элементом комплексного управления технологическим процессом. Однако в конструкции отечественных станов, выпускавшихся до середины 60-х годов, не предусматривались не только системы автоматического или дистанционного управления тепловым режимом, но даже средства контроля расхода жидкости и температуры валков. Управление тепловым режимом стана осуществлялось вручную, чисто эмпирически и полностью зависело от опыта и мастерства вальцовщиков. Расход охлаждающей жидкости назначался при конструировании станов приближенно, без учёта реального количества отводимого тепла. В результате мощность эмульсионных систем охлаждения в одних случаях оказывалась неоправдано завышенной, а в других - недостаточной для работы стана на проектных режимах и поддержания стабильного профиля валков.

В связи с изложенным, в данной работе была поставлена научно-техническая проблема разработки технологических основ теории управления тепловым режимом станов холодной прокатки и дрессировки тонких полос, а также практических рекомендаций по совершенствованию конструкции систем охлаждения и других узлов оборудования станов, связанных с регулированием температуры и теплового профиля валков.

ГЛАВА II. РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ТЕПЛОВОГО БАЛАНСА ПРОЦЕССОВ ХОЛОДНОЙ ПРОКАТКИ И ДРЕССИРОВКИ

Целесообразность математического моделирования нестационарных тепловых явлений при холодной прокатке и дрессировке определяется их большой сложностью, зависимостью от многих факторов технологии и невозможностью осуществить непосредственный стационарный контроль таких важных показателей теплового режима, как температура полосы по пропускам, тепловые деформации рабочих и опорных валков, интенсивность их теплообмена с полосой, окружающей средой, охлаждающей жидкостью и т.д.

Основное допущение, принятое при моделировании, заключалось в том, что температурные поля рабочих и опорных валков j-й рабочей клети K-клетевого стана $t_{pj}(\rho,\tau)$ и $t_{onj}(\rho,\tau)$ (где $\rho=\frac{z}{R}$ -безразмерный радиус, z -текущий радиус, R -радиус бочки, τ - время) в любом радиальном сечении являются осесимметричными, с граничными условиями на поверхности бочки

$$t_{pj}(1,\tau)-\varphi_{pj}(\tau)\ ;\quad t_{onj}(1,\tau)-\varphi_{onj}(\tau)\ , \tag{I}$$

выражения которых заранее не известны, так как они являются сложными функциями режимов прокатки и температуры полосы на входе и выходе из клети t_{nj}, t_{kj}. Последняя, в отличие от стана горячей прокатки, также заранее не известна, так как она обычно возрастает при прохождении полосы через каждую рабочую клеть и уменьшается в межклетевых промежутках.

Полагая, что функции (I) с любой заданной точностью могут быть аппроксимированы ломаными, они были представлены в виде:

$$t_{pj}(1,\tau_n)-\varphi_{pj}(\tau_n)-t_{pнач\,j}+\sum_{i=0}^{n-1}C_i(\tau_n-\tau_i)\ ,$$

$$t_{onj}(1,\tau_n)-\varphi_{onj}(\tau_n)-t_{oпнач\,j}+\sum_{i=0}^{n-1}C_{i_{on}}(\tau_n-\tau_i)\ , \tag{2}$$

где $t_{pнач\,j}$ и $t_{oпнач\,j}$ – начальная температура валков в момент времени τ_0, постоянная по сечению;

$\tau_i-(i=1\div n)$– абсцисса конца i-го отрезка ломаной – графика $\varphi_{pj}(\tau)$ или $\varphi_{onj}(\tau)$;

$C_i, C_{ion}\ [i=0\div(n-1)]$– изменение углового коэффициента графика поверхностной температуры (град/ч) при переходе от i-го отрезка времени к смежному $(i+1)$-му.

Помимо основного допущения, установили, что тепловой баланс в средней части бочки (на длине $\Delta L=\frac{2}{3}B$, где L –длина бочки, B – ширина полосы) можно рассматривать в радиальной плоскости, без учёта осевого потока тепла. Учёт осевого потока, необходимый для моделирования теплового профиля, произвели независимо от радиального поля (см. гл. IУ), представив тем самым сложную объёмную модель как суперпозицию двух плоских моделей.

В диссертации приведено детальное особнование вышеуказанных допущений.

Для решения задачи составили в самом общем виде систему трех уравнений теплового баланса в радиальной плоскости j-й рабочей клети на участке длиной ΔL в средней части бочки за промежуток времени $\Delta\tau_n=\tau_n-\tau_{n-1}$, соответствующий n-му отрезку ломаных (I), предполагая, что все параметры баланса в начале промежутка (τ_{n-1}) известны, а в конце

(τ_n) – подлежат определению. Выразив составляющие теплового баланса полосы, рабочего и опорного валков через энергосиловые, технологические и конструктивные параметры прокатки (дрессировки), определили количество тепла, расходуемого на изменение температурного поля валков $(\Delta Q_p\ ,\ \Delta Q_{on})$,проинтегрировав по радиусу количество тепла, расходуемого за время $\Delta\tau_n$ на изменение температуры тонкого кольцевого слоя валка радиуса $z = \rho R$ и толщиной $dz = d\rho R$ (R -радиус бочки).

В результате получили:

$$\Delta Q_{p(on)} = \frac{\pi D^2_{p(on)}}{2}\cdot\gamma_в\cdot c_в\left[C_{n-1(on)}\cdot\Phi_{p(on)}(\tau_n-\tau_{n-1})+\right.$$
$$\left.+\sum_{i=0}^{n-2}C_{i(on)}\Psi_{p(on)}(\tau_n-\tau_i)\right], \qquad (3)$$

где $\gamma_в$ и $c_в$ – плотность и удельная теплоёмкость валков, $\Phi_{p(on)}(\tau_n)$ и $\Psi_{p(on)}(\tau_n)$ – функции теплосодержания, зависимости которых от конструктивных параметров валков и коэффициента их температуропроводности a имеют следующий вид:

$$\Phi_{p(on)}(\tau_n) = \frac{1-\kappa^2_{p(on)}}{2}\tau_n + \frac{1}{16(a/D^2_{p(on)})}\left[\frac{1-\kappa^4_{p(on)}}{4}-\right.$$
$$\left.-\frac{1-\kappa^2_{p(on)}}{2}+\kappa^2_{p(on)}\cdot\left(\kappa^2_{p(on)}\ln\kappa_{p(on)}+\frac{1-\kappa_{p(on)}}{2}\right)\right]+$$
$$+\frac{1}{4(a/D^2_{p(on)})}\cdot\sum_{l=1}^{m}A_{\nu_l}\cdot exp\left(-\frac{4a}{D^2_{p(on)}}\cdot\nu_l\tau_n\right);$$

$$\Psi_{p(on)}(\tau_n) = \frac{1-\kappa^2_{p(on)}}{2}\cdot\tau_n+\sum_{l=1}^{m}\cdot\frac{A_{\nu_l}}{4(a/D^2_{p(on)})}\cdot\left[exp\left(-\frac{4a}{D^2_{p(on)}}\times\right.\right.$$
$$\left.\left.\times\nu_l\tau_n\right)-exp\left(-\frac{4a}{D^2_{p(on)}}\cdot\nu_l\tau_{n-1}\right)\right];$$

где:

$$A_{\nu_l} = \frac{2\{2\}_{\nu_l}}{\nu_l^4\left[\{2\}_{\nu_l}+\kappa_{p(on)}\cdot\{3\}_{\nu_l}\right]};$$

ν_ℓ – ℓ – ный корень выражения:

$$\{1\} = J_0(\lambda)\cdot Y_1(\lambda\kappa_{p(on)}) - J_1(\lambda\kappa_{p(on)})\cdot Y_0(\lambda),$$

т.е. ℓ –ное по порядку значение λ, при котором $\{1\} = 0$.

$$\{2\} = J_1(\lambda\kappa_{p(on)})\cdot Y_1(\lambda) - J_1(\lambda)\cdot Y_1(\lambda\kappa_{p(on)}),$$

$$\{3\} = J_0(\lambda)\cdot Y_0(\lambda\kappa_{p(on)}) - J_0(\lambda\kappa_{p(on)})\cdot Y_0(\lambda);$$

(индекс ν_ℓ при выражениях $\{2\}$ и $\{3\}$ показывает, что в них $\lambda = \nu_\ell$);

$\kappa_{p(on)} = d_{p(on)}/D_{p(on)}$, где $d_{p(on)}$ и $D_{p(on)}$ –диаметр осевого отверстия и наружный диаметр бочки рабочего (опорного) валков;

m – число учитываемых корней выражения $\{1\}$, зависящее от заданной точности расчёта:

$J_0(x), J_1(x), Y_0(x), Y_1(x)$ – функции Бесселя первого и второго рода нулевого и первого порядков.

После подстановки выражений (3) в уравнения теплового баланса, последние были сведены к системе трех линейных уравнений вида:

$$A_\ell \cdot t_{\kappa j n} + B_\ell \cdot C_{n-1} + E_\ell \cdot C_{n-1} = D_\ell \quad (\ell = 1,2,3). \qquad (4)$$

Коэффициенты этой системы $A_1 \div D_3$ выражены через заданные параметры стана и процесса прокатки (дрессировки), теплофизические константы и величину $\Delta\tau_n$.

Решение системы (4) – определение неизвестных C_{n-1}, $C_{n-1(on)}$ и $t_{\kappa j n}$ (температуры полосы на выходе j –й клети в момент τ_n) – выполняется с помощью определителей, а затем по формулам (2) вычисляются поверхностные температуры валков.

Температура в любой точке радиального сечения валка, имеющей радиус ρ, в момент времени τ_n может быть вычислена по формуле (на примере рабочего валка j –й клети):

$$t_{pj}(\rho,\tau_n) = t_{pнач\,j} + \sum_{i=0}^{n-1} c_i \cdot F_{1p}(\rho,\tau_n - \tau_i), \qquad (5)$$

где $F_{1p}(\rho,\tau_n - \tau_i)$ – значение функции температурного поля $F_1(\rho,\tau)$ для рабочего валка при $\tau = \tau_n - \tau_i$.

Выражение $F_1(\rho,\tau)$ через функции $J_0(\nu_\ell \rho)$, $Y_0(\nu_\ell \rho)$, $J_1(\nu_\ell \kappa)$, $Y_1(\nu_\ell \kappa)$, $\{2\}_{\nu_\ell}$, $\{3\}_{\nu_\ell}$, коэффициент α и конструктивные размеры валка приведено в диссертации.

Реализацию описанной модели осуществили для следующих частных случаев.

I. Тепловой баланс стана холодной прокатки при квазистационарном режиме.

2. Тепловой баланс стана холодной прокатки при нестационарном режиме.

3. Нестационарный тепловой баланс дрессировочного стана.

На основе первого частного случая разработана научно-обоснованная методика расчёта температурного режима и расхода охлаждающей жидкости для непрерывного стана холодной прокатки, которая внедрена в 1966 г. в расчётно-конструкторскую практику Уралмашзавода в виде руководящего материала (РМ 68-66). Широкая апробация этой методики для расчёта систем охлаждения ряда отечественных и зарубежных непрерывных станов показала достаточно точное соответствие расчётных и действительных параметров температурного режима и позволила решить ряд практических задач по конструированию эмульсионных систем.

Второй и третий частные случаи вошли как составные части в математические модели нестационарного теплового профиля валков непрерывного и дрессировочного станов.

1198645

ГЛАВА III. ИССЛЕДОВАНИЕ НА ЭЦВМ ТЕПЛОВОГО РЕЖИМА И РАСХОДА ОХЛАЖДАЮЩЕЙ ЖИДКОСТИ НА НЕПРЕРЫВНОМ СТАНЕ В ФУНКЦИИ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ХОЛОДНОЙ ПРОКАТКИ

Современные станы имеют различные конструктивные, энергосиловые и теплофизические параметры и могут работать при разных технологических режимах. Изменение скорости прокатки, диаметров валков, температуры жидкости и способа её подачи, температуры подката, поступающего на стан, а также перераспределение обжатий между клетями при одинаковом суммарном обжатии - всё это вызывает перераспределение тепловых потоков, изменение температуры валков, полосы и необходимого расхода охладителя на стане.

Эти зависимости необходимо учитывать при проектировании новых, более производительных станов и научном прогнозировании

МВТУ им. Н. Э. Баумана БИБЛИОТЕКА

их основных параметров, а также при реконструкции действующих станов и интенсификации режимов их работы.

Для изучения указанных зависимостей математическая модель квазистационарного теплового баланса была реализована на ЭЦВМ "Урал-4" с учётом варьирования в широких диапазонах следующих величин: скорости прокатки, диаметров валков, коэффициентов теплоотдачи, температуры эмульсии и подката.

При расчёте за базовый вариант был взят четырехклетевой стан "1700" с исходными параметрами соответствующего стана Череповецкого завода, при прокатке полосы из электротехнической стали толщиной 0,405 мм из подката толщиной 2,26 мм и шириной 1020 мм. Этот режим прокатки, согласно проектному расчёту, является наиболее тяжелым для данного стана с точки зрения энергосиловых параметров, следовательно, ему должен сопутствовать наиболее напряженный температурный режим, требующий максимального расхода охлаждающей жидкости.

Основные результаты исследования заключаются в следующем.

При увеличении скорости прокатки температура валков и расходы эмульсии возрастают значительно медленнее, чем скорость. Особенно замедляется этот рост при скоростях свыше 15 м/сек. Например, при увеличении скорости в 2 раза: с 15 до 30 м/сек расход эмульсии увеличивается лишь на 5%.

Поэтому при создании новых высокоскоростных станов не потребуется существенно увеличивать мощность систем охлаждения по сравнению с существующими.

При увеличении диаметра прокатных валков увеличивается тепловыделение в очаге деформации, причем всё дополнительное тепло передается рабочим валкам, приводя к росту их температуры. Чтобы температура валков не возросла, необходимо увеличить мощность системы охлаждения стана.

Поэтому для стана, оснащенного системой автоматической стабилизации теплового профиля валков, их диаметры следует выбирать минимальными из диапазона, допустимого по условиям прочности, жесткости и предельной выкатываемости.

Если автоматическая стабилизация теплового профиля валков не предусмотрена, то диаметры валков следует выбирать макси-

мальными из того же диапазона и предусматривать при этом увеличение мощности системы охлаждения стана.

Установлено, что увеличение интенсивности контактного теплообмена между полосой и валками (коэффициента теплоотдачи $\alpha_{кт}$) приводит к существенному росту температуры валков и расходов эмульсии. Увеличение коэффициентов теплоотдачи при конвективном теплообмене рабочего и опорного валков с эмульсией ($\alpha_{1р}$, $\alpha_{1оп}$), напротив, оказывает положительное влияние на тепловой режим рабочей клети: температура валков уменьшается, а устойчивость теплового профиля повышается. На станах с тяжелыми условиями работы эффективным способом увеличения коэффициентов $\alpha_{1р}$ и $\alpha_{1оп}$ является переход на двустороннее охлаждение валков. Интенсивность конвективного теплообмена полосы с эмульсией (коэффициент α_2) оказывает меньшее влияние на тепловой режим рабочей клети, по сравнению с интенсивностью теплообмена валков. Поэтому для эффективного управления температурой валков с помощью принудительного охлаждения полосы в межклетевых промежутках потребуется увеличить коэффициент α_2 не менее, чем в 6-8 раз.

Работа стана с эмульсией, имеющей повышенную температуру, допустима в определенных пределах (до $t_{эм}$ = 50-55°С). Расход эмульсии при этом не возрастает, а температура рабочих валков увеличивается пропорционально температуре эмульсии.

Повышение температуры подката не приводит к росту температуры готовой полосы на моталке, так как "гасится" некоторым ростом температуры валков первых трёх клетей.

Перераспределением обжатий между клетями можно изменять температуру полосы на выходе из стана в широком диапазоне.

В диссертации дано подробное теплофизическое объяснение всех указанных выше закономерностей.

ГЛАВА IУ. РАЗРАБОТКА И РЕАЛИЗАЦИЯ НА ЭЦВМ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ НЕСТАЦИОНАРНОГО ТЕПЛОВОГО ПРОФИЛЯ ВАЛКОВ

С учётом сформулированных выше задач управления, к математической модели нестационарного теплового профиля валков были предъявлены следующие требования:

I. Возможность определить как величину, так и форму кривой теплового профиля, которую ранее без достаточных оснований считали параболической.

2. Учёт специфики теплового баланса и теплообмена валков отдельных типов тонколистовых станов, в том числе - дрессировочных, тепловые условия которых ранее не были изучены.

3. Возможность рассчитать переменный во времени тепловой профиль не только в функции поверхностной температуры валков, но и в зависимости от переменных технологических параметров прокатки (дрессировки): обжатий, скоростей, натяжений, расхода энергии и т.д.

Для решения первой задачи был применен метод электрического моделирования на электропроводной бумаге квазистационарного температурного поля в осевом сечении валка, основанный на электротепловой аналогии.

Моделирование осуществляли в относительных температурах Θ:

а) для валка, охлаждаемого жидкостью (горячая или холодная прокатка)

$$\Theta = \frac{t_x - t_{эм}}{t_o - t_{эм}} \cdot 100\% , \qquad (6)$$

б) для валка дрессировочного стана, охлаждаемого за счет конвективного теплообмена с окружающей средой

$$\Theta = \frac{t_x - t_{окр}}{t_o - t_{окр}} \cdot 100\% , \qquad (7)$$

где t_x -температура в произвольной точке;

t_o -максимальная температура на поверхности, в середине бочки (для нее относительная температура $\Theta_o = 100\%$);

$t_{эм}$ и $t_{окр}$ - температура охлаждающей жидкости (эмульсии) и окружающей среды (для них относительные температуры $\Theta = 0\%$).

При моделировании граничных условий учитывали теплообмен бочки с прокатываемой полосой, жидкостью и воздухом, в том числе на свободных концах длиной $(L-B)/2$, а также теплообмен шеек с подшипниками, при этом тепловые сопротивления заменяли эквивалентными им электрическими. Для характеристики

перепадов температуры в отдельных поперечных сечениях ввели коэффициенты $\kappa_x = \theta_x / \theta_{пов.x}$ (где x – осевая координата сечения, θ_x – средняя по сечению температура, $\theta_{пов.x}$ – поверхностная температура в том же сечении).

Значения κ_x у боковых кромок полосы и у торцов бочки ($\kappa_в$ и $\kappa_л$), а также величины относительных температур в соответствующих сечениях ($\theta_в$, $\bar{\theta}_в = \kappa_в \theta_в$, $\theta_л$, $\bar{\theta}_л = \kappa_л \cdot \theta_л$) были получены на моделях для широкого диапазона параметров валков и полосы (D/L, b/L). При этом установлено, что при прокатке величины $\theta_в$, $\theta_л$ являются линейными функциями коэффициента теплоотдачи от валков к воде или эмульсии ($\alpha_{тр}$, $\alpha_{тп}$), а при дрессировке – линейными функциями коэффициента теплоотдачи от валков к окружающей среде ($\alpha_{окр.}$) и относительной температуры подшипников ($\theta_п$).

В результате получены следующие расчетные формулы:
для абсолютных температур у кромок полосы и у края бочки:

а) поверхностных

$$t_{в(л)} = \frac{\theta_{в(л)}}{100} t_o + \left(1 - \frac{\theta_{в(л)}}{100}\right) \cdot t_{эм(окр)}, \qquad (8)$$

б) средних по сечению

$$\bar{t}_{в(л)} = \frac{\kappa_{в(л)} \cdot \theta_{в(л)}}{100} t_o + \left(1 - \frac{\kappa_{в(л)} \cdot \theta_{в(л)}}{100}\right) \cdot t_{эм.окр.}, \qquad (9)$$

для тепловой выпуклости валков:

$$\Delta_{\substack{т(о-в) \\ (о-л)}} = \alpha_л \cdot D \left(t_o - t_{эм(окр)}\right) \cdot \left(1 - \frac{\kappa_{в(л)} \cdot \theta_{в(л)}}{100}\right), \qquad (10)$$

где $\alpha_л$ – коэффициент линейного расширения;
t_o – температура в середине бочки, замеренная или расчетная из теплового баланса (гл.II).

Формулы (8)–(10) позволили впервые в расчетной практике учесть влияние на тепловой профиль температур охлаждающей жидкости, окружающей среды и подшипников (последняя оказалась особенно

существенной для валков дрессировочных станов), а также интенсивности конвективного теплообмена валков.

В результате расчетов и исследований было установлено, что формула поверхностных температур (8) остается справедливой и для нестационарного теплового режима. Это дало возможность, подставив в неё значение t_o, полученное по формуле (2) из математической модели нестационарного теплового баланса, создать математическую модель нестационарного теплового профиля валков.

Реализация математической модели осуществляется на ЭВМ в следующем порядке.

I. После подготовки исходных данных (конструктивные и технологические параметры, теплофизические константы, исходные температуры) выполняют цикл итераций для определения промежутка времени $\Delta\tau_n$ (начиная с $n=1$), удовлетворяющего условию прямолинейности поверхностных температур валков, решая при каждой итерации уравнения теплового баланса (4) для середины бочки валков $1^{\underline{e}}, 2^{\underline{e}}, j^{\underline{e}}, \ldots, K^{\underline{e}}$ рабочей клети.

2. По значениям $t_{op_j}(1,\tau_n)$, $t_{oon_j}(1,\tau_n)$, полученным в последней итерации, определяют по формуле (8) поверхностные температуры у кромки полосы и у края бочки, а затем – значения соответствующих угловых коэффициентов для графиков этих температур, представленных, как и в середине бочки, в виде ломаных:

$$C_{n-1B(L)} = \frac{t_{B(L)} - t_{B(L)нач} - \sum_{i=0}^{n-2} C_{iB(L)}\,(\tau_n - \tau_i)}{\tau_n - \tau_{n-1}}, \qquad (11)$$

где $t_{B(L)нач}$ – начальные температуры в соответствующих сечениях;

$C_{iB(L)}$ – изменения угловых коэффициентов при переходе от i-го к $(i+1)$-му отрезку, вычисленные для предыдущих отрезков времени $\Delta\tau_i$.

3. Определение тепловой выпуклости валков на ширине полосы $\Delta_{T(o-B)}$ и на длине бочки $\Delta_{T(o-L)}$ в момент времени τ_n производят по формуле, полученной в 1964 г. автором под руководством А.В.Третьякова (на примере рабочего валка):

$$\Delta_{T(o-в)}^{(o-л)} = \alpha_л \cdot D_р \sum_{i=0}^{n-1} (C_i - C_{iв(л)}) \cdot \left[F_{2р}(1, \tau_n - \tau_i) + (\tau_n - \tau_i) \right], \quad (12)$$

где $F_{2р}(1, \tau_n - \tau_i)$ – значение функции тангенциальных температурных напряжений $F_2(\rho, \tau)$ для рабочего валка при $\rho = 1$ (на поверхности бочки) и $\tau = \tau_n - \tau_i$. Выражение $F_2(\rho, \tau)$ через функции Бесселя, коэффициент α и конструктивные размеры валка приведено в диссертации.

Принципиальное отличие использования формулы (12) в излагаемой модели заключается в том, что ранее входящие в неё угловые коэффициенты $C_i, C_{iв(л)}$ считались известными исходными данными, а теперь они вычисляются непосредственно из режимов прокатки.

Описанная математическая модель была реализована в двух вариантах: для непрерывного стана холодной прокатки (ТПН –СХН)– на ЭЦВМ "Минск-22" НИИТЯЖМАша Уралмашзавода и на ЭЦВМ "Система 4–70" Института проблем управления АН СССР; для дрессировочного стана (ТПН–ДС) – на ЭЦВМ "Минск – 22" Вычислительного центра Ждановского металлургического завода им. Ильича, где она после всесторонней проверки, подтвердившей её высокую точность (до 10%), была внедрена в эксплуатацию в виде постоянной технологической программы.

Проведенное с помощью реализованных вариантов модели исследование на ЭЦВМ влияния режимов прокатки и дрессировки на динамику теплового профиля валков позволило сделать ряд важных практических выводов, использованных для совершенствования технологии на станах и для оптимизации параметров систем управления подачей теплоносителя. В частности установлено, что на дрессировочных станах, в отличие от прокатных, с ростом скорости температура валков не растет, а уменьшается, но динамика их теплового профиля становится более напряженной. Температура подката является главным фактором нестабильности теплового профиля валков при дрессировке, особенно для полос толщиной менее 0,7 мм.

Институт проблем управления АН СССР взял за основу модель ТПН–СХП для создания модели объекта управления тепловой профилировкой валков непрерывного стана с помощью УВМ.

С этой целью совместно с сотрудниками института нами проведено исследование модели, в результате которого установлено, что повышение её адекватности реальному процессу при переменных технологических режимах обеспечивается процедурой самонастройки, причем в качестве параметров самонастройки целесообразно использовать коэффициенты теплоотдачи.

ГЛАВА У. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОВОГО РЕЖИМА И ТЕПЛОВОГО ПРОФИЛЯ ВАЛКОВ ДЕЙСТВУЮЩИХ СТАНОВ

Для всесторонней проверки разработанных теоретических положений и сформулированных на их основе практических выводов в период с 1966 по 1975 гг. были проведены широкие экспериментальные исследования теплового режима семи действующих станов четырех металлургических заводов, указанных в гл.I. Кроме того, ряд специальных исследований провели в лабораторных условиях на моделях прокатных валков.

А. Исследование распределения температуры по длине бочки валков

Расчетные кривые распределения температуры по длине бочки, полученные методом электротепловой аналогии, имеют одну характерную особенность: они существенно отличаются от параболических. На средней части бочки шириной 2/3δ температура поверхности практически остается постоянной, у кромки полосы происходит резкое падение температуры, особенно при охлаждении жидкостью, которое заканчивается на свободном от полосы конце бочки.

Массовые замеры распределения температуры по длине бочки, осуществленные контактными хромель-копелевыми термопарами непосредственно в рабочих клетях во время технологических пауз, показали полное соответствие расчетной и действительной формы кривых теплового профиля валков в середине бочки и на свободных от полосы торцовых участках.

На участках, соответствующих боковым кромкам полосы у части валков наблюдались некоторые отклонения от расчетной формы, вызванные неравномерной выработкой и секционной подачей охлаждающей жидкости: около 35% валков имели расчетную форму распределения температуры, около 60% - расчетную форму с искажениями

и лишь 5% – близкую к параболической. По величине значения расчетных и замеренных температур не отличались более чем на 5÷15%.

Б. Совершенствование метода стационарного контроля температуры валков

Задачи управления тепловым режимом непрерывных станов потребовали совершенствования и внедрения приборов для стационарного контроля температуры валков непосредственно во время прокатки, на основе бесконтактного способа, разработанного в 1962-1964 гг. на Уралмашзаводе под руководством А.В.Третьякова.

В процессе промышленного освоения этого способа, осуществлявшегося в 1963-1968 гг. при активном участии автора, была отработана надежная конструкция датчиков температуры валков холодной прокатки (ДТВ-УЗТМ) с хромель-копелевой микротермопарой (МТП). Специальные исследования на 4-х клетевом стане "1700" позволили уточнить погрешности показаний МТП в зависимости от её расстояния от поверхности и скорости вращения валка и отработать основные конструктивные параметры типовых образцов ДТВ-УЗТМ, которыми Уралмашзавод стал оснащать большинство выпускаемых станов холодной прокатки. С 1975 г. ДТВ-УЗТМ введены в эксплуатацию на стане 1700 Череповецкого металлургического завода.

В. Исследование 4-х клетевого стана "1700" как объекта управления тепловой профилировкой валков

Комплексный эксперимент с целью всесторонней проверки модели ТПН-СХП проводился в мае 1972г. Уралмашзаводом, СЗПИ и Институтом проблем управления АН СССР совместно с работниками Череповецкого металлургического завода. Были определены зависимости между входными технологическими параметрами процесса (толщиной, скоростью прокатки, режимами обжатий и натяжений, температурой подката), управляющими воздействиями (расходом и температурой подаваемой эмульсии) и управляемыми параметрами температурного режима (распределением температуры по длине бочки рабочих и опорных валков, температурой полосы на выходе из валков и температурой эмульсии на сливе).

Одновременная стационарная запись столь большого количества технологических, энергосиловых и тепловых параметров, с фиксацией температуры не только рабочих, но и опорных валков, а также

прокатываемой полосы, проводилась впервые в практике листопрокатного производства. Обработка экспериментальных данных, выполненная на ЭЦВМ "Система 4-70", и сопоставление их с расчетом по модели ТПН-СХП показали, что по характеру динамики температурного режима модель полностью адекватна реальному процессу, а по величине отклонения расчетных и экспериментальных температур не превышают 10-20%. Тем самым была подтверждена пригодность модели ТПН-СХП для использования её в системе автоматического управления подачей теплоносителя. Эксперимент позволил получить ряд исходных данных для разработки алгоритмов управления этой системой.

Г. Исследование теплового баланса, конвективного и контактного теплообмена валков

Исследование проводилось на действующих станах с целью проверки моделей теплового баланса (гл.П) и получения достоверных исходных данных для их реализации, и прежде всего - величин коэффициентов теплоотдачи при конвективном и контактном теплообмене валков. Значения коэффициента теплоотдачи при контактном теплообмене $\alpha_{кт}$, полученные для холодной прокатки впервые, оказались равными 300-500 квт/(м^{2}град). В результате промышленного исследования величин α_{ip} и $\alpha_{оп}$ установлена возможность использования для их определения критериального уравнения А.Н.Шичкова, полученного на лабораторной модели (для опорных валков - непосредственно, для рабочих - с поправочным коэффициентом 1,4-1,6).

ГЛАВА УI. РАЗРАБОТКА И ВНЕДРЕНИЕ НОВЫХ МЕТОДОВ ПРОФИЛИРОВАНИЯ ВАЛКОВ И СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ТЕПЛОВЫМ РЕЖИМОМ ТОНКОЛИСТОВЫХ СТАНОВ

Изложенные в предыдущих главах результаты теоретических и экспериментальных исследований были положены в основу разработки и внедрения новых методов, средств и систем управления тепловым режимом и профилем валков станов холодной прокатки и дрессировки. Ряд результатов работы, в связи с общностью некоторых закономерностей формирования температурных полей и деформаций в листопрокатных валках, удалось распространить на тонко-

листовые станы горячей прокатки.

А. Разработка и внедрение новых калибровок валков

Было доказано, что высокопроизводительная холодная прокатка планшетной полосы может быть обеспечена только путем оптимального сочетания двух основных методов профилирования валков – принудительного изгиба с помощью гидроцилиндров (гидроизгиба) и теплового профилирования с помощью секционной системы охлаждения – с правильно выбранной исходной калибровкой (профилировкой) валков, выполняемой на вальцешлифовальных станках. Неточный подбор исходной калибровки резко снижает эффективность работы стана и качество проката даже при самых совершенных системах автоматического регулирования.

Анализ формы активной образующей валков, выполненный путем суперпозиции кривых их изгиба, исходной калибровки и теплового профиля, показал, что основной причиной неравномерной выработки валков, указанной в гл.I, является несоответствие формы кривых прогиба и тепловой выпуклости. Первая из них – параболического типа, а вторая – существенно непараболическая (см. гл. У). На основе данного вывода были разработаны новые калибровки рабочих и опорных валков, сущность которых состоит в предварительной компенсации несоответствия формы кривых упругих и тепловых деформаций путем шлифовки не по параболе или цилиндрическому профилю, а по более сложной кривой.

В течение 1970–1972 гг. на тонколистовых станах цехов холодной и горячей прокатки Ждановского им.Ильича и Череповецкого металлургических заводов происходили длительные, многоэтапные промышленные испытания новых калибровок, завершившиеся их внедрением в постоянную эксплуатацию. В цехах холодной прокатки для внедрения новых калибровок рабочих валков была осуществлена реконструкция копировальных устройств вальцешлифовальных станков. Новая калибровка опорных валков, предусматривающая выполнение двойных конических скосов с ломаной образующей и расположение внутренних скосов на активной части бочки, была признана изобретением. В результате отсортировка металла по неплоскостности на указанных станах значительно уменьшилась, существенно снизилась неравномерность выработки и наклёпа валков, увеличилась их стойкость. Экономический эффект от внедрения новых калибровок, подтвержденный актами предприятий, составил около 500 тыс.руб/год.

Б. Разработка системы автоматизированной подачи эмульсии (САПЭ) на валки непрерывного стана холодной прокатки

Для разработки системы теплового профилирования валков были сформулированы следующие технические требования.

I. Гибкое управление формой профиля валков путем использования многосекционной подачи жидкости по длине бочки, с минимальным количеством секций, равным пяти (первая и пятая – для свободных от полосы концов бочки, вторая и четвертая – для участков, соответствующих кромкам полосы, третья – для середины бочки).

2. Максимальная стабилизация заданного теплового профиля валков в процессе прокатки и форсирование переходных тепловых режимов.

3. Контроль и стабилизация заданной температуры и заданного расхода эмульсии в каждой зоне регулирования по длине бочки, с ограничением максимально допустимой температуры валков.

4. Обеспечение необходимых расходов эмульсии по зонам регулирования для создания оптимального диапазона изменений тепловой выпуклости валков, достаточного для компенсации их износа и отработки возмущений по неплоскостности проката, не устраняемых гидроизгибом.

Исследование модели ТПН-СХП показало, что наилучшая стабилизация профиля достигается при выполнении условия

$$t_o - t_B = const\,; \quad t_o - t_L = const\,, \qquad (13)$$

т.е. при поддержании постоянными во времени не абсолютных значений температур, а их перепадов по длине бочки.

На основе условия (13) был разработан способ регулирования поперечного профиля полосы и управления подачей охлаждающей жидкости на валки, признанный изобретением.

Большинство перечисленных выше требований, включая условие (13), были реализованы Уралмашзаводом при создании систем автоматизированной подачи эмульсии (САПЭ) ряда новых станов холодной прокатки Карагандинского, Верх-Исетского, Ново-Липецкого и других металлургических заводов, а также при реконструкции эмульсионной системы действующего 4-х клетевого стана 1700 Череповецкого завода.

В 1974–1975 гг. завершена полная реконструкция системы охлаждения этого стана, с переводом его на схему САПЭ, при этом трехсекционное охлаждение валков заменено на пятисекционное, ручное управление расходом эмульсии заменено на дистанционное и автоматическое, внедрен контроль расходов эмульсии и температуры валков в пяти зонах по длине бочки. Разработана технология теплового профилирования валков с помощью САПЭ, определены необходимые расходы эмульсии по зонам для сортамента стана, доказана эффективность использования САПЭ для улучшения планшетности проката. и повышения производительности стана. Экономический эффект от внедрения САПЭ, подтвержденный заводом, составил свыше 200 тыс. руб в год.

Для перехода к следующему этапу автоматизации станов, предусматривающему применение УВМ, Уралмашзаводом, Институтом проблем управления АН СССР, СЗПИ и ГПИ "Проектмонтажавтоматика" разработана и внедряется новая система управления тепловой профилировкой валков (САУТП), в которой САПЭ используется в качестве подсистемы. За основу модели объекта управления в САУТП принята изложенная в гл. IУ модель теплового профиля валков.

В. Рациональное совмещение методов профилирования валков на дрессировочном стане

В 1969–1972 гг. на дрессировочном стане 1700 цеха холодной прокатки Ждановского завода им. Ильича были проведены комплексные промышленные исследования различных методов профилирования валков с целью определения целесообразных границ применимости каждого из этих методов и обеспечения их рационального совмещения в процессе дрессировки.

Эффективность регулирования плоскостности полос с помощью установки гидравлического изгиба валков конструкции Уралмашзавода (исполнительного механизма САПФ – системы автоматического регулирования профиля и формы полос) оценивалось в сопоставлении с работой нажимного устройства по критерию, учитывающему неплоскостное отклонение от заданного среднего обжатия $\varepsilon_{ср}$.

Исследование показало целесообразность сочетания в определенных границах на дрессировочном стане гидроизгиба, теплового профилирования с помощью газовых горелок и системы стабилизации обжатий, а также калибровки валков, подобранной с учетом формы теплового профиля.

В результате были разработаны оптимальные режимы эксплуатации САРПФ, определены допустимые значения давлений гидроизгиба. Внедрение этих режимов позволило увеличить выход листов на весьма глубокую вытяжку, за счет чего получен экономический эффект свыше 100 тыс.руб в год.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. В результате широких исследований технологии и оборудования современных станов холодной прокатки и дрессировки установлено, что высокое качество холоднокатаных листов, при высокой производительности этих станов, может быть обеспечено только путем оснащения их комплексом локальных систем управления, включающим как необходимую составную часть, систему управления тепловым режимом.

2. Для создания технологических основ теории управления тепловым режимом разработана математическая модель, в которой путем совместного решения уравнений теплопроводности валков и теплового баланса процесса холодной прокатки (дрессировки), переменные управляемые параметры теплового режима – температура полосы по пропускам, температура и тепловой профиль рабочих и опорных валков – определяются в функции технологических возмущений – переменных режимов прокатки – и управляющих воздействий – расхода и температуры охлаждающей жидкости.

3. Для проектирования систем управления тепловым режимом новых и реконструируемых станов выполнено теоретическое исследование модели теплового режима на ЭЦВМ. В результате установлены не известные ранее зависимости теплового режима от скорости прокатки, режимов обжатий и натяжений, размеров валков, интенсивности их теплообмена, температуры окружающей среды, охлаждающей жидкости и подшипников. Установлено, что тепловые деформации, в отличие от упругих, имеют существенно непараболическую форму по длине бочки.

4. Основные теоретические положения работы подтверждены путем экспериментальных исследований теплового режима ряда действующих станов холодной прокатки и дрессировки нескольких металлургических заводов СССР.

5. На основании результатов теоретических и экспериментальных исследований разработаны и внедрены на действующих станах новая система автоматизированного управления тепловым режимом, новые калибровки и режимы профилирования валков; при этом обеспечено повышение производительности станов и улучшение качества проката. Теоретическая часть работы внедрена в расчетно-конструкторскую практику (руководящие материалы для конструкторов и технологов, технологическая основа алгоритмов управления с применением УВМ).

6. На основании изложенного можно сделать итоговый вывод: в данной работе поставлена и решена актуальная научно-техническая проблема управления тепловым режимом станов холодной прокатки и дрессировки, разработаны и проверены технологические основы теории управления, внедрены системы и методы, реализующие эту теорию на практике, доказана их высокая эффективность.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах:

I. Гарбер Э.А. В книге "Совершенствование теплового процесса листовой прокатки", Изд-во "Металлургия", 1973, 20 печ.л. (главы Ш,У,УI,УП,УШ,IX,X).

2. Гарбер Э.А. Совершенствование методов управления профилем валков тонколистовых станов. "Сталь", 1975, № 6, с.525-527.

3. Гарбер Э.А., Пичков А.Н., Бурштейн Я.А. и др. Новая профилировка валков широкополосного стана горячей прокатки. Бюллетень Института Черметинформация, 1971, № 12, с.37-38.

4. Гарбер Э.А., Шебаниц Э.Н. и др. Новые профилировки валков четырехклетевого и дрессировочного станов холодной прокатки. "Сталь", 1971, № 5, с.429-432.

5. Гарбер Э.А., Шебаниц Э.Н. и др. Разработка математической модели теплового профиля валков дрессировочного стана. Известия вузов, Черная металлургия, 1972, № 5, с.51-55.

6. Гарбер Э.А., Шебаниц Э.Н. и др. Реализация на ЭВМ математической модели теплового профиля валков дрессировочного стана. Там же, № 7, с.65-68.

7. Гарбер Э.А., Гончарский А.А., Соколова Л.Н. Технологические границы реализации заданного режима обжатий на стане холодной прокатки. "Сталь", 1975, № 3, с.246-248.

8. Гарбер Э.А., Шебаниц Э.Н. и др. Совершенствование метода профилирования валков холодной прокатки. "Металлург",1972, № II, с.32-33.

9. Гарбер Э.А., Шаравин М.П. и др. Математическая модель нестационарного теплового профиля валков непрерывного стана холодной прокатки. Сб."Точная прокатка", ДОННИИЧЕРМЕТ, Донецк, 1973, (Материалы республиканской конференции), с 162-168.

10. Гарбер Э.А., Шаравин М.П. и др. Определение исходных данных для реализации на ЭВМ математической модели нестационарного теплового профиля валков непрерывного стана холодной прокатки. Там же , с.169-173.

11. Гарбер Э.А., Шаравин М.П. и др. Реализация на ЭВМ математической модели нестационарного теплового профиля валков непрерывного стана холодной прокатки. Там же, с.174-180.

12. Гарбер Э.А., Шичков А.Н. и др. Тепловой профиль листопрокатных валков. Там же, с.181-189.

13. Третьяков А.В., Гарбер Э.А., Шебаниц Э.Н., Налча Г.И. Комплексное управление профилем валков для стабилизации технологических параметров процесса дрессировки. Там же, с.163-270.

14. Савранский К.Н., Гарбер Э.А., Шебаниц Э.Н. и др. Исследование профилировки опорных валков широкополосного стана с двойными коническими скосами. Там же, с.90-95.

15. Третьяков А.В., Гарбер Э.А., Давлетбаев Г.Г. Расчёт и исследование прокатных валков. Книга, изд-во "Металлургия", 1976, 16 печ.л. (главы Ш,IУ, 8 печ.л.)

16. Гарбер Э.А., Шаравин М.П. и др. Управление тепловым режимом четырехклетевого стана 1700 холодной прокатки. НИИИНФОРМТЯЖМАШ, I-74-43, с.57-59.

17. Гарбер Э.А., Шебаниц Э.Н. и др. Опорный валок клети кварто. Авторское свидетельство № 381436. Бюллетень изобретений № 22, 1973.

18. Третьяков А.В., Гарбер Э.А. Расчёт и исследование валков холодной прокатки. Книга, изд-во "Машиностроение", 1966, II,2 печ.л.

19. Третьяков А.В., Грачев А.В., Гарбер Э.А., Токмаков А.А. Температурный режим работы валков стана 740 и оснащение его опытно-промышленными приборами для замера температуры валков. Металлургическое машиностроение (НИИИНФОРМТЯЖМАШ),1965, № 5,с.45

20. Третьяков А.В., Гарбер Э.А., Грачев А.В. О температурных условиях службы валков листовых станов трио. "Сталь", 1965, № 9, с.841-842.

21. Третьяков А.В., Гарбер Э.А., Локшин Б.Е., Трофимов Г.К. Применение методов математической обработки экспериментальных данных в инженерно-конструкторской лаборатории НИИТЯЖМАШ Уралмашзавода. "Заводская лаборатория," 1965, № 10, с.1237-1238.

22. Грачев А.В., Гарбер Э.А., Беняковский М.А. и др. Температурный режим работы валков 4-х клетевого стана холодной прокатки 1700. "Сталь", 1966, № 5, с.437-440.

23. Авербух Л.Д., Гарбер Э.А. и др. Способ регулирования поперечной формы полосы при прокатке в клети с опорными валками. Авторское свидетельство № 275961. Бюллетень изобретений № 36, 1972.

24. Третьяков А.В., Гарбер Э.А. и др. Определение коэффициентов теплоотдачи при холодной прокатке. НИИИНФОРМТЯЖМАШ, Металлургическое оборудование, I-67-8, с.45-47.

25. Третьяков А.В., Гарбер Э.А. и др. Расход эмульсии на станах холодной прокатки. НИИИНФОРМТЯЖМАШ, Металлургическое оборудование, I-67-19, с.49-54.

26. Третьяков А.В., Гарбер Э.А., Грачев А.В. К вопросу о тепловом режиме валков листовых станов холодной прокатки. Известия вузов, Черная металлургия, 1968, № 2, с.173-174.

27. Третьяков А.В., Гарбер Э.А. и др. Определение расхода эмульсии на станах холодной прокатки исходя из уравнений теплового баланса. Сб. статей НИИТЯЖМАШ Уралмашзавода. Производство крупных машин. Выпуск XVI "Прокатное оборудование", М., изд-во "Машиностроение", 1968, с.197-203.

28. Третьяков А.В., Зиновьев Е.Г., Грачев А.В., Гарбер Э.А. Вальтер А.А. Стационарные измерители УЗТМ для исследования температурных режимов прокатных станов. НИИИНФОРМТЯЖМАШ, Металлургическое оборудование, I-69-7, с.40-43.

29. Третьяков А.В., Гарбер Э.А., Грачев А.В. Зависимость теплового баланса и расхода эмульсии от основных конструктивных и теплофизических параметров стана холодной прокатки. НИИИНФОРМТЯЖМАШ, Металлургическое оборудование, I-69-12, с.45-48.

30. Химич Г.Л., Третьяков А.В., Гарбер Э.А., Макарова М.А. Оптимальная производительность станов холодной прокатки. Книга, изд-во "Металлургия", 1970, 14,0 печ.л. (с.9-60; 141-148).

31. Валки станов холодной прокатки (под ред. Новикова В.Н. и Белосевича В.К.). Книга, изд-во "Металлургия", 1971, 20,0 печ. листов (с.147-153; 214-226; 259-263).

32. Третьяков А.В., Гарбер Э.А., Грачев А.В. Динамика и устойчивость теплового профиля валков при холодной прокатке. Трудн ЦНИИТМАШ. Валки холодной прокатки. М., 1971, № 97, (Материалы всесоюзной конференции), с.40-44.

33. Третьяков А.В., Гарбер Э.А. и др. Определение количества подаваемой на валки охлаждающей жидкости, необходимого для устойчивой работы стана холодной прокатки. Там же, с.49-53.

34. Третьяков А.В., Гарбер Э.А. и др. Определение соотношения между среднеквадратическими отклонениями толщины подката и холоднокатаных листов. "Сталь", 1972, № 10, с.920-923.

35. Гарбер Э.А., Бочков Н.Г., Сергеев Е.П. и др. Внедрение на чистовой группе стана 2800/1700 профилировки рабочих валков с кольцевыми выточками. Сб."Точная прокатка", ДОННИИЧЕРМЕТ, Донецк, 1973 (Материалы республиканской конференции), с.84-89.