

На правах рукописи



Стоякин Александр Олегович

**ИССЛЕДОВАНИЕ ФОРМИРОВАНИЯ КЛИНОВИДНОСТИ И СЕРПОВИДНОСТИ
ГОРЯЧЕКАТАНЫХ СТАЛЬНЫХ ПОЛОС ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ УСТОЙЧИВОСТИ
ПРОЦЕССА ПРОКАТКИ**

Специальность 05.16.05 – «Обработка металлов давлением»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Москва – 2018

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Липецкий государственный технический университет».

Научный руководитель:

Д-р техн. наук, проф. кафедры «Обработка металлов давлением» ФГБОУ ВО «ЛГТУ»

Бельский Сергей Михайлович

Официальные оппоненты:

Д-р техн. наук, зав. кафедрой «Металлургии, машиностроения и технологического оборудования» ФГБОУ ВО «ЧГТУ»

Кожевникова Ирина Александровна

Канд. техн. наук, профессор кафедры «Обработки металлов давлением», национального исследовательского технологического университета «МИСиС»

Ионов Сергей Михайлович

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова»

Защита состоится «13» февраля 2019 г. в 14 час. 00 мин. на заседании диссертационного совета Д 002.060.02, созданного на базе ФГБУН Института металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова Российской академии наук (ИМЕТ РАН) по адресу: [119334, г. Москва, Ленинский пр., 49.](#), тел. +7 (499) 135-2060

С диссертацией и авторефератом можно ознакомиться в библиотеке ИМЕТ РАН, а также на официальном сайте ИМЕТ РАН <http://www.imet.ac.ru> и на сайте ВАК <http://vak.ed.gov.ru>. Отзывы на автореферат диссертации (в двух экземплярах, заверенные печатью) просьба отправлять по адресу: [119334, г. Москва, Ленинский пр., 49](#), Диссертационный совет Д 002.060.02. Копии отзывов в электронном виде направлять по e-mail: kalash.ds@mail.ru

Автореферат разослан «__» _____ 2018 г.

Ученый секретарь диссертационного совета
доктор технических наук



Калашников И. Е.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. При прокатке полос в черновой группе непрерывного широкополосного стана горячей прокатки (НШСГП) часто возникает дефект формы полосы, который называется «серповидность» - плавное искривление полосы в форме дуги в горизонтальной плоскости. Дефект «серповидность» тесно связан с дефектом формы профиля поперечного сечения полос, который называется «клиновидность». Дальнейшая прокатка полос такими дефектами чревата серьезными последствиями – полоса серповидной формы при выходе из черновой клетки смещается от центра рольганга, ударяясь о направляющие линейки и ограждение рольганга, а при достижении серповидностью критического значения возникают аварийные ситуации, связанные с выбросом полосы с рольганга (рис. 1).



а)



б)

Рис. 1. Нарушение геометрии листового проката в черновой группе клеток

а) полоса серповидной формы между четвертой и пятой клетью стана 2000 ПАО «НЛМК»

б) аварийная ситуация, связанная с выбросом полосы с рольганга на участке черновой группы клеток

В чистовой группе клеток прокатка полос с дефектами «серповидность» и «клиновидность» также приводит к их смещению от центра рольганга; тогда боковая кромка хвостовой части полосы упирается в направляющие линейки, заворачивается, удваивая толщину, и отрывается, т.к. двойная толщина не захватывается прокатными валками (рис. 2). Оторванные части полос приводят к травмированию рабочей поверхности рабочих валков (например, к образованию дефекта «надав») и последующей внеплановой перевалке валков.



а)

б)

в)

Рис. 2. Последствия отрыва части полосы в чистой группе клетей

а) фрагменты полос, оторванные при завороте полосы в направляющих линейках

б), в) дефект рабочей поверхности вала «надав»

Время, затраченное на устранение последствий нарушения формы прокатываемых полос в линии стана 2000 ПАО «НЛМК», например, за 2014 год составило более 5% (617 минут) от общего времени внеплановых простоев за этот период. Стоимость одной минуты простоя стана оценивается на уровне 70 тыс. рублей (без учета затрат на ремонт оборудования и прокатные валки). Таким образом, экономический ущерб, нанесенный предприятию в 2014 году составил более 40 млн. руб.

Изучению вопросов, связанных с формообразованием листового и полосового проката, посвящены работы А.Ф. Головина, И.М. Павлова, В.Н. Выдрина, В.П. Полухина, В.В. Мельцера, В.М. Салганика, А.М. Песина, С.Л. Коцаря, В.Н. Хлопонина, Ю.А. Мухина, С.М. Бельского и других ученых-прокатчиков. Тем не менее, процессы формирования клиновидности и серповидности горячекатаных полос остаются недостаточно изученными.

Научная проблематика диссертации заключается в исследовании закономерностей формирования клиновидности и серповидности горячекатаных полос, разработке новых решений по регулированию геометрических параметров горячекатаного листового и полосового проката с учетом влияния неравномерности механических свойств прокатываемых полос.

Исследуемая проблема актуальна для всех металлургических предприятий со станами горячей прокатки полос. Диссертация выполнена в рамках государственного задания Министерства образования и науки России (проект № 11.1446.2017/4.6 - «Исследование и имитационное моделирование структуры и свойств сталей и сплавов в условиях горячего формоизменения»).

Вышесказанное обуславливает актуальность исследования закономерностей формирования клиновидности и серповидности горячекатаных полос.

Теоретические и экспериментальные исследования были проведены на кафедре «Обработка металлов давлением» и в лабораториях ФГБОУ ВО ЛГТУ (г. Липецк, Россия), а также в Ченстоховском политехническом университете (г. Ченстохова, Польша). Также исследования проводились в Цехе горячего проката ПАО «НЛМК» в условиях действующего производства.

Цель работы. Повышение устойчивости процесса тонколистовой горячей прокатки за счет улучшения геометрических параметров стальных горячекатаных полос путем исследования формирования их клиновидности и серповидности, разработки новых математических моделей и решений по регулированию геометрических параметров горячекатаных полос с учетом влияния неравномерности механических свойств подката по ширине и поперечных перемещений металла в очаге деформации.

Поставленная цель реализуется путем решения комплекса следующих задач:

1. Проведение экспериментальных исследований по определению характера распределения температуры по ширине горячекатаных полос, а также нарушений их геометрических параметров.

2. Разработка математической модели образования клиновидности профиля поперечного сечения полос, прокатываемых в черновой группе НШСГП, с учетом влияния неравномерности их температурных и механических свойств по ширине.

3. Разработка математической модели образования серповидности профиля поперечного сечения полос, прокатываемых в черновой группе НШСГП, с учетом поперечных перемещений металла в очаге пластической деформации.

4. Разработка нового способа регулирования клиновидности и серповидности полос при горячей прокатке в черновой группе НШСГП;

5. Разработка рекомендаций и предложений по корректировке клиновидности и серповидности полос при горячей прокатке.

Научная новизна результатов исследования

1. Впервые в явном виде установлена связь неравномерного распределения температуры по ширине раската с клиновидностью и серповидностью полос, прокатываемых в черновой группе станов горячей прокатки.

2. Разработана математическая модель образования клиновидности профиля поперечного сечения полос, прокатываемых в черновой группе станов горячей прокатки, отличающаяся учетом влияния неравномерности температурных и механических свойств по ширине подката.

3. Разработана математическая модель образования серповидности полос, прокатываемых в черновой группе станов горячей прокатки, отличающаяся учетом поперечных перемещений металла в очаге пластической деформации.

Практическая значимость работы

1. Предложения по регулированию клиновидности поперечного сечения и серповидности горячекатаных стальных полос, разработанные на основе математических моделей образования их клиновидности и серповидности, переданы в Цех горячего проката ПАО «НЛМК». Количество внеплановых простоев по причинам, связанным с серповидностью раската, уменьшилось с 617 минут в 2014 г. до 259 минут в 2017 г.

2. Разработан способ горячей прокатки полос, позволяющий компенсировать клиновидность и серповидность горячекатаных полос (Патент №2615670 от 06.04.2017 г.).

3. Полученные в диссертации результаты могут быть использованы в прокатных цехах таких металлургических предприятиях, как «Северсталь», «ММК», ArcelorMittal Темиртау и др., производящих горячекатаные стальные полосы.

4. Материалы диссертации используются в учебном процессе ЛГТУ в курсах «Теория прокатки», «Неравномерность деформации».

Апробация и реализация результатов диссертации

Материалы диссертационной работы докладывались и обсуждались в рамках: 7-й международной молодежной научно-практической конференции «Инновационные технологии в металлургии и машиностроении» г. Екатеринбург, Россия, 26-30 ноября 2014, международной научно-практической конференции «Современная металлургия нового тысячелетия к 80-летию НЛМК», г. Липецк, Россия, 17-21 ноября 2014 г.; десятом конгрессе прокатчиков, Липецк, 14-16 апреля 2015 г.; международной научно-практической конференции «Современная металлургия нового тысячелетия, посвященной 5-летию металлургического института ЛГТУ», г. Липецк, Россия, 8-11 декабря 2015 г.

Публикации

Основное содержание и результаты работы опубликованы в 12 печатных трудах, в том числе 3 статьи в изданиях, включенных в базы Scopus [1-3] и 4 статьи в изданиях, входящих в перечень ведущих российских рецензируемых научных журналов [3-6], рекомендованных ВАК Минобрнауки РФ.

Структура диссертации

Диссертация состоит из введения, пяти глав, выводов и библиографического списка (включающего 94 наименования) и четырех приложений. Работа изложена на 141 странице машинописного текста, содержит 61 рисунок и 5 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность темы диссертационной работы, определяется цель, задачи, научная новизна и практическая значимость исследования.

В первой главе проведен обзор литературных источников, посвящённых формообразованию листового и полосового проката на непрерывных широкополосных станах горячей прокатки (НШСГП). Рассмотрено оборудование НШСГП, позволяющее осуществлять непрерывный контроль и регулирование геометрических параметров и температурного профиля прокатываемых полос. Отмечается, что практически все существующие системы, отвечающие за регулирование геометрических параметров полосы в черновой группе клетей, могут осуществлять корректировку межвалкового зазора с неизбежным транспортным запаздыванием. Контроль и регулирование температуры полос существующими системами обеспечивается в области, влияющей на механические свойства готовых горячекатаных полос, или указанные системы обеспечивают тонкое регулирование геометрических параметров в чистовой группе клетей, и только некоторые косвенно воздействуют на геометрические параметры подката в черновых клетях НШСГП.

Подробно рассмотрены теоретические исследования формоизменения металла в очаге пластической деформации, а также решение задачи определения напряжений как на контактной поверхности, так и во всем объёме деформируемого тела. Наиболее подходящим для рассматриваемых условий является вариационный метод, который впервые был применен к процессам обработки металлов давлением И.Я. Тарновским и получивший развитие в его дальнейших трудах. Вариационный метод позволяет с высокой точностью определять усилия, распределение напряжений и деформаций по объёму тела, а, главное, прогнозировать форму тела после его деформации. Сформулированы цель и задачи настоящего исследования.

Во второй главе приведены результаты экспериментального исследования температурного поля и профиля поперечного сечения полос, прокатываемых на НШСГП 2000 ПАО «НЛМК». Определены закономерности распределения температурного поля на поверхности прокатываемых полос и связанные с этим нарушения геометрических параметров горячекатаных полос.

Для получения достоверных результатов распределения температуры поверхности прокатываемых полос, рассматриваемых в рамках основного исследования, был проведен ряд дополнительных экспериментов по определению истинного значения степени черноты горячекатаных полос исследуемых марок стали. Эксперименты проводились на пластометре Gleeble 3800 в городе Ченстохова (Польша). Таким образом, информация о степени черноты позволила осуществить тонкую настройку ИК камеры BALTECH TR-1400 и получать

корректную информацию о распределении температурного поля исследуемых полос непосредственно во время проведения измерений.

Исследования проводились на трех участках линии НШСГП 2000 ПАО «НЛМК»: черновая группа клетей, чистовые клетки и участок ускоренного охлаждения полос.

Температурное поле в черновой группе клетей характеризуется выраженным уменьшением температуры от левой кромки к правой (по ходу движения полосы) (рис. 3). Снижение температуры обусловлено тем, что правая кромка сляба в позиции выгрузки из методической печи находится ближе к заслонке и поэтому подстуживается. Также на этом участке на кромках раската образуются наплывы металла, которые становятся причиной образования серповидности полосы.

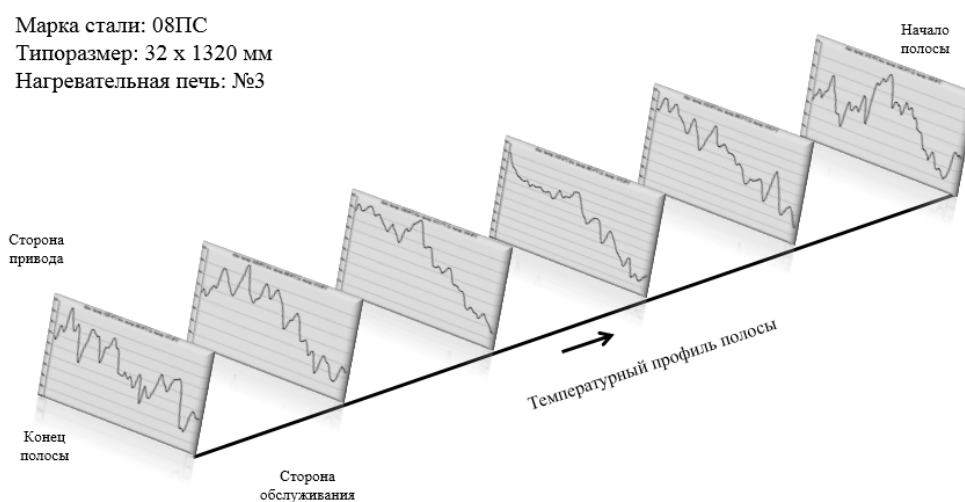


Рис. 3. Температурные профили полос за пятой черновой клетью НШСГП 2000 ПАО «НЛМК»

Перед чистовой группой клетей температурное поле раската практически выравнивается, а иногда даже противоположно изменяется, что обусловлено конструктивными особенностями теплосохоряющих установок промежуточного рольганга и направлением движения воздушных потоков (рис. 4). За чистовой группой температурный перекося становится менее выражен, хотя некоторая наследственность существует.

Марка стали: 08Ю
Типоразмер: 2,7 x 1285 мм
Нагревательная печь: №2

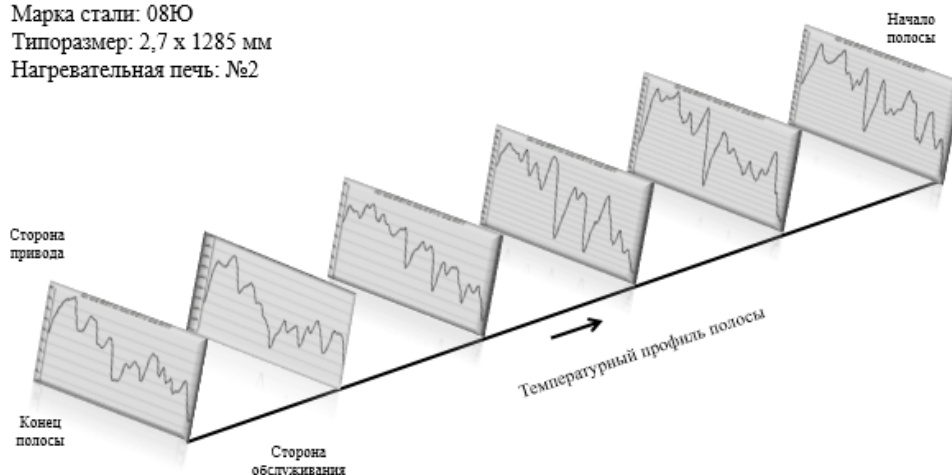


Рис. 4. Температурные профили полос за двенадцатой клетью
(ярко выражен температурный клин)

После прохождения участка ускоренного охлаждения распределение температуры по ширине имеет неравномерный характер – температура со стороны обслуживания, как правило, ниже температуры со стороны привода (рис. 5). Сопоставление распределения температурного поля полос и величин их неплоскостности, полученных по результатам измерений многофункциональной системой RM-312, которая расположена за чистовой группой клетей, представлено на рис. 5.

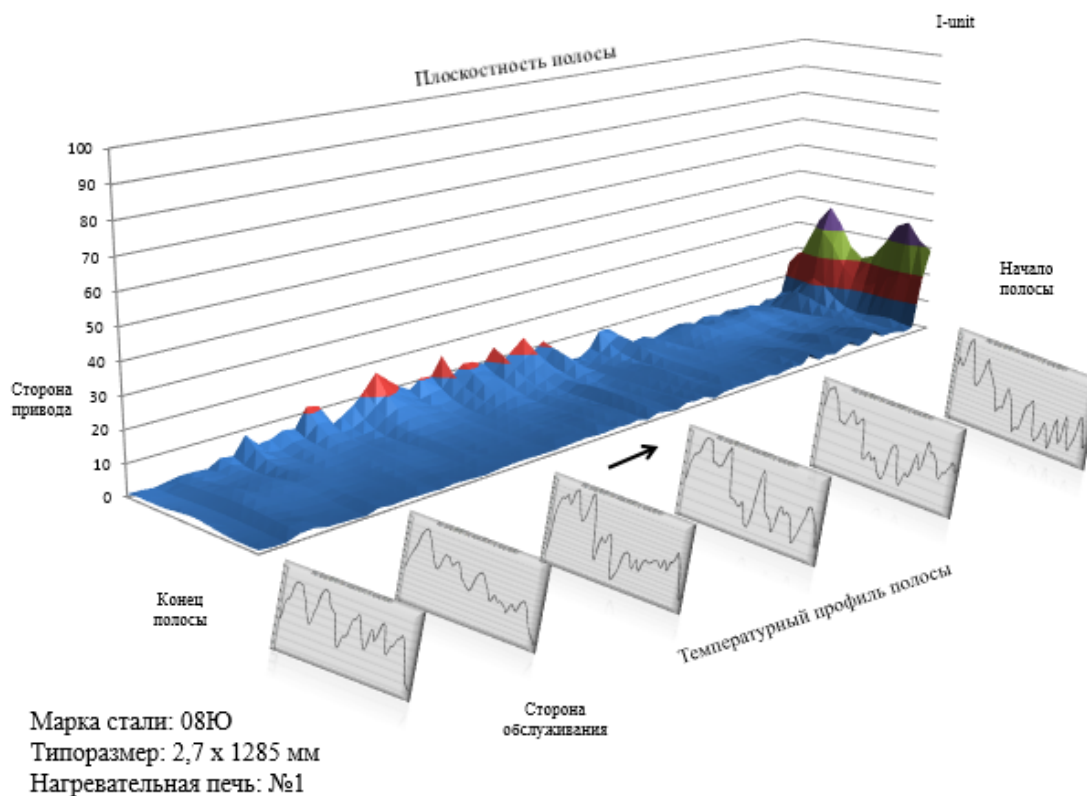


Рис. 5. Сопоставление плоскостности и температурных профилей полос перед смоткой
полосы в рулон

Таким образом, проведённое исследование позволило определить закономерности распределения температурного поля горячекатаных полос в линии НШСГП 2000 ПАО «НЛМК» и оценить процесс формоизменения раската в черновой группе клетей с учетом неравномерности распределения температуры по поверхности раската.

Третья глава посвящена формообразованию прокатываемых полос с учетом влияния неравномерных температуры и свойств металла по ширине сляба. Разработана упрощенная математическая модель образования клиновидности раската с учетом неравномерного температурного поля. В модели рассматривается раскат, у которого температура нагрева одной стороны (стороны привода) выше другой, соответственно, металл более горячей части имеет меньшую величину сопротивления деформации. Тогда схематично можно представить усилия прокатки со стороны привода и обслуживания в виде сил F_1 и F_2 ($F_1 < F_2$), а жесткости станин прокатной клетки – в виде пружин одинаковой жесткости C_k (рис. 6).

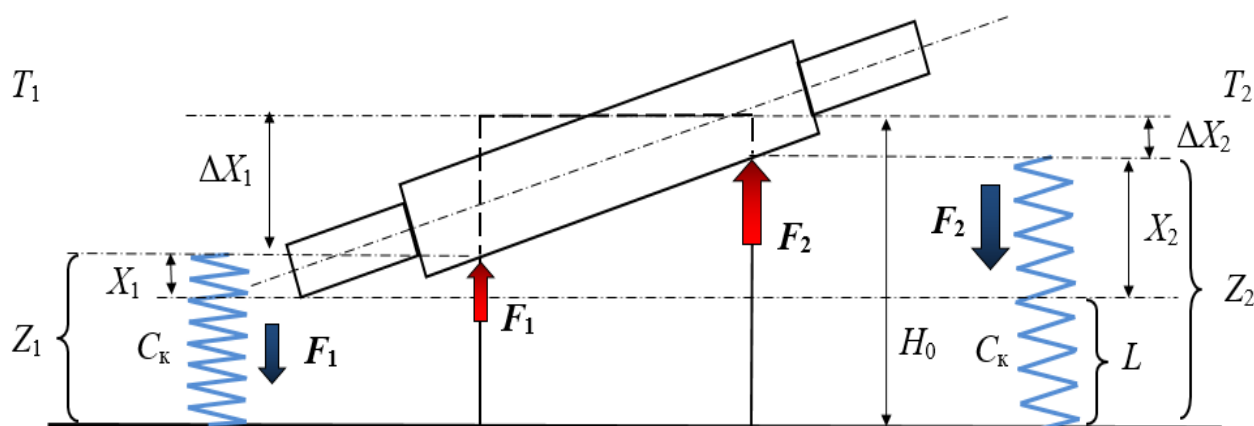


Рис. 6. Упрощенная модель образования клиновидности профиля поперечного сечения горячекатаного раската:

L – исходная высота межвалкового зазора; Z_1 – межвалковый зазор со стороны привода; Z_2 – межвалковый зазор со стороны обслуживания; X_1 – растяжение клетки со стороны привода; X_2 – растяжение клетки со стороны обслуживания; ΔX_1 – обжатие со стороны привода; ΔX_2 – обжатие со стороны обслуживания; F_1 и F_2 – усилие прокатки со стороны привода и со стороны обслуживания; H_0 – исходная толщина раската, T_1 и T_2 – температура со стороны привода и со стороны обслуживания.

Из условия равновесия сил, действующих со стороны валка и полосы с каждой стороны, получим:

$$C_k \times X_1 = F_1; \quad (1)$$

$$C_k \times X_2 = F_2. \quad (2)$$

Откуда:

$$C_k \times (X_2 - X_1) = F_2 - F_1; \quad (3)$$

$$(X_2 - X_1) = W = \frac{(F_2 - F_1)}{C_k}. \quad (4)$$

Очевидно, что для компенсации возникающей клиновидности раската W необходимо создать предварительный перекося ΔS : уменьшить зазор со стороны обслуживания или увеличить зазор со стороны привода таким образом, чтобы суммарный перекося при прокатке стал равным нулю:

$$W = \frac{(F_2 - F_1)}{C_k} - \Delta S = 0. \quad (5)$$

Справедливость модели была подтверждена результатами изменения клиновидности при скачкообразном уменьшении усилия прокатки клетки №12 НШСГП 2000 ПАО «НЛМК» до и после перехода на прокатку следующего типоразмера.

В соответствии с упрощенной моделью на переднем и заднем концах раската, где усилие прокатки меньше по сравнению с усилием прокатки средней части, клиновидность изменяется в отрицательную сторону (рис. 7)

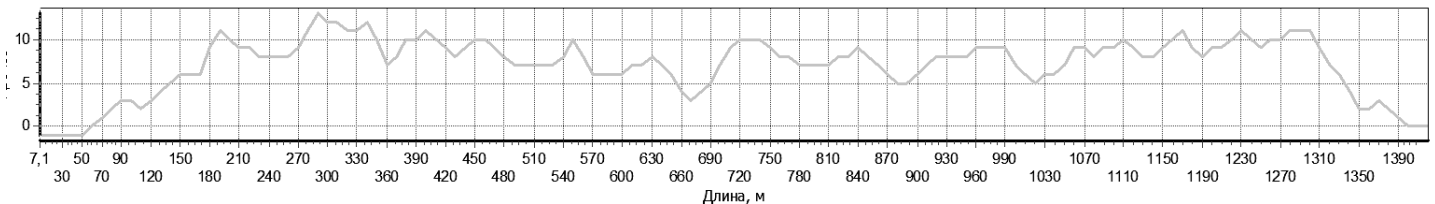


Рис. 7. Изменение клиновидности полосы по ее длине

На основе полученных результатов разработаны рекомендации вальцовщикам НШСГП 2000 ПАО «НЛМК» по изменению величины перекося валковой системы при переходе с «жесткого» типоразмера на «мягкий».

Компенсация клиновидности раската в черновой группе НШСГП 2000 может достигаться за счет совместного использования системы RM-316 и регулирования перекося межвалкового зазора клетки №1. Толщина и температура металла за клетью № 2 также позволяет осуществить необходимые корректировки, но возможности этой клетки для регулирования клиновидности значительно слабее, чем у клетки № 1. Перекося горизонтальных валков черновых клетей №№ 3-5 главным образом служат для устранения серповидности раската, получившейся из-за некорректной настройки перекося валков клетей №1-№2.

При появлении клиновидности раската за клетью № 5 вальцовщикам черновой группы рекомендовано изменять перекося горизонтальных валков клетки № 1 противоположно клиновидности в соответствии с Таблицей 1.

Рекомендуемые величины коррекции перекоса межвалкового зазора клетки № 1

Ширина готовой полосы, мм	Клиновидность за клетью № 5, мкм	Величина перекоса межвалкового зазора, мм	
		При прокатке без реверса в клетке № 1	При прокатке с реверсом в клетке № 1
900 – 1250	Более 250	4,0 – 10,0	3,0 – 8,0
1251 – 1500	Более 250	3,0 – 8,0	3,0 – 7,0
1501 - 1850	Более 300	2,0 – 6,0	2,0 – 6,0

После получения информации от RM-316 о величине клиновидности раската за клетью №5 вальцовщик черновой группы при необходимости корректирует величину перекоса валков клетки № 1.

В четвертой главе представлена математическая модель формирования серповидности полосы в черновой группе клеток стана горячей прокатки при неравномерном обжатии по ширине с учетом поперечных перемещений металла в очаге деформации.

На процесс образования серповидности полосы при прокатке подката с поперечным сечением клиновидной формы существенно влияет поперечное перемещение металла в очаге пластической деформации. (рис. 8).

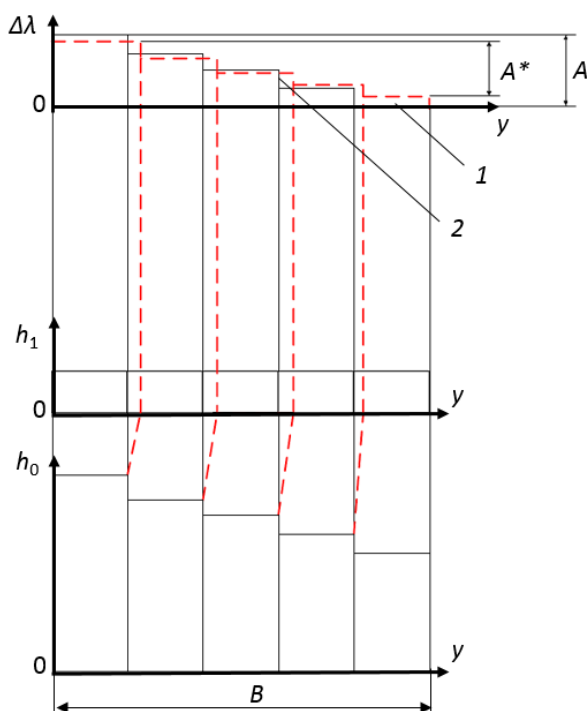


Рис. 8. Схема уменьшения неравномерности вытяжек по ширине полосы из-за поперечного перемещения металла в очаге деформации:

B – ширина полосы; $\Delta\lambda$ – разность вытяжек; h_0 – толщина поперечного сечения полосы на входе в очаг деформации (ступенчатая линия); h_1 – толщина поперечного сечения полосы на выходе (прямая линия); A – амплитуда неравномерности вытяжек по ширине полосы в предположении плоской схемы деформации (ломаная 1); A^* – амплитуда неравномерности вытяжек по ширине полосы с учетом поперечного перемещения металла в очаге деформации (ломаная 2).

Если рассматривать плоскую схему деформации, то амплитуда неравномерности вытяжек $\Delta\lambda$ по ширине полосы была бы равной величине A , но с учетом поперечных перемещений металла в очаге деформации (пунктирные линии) величина вытяжек по ширине полосы изменится, и амплитуда $\Delta\lambda$ станет равной $A^* < A$. Таким образом, расчеты показывают, что реальная серповидность по сравнению с расчетом в предположении плоской схемы деформации в 2-5 раз меньше. Влияние поперечного перемещения металла на уменьшение неравномерности вытяжек в очаге деформации можно оценить с помощью коэффициента ρ :

$$\frac{\Delta\lambda(y)}{\lambda} = \rho \left(\frac{\delta h_0(y)}{h_{0m}} - \frac{\delta h_1(y)}{h_{1m}} \right), \quad (6)$$

где $\Delta\lambda(y)$ и λ - неравномерность вытяжек и средняя вытяжка по ширине полосы; $\delta h_0(y)$ и h_{0m} - приращение толщины и средняя толщина полосы на входе в очаг деформации; $\delta h_1(y)$ и h_{1m} - приращение толщины и средняя толщина полосы на выходе из очага деформации, $0 < \rho < 1$ - коэффициент, учитывающий влияние поперечных перемещений металла в очаге деформации.

Для очага деформации применяется модель жесткопластической среды с упругими внешними зонами, т.е. металл, не обладая упругими свойствами в очаге деформации, сразу же приобретает их на выходе из очага деформации. Для такого очага деформации, можно применить вариационный принцип Журдена:

$$\delta \left(\tau_s \iiint_{\Omega} H d\Omega - \iint_S \bar{\sigma}^n \bar{v} ds + \tau_s \sum_{i=1}^n \iint_{S_i} |\Delta v_i| ds \right) = 0, \quad (7)$$

где H - интенсивность скоростей деформации; $\bar{\sigma}^n$ и \bar{v} - внешние напряжения на поверхности очага деформации S и соответствующие им скорости перемещения; Ω - объем очага деформации; τ_s - предел текучести при сдвиге материала полосы; Δv_i - скачок скоростей на i -й поверхности среза S_i ; δ - символ варьирования.

Выражение, заключенное в круглые скобки, является функционалом и представляет собой полную мощность прокатки. Первый интеграл данного выражения представляет собой мощность внутренних сопротивлений, второй - мощность внешних сил, действующих на границах очага деформации (силы трения скольжения между валками и полосой, переднее и

заднее натяжение), третий – мощность сил среза. Кроме того, во второй интеграл (7) входит мощность пластического изгиба полосы при образовании серповидности.

Продольное распределение скоростей деформации по ширине полосы представлено таким образом, что неравномерность скоростей течения металла по ширине полосы на входе в очаг деформации изменяется по длине очага деформации пропорционально обжатию:

$$v_x(y) = \bar{v}_x \left[1 + f'(y) \frac{h_x - h_1}{\Delta h} + \varphi'(y) \frac{h_0 - h_x}{\Delta h} \right],$$

где Δh - абсолютное обжатие, h_x - текущая толщина полосы в очаге деформации, аппроксимированная квадратичной параболой; $v_x(y)$ - распределение продольных скоростей течения металла по ширине полосы в поперечном сечении по оси x ; \bar{v}_x - среднее значение скорости полосы; f', φ' - входная и выходная неравномерности распределения скоростей продольного течения металла.

Выражение (7) можно представить в виде суммы мощностей:

$$N_{\Sigma} = (N_{\text{внутр}} + N_{\text{скольж}} + N_{\text{изгиб}} + N_{\text{срез}}) \quad (8)$$

В общем виде были получены выражения для скоростей деформации, скоростей перемещения металла в очаге деформации и соответствующих им напряжений, с помощью которых были вычислены мощности, входящие в (8).

Был вычислен момент пластического изгиба горячекатаной полосы на выходе очага деформации в процессе формирования серповидности и угловая скорость изгиба. Мощность $N_{\text{изгиб}}$, вычисленная на основе этих данных, вошла в общий баланс мощностей, что позволило корректно применить вариационный принцип Журдена к рассматриваемой системе, так как она приведена в состояние равновесия. Расчетная схема представлена на рис. 9.

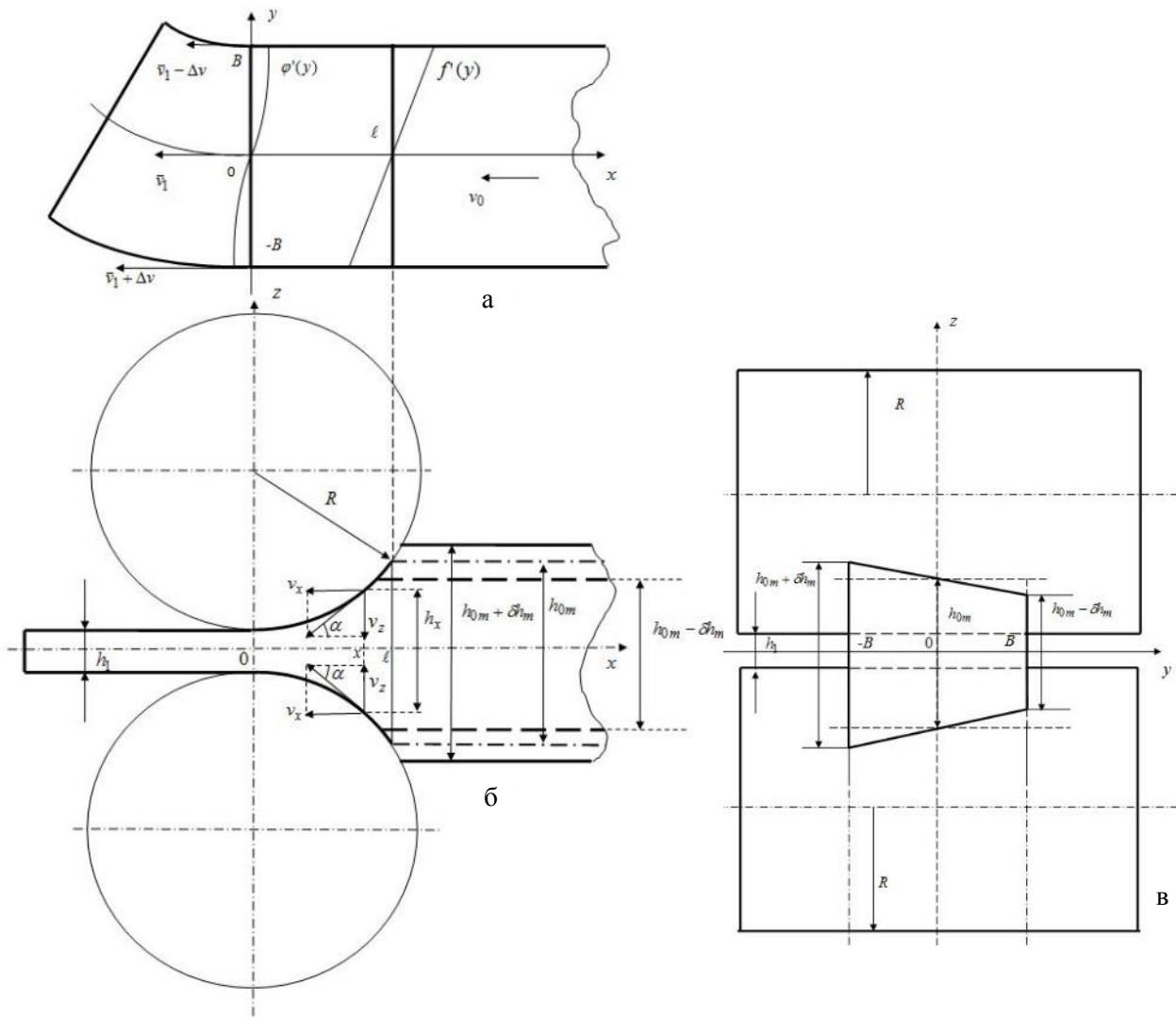


Рис. 9. Расчетная схема формирования серповидности полосы при горячей прокатке: а) очаг деформации при формировании серповидности, б-в) схема обжатия полосы

Варьируя выражение для полной мощности прокатки (8) по $\varphi(y)$

$$F_{\varphi} - \frac{d}{dy} F_{\varphi}' + \frac{d^2}{dy^2} F_{\varphi}'' = 0 ,$$

получили уравнение Эйлера-Пуассона для экстремали $\varphi(y)$:

$$\varphi - \frac{1}{K^2} \cdot \varphi'' + \frac{32\sqrt{3}}{3} \frac{B^2}{E^*} \frac{1}{K^2} \cdot \varphi^{IV} = f , \quad (9)$$

где $\frac{1}{K^2} = \frac{E^* h_m \Delta h}{16\mu h_1}$, $h_m = \frac{h_{0m} + h_1}{2}$, $E^* = \frac{E}{\tau_s}$.

Представим входную неравномерность распределения скоростей продольного течения металла в виде суммы нечетных гармоник:

$$f'(y) = \sum_{i=1}^n A_i \sin\left(i\pi \frac{y}{B}\right). \quad (10)$$

Тогда неравномерность выходных скоростей металла запишется следующим образом:

$$\varphi'(y) = \sum_{i=1}^n B_i \sin\left(i\pi \frac{y}{B}\right), \quad (11)$$

где $B_i = \rho_i \cdot A_i$, а ρ_i – это коэффициент, учитывающий влияние поперечного перемещения металла в очаге деформации на снижение неравномерности i -той гармоники выходной скорости течения металла в процессе формирования серповидности, имеющий следующий вид:

$$\rho_i = \frac{1}{1 + \frac{1}{(KB)^2} (i\pi)^2 \left[1 + \frac{32\sqrt{3}}{3E^*} (i\pi)^2 \right]}. \quad (12)$$

Графически неравномерность выходной скорости течения металла в процессе формирования серповидности с учетом поперечных перемещений в очаге деформации можно изобразить следующим образом (рис. 10):

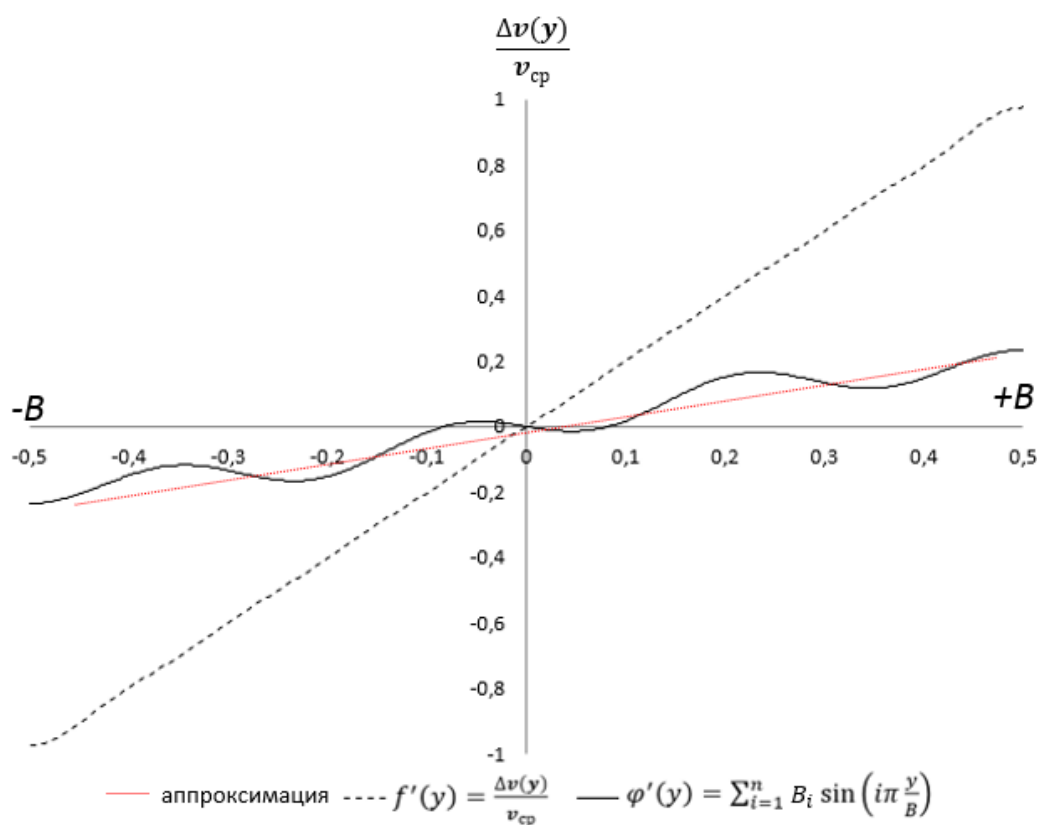


Рис. 10. Влияние поперечного перемещения металла на снижение неравномерности скоростей течения металла при формировании серповидности

Таким образом, перемещение металла в поперечном направлении в очаге деформации приводит к существенному уменьшению неравномерности вытяжек по ширине полосы, из-за чего уменьшается серповидность полосы и увеличивается радиус кривизны по сравнению со значениями, полученными при расчёте в предположении плоской схемы деформации.

На рис. 11 представлена зависимость для первой гармоники ($i = 1$) коэффициента ρ , учитывающего влияние поперечного перемещения металла в очаге деформации от толщины и ее аппроксимация показательной функцией.

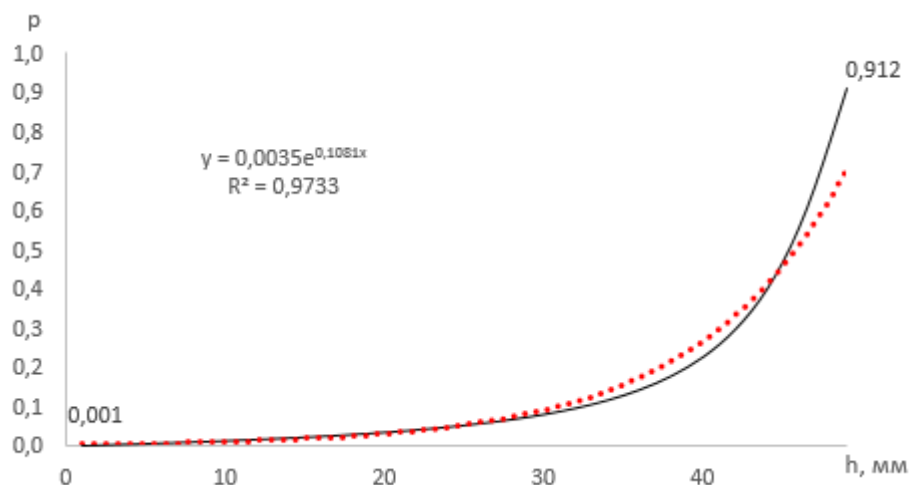


Рис. 11. Зависимость коэффициента, учитывающего поперечное перемещение металла в очаге деформации, от толщины на выходе из клетки

В пятой главе представлен способ горячей прокатки полос и листов, включающий прокатку с предварительным измерением входной температуры полосы, отличающийся тем, что измерение температуры производят на каждой из сторон раската отдельно с помощью пирометров, привод которых синхронизирован с входными боковыми направляющими линейками. Непосредственно процесс предварительной настройки перекося межвалкового зазора протекает в соответствии со схемой, представленной на рис. 12.

В паузе между полосами верхний рабочий валок выставляют параллельно нижнему в позицию S в соответствии с заданным обжатием. При попадании головной части прокатываемой полосы под пирометры (2) происходит измерение температуры левой T_l и правой кромок полосы T_p . На основе полученных значений температуры, величины жесткости станин и зависимости сопротивления пластической деформации σ_s прокатываемого металла от температуры осуществляется вычисление величины перекося ΔS в соответствии со следующей формулой:

$$\Delta S = \frac{\Delta\sigma_s \sqrt{R\Delta h}}{C_k} \cdot \frac{B}{2} \cdot 10^{-4} \text{ [мм]}, \quad (13)$$

где R – радиус рабочего валка, мм; Δh – абсолютное обжатие полосы в клетке, мм; B – ширина прокатываемой полосы, мм; C_k – жесткость станины прокатной клетки, Н/м; $\Delta\sigma_s = \sigma_s(T_l) - \sigma_s(T_p)$, $\sigma_s(T_l)$ и $\sigma_s(T_p)$ – сопротивление пластической деформации прокатываемого металла

при температурах $T_{\text{л}}$ (температура левой кромки полосы) и $T_{\text{п}}$ (температура правой кромки), МПа.

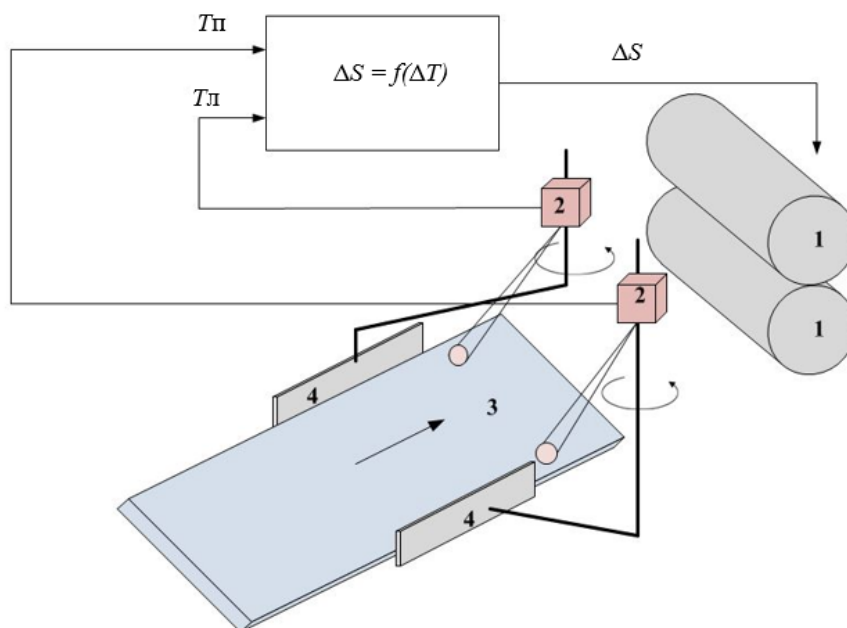


Рис. 12. Схема предварительной настройки перекоса межвалкового зазора

1 – валковая система, 2 – пирометры, 3 – прокатываемая полоса, 4 – направляющие линейки.

После этого происходит регулировка перекоса вертикального межвалкового зазора таким образом, чтобы на стороне более горячей кромки позиция верхнего рабочего вала принимает значение $(S + \frac{\Delta S}{2})$, а на противоположной стороне $(S - \frac{\Delta S}{2})$.

Таким образом, достигается технический эффект в виде уменьшения клиновидности профиля поперечного сечения прокатываемой полосы и выравнивания вытяжек по ее ширине для устранения серповидности. Примечательно, что корректировка клиновидности профиля поперечного сечения прокатываемой полосы возможна непосредственно на первой же единице продукции.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. Впервые в явном виде установлена связь неравномерного распределения температуры по ширине раската с клиновидностью и серповидностью полос, прокатываемых в черновой группе клетей станов горячей прокатки. Установлено, что в черновой группе НШСГП 2000 ПАО «НЛМК» температура левой (сторона привода) прикромочной части раската выше температуры правой (сторона обслуживания) прикромочной части.

2. Разработана математическая модель образования клиновидности профиля поперечного сечения полос, учитывающая влияние неравномерности распределения температуры и сопротивления деформации металла по ширине сляба/раската в черновой

группе НШСГП. Адекватность модели верифицирована в условиях НШСГП 2000 ПАО «НЛМК».

3. Разработана математическая модель образования серповидности полос, прокатываемых в черновой группе НШСГП, с учетом поперечных перемещений металла в очаге пластической деформации.

4. Разработан способ горячей прокатки полос и листов, позволяющий компенсировать клиновидность профиля поперечного сечения раската и выравнивание вытяжек по его ширине для устранения серповидности за счет предварительного измерения входной температуры полосы на ее боковых кромках и соответствующего воздействия на межвалковый зазор (патент №2615670 от 06 апреля 2017г.). Компенсация клиновидности полосы обеспечивается на первой же единице продукции.

5. Разработаны практические рекомендации по регулированию клиновидности поперечного сечения и серповидности горячекатаных стальных полос, разработанные на основе математических моделей образования их клиновидности и серповидности. Рекомендации переданы в Цех горячего проката ПАО «НЛМК». Внеплановые простои по причинам, связанным с серповидностью раската в 2017 г. уменьшились на 58% в сравнении с 2014 г. В денежном выражении получен экономический эффект более 25 млн. рублей.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах:

1. Sergey M. Belskiy, Svetla Yankova, Vyacheslav B. Chuprov, K.V. Bakhaev, Aleksandr O. Stoyakin, Temperature field of stripes under hot rolling // Journal of Chemical Technology and Metallurgy, 50, 6, 2015, 613-616

2. Sergey M. Belskiy, Svetla Yankova, Igor P. Mazur, Alexander O. Stoyakin, Influence of the transversal displacements of metal on the camber formation of hot-rolled strip // Journal of Chemical Technology and Metallurgy, 52, 4, 2017, 672-678.

3. Бельский С.М., Мухин Ю.А., Чупров В.Б., Бахаев К.В., Стоякин А.О. Особенности температурного поля стальных полос при горячей прокатке // “Изв.вузов. Чёрная металлургия”, № 6, 2015. -С.417-421

4. Бельский С.М., Мухин Ю.А., Польшин А.А., Стоякин А.О. Математическая модель профиля поперечного сечения горячекатаных полос с прикромочными особенностями. Сообщение 1// “Производство проката”, № 5, 2015. - С.18-22.

5. Бельский С.М., Мухин Ю.А., Польшин А.А., Стоякин А.О. Математическая модель профиля поперечного сечения горячекатаных полос с прикромочными особенностями. Сообщение 2// “Производство проката”, № 6, 2015. - С.10-13.

6. Бельский С.М., Мазур С.И., Мухин Ю.А., Чупров В.Б., Стоякин А.О. Исследование температурного поля полос, прокатываемых на НШСГП 2000 // “Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации”, выпуск 12, 2014. - С.44-46.
7. Бельский С.М., Мухин Ю.А., Стоякин А.О. Особенности распределения температуры и клиновидности профиля поперечного сечения полос в черновой группе стана горячей прокатки 2000 ПАО НЛМК // Вести высших учебных заведений Черноземья, 2016, №3(45), с. 77-79.
8. Бельский С.М., Мухин Ю.А., Чупров В.Б., Бахаев К.В., Стоякин А.О. Температурное поле полос при горячей прокатке //Сборник научных трудов Международной научно-практической конференции «Современная металлургия начала нового тысячелетия», Ч 3. – Липецк, Изд-во ЛГТУ, 2014. - с. 205-210.
9. Бельский С.М., Мазур С.И., Мухин Ю.А., Чупров В.Б., Стоякин А.О. Исследование температурного поля и клиновидности профиля поперечного сечения полос на стане горячей прокатки 2000 // Сборник научных трудов международной научно-практической конференции «Современная металлургия нового тысячелетия», посвященной 5-летию металлургического института ЛГТУ», ч. I, Липецк. 8-11 декабря 2015 г. - стр. 18-25.
10. Ю.А. Мухин, С.М. Бельский, Е.В.Макаров, Стоякин А.О. Математическая модель формирования теплового и фазового состояния стальных полос на отводящем рольганге при тонколистовой горячей прокатке // Инновационные технологии в металлургии и машиностроении: Сб. науч. трудов. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2014, с.252-256.
11. Бельский С.М., Мазур С.И., Мухин Ю.А., Чупров В.Б., Стоякин А.О. Исследование температурного поля и профиля поперечного сечения полос, прокатываемых на НШСГП 2000 ПГП ОАО «НЛМК»// Труды X Конгресса прокатчиков, Липецк, 14-16 апреля 2015 г., том I, стр. 54-59.
12. Мухин Ю.А., Бельский С.М., Бахаев К.В., Саурин В.В., Стоякин А.О. Способ горячей прокатки полос. Патент RU 2615670 C1 B21B 37/40 Оpubл.06.04.2017. Бюл. № 10.