

На правах рукописи



ПОНОМАРЕВ АЛЕКСЕЙ АЛЕКСАНДРОВИЧ

**ИССЛЕДОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ  
РЕЖИМОВ ПРОКАТКИ КАТАНКИ НА НОВОМ МЕЛКО-  
СОРТНО-ПРОВОЛОЧНОМ СТАНЕ 150**

Специальность 05.16.05 – Обработка металлов давлением

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Екатеринбург, 2011

Работа выполнена на кафедре «Обработка металлов давлением» ФГАОУ ВПО «УрФУ имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»

**Научный руководитель**

доктор технических наук, профессор  
Шилов Владислав Александрович,  
ФГАОУ ВПО «УрФУ имени первого  
Президента России Б.Н. Ельцина»

**Официальные оппоненты:**

доктор технических наук, старший на-  
учный сотрудник  
Смирнов Сергей Витальевич, Инсти-  
тут машиноведения УрО РАН

кандидат технических наук, доцент  
Бондин Андрей Рудольфович,  
ОАО «Синара – Транспортные маши-  
ны»

**Ведущее предприятие:**

ГОУ ВПО «Южно-Уральский государ-  
ственный университет»,  
г. Челябинск

Защита диссертации состоится «11» ноября 2011 г. в 15.00 на заседании диссер-  
тационного совета Д212.285.04 при ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный  
университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина» по адресу  
620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, д. 19, 3-й учебный корпус, ауд. Мт-329. Те-  
лефон (343)375-45-74; факс (343)375-48-03, e-mail: omd@mtf.ustu.ru

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВПО «Уральский  
федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»

Автореферат разослан «07» октября 2011 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета



Л.А. Мальцева

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** Строительство и освоение новых прокатных станов взамен устаревших агрегатов всегда было основным направлением развития прокатного производства. Несмотря на мировой экономический кризис в 2007 – 2010 г. в России был построен ряд новых прокатных станов<sup>\*)</sup>, в том числе двухниточный мелкосортно-проволочный стан 150 в ОАО «Нижнесергинский метизно-металлургический завод» (НСММЗ, г. Березовский), который заменил менее производительный однониточный проволочный стан.

Новый стан 150, спроектированный и изготовленный компанией «Danieleli», предназначен для производства в бунтах мелкосортной стали и катанки широкого марочного сортамента и различного промышленного назначения (низкоуглеродистая для прямого волочения, арматурная, канатная, сварочная, кордовая и др.). Соответственно этому стан снабжен техническими средствами для широкого регулирования скоростных, температурных и деформационных условий прокатки, что позволяет создавать гибкие технологии производства проката различного назначения с требуемыми механическими свойствами.

Как показывает производственный опыт, освоение любого прокатного стана связано с теоретическими и экспериментальными исследованиями, направленными на доработку (совершенствование) пусковых проектных технологических режимов с целью получения наиболее высоких показателей качества продукции и ускоренного достижения проектной производительности. Проведение такого исследования в условиях стана 150 НСММЗ является актуальной задачей.

Диссертационная работа выполнена в рамках Федеральной научно-технической целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России», по государственному контракту № 02.740.11.0152 «Разработка комплексной металлургической технологии производства высококачественных стальных изделий массового назначения» (шифр «2009-1.1233-032-007»), а также по гранту УрФУ на проведение научных исследований № 1.2.3/28.

**Цель работы.** Целью диссертации является исследование пусковых режимов прокатки на новом непрерывном мелкосортно-проволочном стане 150 и разработка научно обоснованных оптимальных режимов термомеханической обработки катанки различного назначения и мелкосортной стали в бунтах,

---

<sup>\*)</sup> Радюкевич Л.В. Состояние и основные направления развития прокатного производства черной металлургии России в 2007 – 2010 г.г.// Сталь. 2011. №1. С. 42 – 47.

обеспечивающих улучшение механических свойств проката и достижение проектной производительности стана.

**Научную новизну** диссертации составляют следующие разработки:

– математическая модель температурных режимов прокатки и охлаждения металла при производстве мелкосортной стали и катанки на современном мелкосортно-проволочном стане;

– закономерности изменения температурных полей в сечении раската при высокоскоростной прокатке в чистовом проволочном блоке клетей по системе калибров овал – круг;

– математическая модель механических свойств готового проката, получаемого на мелкосортно-проволочном стане, устанавливающая зависимость прочностных и пластических характеристик от химсостава стали и параметров термомеханической обработки раскатов;

– модель оптимизации технологических режимов производства мелкосортной стали и катанки по критериям улучшения механических свойств с применением метода возможных направлений.

**Практическую ценность** представляют следующие результаты диссертации:

– алгоритм расчета температуры раската в процессе термомеханической обработки на современном мелкосортно-проволочном стане 150;

– алгоритм и программа конечно-разностных расчетов воздушного охлаждения витков катанки на роликовом транспортере при различных условиях его работы (программа «Воздушное охлаждение»);

– алгоритмы оптимизации режимов термомеханической обработки катанки различного назначения с применением экспертной системы «Технология сортовой прокатки» и программы «Воздушное охлаждение»;

– определение степени энергосилового нагружения оборудования стана 150 и факторов, ограничивающих интенсификацию технологических режимов.

**Реализация результатов работы.** Указанные разработки были использованы при проектировании и освоении технологических режимов производства термоупрочненной арматуры диаметром 6 мм из стали Ст3, сварочной катанки диаметром 5,5 мм из низколегированной стали Св-08Г2С, кордовой катанки диаметром 5,5 мм из высокоуглеродистой стали 70 и других видов продукции на новом мелкосортно-проволочном стане 150 ОАО «Нижнесергинский метизно-металлургический завод».

**Апробация работы.** Основные положения и результаты работы были доложены и обсуждены на следующих конференциях и семинарах:

XII отчетная конференция молодых ученых ГОУ ВПО УГТУ-УПИ: – Екатеринбург, 2007. Второй международный научно-практический семинар «Уральская научно-педагогическая школа по обработке металлов давлением им. А.Ф. Головина»: – Екатеринбург, 2007. XIV отчетная конференция молодых ученых ГОУ ВПО УГТУ-УПИ: – Екатеринбург, 2008. Международный научно-практический семинар «Уральская научно-педагогическая школа по обработке металлов давлением им. А.Ф. Головина»: – Екатеринбург, 2009. XVII международная конференция молодых ученых по приоритетным направлениям развития науки и техники: – Екатеринбург, 2010. Восьмой международный конгресс прокатчиков: – Магнитогорск, 2010. XVIII международная конференция молодых ученых по приоритетным направлениям развития науки и техники: – Екатеринбург, 2010. Международная конференция «Форсирование индустриально-инновационного развития металлургии»: – Алматы, 2010. Международный научно-практический семинар «Уральская научно-педагогическая школа по обработке металлов давлением им. А.Ф. Головина»: – Екатеринбург, 2011. Международная научно-техническая конференция «Современные металлические материалы и технологии (СММТ'2011)»: – Санкт-Петербург, 2011.

**Публикации.** Основное содержание диссертационной работы опубликовано в восьми печатных статьях, в том числе три в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК РФ.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения и изложена на 152 страницах машинописного текста, включая 27 рисунков, 13 таблиц, 4 приложения и библиографический список из 91 наименования.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** дано обоснование темы диссертационной работы и представлена общая характеристика диссертации.

В **первой главе** представлено описание объекта исследования и выполнен аналитический обзор по теме диссертации.

Новый мелкосортно-проволочный стан 150 (рис.1), изготовленный фирмой «Danieli» и установленный в 2008 году на НСММЗ (г. Березовский), предназначен для производства в бунтах мелкосортной круглой и арматурной стали диаметром до 22 мм и катанки диаметром 5,5 – 9,0 мм широкого марочного сортамента (от Ст0 – Ст3 до Св-08Г1НМФАА) и различного промышленного

назначения (арматурная, канатная, сварочная, кордовая и др.), характеризующихся весьма существенным различием механических свойств.

По техническому оснащению стан 150 является одним из наиболее современных мелкосортно-проволочных станов и снабжен устройствами для широкого регулирования скоростных, температурных и деформационных режимов прокатки с целью создания технологий, обеспечивающих получение требуемых, существенно различающихся прочностных и пластических свойств проката.

В качестве исходной заготовки используется непрерывнолитой блюм сечением 125×125 мм длиной 12 м. Прокатка всего сортамента профилей проводится по системе калибров овал – круг. Технически возможная конечная скорость прокатки изменяется в пределах 40 – 115 м/с. Производственная мощность стана составляет 990 тыс. т. в год.

Технология производства мелкосортной стали и катанки с регулируемыми механическими свойствами связана с термомеханической обработкой (ТМО) проката. В диссертации приведен обзор опыта применения ТМО на мелкосортно-проволочных станах. Теоретические и технологические основы термомеханической обработки проката в потоке прокатных станов разработаны в трудах К.Ф. Стародубова, И.Г. Узлова, В.Я. Савенкова, М.Л. Бернштейна и развиты в работах их последователей В.В. Калмыкова, А.А. Кугушина, В.Т. Черненко, А.П. Башенко, Г.А. Хасина, А.А. Минаева, В.В. Парусова и др. В развитие этих работ в ИЧМ НАН Украины создан отдел термической обработки металлов для машиностроения (ОТОМ), который на протяжении многих лет ведет активные работы по использованию ТМО на предприятиях Украины, Молдавии, Белоруссии и России (Молдавский и Белорусский металлургический заводы, комбинат «Криворожсталь», Оскольский металлургический комбинат, Западно-Сибирский металлургический комбинат и др.). Изучению процессов термомеханической обработки посвящены труды Л.М. Капуткиной, В.А. Займовского, А.Б. Сычкова, С.В. Грачева, В.Р. Бараза, В.М. Счастливецва, В.А. Луценко, В.М. Фарбера и других ученых. В настоящее время известно несколько разновидностей ТМО: высокотемпературная (ВТМО), низкотемпературная (НТМО), механико-термическая (МТО), предварительная (ПТМО), разупрочняющая и др. Контролируемую прокатку также считают видом ТМО.

Процессы термомеханической обработки основаны на фазовых и структурных превращениях при нагреве и охлаждении железоуглеродистых сплавов. Изменяя скорость охлаждения можно получать разнообразные структурные со-

стояния стали и, следовательно, разные ее механические свойства (прочностные и пластические). Комбинируя термические операции с пластической деформацией (прокаткой), создающей несовершенства кристаллической решетки, получают различные виды упрочняющей и разупрочняющей термомеханической обработки.

В диссертации представлен и обобщен производственный опыт термомеханической обработки различных видов проката: арматурной стали, катанки из низкоуглеродистой стали для прямого волочения на проволоку диаметром 0,5 – 0,6 мм, сварочной катанки из низкоуглеродистой кремнемарганцовистой стали, высокоуглеродистой катанки для производства проволоки для канатов, пружин, проволочной арматуры и металлокорда. Показано, что при производстве проката различного назначения в зависимости от требуемых механических свойств применяют упрочняющую или разупрочняющую термомеханическую обработку, управляя химсоставом стали, условиями нагрева заготовки, температурными режимами прокатки и охлаждения металла, деформационными, временными и скоростными параметрами процесса.

Для прогнозирования механических свойств проката при разработке режимов ТМО в литературе получены математические модели, выражающие зависимость прочностных и пластических характеристик от химсостава стали и технологических параметров прокатки. Такие модели получены в результате статистического анализа производственных данных и имеют вид уравнений регрессии, позволяющих получать достоверные результаты в условиях тех прокатных станов, где проводилось статистическое исследование. Для нового стана 150 необходимо получить свою математическую модель механических свойств мелкосортной стали и катанки, используя качественные зависимости известных регрессионных моделей.

При проектировании и оптимизации процессов термомеханической обработки катанки и мелкосортной стали необходимо в качестве основы алгоритма использовать математическую модель сортовой прокатки. Среди известных математических моделей технологии сортовой прокатки наиболее полной и научно обоснованной является система расчетов формоизменения металла и энергосиловых параметров деформации, разработанная в Уральском государственном техническом университете – УПИ (ныне УрФУ) на основе применения вариационных методов теории пластичности и обобщения производственных данных. Указанная математическая модель реализована на ЭВМ в виде эксперт-

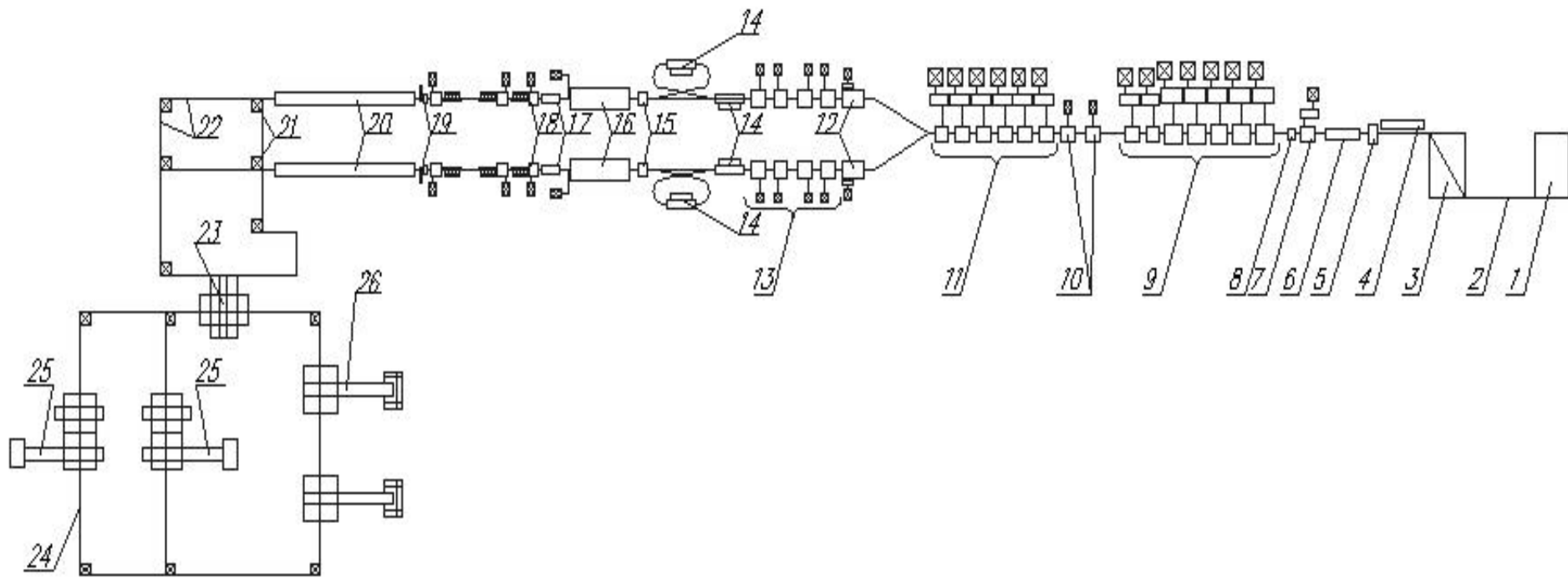


Рис. 1. Схема расположения оборудования мелкосортно-проволочного стана 150: 1-загрузочная решетка; 2-рольганг загрузочный; 3-печь нагревательная; 4-стол для отбраковки заготовок; 5-гидросбив окалины; 6-термостат; 7-трайбаппарат; 8-ножницы; 9-черновая группа клеток; 10-ножницы обрезные; 11-промежуточная группа клеток; 12-ножницы обрезные; 13-предчистовая группа клеток (4×2); 14- линия водяного охлаждения; 15-ножницы обрезные; 16-чистовой проволочный блок; 17-линия водяного охлаждения проката; 18- трайбаппарат; 19-виткоукладчик; 20-линия воздушного охлаждения проката; 21-виткосборник; 22-линия транспортировки бунтов; 23- передаточная тележка бунтов; 24-крюковой конвейер бунтов; 25-установка подпрессовки и обвязки бунтов; 26-разгрузочная тележка бунтов.



ной системы (ЭС) «Технология сортовой прокатки», в которой наряду с формализованными знаниями используются элементы искусственного интеллекта. Эту экспертную систему целесообразно применять для анализа и компьютерного моделирования процессов прокатки на мелкосортно-проволочных станах. Однако использование ее для разработки процессов ТМО вызывает трудности в связи с тем, что при расчете изменения температуры раската не учитывается принудительное водяное охлаждение полосы в процессе прокатки.

Необходимо отметить, что практически все известные методы расчета температурных режимов прокатки, как правило, учитывают потери тепла излучением и конвекцией и разогрев полосы от деформации, но не учитывают принудительного охлаждения раската между группами клетей в специальных камерах. Поэтому с целью использования ЭС «Технология сортовой прокатки» при моделировании и оптимизации режимов ТМО на современных мелкосортно-проволочных станах необходимо разработать математическую модель изменения температуры раската в процессе прокатки на стане с учетом принудительного охлаждения водой.

На основании приведенного аналитического обзора сформулирована цель и определены задачи диссертационной работы:

- разработать математическую модель температурного режима прокатки и охлаждения металла на стане, включающую изменение температуры раската при прокатке в рабочих клетях, принудительном водяном охлаждении в трубчатых камерах, воздушном охлаждении на виткообразователе и роликовом транспортере с поднятыми и закрытыми теплозащитными кожухами;
- провести статистическое исследование механических свойств проката и получить регрессионные зависимости прочностных и пластических характеристик катанки от параметров ТМО;
- провести моделирование технологических режимов прокатки в экспертной системе «Технология сортовой прокатки» и определить факторы (ресурсы стана), ограничивающие конечную скорость прокатки и производительность стана; разработать методику оптимизации технологических режимов по критериям быстродействия;
- разработать алгоритм оптимизации режимов термомеханической обработки арматурной стали и катанки различного назначения по критериям улучшения механических свойств;

- разработать методику прогнозирования микроструктуры и механических свойств проката;
- применить полученные результаты для совершенствования технологических режимов прокатки на стане 150 НСММЗ.

**Вторая глава** посвящена разработке математической модели температурного режима прокатки и охлаждения металла на стане 150.

Соответственно схеме технологического процесса разработанная модель содержит 4 расчетных модуля: изменения температуры предварительно нагретой заготовки в процессе прокатки в рабочих клетях стана; снижения температуры раската в трубчатых камерах водяного охлаждения перед и за чистовым блоком клетей; охлаждения катанки вентиляторным воздухом на виткоукладчике и открытой части роликового транспортера; снижения температуры витков катанки под теплозащитными крышками роликового транспортера.

Изменение температуры при прокатке за один проход составляет:

$$\Delta t = t_0 - \frac{1000}{\sqrt[3]{\frac{0,0255\Pi\tau}{\omega} + \left(\frac{1000}{t_0 + \Delta t_d + 273}\right)^3}} + 273; \Delta t_d = 0,183\sigma \ln \lambda, \quad (1)$$

где  $\tau$  – время охлаждения раската при прокатке и перемещении к следующей клетке, с;  $\Delta t_d$  – повышение температуры раската в процессе прокатки, °С;  $\sigma$  – сопротивление металла деформации, МПа, определяемое по методу термомеханических коэффициентов;  $\lambda$  – коэффициент вытяжки;  $\omega$  – площадь, м<sup>2</sup>;  $\Pi$  – периметр поперечного сечения, м;  $t_0$  – начальная температура, °С.

Формулы (1) реализованы в ЭС «Технология сортовой прокатки», которую применили для расчета температурных режимов.

Снижение температуры раската в камерах принудительного водяного охлаждения определили исходя из уравнения теплового баланса, согласно которому количество тепла, отдаваемое металлом, равно количеству тепла, поглощаемого водой. В результате получили формулу

$$t_n - t_k = \frac{C_b k w \Delta t}{3,6 \omega V \rho C_{ст}}, \quad (2)$$

где  $C_b$  – теплоемкость воды, Дж/(кг·°К);  $k$  – коэффициент эффективности работы камеры, связанный с потерями воды на отсечку и утечку;  $w = \frac{m}{3,6}$  – расход воды в камерах по показаниям расходомера, м<sup>3</sup>/ч;  $\Delta t$  – разность температуры воды до и после процесса охлаждения раската, °К;  $\omega$  – площадь поперечного

сечения раската,  $m^2$ ;  $V$  – скорость движения раската,  $m/c$ ;  $\rho$  – плотность стали,  $кг/м^3$ ;  $C_{ст}$  – теплоемкость стали,  $Дж/(кг \cdot ^\circ K)$ .

Модель воздушного охлаждения катанки на виткообразователе и роликовом транспортере базируется на определении лучистой и конвективной передачи тепла в окружающее пространство. При этом удельный тепловой поток (количество тепла, теряемое в единицу времени единицей поверхности раската) при открытых экранах рассчитывается по закону Ньютона:

$$q = \alpha_{\Sigma} (T_{п} - T_{c}), \quad (3)$$

где  $\alpha_{\Sigma} = \alpha_{к} + \alpha_{л}$  – суммарный коэффициент теплоотдачи конвекцией  $\alpha_{к}$  и излучением  $\alpha_{л}$ ,  $Вт/(м^2 \cdot K)$ ;  $T_{п}$  – температура поверхности раската,  $^\circ K$ ;  $T_{c}$  – температура окружающей среды,  $^\circ K$ . Коэффициент  $\alpha_{л}$  в соответствии с законом Стефана – Больцмана  $\alpha_{л} = C_{прив} [(T_{п}/100)^4 - (T_{c}/100)^4] / (T_{п} - T_{c})$ , где  $C_{прив}$  – приведенный коэффициент излучения системы «раскат – окружающая среда». Коэффициент  $\alpha_{к}$  рассчитывают с использованием критериев Нуссельта  $Nu$  и Рейнольдса  $Re$ :  $\alpha_{к} = Nu \lambda_{в} / R$ ;  $Nu = 0,18 Re^{0,62} \psi$ ;  $Re = wd/\nu$ , где  $\lambda_{в}$  – коэффициент теплопроводности воздуха,  $Вт/(м \cdot K)$ ;  $R$  – характерный размер раската в поперечном сечении,  $м$ ;  $\psi$  – функция угла атаки;  $w$  – скорость потока воздуха,  $м/с$ ;  $d$  – приведенный диаметр раската,  $м$ ;  $\nu$  – кинематический коэффициент вязкости воздуха,  $м^2/с$ .

При найденном значении  $q$  падение теплосодержания витков катанки на промежутке времени  $\Delta\tau$  составит:

$$\Delta i = qk\Delta\tau / R\rho, \quad (4)$$

где  $\Delta i$  – падение теплосодержания,  $Дж/кг$ ;  $k$  – коэффициент материальной нагрузки ( $k=1$  для пластины,  $k=2$  для цилиндра).

При известной температуре  $T_0$  катанки в начале промежутка времени  $\Delta\tau$  с учетом (4) температура в конце этого промежутка рассчитывается по формуле

$$T_1 = (T_0 C_0 - qk\Delta\tau / R\rho) / C_1, \quad (5)$$

где  $C_0$  – теплоемкость стали при  $T_0$ ,  $Дж/(кг \cdot K)$ ;  $C_1$  – теплоемкость стали при  $T_1$ ,  $Дж/(кг \cdot K)$ .

Таким образом, разбивая процесс охлаждения катанки на роликовом транспортере на конечные отрезки времени  $\Delta\tau$ , можно рассчитать в конечно-разностной форме изменение температуры на любом открытом участке транс-

портера. Конечным результатом такого расчета является температура витков катанки перед участком закрытых теплозащитных крышек  $t_3$ .

По разработанной математической модели составлен алгоритм и программа «Воздушное охлаждение» для автоматических расчетов режима охлаждения витков катанки на роликовом транспортере при открытых теплозащитных крышках. Программа составлена в среде визуального программирования Lazarus и реализована на персональном компьютере в операционной системе Windows XP. Время расчета режима воздушного охлаждения в зависимости от длины открытого участка транспортера составляет 40 – 90 с.

Для расчета температурного режима охлаждения витков катанки под теплосохраняющими крышками было проведено специальное экспериментальное исследование на стане. При помощи портативного инфракрасного пирометра типа «Кельвин-компакт 1200» проводили замеры температуры витков под закрытыми крышками после 3, 4, 6, 8, 12 и 14 секции рольганга при скорости транспортирования витков от 0,07 м/с до 0,65 м/с. В результате обработки 114 замеров по программе Microsoft Excel была получена аппроксимирующая формула

$$t_b = t_3 \exp(-0,00105\tau), \quad (6)$$

где  $\tau$  – продолжительность охлаждения катанки под закрытыми крышками, сек.

С использованием полученной математической модели составлен общий алгоритм определения температурного режима прокатки и охлаждения раската при заданной начальной температуре прокатки:

1. По программе ЭС «Технология сортовой прокатки» или по формулам (1) рассчитывают изменение температуры раската в черновой, промежуточной и предчистовой группах клетей.

2. Принимают расход воды в камере предварительного охлаждения и рассчитывают по формуле (2) понижение температуры раската в этой камере и температуру подката для блока клетей.

3. С применением ЭС «Технология сортовой прокатки» рассчитывают изменение температуры в чистовом блоке клетей. Конечную температуру в блоке принимают в качестве исходной для последующего расчета охлаждения раската.

4. Рассчитывают по формуле (2) снижение температуры в камерах окончательного водяного охлаждения и температуру катанки на виткоукладчике.

5. По программе «Воздушное охлаждение» определяют режим охлаждения витков катанки на открытой части транспортера, в результате чего рассчитывают температуру катанки перед первой закрытой крышкой  $t_3$ . Затем рассчитывают длительность охлаждения катанки под закрытыми крышками и по формуле (6) определяют температуру бунта в виткосборнике.

Расчетное изменение температуры в процессе ТМО рекомендуется представлять на общем графике (рис. 2).

Для определения закономерностей распределения температуры в поперечных сечениях раската в диссертации проведено конечно-элементное моделирование в программном комплексе «Deform-3D» температурных полей при прокатке в чистовом блоке клетей. Для построения геометрической модели использовали систему твердотельного моделирования «SolidWorks». Исследовали процесс прокатки катанки  $\varnothing 5,5$  мм в калибрах системы овал-круг при конечной скорости прокатки 110 м/с. Характерные эпюры температурных полей в паре калибров овал-круг приведены на рис. 3. Установлена характерная закономерность изменения температурного поля в каждом проходе: наиболее высокую температуру имеют подконтактные слои металла, которые подвергаются прямому, наиболее сильному обжатию, а боковые недеформируемые зоны не изменяют температуры или несколько охлаждаются. После кантовки в следующем калибре бывшие необжимаемые, более «холодные» зоны подвергаются сильному обжатию и разогреваются, а боковые зоны сохраняют прежнюю температуру. В целом же температура раската за пару проходов увеличивается на 20 – 30°С. В процессе повторения такого характера изменения температуры по ходу прокатки в каждой паре калибров системы овал-круг средняя температура раската повышается, а равномерность распределения температуры по сечению увеличивается: к чистовому проходу разница температур по сечению не превышает 4 – 5°С, что является благоприятным для формирования структуры и механических свойств в сечении готового профиля.

В **третьей главе** диссертации изложены методика и результаты статистического исследования технологических режимов прокатки катанки и мелкосортной стали с целью разработки математических моделей механических свойств проката.

При формировании статистической выборки анализировали режимы термомеханической обработки катанки диаметром от 5,5 до 8,0 мм, мелкосортных арматурных периодических и гладких профилей диаметром от 6 до 16 мм из

сталей марок Ст1, Ст2, Ст3, 08пс, 15Гпс, Св-08А, Св-08АА, Св-08Г2С, Св-08ГНМ, Св-10НМА, 25Г2С, 35ГС, 70, SAE 1005, SAE 1006, SAE 1008, ТМ.

Химический состав сталей (содержание С, Si, Mn, P, S, Cr, Ni, Al, Cu, As, N) принимали согласно паспортам плавок, представленным электросталеплавильным комплексом НСММЗ. Количество обработанных плавок составило 2159.

При прокатке каждой партии металла с использованием установленных на стане средств контрольно-измерительной аппаратуры фиксировали термомеханические параметры, которые, согласно имеющимся теоретическим представлениям и практическому опыту, могут оказывать влияние на механические свойства проката: диаметр катанки  $d$ , температуру нагрева заготовки  $t_{\text{нагр}}$ , температуру раската на виткоуладчике  $t_{\text{в/о}}$ , конечную скорость прокатки  $V_{\text{к}}$ , скорости секций роликового транспортера  $S_i$ , количество работающих вентиляторов  $n_v$ , а также количество открытых и закрытых термоизоляционных крышек на участке воздушного замедленного охлаждения катанки  $m$ .

На образцах, отобранных при прокатке каждой партии металла, стандартными испытаниями определяли механические свойства, в частности: временное сопротивление разрыву  $\sigma_{\text{в}}$ , относительное сужение  $\psi$ , условный предел текучести  $\sigma_{0,2}$  и относительное удлинение  $\delta_5$ .

В результате корреляционно-регрессионного анализа полученных статистических выборок с применением программы Statistica 6 получены две группы уравнений регрессии, выражающие зависимость временного сопротивления разрыву  $\sigma_{\text{в}}$ , относительного сужения  $\psi$ , условного предела текучести  $\sigma_{0,2}$  и относительного удлинения  $\delta_5$  от химсостава стали и от параметров термомеханической обработки раскатов.

Зависимость механических свойств от химсостава стали выражается следующими уравнениями регрессии:

$$\sigma_{\text{в}} = 285,46 + 1053,42C - 44,19Si + 123,69Mn + 1031,21S + 197,11Cr - 3396,71Al, \quad \mathbf{R} = \mathbf{0,87}; \quad (7)$$

$$\psi = 86,218 - 62,823C - 4,712Si - 5,682Mn + 108,253P - 125,112S - 11,933Cr - 12,808Cu + 298,425Al - 210,625N, \quad \mathbf{R} = \mathbf{0,79} \quad (8)$$

$$\sigma_{0,2} = 143,91 + 438,86C - 1016,91Si + 502,03Mn + 531,38Ni, \quad \mathbf{R} = \mathbf{0,77} \quad (9)$$

$$\delta_5 = 43,3890 - 22,4831C + 31,2114Si - 23,8302Mn - 18,2251Ni, \quad \mathbf{R} = \mathbf{0,68} \quad (10)$$

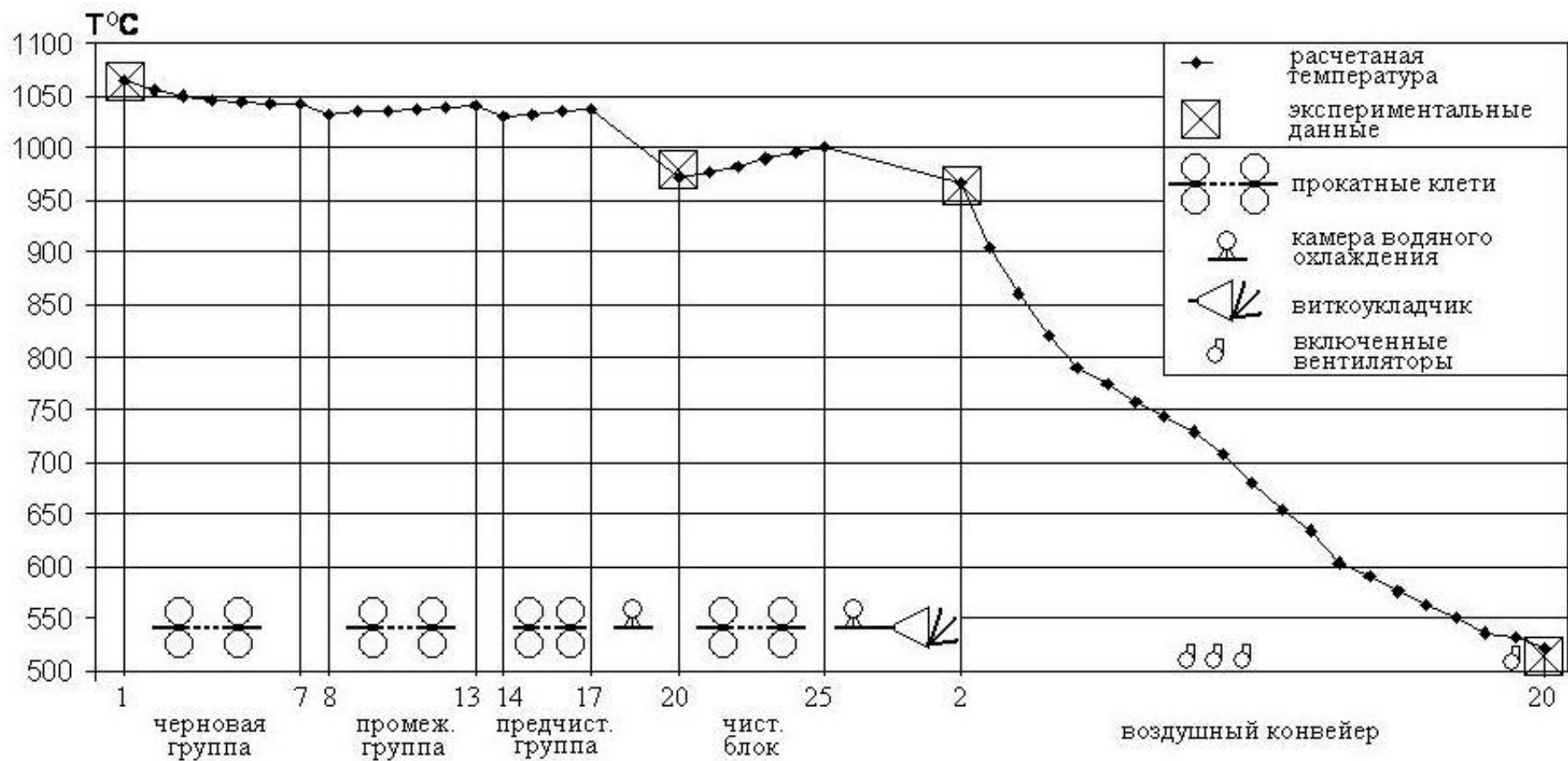
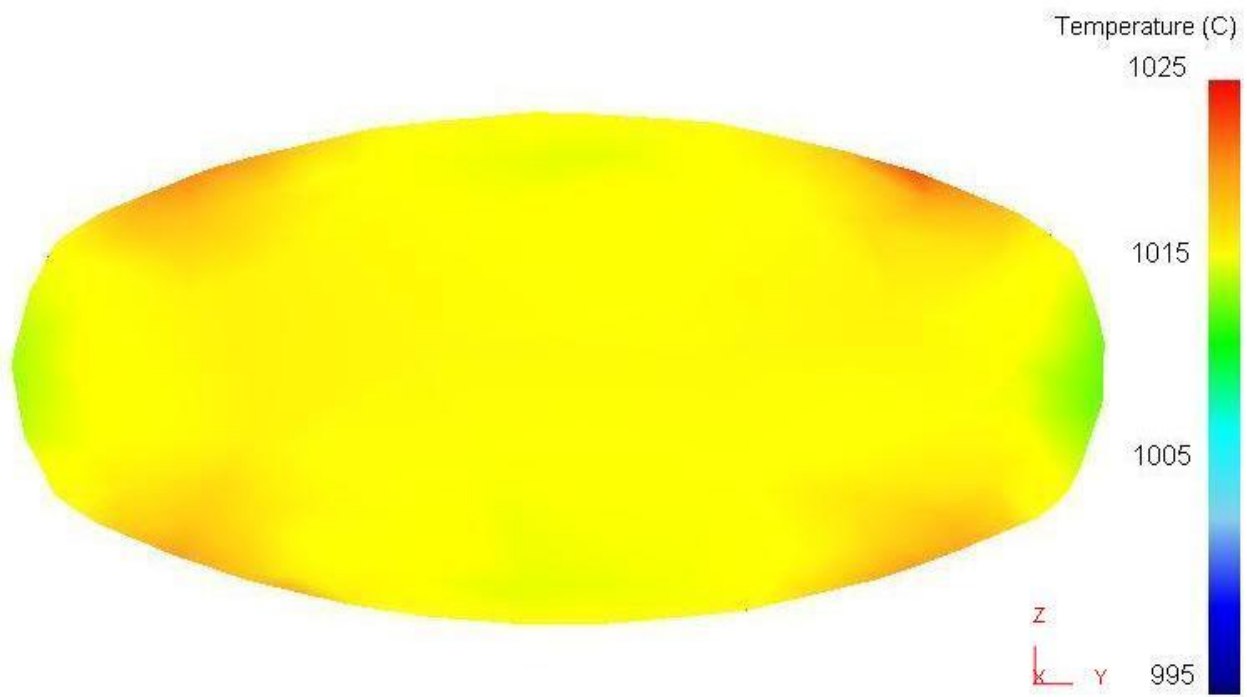
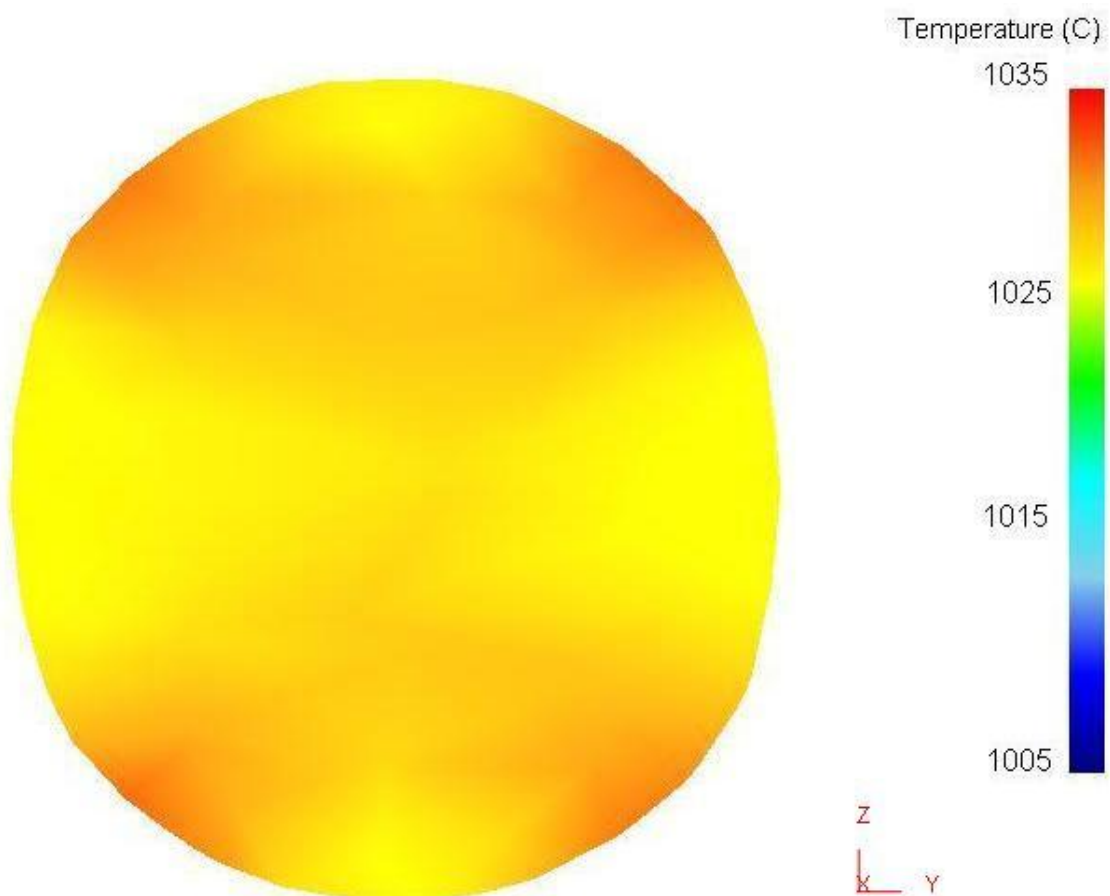


Рис. 2. Расчетный график температурного режима прокатки и охлаждения при термомеханической обработке арматурной стали  $\varnothing 10$  мм марки Ст3сп



Клеть 5



Клеть 6

Рис. 3. Расчетные эпюры температурных полей при прокатке в чистовом блоке клетей



Комплекс уравнений регрессии, определяющих зависимость прочностных и пластических характеристик от параметров термомеханической обработки раскатов выглядит следующим образом:

$$\sigma_{\sigma} = 1846,035 - 11,006d - 1,429t_{\sigma/o} - 1,280V_{\kappa} + 0,229\tau_{отк} - 0,0949\tau_{зак} + 0,4659\tau_{вент}, \quad \mathbf{R} = \mathbf{0,93}, \quad (11)$$

$$\psi = -241,024 - 0,061d + 0,365t_{\sigma/o} + 0,036V_{\kappa} + 0,012\tau_{закр} - 0,102\tau_{вент}, \quad \mathbf{R} = \mathbf{0,96}, \quad (12)$$

$$\sigma_{0,2} = 500,3465 - 3,9d - 0,53t_{\sigma/o} + 0,44V_{\kappa} - 0,25\tau_{отк} + 2,42\tau_{вент} + 0,39t_{нагр}, \quad \mathbf{R} = \mathbf{0,94}, \quad (13)$$

$$\delta_5 = 850,68 - 0,17d + 0,025t_{\sigma/o} - 0,068V_{\kappa} - 0,045\tau_{отк} - 0,356\tau_{вент} - 0,77t_{нагр}, \quad \mathbf{R} = \mathbf{0,78}, \quad (14)$$

Где  $\tau_{отк}$ ,  $\tau_{закр}$  и  $\tau_{вент}$  – продолжительность движения витков катанки на участках соответственно с открытыми и закрытыми крышками, а также с включенными вентиляторами. Эти величины определяются с учетом номера секции рольганга

$$(i=1,2\dots 19), \text{ длины } l_i \text{ и скорости секции } V_i: \tau_j = \sum_k^p \frac{l_i}{V_i}.$$

Полученные уравнения регрессии (7) – (14) характеризуются высокими коэффициентами множественной корреляции ( $R=0,68 - 0,96$ ), значимость которых установлена по критерию Фишера. Значимость коэффициентов уравнений регрессии подтверждена по критерию Стьюдента.

Полученные регрессионные модели рекомендуется применять для прогнозирования механических свойств готового проката на стане 150 и для оптимизации технологических режимов по критериям механических свойств.

В четвертой главе представлены результаты моделирования и оптимизации технологических режимов прокатки на стане 150.

С целью определения нагруженности оборудования стана моделировали в ЭС «Технология сортовой прокатки» режимы прокатки катанки  $\varnothing 5,5$  мм из стали марок Ст3 и 60С2 с конечной скоростью  $V_{\kappa}=110$  м/с и из высокоуглеродистой стали 95Г в диапазоне  $V_{\kappa}=60 \div 110$  м/с, а также мелкосортной стали  $\varnothing 14$  мм при  $V_{\kappa}=24,5$  м/с. В результате моделирования установлено, что степени энергосиловой загрузки оборудования и электродвигателей клеток 1 – 13 и блока клеток составляют 0,6 – 0,8 и не ограничивают технологические режимы. Наиболее загруженными оказались электродвигатели предчистовых клеток 14 и 16. При прокатке сталей Ст3 и 60С2 коэффициент их загрузки составил 0,8 –

0,9, но при прокатке канатной стали 95Г при  $V_k=110$  м/с эти двигатели оказались перегруженными, и поэтому конечную скорость прокатки на этой стали пришлось снизить до 60 м/с, при которой  $k_{дв}=0,90\div 0,98$ .

Таким образом, главным фактором, ограничивающим конечную скорость прокатки и, следовательно, быстродействие (производительность) стана, является мощность электродвигателей консольных клеток 14 и 16. Кроме того, при моделировании установлено, что конечная скорость прокатки ограничена условиями получения требуемых механических свойств проката: при высокой конечной скорости прокатки в блоке происходит чрезмерный разогрев катанки, и высокая конечная температура не позволяет получить нужные прочностные характеристики. Поэтому в известный алгоритм оптимизации по быстродействию стана необходимо включить ограничения по механическим свойствам проката.

#### *Оптимизация по критериям механических свойств*

Для разработки оптимальных режимов термомеханической обработки мелкосортной стали и катанки с целью улучшения их механических свойств применили методы исследования операций. При этом в качестве целевой функции принимали основную по требованиям стандартов механическую характеристику  $Z$  (например, для арматурной стали  $Z=\sigma_b$ , а для низкоуглеродистой катанки  $Z=\psi$ ) с учетом ограничений  $Z_{\min}<Z<Z_{\max}$  и ограничений по другим свойствам ( $\delta_5$ ,  $\sigma_T$  и др.).

В качестве дескриптивной математической модели использовали полученные уравнения регрессии (11) – (14), для расчета параметров процесса прокатки применили математическую модель УрФУ, реализованную в ЭС «Технология сортовой прокатки». Анализируя указанные модели, формировали вектор управления  $U$  ( $x_1, x_2, x_3, \dots$ ). Оценивая составляющие этого вектора по значимости влияния на оптимизируемую механическую характеристику, выделяли наиболее значимый параметр управления  $x_1$  и ранжировали по значимости остальные управляющие параметры. Задача оптимизации технологического режима сводится к поиску такого управления  $U^*(X^*)$ , при котором достигается максимум целевой функции

$$Z^* = \max[Z(X^*)], \quad X^* \in U \quad (15)$$

Для поиска экстремума целевой функции применили один из численных методов оптимизации – метод возможных направлений. Такие методы базируются на вычислительных и логических операциях и сводятся к построению алгоритмов с использованием эвристических соображений. Сущность метода за-

ключается в том, что из начальной точки  $X_0$  осуществляется переход к новой допустимой точке, в которой значение целевой функции  $Z$  лучше, чем в точке  $X_0$ . Этот процесс продолжается до тех пор, пока сохраняется возможность улучшения  $Z$ . Такая процедура повторяется для каждой составляющей вектора управления  $U (x_1, x_2, x_3, \dots)$ .

С учетом указанных общих положений составлен алгоритм оптимизации режимов ТМО по критериям механических свойств, основными этапами которого являются: формирование параметров управления, присвоение каждому параметру численных значений (составление исходного технологического режима), расчет температурного режима прокатки и охлаждения раската, расчет в ЭС «Технология сортовой прокатки» всех параметров технологического режима, проверка ограничений, определение по уравнениям регрессии механических свойств проката и их оценка, изменение значения управляющего параметра в направлении увеличения целевой функции или смена управления, повторные расчеты.

Ниже приводится пример оптимизации по разработанному алгоритму технологии производства кордовой катанки  $\varnothing 5,5$  мм из стали 70. По техническим требованиям для этой катанки предел прочности  $\sigma_B = 950 \div 1180$  МПа и относительное сужение  $\psi \geq 28\%$ . Поэтому в качестве целевой функции  $Z$  необходимо выбрать  $\sigma_B$ , т.е.  $Z = \sigma_B^* \rightarrow \max [Z (U^*)]$ . Анализируя уравнение регрессии (11), выбираем в качестве параметров управления конечную скорость прокатки  $V_K$ , температуру виткообразования  $t_{B/O}$ , время охлаждения  $\tau_{отк}$ ,  $\tau_{зак}$ ,  $\tau_{вент}$ . В качестве исходного для оптимизации приняли пусковой режим, для которого  $t_H = 1055^\circ\text{C}$ ;  $V_K = 110$  м/с;  $t_{B/O} = 950^\circ\text{C}$ ;  $\tau_{отк} = 116,83$  с (при скорости транспортера  $V_T = 0,8 \div 1,2$  м/с);  $\tau_{зак} = 0$  с (все крышки открыты);  $\tau_{вент} = 0$  с (вентиляторы отключены).

Вначале по алгоритму расчета температурного режима прокатки и охлаждения была определена температура раската на всех участках стана (рис. 4, кривая 1). Затем по программам ЭС «Технология сортовой прокатки» рассчитали все технологические и энергосиловые параметры прокатки и установили, что все ограничения технологического режима выполняются. Выполнив расчет по регрессионным моделям (11) – (12) получили  $\psi = 65,74\%$ ,  $\sigma_B = 720,25$  МПа. Сравнивая эти результаты с требуемыми характеристиками (см. выше), убедились, что полученное значение  $\sigma_B = 720,25$  МПа существенно меньше требуемого (950 – 1180 МПа). Поэтому необходимо изменить наиболее значимый управ-

ляющий параметр  $t_{в/о}$  в сторону, соответствующую увеличению  $\sigma_{в}$ , т.е. уменьшение  $t_{в/о}$  за счет увеличения расхода воды в камерах, приняли  $t_{в/о}=900^{\circ}\text{C}$ . Одновременно уменьшили конечную скорость прокатки до 85 м/с в целях предотвращения образования мартенсита. Повторив указанные выше расчеты, получили новый температурный режим прокатки и охлаждения (см. кривую 2 на рис. 4) и соответствующие значения механических свойств:  $\psi=53,32\%$  и  $\sigma_{в}=820,16$  МПа, что также меньше  $\sigma_{в\text{min}}=950$  МПа. Дальнейшее снижение скорости прокатки нецелесообразно, так как приведет к уменьшению производительности стана. Поэтому в качестве нового параметра управления выбрали охлаждение витков на транспортере вентиляторным воздухом. При пяти включенных вентиляторах время охлаждения  $\tau_{\text{вент}}=18,1$  с. Повторив все указанные расчеты при этом управляющем параметре, получили новый температурный режим (см. кривую 3 на рис. 4) и соответствующие ему механические свойства:  $\psi^*=40,0\%$  и  $\sigma_{в}^*=1030$  МПа – которые соответствуют техническим требованиям. Таким образом, рассчитанный технологический режим можно считать оптимальным, который характеризуется следующими управляющими параметрами:  $V_{к}^*=85$  м/с;  $t_{в/о}^*=900^{\circ}\text{C}$ ;  $\tau_{\text{отк}}=116,8$  с;  $\tau_{\text{зак}}=0$  с;  $\tau_{\text{вент}}=18,1$  с.

Аналогичным образом были рассчитаны оптимальные технологические режимы прокатки арматурного профиля №6 из стали СтЗсп и сварочной катанки  $\varnothing 5,5$  мм из стали Св-08Г2С. Разработанные режимы внедрены на стане 150.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведения диссертационной работы достигнута поставленная цель и получены следующие результаты:

1. Разработана математическая модель температурных режимов прокатки и охлаждения раската на современном мелкосортно-проволочном стане, позволяющая определять изменение температуры металла в процессе деформации в рабочих клетях, при принудительном водяном охлаждении в трубчатых камерах, при воздушном охлаждении на виткоукладчике и роликовом транспортере с открытыми и закрытыми теплосохраниющими крышками, что создает широкие возможности для управления технологическими режимами производства проката с целью регулирования механических свойств.

2. Определены основные закономерности изменения температурных полей в сечении раската при высокоскоростной прокатке катанки в чистовом бло-

ке клеток по системе калибров овал-круг, что позволяет оценивать изменение структуры и механических свойств по сечению готового проката.

3. Разработана математическая модель механических свойств мелко-сортных круглых профилей и катанки, устанавливающая зависимость прочностных и пластических характеристик проката от химического состава стали и параметров термомеханической обработки раскатов.

4. На основе аппарата исследования операций с применением полученных в диссертации математических моделей разработана методика (модель) оптимизации технологических режимов производства проката по критериям механических свойств, усовершенствована известная модель оптимизации технологии по критериям быстродействия.

5. Разработан алгоритм и программа конечно-разностных расчетов процесса воздушного охлаждения витков катанки на роликовом транспортере при различных условиях его работы (программа «Воздушное охлаждение»).

6. Составлены алгоритмы расчета температуры раската и оптимизации режимов термомеханической обработки катанки различного назначения с использованием экспертной системы «Технология сортовой прокатки» и программы «Воздушное охлаждение».

7. Определена степень энергосилового нагружения оборудования стана 150. Установлены факторы, ограничивающие конечную скорость прокатки и производительность стана.

8. Предложена методика прогнозирования структуры и механических свойств готового профиля.

9. С использованием результатов диссертации разработаны и внедрены оптимальные технологические режимы производства термоупрочненной арматуры №6 класса А500 из стали СтЗсп, сварочной низколегированной катанки диаметром 5,5 мм из стали Св-08Г2С, кордовой катанки диаметром 5,5 мм из стали 70 и ряд других.

Полученные результаты являются научно-обоснованными технологическими разработками по совершенствованию процессов производства мелко-сортной стали в бунтах и катанки на современных непрерывных станах с целью улучшения механических свойств и повышения производительности, что имеет существенное значение для экономики страны.

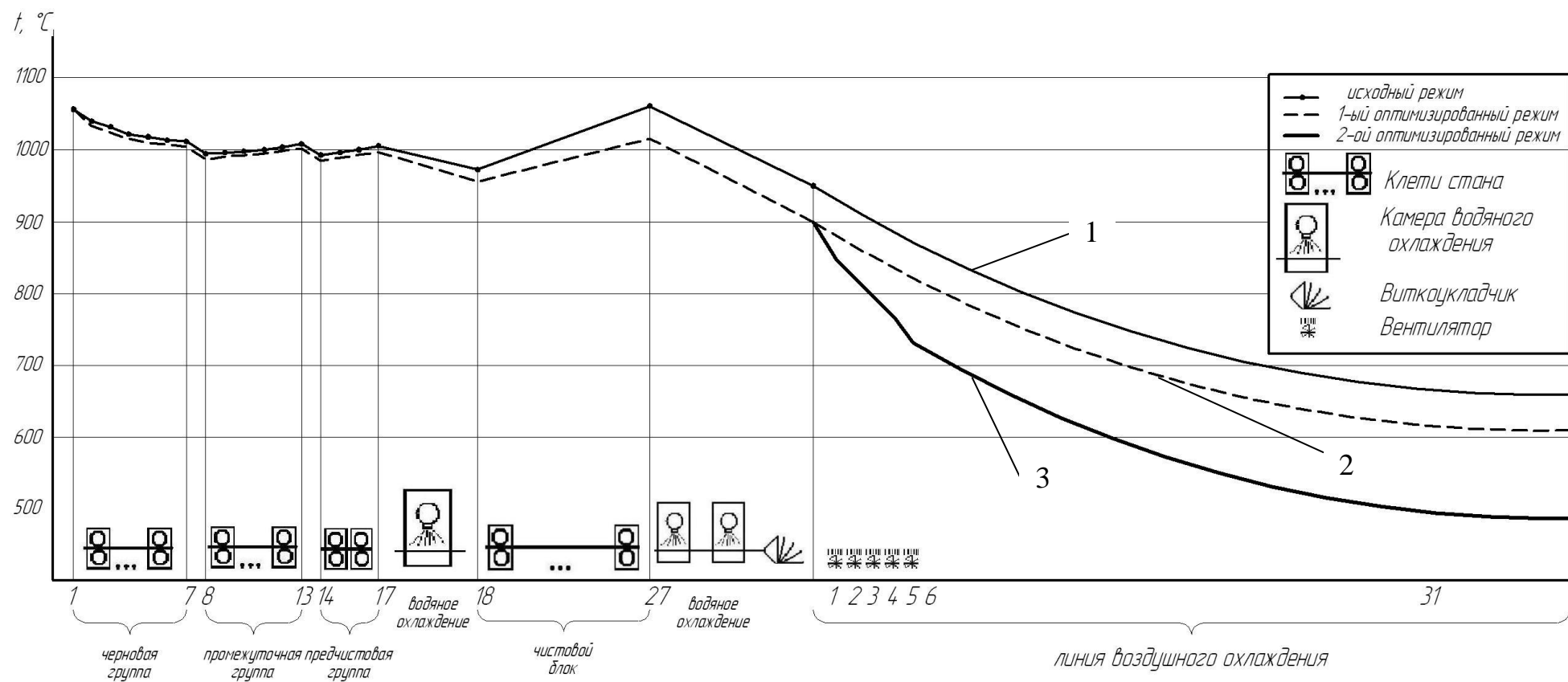


Рис. 4. Температурный режим при прокатке катанки диаметром 5,5 мм из стали 70

**Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах**

**В рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК:**

1. Пономарев А.А., Гурбан Е.С., Шилов В.А. Новый мелкосортно-проволочный стан. // Производство проката. 2010. №8. С.13 – 15.

2. Пономарев А.А., Пяткова А.Ю., Паршаков С.И., Шилов В.А. Статистический анализ и прогнозирование механических свойств катанки на новом мелкосортно-проволочном стане. // Производство проката. 2011. №1. С. 32-36.

3. Пономарев А.А., Шилов В.А., Николаев М.С. Управление температурными режимами прокатки на мелкосортно-проволочном стане. // Производство проката. 2011. №8. С. 18 – 24.

**В сборниках трудов научных конференций:**

4. Пономарев А.А., Шилов В.А., Дюняшев Т.И. Исследование пусковых технологических режимов производства катанки на мелкосортно-проволочном стане 150 ЗАО «БЭМЗ». // Научные труды XVII международной конференции молодых ученых по приоритетным направлениям развития науки и техники: сборник статей. В 3 ч. Екатеринбург: УГТУ–УПИ, 2010. Ч. 2. С. 319 – 321.

5. Пономарев А.А., Шилов В.А. Компьютерное моделирование технологических режимов прокатки на мелкосортно-проволочном стане. Научные труды XVIII Международной конференции молодых ученых по приоритетным направлениям развития науки и техники: сборник статей. В 3 ч. Екатеринбург: УГТУ–УПИ, 2010. Ч. 2. С. 136 – 138.

6. Пономарев А.А., Шилов В.А. Конечно-разностное моделирование высокоскоростной прокатки катанки в чистовом блоке клетей. // Труды международной научно-технической конференции «Современные металлические материалы и технологии (СММТ – 2011). 21 – 24.06.2011». СПб: Изд-во политехнического университета, 2011. С. 48 – 49.

7. Шилов В.А., Пономарев А.А., Николаев М.С. Моделирование температурных режимов прокатки на новом мелкосортно-проволочном стане. // Труды международной научно-технической конференции «Современные металлические материалы и технологии (СММТ – 2011). 21 – 24.06.2011». СПб: Изд-во политехнического университета, 2011. С. 70 – 71.

8. Пономарев А.А., Гурбан Е.С., Литвинов С.И. Освоение производства сварочной легированной катанки на новом мелкосортно-проволочном стане ОАО «НСММЗ». // Труды международной конференции «Форсирование индустриально-инновационного развития металлургии» Казахский национальный технический университет им. К.И. Сатпаева. Алматы, 2010. С. 34 – 36.

---

Подписано в печать 30.09.2011		Формат 60x84	1/16
Бумага писчая	Плоская печать		Усл. печ.л.
Уч.-изд. л.	Тираж 100	Заказ	Цена «С»

---

Издательство ФГАОУ ВПО УрФУ  
620002, Екатеринбург, ул. Мира, 19

Ризография НИЧ ФГАОУ ВПО УрФУ  
620002, Екатеринбург, ул. Мира, 19