

На правах рукописи

МАКАРОВ Евгений Валерьевич

**РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ
ГОРЯЧЕЙ ПРОКАТКИ СТАЛЬНЫХ ПОЛОС С ПРИМЕНЕНИЕМ
СИСТЕМ ПРИНУДИТЕЛЬНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ**

Специальность 05.16.05 «Обработка металлов давлением»

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2012

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Липецкий государственный технический университет»

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Бельский Сергей Михайлович

Официальные оппоненты: **Шаталов Роман Львович**
доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой «Металлургия,
металловедение и обработка металлов
давлением», Московский государствен-
ный открытый университет

Потемкин Валерий Константинович
кандидат технических наук, доцент,
Национальный исследовательский тех-
нологический университет «МИСиС»

Ведущая организация: **Институт металлургии и материало-
ведения им. А.А. Байкова РАН**

Защита состоится «19» декабря 2012 года в 14⁰⁰ ч. на заседании диссертационного совета Д 212.132.09 при федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Национальный исследовательский технологический университет “МИСиС”» по адресу: 119049, г. Москва, Ленинский проспект, д. 4.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Национального исследовательского технологического университета «МИСиС».

Автореферат разослан «14» ноября 2012 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета

Ионов С.М.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. В настоящее время основной объем горячекатаных полос производится на непрерывных широкополосных станах горячей прокатки (НШСГП); к важнейшим показателям эффективности их работы относятся производительность и качество прокатываемых полос.

Применение систем принудительного охлаждения прокатываемых полос, к которым относятся межклетевое охлаждение в чистовой группе клетей и ускоренное охлаждение на отводящем рольганге, позволяет повысить производительность НШСГП и улучшить потребительские свойства горячекатаных полос.

Межклетевое охлаждение прокатываемых полос существенно изменяет температурно-скоростной и деформационный режим прокатки в чистовой группе клетей, что ведет к серьезному изменению условий формирования микроструктуры металла в межклетевых промежутках и механических свойств горячекатаных полос.

Температурно-скоростной режим охлаждения на отводящем рольганге в значительной степени определяет механические свойства горячекатаных полос. Особенно остро стоит проблема обеспечения заданной температуры скотки толстых полос, при производстве которых коррекция текущего режима охлаждения крайне затруднена, а в некоторых случаях просто невозможна из-за значительной величины транспортного запаздывания и малой длины полос.

Постоянно усложняющийся сортамент прокатываемых на НШСГП полос делает актуальными вопросы разработки математических моделей горячей прокатки, учитывающих применение систем охлаждения полосы и тепловые процессы фазовых превращений в стали; исследования возможностей межклетевого охлаждения в области формирования микроструктуры горячекатаных полос; разработки и совершенствования технологических режимов производства горячекатаных полос.

Цель работы заключается в теоретическом исследовании и разработке технологических режимов горячей прокатки с применением систем охлаждения проката в линии непрерывного широкополосного стана, направленных на повышение производительности стана и стабилизацию микроструктуры металла по длине горячекатаных полос.

Для достижения поставленной цели сформулированы и решены следующие задачи:

– разработка комплексной математической модели теплового состояния металла в линии непрерывного широкополосного стана горячей прокатки, учитывающей экранирование раската на промежуточном рольганге, принудительное охлаждение в чистовой группе клетей и на отводящем рольганге, процессы тепловыделения в прокатываемой полосе, влияние фазового состояния и химического состава стали на физические свойства металла;

– исследование влияния межклетевого охлаждения полосы в чистовой группе клеток непрерывного широкополосного стана горячей прокатки на структурное состояние металла;

– исследование эффективности применения и разработка режимов межклетевого охлаждения, направленных на повышение производительности непрерывного широкополосного стана горячей прокатки и стабилизацию микроструктуры металла по длине полосы;

– разработка режимов горячей прокатки полос из низкоуглеродистых марок стали с повышенным ускорением чистовой группы клеток непрерывного широкополосного стана.

Научная новизна. В работе получены и выносятся на защиту следующие результаты, имеющие научную новизну:

– комплексная математическая модель теплового состояния металла в линии непрерывного широкополосного стана горячей прокатки от момента выхода раската из черновой группы клеток до смотки полосы в рулон, учитывающая экранирование раската на промежуточном рольганге, системы охлаждения полосы в чистовой группе клеток и на отводящем рольганге, выделение тепла вследствие пластической деформации и полиморфного превращения переохлажденного аустенита, влияние фазового состояния и химического состава стали на физические свойства металла, неравномерность теплового поля по толщине полосы при задании начальных условий;

– результаты теоретических исследований влияния межклетевого охлаждения полосы в чистовой группе клеток непрерывного широкополосного стана горячей прокатки на формирование микроструктуры полос из низкоуглеродистых марок стали, проведенных с учетом неравномерного распределения температурного поля по толщине прокатываемых полос;

– режим горячей прокатки полос из низкоуглеродистых и низколегированных марок стали на непрерывном широкополосном стане без ускорения чистовой группы клеток, с межклетевым охлаждением и повышением температуры конца прокатки, направленный на стабилизацию микроструктуры металла по длине полосы.

Практическая значимость работы. Внедрение математической модели теплового состояния металла в состав системы начальной настройки чистовой группы клеток широкополосного стана горячей прокатки повысит точность расчета технологических параметров процесса прокатки при производстве полос с применением межклетевого охлаждения. Математическая модель обеспечит возможность автоматизации расчета требуемого расхода охлаждающей воды и схемы включения коллекторов межклетевого охлаждения в зависимости от прокатываемого сортамента и температурно-скоростных параметров процесса прокатки, что позволит оптимизировать эксплуатацию системы межклетевого охлаждения полосы и повысит производительность стана.

Применение режимов с повышением температуры конца прокатки в зависимости от сортамента и температурно-скоростных параметров процесса прокатки обеспечит получение более стабильных механических свойств по длине горячекатаных полос из низкоуглеродистых и низколегированных марок стали, производимых на непрерывном широкополосном стане, чем при прокатке по традиционной технологии.

Математическая модель теплового состояния металла, учитывающая изменение физических свойств металла в зависимости от фазового состояния и химического состава стали и выделение тепла вследствие полиморфного превращения переохлажденного аустенита, позволит повысить точность расчета режимов ускоренного охлаждения толстых и коротких полос на отводящем рольганге, особенно в случае его значительной протяженности.

Достоверность полученных результатов основана на использовании классических подходов современных теорий прокатки, теплопроводности и физического металловедения, обоснованности и строгости применяемых математических методов и технологий компьютерного моделирования.

Публикации. Основные материалы диссертации опубликованы в 11 печатных работах, среди которых 10 статей, в том числе 2 публикации в периодическом научном издании, рекомендуемом ВАК Министерства образования РФ [1–2], 1 свидетельство о регистрации программной системы.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на международной научно-технической конференции «Теория и практика производства листового проката» (Липецк, 2008 г.); международной научно-технической конференции «Современная металлургия начала нового тысячелетия» (Липецк, 2010-2011 г.г.); международной научно-технической конференции «Инновационные технологии обработки металлов давлением» (Москва, 2011 г.); научных конференциях аспирантов и студентов ЛГТУ по обработке металлов давлением (Липецк, 2008-2009 гг.).

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырёх глав, выводов и библиографического списка. Общий объем работы составляет 164 страницы машинописного текста, включая 46 рисунков, 19 таблиц, 5 приложений. Библиографический список содержит 158 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность диссертационной работы, изложены ее цель, задачи исследований и основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе выполнен аналитический обзор работ П.И. Полухина, Ю.Д. Железнова, В.Н. Хлопонина, Ю.В. Коновалова, В.П. Полухина, Н.И. Ялового, Л.Г. Генкина, А.Н. Дружинина, В.Г. Лабейша, В.В. Шкатова, P.D. Hodgson, C.M. Sellars и других авторов, посвященных вопросам теплового состояния и разупрочнения металла при производстве полос на НШСГП, интенсификации процесса прокатки полос за счет применения межклетевого охлаждения в чистовой группе клетей. Рассмотрены методы расчета температуры полосы и существующие математические модели теплового состояния металла в линии НШСГП. Проанализированы существующие математические модели кинетики статической, динамической и метадинамической рекристаллизации стали в однофазной γ – области при термомеханической обработке стали. Описаны возможности межклетевого охлаждения в области регулирования температурно-скоростных параметров прокатки полос и повышения производительности НШСГП. Рассмотрено влияние межклетевого охлаждения на механические свойства горячекатаных полос.

Вторая глава* посвящена разработке комплексной математической модели теплового состояния металла в линии непрерывного широкополосного стана горячей прокатки от момента выдачи раската из черновой группы клетей до смотки полосы в рулон. Математическая модель базируется на определении пространственно-временного температурного поля полосы. Расчетное поле находится путем решения одномерного нестационарного уравнения теплопроводности (1) численным методом – методом конечных разностей:

$$\rho(T)c(T)\frac{\partial T}{\partial \tau} = \lambda(T)\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + q_v, \quad (1)$$

где ρ – плотность металла, $кг/м^3$; c – удельная теплоемкость металла $Дж/(кг \cdot K)$; λ – теплопроводность металла, $Вт/(м \cdot K)$; T – температура металла, K ; τ – время, $с$; x – координата по толщине полосы, $м$; q_v – удельная мощность тепловых источников, $Вт/м^3$.

Потери тепла полосой в линии НШСГП в результате излучения, взаимодействия с окружающим воздухом, охлаждения водой и теплоотдачи рабочим валкам описываются граничными условиями второго и третьего рода, которые задаются в следующем виде:

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial x} = q + \alpha(T - T_{cp}), \quad (2)$$

где T_{cp} – температура среды, q – плотность теплового потока, $Вт/м^2$; α – коэффициент теплоотдачи, $Вт/(м^2 \cdot K)$.

* Научный консультант д.т.н., профессор Ю.А. Мухин

Уравнение теплопроводности (1) аппроксимируется системой алгебраических уравнений, решение которой осуществляется методом прогонки. В качестве конечно-разностной схемы используется неявная схема.

Математическая модель теплового состояния металла учитывает наличие устройства экранирования раската и изменение температуры его панелей в процессе прокатки полосы, систем охлаждения полосы в чистовой группе клетей и на отводящем рольганге, выделение тепла вследствие пластической деформации металла и полиморфного $\gamma \rightarrow \alpha$ превращения переохлажденного аустенита. Модель также учитывает влияние фазового состояния и химического состава стали на физические свойства металла. Исходными данными для математической модели являются температурно-скоростные параметры горячей прокатки, деформационный режим, технологические параметры межклетевого охлаждения в чистовой группе клетей и ускоренного охлаждения полосы на отводящем рольганге, геометрические параметры полосы, химический состав стали.

Системы охлаждения полосы в чистовой группе клетей НШСГП учитываются заданием граничных условий третьего рода. К системам охлаждения отнесены: межклетевое охлаждение полосы, охлаждение очага деформации, подавление пылеобразования, поперечное душирование полосы (гидросдув). Коэффициент теплоотдачи между спрейерной струей воды коллектора системы охлаждения и высокотемпературной поверхностью прокатываемой полосы рассчитывается по эмпирическим зависимостям, представленным в работах К. Sasaki и J. Wendelstorf. Расчет коэффициента теплоотдачи выполняется с учетом расхода охлаждающей воды, температур воды и поверхности полосы.

Моделирование процесса разогрева металла вследствие работы пластической деформации осуществляется путем задания мощности тепловых источников, распределенных определенным образом в узлах пространственной сетки.

Расчет коэффициента теплоотдачи и удельного теплового потока при моделировании теплового состояния металла в процессе ускоренного охлаждения полосы на отводящем рольганге НШСГП выполнен по эмпирическим зависимостям, изложенным в работах В.Г. Лабейша.

Математическая модель учитывает структурное состояние металла при прокатке полос в чистовой группе клетей. Расчет структурного и фазового состояний металла при моделировании процесса прокатки базируется на тепловом состоянии полосы в линии стана. В ходе моделирования рассчитываются доля рекристаллизованного объема γ – фазы в микроструктуре металла и средний размер зерна аустенита при прокатке полосы в чистовой группе клетей, температуры начала и окончания полиморфного $\gamma \rightarrow \alpha$ превращения и долю α – фазы в микроструктуре металла.

Кинетика рекристаллизации аустенита рассчитана по эмпирическим зависимостям для низкоуглеродистых марок стали, которые изложены в работах P.D. Hodgson, C.M. Sellars, T.M. Maccagno, T. Senuma. Расчет температур начала и окончания полиморфного $\gamma \rightarrow \alpha$ превращения проводится на основе обобщения термокинетических диаграмм распада переохлажденного аустенита. Распределение температуры в критических точках в зависимости от скорости охлаждения и химического состава стали рассчитывается по уравнению, разработанному на кафедре ОМД ЛГТУ:

$$Ar_i = kW - mW^n + A_i, \text{ } ^\circ\text{C}, \quad i = 1, 3, \quad (3)$$

где W – скорость охлаждения, $^\circ\text{C}/\text{с}$; A_i – изотермическое значение с учетом химического состава; k , m , n – коэффициенты.

Коэффициенты уравнения (3) получены методом Ньютона–Рафсона и для стали с содержанием $[C] = 0,18\%$, $[Mn] = 0,45\%$, $[Si] = 0,2\%$ имеют следующие значения:

- критическая точка Ar_3 ($k = -0,131$; $m = 17,468$; $n = 0,333$);
- критическая точка Ar_1 ($k = -1,392$; $m = 44,832$; $n = 0,114$).

Регрессионные уравнения изотермических температур A_3 , A_1 и тепловыделение при $\gamma \rightarrow \alpha$ превращении чистого железа получены на основе расчета фазовых диаграмм состояния железа и легирующих элементов в программе Thermo-Calc. Регрессионное уравнение температуры A_3 для низкоуглеродистых марок стали с массовым содержанием $[C] \leq 0,3\%$, $[Mn] \leq 2\%$, $[Si] \leq 1\%$ и содержанием других химических элементов не более 0,05% получено следующего вида:

$$\begin{aligned} A_3 = & 911 - 459,7[C] + 394,8[C]^2 - 43,5[Mn] + 125,9[Mn][C] - \\ & - 170[Mn][C]^2 + 80,8[Si] - 216,6[Si][C] + 321,6[Si][C]^2 - \\ & - 27,4[Mn][Si] + 4,85[Mn]^2[Si] + 3,07[Mn][Si]^2. \end{aligned} \quad (4)$$

Получены регрессионные уравнения температуры A_1 следующего вида:

- для сталей с массовым содержанием $[Mn] \leq 1\%$ и $[Si] \leq 1\%$ содержанием других химических элементов не более 0,05%

$$A_1 = 727 - 47,9[Mn] + 15,19[Si] - 15,53[Mn]^2[Si] + 8,66[Mn][Si]^2; \quad (5)$$

- для сталей с массовым содержанием $[C] \leq 0,3\%$, $1\% < [Mn] \leq 2\%$, $[Si] \leq 1\%$ и содержанием других химических элементов не более 0,05%

$$\begin{aligned} A_1 = & 713,5 - 41,7[Mn] - 90,2[Mn][Si] + 102,2[Si] + 11,9[Mn]^2[Si] - \\ & - 1,37[Mn][Si]^2 + 79,3[Mn][C] - 86,4[Mn][C]^2 - 502,4[Si][C] + \\ & + 787,7[Si][C]^2 + 330,6[Mn][Si][C] - 588,9[Mn][Si][C]^2. \end{aligned} \quad (6)$$

Полиморфное превращение стали сопровождается значительным выделением тепла. Согласно проведенным расчетам тепловыделение при $\gamma \rightarrow \alpha$ превращении чистого железа составляет 136,93 МДж/м³, тогда выражение для удельной мощности разогрева полосы вследствие полиморфного превращения можно записать в виде:

$$q_V = \frac{136,93(X_\alpha^j - X_\alpha^{j-1})}{\tau^j - \tau^{j-1}}, \quad (7)$$

где X_α – доля α -фазы в микроструктуре металла; τ – время, с.

В третьей главе проведена адаптация математической модели теплового состояния металла к условиям непрерывного широкополосного стана 2000 горячей прокатки ПГП ОАО «НЛМК» (стан 2000).

В качестве исходных данных при адаптации математической модели служили технологические параметры прокатки, геометрические параметры полосы, химический состав стали, которые контролируются и записываются в электронном виде автоматизированной системой управления технологическим процессом (АСУ ТП) стана 2000.

На промежуточном и отводящем рольгангах стана 2000 контролируются температура раската за черновой группой клетей, температура конца прокатки и температура смотки полос. Радиационные пирометры контролируют температуру поверхности металла, при этом распределение температуры по толщине полосы остается неизвестным. Расчет начального распределения температуры по толщине раската за черновой группой клетей выполнен на основе математического моделирования теплового состояния металла от клетки №4 до пирометра, контролирующего температуру раската. В результате исследования теплового состояния металла за черновой группой клетей разработана методика (8)–(14) расчета распределения температуры по толщине раската, в зависимости от технологических параметров горячей прокатки.

Начальное распределение температуры $t_p(x)$ по толщине раската при адаптации модели задается следующими функциями:

- от 0 до $1/6 H$

$$t_p(x) = \frac{6(t_{1/6} - t_n)}{H}x + t_n, \quad (8)$$

- от $1/6 H$ до $5/6 H$

$$t_p(x) = 4(t_{1/6} - t_c) \left(\frac{(x - H/6)^2}{(2H/3)^2} - \frac{x - H/6}{2H/3} \right) + t_{1/6}, \quad (9)$$

• от $5/6H$ до H

$$t_p(x) = -\frac{6(t_{1/6} - t_n)}{H}(x - H) + t_n, \quad (10)$$

где x – координата по толщине раската, мм; H – толщина раската, мм; t_n – температура поверхности металла, которая контролируется радиационным пирометром, °C; $t_{1/6}$ – температура на расстоянии $1/6H$ от поверхности, °C; t_c – температура середины, °C.

Температуры $t_{1/6}$ и t_c определяются по формулам:

$$t_{1/6} = \theta_{1/6} t_n, \quad (11)$$

$$t_c = \theta_c t_n, \quad (12)$$

где

$$\begin{aligned} \theta_{1/6} &= a t_n^b h_p^c H_p^d \tau^e [C]^f, \quad F = 78,38, R = 0,994; \\ a &= 0,68295; b = 0,03894; c = 0,007619; d = 0,03595; e = -0,01177; \\ f &= 2,506 \cdot 10^{-4}; \end{aligned} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} \theta_c &= a t_n^b h_p^c H_p^d \tau^e [C]^f, \quad F = 60,34, R = 0,992; \\ a &= 0,51354; b = 0,07153; c = 0,02066; d = 0,04913; e = -0,01616; \\ f &= 2,788 \cdot 10^{-4}; \end{aligned} \quad (14)$$

t_n – температура поверхности раската, °C; h_p и H_p – толщина раската на входе и выходе из последней клетки черновой группы соответственно, мм; τ – время транспортирования раската от клетки до пирометра, с; $[C]$ – массовое содержание углерода, %.

Разработанная методика расчета распределения температуры по толщине раската может быть применена для всех НШСГП (за исключением тех, на которых применяется Coil box).

Аналогичным образом рассчитывается начальное распределение температуры по толщине полосы за чистовой группой клетей.

Адаптация математической модели заключается в определении параметров и коэффициентов модели с целью минимизации ошибки между расчетной и измеренной температурой металла, которая вычисляется по формуле:

$$\begin{aligned} S &= \sum_{n=1}^N E_n \rightarrow \min, \\ E &= \frac{\sum_{k=1}^K |T_k^{расч} - T_k^{изм}|}{K}, \end{aligned} \quad (15)$$

где N – количество полос в выборке; $T^{расч}$ и $T^{изм}$ – расчетная и измеренная температура металла соответственно; K – количество измерений температуры металла по длине полосы.

Задача минимизации величины S решена с помощью метода Нелдера-Мида. Адаптация математической модели теплового состояния металла выполнена к условиям прокатки и охлаждения на участке промежуточный рольганг – чистовая группа клетей и отводящем рольганге.

При адаптации модели использовались две выборки горячекатаных полос из низкоуглеродистых и низколегированных марок стали: адаптационной и контрольной. Адаптационная выборка предназначена для поиска оптимальных значений коэффициентов модели, а контрольная – для оценки адекватности адаптированной математической модели. Общее количество полос в адаптационной и контрольной выборках составляет 5441 и 5442 соответственно. Расчет теплового состояния полосы сводился к определению температур конца прокатки и смотки. Пример расчета теплового состояния сечения заднего конца полосы на промежуточном рольганге и в чистовой группе клетей показан на рис. 1. Режим обжаты и технологические параметры горячей прокатки полосы представлены в таблицах 1 и 2.

Таблица 1 – Режим горячей прокатки полосы 3х1067 мм из стали 08Ю
в чистовой группе клетей

№ клетки	5	ОЛ	6	7	8	9	10	11	12
Толщина полосы, мм	34,6	34,1	19,1	10,9	7,29	5,45	4,20	3,43	3,00
Относительное обжатие, %	–	1,4	44,0	42,7	33,5	25,2	22,9	18,2	12,7
Скорость полосы, м/с	–	1,09	1,95	3,39	5,10	6,82	8,85	10,82	12,4
Среднемассовая темп., °С	1047	975	952	937	921	903	890	877	867
Усилие прокатки, МН	–	–	15,0	17,1	16,8	14,0	14,0	11,2	10,8

Таблица 2 – Технологические параметры горячей прокатки
полосы 3х1067 мм из стали 08Ю

Температурно-скоростной режим					Расход воды в системе МКО						Масса рулона
t_5	$t_{кп}$	$V_{запр}$	a	$\tau_{маш}$	Q_1	Q_2	Q_3	Q_4	Q_5	Q_6	
°С	°С	м/с	м/с ²	с	м ³ /ч	м ³ /ч	м ³ /ч	м ³ /ч	м ³ /ч	м ³ /ч	т
1000	840	10,6	0,024	75	197	196	194	146	118	0	22

Отводящий рольганг стана 2000 оснащен установкой ускоренного охлаждения полосы, которая состоит из 80 верхних и нижних полусекций с коллекторами струйного охлаждения. Пример расчета теплового состояния сечения полосы по длине отводящего рольганга показан на рис. 2.

Доля полос с ошибкой расчета температур конца прокатки и смотки полос более 20 °С для адаптационной и контрольной выборок составила менее 2%.

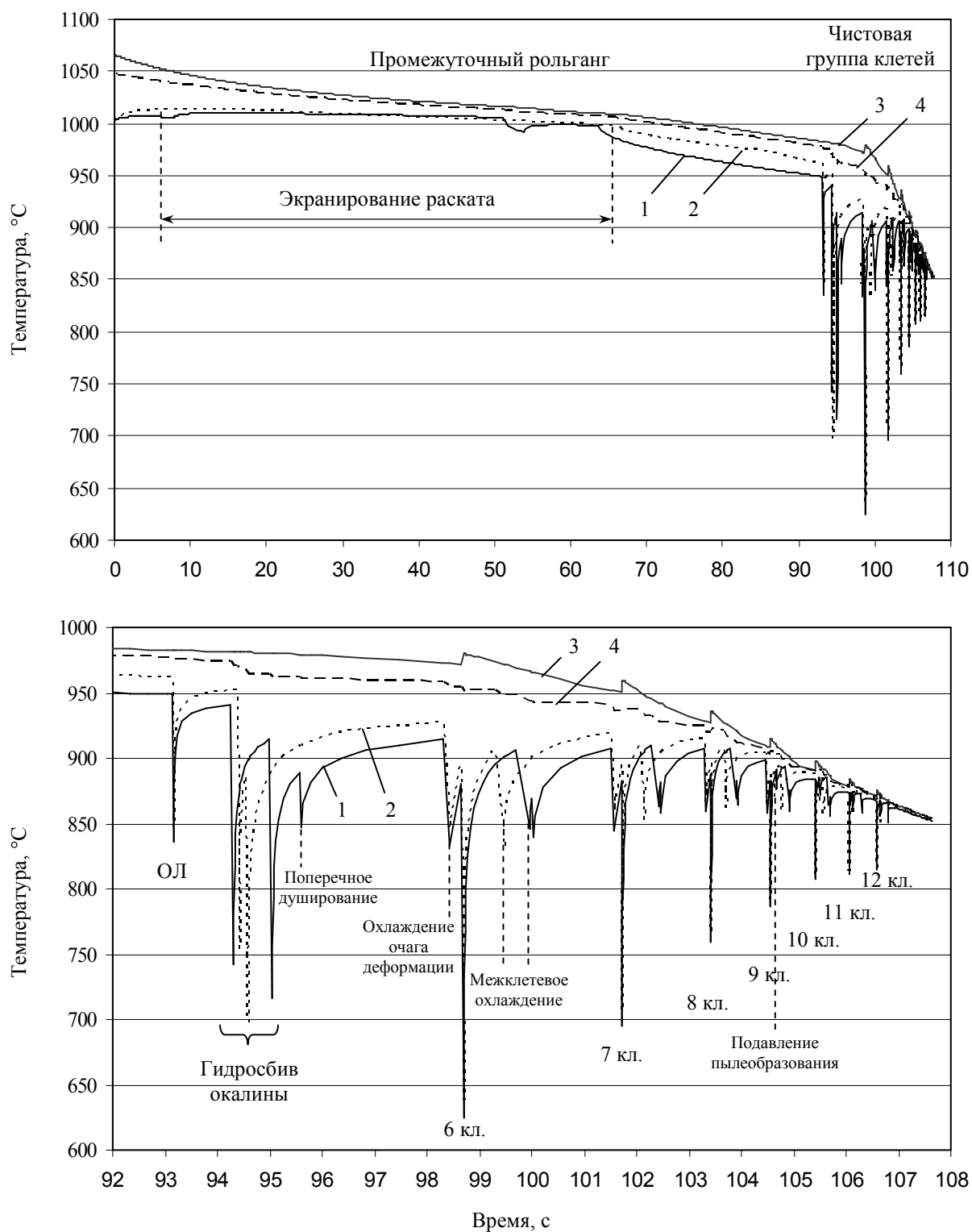


Рис. 1. Изменение температуры полосы на промежуточном рольганге и участке чистовой группы клеток (полоса 3x1067 мм, марка стали 08Ю):

- 1) верхняя поверхность; 2) нижняя поверхность;
3) середина; 4) среднемассовая температура

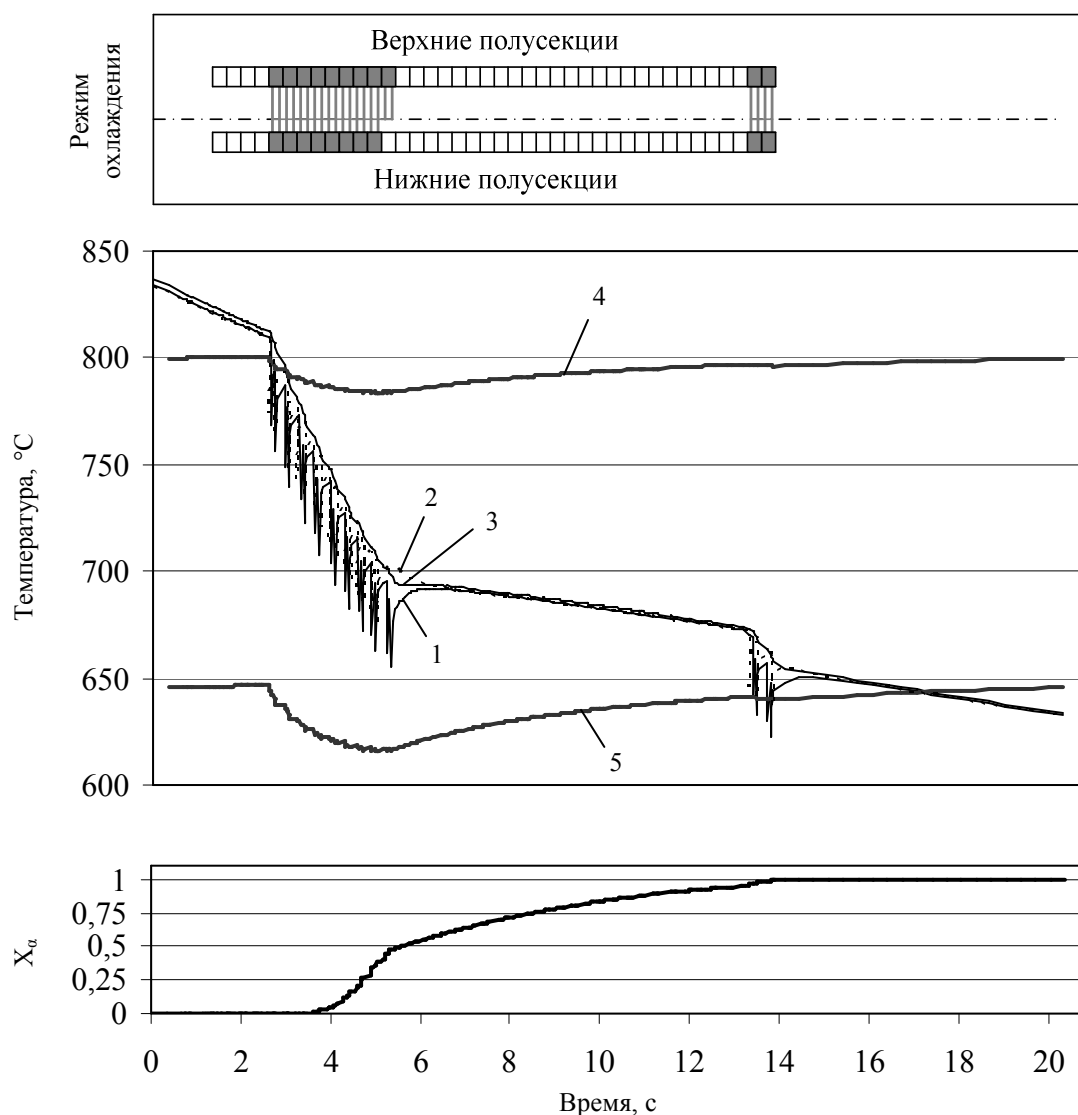


Рис. 2. Изменение температуры полосы на отводящем рольганге (полоса 4x1500 мм, марка стали СтЗсп, заправочная скорость 7,2 м/с):
1) верхняя поверхность; 2) нижняя поверхность;
3) середина; 4) Ar_3 ; 5) Ar_1

Четвертая глава* посвящена разработке и совершенствованию режимов прокатки полос на непрерывном широкополосном стане 2000 горячей прокатки ПГП ОАО «НЛМК».

Корректная настройка системы межклетевого охлаждения полосы позволяет увеличить пропускную способность чистовой группы клеток, а значит повысить производительность стана, и рационально использовать охлаждающую воду, сохраняя при этом равномерный ритм прокатки без нарушения температурного режима.

С точки зрения повышения производительности стана задача расчета режимов межклетевого охлаждения сводится к определению расхода охлаждаю-

* Научный консультант д.т.н., профессор Ю.А. Мухин

щей воды и схемы включения коллекторов системы из условия увеличения пропускной способности чистовой группы клетей до производительности участка методических печей.

На основе разработанной математической модели теплового состояния металла произведена оценка возможности применения межклетевого охлаждения для сортамента стана 2000 в зависимости от температурно-скоростного режима прокатки. В результате математического моделирования прокатки полос из низкоуглеродистых сталей в чистовой группе клетей стана 2000 установлено, что систему межклетевого охлаждения следует применять при прокатке полос толщиной $h \geq 2,2$ мм. При прокатке более тонких полос обеспечить необходимый уровень температуры конца прокатки, при котором формируется благоприятная микроструктура металла, на стане 2000 с применением межклетевого охлаждения не представляется возможным.

Целесообразность применения межклетевого охлаждения с точки зрения повышения производительности стана определяется тем, что чистовая группа клетей стана становится «узким местом» при определенных температурно-скоростных режимах прокатки и типоразмерах прокатываемых полос. Если пропускная способность чистовой группы клетей превышает производительность участка методических печей, то применение межклетевого охлаждения нецелесообразно, поскольку «узким местом» в линии стана является участок методических печей.

Согласно проведенным исследованиям при температуре конца прокатки полосы 840 °С, температуре раската за пятой клетью 1000 °С, четырех работающих методических печах и паузе в чистовой группе клетей равной 30 с систему межклетевого охлаждения на стане 2000 следует применять практически для всего сортамента. Напротив, при двух работающих печах применение межклетевого охлаждения с точки зрения повышения производительности нецелесообразно практически для всего сортамента стана и темпа прокатки. Применение межклетевого охлаждения с максимальным расходом охлаждающей воды 1200 м³/ч позволяет сократить машинное время прокатки в чистовой группе клетей на 27–28%.

Применение межклетевого охлаждения полосы в чистовой группе клетей НШСГП приводит к изменению скоростного режима прокатки (при условии постоянства температуры переднего конца раската на входе в чистовую группу клетей от полосы к полосе) и теплового состояния полосы. Подстуживание металла водой увеличивает температурный градиент по толщине полосы, а сокращение междеформационных пауз влияет на процессы структурообразования. В связи с этим, при назначении режимов межклетевого охлаждения полосы необходимо учитывать влияние изменения температурно-скоростного режима на потребительские свойства производимых горячекатаных полос.

Исследование влияния межклетевого охлаждения на структурное состояние металла в чистовой группе клеток выполнено при моделировании прокатки полосы 3х1200 мм из стали марки 08Ю по режимам:

- 1) прокатка без применения межклетевого охлаждения;
- 2) межклетевое охлаждение во всех межклетевых промежутках;
- 3) межклетевое охлаждение в первых трех межклетевых промежутках;
- 4) межклетевое охлаждение в последних трех межклетевых промежутках.

Режим обжатий в чистовой группе клеток представлен в таблице 3. Технологические параметры прокатки и расход воды в системе межклетевого охлаждения по исследуемым режимам представлены в таблице 4. Температурно-скоростные режимы прокатки полосы представлены в таблице 5. В таблице 5 в качестве температуры полосы приведена среднемассовая температура металла. Длина горячекатаной полосы составляет 884 м. Результаты исследования представлены на рис. 3.

Таблица 3 – Режим обжатий в чистовой группе клеток при прокатке полосы 3х1200 мм из стали 08Ю

№ клетки	5	ОЛ	6	7	8	9	10	11	12
Толщина, мм	34,7	34,0	20,3	12,5	8,40	5,89	4,45	3,45	3,00
Относительное обжатие, %	-	1,9	40,3	38,5	32,8	29,9	24,4	22,5	13,1

Таблица 4 – Технологические параметры прокатки и исследуемых режимов межклетевого охлаждения

№ режима	Температурно-скоростной режим					Расход воды в системе МКО					
	t_5	$t_{кп}$	V_3	a	$\tau_{маш}$	Q_1	Q_2	Q_3	Q_4	Q_5	Q_6
	°C	°C	м/с	м/с ²	с	м ³ /ч	м ³ /ч	м ³ /ч	м ³ /ч	м ³ /ч	м ³ /ч
1	1000	840	8,97	0,026	87,4	0	0	0	0	0	0
2	1000	840	11,95	0,026	68,8	200	200	200	200	200	200
3	1000	840	10,25	0,026	78,4	200	200	200	0	0	0
4	1000	840	10,25	0,026	78,4	0	0	0	40	200	200

Таблица 5 – Температурно-скоростные режимы прокатки полосы 3х1200 мм из стали 08Ю в чистовой группе клеток

	№ режима	№ клетки								
		5	ОЛ	6	7	8	9	10	11	12
Скорость полосы, м/с	1	—	0,79	1,33	2,15	3,20	4,57	6,05	7,80	8,97
	2	—	1,05	1,77	2,87	4,27	6,09	8,06	10,40	11,95
	3	—	0,90	1,51	2,46	3,66	5,22	6,91	8,91	10,25
	4	—	0,90	1,51	2,46	3,66	5,22	6,91	8,91	10,25
Температура полосы, °C	1	1043	987	951	934	918	900	888	877	863
	2	1043	988	961	943	926	908	893	876	858
	3	1043	987	956	934	913	891	881	871	859
	4	1043	987	956	942	929	914	903	885	860

Согласно результатам исследования процесс первичной рекристаллизации успевает пройти полностью только в первых трех межклетевых промежутках при прокатке по всем четырем режимам (рис. 3.а). В последних межклетевых промежутках металл не успевает полностью рекристаллизироваться и рост зерен аустенита затруднен (рис. 3.б). Доля рекристаллизованного объема и средний размер зерна аустенита на рис. 3 приведены для момента входа переднего конца полосы в очаг деформации и под пирометр температуры конца прокатки.

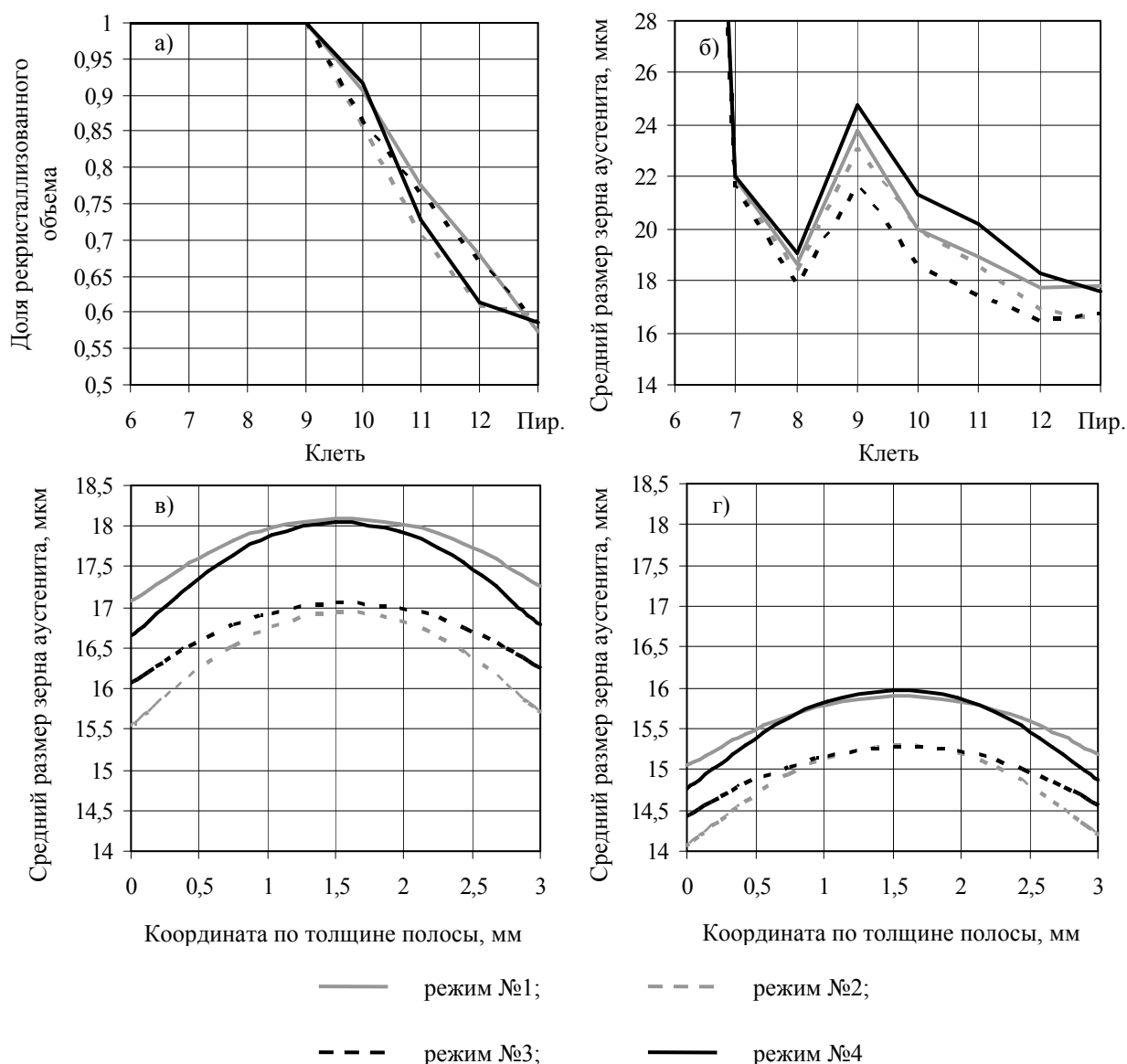


Рис. 3. Сравнение структурного состояния полос прокатанных с применением принудительного межклетевого охлаждения

Применение межклетевого охлаждения приводит к уменьшению среднего размера зерна аустенита на выходе из стана, а значит и повышению прочностных свойств металла.

При межклетевом охлаждении по режиму №2 средний размер зерна в центральных слоях полосы уменьшается с 18,1 мкм до 16,9 для переднего конца

(рис. 3.в) и с 15,9 мкм до 15,3 мкм для заднего конца (рис. 3.г) по сравнению с прокаткой без межклетевого охлаждения (режим №1). Уменьшение размера зерна аустенита от переднего к заднему концу полосы связано с применением ускорения чистовой группы клеток НШСП (междеформационные паузы уменьшаются в процессе прокатки) и постоянной температурой конца прокатки по длине полосы при наличии температурного «клина» на входе в чистовую группу клеток.

Применение межклетевого охлаждения по режиму №3 снижает температуру металла в первых межклетевых промежутках, что приводит к уменьшению среднего размера зерна на выходе из стана.

В отличие от режима №3 охлаждение в последних межклетевых промежутках (режим №4) позволяет получить средний размер зерна аустенита близкий к размеру зерна при прокатке без межклетевого охлаждения и одинаковом скоростном режиме. Таким образом, секции межклетевого охлаждения полосы следует включать, начиная с последнего межклетевого промежутка чистовой группы клеток. При увеличении конечной толщины прокатываемой полосы включение секций межклетевого охлаждения следует переносить от последнего межклетевого промежутка к первому, с целью минимизации неоднородности зерна аустенита по толщине полосы и подавления процесса рекристаллизации при длительных междеформационных паузах.

На процессы разупрочнения металла влияют степень и скорость деформации, температура, химический состав стали, размер зерна, время. Для обеспечения однородной микроструктуры металла на выходе из чистовой группы клеток НШСП по всей длине полосы необходимо поддерживать перечисленные параметры на постоянном уровне.

При прокатке полос на НШСП общепринята стратегия поддержания температуры конца прокатки по длине полосы на постоянном уровне. Это постоянство обеспечивается ускорением чистовой группы клеток порядка $0,02 - 0,03 \text{ м/с}^2$. При прокатке полос с ускорением и стабилизацией температуры конца прокатки возникает неоднородность микроструктуры от переднего к заднему концу полосы. Это связано с существенным изменением температурно-скоростного режима в чистовой группе клеток при прокатке рулонов большой массы – в процессе прокатки сокращаются междеформационные паузы при одновременном снижении температуры раската.

Стабилизации микроструктуры металла по длине полосы можно достичь повышением температуры конца прокатки, компенсируя падение температуры раската на входе в чистовую группу клеток. Повышения температуры конца прокатки по длине полос можно достичь двумя способами, которые не требуют дополнительных капитальных затрат:

- 1) горячая прокатка с применением межклетевого охлаждения по режиму

с переменным расходом охлаждающей воды;

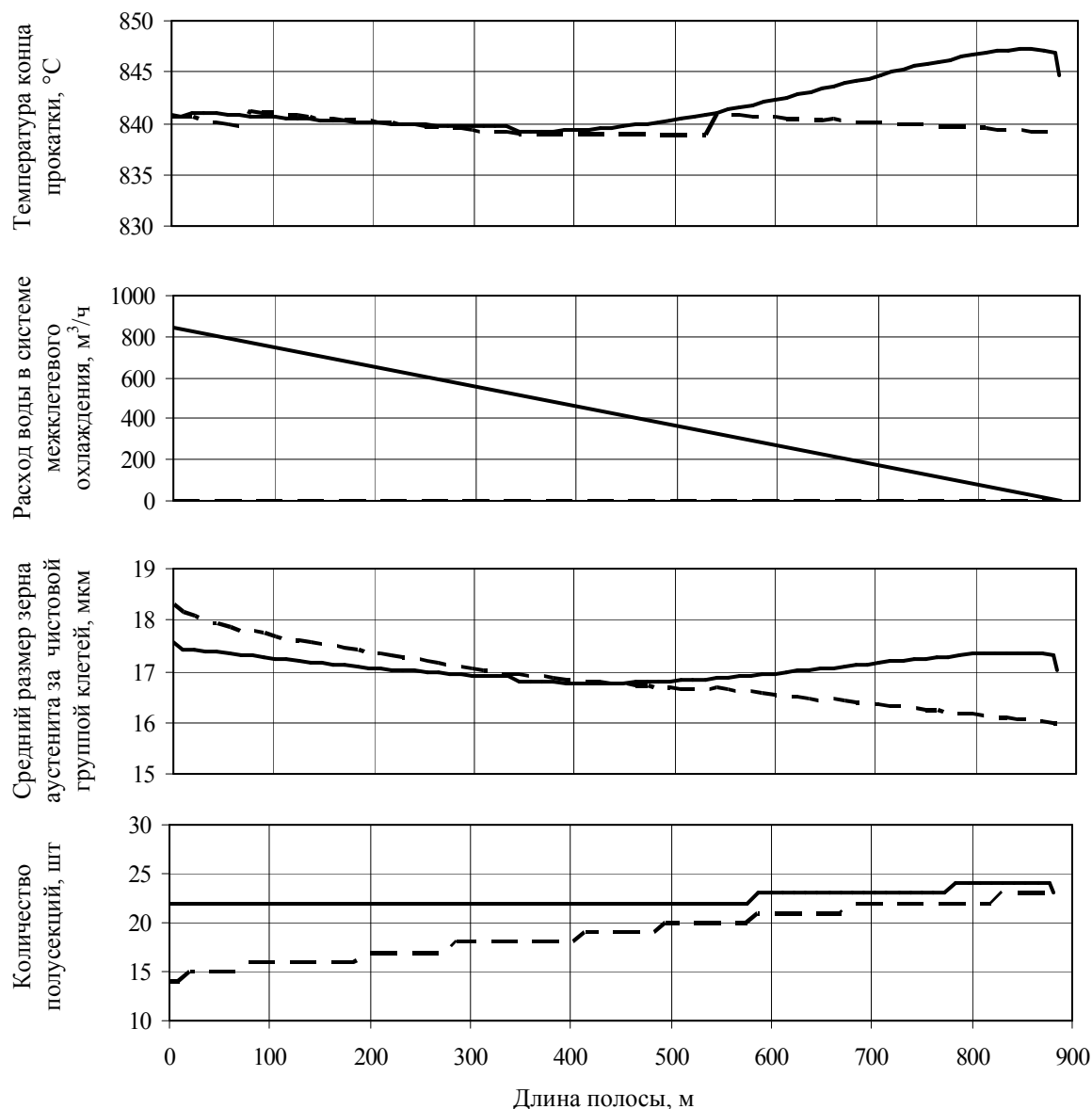
2) горячая прокатка с повышенным ускорением чистовой группы клетей, т.е. с большей величиной, чем по традиционной технологии.

Режим межклетевого охлаждения с переменным расходом воды заключается в уменьшении подаваемой охлаждающей воды по длине прокатываемой полосы. Данный режим межклетевого охлаждения позволяет вести прокатку без ускорения либо уменьшить его величину, тем самым стабилизируя скоростной режим, условия деформации и охлаждения металла. Согласно проведенным исследованиям данный режим позволяет стабилизировать средний размер зерна аустенита на выходе из чистовой группы клетей стана 2000 при прокатке полос из низкоуглеродистых сталей толщиной $h \geq 2,5$ мм и с температурой конца прокатки переднего конца полосы 840 °С. Приращение величины температуры конца прокатки при прокатке тонких полос составило 7–8 °С, толстых полос – 16–18 °С. Машинное время прокатки полос толщиной $h \geq 2,7$ мм сократилось на 14–18%.

Прокатка без применения ускорения в чистовой группе клетей существенно упрощает регулирование температуры смотки и позволяет стабилизировать условия охлаждения полосы на отводящем рольганге стана. Применение повышения температуры конца прокатки по длине полосы и стабилизация условий ускоренного охлаждения позволяют решить проблему получения равномерной микроструктуры металла при прокатке полос из рулонов большой массы на НШСГП. Сравнение технологических параметров горячей прокатки по режиму с постоянной температурой конца прокатки и режиму межклетевого охлаждения с переменным расходом охлаждающей воды представлено на рис. 4.

При прокатке полос из низкоуглеродистых марок стали по режиму с повышенным ускорением без применения экранирования раската стабилизации микроструктуры металла на выходе из чистовой группы клетей можно достичь приращением температуры конца прокатки равным 13–17 °С, при прокатке тонких полос с применением экранирования раската приращение равно 6–10 °С.

Отличительной особенностью режима горячей прокатки с повышенным ускорением является возможность стабилизации микроструктуры металла на выходе из чистовой группы клетей и сокращения машинного времени прокатки полос, при производстве которых повышение заправочной скорости невозможно в силу технических возможностей стана. Применение режима ограничено только охлаждающей способностью установки ускоренного охлаждения полосы на отводящем рольганге и энергосиловыми параметрами процесса прокатки при производстве широких полос. Режим горячей прокатки с повышенным ускорением позволяет сократить машинное время прокатки на 3–4 % при применении экранирования раската и на 7–9 % при прокатке без него.



- $t_5 = 1000\text{ }^{\circ}\text{C}$, $V_3 = 9\text{ м/с}$, $a = 0,026\text{ м/с}^2$, $t_{\text{кн}}(L) = \text{const}$, $Q_{\text{МКО}} = 0$, $t_{\text{см}} = 640\text{ }^{\circ}\text{C}$;
- $t_5 = 1000\text{ }^{\circ}\text{C}$, $V_3 = 11,2\text{ м/с}$, $a = 0$, $t_{\text{кн}}(L) = \text{var}$, $Q_{\text{МКО}}(L) = \text{var}$, $t_{\text{см}} = 640\text{ }^{\circ}\text{C}$

Рис. 4. Расчетные технологические параметры горячей прокатки и ускоренного охлаждения полосы 3x1250 мм (марка стали 08Ю)

С целью экспериментальной проверки разработанных режимов проведена опытная прокатка полос на стане 2000. При прокатке полос с принудительным охлаждением в последних межклетевых промежутках чистой группы клеток разница между фактической и расчетной температурой конца прокатки не превышала 10 °C. Уровень механических свойств горячекатаных полос, прокатанных с повышенным ускорением чистой группы клеток, соответствовал требованиям заказчика.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. Разработана комплексная математическая модель теплового состояния металла в линии непрерывного широкополосного стана горячей прокатки от момента выхода раската из черновой группы клетей до смотки полосы в рулон, учитывающая экранирование раската на промежуточном рольганге, системы принудительного охлаждения полосы, выделение тепла вследствие пластической деформации и полиморфного превращения переохлажденного аустенита, влияние фазового состояния и химического состава стали на физические свойства металла, а также неравномерность теплового поля по толщине полосы в зависимости от прокатываемого сортамента и технологических параметров прокатки при задании начальных условий. Математическая модель адаптирована к условиям непрерывного широкополосного стана 2000 горячей прокатки ПГП ОАО «НЛМК». Ошибка расчета температуры металла не превышает 20 °С для 98 % полос из низкоуглеродистых и низколегированных марок стали.

2. На основе проведенных исследований теплового и структурного состояний металла в линии непрерывного широкополосного стана горячей прокатки разработаны рекомендации по выбору схемы включения коллекторов системы межклетевого охлаждения полосы в чистовой группе клетей.

3. Разработана компьютерная программа, позволяющая рассчитывать режимы горячей прокатки, межклетевого охлаждения в чистовой группе клетей и ускоренного охлаждения полос на отводящем рольганге для условий непрерывного широкополосного стана 2000 горячей прокатки ПГП ОАО «НЛМК».

4. Разработаны технологические режимы горячей прокатки полос с применением принудительного межклетевого охлаждения в чистовой группе клетей для условий непрерывного широкополосного стана 2000 горячей прокатки ПГП ОАО «НЛМК» в зависимости от прокатываемого типоразмера с учетом производительности участка методических печей и чистовой группы клетей, направленные на эффективную эксплуатацию системы и позволяющие повысить годовую производительность стана на 1,2 %.

5. Разработаны технологические режимы горячей прокатки полос из низкоуглеродистых марок стали с повышением температуры конца прокатки для условий непрерывного широкополосного стана 2000 горячей прокатки ПГП ОАО «НЛМК», позволяющие стабилизировать микроструктуру металла по длине горячекатаных полос и повысить производительность стана. При прокатке полос без ускорения чистовой группы клетей с применением межклетевого охлаждения машинное время прокатки сокращается на 14–18 %. При прокатке полос по режимам с повышенным ускорением машинное время прокатки сокращается на 7–9 %.

6. Математическая модель теплового состояния металла передана ОАО «НЛМК» для использования в составе АСУ ТП непрерывного широкопо-

лосного стана 2000 горячей прокатки ПГП. Режимы горячей прокатки полос из низкоуглеродистых марок стали с применением принудительного межклетевого охлаждения переданы ОАО «НЛМК» для использования в технологическом процессе.

Основное содержание диссертации отражено в следующих публикациях:

1. Математическая модель теплового состояния металла на отводящем рольганге стана горячей прокатки с учетом полиморфного превращения. Сообщение 1 / Ю.А. Мухин, С.И. Мазур, Е.В. Макаров, С.М. Бельский // Производство проката. 2011. № 12. С. 2–5.

2. Математическая модель теплового состояния металла на отводящем рольганге стана горячей прокатки с учетом полиморфного превращения. Сообщение 2 / Ю.А. Мухин, С.И. Мазур, Е.В. Макаров, С.М. Бельский // Производство проката. 2012. № 1. С. 14–16.

3. Оценка неравномерности условий охлаждения по длине горячекатаных полос / Ю.А. Мухин, В.Н. Соловьев, Е.В. Макаров [и др.] // Теория и практика производства листового проката: сборник научных трудов. Ч.1. Липецк: ЛГТУ, 2008. 276 с.: С. 101–107.

4. Рациональные температурно-скоростные режимы прокатки полос на НШСГП / Ю.А. Мухин, В.Н. Соловьев, А.В. Шунин, Е.В. Макаров [и др.] // Теория и практика производства листового проката: сборник научных трудов. Ч.1. Липецк: ЛГТУ, 2008. 276 с.: С. 107–115.

5. Мухин Ю.А., Соловьев В.Н., Макаров Е.В. Исследование влияния скорости охлаждения на формирование механических свойств проката // Образование, наука, производство и управление: сборник научных трудов и научно-методических докладов. Т.1 Старый Оскол: СТИ НИТУ МИСиС, 2009. 296 с.: С. 244–246.

6. Мухин Ю.А., Макаров Е.В. Моделирование температурного поля раската после черновой группы клеток НШСГП // Современная металлургия начала нового тысячелетия: сборник научных трудов. Ч.2. Липецк: Издательство ЛГТУ, 2010. 320 с.: С. 3–8.

7. Исследование условий охлаждения полосы на отводящем рольганге НШСГП / Ю.А. Мухин, В.Н. Соловьев, Е.В. Макаров [и др.] // Современная металлургия начала нового тысячелетия: сборник научных трудов. Ч.2. Липецк: Издательство ЛГТУ, 2010. 320 с.: С. 92–96.

8. Ускоренное охлаждение металла на отводящем рольганге широкополосного стана горячей прокатки / Ю.А. Мухин, С.И. Мазур, Е.В. Макаров, С.М. Бельский // Сборник докладов международной научно-технической конференции «Инновационные технологии обработки металлов давлением», по-

священной 100-летию со дня рождения проф. д.т.н., академика АН КазССР, Героя Социалистического Труда П.И. Полухина. М.: Изд. дом МИСиС, 2011. 586 с.: С. 124–129.

9. Мухин Ю.А., Макаров Е.В. Влияние принудительного межклетевого охлаждения полосы в чистовой группе клеток НШСП на структурообразование металла // Современная металлургия начала нового тысячелетия: сборник научных трудов. Ч.2. Липецк: Издательство ЛГТУ, 2011. 215 с.: С. 3–8.

10. Макаров Е.В., Мухин Ю.А. Программное обеспечение «Программа расчета теплового и структурного состояний металла в линии широкополосного стана горячей прокатки». Инвентарный номер 50201250489. М.: ВНИИЦ, 2012.

11. Improving of low-carbon hot-rolled strips production at the high acceleration rolling / J.A. Mukhin, V.N. Soloviev, E.V. Makarov [et al.] // New technologies and achievements in metallurgy and materials engineering: a collective monograph. Czestochowa, 2012.: P. 423–427.