

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«ЛИПЕЦКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

*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»

Диссертация на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель  
доктор технических наук,  
профессор С.М. Бельский

Москва 2018

## Оглавление

Оглавление .....	2
Введение .....	4
1. Литературный обзор и постановка задач исследования .....	8
1.1. Геометрические параметры профиля поперечного сечения горячекатаных полос .....	8
1.2. Дефекты и недостатки, возникающие при горячей прокатке по причине клиновидности и серповидности прокатываемых полос .....	16
1.3. Образование клиновидности и серповидности горячекатаных полос .....	22
1.4. Способы контроля и регулирования серповидности полос при горячей прокатке .....	28
1.5. Способы контроля и регулирования температуры горячекатаных полос в линии прокатного стана .....	37
1.6. Теоретическое исследование формоизменения прокатываемых полос в очаге пластической деформации при продольной прокатке .....	44
1.6.1. Влияние условий течения металла в очаге деформации на формоизменение горячекатаных полос .....	44
1.6.2. Методы и способы решения плоских задач ОМД .....	48
1.6.3. Методы и способы решения объемных задач ОМД .....	54
1.7. Заключение по литературному обзору и постановка задач исследования	59
2. Исследование температурного поля горячекатаных полос .....	62
2.1. Экспериментальное исследование температурного поля горячекатаных полос на непрерывном широкополосном стане 2000 ПАО «НЛМК» .....	62
2.1.1. Физическое моделирование нагрева и охлаждения металла на установке Gleeble 3800 .....	62
2.1.2. Проведение эксперимента в условиях НШСГП 2000 ПАО «НЛМК» .....	68
2.1.3. Обработка и анализ результатов исследования .....	73
2.2. Выводы к второй главе .....	89
3. Математическая модель формообразование прокатываемых полос	

с учетом неравномерных свойств металла по ширине сляба .....	91
3.1. Процесс формирования полосы серповидной формы .....	91
3.2. Рекомендации по регулированию клиновидности полос в черновой группе клетей стана горячей прокатки .....	95
3.3. Выводы к третьей главе .....	96
4. Математическая модель образования серповидности горячекатаных полос с учетом поперечных перемещений металла в очаге пластической деформации .....	98
4.1. Мощность прокатки при образовании серповидности полосы с учетом поперечных перемещений металла в очаге деформации .....	99
4.2. Мощность образования серповидности и уравнении Эйлера-Пуассона .	104
4.3. Зависимость коэффициента, учитывающего влияние поперечных перемещений металла в очаге деформации, от параметров прокатки .....	110
4.5. Выводы к четвертой главе .....	116
5. Способ горячей прокатки с компенсацией клиновидности профиля поперечного сечения полосы .....	117
5.1. Предварительный перекося рабочих валков как способ компенсации клиновидности профиля поперечного сечения полосы .....	117
5.2. Выводы к пятой главе .....	121
Основные выводы.....	123
Библиографический список .....	124
Приложение А. Результаты измерения клиновидности при скачкообразном уменьшении усилия прокатки .....	135
Приложение Б. Справка об использовании в учебном процессе .....	139
Приложение В. Справка об использовании практических рекомендаций .....	140
Приложение Г. Патент на способ горячей прокатки полос .....	141

## Введение

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 с 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 чистой группе клетей 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. Оторванные части полос приводят к травмированию рабочей поверхности рабочих валков (например, к образованию дефекта «надав») и последующей внеплановой перевалке валков.

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, потери предприятия в 2014 году составили 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. Хлопониной, 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.

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.

Целью диссертационной работы является повышение устойчивости процесса прокатки за счет исследования формирования клиновидности и серповидности горячекатаных стальных полос, разработки математических моделей, разработки новых решений по регулированию геометрических параметров горячекатаного листового и полосового проката с учетом влияния неравномерности механических свойств подката и поперечных перемещений металла в очаге деформации.

Поставленная цель реализуется путем решения комплекса следующих задач:

- проведение экспериментальных исследований по определению характера распределения температуры по ширине горячекатаных полос, а также нарушений их геометрических параметров;
- 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;
- разработка математической модели образования серповидности профиля поперечного сечения полос, прокатываемых в черновой группе НШСГП, с учетом поперечных перемещений металла в очаге пластической деформации;
- разработка способа регулирования клиновидности и серповидности полос при горячей прокатке в черновой группе НШСГП;
- разработка рекомендаций и предложений по корректировке клиновидности и серповидности полос при горячей прокатке.

В работе получены и выносятся на защиту следующие результаты, отличающиеся научной новизной:

1. Связь неравномерного распределения температуры по ширине раската с клиновидностью и серповидностью полос, прокатываемых в черновой группе станов горячей прокатки. Характер распределения температуры по длине и ширине прокатываемого металла на различных участках НШСГП 2000 ПАО «НЛМК».

2. Математическая модель образования клиновидности профиля поперечного сечения полос, прокатываемых в черновой группе НШСГП, отличающаяся учетом влияния неравномерности температурных и механических свойств по ширине подката.

3. Математическая модель образования серповидности полос, прокатываемых в черновой группе НШСГП, отличающаяся учетом поперечных перемещений металла в очаге пластической деформации.

## 1. Литературный обзор и постановка задач исследования

### 1.1. Геометрические параметры профиля поперечного сечения горячекатаных полос

В процессе тонколистовой горячей прокатки необходимо соблюдение точности геометрических параметров профиля поперечного сечения и формы как готовых полос и листов, так и подката для станков холодной прокатки.

Основными геометрическими параметрами, определяющими точность геометрических размеров и формы полос и листов, являются выпуклость и клиновидность профиля поперечного сечения, а также серповидность готовых полос. При выходе из черновой группы клетей полоса может иметь существенную клиновидность, например, толщина полосы со стороны привода больше, чем со стороны обслуживания. На рис. 1.1 представлен пример измерения профиля поперечного сечения горячекатаной полосы.

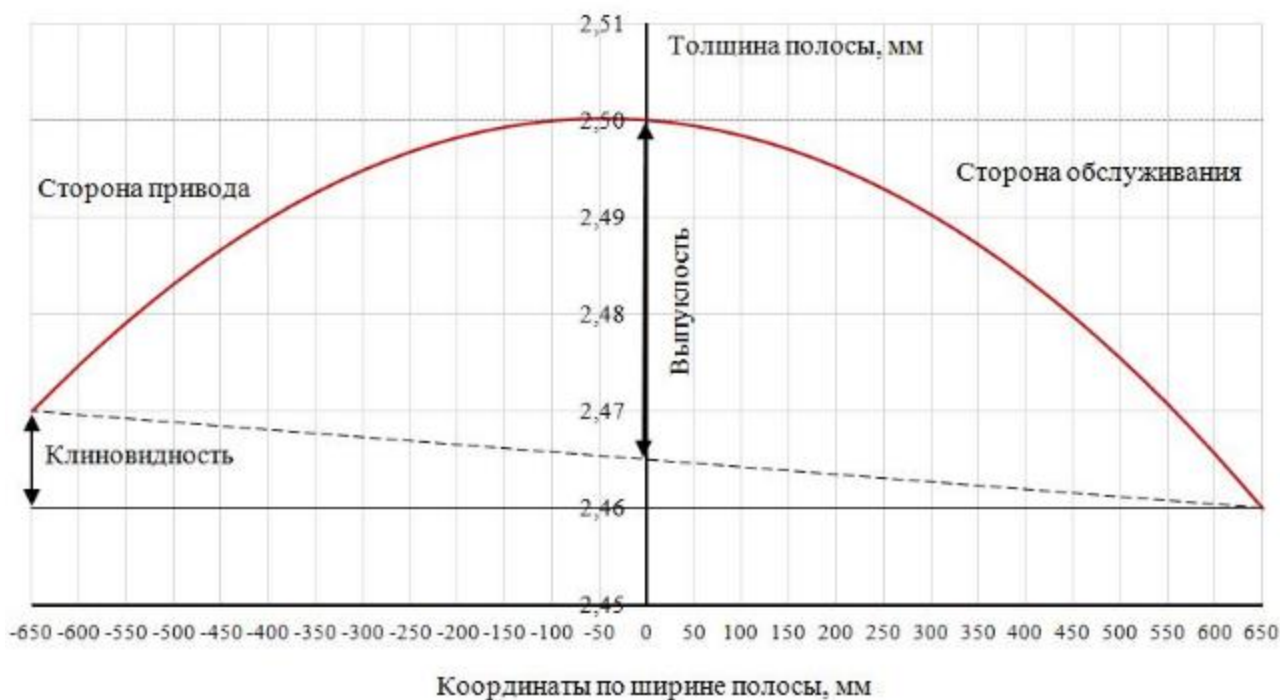


Рис. 1.1. Параметры профиля поперечного сечения горячекатаной полосы



На непрерывном широкополосном стане горячей прокатки (НШСГП) 2000 Цеха горячего проката (ЦГП) ПАО «НЛМК» с целью своевременного контроля геометрических параметров профиль поперечного сечения и толщина прокатываемых полос измеряется после прокатки в черновой группе клетей и далее за последней чистовой клетью №12 с помощью многофункциональных приборов RM-316 и RM-312 соответственно (рис.1.2).

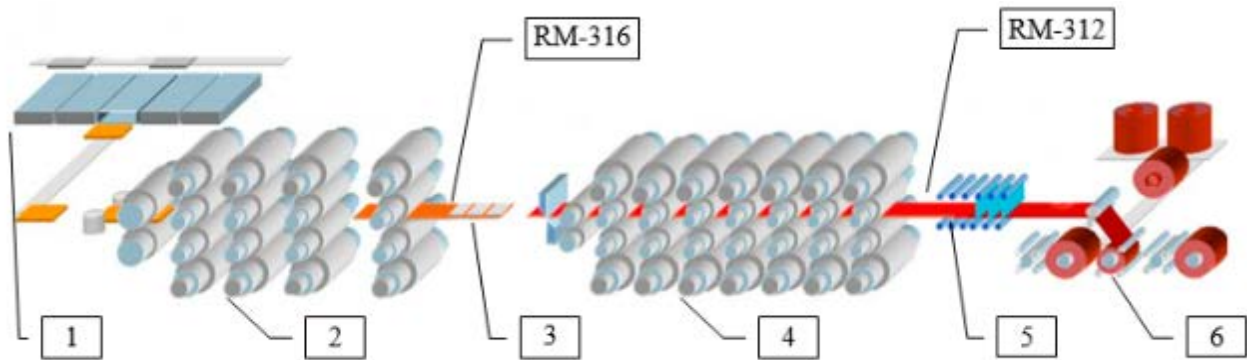


Рис. 1.2. Непрерывный широкополосный стан горячей прокатки 2000 цеха горячей прокатки ПАО «НЛМК»: 1- участок нагревательных печей; 2 – черновая группа клетей; 3 – теплосохраняющая установка (экраны); 4 – чистовая группа клетей; 5 – установка ускоренного охлаждения; 6 – моталки; RM-316, RM-312 – места установки многофункциональных приборов

За клетью №5, последней клетью черновой группы клетей в конце 2014 года была установлена трехточечная система измерения профиля и толщины горячекатаного раската RM-316 с детекторами положения кромок (рис. 1.3).

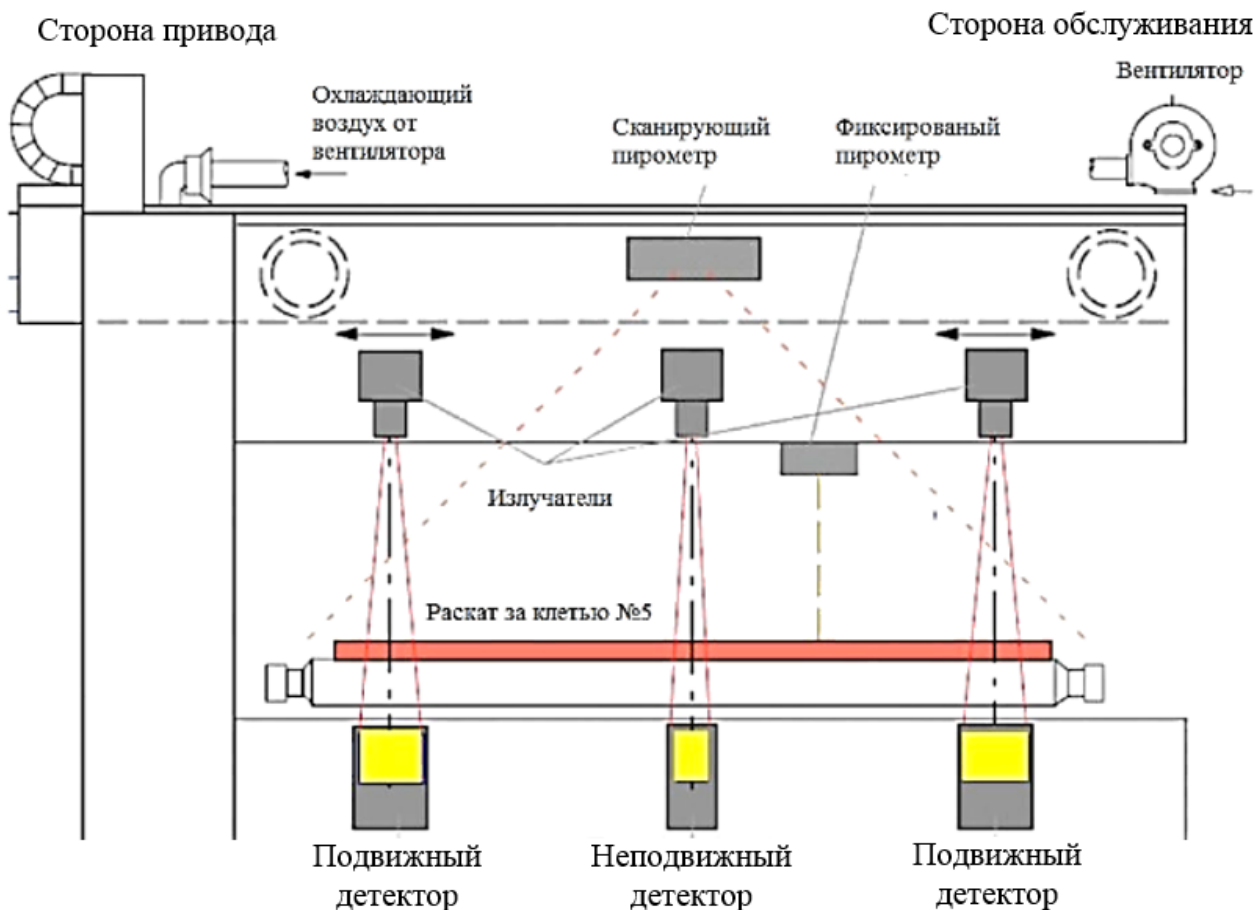


Рис. 1.3. Схема и принцип действия RM-316

Данная система измерения имеет в своем составе три рентгеновских сенсора, от которых одновременно получает данные о толщине, выпуклости и клиновидности раската. Получая данные со сканирующего пирометра, система отслеживает положения кромок раската с точностью до 10 мм и перемещает боковые сенсоры так, чтобы они находились на заданном расстоянии от них. Каждый из трех измерительных каналов включает в себя одну ионизационную камеру-детектор. RM-316 использует три источника рентгеновского излучения (по одному для каждого из трех измерительных каналов), позволяющих получать данные о толщине раската на кромках и в середине в диапазоне от 20 до 60 мм.

За последней чистовой клетью №12 профиль поперечного сечения и толщина полосы измеряется многофункциональным прибором RM-312.

Конструкция измерительной матрицы прибора RM-312 и принцип сканирования при измерении профиля поперечного сечения прокатываемых полос обеспечивает измерение толщины полосы в направлении ширины с дискретностью 5 мм и погрешностью 0,13% (рис. 1.4).

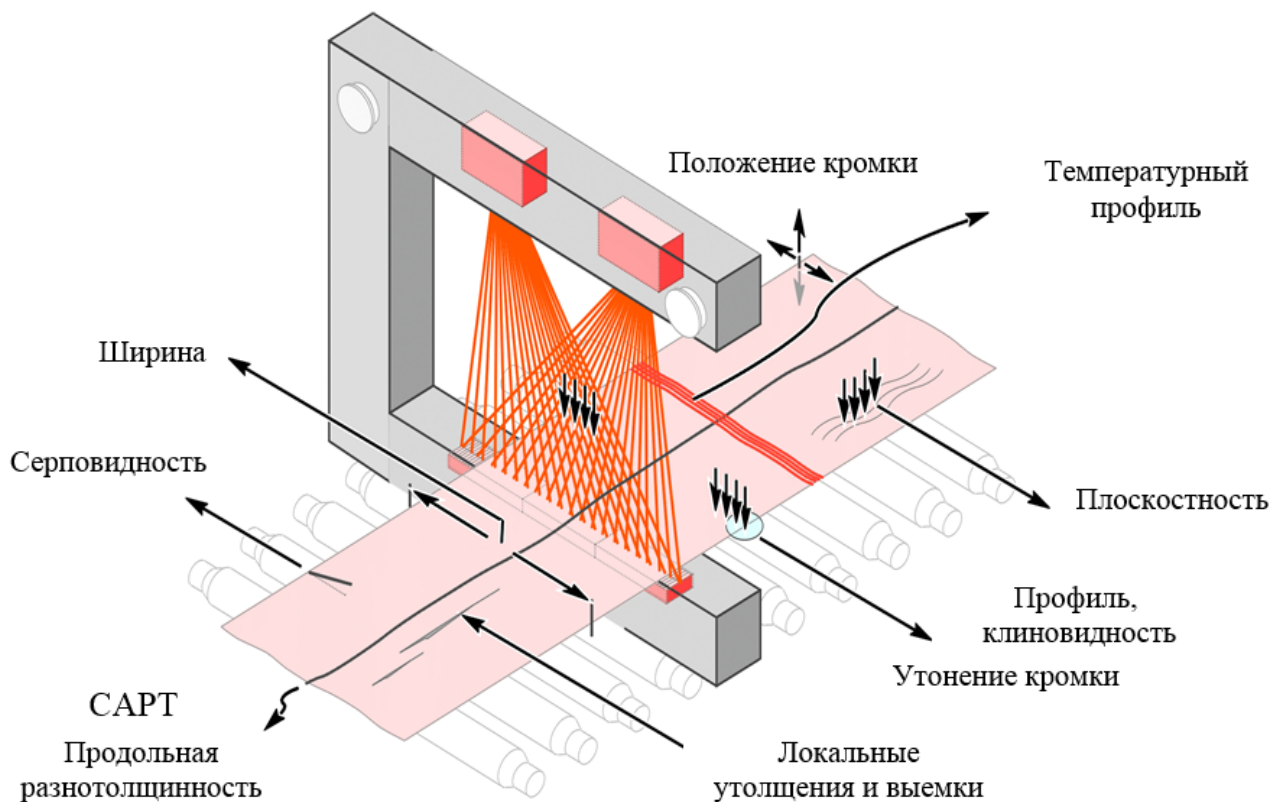


Рис. 1.4. Принцип измерения геометрических параметров полосы многофункциональным прибором RM-312

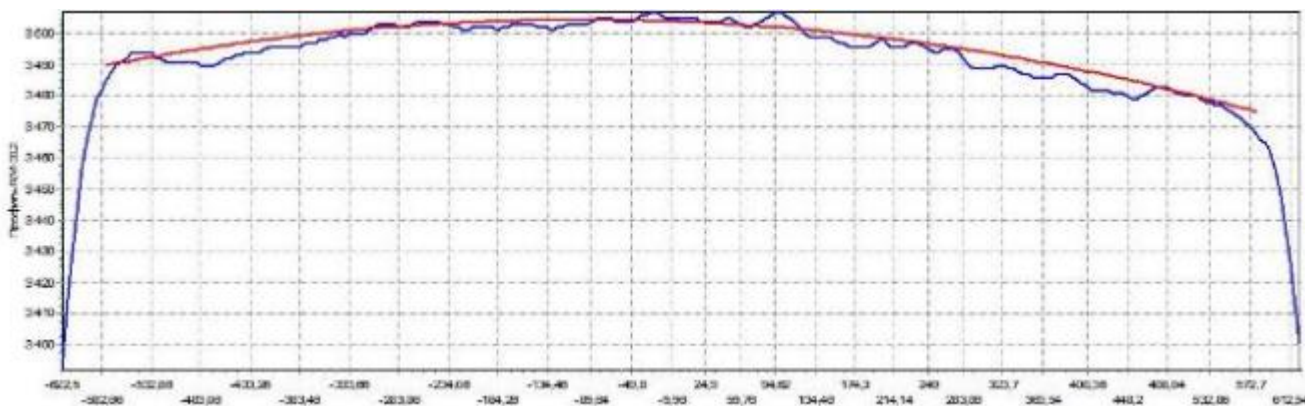


Рис. 1.5. Реальный профиль поперечного сечения полосы, измеренный прибором RM-312

В ГОСТах и технических условиях указываются размеры прокатываемых листов и полос и возможные отклонения от номинальных значений (допуски) [1-6]. В качестве примера в Таблице 1.1 приведены допуски на толщину горячекатаных стальных листов и полос согласно ГОСТ 19903-2015 (до толщины 7,5 – 10 мм) [2]. Для стальных листов предусмотрены две категории точности прокатки: повышенная и нормальная. С увеличением ширины листов допуск также увеличивается. Для тонких листов ( $\leq 3,9$  мм) допускаемые отклонения в плюс и минус симметричны относительно номинальной толщины, а для толстых листов ( $> 3,9$  мм) минусовый допуск значительно больше плюсового.

Таблица 1.1

ГОСТ 19903-2015 «Прокат листовой горячекатаный. Сортамент»

Толщина проката	Предельное отклонение по толщине проката при ширине											
	от 500 до 750		св. 750 до 1000		св. 1000 до 1500		св. 1500 до 2000		св. 2000 до 2300		св. 2300 до 2700	
	ПТ	НТ	ПТ	НТ	ПТ	НТ	ПТ	НТ	ПТ	НТ	ПТ	НТ
От 0,40 до 0,50	+0,05	±0,07	-	-	-	-	-	-	-	-	-	...
Св. 0,50 до 0,60	±0,06	+0,08	-	-	-	-	-	-	-	-	-	...
0,60 - 0,75	+0,07	±0,09	±0,07	±0,09	-	-	-	-	-	-	-	...
0,75 - 0,90	±0,08	±0,10	±0,08	+0,10	-	-	-	-	-	-	-	...
0,90 - 1,10	±0,09	±0,11	±0,09	±0,12	-	-	-	-	-	-	-	...
1,10 - 1,20	±0,10	±0,12	±0,11	±0,13	±0,12	±0,15	-	-	-	-	-	...
1,20 - 1,30	+0,11	±0,13	±0,12	±0,14	±0,12	±0,15	-	-	-	-	-	...
1,30 - 1,40	±0,11	±0,14	±0,12	±0,15	±0,12	±0,18	-	-	-	-	-	...
1,40 - 1,60	±0,12	±0,15	±0,13	±0,15	±0,13	+0,18	-	-	-	-	-	...
1,60 - 1,80	±0,13	±0,15	±0,14	±0,17	±0,14	±0,18	-	-	-	-	-	...
1,80 - 2,00	±0,14	±0,16	+0,15	±0,17	+0,16	±0,18	±0,17	+0,20	-	-	-	...
2,00 - 2,20	±0,15	±0,17	+0,16	±0,18	±0,17	±0,19	±0,18	±0,20	-	-	-	...
2,20 - 2,50	±0,16	±0,18	±0,17	±0,19	±0,18	±0,20	±0,19	±0,21	-	-	-	...
2,50 - 3,00	±0,17	±0,19	±0,18	±0,20	±0,19	±0,21	±0,20	±0,22	±0,23	±0,25	-	...
3,00 - 3,50	±0,18	±0,20	±0,19	±0,21	±0,20	±0,22	±0,22	±0,24	±0,26	±0,29	-	...

Толщина проката	Предельное отклонение по толщине проката при ширине											
	от 500 до 750		св. 750 до 1000		св. 1000 до 1500		св. 1500 до 2000		св. 2000 до 2300		св. 2300 до 2700	
	ПТ	НТ	ПТ	НТ	ПТ	НТ	ПТ	НТ	ПТ	НТ	ПТ	НТ
3,50 - 3,90	±0,20	±0,22	±0,21	+0,23	±0,22	+0,24	+0,24	+0,26	±0,28	±0,31	-	...
3,90 - 5,5	+0,10	+0,20	+0,15	+0,30	+0,10	+0,30	+0,20	+0,40	+0,25	+0,45	-	...
	-0,40	-0,40	-0,40	-0,40	-0,50	-0,50	-0,50	-0,50	-0,50	-0,50		
5,5 - 7,5	-0,50	+0,10	+0,10	+0,20	+0,10	+0,25	+0,20	+0,40	+0,25	+0,45	-	...
		-0,50	-0,60	-0,60	-0,60	-0,60	-0,60	-0,60	-0,60	-0,60		
7,5 - 10,0	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...

ПТ - повышенная точность прокатки, НТ - нормальная точность прокатки

Клиновидность – это дефект профиля поперечного сечения горячекатаной полосы, при котором наблюдается значительная разность толщины противоположных боковых кромок полосы.

Для профиля поперечного сечения горячекатаных полос, прокатанных на НШСГП 2000 Цеха горячего проката ПАО «НЛМК» и предназначенных для производства холоднокатаного проката, в нормативных документах определены допустимые величины клиновидности (Таблица 1.2).

Таблица 1.2

Допустимая клиновидность профиля поперечного сечения горячекатаного подката

Номинальная ширина горячекатаных полос, мм	Клиновидность профиля поперечного сечения для полос номинальной толщины, мм	
	1,80 ÷ 2,30	2,31 ÷ 4,50
900 ÷ 1250	≤ 0,015	≤ 0,020
1251 ÷ 1500	≤ 0,020	≤ 0,025
1501 ÷ 1850	≤ 0,025	≤ 0,035

Отклонение формы, при котором кромки полосы в горизонтальной плоскости имеют форму дуги, называют серповидностью (рис. 1.6).

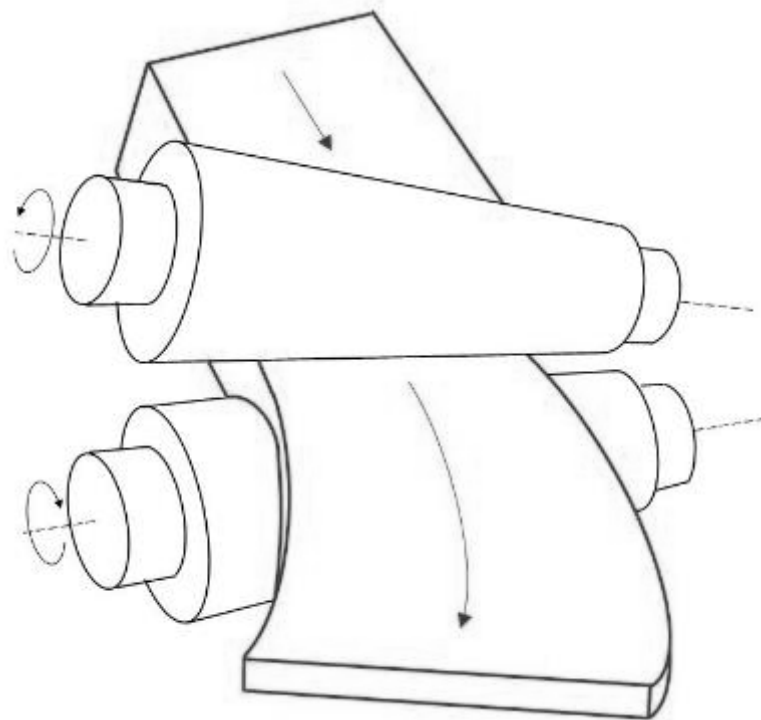


Рис. 1.6. Серповидность горячекатаной полосы

Измерение величины серповидности полос осуществляется следующим образом: к кромке полосы на базовой длине  $L$  прикладывают линейку или натянутую ровную стальную струну без скруток и перегибов (рис.1.7), максимальное значение отклонения ( $\Delta$ ) между кромкой полосы и струной называют величиной серповидности или кривизны в продольном направлении.

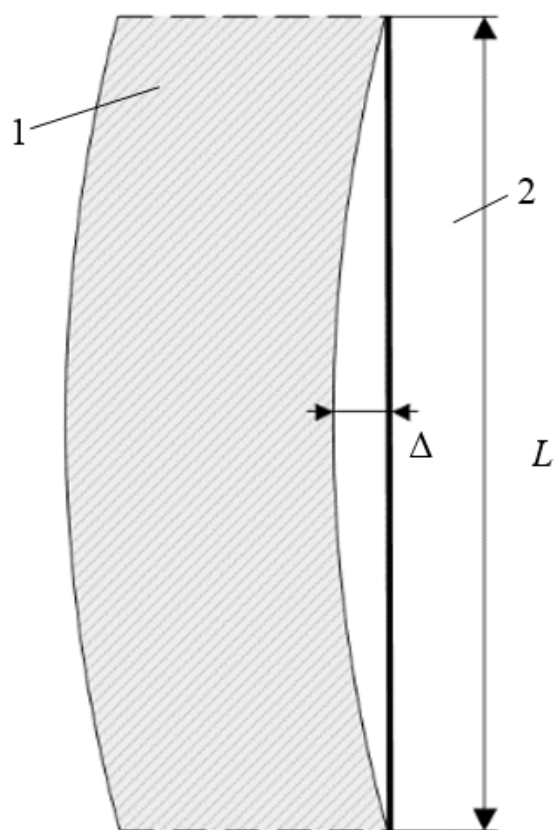


Рис. 1.7. Измерение серповидности: 1 – измеряемый лист; 2 – поверочная струна или линейка

Серповидность измеряют измерительной линейкой или щупом и выражают в миллиметрах на базовой длине. Для металлопроката, изготовляемого в рулонах и листах, предельная величина серповидности не должна превышать 10 мм на длине 3 м, но по согласованию изготовителя с потребителем на серповидность проката, изготовляемого в листах, может устанавливаться более жёсткие требования, например, ее значения не должны превышать 2 мм на 1 м длины [2,3].

В соответствии с требованиями внутренней нормативной документации металлургических заводов величины серповидности проката могут быть иными. Например, в ПАО «НЛМК», в соответствии технологической инструкцией ТИ 05757665-ЦГП-01-2016, серповидность горячекатаных полос не должна превышать 3 мм на длине 1 метр или соответствовать требованиям заказа [4].

## 1.2. Дефекты и недостатки, возникающие при горячей прокатке по причине клиновидности и серповидности прокатываемых полос

При горячей прокатке слябов с таким дефектами профиля поперечного сечения, как клиновидность и серповидность, с высокой долей вероятности возникают ситуации, когда раскат начинает отклоняться от оси прокатки, то есть при попадании сляба, имеющего серповидную форму в клеть, середина валков не совпадает с центром сляба. Таким образом раскат, выходящий из клетки, начинает смещаться с центра рольганга, ударяясь о направляющие линейки, а при достижении критического значения серповидности возникают аварийные ситуации, связанные с выбросом раската. Такого рода аварийные ситуации нежелательны не только с точки зрения вынужденной остановки стана и потери производства, но и из-за возможности травмирования дорогостоящего оборудования и даже опасности для работающего персонала.

На участке черновой группы клетей НШСГП ЦГП ПАО «НЛМК» нередки случаи образования выпучивания раската на хвостовом участке раската между вертикальными и горизонтальными валками черновой клетки №1 со стороны привода.

Как показало исследование, о котором более подробно будет рассказано в главе 2, сторона сляба, находящаяся со стороны привода, как правило, более горячая - соответственно предел текучести металла со стороны привода меньше, чем предел текучести металла со стороны обслуживания, по этой причине происходит неравномерное образование наплыва (рис. 1.8).



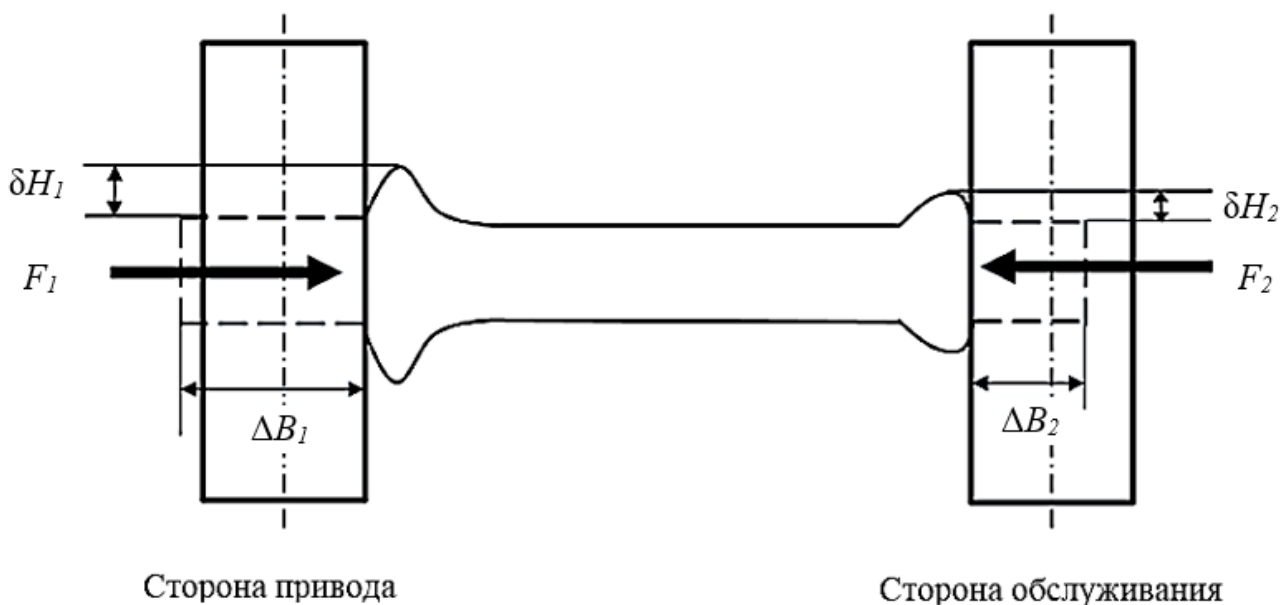


Рис. 1.8. Образование наплывов в вертикальной клетке

В клетке №1 из-за разницы толщины наплывов скорость входа металла в горизонтальные валки слева больше скорости входа металла справа – металл слева накапливается в промежутке между вертикальными и горизонтальными валками. Наступает момент, когда раскат с левой стороны начинает выпучиваться и напоздать на левый вертикальный валок, что впоследствии приводит к увеличению ширины хвостового участка. Этим объясняется, почему напоздание происходит ближе к хвосту раската. Необходимо отметить то, что факт образования наплывов рассматривалось В.М. Салгаником и А.М. Песиним в работах [7,8] в плане влияния наплывов на образование поверхностных дефектов (трещин), для борьбы с которыми по результатам математического моделирования в программном продукте DEFORM 3D предлагалось применять валки черного вертикального окалиноломателя в форме ящичного калибра с выпуклым дном. Экспериментальное моделирование в лабораторных условиях данного процесса представлено в работе [9]; использование предложенной нестандартной формой калибра позволяет значительно уменьшить дополнительное уширение и удерживать поверхностные дефекты на боковых гранях.

Процесс течения металла на свободных гранях толстых полос и плит также рассматривался в работе [10]. В работе описан процесс формирования таких внутренних дефектов, как расслоение, складки и пористость полос с помощью экспериментально-теоретического метода муара, позволившего получить информацию по всей исследуемой плоскости о перемещении металла в очаге деформации. Даны рекомендации по обжатию концевых участков полосы на величину, сопоставимую с углом захвата, что способствует предотвращению повышенной вытяжки в середине полосы.

В условиях действующего производства, например, на реверсивном толстолистовом стане 2800 ОАО «Уралсталь», процесс формоизменения в вертикальных и горизонтальных валках был рассмотрен в работах [11-12], где было проведено натурное исследование и реализован многофакторный статистический (корреляционно-регрессионный) анализ. В данных работах представлены результаты большого количества экспериментов, позволивших исследовать распределение продольной деформации, обусловленное обжатием слябов в вертикальных валках и последующим обжатием утолщенных кромок полосы при прокатке в горизонтальных валках. Представлены зависимости, справедливые для стана 2800 ОАО «Уралсталь», по которым возможно определить форму готового толстолистового проката с учетом утолщенных кромок раската.

При исследовании процесса холодной прокатки ленты из подката клиновидного поперечного сечения и Г.А. Куницыным [13] был исследован процесс объемного течения металла при холодной прокатке. Традиционно при холодной прокатке широких полос поперечной деформацией металла пренебрегают, но при прокатке узких полос данный фактор необходимо учитывать. В результате исследования было получено, что при прокатке полос из подката клиновидной формы поперечное течение металла со стороны более толстой кромки увеличивается, а со стороны более тонкой – уменьшается. Работа проводилась с применением пакета DEFORM 3D (рис. 1.9), также были

проведены экспериментальные исследования на станах холодной прокатки ПАО «ММК».

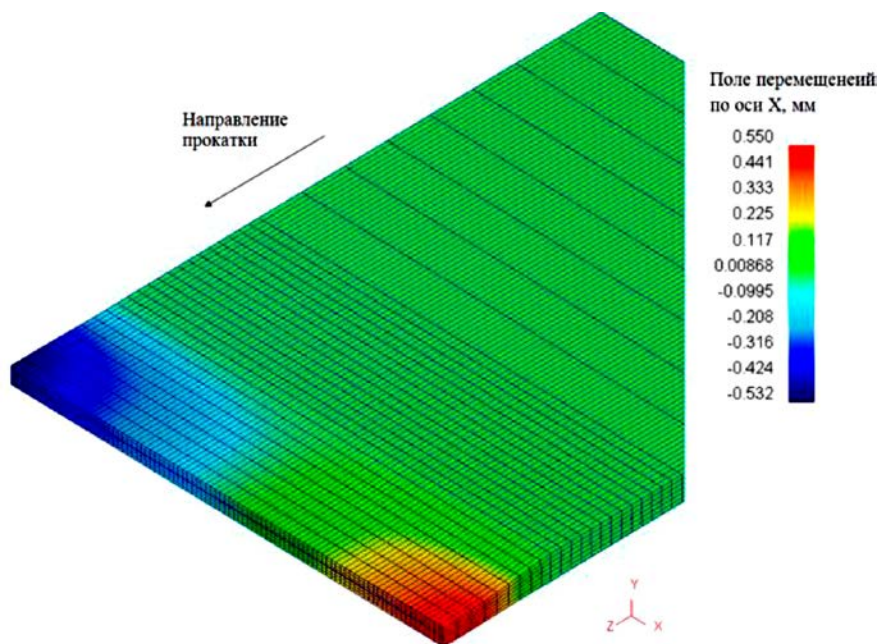


Рис. 1.9. Поле перемещений в очаге деформации при прокатке ленты с клиновидным поперечным сечением

Отмечено, что клиновидность подката из горячекатаных рулонов после прокатки узкой ленты полностью переходит на готовую продукцию, что выражается в разнице в цене между лентой повышенной и высокой точности по толщине. Таким образом, цех холодной прокатки ПАО «ММК» ежегодно терял около 1 млн. рублей, в том числе и из-за необходимой в данном случае обрезки кромки ленты.

В процессе исследований, представленных в статьях [14,15] экспериментально установлено значительное влияние клиновидности поперечного профиля на уширение на узкой ленте. Наличие уширения положительно влияет на точность прокатки - способствует уменьшению клиновидности по сравнению с плоской деформацией.

В работе [16] описывается характер деформации при холодной прокатке ленты как с учетом поперечного течения металла, так и продольного, т.е. рассматривается объемное напряженно-деформированное состояние, что в свою

очередь на практике позволяет учесть такой дефект горячекатаного подката, как клиновидность.

Как известно, при производстве анизотропной электротехнической стали (АЭС) предъявляются повышенные требования к геометрическим характеристикам горячекатаного подката. Известен способ [17] изготовления подката для производства холоднокатаных полос АЭС, заключающийся в использовании при горячей прокатке в чистовых клетях рабочих валков, края которых имеют скосы (рис. 1.10). Таким образом, при прокатке подката в чистовой клети кварто, упругая деформация рабочих валков приводит к тому, что прикромочная зона не подвергается избыточной деформации и износ валков в этой зоне снижается, и становится равномерным по всей длине бочки валка. По утверждению авторов, при такой прокатке величина клиновидности кромок будет находиться в допустимых пределах и необходимость в обрезке кромок отпадает.

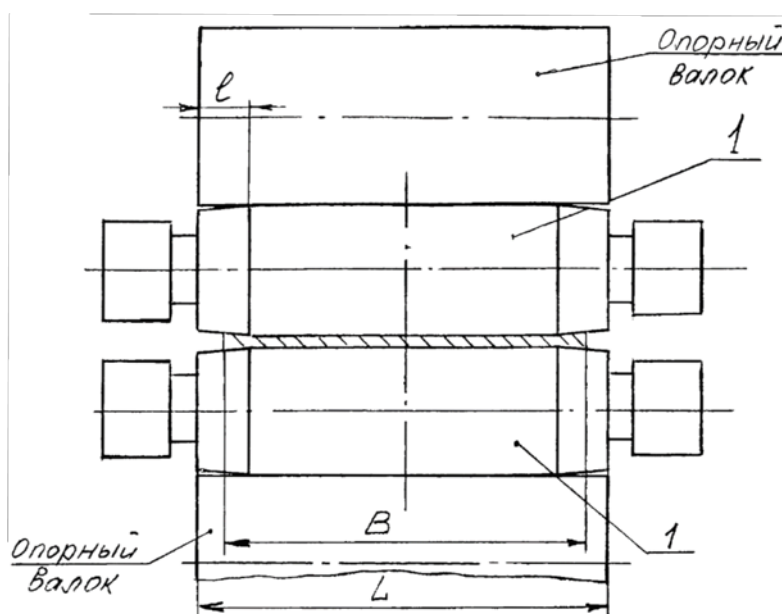


Рис. 1.10. Прокатка АЭС в клети кварто на рабочих валках со скосами

О.В. Синицкий и П.П. Полецков в работе [18] рассмотрели основные современные технологические системы для обеспечения геометрии и формы листового проката. На производстве специалисты часто имеют дело с

отклонением от плоскостности и с дефектами геометрии проката. При этом нарушения могут проявляться по-разному, например, в виде одновременного искажения профиля в продольном и поперечном направлениях. Соответственно, при дальнейшей прокатке завышенные значения вытяжки по одной из сторон также могут привести к формированию серповидности проката. Отмечается, что при тонколистовой прокатке в случае равномерного обжатия полосы по ширине происходит равномерное удлинение с наследованием формы подката. Если на подкате имелись какие-либо дефекты формы, то они будут унаследованы готовым прокатом.

Так, в условиях производства горячего проката на широкополосных станах при прокатке полосы клиновидного профиля в черновой группе клетей в связи с неравномерностью вытяжек и возможностью образования серповидности полосы в последующих клетях, оператором или автоматизированной системой предпринимаются действия по удержанию полосы на линии стана. Закономерность образования на одной из сторон дефекта формы полосы – серповидность – подтверждается, например, в работе [19] для условий производства горячекатаных и холоднокатаных полос в ПАО «ММК».

При входе головного участка полосы в чистовую клеть в результате образовавшейся серповидности подката и несоответствия межвалкового зазора и профиля поперечного сечения полосы возникает опасность застревания прокатываемой полосы. При выходе хвостового участка из чистовой группы клетей в результате неравномерного распределения межклетевого натяжения по ширине полоса смещается в ту или иную сторону, что приводит к образованию складки и последующему ее отрыву. Оторванная часть полосы может травмировать валки, что в свою очередь ведет к получению несоответствующей продукции.

Необходимо отметить тот факт, что во всех вышерассмотренных исследованиях не учитываются неравномерные свойства по ширине раската. В.В. Мельцер и В.М. Салганик в своей работе [20] учли возможное наличие

неравномерного распределения температуры раската при исследовании формообразования полос на тонколистовых станах ПАО «ММК», благодаря чему им удалось предложить точный метод расчета возможности гидромеханического регулирования профиля полос без проведения предварительных экспериментов.

### 1.3. Образование клиновидности и серповидности горячекатаных полос

Серповидность горячекатаных полос связана с клиновидностью профиля их поперечного сечения. Предположим, что по разным причинам при прокатке в черновой группе клетей обжатие сляба по ширине неравномерно. Таким образом, из клетки №1 черновой группы выходит раскат с клиновидной формой поперечного сечения. Если такой раскат прокатывать с одинаковой по ширине толщиной в последующих клетях черновой и чистовой групп НШСГП, то на «толстой» кромке раската вытяжка металла будет больше, чем на «тонкой», следствием чего станет серповидность полосы (рис. 1.11 а, б).

Для сохранения прямолинейного движения раската с клиновидным профилем поперечного сечения при прокатке необходимо обеспечить равенство вытяжек прикромочных участков (рис. 1.11 б).

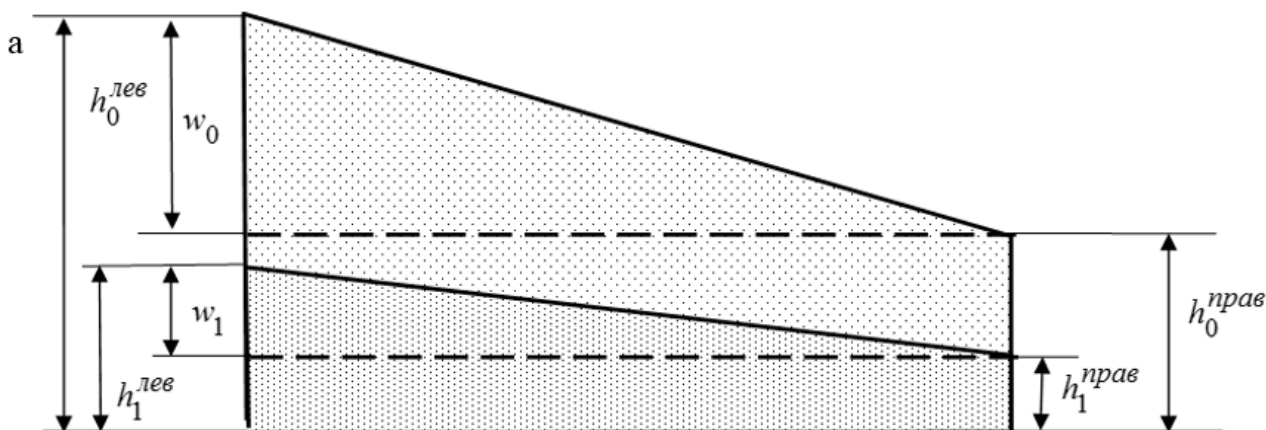


Рис. 1.11. Образование серповидности: а – различная толщина левой и правой сторон раската; б – серповидность

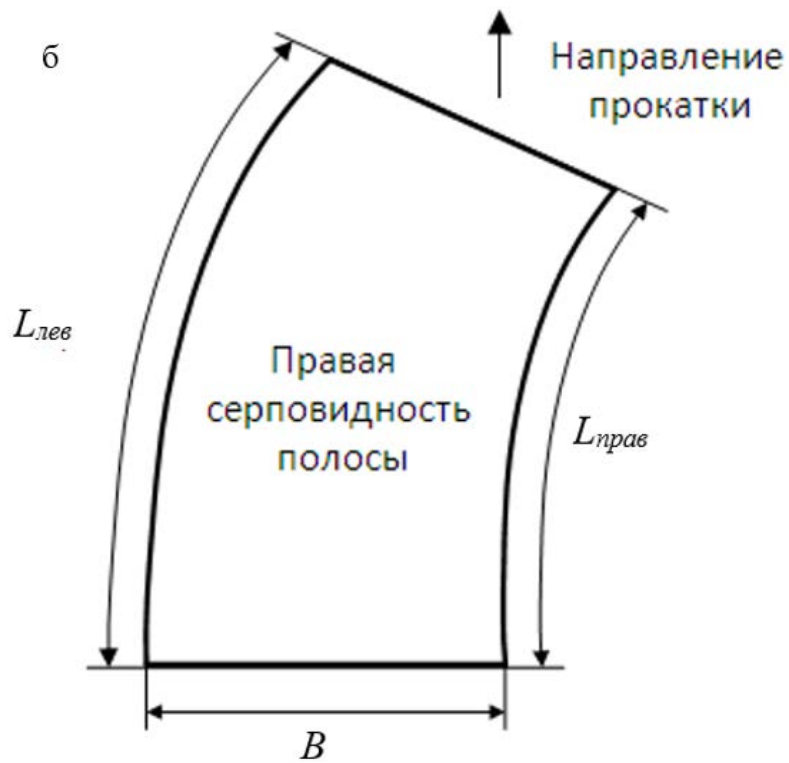


Рис. 1.11. (продолжение)

Оценим величину серповидности раската при прокатке без уширения, то есть в рамках теории плоского деформированного состояния.

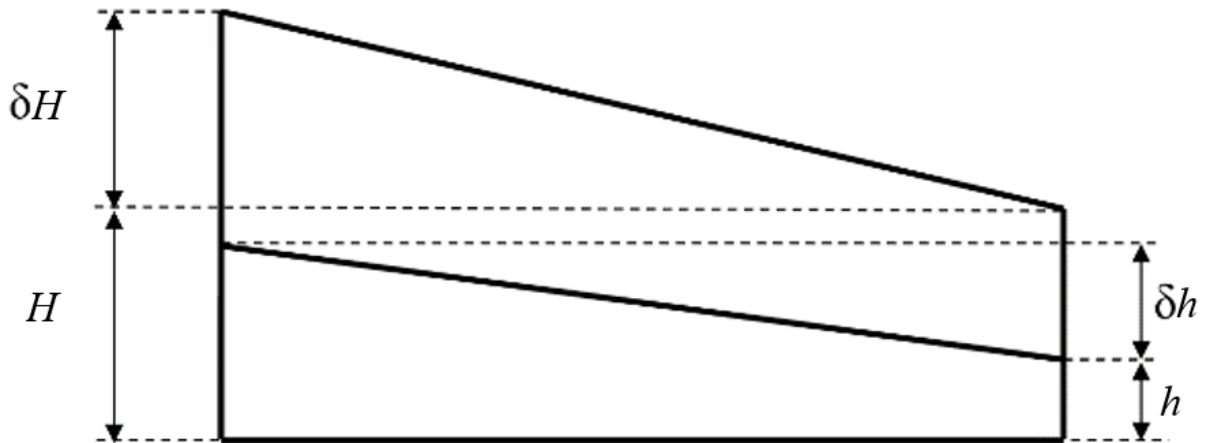


Рис. 1.12. Профили поперечного сечения сляба и раската клиновидной формы

Профили поперечного сечения сляба и раската схематично изображены на рис. 1.12 Сляб со стороны обслуживания имеет толщину  $H$ , а со стороны привода –  $(H + \delta H)$ , форма сляба в продольном сечении прямоугольная, длина сляба  $L$ .

После прокатки длина правой (сторона обслуживания) кромки готовой полосы будет равна  $L_0$ , длина левой (сторона привода) кромки готовой полосы соответственно -  $L_1$  (рис. 1.13).

Выведем условие, при котором  $L_0 = L_1$ . Коэффициент вытяжки справа представим как  $\mu_0 = \frac{H}{h}$ , а коэффициент вытяжки слева -  $\mu_1 = \frac{H+\delta H}{h+\delta h}$ . Тогда длина правой кромки полосы будет равна  $L_0 = \mu_0 L = L \frac{H}{h}$ , а левой  $L_1 = \mu_1 L = L \frac{H+\delta H}{h+\delta h}$ .

Выразим относительную разность между этими длинами [21]:

$$\frac{L_1 - L_0}{L_0} = \frac{L \frac{H+\delta H}{h+\delta h} - L \frac{H}{h}}{L_0} = \frac{1}{\mu} \left( \frac{H+\delta H}{h+\delta h} - \frac{H}{h} \right) = \frac{1}{\mu} \left[ \frac{Hh+h\delta H - Hh - H\delta h}{h(h+\delta h)} \right] = \frac{1}{\mu} \left( \frac{\delta H - \frac{H}{h}\delta h}{h+\delta h} \right) = \frac{\delta H}{H} - \frac{\delta h}{h}$$

Таким образом, для того, чтобы удлинение правой кромки было равно удлинению левой кромки, нужно, чтобы выполнялось следующее равенство:

$$\frac{\delta H}{H} = \frac{\delta h}{h},$$

Данное равенство справедливо как для отдельной клетки, так и для нескольких рядом стоящих клеток и для всего стана.

Рассмотрим следующий пример: сляб исходной толщины  $H = 240$  мм прокатывается на стане 2000 ПАО «НЛМК» до толщины  $h = 2$  мм. После прокатки в первой черновой клетки стана толщина раската составляет 190 мм. Допустим, что клиновидность готовой горячекатаной полосы при заданной конечной толщине равна максимально допустимой величине, которая в нашем случае составляет 35 мкм (0,035 мм). Тогда, считая, что уширения нет, и весь металл идет в удлинение, при выполнении равенства  $\frac{\delta H}{H} = \frac{\delta h}{h}$ , получим клиновидность раската за клетью №1:

$$\delta H = \frac{\delta h}{h} H = \frac{0,035}{2,0} 190 = 3,325 \text{ мм.}$$

При длине сляба 10 м, ширине 1500 мм и толщине 240 мм длина сторон раската за клетью №1 при такой клиновидности:

$$L_1 = \frac{240}{190} \times 10 = 12,63 \text{ м;}$$

$$L_0 = \frac{240}{193,325} \times 10 = 12,41 \text{ м.}$$



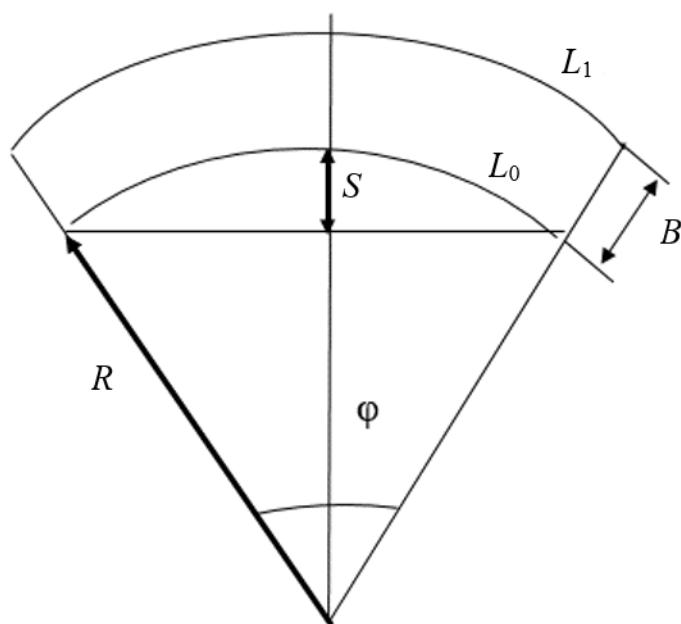


Рис. 1.13. Раскат серповидной формы

Угол и радиус кривизны раската за клетью №1:

$$\varphi = \frac{L_1}{R+B} = \frac{L_0}{R};$$

$$R = \frac{L_0}{L_1 - L_0} B = \frac{12,41}{12,63 - 12,41} 1,5 = 84,61 \text{ м.}$$

Угол  $\varphi$ :

$$\varphi = \frac{12,41}{84,61} = 0,147 \text{ рад}$$

Серповидность за клетью №1:

$$S = R - R \cos \frac{\varphi}{2} = 84,61 - 84,61 \times 0,9973 = 0,227 \text{ м.}$$

Предположим, что прикромочная часть полосы со стороны привода более тонкая, тогда ее уширение будет больше за счет большего обжатия по сравнению со стороной обслуживания. Это поперечное перемещение металла в очаге деформации является одним из факторов, приводящих к уменьшению серповидности раската за клетью №1. Наблюдения показывают, что реальная серповидность при такой клиновидности раската находится на уровне 5-10 см на длине раската, то есть в 2-5 раз меньше по сравнению с расчетом в предположении плоской схемы деформации.

Оператор поста управления черновой группы клетей исправляет серповидность раската перемещением правого нажимного винта – вверх при левом серпе, вниз – при правом.

Серповидность раската на выходе из клетки №1 величиной 5-10 см не видна с пульта управления черновой группой, поэтому воздействие на клиновидность готовой полосы осуществляется с достаточно большой задержкой по результату прокатки в чистовой группе клетей.

Теперь, по результату прокатки в последней черновой клетки НШСГП 2000, оценим при той же клиновидности готовой полосы клиновидность раската за клетью №5. Толщину полосы после прокатки в клетии №5 примем равной 34 мм, в таком случае при выполнении равенства  $\frac{\delta H}{H} = \frac{\delta h}{h}$ , получим:

$$\delta H = \frac{\delta h}{h} H = \frac{0,035}{2,0} 34 = 0,6 \text{ мм.}$$

Длина сторон раската за клетью №5 при такой клиновидности (при длине сляба 10 метров, ширине 1,5 метра и толщине 240 мм):

$$L_1 = \frac{240}{34} \times 10 = 70,6 \text{ м;}$$

$$L_0 = \frac{240}{34,6} \times 10 = 69,36 \text{ м.}$$

Отсюда радиус кривизны

$$R = \frac{L_0}{L_1 + L_0} B = \frac{69,36}{70,6 + 69,36} 1,5 = 83,9 \text{ м.}$$

Угол  $\varphi$ :

$$\varphi = \frac{69,36}{83,9} = 0,827 \text{ рад}$$

Серповидность за клетью №5:

$$S = R - R \cos \frac{\varphi}{2} = 83,9 - 89,91 \times 0,9157 = 7,07 \text{ м.}$$

При наблюдении за раскатом в линии НШСГП 2000 серповидность за клетью №5 такой величины не наблюдалась, поэтому делаем вывод о том, что на величину серповидности оказывает значительное влияние поперечное перемещение металла в очаге деформации, т.е. вычисления величины

серповидности раската в черновой группе (особенно в первых клетях), в рамках теории плоского деформированного состояния некорректны.

Вывод о том, в какой пропорции металл идет на уширение и удлинение на прикромочных участках, можно приближенно оценить по фактической ширине и форме переднего и заднего концов раската за клетями черновой группы (рис. 1.14 а, б)

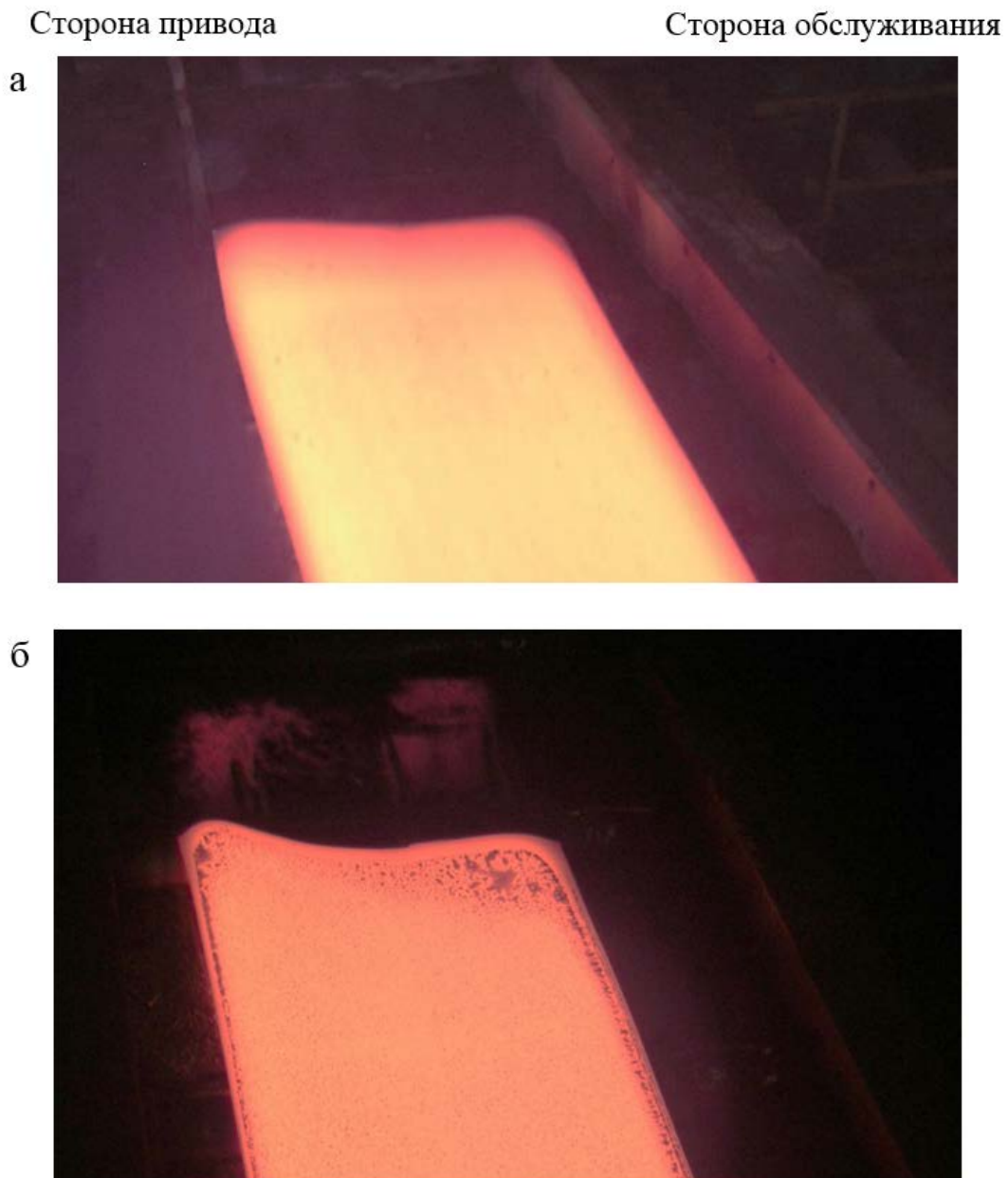


Рис. 1.14. Типичная форма головной и хвостовой частей полосы после прокатки в черновой группе клетей стана 2000 ПАО «НЛМК»:

а – голова полосы; б - хвост полосы

Анализ формы головных и хвостовых частей горячекатаных полос после прокатки в черновой группе говорит о том, что левая прикромочная часть полосы (со стороны привода) имеет большую длину, что говорит о ее большей вытяжке.

#### 1.4. Способы контроля и регулирования серповидности полос при горячей прокатке

Стабильность процесса прокатки, формы и профиля готовых полос зависят от оснащенности станов средствами контроля и регулирования, а также от диапазонов изменения регулирующих воздействий.

Определение уровня значимости каждого контролируемого параметра для конкретных условий является главным в выборе наиболее эффективного способа регулирования. Задача усложняется, когда имеется возможность использования нескольких способов регулирования. Такие случаи встречаются наиболее часто. При этом обычно стремятся комбинировать способы грубого регулирования в широком диапазоне со способами более тонкого регулирования в узком диапазоне. Грубой коррекцией производят настройку стана, а затем средствами тонкого воздействия выполняют оперативное регулирование [22].

Наиболее массово применяемым на текущий момент является способ, основанный на визуальном контроле геометрии готового проката с использованием различного рода цифровых телекамер. В отечественной промышленности, лидером предлагаемых решений в данной области является ООО «Компания «Люмента». Для обеспечения автоматизированного контроля качества выпускаемой продукции по ширине листа в 2003 году на стане 2800 ОАО «Северсталь» была внедрена система, основанная на бесконтактном оптоэлектронном методе измерения ширины и серповидности горячекатаной полосы (рис. 1.15).

Входными данными для системы является информация о положении кромок полосы, полученная от трех цифровых телекамер. Обзорная телекамера

используется для перемещения подвижной телекамеры с целью обеспечения попадания кромки полосы в поле зрения подвижной телекамеры. Вычислительный блок управляет системой позиционирования подвижной телекамеры. По мере прохождения полосы в зоне измерения информация о положении ее кромок накапливается вычислительным модулем наряду с информацией о длине полосы. После выхода полосы из зоны измерения вычислительный блок производит математическую обработку данных и выводит вычисленную серповидность и ширину в трёх сечениях (в начале, в центре и в конце полосы).

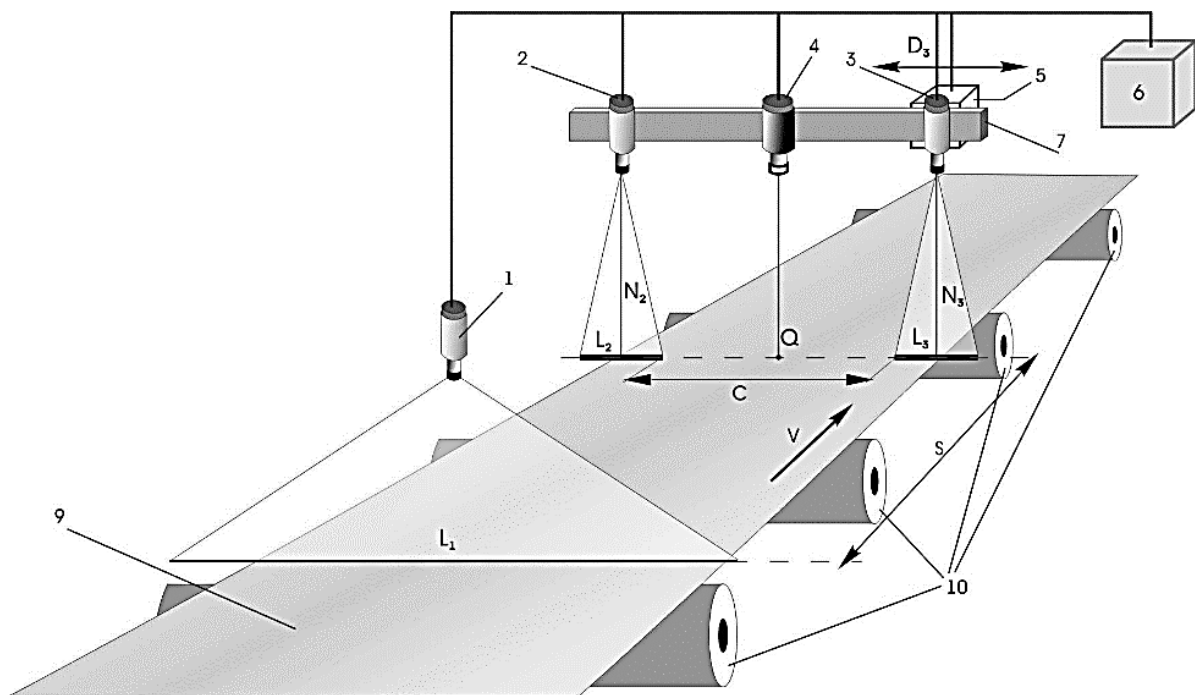


Рис. 1.15. Схема размещения оборудования: 1 – неподвижный фотоприемник (обзорная линейная камера); 2,3 – подвижные фотоприемники (измерительные линейные камеры); 4 – бесконтактный измеритель длины; 5,7 – устройство позиционирования подвижного фотоприемника; 6 – вычислительно-управляющий блок; 9 – прокатываемая полоса; 10 – транспортирующие ролики

Для измерения ширины и серповидности полосы в черновой и чистовой группах клетей стана 2000 ОАО «Северсталь» в 2008 была разработана новая система с возможностью определения наличия дефектов (рис.1.16). Данная система основана на использовании принципов стереометрии, применение которых позволяет производить измерения с необходимой точностью и

компенсировать вибрацию, смещение, искажение полосы в ходе технологического процесса (электронно-оптический метод контроля).

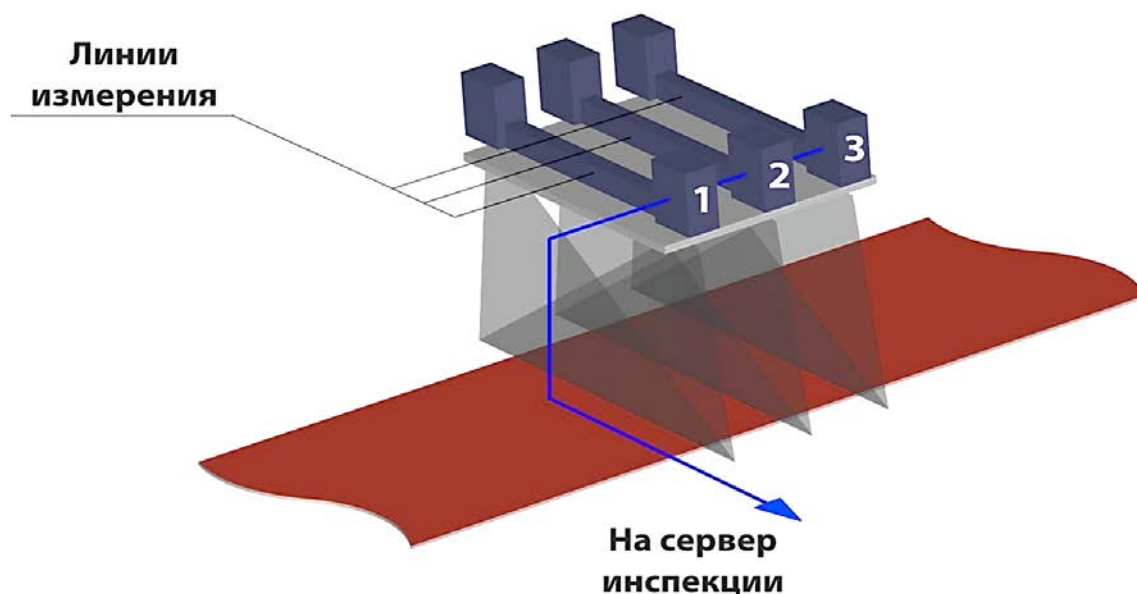


Рис. 1.16. Принцип размещения оборудования

Система состоит из трех стереомодулей, расположенных на выходе прокатной клетки. Работа стереомодулей синхронизирована, таким образом осуществляется «мгновенный снимок» полосы с трех линий измерения. Данные от стереомодулей поступают на сервер инспекции, где осуществляется их математическая обработка. Результатом обработки данных от стереомодулей является значение ширины и серповидности полосы в единицу времени в абсолютных величинах, также накопление «мгновенных снимков» в процессе измерения позволяет создать карту полосы.

Одной из заслуживающих внимания стала система для определения геометрических параметров подката «ShapeScanner 5000», установленная на участке подачи металла в клетку стана 5000 ОАО «Северсталь» в конце 2010 года [23]. Данная система скомбинировала в себе электронно-оптический метод контроля с использованием принципов стереометрии (рис.1.17). Ввиду установки системы в достаточно агрессивной среде, предусмотрено использование термокожухов для обеспечения бесперебойной работы

измерительной аппаратуры, причем для терморегуляции используется электрический способ охлаждения и нагрева, что позволяет обойтись без внешнего подвода воды или воздуха.

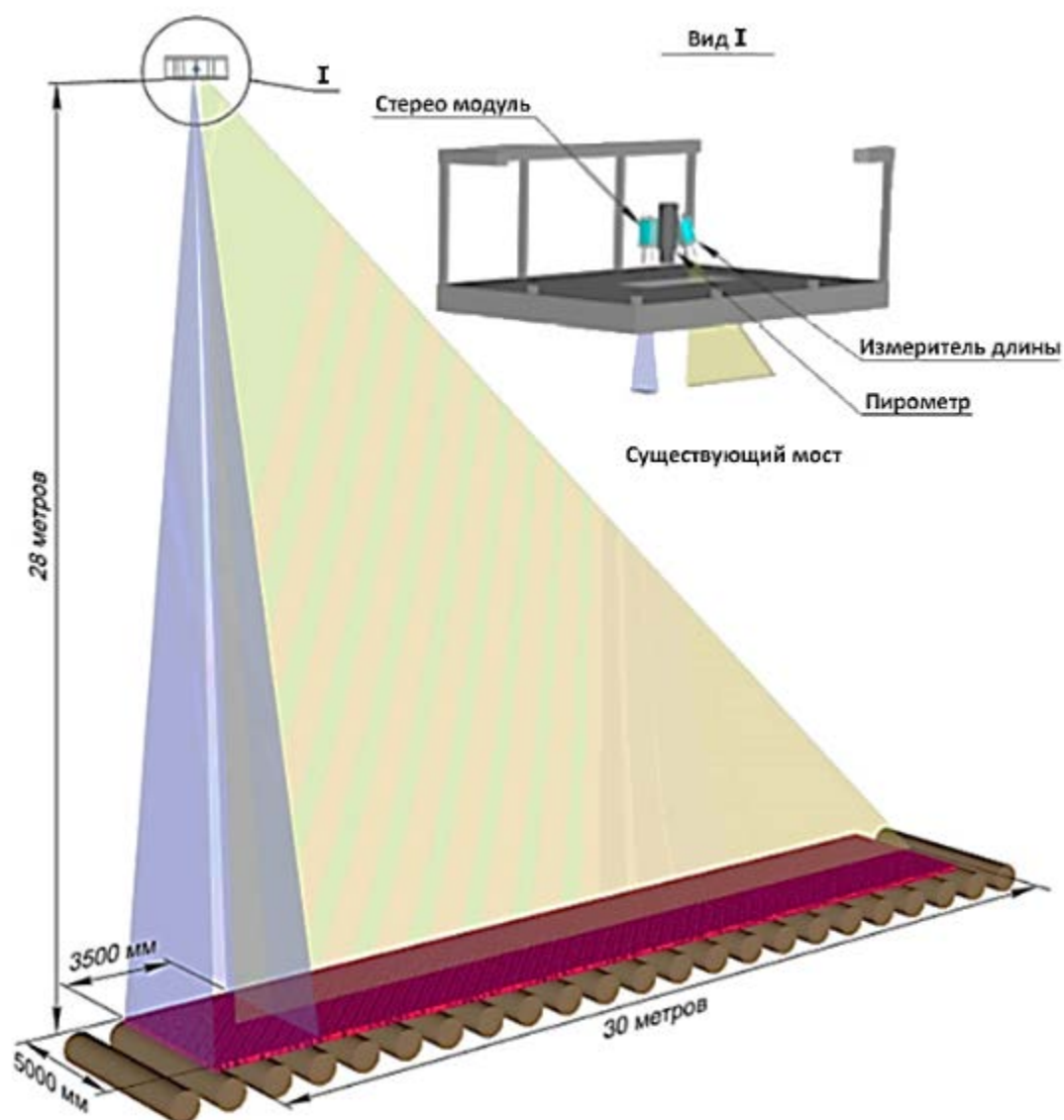


Рис. 1.17. Схема размещения оборудования на стане 5000 ОАО «Северсталь»

Измерительный стереомодуль построен на основе трех видеокамер и предназначен для получения двумерного изображения контуров объекта. Длина подката рассчитывается на основе данных линейной камеры высокого разрешения. Измеритель длины имеет поле зрения 30 м на рольганге, что позволяет получать данные о длине и положении переднего и заднего концов подката. Данные от измерителя передаются в вычислительный комплекс.

Пирометр, предусмотренный в системе, служит для определения текущей температуры объекта по методу спектрального отношения.

В основе измерения геометрических параметров лежит информация, полученная от измерительной аппаратуры, созданной на основе ПЗС-матрицы (приборы с зарядовой связью (ПЗС), служащие для преобразования оптического сигнала в электрический). ПЗС-матрицы используют собственное излучение нагретого металлического объекта измерений. Для обеспечения измерений используются два основных оптико-электронных модуля, это измерительный стереомодуль и измеритель длины. Для измерения длины раската используется модуль на основе линейной камеры. Для измерения ширины и получения формы головной и хвостовой части раската система использует измерительный стереомодуль, состоящий из двух линейных камер высокого разрешения, что позволяет обеспечивать высокоточное измерение ширины вне зависимости от текущей толщины раската. В состав измерительного стереомодуля также входит матричная камера, позволяющая получать изображения контура объекта, находящегося в рабочей зоне на рольганге. Изображения поступают в вычислительный комплекс, который на их основе производит расчет текущей ширины раската и определяет форму головной и хвостовой частей.

На основе информации о текущем положении объекта производится объединение изображений, получаемых от матричной камеры, и составляется полная карта геометрии раската. Пирометр отслеживает текущую температуру металла и учитывает ее при дальнейшем расчете длины, ширины и формы раската. Измерение геометрических размеров подката производится как при прямом движении прокатки, так и при обратном (реверсивном).

После того, как головная часть проката попадет в поле зрения матричной камеры, происходит захват первого изображения. Далее система непрерывно производит захват изображений частей проката, находящегося под измерительной камерой (рис. 1.18). Для компенсации толщины подката, его перемещений в вертикальной плоскости используется стереомодуль, который



непрерывно контролирует положение боковых кромок проката, одновременно с этим пирометр осуществляет контроль температуры проката для компенсации уровня светового излучения.

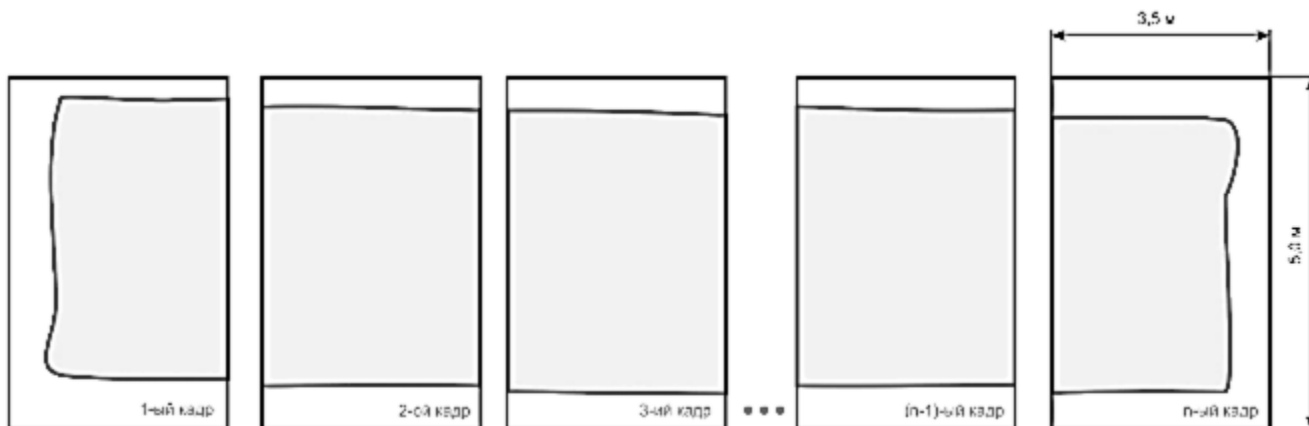


Рис. 1.18. Принцип объединения отдельных кадров

После полного прохождения проката в зоне измерительных камер, с помощью показаний измерителя длины отдельные фрагменты проката объединяются в единый кадр (рис. 1.19), и производится полный расчет формы проката.



Рис. 1.19. Кадры после объединения

Результаты измерений для каждой единицы продукции формируются в отдельный файл с возможностью просмотра как в виде таблиц, так и в виде графического изображения.

Как отечественные, так и иностранные фирмы разрабатывают решения по контролю и управлению формой и профилем проката; одной из таких фирм является «Нординкрафт Инжиниринг», которая предлагает измерительный

комплекс контроля плоскостности и серповидности листового проката «GEOMETRIX-PL» (рис.1.20). Комплекс представляет собой техническое устройство, в основе работы которого лежит принцип оптической триангуляции в качестве инструмента для осуществления измерений.

Триангуляционный метод основывается на свойстве лазерного луча распространяться на большие расстояния практически без рассеивания. Принцип работы такой измерительной системы заключается в том, что лазер подсвечивает точку, до которой будет измеряться расстояние. Другое детектирующее устройство, расположенное на некотором расстоянии от источника лазерного излучения, регистрирует отраженный от этой точки свет. Такая конструкция измерительной системы образует собой треугольник, ввиду чего метод и называется триангуляционный.

Детектор представляет собой цифровую видеокамеру, объектив которой фокусирует пришедший отраженный луч на ПЗС-матрице. Луч, попадая на светочувствительную поверхность сенсора, поглощается, образуя небольшое световое пятно. По расположению этого светового пятна можно измерить угол между отраженным лучом и линией сенсор-лазера. В итоге производится несложный расчёт, и получают искомые данные.

Таким образом автоматизированная система контроля формы полосы, состоящая из оптического модуля высокого разрешения (2D сканеры), подсистемы измерения ширины и длины раската и пирометра, осуществляет бесконтактный контроль формы и размеров полосы в процессе ее прокатки на стане. Дополнительно проводится измерение и обработка промежуточной и окончательной формы проката.

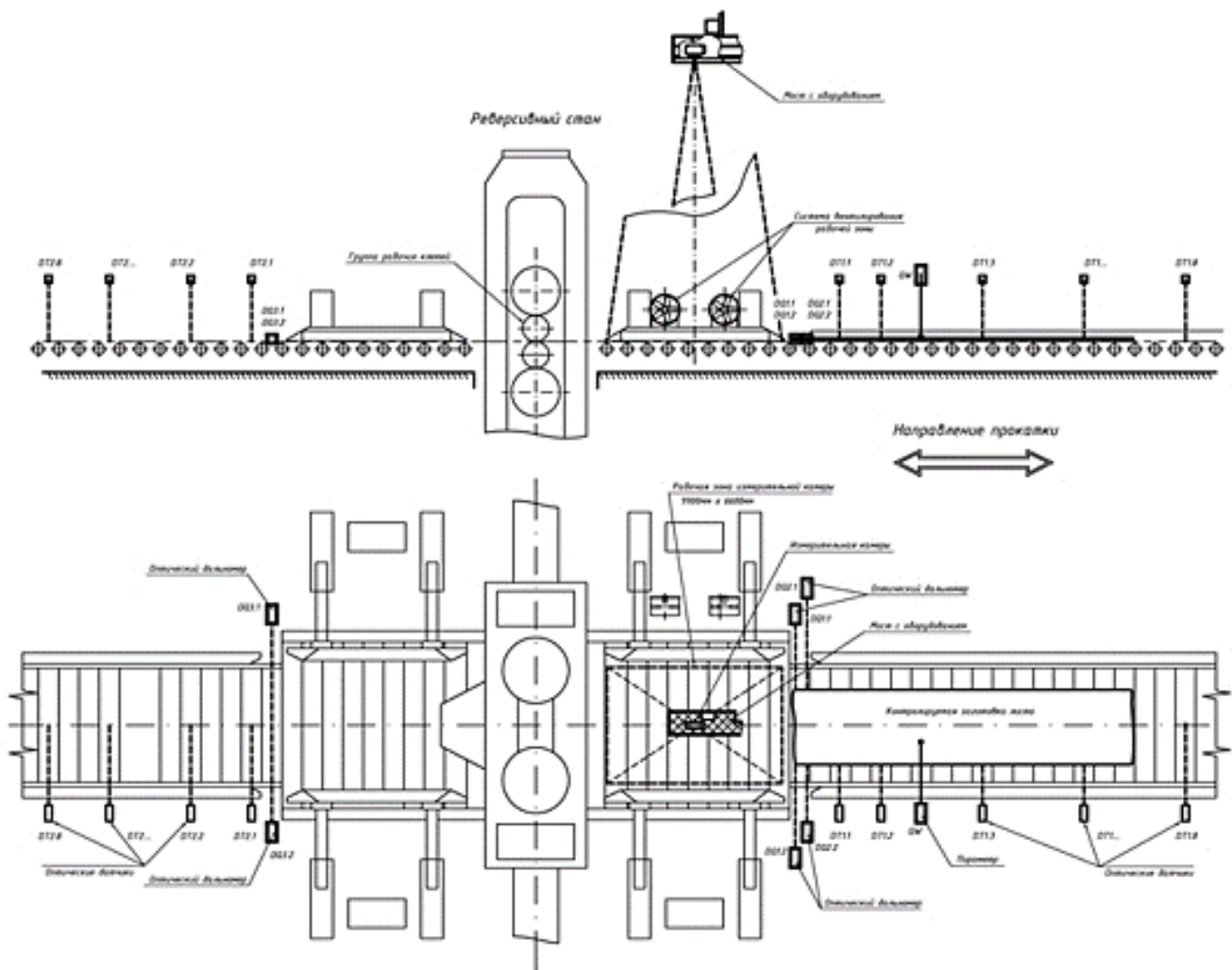


Рис. 1.20. Контроль геометрии листового проката в линии стана

Использование системы триангуляционных лазерных 2D сканеров позволяет получить комплексную оценку плоскостности полосы, а также измерить его ширину и серповидность.

Обзор существующих способов контроля геометрии, плоскостности и профиля полос на Европейских прокатных станах был сделан в статье Julio Molleda [24]. Как и предлагаемые выше принципы регулирования, большинство из перечисленных в работе решений представляют собой оптические устройства в различных вариациях.

В работах [25,26], рассмотрен вопрос о повышении качества изображений, наблюдаемых при производстве горячего проката на современных станах. Освещены проблемы светового контраста (спектральной мощности излучения

нагретого объекта), организация мониторинга перемещения проката и качество используемого оборудования. Предложено использовать телекамеры на двух матрицах ПЗС с организацией в ней автоматизированного экспонирования объекта контроля, физически для формирования мультиплексного видеосигнала используются шторы, работающие в определенном временном интервале [27]. В рассматриваемых работах подтверждаются трудности, существующие в настоящее время при использовании визуальных методов контроля геометрии, плоскостности и формы при производстве горячего проката.

После идентификации отклонений геометрии проката от нормированных значений используются различные способы коррекции геометрии полосы. Для систем тонкого регулирования геометрии горячекатаных полос авторами работы [28] был проведен анализ возможности управления клиновидностью и серповидностью проката за счет особенностей профилировок рабочих и опорных валков. Данный способ достаточно широко используется для регулирования плоскостности полос в чистовых клетях стана, но в черновой группе его использование на данный момент затруднено ввиду множества зависимых факторов и сложности настройки.

В работе [29] авторы во главе с В.М. Салгаником предложили совершенствовать черновые группы клетей станов 2000 и 2500 ММК за счет установки эджеров (вертикально расположенные рабочие валки, предназначенные для бокового обжатия прокатываемого металла) перед и после клетей №2 и №3, что позволило бы унифицировать режим боковых обжатий, а также осуществлять грубую регулировку геометрии полосы. Оснащение черновых клетей эджерами в дополнение с автоматизированной системой регулирования боковых гидравлических приводов достаточно успешно позволяют предотвращать смещение полосы относительно оси прокатки на современных станах [30].

В работе [30] был предложен инженерный метод расчета разнотолщинности по длине горячекатаных полос, в котором отметили

существенное влияние на геометрию полосы таких факторов, как наследственность разнотолщинности подката и неравномерность распределения температуры. Отмечена необходимость установки дополнительного оборудования перед чистовой группой клетей (калибровочная клеть) для обеспечения необходимой точности проката при неудовлетворительной обработке слябов в черновой группе клетей.

Подробно все основные принципы регулирования геометрии и плоскостности полос при производстве горячего проката рассмотрены в работе [32].

#### 1.5. Способы контроля и регулирования температуры горячекатаных полос в линии прокатного стана

Как известно, регулирование геометрии полосы зависит от исходных параметров и геометрии заготовки (сляба или раската), предшествующей обработки и механических свойств проката. Также не малую роль играет оборудование и место его расположения в линии стана. При горячей прокатке свои особенности вносит и распределение температуры. С целью обеспечения ее равномерного распределения и, соответственно, механических свойств полосы как по длине, так и по ширине разработано множество устройств.

В.В. Чащин в большинстве своих работ, например, [33,34], поднимает вопрос необходимости уменьшения тепловых потерь и регулирования охлаждения при производстве горячекатаных полос. Приводятся примеры технической и экономической целесообразности применения различных способов и устройств. Например, предлагается объединить всю производственную цепочку в единый непрерывный агрегат, но также рассматриваются и менее кардинальные мероприятия.

Одно из достаточно смелых решений по обеспечению сохранения температуры в линии стана горячей прокатки предложено в работе [35].

Защитное покрытие на основе огнеупорных материалов (шамот, корунд, магнезит и т.д.), которое наносится на поверхность сляба перед нагревательными печами, а также после последней клетки черновой группы прокатного стана, призвано способствовать сохранению температуры металла, нагреваемого в печах, при его выдаче и при перемещении по рольгангу. Данный способ сохранения температуры слябов прошел опытно-промышленные испытания на Кулебакском металлургическом заводе, но широкого применения не получил.

Вопрос обеспечения равномерных свойств по длине проката и различные способы их обеспечения подробно описаны в работе [36]. В работе Ю.А. Мухина [37] представлены результаты применения в ПАО «НЛМК» (стан 2000 цеха горячей и стан 2030 холодной прокатки) способа обратного температурного клина. Суть метода заключается в прокатке в чистовой группе клеток НШСГП с повышенным ускорением и использованием системы управляемого охлаждения (душирующей установкой). Таким образом, температура по длине полосы перед смоткой и механические свойства готового проката выравниваются.

Использование аналогичного способа регулирования температуры на стане 2000 ЧерМК в сравнении со станом 2000 НЛМК описывается в работе [38]. Необходимо отметить, что отклонение температуры при использовании повышенного ускорения и перераспределения обжаты в чистовой группе клеток в некоторых случаях достигает 70 °С, но выдержать необходимые уставки возможно только при использовании современных автоматизированных систем на базе ЭВМ.

При прокатке на НШСГП в условиях ограниченной длины промежуточного рольганга известен способ [39], включающий в себя прокатку заготовки в черновой группе клеток в раскат, промежуточную намотку раската с одновременным перемещением наматываемого рулона в направлении прокатки, обрезку переднего конца раската, размотку из рулона и прокатку в чистовой группе клеток в полосу. При технической возможности модернизации промежуточного рольганга давно известен способ [40], так называемый «coil

box». По сути, это моталка, обеспечивающая смотку подката после черновой группы клетей и последующую размотку раската для прокатки в чистой группе. Данный способ выравнивания температуры очень эффективен, но требует высокой технической культуры обслуживания оборудования и возможен не на всех видах продукции.

Наиболее распространённый и простой способ обеспечения равномерного распределения температуры в линии стана горячей прокатки на текущий момент является способ, основывающийся на установке теплосохраниющих экранов, например, [41]. Данное устройство позволяет даже переориентировать прокатный стан под выпуск продукции, на которую он изначально не был рассчитан, например, выпускать труднодеформируемые трубные марки сталей [42]. В разрезе использования данного оборудования В.Н. Хлопонин в статье [43] рассмотрел эффективность использования активных, пассивных и псевдоактивных ТСУ (теплосохраниющих установок). Если о пассивных и активных способах экранирования достаточно много написано в литературе [44-47], то из-за малой распространённости о псевдоактивных ТСУ мало информации. Основу всех этих способов составляет уменьшение теплообмена подката с окружающей средой за счет снижения приведённой степени черноты (все виды) или путем повышения температуры экранов (псевдоактивные) или же прямое воздействие теплового потока на поверхность проката, что является особенностью активных ТСУ или еще их называют туннельными печами. Помимо использования классических горелок и подогрева поверхности за счет сгорания топлива известен способ [48], в котором в качестве источника тепла для подогрева кромки раската используются щелевые индукторы. Безусловно эффективность данных методов подтверждена годами практического использования, но существуют участки линии НШСГП, на которых невозможно или небезопасно устанавливать ТСУ.

Помимо регулирования распределения температуры раската по длине и ширине в линии стана горячей прокатки, специалистам прокатных цехов

необходимы данные об истинной температуре проката в конкретных точках линии стана. Для прогнозирования температуры металла в линии используются множество математических моделей. Их обзор представлен в известном справочнике [49]. Конечно большинство используемых формул построено на теоретическом анализе, но также встречаются и статические зависимости. Даже на текущий момент вопрос точного прогнозирования температуры в линии стана не потерял свою актуальность. В работе [50] авторы провели анализ большинства известных моделей и на основе реальных данных, полученных на ШСГП 2000 ОАО «ММК», предложили консолидированную модель расчета, с помощью которой возможно получить данные о значениях температуры с точностью от 2,7% до 2,3% в зависимости от конкретных условий обработки.

Теоретические данные о температуре все же отличаются от реальных, поэтому в линии НШСГП устанавливаются пирометры, тепловизионные сканеры и камеры. Обзор способов измерения температуры в металлургических цехах с помощью данных устройств был сделан в работе [51]. В части прокатного производства предлагается оснастить станы горячей прокатки установками контроля температуры в 3–4 точках по ширине полосы либо установить тепловизионные сканеры, что позволит вести более точное управление процессом прокатки и охлаждения и обеспечит получение равномерной структуры и свойств по длине и ширине готового проката. На данный момент уже существуют работающие в промышленных условиях установки, использующие данные принципы.

На стане 5000 ОАО «Северсталь» в 2007 году была установлена система, обеспечивающая контроль распределения температуры по поверхности листа до установки контролируемого охлаждения (УКО) (рис.1.21). Установка состоит из 2-х линейных тепловизионных камер, реализованных на многоэлементных инфракрасных фотоприемниках. Одна камера устанавливается непосредственно за клетью стана 5000 перед установкой контролируемого охлаждения, вторая камера устанавливается за УКО. Такие камеры позволяют получать



параллельные замеры температуры в реальном масштабе времени, что дает точное картографирование измеренных значений для движущихся с различной скоростью объектов.

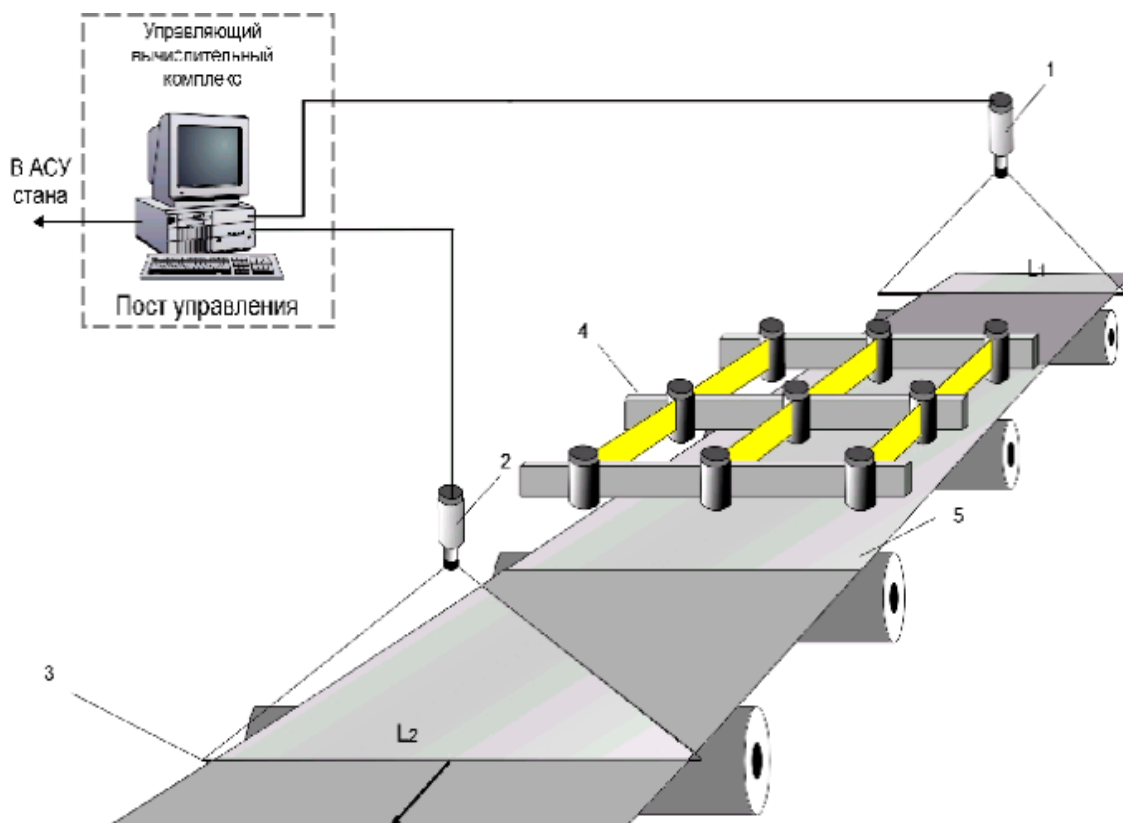


Рис. 1.21. Функциональная схема установки: 1, 2 – тепловизионные камеры; 3 – измеряемый лист; 4 – УКО; 5 – зона охлаждения

Управляющий вычислительный комплекс обеспечивает прием информации с тепловизионных камер, обработку полученной информации и расчет температурного распределения, согласование со скоростью работы стана и расчет картографического температурного распределения, ведение и просмотр баз данных. Программное обеспечение обеспечивает расчет максимальной, минимальной и средней температуры листа, сопоставление температурного профиля с измерениями до УКО и после него (рис.1.22).

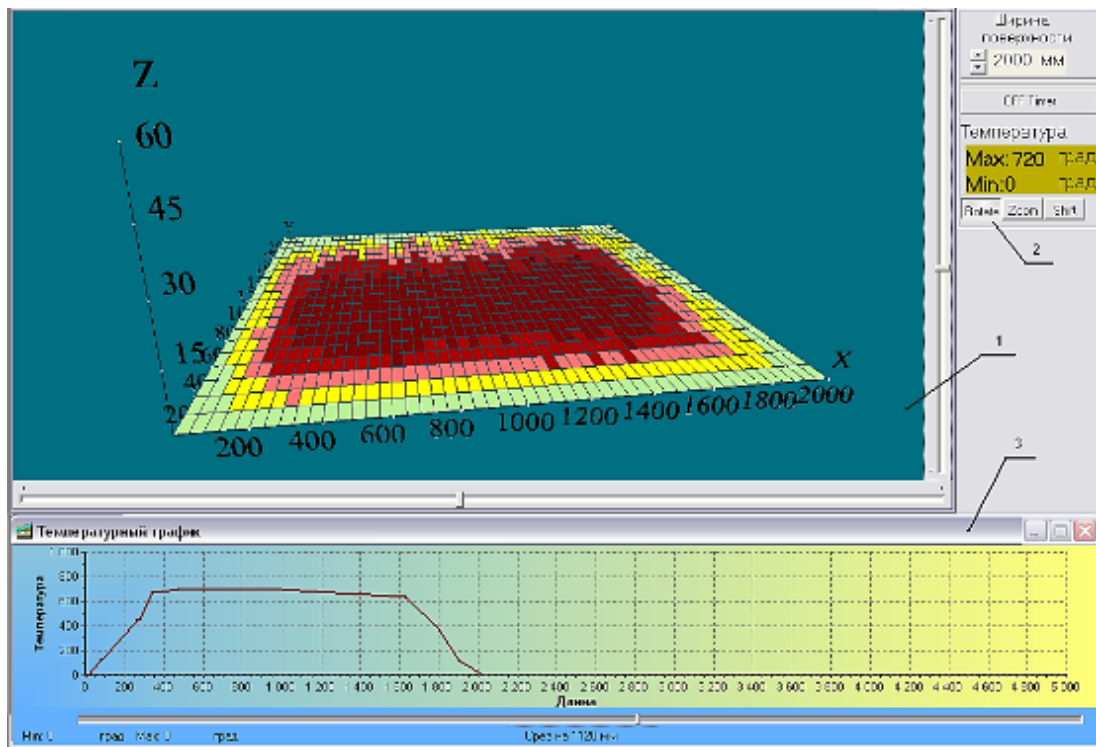


Рис. 1.22. Окно рабочей программы: 1 – поле просмотра картографического температурного профиля листа; 2- поле линейного среза на заданной длине; 3 – поле для отображения текстовой информации.

Похожее решение предложено авторами работы [52]. На стане 2000 ЧерМК ОАО «Северсталь» для определения температуры смотки полосы в рулон были установлены два пирометра, один из которых пирометр спектрального отношения, предназначенный для измерения температуры полосы в ее средней части и определения коэффициента излучения, служащего в дальнейшем для корректировки значений, получаемых от второй линейно сканирующей камеры (рис.1.23).

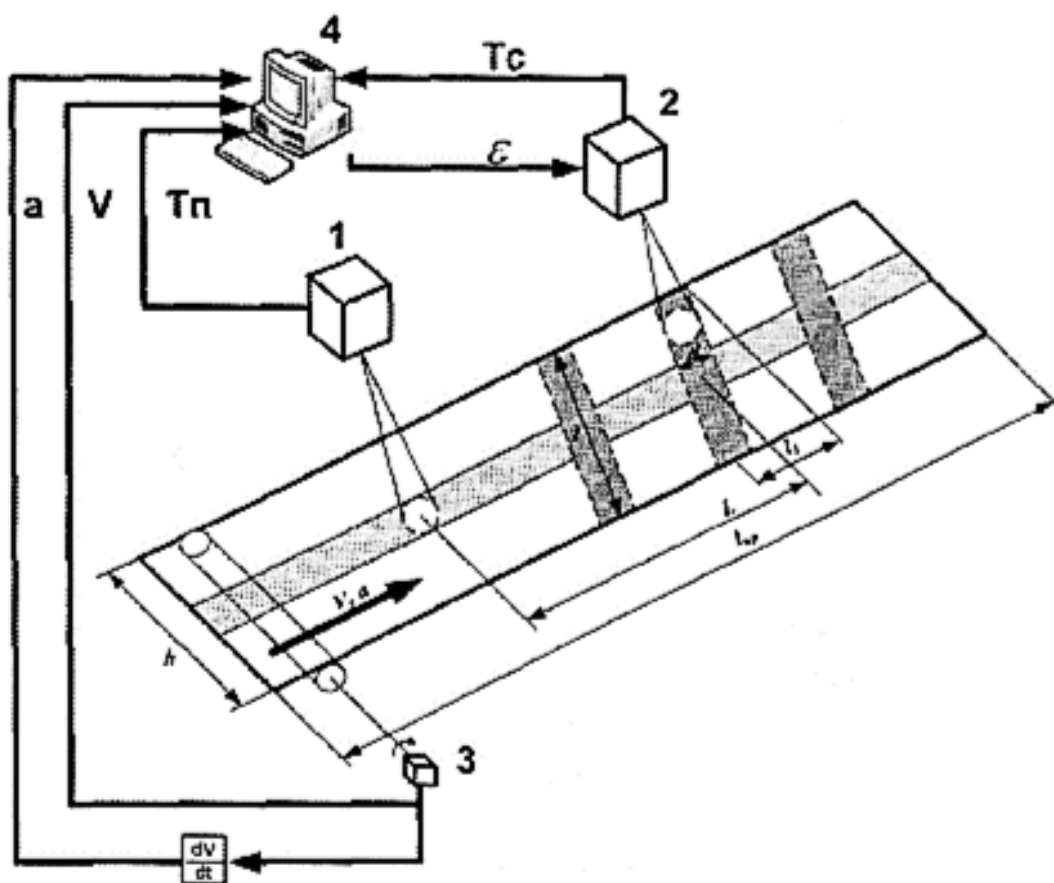


Рис. 1.23. Функциональная схема системы измерения температуры

Использование сканера в данной системе позволяет получать не только корректное значение температуры, но и реальный температурный профиль полосы. В зависимости от имеющегося температурного профиля полосы происходит корректировка подачи воды в следующей за системой измерения температуры установке ускоренного охлаждения полосы.

Перед чистовой группой клетей стана горячей прокатки 2000 ОАО «ММК» проводились исследования износа рабочих валков и, как следствие, изменения геометрии готового проката [53]. Основную роль в образовании локального износа, как отмечается работе, играло количество прокатываемых полос в монтажной партии, но также не малое влияние оказывало неравномерное распределение температуры по ширине и длине полосы. Для уменьшения образования дефектов был предложен ряд технических решений, касающихся изменения существующей технологии (чередование полос узкой/широкой с

переходом по ширине и т.д.), изменения состава/характеристик оборудования (подача смазки в область формирования дефектов и т.д.) и решений, требующих больших капитальных затрат (осевая сдвижка и т.д.). Выдвинутые предложения рекомендованы к внедрению на стане 2000 НП ОАО «ММК».

Заслуживает внимания работа по исследованию температурных полей раскатов толстолистного проката, проведенная на стане 5000 ОАО «ММК» [54]. Целью исследования было выявление «эталонных» температурных полей, при которых показатели плоскостности наиболее качественны, и имеется возможность прогнозирования неплоскостности раската еще в линии прокатки путем сопоставления его температурного поля с «эталонным». Авторы использовали бесконтактный пирометр фирмы LANDSCAN. По результатам измерений было выявлено, что волнистость кромок толстолистного проката является следствием температурного градиента на кромках раската. Был предложен ряд технологических решений, которые, по мнению авторов, приведут к достижению поставленной цели. Исследование проводилось на толстолистовом прокате и результаты применимы только на стане 5000 ОАО «ММК» в связи с особенностями производства.

1.6. Теоретическое исследование формоизменения прокатываемых полос в очаге пластической деформации при продольной прокатке

1.6.1 Влияние условий течения металла в очаге деформации на формоизменение горячекатаных полос

Влияние поперечных перемещений металла в очаге пластической деформации на уменьшение остаточных напряжений в полосе после прокатки известно уже достаточно давно, например, М.И. Сафьян, Д.П. Галкин, Г.Г. Григорян, В.Н. Выдрин и т.д. оценивали поперечные перемещения металла по муаровой картине, использовали предварительно нанесённую на поверхность

образцов сетку, по искажению которой осуществлялась оценка. Также известен способ наклеивания на поверхности свинцовых полос тензодатчиков для оценки поперечных напряжений перед входом в валки. Результаты работы данных исследователей убедительно доказывают наличие поперечных перемещений металла в очаге пластической деформации.

Ю.Д. Железнов и Г.Г. Григорян в своей работе [55] экспериментально оценили устойчивость процесса тонколистовой прокатки с учетом поперечного течения металла, а также определили влияние неравномерной деформации на дефекты конечной формы полосы с помощью магнитоанизотропного датчика и профилометра. Все эксперименты, проводимые на стане 500 (одноклетевой четырехвалковый) и стане 320 (непрерывный двухклетевой четырехвалковый) убедительно показали закономерность явления и доказали, что в очаге пластической деформации имеют место поперечные перемещения металла, которые уменьшают неравномерность вытяжек по ширине полосы.

Б.П. Картушов, И.Н. Потапов, В.М. Салганик и А.М. Песин предложили способы производства листового проката [56,57], при которых достигается улучшение плоскостности прокатываемых полос за счет использования принципа, при котором поперечные перемещения металла в очаге деформации увеличиваются с уменьшением ширины полосы. При первом способе технический эффект достигается с помощью последовательной прокатки металла в профилированных валках (раскату придается волнообразный профиль) и только затем в валках с гладкой бочкой. Таким образом, металл получает возможность перемещения в поперечном направлении. При втором способе на полосе с помощью специальных дисков накатывают выступы с тем расчетом, чтобы каждый локальный очаг деформации имел ширину, меньшую его длины. Это также позволяет интенсифицировать эффект поперечного перемещения металла, который в свою очередь позволяет снизить неравномерность вытяжек по ширине полосы.

Как известно, при расчете остаточных напряжений по теореме Генки о разгрузке (1924 г.) предполагают, что из компонентов тензора напряжений, вычисленных при решении пластической задачи, вычитаются напряжения, вычисленные при решении упругой задачи.

В своих работах С.Л. Коцарь, Г.Г. Григорян и Б.А. Поляков [58,59] предложили оригинальный способ учитывать эффект уменьшения неравномерности распределения остаточных напряжений за счет поперечного перемещения металла в очаге деформации коэффициентом  $\rho$ .

$$\frac{\Delta\lambda(y)}{\lambda} = \rho \left( \frac{\delta h_0(y)}{h_0} - \frac{\delta h_1(y)}{h_1} \right) \quad (1.1)$$

где  $\Delta\lambda(y)$  и  $\lambda$  - неравномерности вытяжек и среднее удлинение по ширине полосы;  $\delta h_0(y)$  и  $h_0$  - изменение толщины и средняя толщина полосы на входе в очаг деформации;  $\delta h_1(y)$  и  $h_1$  - величина текущей поперечной разнотолщинности и величина средней толщины полосы на выходе очага деформации,  $0 < \rho < 1$  - коэффициент, учитывающий влияние поперечных перемещений металла в очаге деформации.

Отличие предложенного метода, от классического заключается в том, что процесс решения упругой задачи не рассматривается, а определялся только коэффициент  $\rho$ , характеризующий уменьшение неравномерности напряжений по ширине полосы на выходе очага деформации по сравнению с рассчитанной в предположении плоской схемы деформации. При больших обжатиях, особенно при горячей прокатке, упругая составляющая деформации полосы практически отсутствует, поэтому допустимо считать, что выходные напряжения переходят в остаточные без изменения величины.

В работе [22], при рассмотрении процесса листовой прокатки без уширения наглядно представлено влияния поперечного перемещения металла в очаге пластической деформации на уменьшение остаточных напряжений (рис. 1.24).

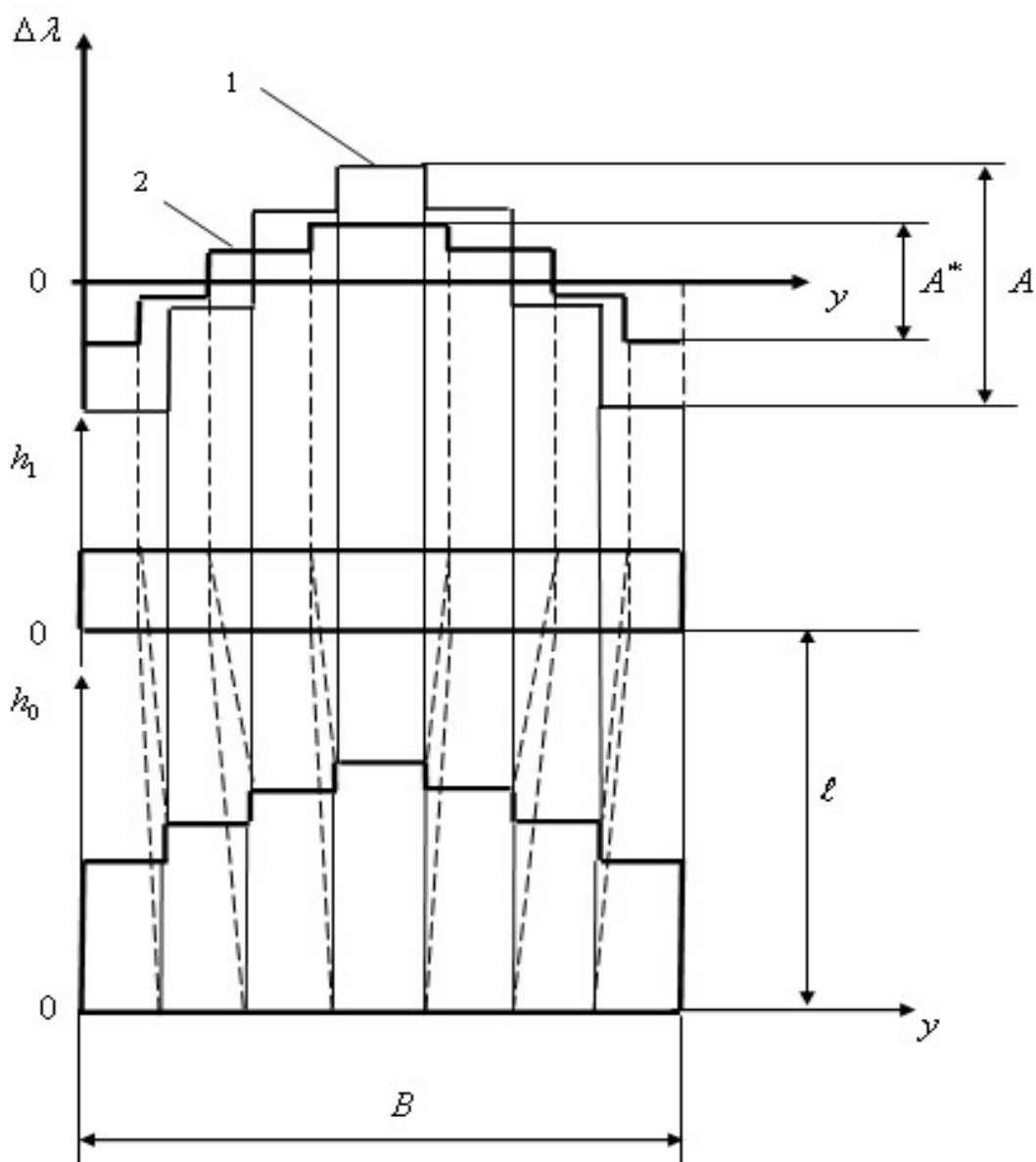


Рис. 1.24. Схема уменьшения неравномерности вытяжек по ширине полосы из-за поперечного перемещения металла в очаге деформации

На рисунке высота полосы на входе и выходе из очаг деформации обозначены  $h_0$  (ступенчатая линия) и  $h_1$  (прямая линия) соответственно, ширина полосы обозначена  $B$ , длина очага деформации –  $\lambda$ . Если рассматривать плоскую схему деформации, то амплитуда разности вытяжек  $\Delta\lambda$  по ширине полосы была бы равной величине  $A$  (ломаная 1), но при учете поперечных перемещений металла в очаге деформации (пунктирные линии) величина вытяжек по ширине полосы изменится, и амплитуда  $\Delta\lambda$  станет равной  $A^* < A$  (ломаная 2).

### 1.6.2. Методы и способы решения плоских задач ОМД

При разработке технологических процессов обработки металлов давлением, проектировании оборудования, а также при непосредственном процессе прокатки с учетом регулирования геометрии полосы в зависимости от распределения температурного поля подката, исходной формы заготовки и прочих факторов, влияющих как на готовую продукцию, так и на стабильность процесса обработки, необходимо знать полное усилие, которое нужно приложить к деформируемому телу для преодоления сопротивления металла деформации и трения на поверхности контакта металла с инструментом. С целью определения деформирующих усилий и деформаций разработано множество аналитических и экспериментальных методов.

Аналитически усилие можно определить, зная нормальные и касательные напряжения в каждой точке поверхности контакта металла с инструментом, форму и размеры этой поверхности. Наиболее распространенными аналитическими методами определения усилия деформирования являются:

- метод характеристик (линий скольжения);
- энергетический метод с использованием вариационных принципов;
- метод совместного решения дифференциальных уравнений равновесия и уравнения пластичности.

Рассмотрим наиболее распространённые аналитические методы определения усилия деформирования и напряжений.

Метод линий скольжения применяется для решения плоских и осесимметричных задач. Метод был разработан Генки Г., Прандтлем Л. и Гейрингер Х.[60,61]. На рис. 1.25 представлена схема расположения линий скольжения в деформируемом теле и обозначения геометрических параметров. Траектории главных напряжений пересекают линии скольжения под углом  $\pi/4$ .



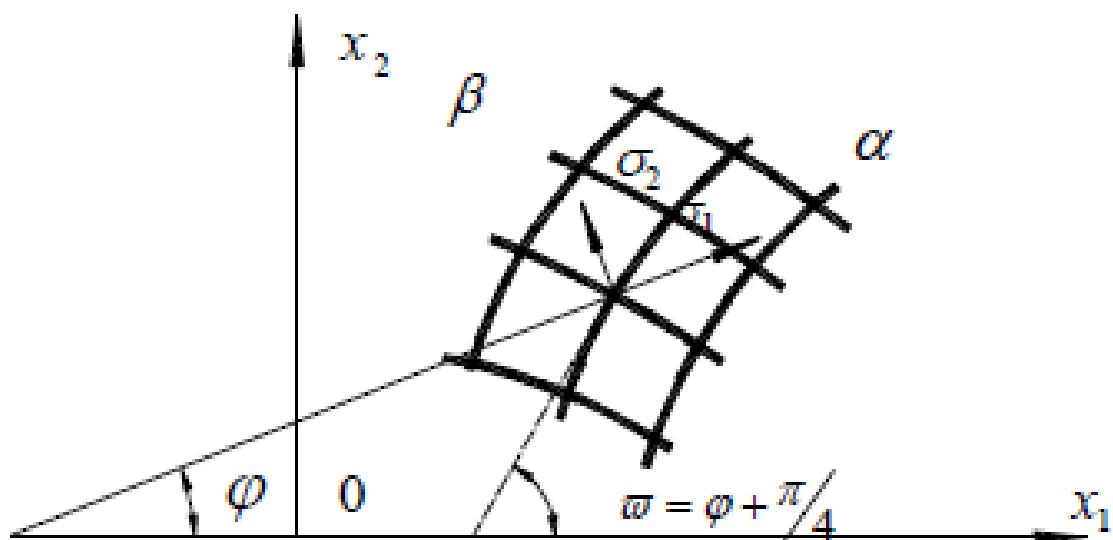


Рис. 1.25. Траектории главных касательных напряжений

На практике при начальных стадиях пластической деформации на поверхности деформируемого тела появляется сетка линий. Именно эти линии являются следами пересечения поверхности образца с плоскостями максимальных касательных напряжений. Линии скольжения можно наблюдать также на поверхности листов, покрытых окалиной, вблизи кромки при резке, пробивке отверстий и т.п. Если известна траектория этих линий скольжения и среднее значение напряжений в одной точке, то можно найти напряжения в другой точке, и соответственно рассчитать контактные напряжения и деформирующие усилия в точках выхода линий скольжения на контактные поверхности.

Таким образом, если возможно построить подходящее поле линий скольжений, то задача определения деформирующих усилий решена. При построении полей линий скольжения используют их свойства:

1. линии скольжения непрерывны и образуют два семейства ортогональных кривых;
2. линии скольжения пересекают траектории главных напряжений под углом  $\pm \pi/4$ ;
3.  $\sigma_{ср}$  пропорционально углу поворота линии;

4. угол между касательными к двум линиям скольжения одной области в точках пересечения их с каждой линией скольжения другой области остается постоянным;

5. при перемещении точек вдоль линии скольжения одной области радиусы кривизны линий скольжения другой области в точках пересечения с данной линией изменяются на величину пройденных расстояний;

6. угол наклона линий скольжения на контуре зависит от касательных напряжений.

Линии скольжения, построенные на основе данных свойств, должны удовлетворять кинематическим условиям. Тогда при обработке металлов давлением построение полей линий скольжения позволяет определять деформирующие усилия. Метод может использоваться для различных процессов ОМД, например, прессование (прямое, обратное), протяжка, волочение, обжатие, прокатка.

Общее представление о методе совместного решения дифференциальных уравнений равновесия с уравнением пластичности можно получить на примере процесса прокатки [93].

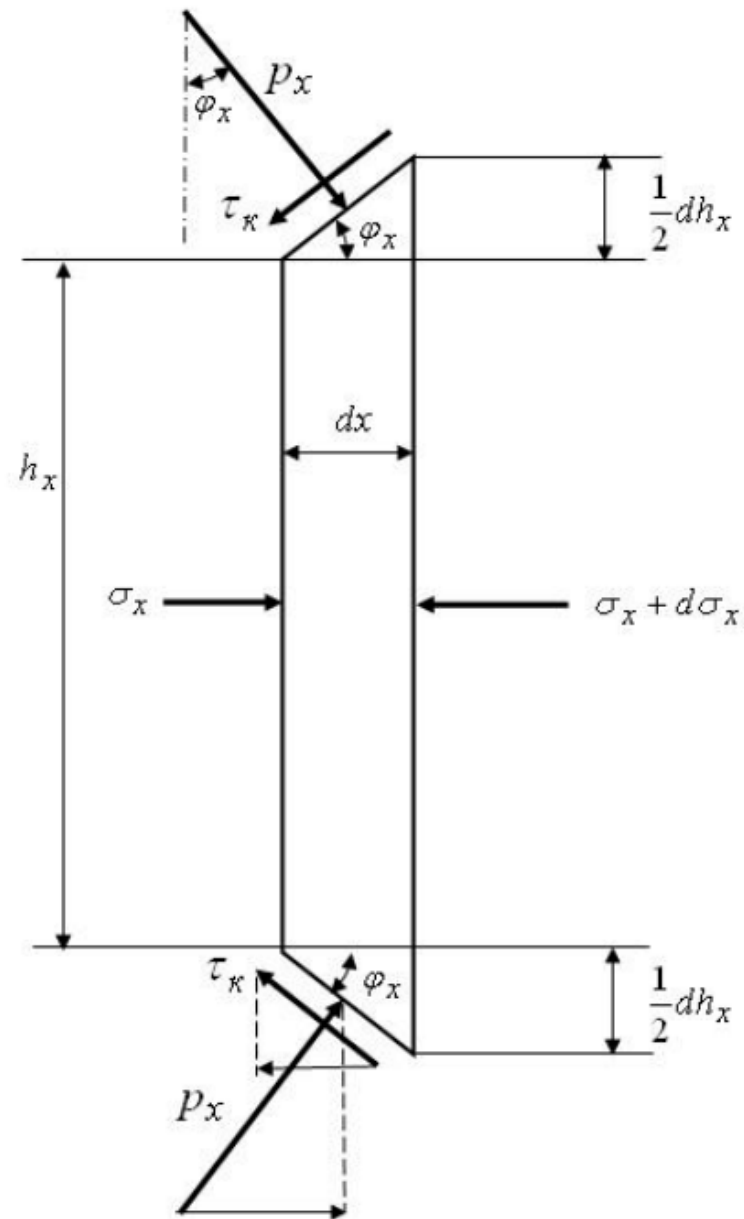


Рис. 1.26. Напряжения, действующие на выделенный в очаге деформации элементарный участок металла

В общем случае объемного напряженного состояния имеем три уравнения равновесия и одно уравнение пластичности:

$$\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} = 0$$

$$\frac{\partial \tau_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} = 0$$

$$\frac{\partial \tau_{zx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} = 0$$

$$\sigma_i = \frac{1}{2} \sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + 6(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2)}$$

При рассмотрении очага деформации в процессе тонколистовой прокатки, при идеальных условиях (рис. 1.26), уравнения равновесия можно привести к виду  $\sum F_x = 0$ :

$$-(\sigma_x + d\sigma_x)(h_x + dh_x)B + \sigma_x h_x B + 2P_x \frac{dx}{\cos(\varphi_x)} \sin(\varphi_x) B - 2\tau_x \frac{dx}{\cos(\varphi_x)} \cos(\varphi_x) B = 0,$$

где  $P_x$  – давление прокатки,  $h$  – толщина прокатываемой полосы,  $B$  – ширина прокатываемой полосы.

После преобразований, пренебрегая бесконечно малой величиной более высокого порядка и при  $\tan(\varphi_x) = \frac{dh_x}{2 dx}$  уравнение равновесия принимает вид:

$$(\sigma_x + P_x) \frac{dh_x}{dx} + h_x \frac{d\sigma_x}{dx} + 2\tau_k \quad (1.2)$$

Для главных напряжений при двумерной деформации условие пластичности примет вид:

$\sigma_1 - \sigma_3 = 2\tau_s$ , где  $2\tau_s = \frac{2}{\sqrt{3}}\sigma_s = 1,15\sigma_s$ ;  $\sigma_s\tau_s$  – предел текучести при растяжении и предел текучести на сдвиг.

При тонколистовой прокатке  $\varphi_x \leq \alpha \ll 1$ , принимаем  $\sigma_1 = P_x$ ,  $\sigma_3 = \sigma_x$ , тогда  $2\tau_s = P_x - \sigma_x$ . Подставляя полученное условие пластичности в уравнение равновесия (1.2), получаем дифференциальное уравнение равновесия:

$$\frac{dP_x}{dx} = \frac{2\tau_s}{h_x} \frac{dh_x}{dx} + \frac{d(2\tau_s)}{dx} \pm \frac{2\tau_k}{h_x}, \quad (1.3)$$

где знак «+» соответствует зоне опережения, а знак «-» зоне отставания.

Инженерный метод и метод прямого интегрирования применяются для решения плоских и осесимметричных задач, например, деформирование трубных заготовок в условиях внешнего, внутреннего или комбинированного давления; осадка толстостенной трубы в матрице, сжатие заготовки (плоской или клиновидной формы) шероховатыми плитами; формовка деталей конической формы.

Оба метода позволяют находить распределение напряжений в деформируемой заготовке [62-64]. Метод прямого интегрирования является более общим и для получения аналитических решений необходимо упрощение исходных уравнений на основе допущений о характере протекания процесса. Оба метода позволяют найти и распределение деформирующих усилий и напряжений, при этом в инженерном методе для этой цели проводятся эксперименты.

Метод верхней оценки разработан Джонсоном В. и Кудо Х. [65-66]. Суть метода состоит в том, что объем очага деформации заменяется жесткими блоками, таким образом происходит замена поля линий скольжения системой прямолинейных отрезков (рис. 1.27).

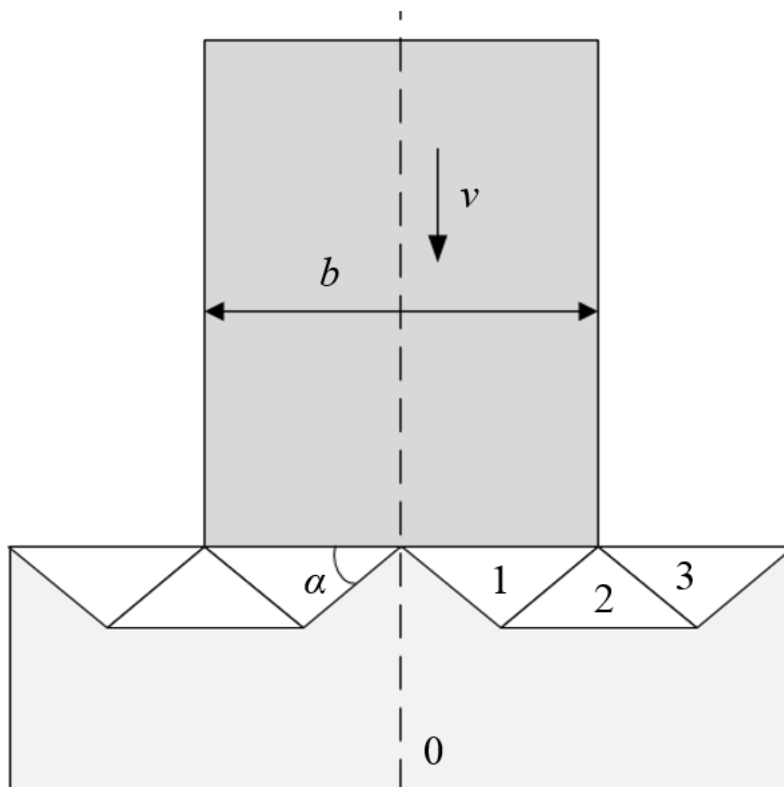


Рис. 1.27. Блочное поле при вдавливании пуансона в заготовку: 1,2,3 – блочное поле;  $b$  – ширина пуансона;  $v$  – скорость деформирования

В качестве блоков используются треугольные призмы, при этом внутри каждой призмы скорость постоянна. Число и размеры блоков выбирают произвольно. Касательные напряжения вдоль границ берут максимальными  $\tau_x =$

$k$ , на свободной поверхности принимают равными нулю  $\tau_x = 0$ , а на контактных поверхностях принимают от  $\tau_x = \mu\sigma_1$  до предельного значения  $\tau_x = k$ .

Метод верхней оценки может использоваться для квазистатических процессов в случае небольших деформаций при процессахковки, осадки, штамповки или прессования (прямого, обратного), но этот метод не позволяет определять распределение напряжений.

### 1.6.3. Методы и способы решения объемных задач ОМД

Помимо полного усилия необходимо знать распределение напряжений как на контактной поверхности металла с инструментом, так и по всему объёму деформируемого тела, что позволяет оценить неравномерность деформации, качество продукции, пластичность и т.д.

Метод баланса работ [67, 68] основан на законе сохранения энергии. Как известно, работа внешних сил на соответствующих перемещениях равна работе внутренних сил деформирования (упругая деформация не учитывается). Материал заготовки считается несжимаемым, а работа внутренних сил определяется через интенсивности деформаций сдвига и касательных напряжений. Данный метод может быть использован для определения деформирующих усилий при процессах объемной осадки,ковки, прокатки и объемной горячей штамповки. Он не позволяет находить распределение полей напряжений и деформаций.

При процессе прокатки, особенно горячей, происходит поперечное перемещение металла в очаге деформации. Этот процесс является достаточно сложным с точки зрения теории прокати, что подтверждается наличием в литературе нескольких теорий и более 50 формул для определения уширения. Обзор всех основных гипотезы и экспериментальные исследования данного вопроса представлен в работе [69].

Так, например, в исследованиях Е. Бласса (1882 г.) и В. Тафеля (1909 г.) выдвигаются гипотезы о том, что уширение образуется в основном на боковых кромках полосы и в зонах, прилегающих к ним, чем объясняется неравномерное распределения уширения при листовой прокатке.

А.Ф. Головин (1928 г.) считал, что в соответствии с законом наименьшего сопротивления при пластической деформации частицы металла в очаге деформации перемещаются по нормальям к боковой поверхности; при этом очаг деформации условно делится на четыре зоны: опережения, отставания и две примыкающие к боковым кромкам полосы зоны уширения (рис. 1.28), что также советуется неравномерному распределению уширения.

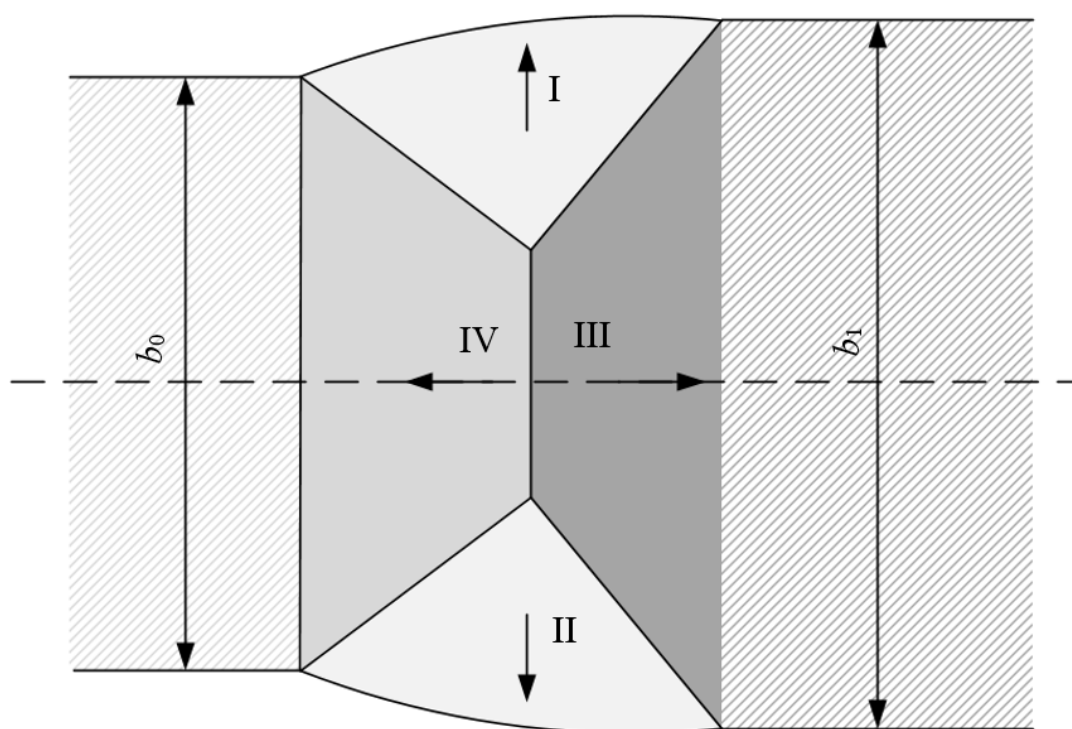


Рис. 1.28. Деление очага деформации на зоны: I, II – условные зоны уширения, III – зона опережения, IV – зона отставания

В своих исследованиях Б.П. Бахтинов, А.И. Целиков и А.И. Гришков доказали, что боковые зоны, могут использоваться для теоретического вычисления величины уширения. По мере удаления от середины полосы к кромкам угол между направлением прокатки и вектором касательного

напряжения растут, причем ближе к кромкам более интенсивно, т.е. в боковых зонах скорость поперечного перемещения металла увеличивается, что подтверждает возможность деления очага деформации на зоны. В литературе для определения уширения с учетом деления очага деформации на зоны известен псевдотрехмерный метод, при котором решается дифференциальное уравнение, описывающее перемещение металла в следствии уменьшения высоты сечения и приращения ее ширины в очаге деформации, для всех перечисленных выше зон в зависимости от нахождения граничных линий, отделяющих зону опережения от зоны отставания [69].

$$db_x = -2z \frac{dh_x}{h_x},$$

где  $dh_x$  и  $db_x$  - уменьшение высоты  $h_x$  сечение прокатываемой полосы и приращение ее ширины  $b_x$  при перемещении любого сечения в рассматриваемом очаге деформации.

Результаты вычислений, полученные после решения данного дифференциального уравнения, хорошо соглашающиеся с экспериментальными данными получаются при условии, что на границах зоны уширения, зоны отставания и зоны опережения равны приращения средних по высоте продольных и поперечных напряжений. Данное уравнение также было решено и при принятии других упрощений, например, замене дуги захвата хордой или уравнением параболы вида  $y = a + bx^2$ . Все полученные формулы уширения можно привести к одному виду

$$\Delta b = a \frac{1}{2c} (m - 1) \Delta h \ln \frac{h_0}{h_1},$$

где  $a = 2 \frac{1-\varepsilon}{2-1,5\varepsilon}$  – коэффициент, зависящий от относительно обжатия;  $m = \frac{\tau_v}{2k \tan \theta}$ ,  $c = \frac{\tau_k}{2k}$  – коэффициенты, учитывающие контактные касательные напряжения, действующие в продольном и поперечном направлениях. В зависимости от принимаемых допущений для решения дифференциального уравнения изменяется и точность получаемых результатов.



В литературе по теории упругости и математической теории пластичности широко известны вариационные методы, применительно к процессам обработки металлов давлением они получили развитие в трудах И.Я. Тарновского и его учеников. Подробно вариационные методы изложены в фундаментальных работах [68,70]. Определение усилий и деформаций, как и в методе баланса работ, основано на энергетическом принципе, но, в отличие от метода верхней оценки и метода баланса работ, позволяет определить не только полное и удельное усилия, но и распределение напряжений и деформаций по объему тела, а также форму тела после деформации с учетом неравномерности деформации. Способ отличается высокой точностью, но сложен в применении. В основу вариационного метода положено то, что сумма работ всех внешних и внутренних сил на возможных перемещениях около состояния равновесия равна нулю. Исходя из этого практическую задачу можно сформулировать таким образом: найти такую функциональную зависимость перемещений от координат, при которой полная энергия принимает минимальное значение. Практическое использование вариационных данных методов упоминается в большом количестве научной литературы.

В работе [71] проведен обзор современных технических и технологических систем, предназначенных для обеспечения допустимой поперечной разнотолщинности и геометрии листового проката. Затронуты вопросы обеспечения стабильности процесса прокатки в результате обработки полос с клиновидным профилем, а также рассмотрены силы, действующие внутри очага деформации при прокатке полос с такого рода нарушением симметрии, для анализа используется инженерный метод решения данной задачи. Метод позволяет определять распределение действующих напряжений и состоит в решении уравнений равновесия совместно с упрощенным условием пластичности при заданных граничных условиях.

Для решения задач теории процесса кузнечной прошивки в работе [72] используется подход, основанный на вариационном методе решения задач ОМД.

А.Л. Воронцов показывает возможность решения вариационных задач путем расчленения задачи на ряд простых, для каждой из которых создается своя расчётная модель. Каждая простая модель может содержать варьируемый параметр, однако основное варьирование происходит путем сравнения сил, требуемых для выполнения процесса деформации. Соответственно считается, что процесс на той или иной стадии будет проходить по закону, по которому требуемые силы будут минимальны.

В рамках рассмотрения проблемы формообразования листового и полосового проката при учете поперечного перемещения металла в очаге пластической деформации в процессе горячей прокатки С.М. Бельским в работе [22] для определения уравнения, описывающего распределение погонной нагрузки по ширине полосы в зависимости от условий прокатки и параметров полосы, был применен вариационный метод Журдена. Полученное дифференциальное уравнение для функции распределения погонной нагрузки имеет следующий вид:

$$p'(y) = \frac{4\mu\bar{v}_1 h_1}{h_0 \Delta h} (\varphi - f) \ln \left| \frac{2\sqrt{(1-t_H^2)^2 + a^2(\varphi-f)^2 - 2t_H^2 + 2 + a^2(\varphi-f)^2}}{a^2(\varphi-f)} \right| + f'' \lambda \left( \frac{h_1}{\Delta h} + \frac{2}{3} \right) - \\ - \varphi'' \lambda \left( \frac{h_0}{\Delta h} + \frac{2}{3} \right),$$

граничное условие, после интегрирования дифференциального уравнения по частям, примет следующий вид:

$$p(B) = \frac{\frac{P}{2} + \int_0^B y p'(y) dy}{B}.$$

Вывод данного дифференциального уравнения основан на принципе Журдена возможных скоростей изменения деформированного состояния для жесткопластической среды. Полное усилие прокатки  $P$  предлагается вычислить любым известным методом, например, интегрированием уравнения равновесия или, например, вариационным методом, что и представил Бельский С.М. в работе [73].

## 1.7. Заключение по литературному обзору и постановка задач исследования

На основе рассмотренных выше материалов можно сделать следующие выводы.

На сегодняшний день существуют сложившиеся процедуры измерения параметров формы листового проката, требования к которым с каждым годом повышаются. Для соблюдения установленных норм разработаны и внедрены в технологическую линию системы, обеспечивающие непрерывный контроль за процессом формоизменения и при необходимости корректировку геометрии проката. Необходимо отметить тот факт, что практически все разработанные системы в лучшем случае корректируют форму полосы, следующей за той, на которой были получены отклонения, так как принципы их функционирования основаны на измерениях геометрических характеристик готовой полосы или подката и последующей подстройке клеток стана или корректировке технологического режима.

В литературе подробно рассмотрен вопрос корреляции технологических параметров, механических свойств и получаемой геометрии листового горячего проката. Одним из важнейших параметров является распределение температуры, с целью контроля которой также разработано множество систем и способов. Большинство из них обеспечивают контроль и регулирование температуры в области, влияющей на механические свойства готового горячего проката, или обеспечивают тонкое регулирование геометрических характеристик в чистовой группе клеток и только единицы косвенно воздействуют на геометрию подката в черновых клетях стана.

Важнейшими параметрами при разработке стабильной технологии при тонколистовой горячей прокатке являются не только энергосиловые параметры, такие как усилие и момент, прикладываемые к деформируемому телу, но и кинематические параметры, такие как скорости течения металла в очаге

деформации. Для определения данных параметров разработано множество аналитических и экспериментальных методов. Среди прочих необходимо выделить вариационный метод, который впервые был применен к процессам обработки металлов давлением И.Я. Тарновским и получивший развитие в его дальнейших трудах. Данный метод позволяет с высокой точностью определить полное и удельное усилия, распределение напряжений и деформаций по объему тела, а главное, спрогнозировать форму тела после его деформации.

Таким образом сформулируем основную цель настоящего исследования: 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.

## 2. Исследование температурного поля горячекатаных полос

### 2.1. Экспериментальное исследование температурного поля

горячекатаных полос на непрерывном широкополосном стане 2000 ПАО «НЛМК»

С целью изучения закономерностей распределения температурного поля прокатываемых на стане 2000 ПАО «НЛМК» полос были проведены измерения температурного поля в линии стана. Исследования проводились как на углеродистых/низкоуглеродистых марках, так и на электротехнических марках сталей, таким образом был охвачен почти весь сортамент прокатываемых полос. Измерение температурного поля проводились с помощью переносной тепловизионной камеры VALTECH TR-1400 (детектор - микроболометр  $384 \times 288$  пикселей, диапазон рабочих температур  $-20^{\circ}\text{C} \div +1200^{\circ}\text{C}$ , точность измерения  $\pm 5^{\circ}\text{C}$  ( $\pm 0,5\%$  измеряемой температуры) [75].

#### 2.1.1 Физическое моделирование нагрева и охлаждения металла на установке Gleeble 3800

При измерении температуры с помощью телевизионной камеры в промышленных условиях необходимо знать фактический уровень излучательной способности (коэффициент излучения) измеряемых объектов. Необходимость этого действия зафиксирована в эксплуатационной документации и говорит о том, что при работе с горячекатаными стальными полосами нужно устанавливать индивидуальный коэффициент для каждой марки стали. Разброс значений коэффициентов излучения довольно большой, и в каждом конкретном случае их величины индивидуальны. Но главное – они различны для одного и того же материала при различных температурах [76].

С учетом работ А.В. Фрунзе [77-79] для определения фактической температуры с помощью тепловизионной камеры BALTECH TR-1400 было решено провести ряд экспериментов по определению истинного значения коэффициентов излучения исследуемых марок сталей на установке Gleeble 3800 в городе Ченстохова (Польша).

Комплекс Gleeble 3800 представляет собой высокоскоростной пластометр с возможностью программирования стадий обработки металлов с постоянной или переменной по ходу обработки температурой или скоростью деформации (рис. 2.1). Для моделирования процессов ОМД в комплексе возможен индукционный нагрев образца при помощи сварочного трансформатора со скоростью до  $12\ 000^{\circ}\text{C}/\text{с.}$ , контроль температуры контактными термодарами типа К (хромель-алюмелевыми с возможностью одновременной записи данных в четырех точках рабочей части образца), для предотвращения сваривания образца с инструментом используются пластины из графита предварительно покрытые графитовой смазкой. Все параметры работы установки и обработки материала фиксируются в компьютере с частотой до 50 КГц. Проведение эксперимента так же возможно в вакууме (до  $10^{-5}$  torr), в защитном газе (аргон) или на воздухе.

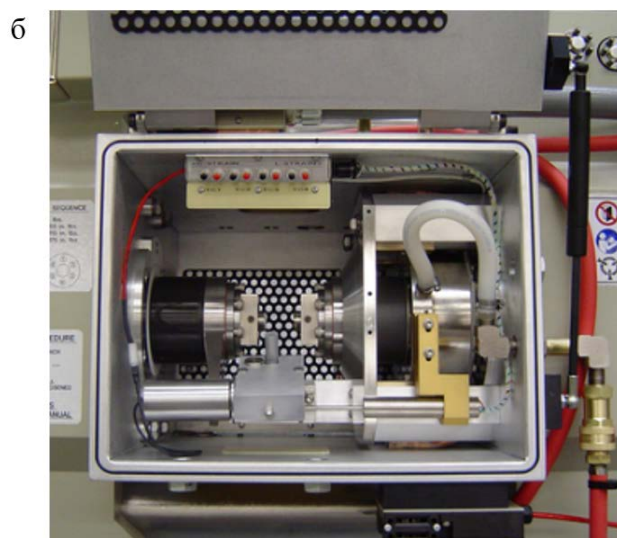


Рис. 2.1. Высокоскоростной пластометр Gleeble 3800: а – установка Gleeble 3800 в сборе; б – модуль Hydrawedge

Эксперименты проводились на образцах длиной 20 мм, шириной 15 мм и высотой 10 мм из сталей 3СП, 08Ю, 09Г2С НС420LA и т.д. Нагрев осуществляли без использования защитного газа со скоростью  $10^{\circ}\text{C}/\text{с}$  до температуры  $1100^{\circ}\text{C}$  выдержкой в течение 2 мин и последующим воздушным охлаждением до



целевой температуры. В процессе работы фиксировалась температура образца для чего к нему приваривались четыре хромель-алюмелевые термопары типа К.

Эксперименты проводились с использованием модуля Hydrawedge, который характеризуется возможностью регулирования скорости, времени и температуры нагрева образцов, а также управления скоростью охлаждения. К модулю был подключен тепловизор инфракрасный ThermoCAM™ SC640 прошедший поверку в Польше по ГОСТу, аналогичному ГОСТ Р 8.619-2006 «Приборы тепловизионные измерительные. Методика поверки» [80] используемому в РФ.



Рис. 2.2. Тепловизор инфракрасный ThermoCAM SC640

Инфракрасная камера (теповизор) ThermoCAM™ SC640 является оптико-электронным измерительным прибором, работающим в инфракрасной области электромагнитного спектра (рис. 2.2), который состоит из объектива и электронного блока. Данный блок осуществляет измерение, регистрацию, обработку и отображение сигнала на экране камеры. Тип детектора микроболометр – с матрицей 640x480 пикселей. Тепловизор отображает распределение температур на поверхности объекта или на границе разделения различных сред в виде цветовой палитры на основе преобразования интенсивности инфракрасного электромагнитного излучения в электрический

сигнал, погрешность до 2 °С. Измерение температуры осуществляется в центре теплового изображения объекта.

В процессе эксперимента данные температуры, полученные с ИК камеры, передавались через программу ThermaCAM Reporter в специализированное программное обеспечение Quiksim2 комплекса Gleeble 3800. Полученные данные о температуре и излучательной способности фиксировались при помощи стандартного программного пакета Origin, встроенного в систему Gleeble (рис. 2.3).

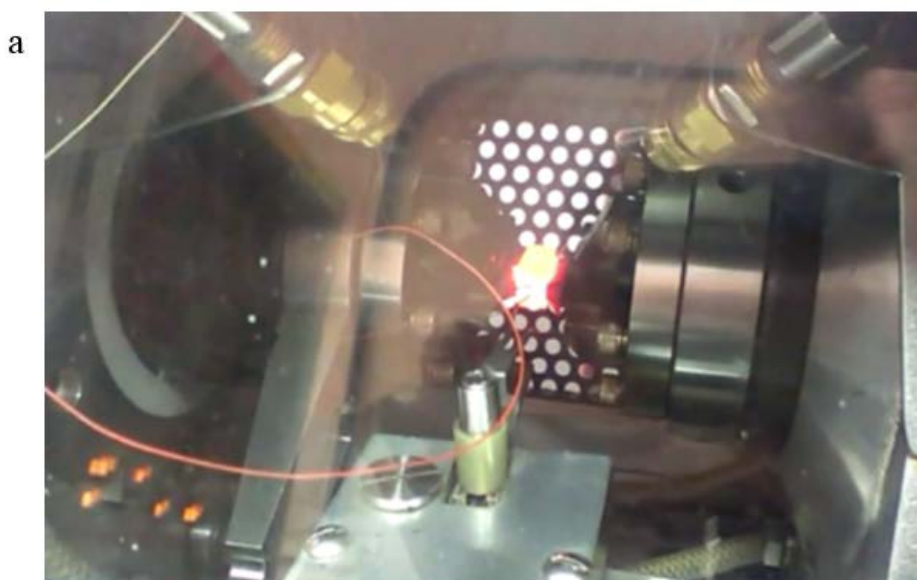
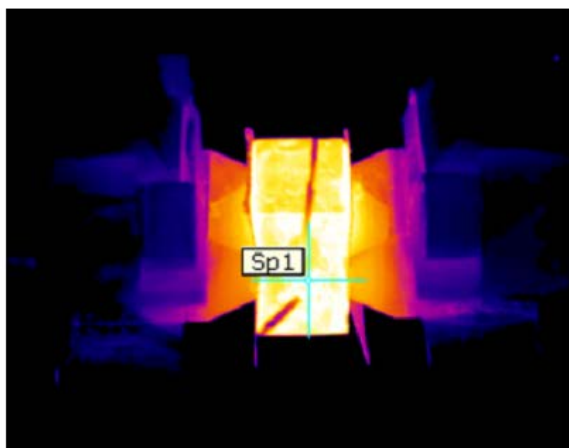


Рис. 2.3. Тепловизионная картина исследуемого образца на установке Gleeble 3800 полученная с помощью ИК камеры ThermaCAM™ SC640: а – камера модуля Hydrawedge в работе; б – 09Г2С при 840 градусах коэффициент излучения – 0,82; в – НС420LA при 840 градусах коэффициент излучения – 0,79

б



в

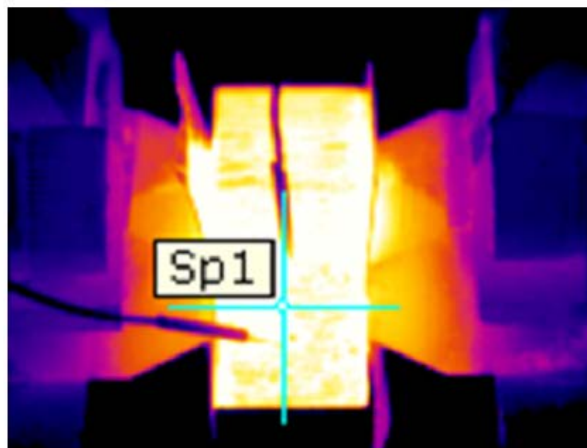


Рис. 2.3. (продолжение)

Таблица 2.1

Результаты измерений коэффициента излучения на установке Gleeble 3800 с помощью ИК камеры ThermoCAM™ SC640

Сталь	Коэффициент излучения			
	640°C	740°C	840°C	940°C
Ст3СП	0,80	0,81	0,82	0,84
09Г2С	0,80	0,81	0,82	0,83
08Ю	0,79	0,80	0,81	0,82
НС420LA	0,77	0,78	0,79	0,81

Таким образом, в результате проведенной работы были получены данные о фактической излучательной способности марок сталей, на которых планировалось провести эксперименты в условиях ПАО «НЛМК» на стане горячей прокатки 2000. Информация о коэффициенте излучения позволила осуществить более точную настройку ИК камеры BALTECH TR-1400 и получать корректную тепловизионную картину исследуемого проката непосредственно во время проведения измерений, а также позволила делать промежуточные выводы о необходимости корректировки методики проведения эксперимента или позиции измерений в линии стана.

## 2.1.2 Проведение эксперимента в условиях НШСГП 2000 ПАО «НЛМК»

Как говорилось ранее, на стане 5000 ОАО «ММК» было проведено исследование по выявлению «эталонных» температурных полей, при которых показатели плоскостности наиболее качественны, и возможно прогнозирование неплоскостности раската путем сопоставления его температурного поля с «эталоном» [81]. Для решения аналогичной задачи было проведено контрольное измерение средствами ЗАО «Теккно» условий охлаждения полосы в линии стана 2000 ПАО «НЛМК». Выявлено что охлаждение полос имеет существенную неравномерность - на термограммах (рис. 2.4) хорошо видна продольная пятнистость и полосатость [82]. Такая неравномерность может проявляться в виде неплоскостности как готового проката, так и в образовании серповидности на участке черновой группы клетей.

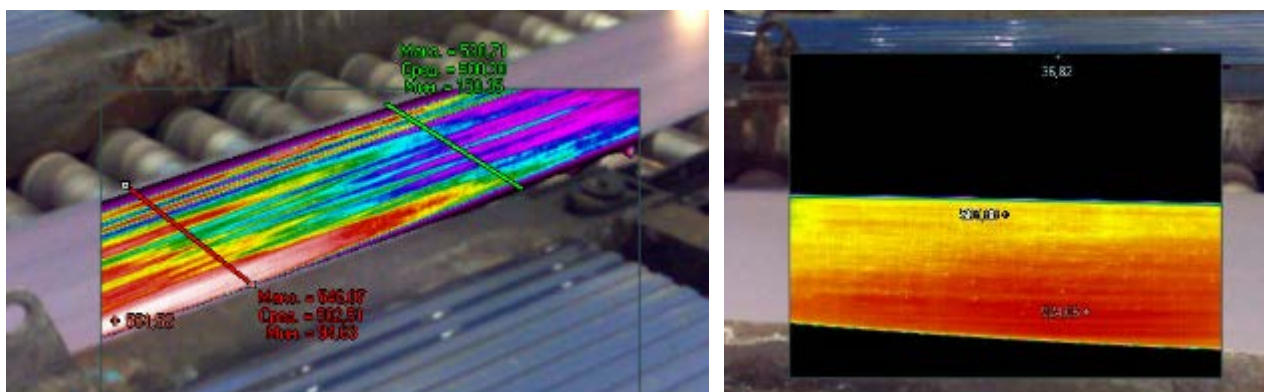


Рис. 2.4. Термосъемка полосы после установки ускоренного охлаждения

С целью более подробной проработки выявленного наблюдения было организовано экспериментальное исследование, задачей которого ставилось получить фактическую картину температурного поля раската в линии НШСГП 2000 ПАО «НЛМК» и сопоставить данные по плоскостности с температурным полем полос.

В качестве основного измерительного инструмента была выбрана тепловизионная камера VALTECH TR-1400, технические характеристики которой представлены в таблице 2.2

## Технические характеристики BALTECH TR-1400

Измерения	Диапазон измерения температуры, °С	-20...+1200 °С
	Погрешность	± 5 °С или ± 0,5% показаний измерений
Параметры визуализации	Тип детектора	Микроболометр 384 x 288 пикселей
	Спектральный диапазон	8~14μм
	Поле зрения объектива	18° x 14°
	Пространственная разрешающая способность	1.0 мрад
	Температурная чувствительность	0,1°С при 30°С
	Частота кадров	50/60 Гц
Представление изображения	Дисплей	Цветной ЖК-дисплей с диагональю 3,5"
Режимы измерений	Подвижная точка	4 подвижных точки
	Изотерма	Есть
	Корректировка коэффициента излучения	Коэффициент 0.01 ~ 1.0
	Корректировка измерений	Автоматическая, температура окружающей среды, расстояние, относительная влажность определяются пользователем
Хранение изображения	Тип	Память, емкостью до 1500 термограмм
	Форматы файлов	Формат производителя, включает 14 бит измерительных данных
Требования к окружающим условиям	Диапазон рабочих температур	-20°С ~ +50°С
	Диапазон температур хранения	-40°С ~ +70°С
	Влажность	При работе и хранении до 90% (без конденсации)
	Влагопылезащищенность	IP54
	Испытание на удар	25g, IEC, 68-2-29
	Вибрация	2g, IEC 68-2-6

В данной тепловизионной камере в качестве инфракрасного чувствительного элемента используется микроболометр с разрешением  $384 \times 288$  пикселей. Микроболометр - определенный тип оптического теплового приёмника излучения, используемого в качестве датчика в тепловизионной камере. Инфракрасное излучение с длиной волны  $8-14 \mu\text{m}$  попадает на материал датчика, нагревая его, и таким образом изменяя его электрическое сопротивление. Это изменение сопротивления измеряется и пересчитывается в температуры, которые используются для построения изображения. В отличие от других типов инфракрасных датчиков, микроболометры не требуют охлаждения.

Исследования проводились более полугода, велся учет и регистрация температурных полей полос в линии стана на трех участках линии НШСГП 2000 ПАО «НЛМК»:

1) В черновой группе температура раската измерялась после третьей, четвертой и пятой клетей, это связано с техническими ограничениями тепловизионной камеры (температура поверхности раската не должна превышать  $1200 \text{ }^\circ\text{C}$ ). Измерения проводились с шапки клетки (рис. 2.5), таким образом расстояние от тепловизера до раската составляло не более 6м.

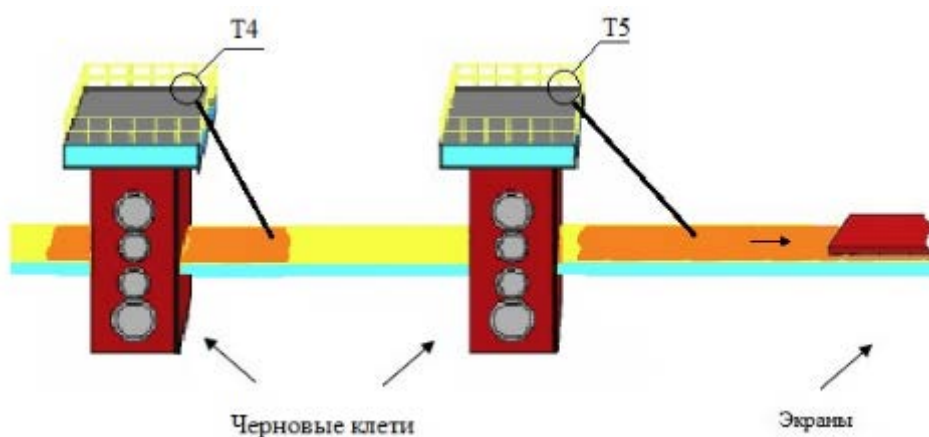


Рис. 2.5. Измерение температуры в черновых клетях: T4, T5 – позиции измерения температуры тепловизионной камерой Valtech

2) Измерения температуры на промежуточном рольганге проводились после теплосохраниющих установок с пешеходного мостика (рис. 2.6) перед чистой группой клетей. Расстояние от тепловизера до раската составляло не более 3 м.

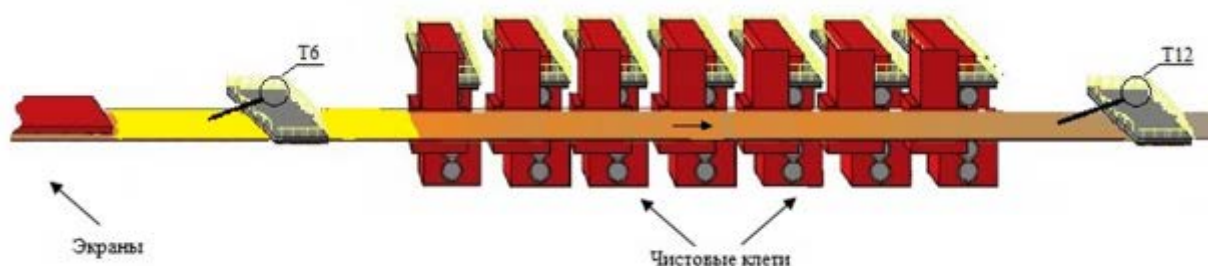


Рис. 2.6. Измерение температуры на участке чистовых клетей: T6, T12 – позиции измерения температуры тепловизионной камерой Baltech

На расстоянии порядка 5 метров после группы чистовых клетей также проводились замеры температуры в месте стационарного контроля температуры полосы с помощью промышленного пирометра, установленного в линии стана. Немного забегая вперед, необходимо отметить тот факт, что показания пирометров и данные о температуре в средней части полосы, полученные с помощью тепловизера с учетом информации, полученной в ходе эксперимента на установке Gleeble 3800, практически совпадали.

Для бесконтактного измерения температур полосы на стане 2000 используются инфракрасные пирометры производства компании Optris (Германия) модели STlaser 3MH2 (спектральный диапазон 2,3 мкм), с диапазоном измерения 200 - 1200 °С. Пирометры установлены за пятой клетью (рис. 2.7), после двенадцатой клетки, а также после установки ускоренного охлаждения. Информация с пирометров передается по каналам связи в контроллеры для обработки. После обработки данные средней температуры полосы передаются на ПУ-9 (пульт управления чистой группой клетей) - компьютер подсистемы “Пульт вальцовщика”. Анализируя полученные данные вальцовщик может осуществить корректировку скорости прокатки.

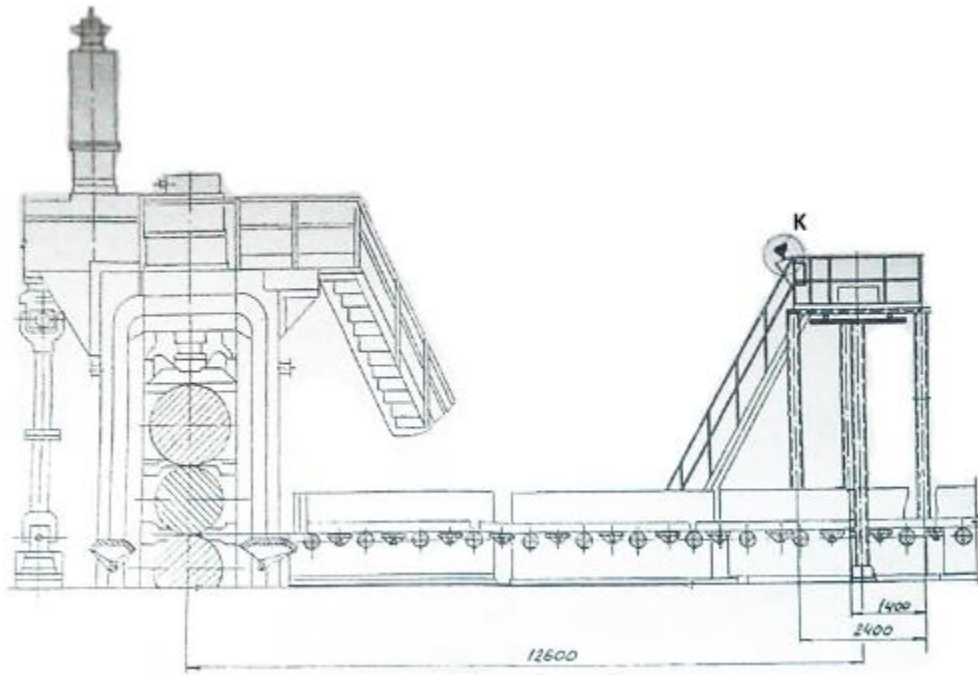


Рис. 2.7. Место установки пирометра Optris (K) за пятой клетью

После прокатки полосы информация о температурах сохраняется на сервере и может быть вызвана в любой момент инженером для проведения анализа. Например, по полученным данным температуры могут быть построены графики распределения температуры по длине раската (рис. 2.8).

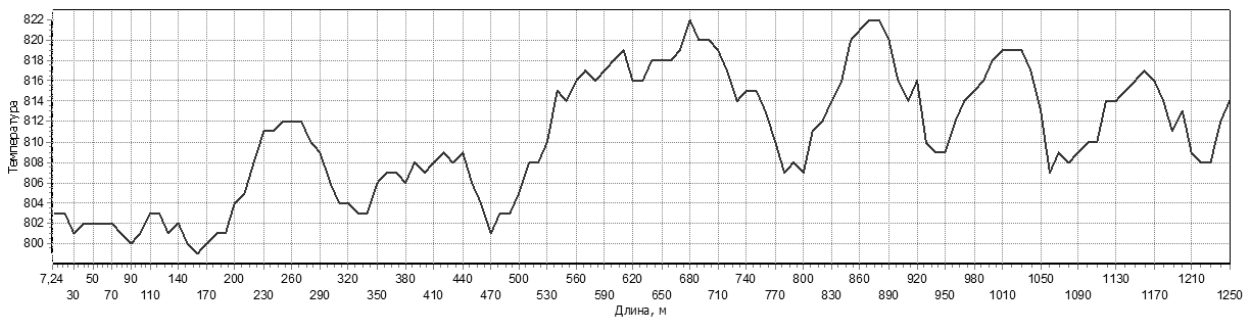


Рис. 2.8. Тренд температуры по длине после чистовой группы клетей

С данными, полученными от этих пирометров, и проводилась сверка результатов измерений.



3) Участок ускоренного охлаждения полосы. После секций ускоренного охлаждения полосы измерения температуры производились с вышки (рис. 2.9), предназначенной для установки штатного пирометра Optris.

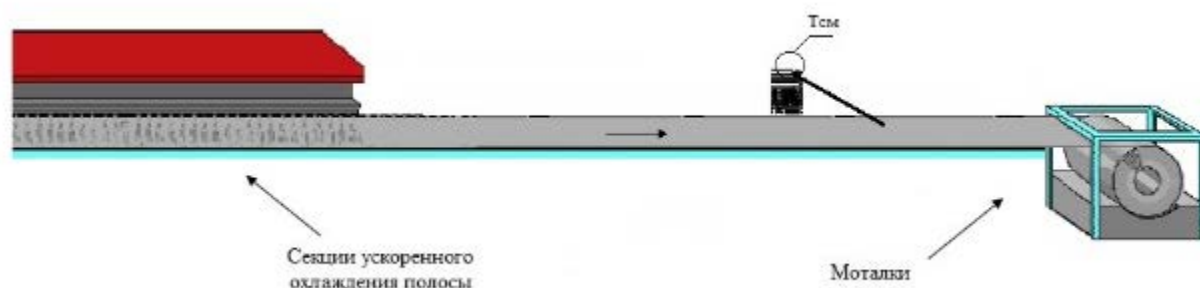


Рис. 2.9. Измерение температуры на участке смотки полосы: Тсм – позиция измерения температуры тепловизионной камерой Baltech

### 2.1.3 Обработка и анализ результатов исследования

Была осуществлена привязка измеренных температурных полей полос с помощью номеров плавок и профилеразмеров, а также марок стали прокатываемых полос. В результате исследования был получен большой объем информации как графической, так и числовой.

Для обработки данных, полученных в результате измерений, использовалась программа IRSee Report (рис. 2.10), поставляемая в комплекте с тепловизионной камерой BALTECH TR-1400. Термограммы, полученные с помощью тепловизионной камеры, передавались в программу. На изображении поверхности полосы проводилась горизонтальная линия для получения термопрофиля вдоль этой линии (за исключением обрезной кромки). Эти температуры для средней части полосы, полученные с помощью пирометров Optris, сопоставлялись с температурой в средней части полосы на термограмме, полученной с учетом величины коэффициента излучения по результатам экспериментов в Польше.

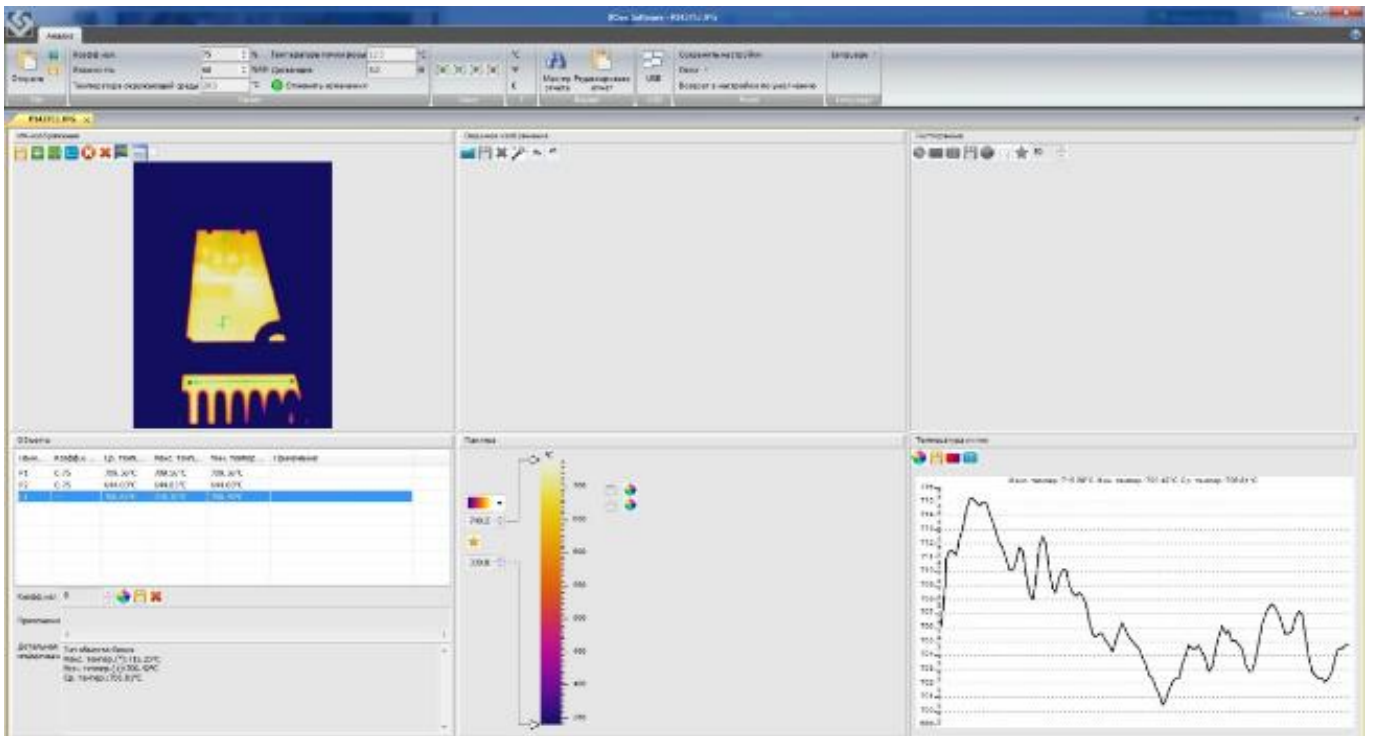
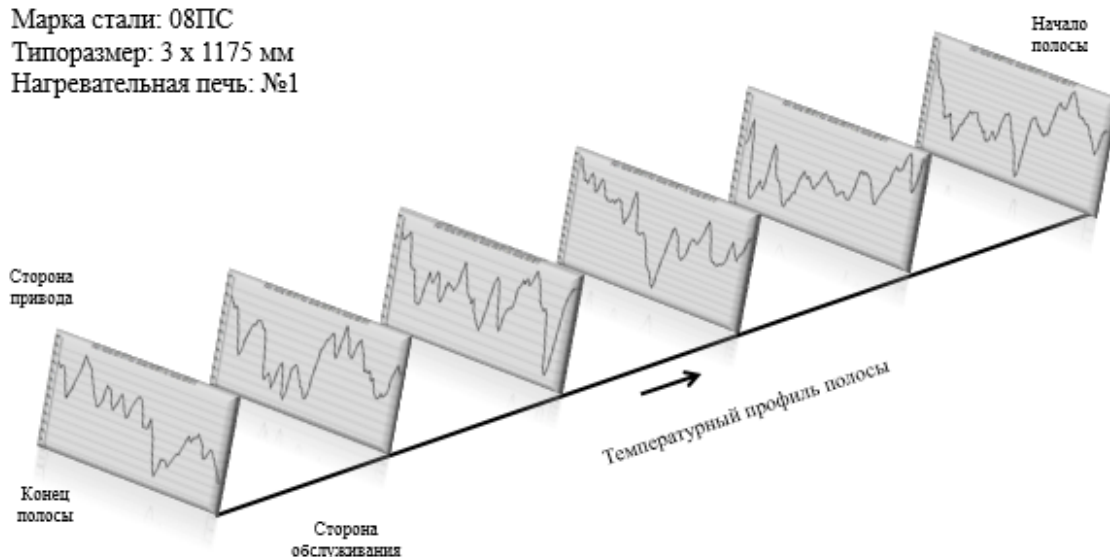


Рис. 2.10. Рабочее окно программы IRSee Report

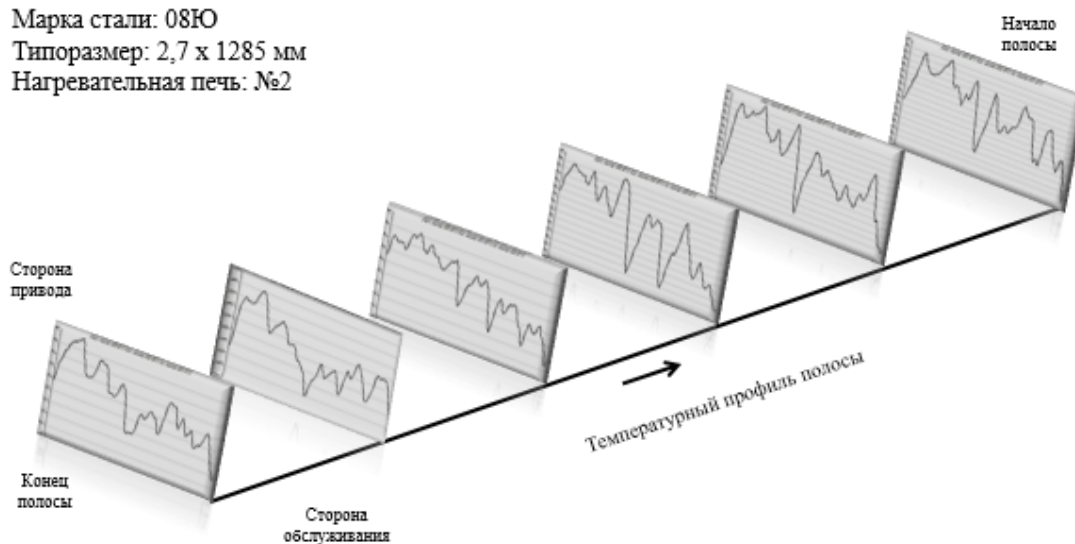
Помимо характера распределения оценивалась величина разницы температур раската между стороной привода и стороной обслуживания.

В качестве примера на рис. 2.11 представлено распределение температуры по ширине полосы для наиболее востребованных марок сталей.

Марка стали: 08ПС  
Типоразмер: 3 x 1175 мм  
Нагревательная печь: №1



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



Марка стали: 104  
Типоразмер: 2,2 x 1100 мм  
Нагревательная печь: №4

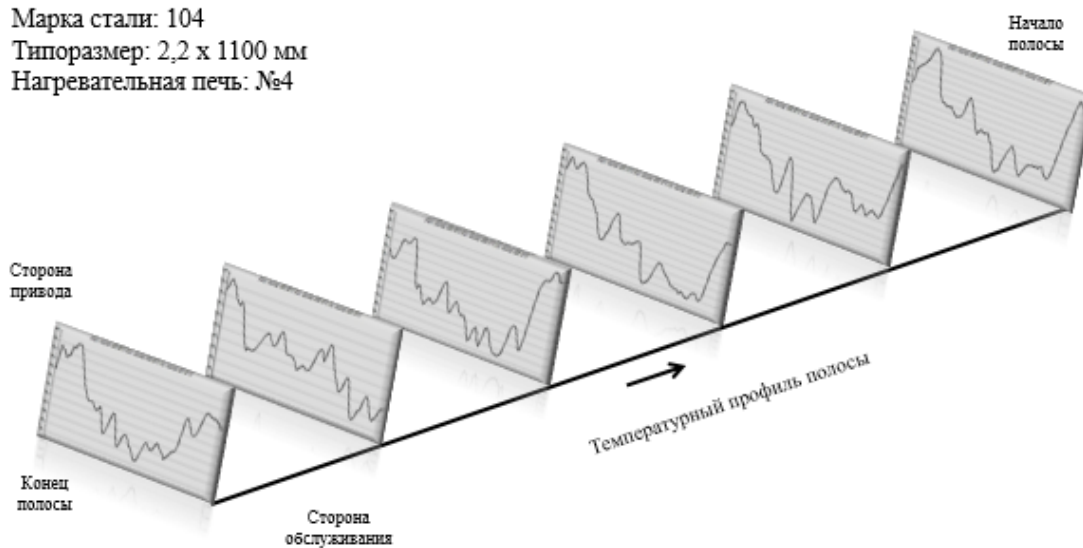


Рис. 2.11. Температурные профили полос после чистовой группы клетей  
НШСП 2000 ПАО «НЛМК»

Таким образом, были получены реально измеренные температуры, а также построены соответствующие графики распределения температурного поля на поверхности прокатываемых полос, основываясь на которых провели оценку неравномерности распределения температурного поля и нарушений геометрии листового проката.

## 2.2. Формирование неравномерного температурного поля при горячей прокатке полос

На участке черновой группы клетей температура раската измерялась после третьей, четвертой и пятой клетей стана. На рис. 2.12 представлены наиболее типичные распределения температуры по ширине прокатываемых полос.

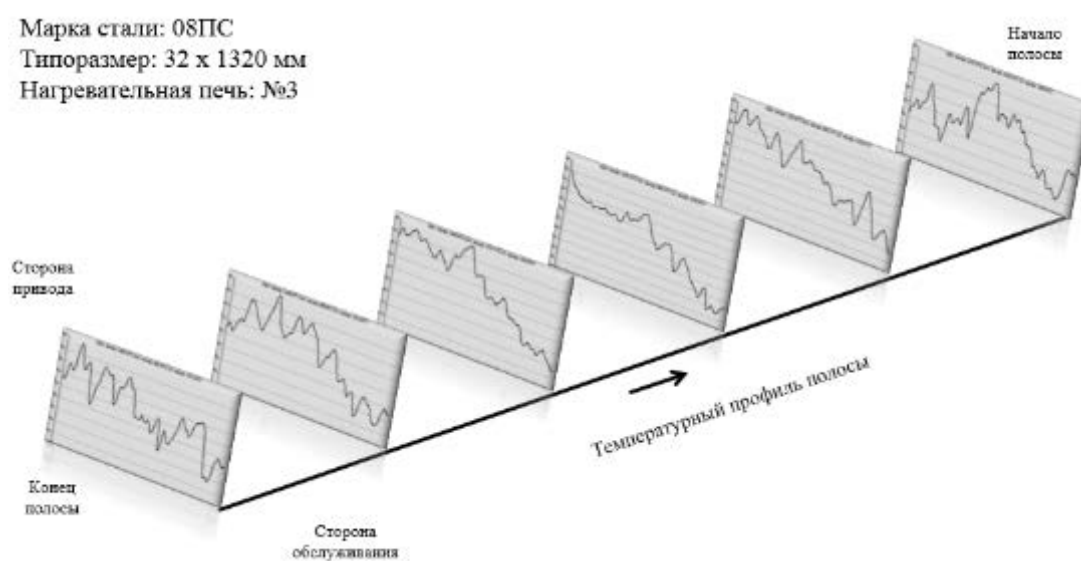
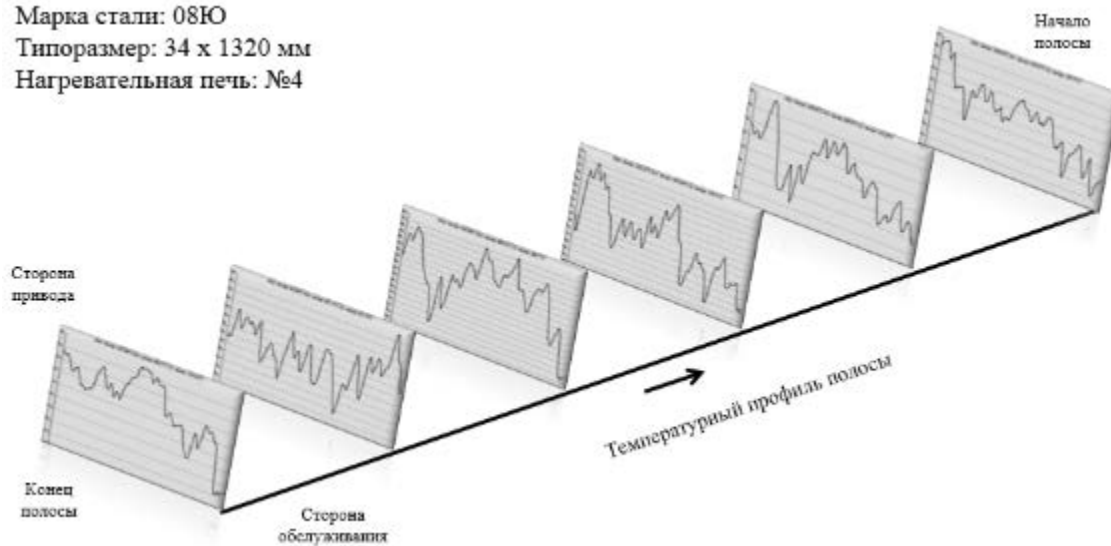
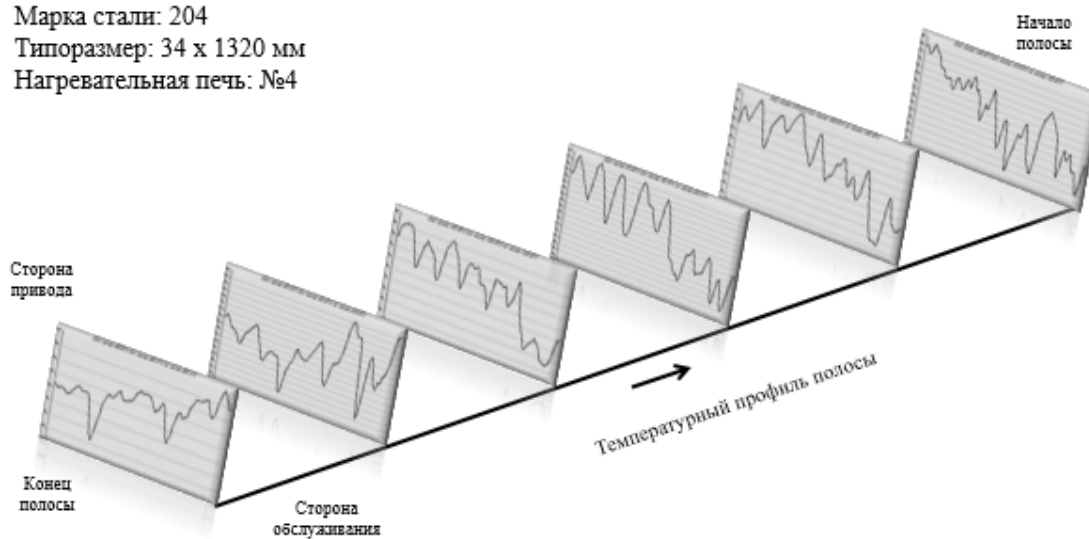


Рис. 2.12. Температурные профили полос за клетью №5 для различных марок сталей

Марка стали: 08Ю  
Типоразмер: 34 x 1320 мм  
Нагревательная печь: №4



Марка стали: 204  
Типоразмер: 34 x 1320 мм  
Нагревательная печь: №4



Марка стали: Ст3СП  
Типоразмер: 32 x 1320 мм  
Нагревательная печь: №4

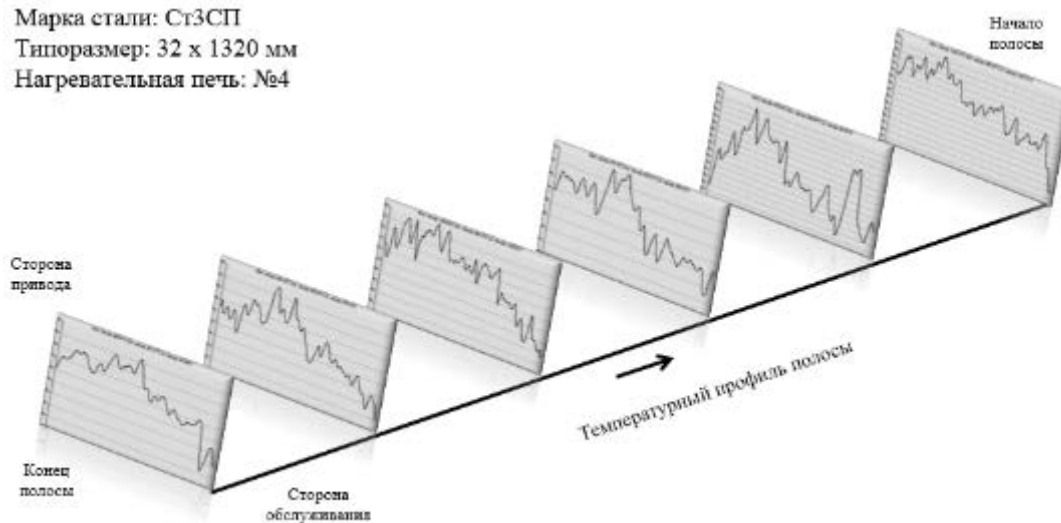


Рис. 2.12. (продолжение)

В результате анализа термограмм на этом участке был сделан вывод о том, что температура по ширине раската распределена неравномерно, наблюдается полосчатость, но при этом явно выражен температурный клин. Температура со стороны привода выше, чем температура со стороны обслуживания в независимости от типоразмера или марки стали. Температурный градиент составляет 40 - 60 °С за третьей клетью, на выходе из пятой черновой клетки стана разница в температуре между стороной привода и обслуживания составляет 25 - 35 °С.

Полосчатость на поверхности раската, о которой упоминалось в заключении ЗАО «Текно» [82], обусловлена конструктивными особенностями установки для гидросбива окалины (рис. 2.13). В общем виде об аналогичном факте упоминается в работе [83].

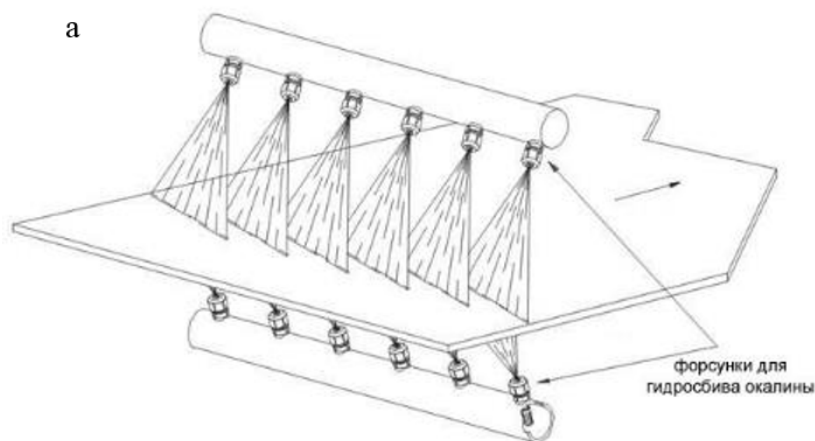


Рис. 2.13. Конструкция гидросбива окалины: а – принцип действия; б – настройка форсунок

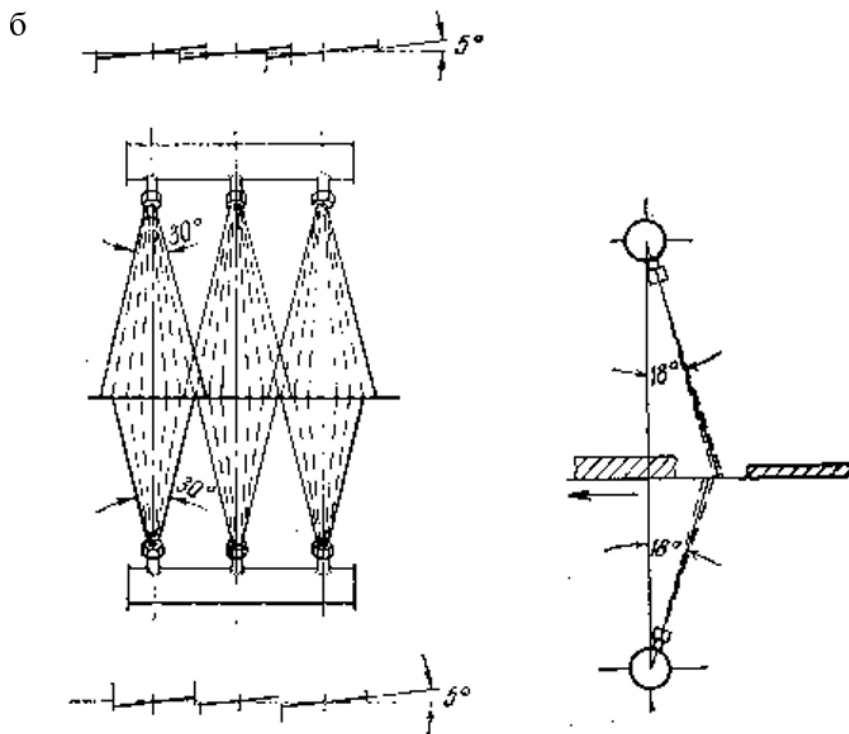


Рис. 2.13. (продолжение)

Уменьшение градиента температуры по мере прохождения раската в линии черновых клетей происходит из-за выделения тепла в результате деформации раската.

Для количественной оценки температуры, выделяемой за счет энергии деформации, можно воспользоваться формулой Ю.Д. Железнова [49]:

$$\Delta t = 0,42P_{cp} \log(h_0/h_1), \quad (2.1)$$

где  $P_{cp}$  – среднее давление металла на валки при горячей прокатке, МПа;

$h_0$  – толщина металла на входе в клеть, мм;

$h_1$  – толщина металла на выходе из клетки, мм.

Данную оценку возможно провести по измерениям усилия прокатки и толщине металла на входе и выходе из клетки, полученным из Автоматизированной Системы Управления Производством (СУП), для клетей черновой группы стана по длине полосы для стороны привода и стороны обслуживания.

Таким образом, повышение температуры за счет энергии деформации составляет порядка 15 - 20 °С. Температура на стороне обслуживания выделяется более интенсивно, что связано с большими усилиями, прикладываемыми к этой стороне полосы. Соответственно, температурный клин выравнивается, при этом температурный градиент уменьшается с 40 - 60°С за третьей клетью, до 25 - 35 °С на выходе из пятой черновой клетки стана.

Перед чистой группой клетей на промежуточном рольганге, происходит интенсивное образование окалины; в связи с этим был существенно затруднен анализ термограмм (порядка 60% термограмм не подлежало анализу (рис. 2.14).

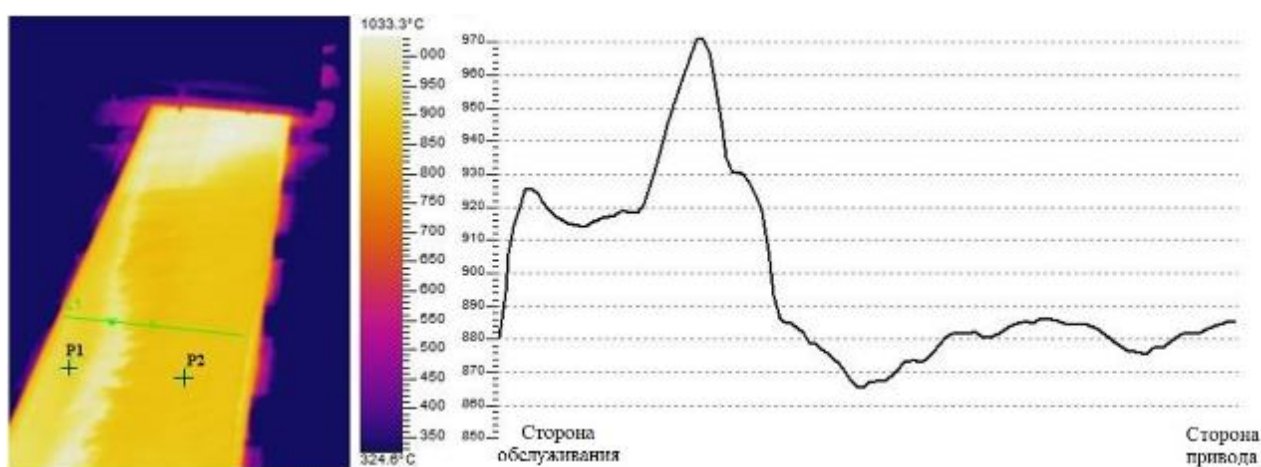


Рис. 2.14. ИК-изображение и распределение температуры по ширине для средней части полосы перед чистой группой клетей: P1 – участок полосы без окалины, P2 – участок полосы с окалиной.

На термограммах, пригодных для анализа, видно, что температурный клин, идущий с черновой группы клетей в головной части полосы, практически выравнивается, а по мере приближения хвостовой части полосы на некоторых полосах температура со стороны обслуживания становится даже выше, чем со стороны привода. Температурный градиент может составлять до 20 °С.

Выравнивание температуры, а также изменение температурного клина обусловлено конструктивными особенностями теплосохраниющих установок (рис. 2.15, 2.16).





Рис. 2.15. Общий вид секции теплосохраниющих установок

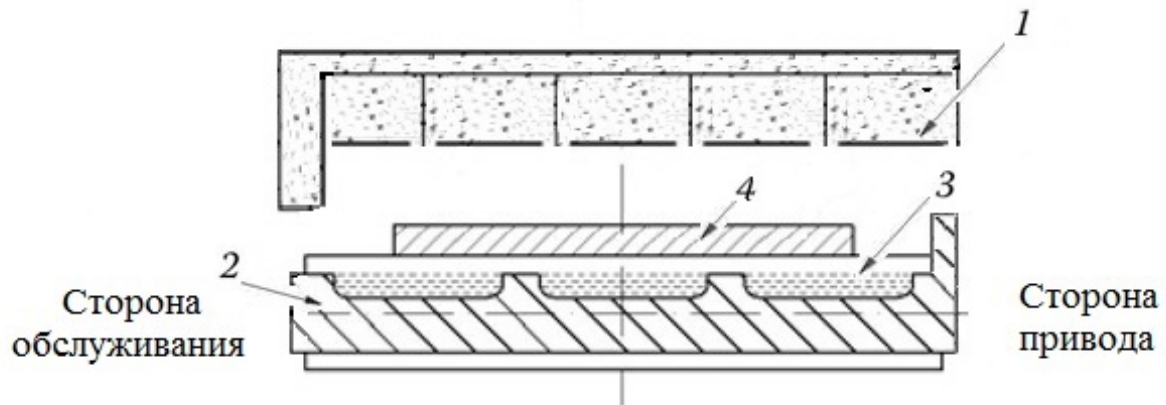


Рис. 2.16. Поперечный разрез секции теплосохраниющих установок: 1 – теплоаккумулирующие кассеты; 2 – межроликовые плиты; 3– воздушная окалина; 4 – подкат

Секции теплосохраниющих установок сконструированы таким образом, что в опущенном состоянии подкат закрыт теплоаккумулирующими кассетами сверху и со стороны обслуживания, а тепло со стороны привода уходит в атмосферу цеха беспрепятственно. В связи с этим подкат со стороны привода охлаждается более интенсивно.

На 85% термограмм, полученных после чистовой группы клетей, наблюдается неравномерное распределение температуры по ширине. Температура со стороны обслуживания ниже температуры со стороны привода

на 10 - 20 °С (рис. 2.17, 2.18). Выделяется небольшая группа полос (рис. 2.17), на которых неярко выражен температурный клин, а температура в средней части полос ниже температуры на краях. На оставшихся 15% термограмм температура распределена примерно равномерно. Из полученных данных можно сделать вывод о том, что есть некоторая наследственность температурного профиля полосы, он практически не изменяется в чистовой группе клеток.

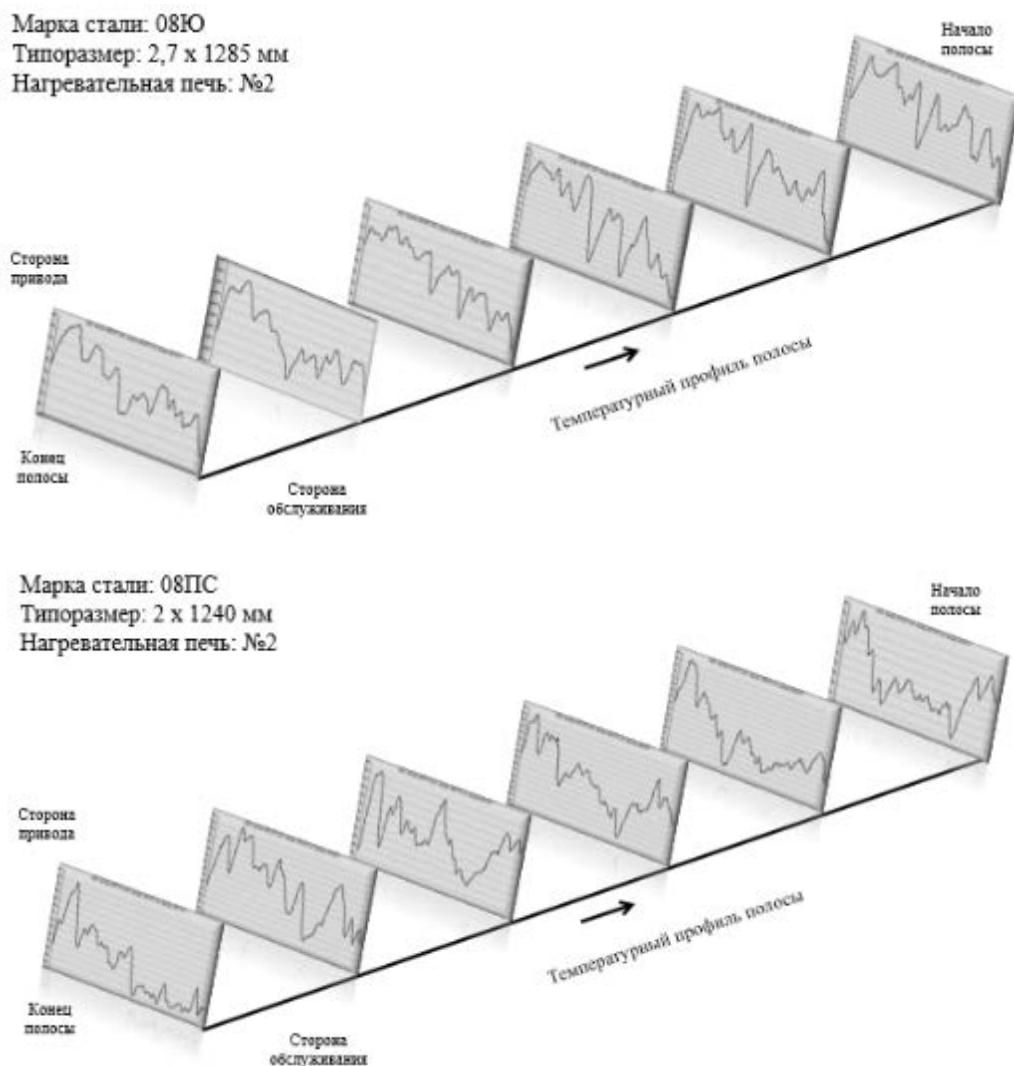


Рис. 2.17. Температурные профили полос за двенадцатой клетью для различных марок сталей (ярко выражен температурный клин)

Марка стали: 402  
Типоразмер: 2 x 1120 мм  
Нагревательная печь: №2

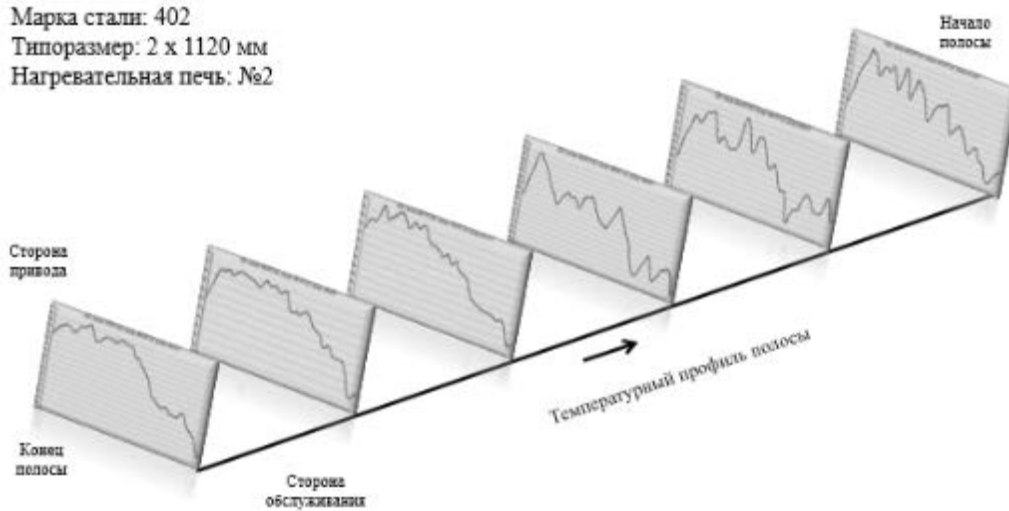


Рис. 2.17. (продолжение)

Марка стали: 08Ю  
Типоразмер: 2,7 x 1297 мм  
Нагревательная печь: №3

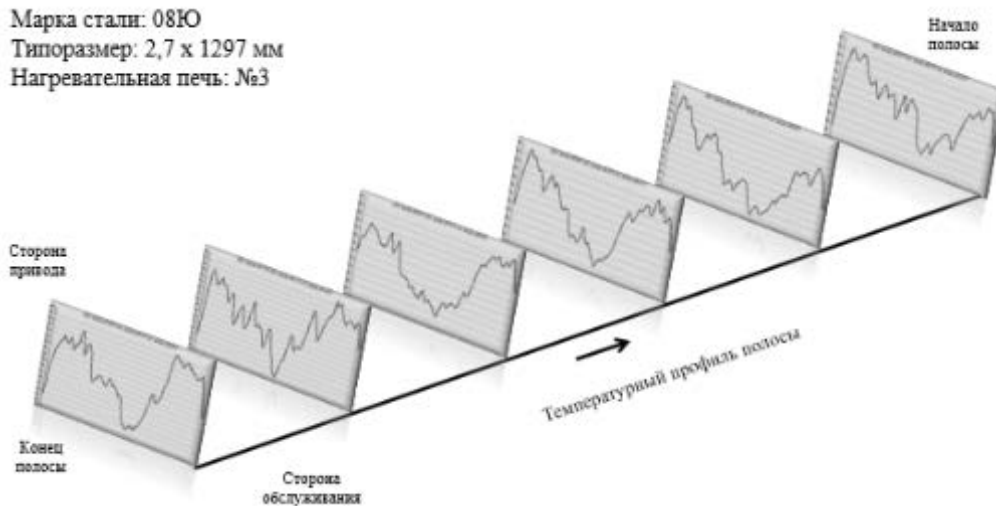


Рис. 2.18. Температурные профили полос за двенадцатой клетью для различных марок сталей

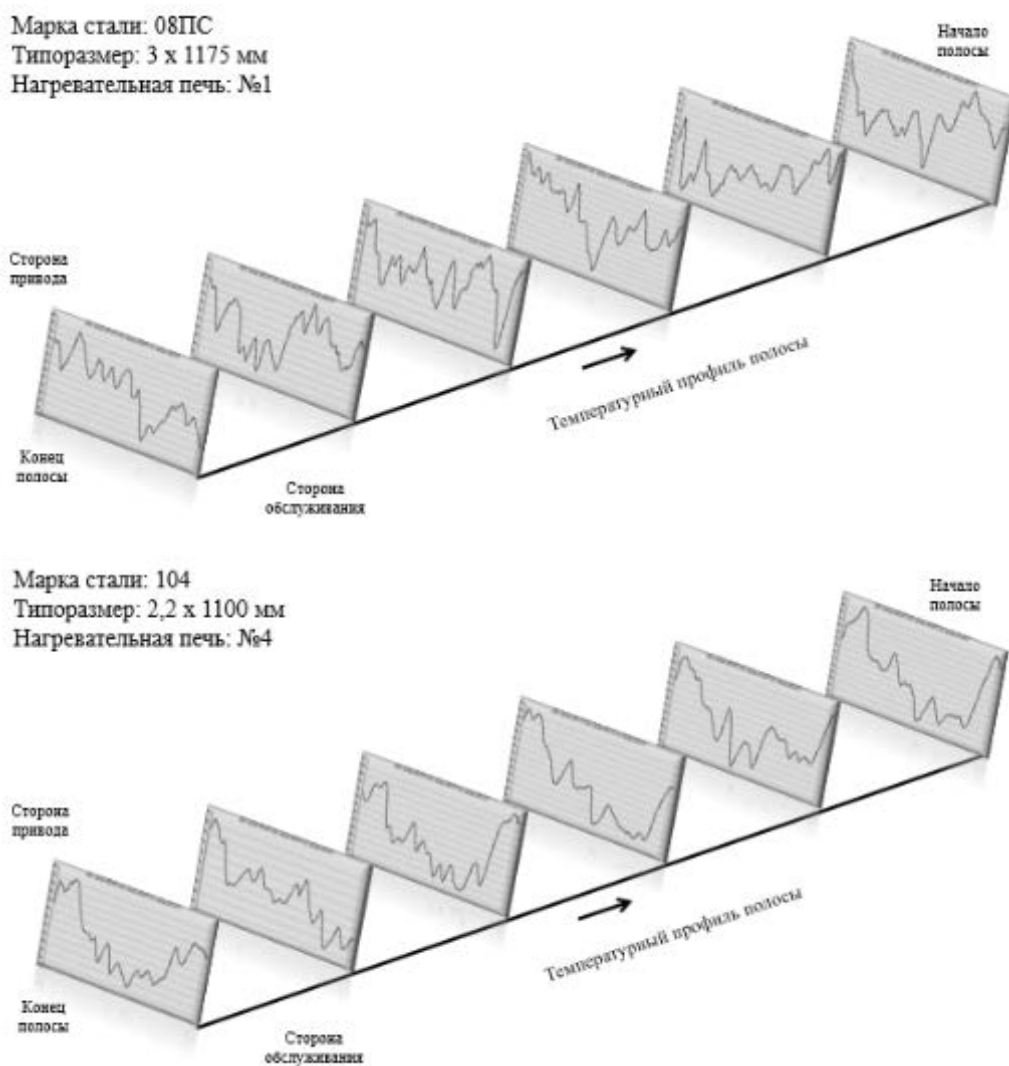


Рис. 2.18. (продолжение)

После секций ускоренного охлаждения полосы распределение температуры по ширине имеет неравномерный характер. Температура со стороны обслуживания ниже температуры со стороны привода. В зависимости от типа сталей температурный градиент варьируется от 5 – 10 °С для конструкционных марок сталей, до 10 - 15 °С - для электротехнических марок сталей.

Проведено сопоставление плоскостности готовых горячекатаных полос с их температурными профилями по сечениям (рис. 2.19). Величина нелоскостности полосы (волнистость и коробоватость) измерена в I-unit.

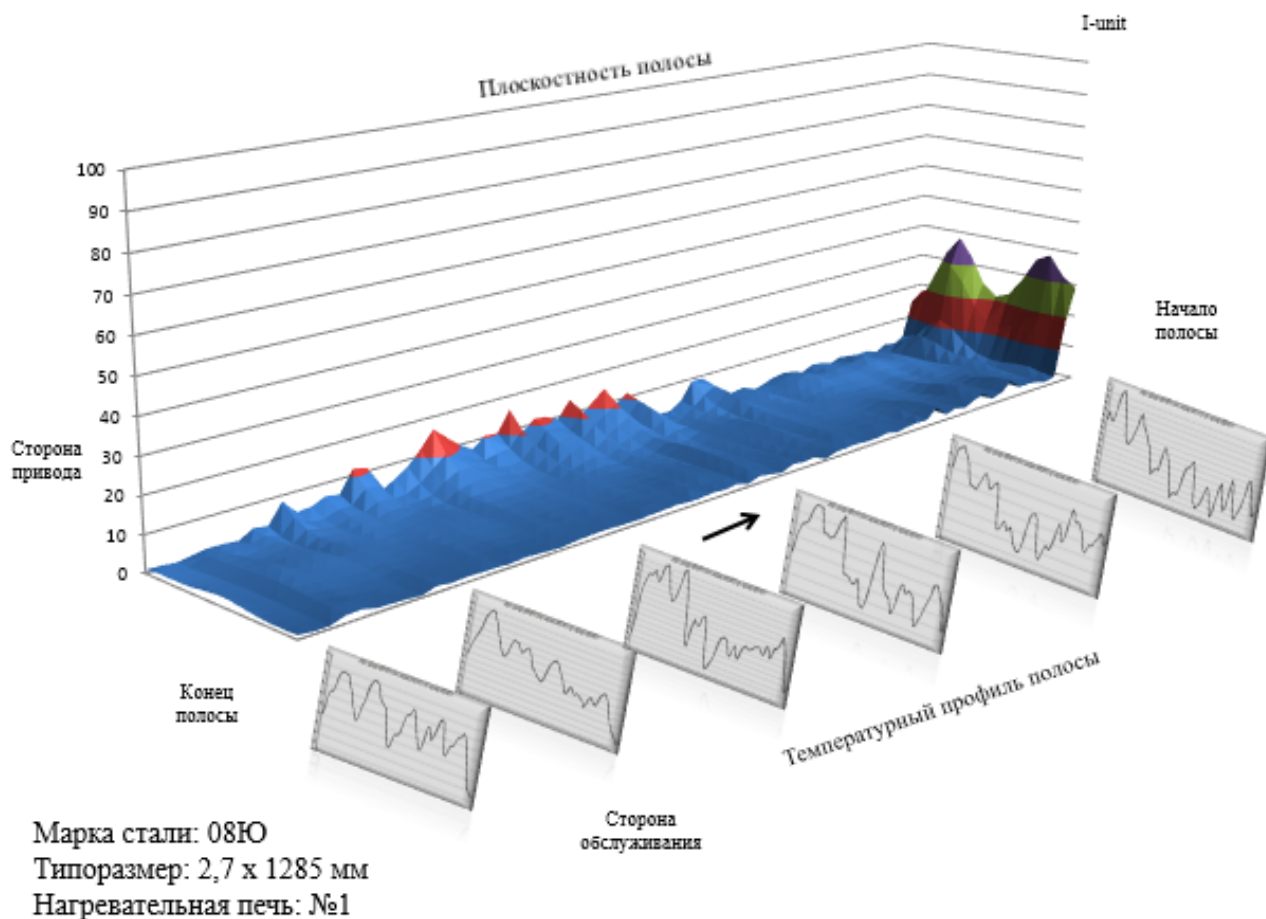
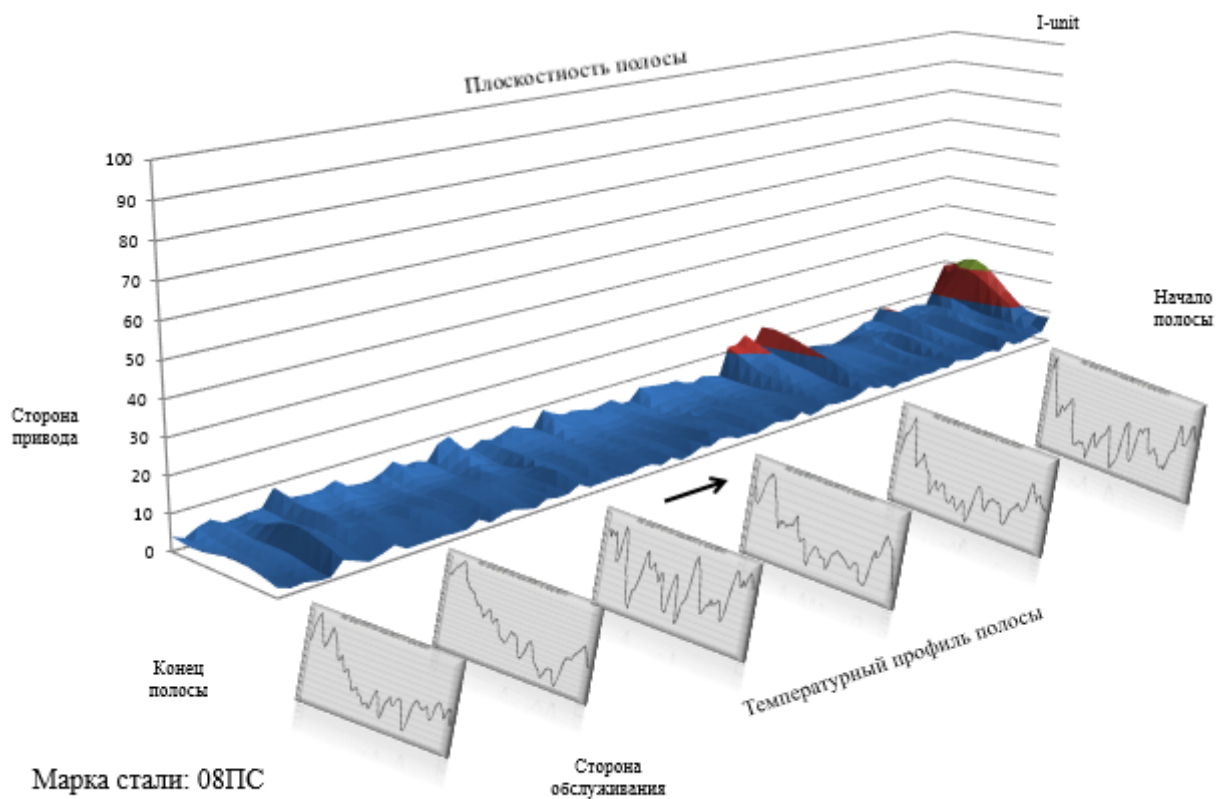
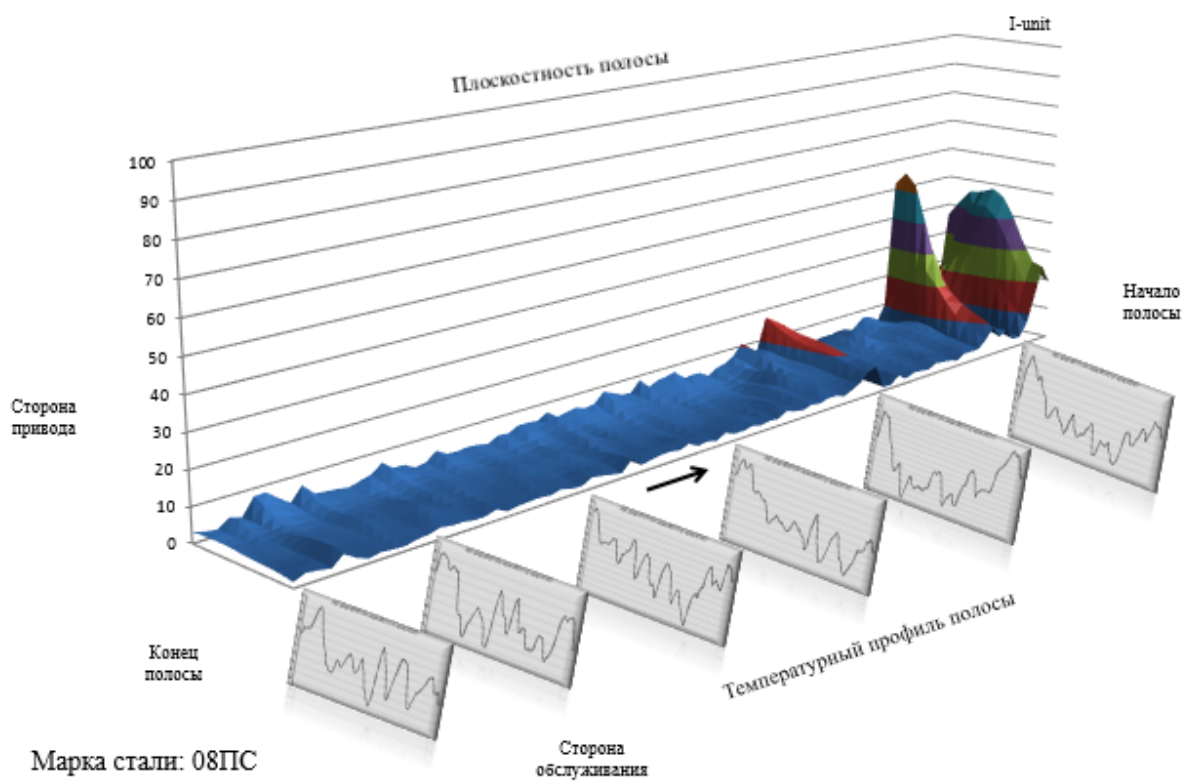


Рис. 2.19. Сопоставление плоскостности и температурных профилей полос для различных марок сталей

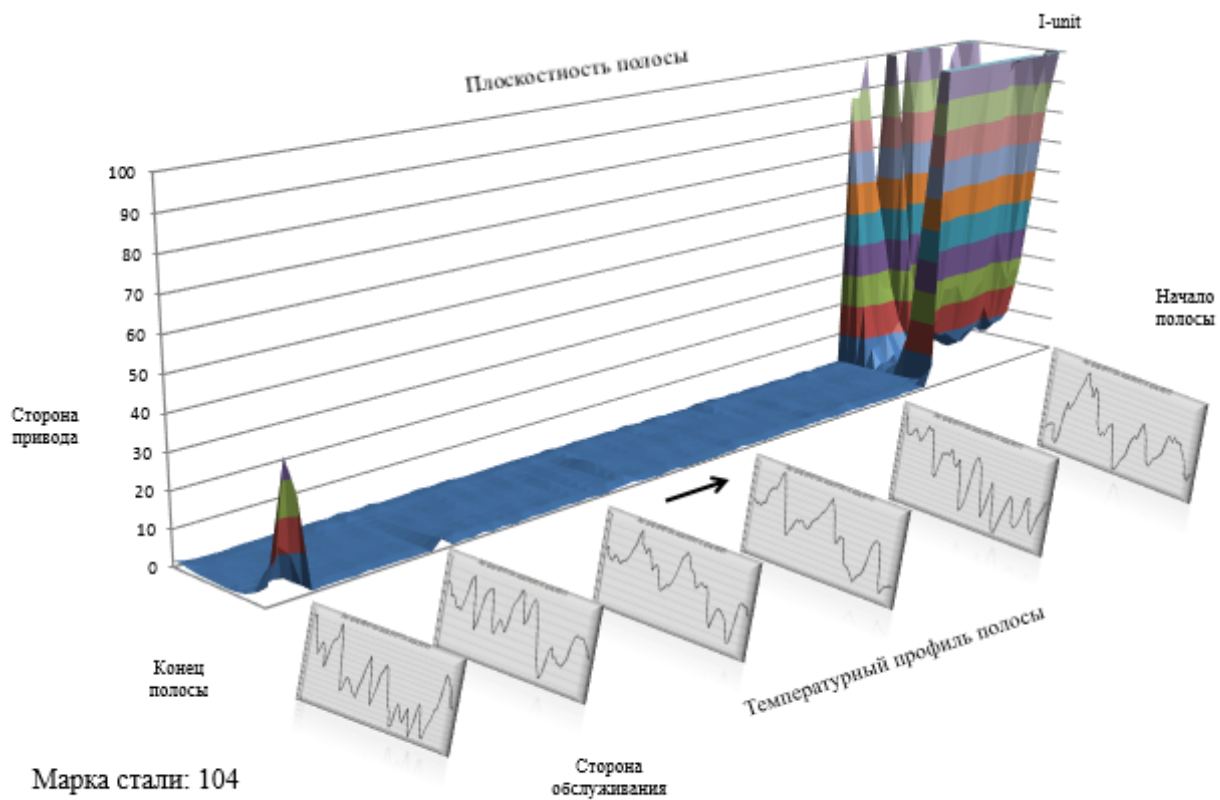


Марка стали: 08ПС  
 Типоразмер: 3,5 x 1135 мм  
 Нагревательная печь: №1

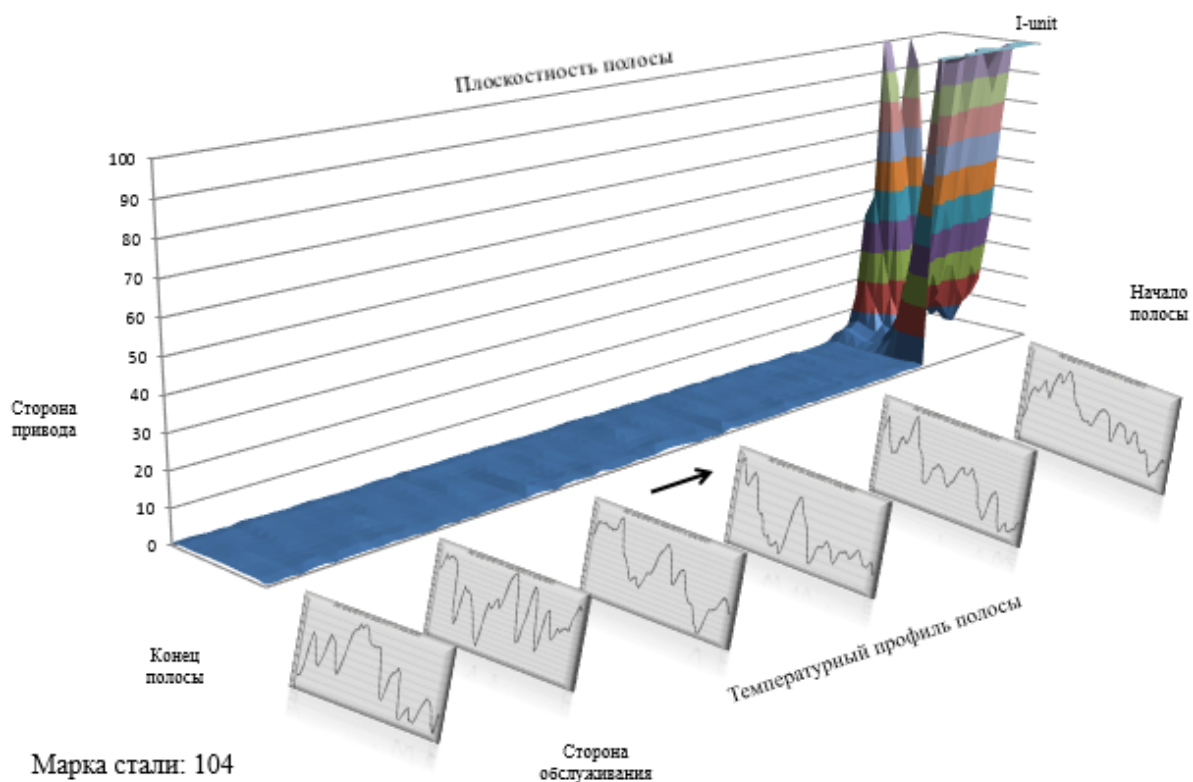


Марка стали: 08ПС  
 Типоразмер: 3,5 x 1135 мм  
 Нагревательная печь: №3

Рис. 2.19. (продолжение)

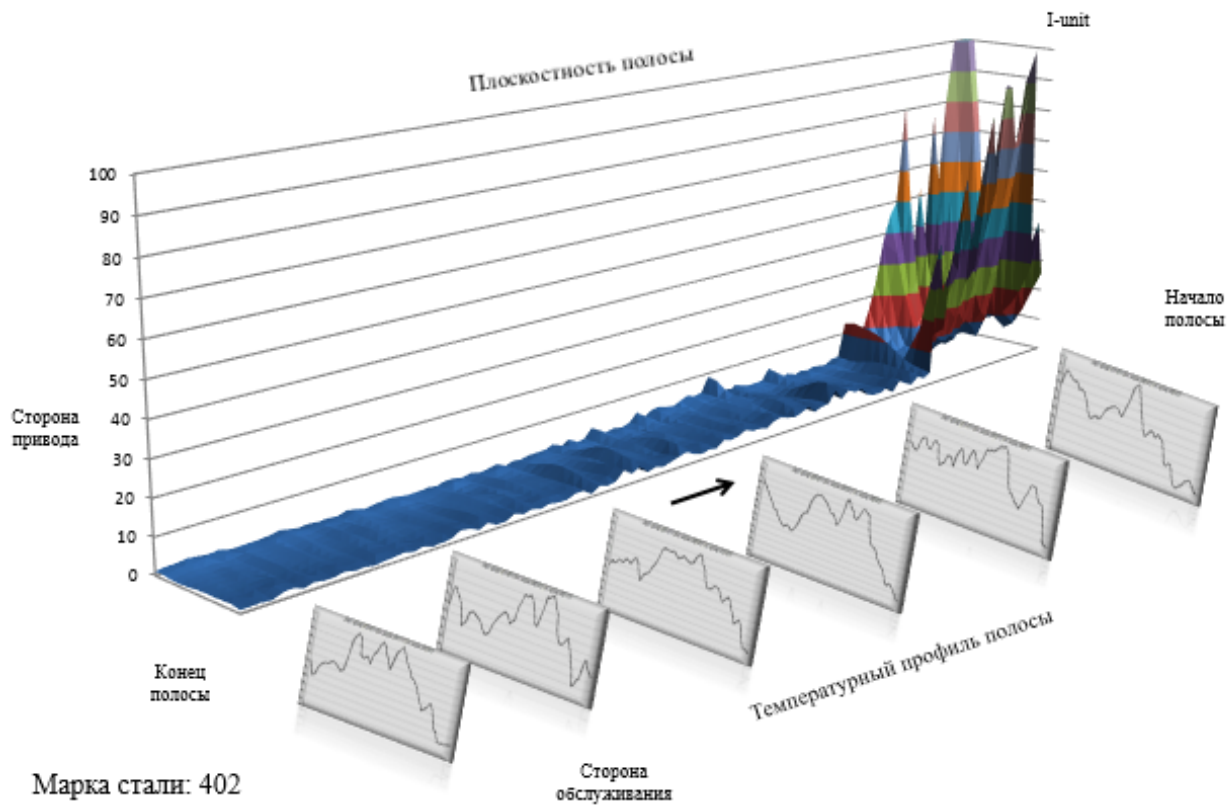


Марка стали: 104  
 Типоразмер: 2,2 x 1100 мм  
 Нагревательная печь: №3

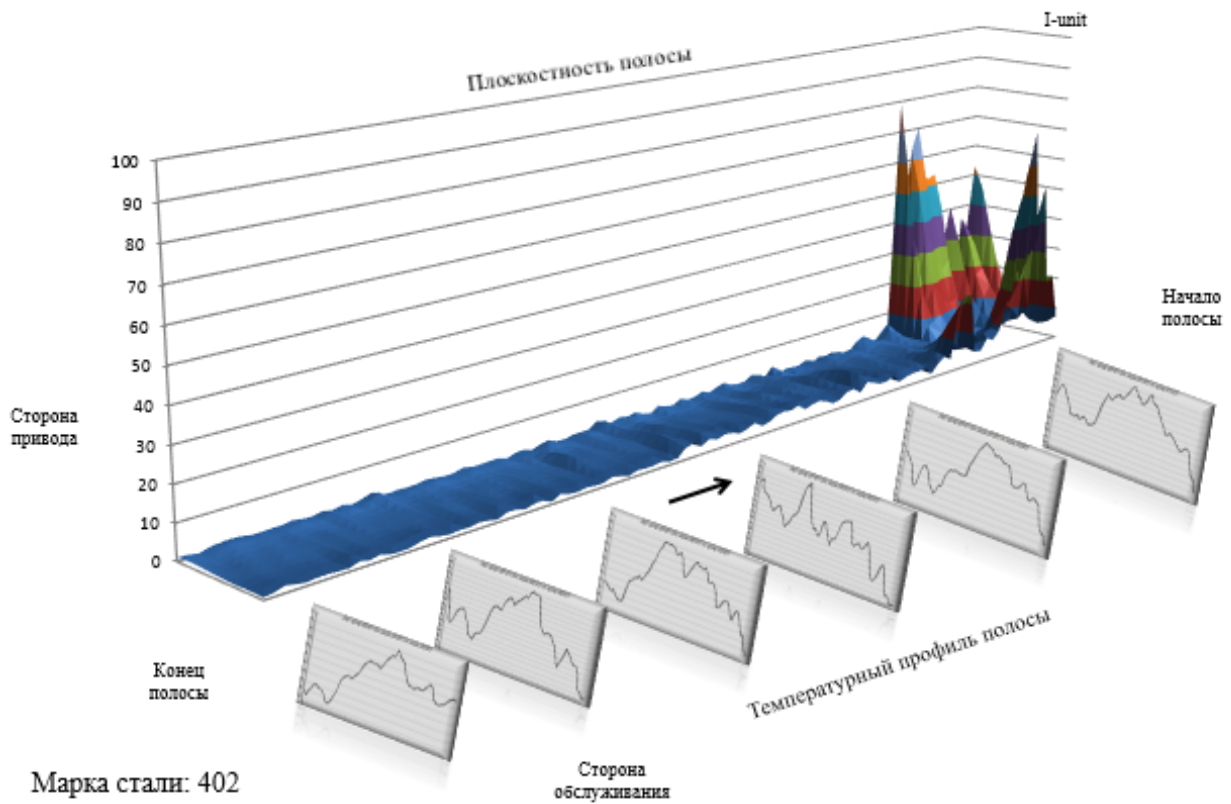


Марка стали: 104  
 Типоразмер: 2,2 x 1100 мм  
 Нагревательная печь: №4

Рис. 2.19. (продолжение)



Марка стали: 402  
 Типоразмер: 2 x 1100 мм  
 Нагревательная печь: №1



Марка стали: 402  
 Типоразмер: 2 x 1100 мм  
 Нагревательная печь: №4

Рис. 2.19. (продолжение)



Как видно из диаграмм на рис. 2.19, в месте образования волнистости со стороны привода (увеличенные значения неплоскостности) на термограммах температура более высокая: более горячей кромке соответствует *большая* вытяжка.

### 2.3. Выводы к второй главе

1. В условиях действующего производства на НШСП 2000 ПАО «НЛМК» проведено экспериментальное исследование закономерности распределения температурного поля и особенностей геометрических параметров горячекатаных полос.

2. Распределение температурного поля полос, прокатываемых в черновой группе клетей, характеризуется выраженным уменьшением температуры от левой кромки (сторона привода) к правой (сторона обслуживания). Уменьшение температуры обусловлено тем, что правая кромка сляба в позиции выгрузки находится ближе к заслонке методической печи и поэтому подстуживается.

3. Установлено, что в черновых клетях стана горячей прокатки вытяжка приводной кромки прокатываемых полос больше вытяжки кромки со стороны обслуживания. Этот эффект обусловлен неравномерным распределением температуры по ширине сляба (сторона привода горячее стороны обслуживания), вследствие чего между вертикальным окалиноломателем и первой черновой клетью на кромках горячекатаной полосы образуются наплывы металла, причем наплывы металла с приводной стороны, как правило, больше наплывов со стороны обслуживания.

4. Установлено, что перед чистовой группой клетей температурная неравномерность значительно уменьшается, а иногда даже изменяется на противоположную, что обусловлено конструктивными особенностями теплосохраниющей установки (ТСУ) и направлением движения воздушных

потоков. За чистой группой температурный перекоп становится менее выражен, хотя некоторая наследственность существует.

### 3. Математическая модель формообразование прокатываемых полос с учетом неравномерных свойств металла по ширине сляба

#### 3.1 Процесс формирования полосы серповидной формы

При рассмотрении процесса прокатки полос с профилем поперечного сечения клиновидной формы на НШСГП 2000 ПАО «НЛМК» было отмечено, что после прокатки «жесткого» металла без изменения перекоса межвалкового зазора клеток черновой группы существенно изменяется клиновидность на следующем за ним «мягком» металле и наоборот. Для анализа образования клиновидности поперечного сечения прокатываемых полос рассмотрим следующую схему прокатки с учетом неравномерных механических свойств по ширине сляба, например, из-за перекоса температурного поля (рис. 3.1).

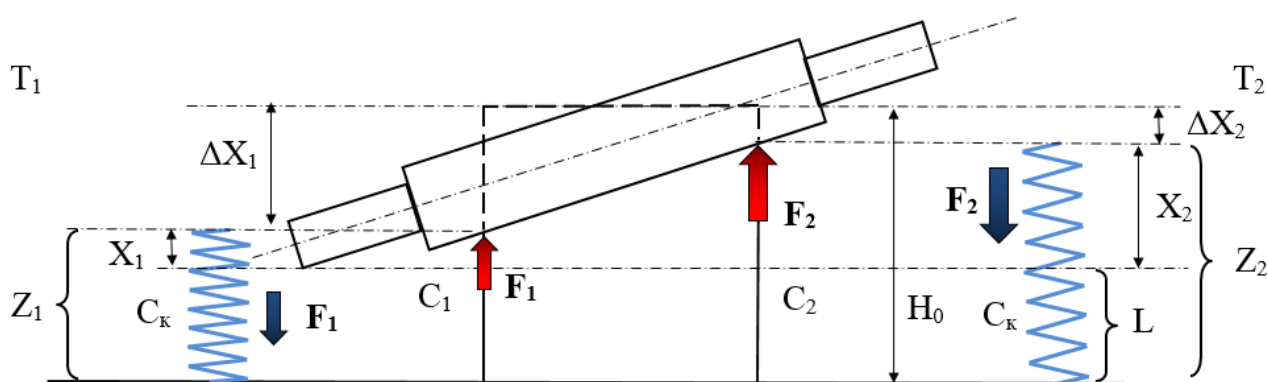


Рис. 3.1. Упрощенная схема образования клиновидности

Предположим, что сляб толщиной  $H_0$  имеет неравномерный нагрев, температура со стороны привода  $T_1$  выше, чем со стороны обслуживания  $T_2$  ( $T_1 > T_2$ ), соответственно, металл слева мягче, чем справа. Тогда схематично можно представить силы сопротивления металла пластической деформации 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  $C_k$ .

На рис. 3.1 следующие обозначения:

$L$  – исходная высота межвалкового зазора;

$Z_1$  – высота нагруженного межвалкового зазора со стороны привода;  
 $Z_2$  – высота нагруженного межвалкового зазора со стороны обслуживания;  
 $X_1$  – растяжение клетки со стороны привода;  
 $X_2$  – растяжение клетки со стороны обслуживания;  
 $\Delta X_1$  – обжатие со стороны привода;  
 $\Delta X_2$  – обжатие со стороны обслуживания;  
 $F_1$  и  $F_2$  – усилия прокатки со стороны привода и со стороны обслуживания.

Условие равновесия требуют равенства сил, действующих со стороны валка и полосы с каждой стороны, тогда:

$$C_k \times X_1 = F_1; \quad (3.1)$$

$$C_k \times X_2 = F_2. \quad (3.2)$$

Обозначим жесткости полосы со стороны привода и обслуживания соответственно  $C_1$  и  $C_2$ .

Выполним центрирование переменных с помощью стандартного приема:

$$\text{Для жесткости: } C = (C_2 + C_1)/2; \Delta C = (C_2 - C_1)/2$$

$$\text{Для обжатий: } \Delta X' = (\Delta X_1 + \Delta X_2)/2; \Delta X'' = (\Delta X_2 - \Delta X_1)/2$$

$$\text{Для растяжений: } X = (X_1 + X_2)/2; \Delta X^* = (X_2 - X_1)/2$$

Откуда:

$$\begin{cases} C_2 = C + \Delta C; C_1 = C - \Delta C \\ \Delta X_2 = \Delta X' - \Delta X''; \Delta X_1 = \Delta X' + \Delta X'' \\ X_2 = X + \Delta X^*; X_1 = X - \Delta X^* \end{cases} \quad (3.3)$$

Переписываем выражения (3.1) и (3.2) с учетом (3.3):

$$C_k(X - \Delta X^*) = (\Delta X' + \Delta X'')(C - \Delta C);$$

$$C_k(X + \Delta X^*) = (\Delta X' - \Delta X'')(C + \Delta C).$$

Почленным перемножением освободимся от скобок:

$$\Delta X' C + \Delta X'' C - \Delta X' \Delta C - \Delta X'' \Delta C = C_k X - C_k \Delta X^*; \quad (3.4)$$

$$\Delta X' C - \Delta X'' C + \Delta X' \Delta C - \Delta X'' \Delta C = C_k X + C_k \Delta X^*. \quad (3.5)$$

Почленно вычитая из выражения (3.4) выражение (3.5), получаем:

$$\Delta X'' C + \Delta X' \Delta C = -\Delta X^* C_k. \quad (3.6)$$

Замечаем, что  $\Delta X''$  равняется половине величины клиновидности полосы  $\frac{W}{2}$

, запишем:

$$\frac{W}{2}C - \Delta X' \Delta C = - \Delta X^* C_K. \quad (3.7)$$

Из рис. 3.1 также можно сделать вывод о том, что величина  $\frac{W}{2}$  равна  $\Delta X^*$ , тогда из (3.7) получаем:

$$\begin{aligned} \frac{W}{2}C - \Delta X' \Delta C &= - \frac{W}{2} C_K; \\ \frac{W}{2}C + \frac{W}{2} C_K &= \Delta X' \Delta C; \end{aligned} \quad (3.8)$$

В итоге зависимость клиновидности от разности жесткостей (температур) раската со стороны привода и обслуживания выглядит следующим образом:

$$W = \frac{2\Delta X' \Delta C}{C + C_K}. \quad (3.9)$$

Анализ выражения (3.9) позволяет сделать следующие выводы:

1. При равенстве жесткостей (температур) раската со стороны привода и обслуживания ( $\Delta C = 0$ ) клиновидность раската на выходе клетки равна нулю, что вполне объяснимо физически.

2. Чем больше общий уровень жесткости раската  $C$ , тем больше выражена тенденция к изменению клиновидности в положительную сторону при одной и той же разности жесткостей ( $\Delta C = const$ ).

Рассмотрим уравнение равновесия системы через действующие на нее силы, тогда, вычитая из выражения (3.2) выражение (3.1), получим:

$$\begin{aligned} C_K \times (X_2 - X_1) &= F_2 - F_1; \\ W &= X_2 - X_1; \\ W &= \frac{(F_2 - F_1)}{C_K}. \end{aligned} \quad (3.10)$$

Логично, что для компенсации возникающей клиновидности раската  $W$  необходимо создать перекосяк  $\Delta S$  (уменьшить зазор со стороны обслуживания или увеличить зазор со стороны привода), т.е. от правой части выражения (3.10) отнять постоянную величину  $\Delta S$ , равную отношению разности усилий со

стороны обслуживания и привода к жесткости клетки  $\frac{(F_2-F_1)}{C_k}$ . Приравняв это выражение нулю, получим условие равенства обжатий:

$$W = \frac{(F_2-F_1)}{C_k} - \Delta S = 0. \quad (3.11)$$

При переходе с «жесткого» металла на «мягкий» и одинаковом межвалковом зазоре усилие прокатки уменьшается, соответственно уменьшается и разность усилий  $(F_2 - F_1)$ . В свою очередь обжатия со стороны привода и обслуживания увеличиваются, так как уменьшается жесткость полосы  $C_1$  и  $C_2$ , а величина перекоса, остающаяся от предыдущего «жесткого» сляба, превышает необходимое значение. Таким образом, при переходе с «жесткого» сляба на «мягкий» клиновидность ухудшается в отрицательную сторону, и вальцовщику необходимо принимать меры по уменьшению величины перекоса валковой системы.

В Приложении А приведен пример изменения клиновидности при скачкообразном уменьшении усилия прокатки клетки №1 до и после перехода на следующий типоразмер (сравнение по печам). Изменение клиновидности полос представлено для перехода с прокатки стали марки 1006  $1,8 \times 1250$  мм на прокатку стали СтЗпс  $3,0 \times 1250$  мм 02.11.2013 г. (одинаковые времена нагрева и температуры за последней черновой клетью).

Из анализа графиков видно, что клиновидность изменилась в отрицательную сторону на 5 - 10 мкм при переходе с «жесткого» (марка 1006) металла на «мягкий» (марка СтЗсп).

Таким образом, нашел объяснение факт того, что в данном случае кромка полосы со стороны обслуживания в клетки №1 стана 2000 становится толще по отношению к кромке полосы со стороны привода, и в последующих клетях увеличивается вероятность получения серпа, что может привести к смещению полосы с линии прокатки.

Характер клиновидности на переднем и заднем концах объясняется отсутствием «внешних» зон, что способствует уменьшению усилия прокатки.

Эффективная жесткость металла на этих участках меньше по сравнению со средней частью.

В соответствии с упрощенной моделью на переднем и заднем концах полосы клиновидность изменяется в отрицательную сторону (рис.3.2).

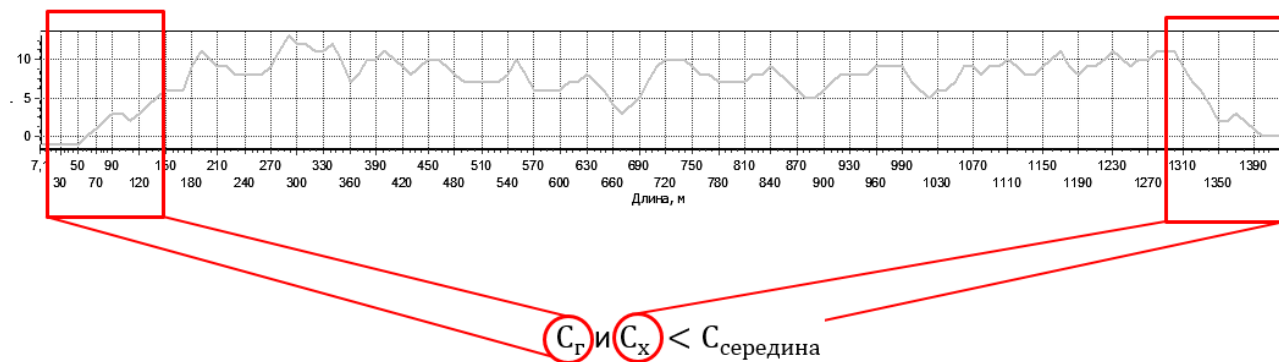


Рис. 3.2. Изменение клиновидности полосы по длине

### 3.2. Рекомендации по регулированию клиновидности полос в черновой группе клетей стана горячей прокатки

С учетом полученных результатов для вальцовщиков НШСГП 2000 ПАО «НЛМК» были разработаны рекомендации по компенсации клиновидности раската в черновой группе. Клиновидность раската может компенсироваться в линии стана за счет совместного использования системы RM-316 и регулирования перекоса межвалкового зазора клетки №1.

Данные о толщине кромок раската за клетью №5, а, соответственно, и величина клиновидности, становятся доступны вальцовщику черновой группы сразу же после прохождения раскатом измерительной рамки RM-316. Темп прокатки позволяет вальцовщику оценить полученные данные и при необходимости осуществить корректировку величины перекоса валков клетки №1 на слябах, следующих за прокатанным.

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.

Перекосы горизонтальных валков черновых клетей №№ 3-5 главным образом служат для устранения серповидности раската, получившейся из-за некорректной настройки перекосов валков клетей №1-№2.

Таким образом, при появлении клиновидности раската за клетью № 5 вальцовщикам черновой группы рекомендовано изменять перекося горизонтальных валков клетки № 1 противоположно клиновидности в соответствии с Таблицей 3.1.

Таблица 3.1

Рекомендуемые величины коррекции перекося межвалкового зазора клетки № 1

Ширина готовой полосы, мм	Клиновидность за клетью № 5, мкм	Величина перекося межвалкового зазора, мм	
		При прокатке без реверса в клетки № 1	При прокатке с реверсом в клетки № 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

### 3.3. Выводы к третьей главе

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

2. Разработаны рекомендации по предупреждению образования клиновидности поперечного сечения горячекатаных полос с учетом неравномерных свойств металла по ширине сляба:

- при переходе с прокатки «жесткого» металла на прокатку «мягкого» увеличивать высоту межвалкового зазора клетки №1 на стороне обслуживания, и,



соответственно, действовать наоборот при переходе с прокатки «мягкого» металла на прокатку «жесткого».

#### 4. Математическая модель образования серповидности горячекатаных полос с учетом поперечных перемещений металла в очаге пластической деформации

В процессе образования серповидности полосы при горячей прокатке подката с профилем поперечного сечения клиновидной формы существенную роль играют поперечные перемещения металла в очаге пластической деформации (рис. 4.1).

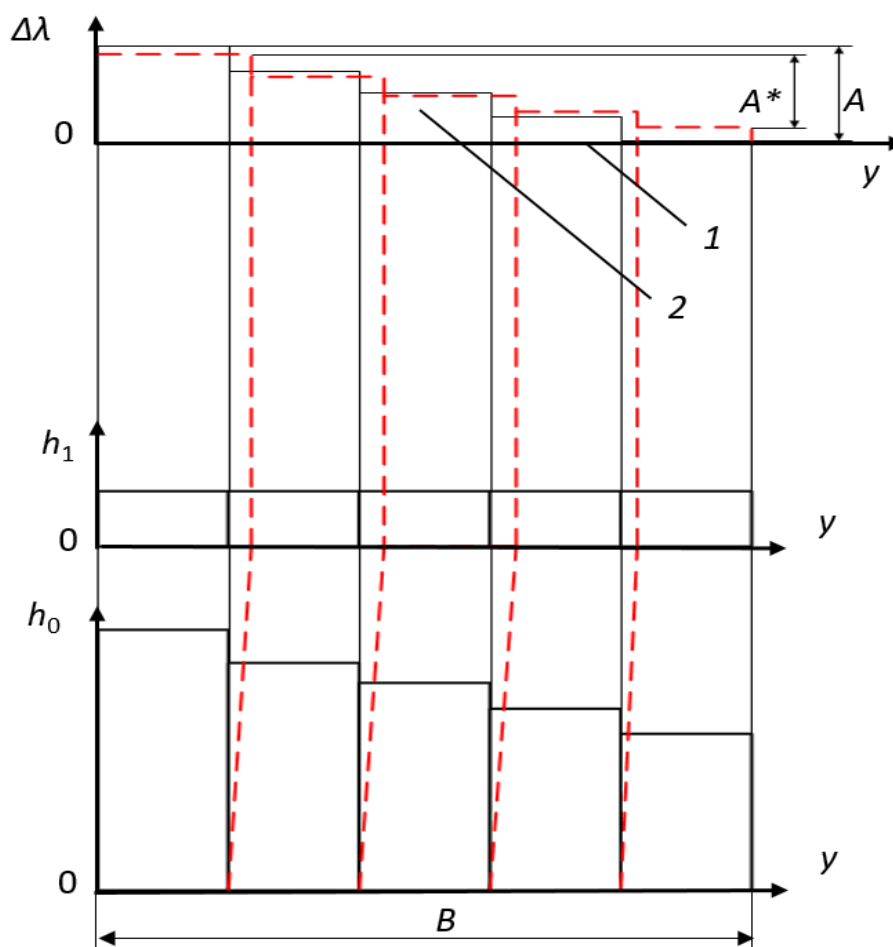


Рис. 4.1. Схема уменьшения неравномерности вытяжек по ширине полосы из-за поперечного перемещения металла в очаге деформации:

$B$  – 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 разности вытяжек по ширине полосы в предположении плоской схеме деформации

(ломаная 1);  $A^*$  – амплитуда разности вытяжек по ширине полосы с учетом поперечных перемещений металла в очаге деформации (ломаная 2).

Если предположить плоскую схему деформации, то амплитуда разности вытяжек  $\Delta\lambda$  по ширине полосы была бы равной величине  $A$ , но с учетом поперечных перемещений металла в очаге деформации (пунктирная линия) величина разности вытяжек по ширине полосы уменьшится, и амплитуда  $\Delta\lambda$  станет равной  $A^* < A$ .

#### 4.1. Мощность прокатки при образовании серповидности полосы с учетом поперечных перемещений металла в очаге деформации

Предположим, что в очаг деформации входит полоса с клиновидным профилем поперечного сечения, причем толщина по ширине полосы изменяется линейно от  $(h_{0m} + \delta h_m)$  до  $(h_{0m} - \delta h_m)$ , где  $h_{0m}$  – толщина в середине полосы на входе в очаг деформации (рис. 4.2), при этом на выходе из очага деформации толщина полосы одинакова по всей ширине и равна  $h_1$ . При неравномерном обжатии полосы по ширине в очаге деформации возникают поперечные перемещения металла [58,84-85].

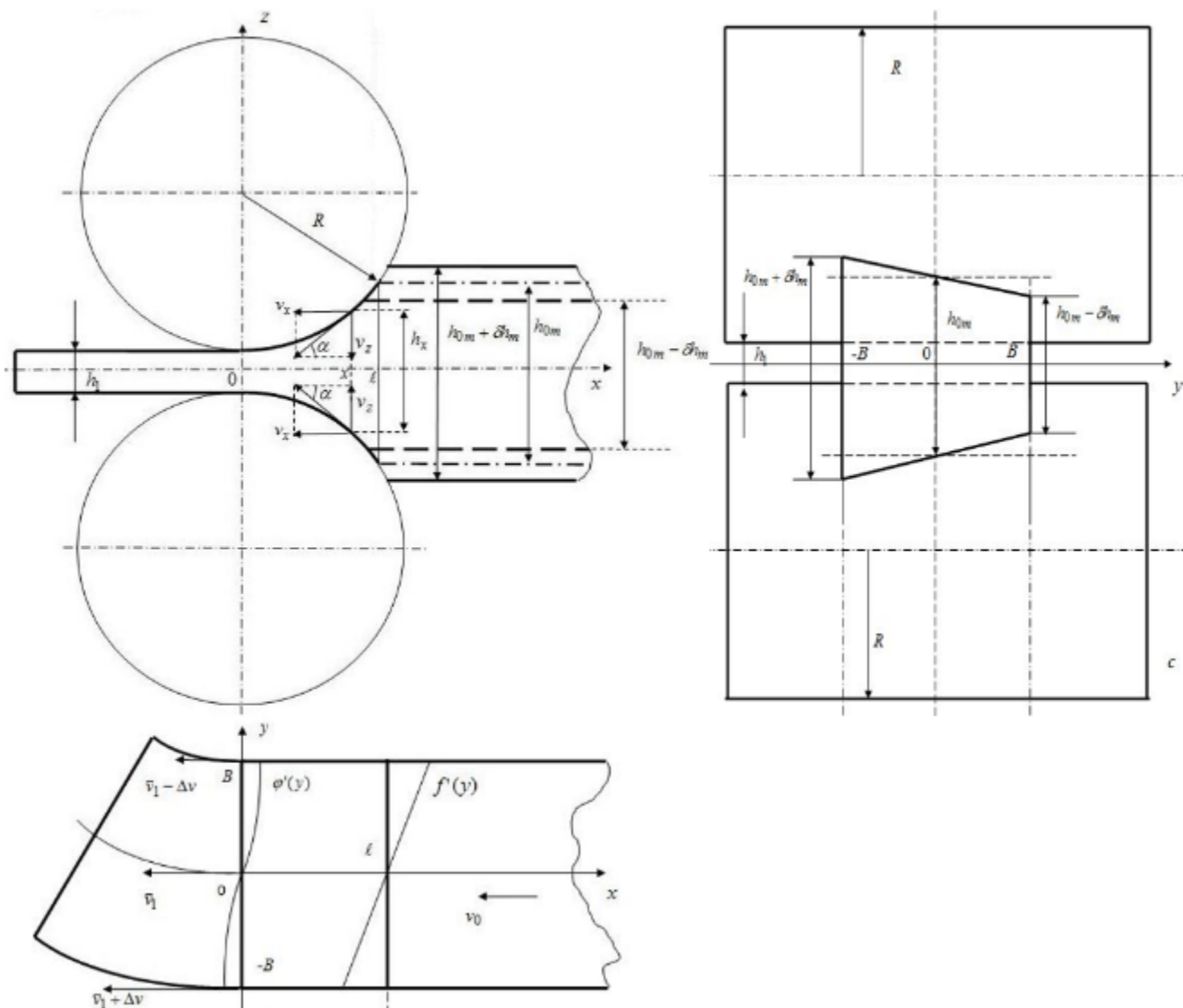


Рис. 4.2. Процесс формирования серповидности полосы при горячей прокатке

Влияние поперечных перемещений металла в очаге деформации на выравнивание вытяжек по ширине учитывается коэффициентом  $\rho$  [58, 90-93]:

$$\delta \frac{\Delta\lambda(y)}{\lambda} = \rho \left( \frac{\delta h_0(y)}{h_{0m}} - \frac{\delta h_1(y)}{h_{1m}} \right), \quad (4.1)$$

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

В нашем случае толщина полосы на выходе из очага деформации не изменяется  $\delta h_1(y) = 0$ , а на входе изменение толщины  $\delta h_0(y)$  имеет линейный характер и изменяется линейно от  $(h_{0m} + \delta h_m)$  на левой кромке ( $y = -B$ ) до  $(h_{0m} - \delta h_m)$  на правой кромке ( $y = +B$ ) (рис. 2, б), где  $B$  – полуширина полосы.

На входе в очаг пластической деформации отмечается неравномерность высотной деформации, продольных напряжений, скоростей течения металла по ширине полосы. Так как величина деформационных и скоростных неравномерностей существенно мала по сравнению с их среднеинтегральными значениями, то обобщенно эту неравномерность можно выразить как неравномерность скоростей входа металла в очаг деформации.

Входную неравномерность скоростей опишем функцией  $f'(y) \ll 1$ , а выходную –  $\varphi'(y) \ll 1$  [58]. В частном случае при плоской схеме деформации  $f'(y) = \varphi'(y)$ .

Для очага пластической деформации выбрали модель жёстко-пластической среды с упругими внешними зонами. Считаем, что металл, не обладая упругостью в очаге деформации (при достаточно больших пластических деформациях упругими можно пренебречь), сразу же приобретает ее на выходе из очага деформации.

Принято условие, что прокатка ведется без уширения, т.е.  $f(0) = f(B) = 0$  и  $\varphi(0) = \varphi(B) = 0$ .

Для такого очага деформации, применив вариационный принцип Журдена [70], мы получим следующее уравнение:

$$\delta \left( \tau_s \iiint_{\Omega} H d\Omega - \iint_S \bar{\sigma}^n \bar{v} ds + \tau_s \sum_{i=1}^n \iint_{S_i} |\Delta v_i| ds \right) = 0 \quad (4.2)$$

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

Выражение (4.2) также можно представить в виде суммы мощностей  $N_{\Sigma} = (N_{\text{внутр}} + N_{\text{скольж}} + N_{\text{изгиб}} + N_{\text{срез}})$ .

Выражение, заключенное в круглые скобки (4.2), 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, расходуемая на пластический изгиб полосы при образовании серповидности, четвертый - мощность среза.

Продольное распределение скоростей течения металла по ширине полосы может быть представлено следующим образом: неравномерность скоростей течения металла по ширине полосы на входе в очаг деформации переходит в неравномерность скоростей течения металла по ширине полосы на выходе из очага деформации пропорционально обжатую:

$$v_x(y) = \bar{v}_x \left[ 1 + f'(y) \frac{h_{xm} - h_1}{\Delta h} + \varphi'(y) \frac{h_{0m} - h_{xm}}{\Delta h} \right], \quad (4.3)$$

где  $\Delta h = h_{0m} - h_1$  - абсолютное обжатие,  $h_{xm} = h_1 + \Delta h \left(\frac{x}{l}\right)^2$  - текущая толщина полосы в очаге деформации, аппроксимированная квадратичной параболой;  $l$  - длина очага деформации;  $v_x(y)$  - распределение продольных скоростей течения металла по ширине полосы в поперечном сечении по оси  $x$ , отнесенное к окружной скорости валка  $v_r$ ;  $\bar{v}_x$  - значение продольной скорости металла, усредненное по ширине полосы, в поперечном сечении  $x$ , отнесенное к окружной скорости валка  $v_r$ ;  $\bar{v}_0$  и  $\bar{v}_1$  - усредненное значение продольной скорости полосы на входе и выходе из очага деформации, отнесенное к окружной скорости валка  $v_r$ .

Из выражения (4.3) следует, что на входе в очаг деформации  $v_x(l) = \bar{v}_x [1 + f'(y)]$ , а на выходе  $v_x(0) = \bar{v}_x [1 + \varphi'(y)]$ .

В соответствии с законом постоянства секундных объемов  $h_1 \bar{v}_1 = h \bar{v}_x$ , где  $h = h_{xm}$  - текущая толщина в середине полосы в очаге деформации, получим среднее по ширине значение скорости металла в поперечном сечении  $x$ :

$$\bar{\xi}_x = \frac{\partial \bar{v}_x}{\partial x} = -\frac{h_1 \bar{v}_1}{h^2} h' = -\frac{\bar{v}_x h'}{h}. \quad (4.4)$$

Отсюда:

$$\bar{v}_x = -\bar{\xi}_x \frac{h}{h'}. \quad (4.5)$$

На основе (4.1) - (4.5) получим выражение для скорости деформации  $\xi_x$ :

$$\xi_x = \frac{\partial v_x}{\partial x} = \bar{\xi}_x \left[ 1 + \frac{\varphi' h_{0m} - f' h_1}{\Delta h} \right], \quad (4.6)$$

где  $\bar{\xi}_x = \frac{\partial \bar{v}_x}{\partial x}$  - среднее значение скорости деформации металла по оси  $x$ .

Исходя из условия кинематической допустимости скоростей на поверхности валка:  $\frac{v_z}{v_x} = \operatorname{tg} \alpha = \frac{1}{2} \frac{\partial h}{\partial x} = \frac{h'}{2}$ , и, допуская, принимая во внимание, что степень деформации постоянна по высоте, получим  $\xi_z = \frac{v_z}{z}$ . На поверхности полосы  $\xi_z = v_x \frac{h'}{h}$ . Учитывая выражения (4.3) и (4.5), получим:

$$\xi_z = -\bar{\xi}_x \left[ 1 + f' \frac{h-h_1}{\Delta h} + \varphi' \frac{h_{0m}-h}{\Delta h} \right]. \quad (4.7)$$

Из условия несжимаемости среды получим выражение для скорости деформации вдоль оси  $y$ :

$$\xi_y = \bar{\xi}_x (f' - \varphi') \frac{h}{\Delta h}. \quad (4.8)$$

Проинтегрировав (4.8) по  $y$ , получим выражение для скорости течения металла в поперечном направлении:

$$v_y = \frac{-\bar{v}_x h'}{\Delta h} (f' - \varphi'). \quad (4.9)$$

Интенсивность скоростей деформации вычисляем, пренебрегая влиянием деформаций сдвига. Используя выражения (4.6), (4.7) и (4.8) получим:

$$H = 2\sqrt{\bar{\xi}_x^2 - \xi_y \xi_z} = |\bar{\xi}_x| \cdot \left\{ 2 + f' \left[ \frac{h-2h_1}{\Delta h} \right] + \varphi' \left[ \frac{2h_{0m}-h}{\Delta h} \right] + (f')^2 \left[ \frac{h_1^2 - hh_1 + h^2}{(\Delta h)^2} \right] + (\varphi')^2 \left[ \frac{h_{0m}^2 - hh_{0m} + h^2}{(\Delta h)^2} \right] + f' \varphi' \left[ \frac{-2h_1 h_{0m} + h_{0m} h + h_1 h - 2h^2}{(\Delta h)^2} \right] \right\}. \quad (4.10)$$

Для того, чтобы рассчитать мощность внутренних сопротивлений, необходимо проинтегрировать выражение (4.10) в соответствии с уравнением (4.2) и спецификой выбранной модели среды:

$$\frac{N_{\text{внутр}}}{\tau_s} = \int_{-B}^B \int_0^l \int_0^h H dy dx dz. \quad (4.11)$$

Мощность трения скольжения между валками и полосой:

$$\frac{N_{\text{скольж}}}{\tau_s} = 4\mu \int_{-B}^B dy \int_0^l |\Delta v_{sl}| dx = 4\mu \int_{-B}^B dy \int_0^l \sqrt{|\Delta v_{\tau}^2 + v_y^2|} dx,$$

где  $\Delta v_{sl}$  скорость перемещения металла на поверхности валка,  $\Delta v_{\tau} = v_x - 1$  - скорость перемещения металла на поверхности валка в направлении прокатки, отнесенная к окружной скорости валка  $v_r$ ;  $\mu$  - коэффициент трения.

После несложных преобразований получим:

$$\frac{N_{\text{скольж}}}{\tau_s} = 4\mu l \int_{-B}^B dy \int_0^1 \frac{\Delta h}{h} \sqrt{(t^2 - t_n^2)^2 + \left[ \frac{2\bar{v}_1 h_1}{l \Delta h} \cdot t \cdot (\varphi - f) \right]^2} dt \quad (4.12)$$

где  $t = \frac{x}{l}$ ;  $t_n = \frac{x_n}{l}$ ;  $x_n$  - нейтральное сечение.

На рис. 4.1 представлен изгиб полосы в поперечной плоскости на выходе из очага деформации (формирование серповидности полосы).

Для вычисления мощности пластического изгиба полосы рассмотрим распределение скорости течения металла на выходе из очага деформации (рис. 4.3). На рис. 4.3 следующие обозначения:  $v_{1m} = \bar{v}_1$  - средняя по ширине скорость полосы на выходе из очага деформации;  $\Delta v_m$  - приращение скорости течения металла на выходе из очага деформации.

## 4.2. Мощность образования серповидности и уравнении Эйлера-Пуассона

На рис. 4.1 представлен изгиб полосы в поперечной плоскости на выходе из очага деформации (формирование серповидности полосы).



Для вычисления мощности пластического изгиба полосы рассмотрим распределение скорости течения металла на выходе из очага деформации (рис. 4.3). На рис. 4.3 следующие обозначения:  $v_{1m} = \bar{v}_1$  - средняя по ширине скорость полосы на выходе из очага деформации;  $\Delta v_m$  - приращение скорости течения металла на выходе из очага деформации.

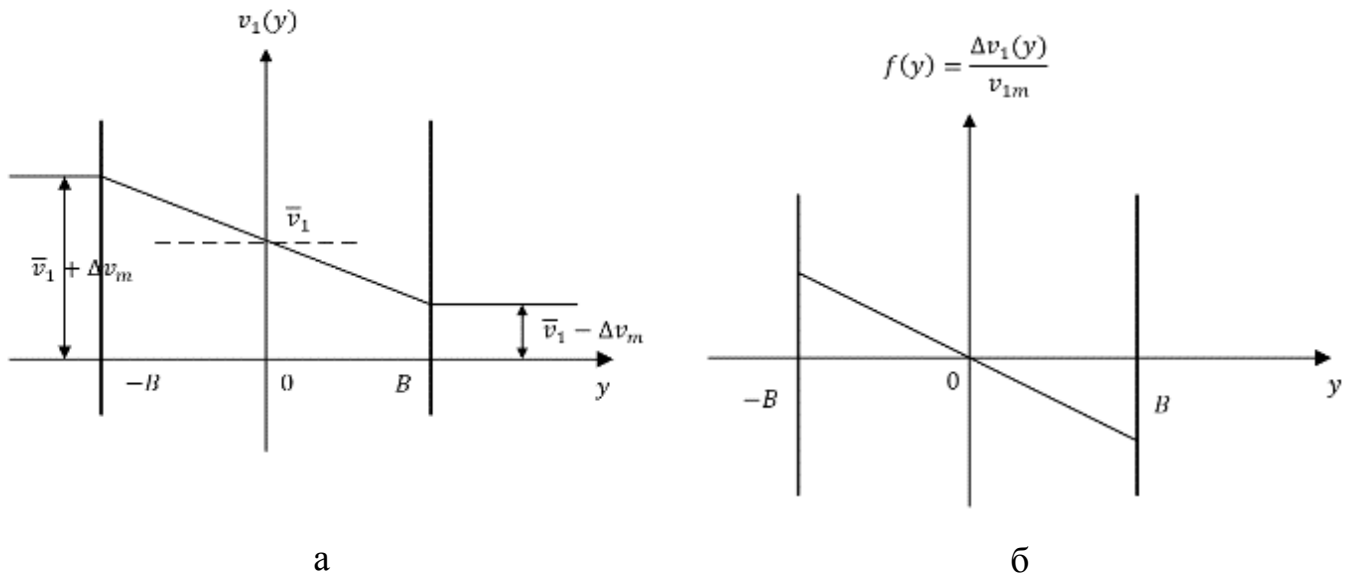


Рис. 4.3. Распределение скоростей течения металла на выходе из очага

деформации: а –  $v_1(y)$ ; б –  $f(y) = \frac{\Delta v_1(y)}{v_{1m}}$

В течение единицы времени выходное поперечное сечение перемещается из положения 1-1 в положение 2-2 с углом поворота и радиусом, равными соответственно  $\varphi$  и  $R_t$  (рис. 4.4). Тогда мощность изгиба будет равна:

$$N_{\text{изгиб}} = M_t \cdot \omega_t, \quad (4.13)$$

где  $M_t$  - изгибающий момент полосы;  $\omega_t$  - угловая скорость вращения поперечного сечения полосы на выходе из очага деформации.

Определим радиус перемещения поперечного сечения:

$$\frac{\bar{v}_1 - \Delta v_m}{R_t} = \frac{\bar{v}_1 + \Delta v_m}{R_t + 2B},$$

$$R_t = B \frac{\bar{v}_1 - \Delta v_m}{\Delta v_m}. \quad (4.14)$$

Угловая скорость перемещения поперечного сечения:

$$\omega_t = \frac{\Delta v_m}{B}. \quad (4.15)$$

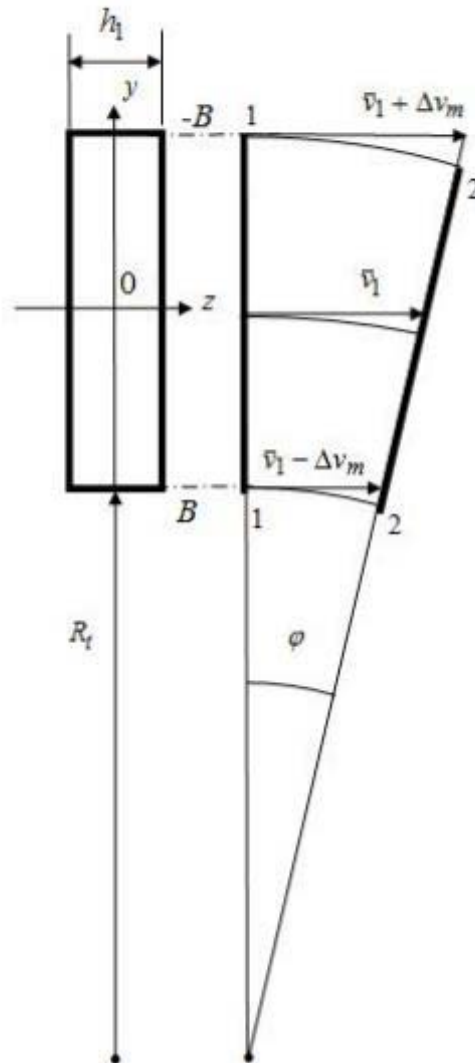


Рис. 4.4. Схема перемещения поперечного сечения полосы

Изгибающий момент полосы:

$$M_t = \sigma_{max} \cdot W, \quad (4.16)$$

где  $\sigma_{max}$  - максимальное напряжение растяжения полосы на выходе из очага деформации;  $W$  - момент сопротивления поперечного сечения полосы.

$$W = \frac{J_z}{y_{max}}, \quad (4.19)$$

где  $J_z$  - момент инерции поперечного сечения относительно оси вращения;  $y_{max}$  - расстояние от оси вращения до наиболее удаленной части полосы.

$$J_z = 4R_t B^2 h_1 + 2R_t^2 B h_1 + \frac{8}{3} h_1 B^3 ; \quad (4.20)$$

$$y_{max} = R_t + 2B . \quad (4.21)$$

Примем за  $\sigma_{max}$  предел текучести на растяжение:

$$\sigma_{max} = \sqrt{3} \tau_s . \quad (4.22)$$

Подставляя (4.20) и (4.21) в (4.19) с учетом (4.14) и пренебрегая малыми величинами, получим

$$W = \frac{4 \frac{B \bar{v}_1}{\Delta v_m} B^2 h_1 + 2 B h_1 \frac{B^2 \bar{v}_1^2}{(\Delta v_m)^2} + \frac{8}{3} h_1 B^3}{B \frac{\bar{v}_m}{\Delta v_m}} = \frac{8}{3} h_1 B^2 \frac{\Delta v_m}{\bar{v}_1} + 2 B^2 h_1 \frac{\bar{v}_1}{\Delta v_m} + 4 B^2 h_1 . \quad (4.23)$$

Из (4.15), (4.16), (4.22) и (4.23) получим выражение для мощности изгиба:

$$N_{изгиб} = \sqrt{3} \cdot \tau_s \cdot \left( \frac{8}{3} h_1 B^2 \frac{\Delta v_m}{\bar{v}_1} + 2 B^2 h_1 \frac{\bar{v}_1}{\Delta v_m} + 4 B^2 h_1 \right) \frac{\Delta v_m}{B} = \sqrt{3} \cdot \tau_s \times \quad (4.24)$$

$$\times \left[ \frac{8}{3} B h_1 \cdot \bar{v}_1 \left( \frac{\Delta v_m}{\bar{v}_1} \right)^2 + 4 B h_1 \bar{v}_1 \left( \frac{\Delta v_m}{\bar{v}_1} \right) + 2 B h_1 \bar{v}_1 \right] .$$

Рассмотрим выражение  $\frac{\Delta v_m}{\bar{v}_1}$ :

$$\frac{\Delta v_m}{\bar{v}_1} = \frac{v_1(B) - v_1(-B)}{\bar{v}_1} = \varphi'(B) - \varphi'(-B) = \int_{-B}^B \varphi''(y) dy . \quad (4.25)$$

Перепишем выражение (4.24):

$$N_{изгиб} = \sqrt{3} \cdot \tau_s \cdot \left[ \frac{8}{3} B h_1 \cdot \bar{v}_1 \left( \int_{-B}^B \varphi''(y) dy \right)^2 + 4 B h_1 \cdot \bar{v}_1 \left( \int_{-B}^B \varphi''(y) dy \right) + 2 B h_1 \bar{v}_1 \right] . \quad (4.26)$$

В соответствии с неравенством Коши-Буняковского  $\left[ \int_{-B}^B \varphi''(y) dy \right]^2 \leq \leq 2B \cdot \int_{-B}^B [\varphi''(y)]^2 dy$  запишем:

$$\frac{N_{изгиб}}{\tau_s} = \sqrt{3} \cdot \left[ \frac{16}{3} B^2 h_1 \cdot \bar{v}_1 \cdot \int_{-B}^B [\varphi''(y)]^2 dy + 4 B h_1 \cdot \bar{v}_1 \int_{-B}^B \varphi''(y) dy + + 2 B h_1 \bar{v}_1 \right] . \quad (4.27)$$

Вариационный принцип Журдена может применяться только к механическим системам, находящимся в равновесии. Для уравнивания

очага деформации приложим к полосе на выходе из очага деформации пластический момент изгиба  $M_t$ .

Еще необходимо учесть мощность, затрачиваемую на накопление полосой потенциальной энергии, которую полоса будет уносить из очага деформации:

$$\frac{N_{\text{пот}}}{\tau_s} = \bar{v}_1 h_1 \int_{-B}^B \frac{(\sigma_x^*)^2}{2E^*} dy = \bar{v}_1 h_1 \int_{-B}^B \frac{[\varphi'(y)E^*]^2}{2E^*} dy = \bar{v}_1 h_1 \int_{-B}^B \frac{[\varphi'(y)]^2 E^*}{2} dy, \quad (4.28)$$

где  $\sigma_x^*(y) = -\varphi'(y)E^*$ ;  $E^* = \frac{E}{\tau_s}$ ,  $E$  - модуль упругости материала полосы.

Пренебрегая мощностями среза, запишем выражение для полной мощности прокатки в соответствии с (4.3):

$$\begin{aligned} \frac{N_{\Sigma}}{\tau_s} = \frac{1}{\tau_s} (N_{\text{внутр}} + N_{\text{скольж}} + N_{\text{изгиб}} + N_{\text{срез}}) = \int_{-B}^B \left( \int_0^l \int_0^h H dz dx + \right. \\ \left. + 4\mu l \int_0^1 \frac{\Delta h}{h} \sqrt{(t^2 - t_n^2)^2 + \left[ \frac{2\bar{v}_1 h_1}{l \Delta h} \cdot t \cdot (\varphi - f) \right]^2} dt + \sqrt{3} \frac{16}{3} B^2 h_1 \cdot \bar{v}_1 \times \right. \\ \left. \times [\varphi''(y)]^2 + 4\sqrt{3} B h_1 \cdot \bar{v}_1 \cdot \varphi''(y) + \bar{v}_1 h_1 \frac{[\varphi'(y)]^2 E^*}{2} \right) dy + 2\sqrt{3} B h_1 \bar{v}. \end{aligned} \quad (4.29)$$

Варьируя выражение (4.29) по  $\varphi(y)$ ;, получим уравнение Эйлера-Пуассона для определения экстремали  $\varphi(y)$ :

$$F_{\varphi} - \frac{d}{dy} F_{\varphi'} + \frac{d^2}{dy^2} F_{\varphi''} = 0, \quad (4.30)$$

$$\begin{aligned} \text{где } F = 4\mu l \int_0^1 \frac{\Delta h}{h} \sqrt{(t^2 - t_n^2)^2 + \left[ \frac{2\bar{v}_1 h_1}{l \Delta h} \cdot t \cdot (\varphi - f) \right]^2} dt + \sqrt{3} \frac{16}{3} B^2 h_1 \cdot \bar{v}_1 \times \\ \times [\varphi''(y)]^2 + +4\sqrt{3} B h_1 \cdot \bar{v}_1 \cdot \varphi''(y) + \bar{v}_1 h_1 \frac{[\varphi'(y)]^2 E^*}{2}. \end{aligned}$$

Определим компоненты уравнения (4.30):

$$F_{\varphi} = 4\mu l \int_0^1 \frac{\frac{\Delta h}{h} \left( \frac{2\bar{v}_1 h_1}{l \Delta h} \right)^2 t^2 (\varphi - f)}{\sqrt{[(t^2 - t_n^2)]^2 + \left[ \frac{2\bar{v}_1 h_1}{l \Delta h} t (\varphi - f) \right]^2}} dt. \quad (4.31)$$

$$\frac{d}{dy} F_{\varphi'} = \bar{v}_1 h_1 E^* \cdot \varphi''. \quad (4.32)$$

$$\frac{d^2}{dy^2} F_{\varphi''} = \frac{32}{3} \sqrt{3} \cdot h_1 \bar{v}_1 B^2 \cdot \varphi^{IV}. \quad (4.33)$$

После очевидных преобразований получим уравнение Эйлера-Пуассона в следующем виде:

$$\varphi - \frac{1}{K^2} \cdot \varphi'' + \frac{32\sqrt{3} B^2}{3 E^* K^2} \cdot \varphi^{IV} = f, \quad (4.34)$$

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

Представим неравномерность входных скоростей течения металла  $f'(y)$  в виде суммы нечетных гармоник:

$$f'(y) = \sum_{i=1}^n A_i \sin\left(i\pi \frac{y}{B}\right). \quad (4.35)$$

Тогда неравномерность выходных скоростей металла  $\varphi'(y)$  выразится в следующем виде:

$$\varphi'(y) = \sum_{i=1}^n B_i \sin\left(i\pi \frac{y}{B}\right). \quad (4.36)$$

Подставляя (4.35) в (4.34), мы получаем

$$B_i = \rho_i \cdot A_i, \quad (4.37)$$

где  $\rho_i$  - коэффициент, учитывающий влияние поперечного перемещения металла в очаге деформации на снижение  $i$ -той гармоники неравномерности выходных скоростей течения металла в процессе формирования серповидности:

$$\rho_i = \frac{1}{1 + \frac{1}{(KB)^2} (i\pi)^2 \left[ 1 + \frac{32\sqrt{3}}{3E^*} (i\pi)^2 \right]}. \quad (4.38)$$

Графически уменьшение неравномерности выходных скоростей течения металла в процессе формирования серповидности с учетом поперечных перемещений в очаге деформации представлено на рис. 4.5.

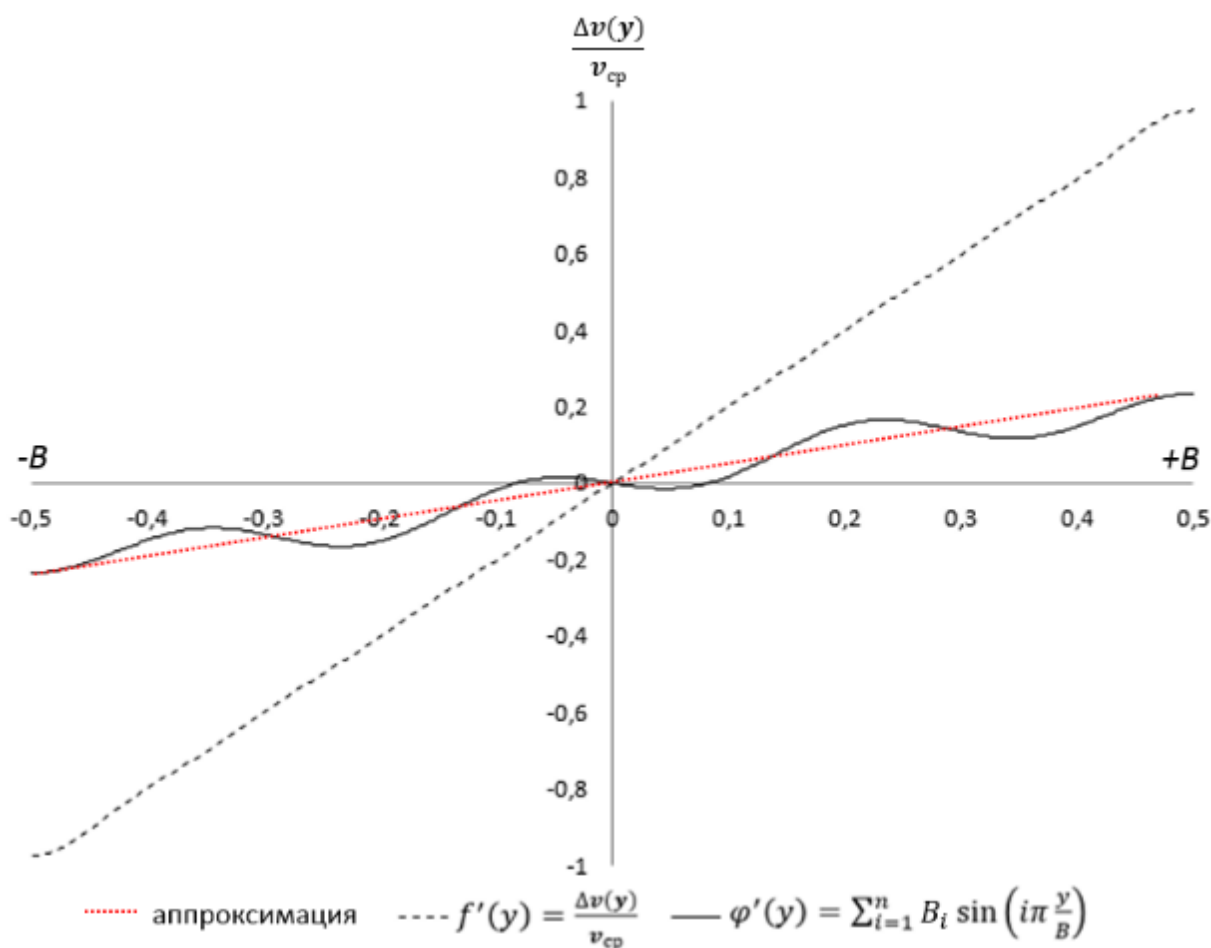


Рис. 4.5. Уменьшение неравномерности выходных скоростей течения металла из-за поперечных перемещений металла при формировании серповидности

4.3. Зависимость коэффициента, учитывающего влияние поперечных перемещений металла в очаге деформации, от параметров прокатки

Выражение (4.38) показывает, что наиболее влияющими на коэффициент  $\rho$  параметрами являются: ширина  $B$ , радиус рабочих валков  $R$ , входная толщина  $h_0$ , входная толщина  $h_1$  и температура прокатки  $T$ .

Рассмотрим влияние каждого из этих параметров на коэффициент  $\rho$  для первой гармоники ( $i = 1$ ) неравномерности входных скоростей при постоянных других параметрах. Зададимся следующими значениями параметров прокатки: Зададимся следующими значениями параметров прокатки:  $B = 1000$  мм,  $R = 450$  мм,  $h_0 = 50$  мм,  $h_1 = 40$  мм,  $T = 1160$  °С,  $\mu = 0,3$ .

Рассмотрим поведение функции  $\rho_i = \frac{1}{1 + \frac{1}{(KB)^2} (i\pi)^2 \left[ 1 + \frac{32\sqrt{3}}{3E^*} (i\pi)^2 \right]}$  при

изменение ширины проката в диапазоне  $B = 100 \div 5000$  мм (рис. 4.6). На графике видно, что коэффициент  $\rho$  увеличивается вместе с увеличением ширины, но при этом рост не является линейным. Наиболее точно зависимость аппроксимируется полиномом второй степени, представленном на графике в виде линии тренда.

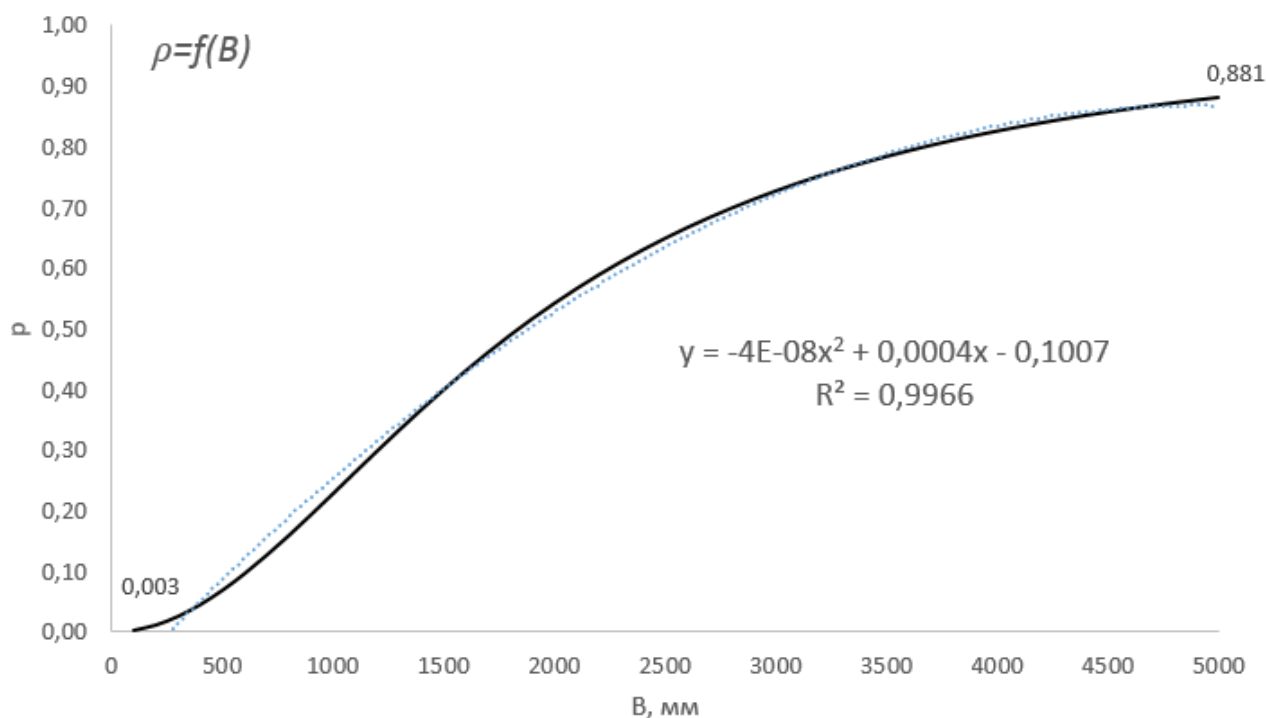


Рис. 4.6. Зависимость коэффициента  $\rho_1$  от ширины полосы

Рассмотрим поведение коэффициента  $\rho_1$  в зависимости от радиуса рабочих валков в диапазоне  $R = 100 \div 1000$  мм (рис. 4.7). Из графика, представленного на рис. 4.7 видно, что при увеличении радиуса рабочих валков коэффициент, учитывающий поперечное перемещения металла в очаге деформации, уменьшается, при этом зависимость уменьшения можно описать степенной функцией, представленной на графике.

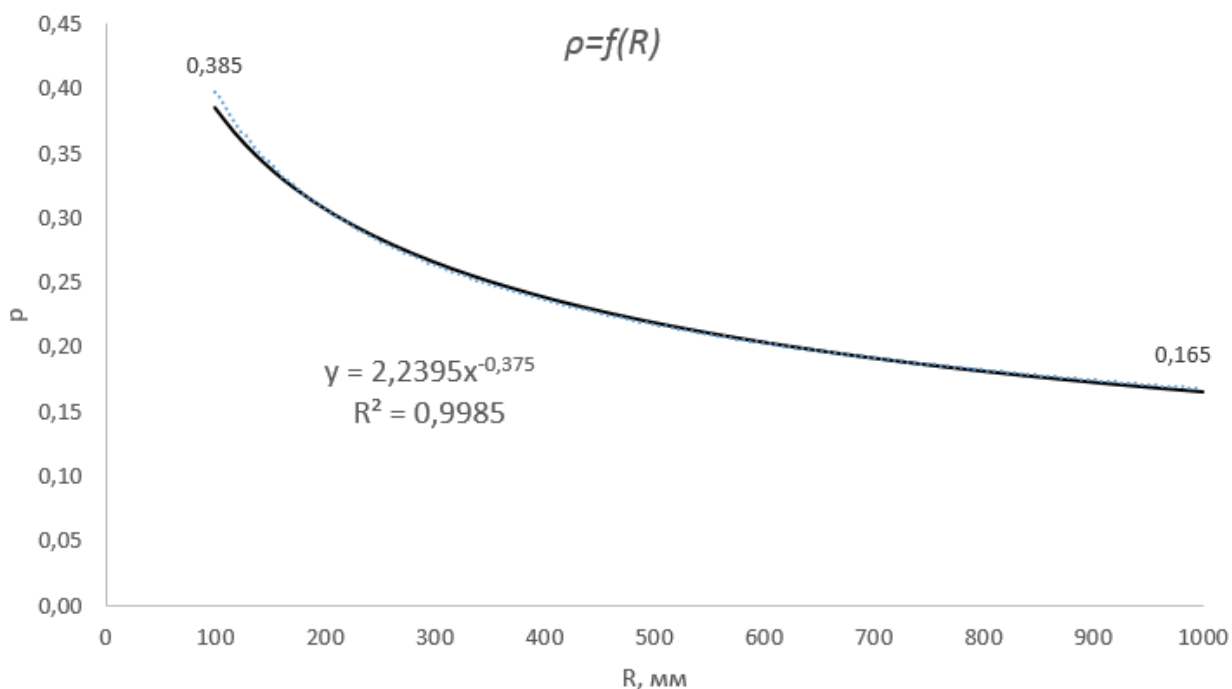


Рис. 4.7. Зависимость коэффициента  $\rho_1$  от радиуса рабочих валков

Рассмотрим поведение коэффициента  $\rho_1$  в зависимости от толщины полосы на входе в очаг деформации в диапазоне  $h_0 = 45 \div 300$  мм (рис. 4.8). Из графика (рис. 4.8) видно, что при увеличении толщины на входе коэффициент  $\rho_1$  уменьшается, при этом существенное изменение коэффициента  $\rho_1$  находится в достаточно узком интервале от 50 мм до 100 мм, далее интенсивность его изменения существенно падает. Функцию, представленную на рис. 4.8 можно описать степенной функцией, вид которой представлен на графике.



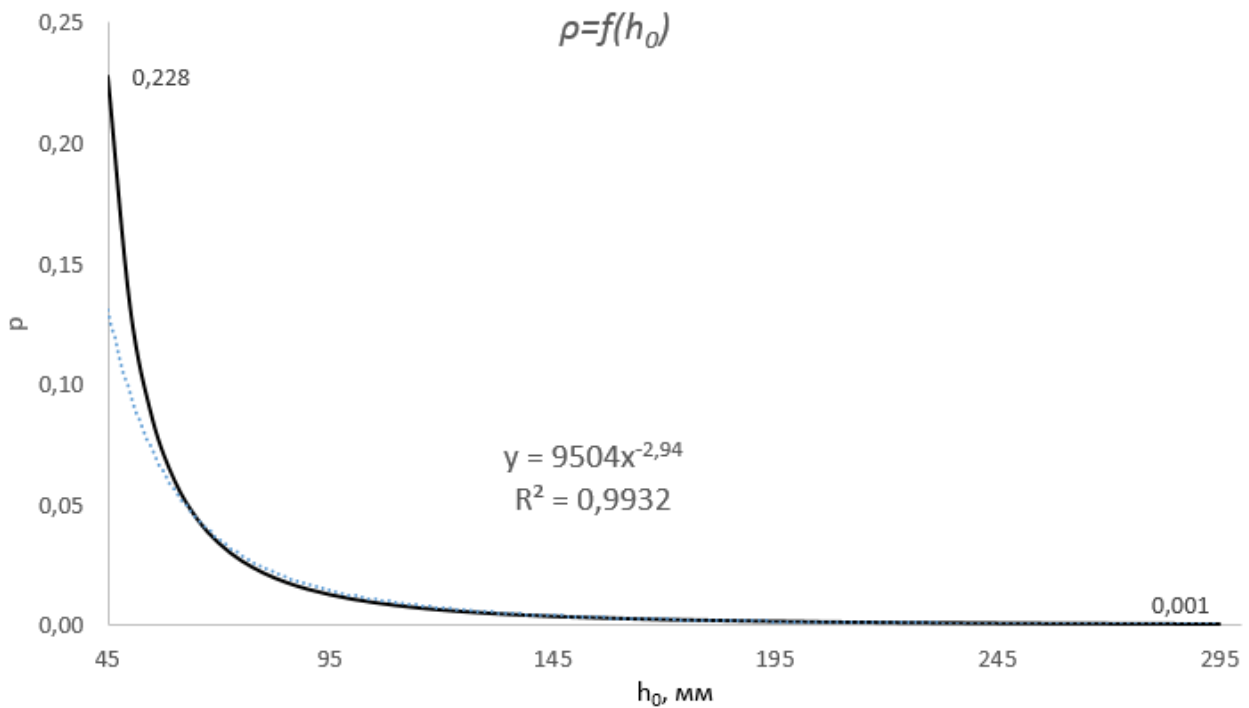


Рис. 4.8. Зависимость коэффициента  $\rho_1$  от входной толщины

Рассмотрим поведение коэффициента  $\rho_1$  в зависимости от толщины раската на выходе из клетки в диапазоне  $h_1 = 1 \div 49$  мм. На рис. 4.9 графически представлена данная зависимость, при этом коэффициент  $\rho_1$  увеличивается с увеличением толщины раската. Рост параметра наиболее точно описывается экспоненциальной зависимостью и, соответственно, имеет самый интенсивный рост.

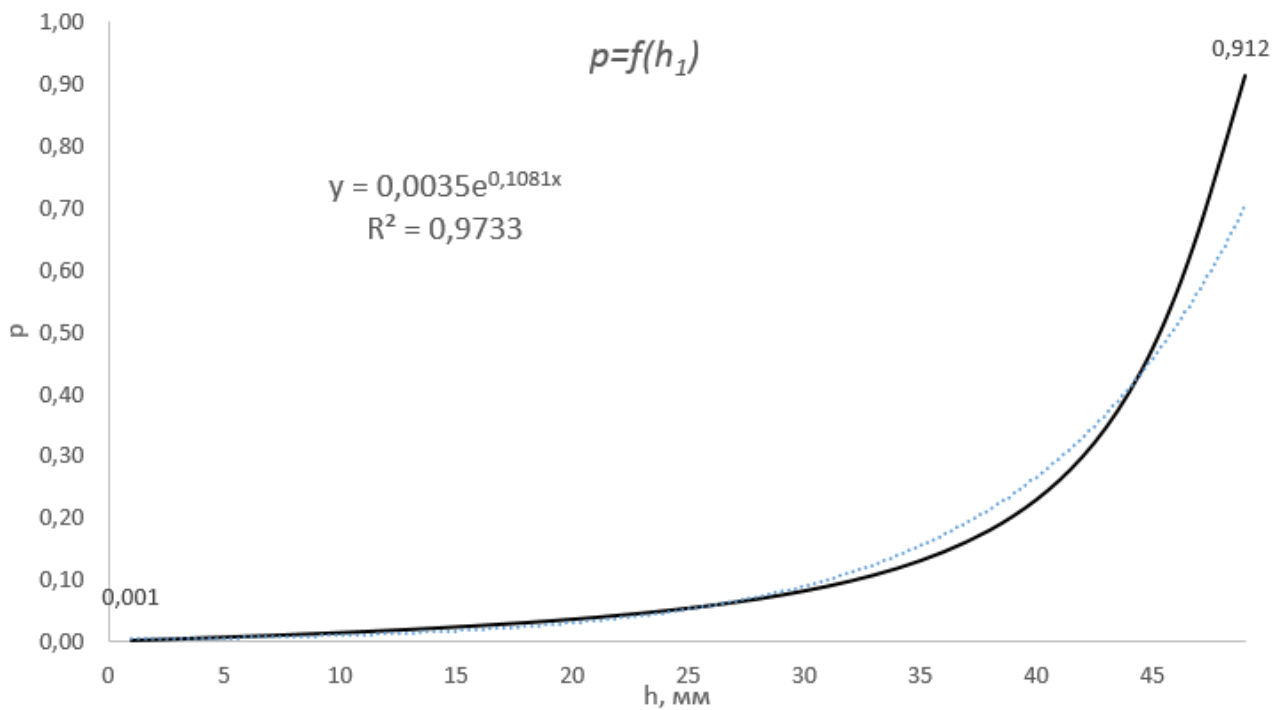


Рис. 4.9. Зависимость коэффициента  $\rho_1$  от выходной толщины

Для рассмотрения влияния температуры прокатки на коэффициент, учитывающий поперечное перемещения металла в очаге деформации, необходимо принять некоторые допущения в связи с тем, что температура не присутствует в явном виде в уравнении (4.38), но, как известно, от температуры зависит коэффициент трения и сопротивления металла деформации [45]. Тогда по методике А.И. Целикова для стали Ст3 при  $B = 1000\text{мм}$ ,  $R = 450\text{мм}$ ,  $h_0 = 50\text{мм}$ ,  $h_1 = 40\text{мм}$  выполним следующий расчет [94]:

$$\tau_s = \sigma_T \sqrt{3}; \sigma_T = A_1 A_2 A_3 \sigma_{0D} e^{-m_1 T} \varepsilon^{m_2} u^{m_3},$$

где  $A_1 A_2 A_3 \sigma_{0D} = 1330$ ;  $m_1 = 0,0025$ ;  $m_2 = 0,252$ ;  $m_3 = 0,143$ ;

$$\varepsilon = \frac{\Delta h}{h_0}; h_n = \sqrt{h_0 h_1}; \gamma = \left( \frac{h_n}{h_1} - 1 \right) \frac{h_1}{l_d}; S' = R \frac{\gamma^2}{h_1}; v_1 = v(1 + S'); u = \frac{v_1 \Delta h}{l_d h_1};$$

В свою очередь коэффициент трения для принятых условий по С. Эжелунду подчиняется следующей зависимости:

$$\mu = k_1 k_2 k_3 (1,05 - 0,0005T),$$

где для чугунных валков  $k_1 = 0,8$ , для скорости прокатки 2 м/с  $k_2 = 0,8$ , а  $k_3$  для углеродистых марок сталей будет равен 1,0.

Тогда расчет сопротивления металла деформации и коэффициента трения при  $T = 1160^\circ\text{C}$  будет выглядеть следующим образом:

$$\begin{aligned} \Delta h &= h_0 - h_1 = 50 - 40 = 10 \text{ мм}; \quad \varepsilon = \frac{\Delta h}{h_0} = \frac{10}{50} = 0,2; \quad h_H = \sqrt{h_0 h_1} = \sqrt{50 \cdot 40} = \\ &= 44,72 \text{ мм}; \quad l_D = \sqrt{\frac{\Delta h}{R}} = \sqrt{\frac{10}{450}} = 67,08 \text{ мм}; \quad \gamma = \left(\frac{h_H}{h_1} - 1\right) \frac{h_1}{l_D} = \left(\frac{44,72}{40} - 1\right) \frac{40}{67,08} = \\ &= 0,07; \quad S' = R \frac{\gamma^2}{h_1} = 450 \frac{0,07^2}{40} = 0,792; \quad v_1 = v(1 + S') = 2(1 + 0,792) = \\ &= 3,584 \text{ м/с}; \quad u = \frac{v_1 \Delta h}{l_D h} = \frac{3,584 \cdot 10^3 \cdot 10}{67,08 \cdot 40} = 10,68 \text{ с}^{-1}; \quad \sigma_T = A_1 A_2 A_3 \sigma_{0D} e^{-m_1 T} \varepsilon^{m_2} u^{m_3} = \\ &= 1330 \times 2,718^{-0,0025 \cdot 1160} \cdot 0,2^{0,252} \cdot 10,68^{0,143} = 0,684 \text{ Мпа}, \quad \tau_s = \sigma_T \sqrt{3} = \\ &= 0,684 \cdot 1,73 = 1,186 \text{ Мпа}, \quad \mu = k_1 k_2 k_3 (1,05 - 0,0005 T) = 0,8 \cdot 0,8 \cdot 1 \times \\ &\times (1,05 - 0,0005 \cdot 1160) = 0,301. \end{aligned}$$

Соответственно, осуществив аналогичные расчеты для температуры в диапазоне  $T = 800 \div 1290^\circ\text{C}$  и подставив получившиеся значения в уравнении (4.38), получим зависимость коэффициента  $\rho_1$ , учитывающего поперечные перемещения металла в очаге деформации от температуры рис. 4.10.

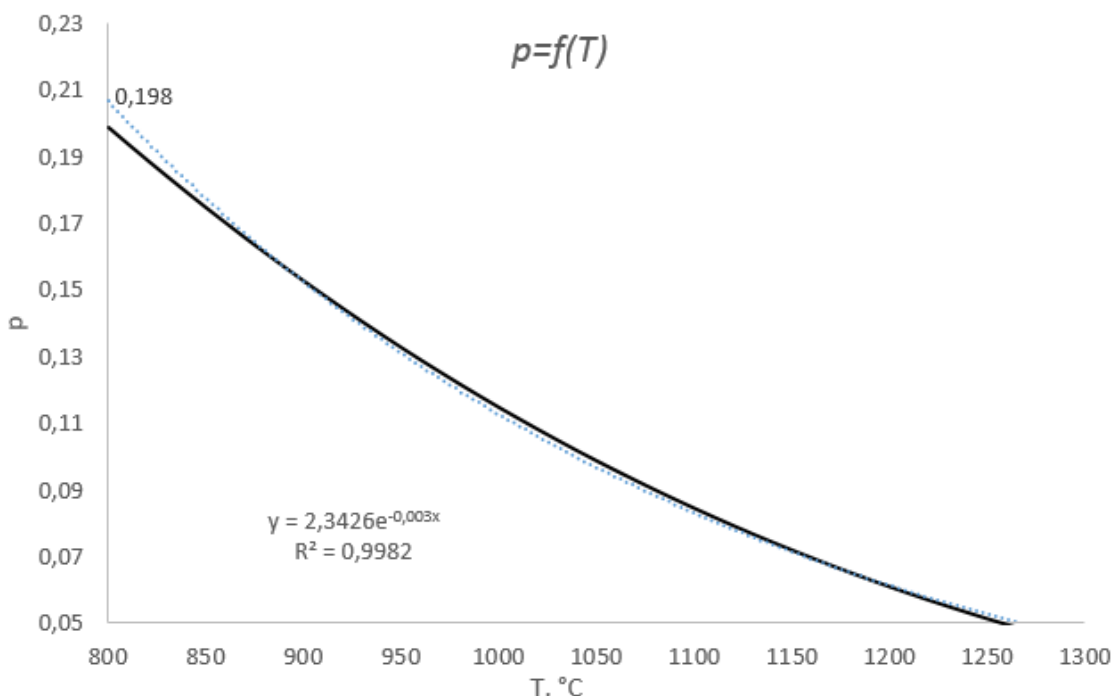


Рис. 4.10. Зависимость коэффициента  $\rho_1$  от температуры прокатки

На рис. 4.10 видно, что при увеличении температуры величина коэффициента уменьшается в соответствии со степенной зависимостью представленной в виде линии тренда на данном графике.

#### 4.4. Выводы к четвертой главе

1. Представлена схема уменьшения неравномерности вытяжек по ширине полосы из-за поперечного перемещения металла в очаге пластической деформации при образовании серповидности полосы.

2. Разработана математическая модель формирования серповидности полосы в черновой группе клетей стана горячей прокатки при неравномерном обжатии по ширине с учетом поперечных перемещений металла в очаге деформации, основанная на вариационном принципе Журдена. Модель верифицирована косвенно, путем сопоставления фактического вида серповидности полосы с данными серповидности, полученными в рамках расчета в предположении плоской схемы деформации и расчетом серповидности по предложенной математической модели.

3. Исследована зависимость коэффициента, учитывающего поперечные перемещения металла в очаге деформации, от таких параметров прокатки, как ширина раската, радиус рабочего вала, толщина на входе и выходе из очага деформации и температуры прокатки. Толщина раската на выходе из очага деформации (обжатие) имеет наибольшее влияние на рассматриваемый коэффициент.

## **5. Способ горячей прокатки с компенсацией клиновидности профиля поперечного сечения полосы**

5.1. Предварительный перекося рабочих валков как способ компенсации клиновидности профиля поперечного сечения полосы

Для регулирования профиля и формы прокатываемых полос и листов в линии широкополосных станов горячей прокатки разработано и запатентовано множество способов.

Известен способ уменьшения клиновидности профиля поперечного сечения при смещении прокатываемой полосы вдоль бочки рабочих валков [86], при котором обжатие полосы со стороны кромки, находящейся у края бочки, увеличивают, а со стороны кромки, находящейся в средней части длины валков, обжатие уменьшают. Основным недостатком данного способа является его применимость только для случая бокового смещения прокатываемой полосы.

Существует способ прокатки [87], при котором уменьшение клиновидности профиля поперечного сечения достигается уменьшением обжатия полосы с приводной стороны за счет изменения профилировок рабочего или опорного валка: с приводной стороны на рабочем или опорном валке делают скос, глубина которого определяется средней величиной измеренной разницы температур кромок прокатываемых полос. Основным недостатком этого метода является невозможность регулирования параметров скоса в процессе прокатки.

Наибольший интерес вызывает способ [88] целенаправленного воздействия на прокатываемую полосу изменением позиции нажимных устройств горизонтальных валков с целью выравнивания усилий прокатки со стороны привода и обслуживания и выпрямлении получающейся при этом серповидности мощными быстродействующими направляющими линейками. Несмотря на существенные преимущества этого способа над рассмотренными ранее, данный метод также не лишен недостатков, например, равенство усилий

прокатки со стороны привода и обслуживания не обеспечивает равенства вытяжек по ширине прокатываемой полосы, поэтому для его осуществления необходима глубокая модернизация направляющих линеек.

Для существующего уровня технического оснащения станов горячей прокатки полос является оказание целенаправленного воздействия на геометрию полосовой заготовки, т.е. на клиновидность профиля поперечного сечения, при ее прокатке в обычных линиях горячей прокатки для получения полос без клиновидности и боковых искривлений. Как было описано выше, при горячей прокатке полос распределение толщины по ширине, как правило, неравномерное из-за того, что обжатия полосы уменьшаются от более горячей кромки к менее горячей кромке, и профиль поперечного сечения приобретает клиновидность.

Для решения данной задачи был разработан и запатентован способ горячей прокатки полос и листов, включающий прокатку с предварительным измерением входной температуры полосы [89].

Ранее во второй главе была подробно рассмотрена схема образования клиновидности из-за несимметричности температурного поля подката. При рассмотрении уравнения равновесия системы было получено уравнение возникающей клиновидности полосы через растяжения и жесткости станин и прокатываемого металла:

$$W = \frac{(F_2 - F_1)}{C_K} = \frac{\Delta F}{C_K} \quad (5.1)$$

Для компенсации возникающей клиновидности было предложено создать предварительный перекоп межвалкового зазора  $\Delta S$ , тогда  $W = \frac{\Delta F}{C_K} - \Delta S = 0$  (условие равенства обжатий боковых кромок прокатываемой полосы). Таким образом, для определения величины  $\Delta S$  необходимо заранее вычислить величины  $F_1$  и  $F_2$ .

Величину усилий прокатки  $F_1$  и  $F_2$  предлагается оценить с помощью произведения величины сопротивления пластической деформации  $\sigma_s$  при измеренной температуре на половину площади очага деформации:

$$F_1 = \sigma_s \times (T_l) \times \sqrt{R\Delta h} \times \frac{B}{2};$$

$$F_2 = \sigma_s \times (T_p) \times \sqrt{R\Delta h} \times \frac{B}{2};$$

Тогда

$$\Delta F = F_1 - F_2 = \Delta\sigma_s \sqrt{R\Delta h} \times \frac{B}{2},$$

где  $\Delta\sigma_s = \sigma_s(T_l) - \sigma_s(T_p)$ ;  $T_l$  и  $T_p$  – температуры левой и правой кромок, измеренные пирометрами 2 (рис. 4.10);  $\sigma_s(T_l)$  и  $\sigma_s(T_p)$  – сопротивление пластической деформации прокатываемого металла при температурах  $T_l$  и  $T_p$ .

Величину жесткости станин можно измерить или рассчитать. Зависимости сопротивления пластической деформации  $\sigma_s$  прокатываемого металла также можно определить прямым измерением в лабораторных условиях или найти в справочниках по металловедению.

Итак, величина предварительного перекоса определяется в соответствии с условием равенства обжатий и может быть представлена в следующем виде:

$$\Delta S = \frac{\Delta\sigma_s \sqrt{R\Delta h}}{C_k} \cdot \frac{B}{2} \cdot 10^{-4} \text{ [мм]}, \quad (5.2)$$

$R$  – радиус рабочего валка, мм;  $\Delta h$  – абсолютное обжатие полосы в клети, мм;  $B$  – ширина прокатываемой полосы, мм;  $C_k$  – жесткость станины прокатной клети, т/мм;  $\Delta\sigma_s = \sigma_s(T_l) - \sigma_s(T_p)$ ,  $\sigma_s(T_l)$  и  $\sigma_s(T_p)$  – сопротивление пластической деформации прокатываемого металла при температурах  $T_l$  (температура левой кромки полосы) и  $T_p$  (температура правой кромки), МПа.

Непосредственно процесс предварительной настройки перекоса межвалкового зазора протекает в соответствии со схемой, представленной на рис. 5.1.

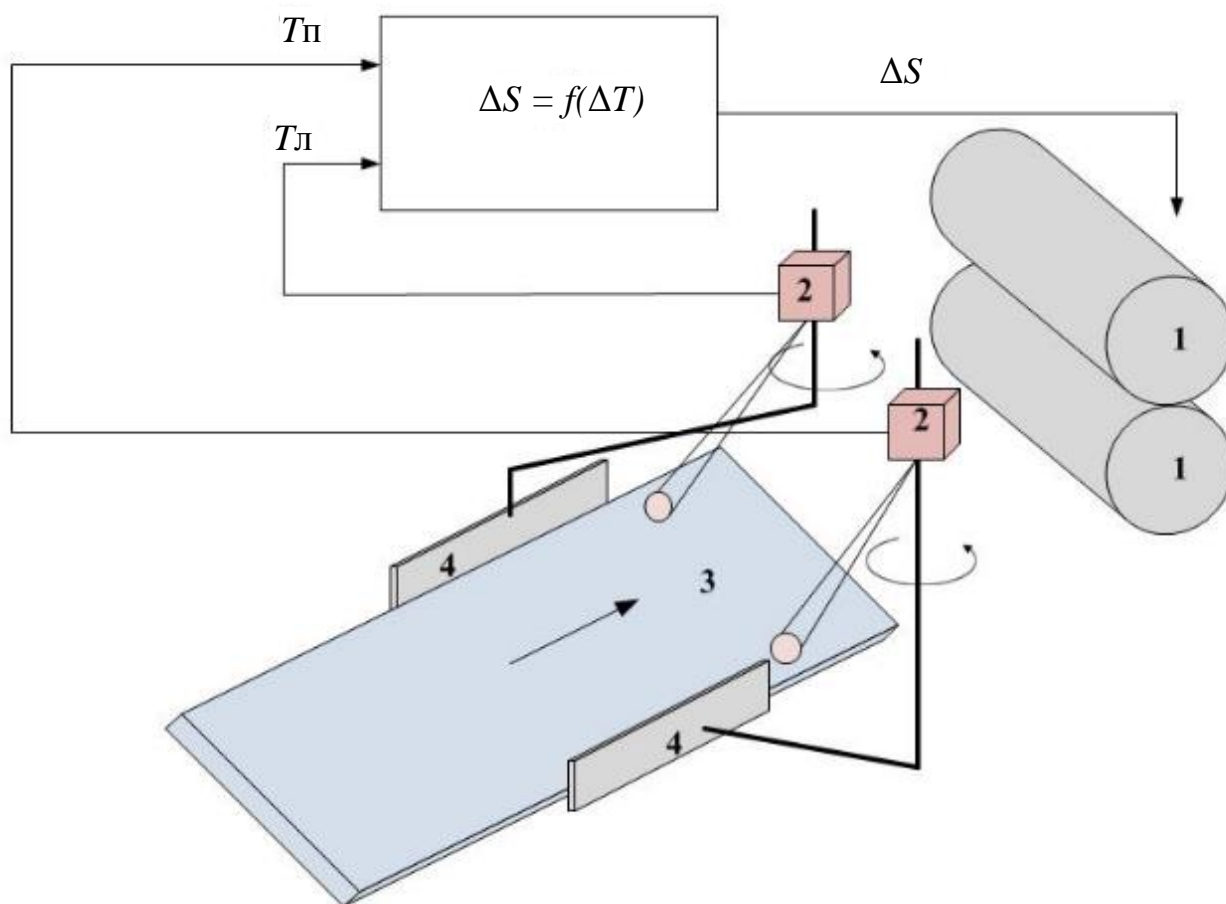


Рис. 5.1. Схема предварительной настройки перекоса межвалкового зазора: 1 – валковая система, 2 – пирометры, 3 – прокатываемая полоса, 4 – направляющие линейки

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  $T_{\text{л}}$  и правой кромок полосы  $T_{\text{п}}$ . На основе полученных значений температуры, величины жесткости станин и зависимости сопротивления пластической деформации  $\sigma_s$  прокатываемого металла от температуры осуществляется вычисление величины перекоса  $\Delta S$  в соответствии с формулой (5.2). После этого происходит регулировка перекоса межвалкового зазора горизонтальных валков таким образом, чтобы на стороне более горячей



кромки позиция верхнего рабочего валка приняла 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. Отметим, что получение бездефектной продукции возможно непосредственно на первой же единице продукции в отличие от известных способов регулирования полосового и листового проката в линии станов горячей прокатки.

Для получения корректных значений температуры полосы предлагается использовать современные инфракрасные пирометры спектрального отношения (ИК ПСО) с системой позиционирования относительно кромок раската с помощью направляющих линеек (4). Пирометры предлагаемого типа позволяют осуществлять измерения температуры независимо от формы измеряемого объекта, запыленности и загазованности окружающей среды и наличия непрозрачных объектов в поле зрения пирометра (защитное стекло). Отношение сигналов приемников слабо зависит от излучательной способности объектов измерения, и корректные результаты измерений обеспечиваются без учета фактических значений излучательной способности объекта измерения.

## 5.2. Выводы к пятой главе

1. Предложен новый способ горячей прокатки полос и листов, заключающийся в прокатке полос с предварительным измерением их входной температуры, отличающийся тем, что измерение температуры производят отдельно на левой и правой кромках с помощью пирометров, привод которых синхронизирован с входными боковыми направляющими линейками, причем для устранения клиновидности профиля поперечного сечения полосы и выравнивания вытяжек по ее ширине для устранения серповидности на стороне более горячей кромки позицию верхнего рабочего валка увеличивают, на

противоположной стороне уменьшают на величину перекоса, которая рассчитывается в соответствии с моделью образования клиновидности полосы, представленной в третьей главе представленной работы.

2. На разработанный способ горячей прокатки получен патент № 2615670 от 06 апреля 2017 г.

## 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.

Результаты работы внедрены в ПАО «НЛМК» и используются в учебном процессе ЛГТУ в курсах «Теория прокатки», «Неравномерность деформации».

## Библиографический список

1. ГОСТ 26877-2008 Методы измерений отклонений формы. Межгосударственный стандарт металлопродукция. – М.: Стандартинформ, 2013. – 28 с.
2. ГОСТ 19903-2015 Прокат листовой горячекатаный. Сортамент. Межгосударственный стандарт. – М.: Стандартинформ, 2016. – 15 с.
3. ГОСТ 103-2006 Прокат сортовой стальной горячекатаный полосовой сортамент. Межгосударственный стандарт. - М.: Стандартинформ, 2009. – 15с.
4. JIS G 3193 – 2005 Размеры, масса и допустимые 5. JIS G 3193 – 2005 Размеры, масса и допустимые отклонения для горячекатаного толстого листа тонкого листа и полосы. Японский промышленный стандарт. – Япония.: JISF, 2005. – 19с.
5. EN 10029 - 2010 Горячекатаные стальные листы толщиной 3 мм и более - Допуски размеров и формы DIN EN 10029:2011-02. Европейский стандарт. – ЕКС, 2010. – 14с
6. ТИ 05757665-ЦГП-01-2016. Производство проката на стане 2000 в ПГП / ПАО «НЛМК», 2016. – 141 с.
7. Салганик, В.В. Исследование влияния формы валков черногого окалиналомателя на возможность снижения поверхностного дефектообразования при прокатке на стане 2000 / В.М. Салганик, А.М. Песин, Д.Н. Чикишев, Д.О. Пустовойтов // в сборнике: Процессы и оборудование металлургического производства сборник научных трудов. под редакцией С. И. Платова. – Магнитогорск.: Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, - 2009. - С. 211-217.
8. Молостов, М.А., Разработка эффективной схемы деформации проката в черновой группе клетей Стана 2000 / М.А. Молостов, П.А. Стеканов, С.В. Дубовский, В.М. Салганик, А.М. Песин, Д.О. Пустовойтов // Сталь. - 2009. - № 10. - С. 51-52.
9. Салганик, В.М., Особенности формоизменения слябов при

черновой прокатке / В.М. Салганик, А.М. Песин, О.Н. Сычев, С.В. Денисов, А.А. Скрылев // *Металлург*. - 2008. - № 12. - С. 47-49.

10. Пучков, Л.М. Формирование свободной поверхности конца при прокатке высоких полос / Л.М. Пучков // *Производство проката*. - 2015. - № 10. - С. 3-9.

11. Шабалов, И.П. Исследование формоизменение полосы при прокатке с обжатиями в вертикальных и горизонтальных валках / И.П. Шабалов // *Производство проката*. - 2004. - № 7. - С. 3-13.

12. Шабалов, И.П. Исследование формообразования раскатов на толстолистовом стане 2800 / И.П. Шабалов // *Производство проката*. - 2004. - № 8. - С. 2-8.

13. Куницын Г.А. Повышение точности процесса холодной прокатки ленты из подката клиновидного поперечного сечения работа на соискание степени к.т.н. 05.16.05 Магнитогорск 2000

14. Куницын, Г.А. Исследование и моделирование объемного течения металла при холодной прокатке узкой ленты / Г.А. Куницын, Э.М. Голубчик, А.М. Песин, В.М. Салганик, Д.О. Пустовойтов // *Вестник МГТУ им. Г.И. Носова*. – 2010. - №4. – С. 38-41.

15. Салганик, В.М. Технологические возможности компенсации клиновидности при холодной прокатке узкой ленты / В.М. Салганик, А.М. Песин, Г.А. Куницын, Д.О. Пустовойтов // *Черные металлы*. – 2011. - № 7-8. – С. 14-19.

16. Куницын, Г.А. Развитие теории и технологии прокатки стальных полос из подката многократной ширины для повышения эффективности производства работа на соискание степени д.т.н. 05.16.05 Магнитогорск – 2011

17. Патент. RU 2224029 С2. Способ изготовления горячекатаного подката для производства холоднокатаных полос анизотропной электротехнической стали / Чернов П.П., Ларин Ю.И., Черненилов Б.М., Поляков М.Ю., Мамонов В.Н., Евсюков В.Н., Бубнов С.Ю., Хуснутдинов Н.Х.,

Витюк В.Ю. № 2002108262А заявл. 01.04.2002; опубл. 20.02.2004

18. Синицкий, О.В. Элементы современных технологических систем для обеспечения геометрии и формы листового проката О.В. Синицкий, П.П. Полецков // Калибровочное бюро. - 2015. № 6. – С.72-99

19. Дема, Р.Р. Исследование процесса формирования поперченного профиля и плоскостности горячекатаных и холодно катанных полос в условиях ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат» / Р.Р. Дема, О.В. Синицкий, Д.Н. Чикишев, М.В. Харченко, Е.Ю. Кожушков // Производство проката. - 2006. - № 3. - С. 9-14.

20. Мельцер, В.В., Расчет регулирования профиля тонких полос при непрерывной горячей прокатке / В.В. Мельцер, В.М. Салганик, Б.Я. Омельченко // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. - 1975. - № 4. - С. 86-89.

21. Суяров, Д.И. Качество тонких стальных листов / Д.И. Суяров, М.А. Беньковский. – М.: Металлургия, 1964. – 175 с.

22. Бельский С.М. Совершенствование технологий формообразования полос и листов на основе развития теории симметричной и асимметричной горячей прокатки: Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук: 05.16.05 / Бельский Сергей Михайлович. – Липецк. 2009. – 376 с.

23. Техническая документация. Автоматизированная система измерения геометрических параметров подката “ShapeScanner 5000”. ЛПЦ-3, Стан 5000. - ОАО «Северсталь» - 2010

24. Julio Molleda On-Line Flatness Measurement in the Steelmaking Industry/ Julio Molleda / Rub´en Usamentiaga / Daniel F. Garc´ia // Sensors – 2013. – №13. – p. 28.

25. Смелков, В.М. Повышение качества изображения сюжетов с высоким контрастом при телевизионном наблюдении за перемещением горячего проката / В.М. Смелков // Производство проката. – 2012. - №3. – С. 33.

26. Смелков, В.М. Альтернативное устройство телекамеры для

мониторинга за горячей прокаткой / В.М. Смелков // Производство проката. – 2013. - №2. – С. 27.

27. Патент. RU 2472303 C1. Телевизионная система для наблюдения за перемещением горячего проката / Смелков В.М. № RU2011147023А заявл. 18.11.2011; опубл. 10.01.2013.

28. Салганик, В.М. Анализ технологических возможностей ШСГП 2000 ОАО «ММК» по производству подката для жести двойной ширины с требуемым поперечным профилем / В.М. Салганик, О.В. Сеницкий, О.Н. Сычев, П.П. Полецков, О.В. Казаков. В.В. Коломиец // в сборнике: Материалы 63-й научно-технической конференции по итогам научно-исследовательских работ за 2003-2004 гг сборник докладов. - 2004. - С. 5.

29. Салганик, В.М. Формирование ширины полос и пути его совершенствования на листовых станах 2000 и 2500 ММК / В.М. Салганик, Ю.А. Тверской, А.В. Кушнарев, А.Г. Соловьев, А.А. Матруев, Е.В. Кудряков // в сборнике: Труды четвертого конгресса прокатчиков в 2-х томах. АО "Черметинформация". - 2002. - С. 2.

30. Шейхи, Ш. Развитие производства плоского стального проката / Ш. Шейхи, А. Ангербауэр, К.-Д. Вупперман // Черные металлы. – 2010. - №8. – С. 30.

31. Николаев, В.А. Изменение толщины по длине полосы на ШСГП при воздействии технологических параметров / В.А. Николаев, Д.А. Матюшенко // Производство проката. – 2008. - №7. – С. 24.

32. Бельский, С.М. Классификация технологических принципов регулирования плоскостности полос / С.М. Бельский, Ю.А. Мухин // Сталь. - 2009. - № 11. С. 47-50.

33. Чащин, В. В. Повышение эффективности производства полосового проката путем регулируемого охлаждения рулонов горячекатаных полос / На предприятиях и в институтах. Прокатное производство / В. В. Чащин // Новости черной металлургии России и зарубежных стран. Ч.1. Черная металлургия. –

2000. – №1,2. – С.51-54

34. Чащин, В.В. Комплексный подход к поддержанию температурного режима на непрерывных станах горячей прокатки / В.В. Чащин // *Металлург.* – 2011. - №4. - С. 53.

35. Манюров, Ш.Б. Совершенствование технологии прокатки тонких полос на широкополосных станах / Ш.Б. Манюров, А.В. Куклев, В.А. Капитанов, И.В. Кушнерев, Е.Ю. Молчан // *Металлург.* – 2008. - №8. – С. 43.

36. Рудской, А.И. Теория и технология прокатного производства: учебное пособие / А.И. Рудской, В.А. Лунев. – Санкт – Петербург: Наука, 2005. – 539 с.

37. Мухин, Ю.А. Горячая прокатка с обратным температурным клином и стабильность структуры и механических свойств готовых полос / Ю.А. Мухин, С.И. Мазур, С.М. Бельский, А.В. Шунин // *Производство проката.* – 2013. - №11. – С. 15.

38. Ракишев, Б.Р. Энергосбережение на литейно – прокатных агрегатах: учебное пособие / Б.Р. Ракишев, С.А. Машеков. – Алматы: КазНТУ, 2015. – 189 с.

39. Патент RU 2044580 С1. Способ производства горячекатаных полос/ Салганик В.М., Гун И.Г., Стариков А.И., Сарычев В.Ф., Гостев А.А., Соловьев А.Г. № RU93000631А заявл. 06. 01.1993; опубл. 27.09.1995

40. Патент US 1721352 А. Coil box for rolling mills/ Harry M Naugle, Arthur J Townsend № US1721352А заявл. 12.12.1924; опубл. 16.07.1929

41. Патент RU 2597181 С1. Теплоэкранирующая установка над рольгангом полосового стана горячей прокатки / Хлопонин В.Н., Философова Т.Г., Хлопонина Т.В. № RU2015117899А заявл. 13.05.2015; опубл. 10.09.2016

42. Салганик, В.М. Возможности и варианты модернизации широкополосного стана 2500 ММК для осуществления контролируемой горячей прокатки / В.М. Салганик, Ю.А. Тверской, А.В. Кушнарев, А.Г. Соловьев, С.В. Денисов, А.А. Матруев // *Черная металлургия.* – 2002. - №1. – С. 37.



43. Хлопонин, В.Н. Эффективность активного и псевдоактивного способов снижения охлаждения подката в условиях ШПС горячей прокатки / В.Н. Хлопонин, А.Н. Тинигин // *Металлург.* – 2011. - №10. – С. 77.

44. Laws, W.R. Improved temperature distribution in a HSM using Heat shields. // *Steel Times* -1993 №6 - С. 249-250.

45. Хлопонин, В.Н. Способы снижения охлаждения подката на промежуточном рольганге широкополосного стана горячей прокатки (ШПС г.п.), их тепловая и энергетическая эффективность / В.Н. Хлопонин, А.Н. Тинигин // *Электронный журнал.* – 2011. - №8. – С.1.

46. Fantuzzi, M., Employing an active tunnel furnace in an HSM. / M. Fantuzzi, E. Filippi, A. Venanzini // *II Steel Times International.* - 2005 - №2., p. 20 – 21

47. Delpature, Y. Main Feature and Performance data of the ATF Active Tunnel Furnace / Y. Delpature, M. Fantuzzi, E. Filippi // *II MPT international* - 2005 - №3 - С.56-58.

48. Кухарь, В.В. Анализ теплового состояния тонколистовой стали на непрерывных широкополосных станах горячей прокатки / В.В. Кухарь, А.Г. Присяжный, Н.А. Саврухина // *Проблемы энергоресурсосбережения в промышленном регионе. Наука и практика: всеукраинская научно-практической. конф. Молодых ученых, специалистов, аспирантов (20-24 апреля 2015, г. Мариуполь) / ПГТУ.* - Мариуполь, 2015 - С. 87-89.

49. Коновалов, Ю.В. Справочник прокатчика. Книга 1. Производство горячекатанных листов и полос. М.: Теплотехник, 2008: б.н.

50. Румянцев, М.И. Опыт конструирования модели для расчета температуры металла в линии широкополосного стана горячей прокатки / М.И. Румянцев, И.Г. Шубин, Д.Ю. Загузов, С.В. Игуменов // *Производство проката.* – 2007. № 1. – С. 16-18.

51. Беленький, А.М. Измерение температуры в металлургии / А.М. Беленький, А.Н. Бурсин, М.Ю. Дубинский, С.И. Калимулина // *Черные*

металлы. - 20–7. - №8. – С. 17.

52. Харахнин, К.А. Система бесконтактного измерения температуры поверхности полосы перед смоткой на широкополосном стане горячей прокатки / К.А. Харахнин, Д.В. Головкин, С.А. Аниськин, Р.Л. Мельников // Производство проката. – 2010. - №9. – С 44.

53. Дема, Р.Р. Исследование причин возникновения дефекта «локальная разнотолщинность» в прикромочной области горячекатанных полос // Р.Р. Дема, М.В. Харченко, Р.Н. Амиров, О.В. Синицкий, Д.Н. Чикишев / Сталь. – 2016. - №12. – С. 40.

54. Салганик, В.М. Исследование неплоскостности толстолистого проката на стане 5000 ОАО «ММК» на основе анализа температурных полей раскатов / В.М. Салганик, С.В. Денисов, Д.Г. Набатчиков, С.В. Коршенков // Черные металлы. – 2011. – специальный выпуск. – С 67.

55. Устойчивость процесса тонколистовой прокатки с учетом поперечного течения металла / Г.Г. Григорян [и др.] // Известия вузов. Черная металлургия. – 1975. – №3. – С. 127-129.

56. А.с. 719716 СССР, МКИ В 21 В 1/38. Способ производства листового проката / Б.П. Картушов, А.В. Курятников, И.Н. Потапов, Ю.В. Пикулев, Н.И. Рубцов – № 2612775/22–02; заявл. 10.05.78; опубл. 05.03.80. Бюл. № 9.

57. А.с. 1526855 SU, МКИ В 21 В 1/02, 1/26. Способ получения листового проката / В.М. Салганик, А.М. Песин, В.М. Чеботов, С.П. Ларииков – № 4274084/31–02; заявл. 01.07.97; опубл. 07.12.89. Бюл. № 45.

58. Григорян, Г.Г. Учет схемы деформации при анализе формообразования в процессе листовой прокатки / Г.Г. Григорян, С.Л. Коцарь, Ю.Д. Железнов // Известия вузов. Черная металлургия. – 1976. – № 7. – С. 88-92.

59. Поляков, Б.А. Влияние условий прокатки на распределение остаточных напряжений по ширине полосы / Б.А. Поляков, С.Л. Коцарь // Известия вузов. Черная металлургия. – 1988. – № 10. – С. 54-57.

60. Шофман, Л. А. Теория и расчеты процессов холодной штамповки / Л. А. Шофман // М.: Машиностроение. - 1964. – 375с.

61. Губкин, С. И. Теория обработки металлов давлением / С. И. Губкин // М.: Metallurgizdat. - 1947. – 532 с.
62. Попов Е. А. Основы теории листовой штамповки / Е. А. Попов // М.: Машиностроение. - 1977. – 278 с.
63. Сторожев, М. В. Теория обработки металлов давлением: учебник для вузов / М. В. Сторожев, Е. А. Попов // 4-е изд., перераб., доп. – М.: Машиностроение. - 1977. – 423 с.
64. Свешников, В. С. Прогрессивная технология холодной штамповки / В. С. Свешников // Л.: Лениздат. - 1974. – 332 с.
65. Шофман, Л. А. Элементы теории холодной штамповки / Л. А. Шофман // М.: Оборонгиз. - 1952. – 335 с.
66. Журавлев, А. З. Основы теории штамповки в закрытых штампах / А. З. Журавлев // М.: Машиностроение. - 1973. – 222 с.
67. Свешников, В. С. Прогрессивная технология холодной штамповки / В. С. Свешников // Л.: Лениздат. - 1974. – 332 с.
68. Унсов, Е. П. Теория пластических деформаций металлов / Е. П. Унсов, А. Г. Овчинников // М.: Машиностроение. - 1983. – 364 с.
69. Целиков, А.И. Теория прокатки / А.И. Целиков, А.И. Гришков. – М.: Metallurgiya, 1970. – 359 с.
70. Теория обработки металлов давлением (Вариационные методы расчета усилия и деформации) / Под ред. И.Я. Тарновского и др. М.: Metallurgizdat. 1963. 673
71. Унсов, Е.П. Инженерные методы расчета усилий при обработке металлов давлением // М.: Mashgiz. - 1955, 230 с.
72. Синицкий, О.В. Элементы современных технологических систем для обеспечения геометрии и формы листового проката О.В. Синицкий, П.П. Полецков // Калибровочное бюро. - 2015. № 6. – С.72-99
73. Бельский, С.М. Определение усилия прокатки вариационным методом / С.М. Бельский // Современная металлургия начала нового

тысячелетия: сборник научных трудов международной научно-технической конференции. Ч.3. – Липецк, 2006. – С.152-158.

74. Воронцов, А.Л. Новый метод решения сложных вариационных задач на примере расчета процесса кузнечной прошивки / А.Л. Воронцов // Производство проката. – 2009. - №9. – С 2.

75. Стандарт по использованию тепловизоров VALTECH // ООО «БАЛТЕХ», 2005. - 15с.

76. Фрунзе, А.А. Метод определения коэффициента излучения для коррекции энергетического пирометра Фрунзе А.А., Фрунзе А.В. // ННТП ТЕРМОКОНТ, 2005. - 15с.

77. Фрунзе, А.В. Алгоритм определения действительной температуры объекта с учетом температурной зависимости его излучательной способности / А.В. Фрунзе // Датчики и системы. - 2014. - №11. - С. 59-63.

78. Фрунзе, А. В. Метрологические проблемы энергетической пирометрии / А.В. Фрунзе // Фотоника. - 2014. - № 6. - С. 92-101.

79. Фрунзе, А.В. Методические погрешности энергетических пирометров и способы их минимизации / А.В. Фрунзе // Метрология. - 2012. - № 7. - С. 25-38.

80. ГОСТ Р 8.619-2006 Приборы тепловизионные измерительные. Методика поверки. Национальный стандарт российской федерации. - М.: Стандартиформ, 2006. – 19с.

81. Салганик, В.М. Исследование неплоскостности толстолистового проката на стане 5000 ОАО «ММК» на основе анализа температурных полей раскатов / В.М. Салганик, С.В. Денисов, Д.Г. Набатчиков, С.В. Коршенков // Черные металлы. – 2011. – специальный выпуск. – С 67.

82. Гусев, Г.В. Заключение по вопросу оснащения линии стана 2000 оборудованием для бесконтактного контроля температур / Г.В. Гусев, П.А. Тимичев // СПб.: Текно. - 2013. - 8 с.

83. Мажирин, Е.А. Регулируемая система гидросбива окалина / Е.А. Мажирин, А.А. Колгантов, О.Н. Чиченева // Производство проката. - 2010. - №

11. - С. 37-39.

84. Belskiy, S.M., Investigation of slab width formation in roughing group of broad strip mill / S.M. Belskiy, V.A. Tret'yakov, V.V. Baryshev, S.V. Kudinov // Steel in Translation. - 1998. - № 28. - С. 32-39.

85. Bernsmann, G.P. Lateral Material Flow During Cold Rolling of Strip / G.P. Bernsmann // Iron and Steel Engineer. - 1972. - № 49. - С. 67-71.

86. Патент SU 1652007 A1. Способ прокатки полос на широкополосном стане/ Николаев В.А., Сацкий В.А., Штехно О.Н., Мовшович В.С., Тилик В.Т., Пилипенко С.С., Пиховкин Н.Н. № 1529542 заявл. 20.02.1989; опубл. 30.05.1991 Бюл. №20

87. Патент UA 20129 A. Спосіб гарячої прокатки штаб/ Ніколаєв В.О., Трофімов В.О., Путнокі О.Ю., Піховкін М.М., Васильєв О.Г., Тилик В.Т., Штехно О.М., Мовшович В.С., Коваль С.М. № 98073226 заявл. 10.07.1995; опубл. 25.12.1997 Бюл. №6

88. Патент RU 2368443 C2. Способ и устройство для целенаправленного воздействия на геометрию полосовой заготовки в черновой клетки/ Олаф Норман Йепсен (DE), Олаф Норман Йепсен, Хайнц-Адольф Мюллер (DE), Хайнц-Адольф Мюллер, Йоахим Иммекус (DE), Йоахим Иммекус № 2007126472A заявл. 10.05.2006; опубл. 27.09.2009

89. Патент RU 2615670 C1. Способ горячей прокатки полос/ Мухин Ю.А., Бельский С.М., Бахаев К.В., Стоякин А.О., Саурин В.В. № 2015142324A заявл. 05.10. 2015; опубл. 07.04. 2017

90. Бельский, С.М. Исследование процесса формирования ширины сляба в черновой группе широкополосного стана / С.М. Бельский, В.А. Третьяков, В.В. Барышев, С.В. Кудинов // Изв.вуз. Черная металлургия. – 1998. - № 1. - С. 24-29.

91. Скороходов, В.Н. Уширение при прокатке полос / В.Н. Скороходов, П.П. Чернов, Ю.А. Мухин, С.М. Бельский // Материаловедение и высокотемпературные технологии: сб. научн. трудов. - Н.Новгород, 2000.- С.155-

159.

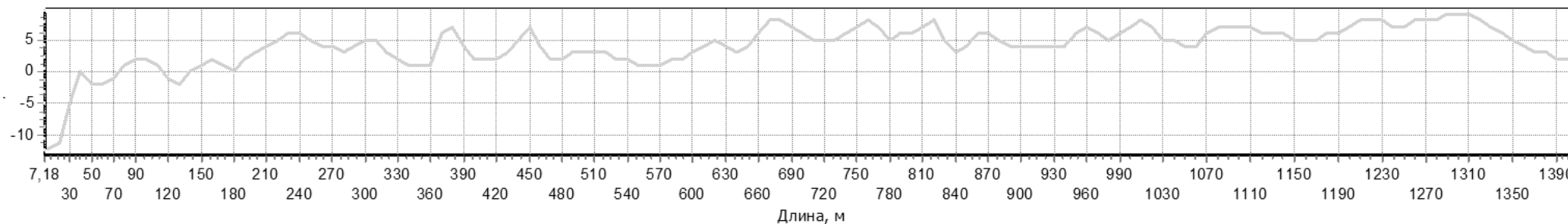
92. Скороходов, В.Н. Математическая модель процесса свободного уширения при прокатке полос / В.Н. Скороходов, П.П. Чернов, Ю.А. Мухин, С.М. Бельский // Сталь.- 2001. - № 3.-С. 38-40.

93. Бельский, С.М. Основы теории тонколистовой прокатки: учебное пособие / С.М. Бельский, Ю.А. Мухин. – Липецк: Изд-во ЛГТУ, 2013. - 82 с.

94. Коновалов, Ю.В. Расчёт параметров листовой прокатки. Справочник / Ю.В. Коновалов, А.Л. Остапенко, В.И. Пономарёв. – М., Metallurgia, 1986. - 430 с.

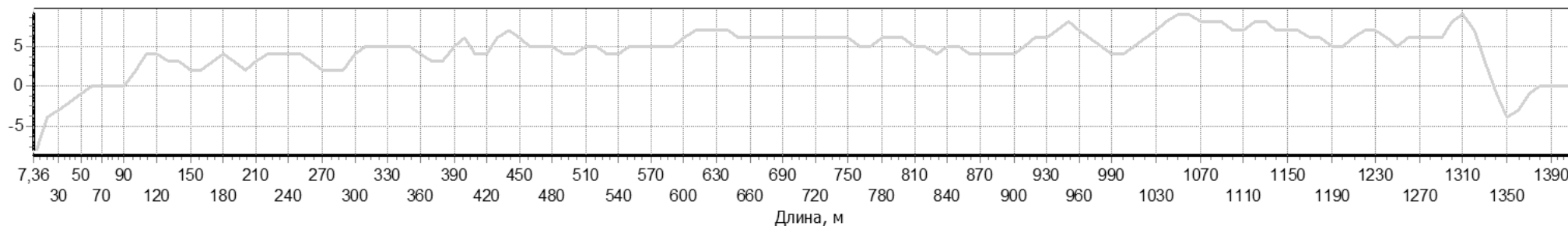
Результаты измерения клиновидности при скачкообразном уменьшении усилия прокатки

Прокатка 02.11.2013 01:31:57; плавка №9322993; партия №25607; рулон №4;  
 марка стали - 1006; позиция №3; печь №4; типоразмер 1,8x1250 мм;  
 Тренды по длине



а)

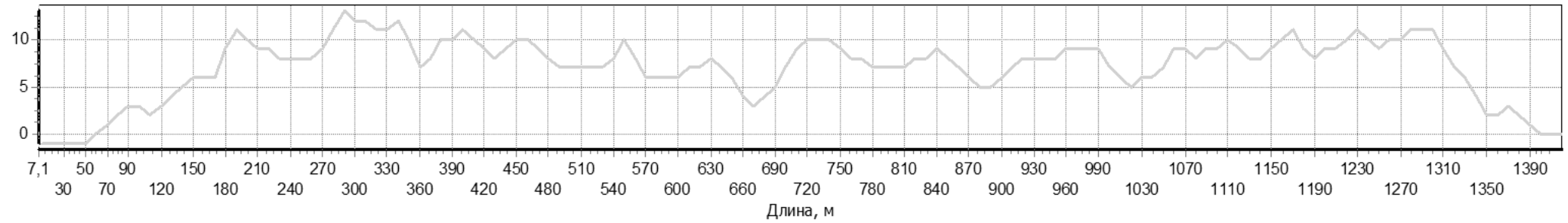
Прокатка 02.11.2013 01:33:48; плавка №9322993; партия №25608; рулон №1;  
 марка стали - 1006; позиция №3; печь №3; типоразмер 1,8x1250 мм;  
 Тренды по длине



б)

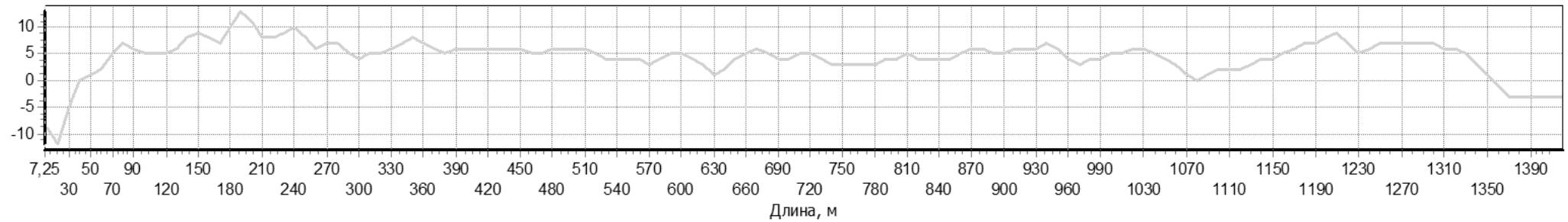
Рис. 1. Распределение клиновидности полосы: а – г – исходный типоразмер; г – последняя полоса типоразмера перед изменением усилия прокатки клетки №1 ( $P_1 = 2100$  тонн); д – з – новый типоразмер; д – первая полоса нового типоразмера после изменения усилия прокатки клетки №1 ( $P_1 = 1400$  тонн)

Прокатка 02.11.2013 01:37:49; плавка №9322993; партия №25608; рулон №3;  
марка стали - 1006; позиция №3; печь №5; типоразмер 1,8x1250 мм;  
Тренды по длине



в)

Прокатка 02.11.2013 01:39:43; плавка №9322993; партия №25608; рулон №4;  
марка стали - 1006; позиция №3; печь №1; типоразмер 1,8x1250 мм;  
Тренды по длине

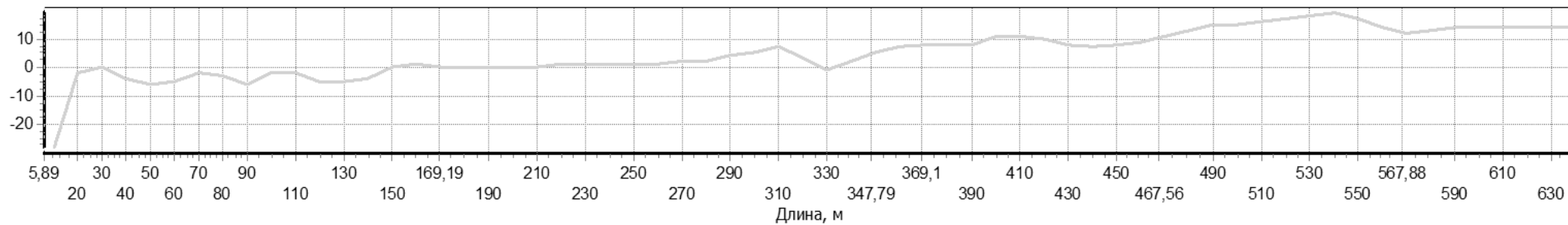


г)

Рис. 1. (продолжение)

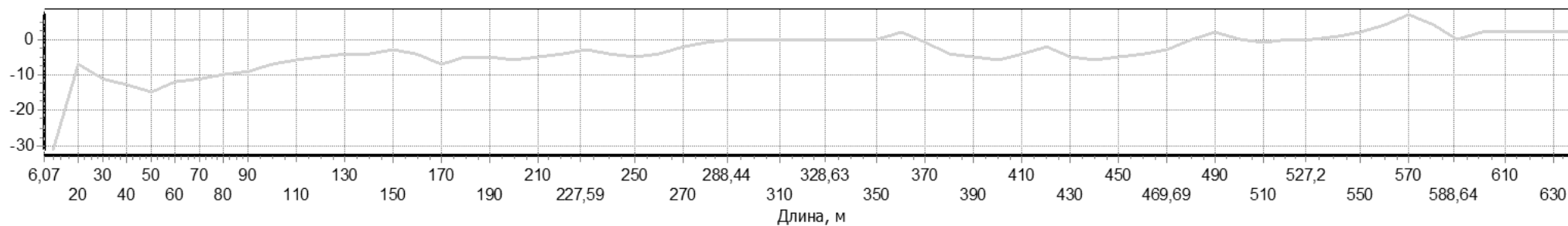


Прокатка 02.11.2013 01:41:03; плавка №9370459; партия №25609; рулон №1;  
марка стали - СтЗпс; позиция №115; печь №5; типоразмер 3x1250 мм;  
Тренды по длине



д)

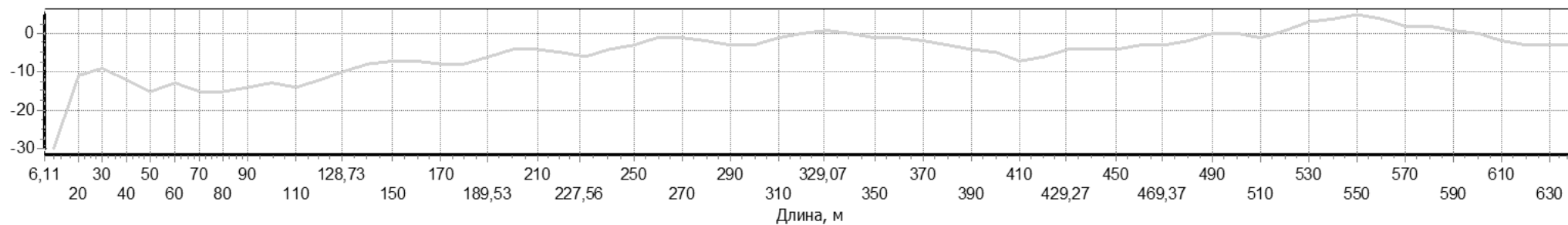
Прокатка 02.11.2013 01:42:11; плавка №9370459; партия №25609; рулон №2;  
марка стали - СтЗпс; позиция №115; печь №4; типоразмер 3x1250 мм;  
Тренды по длине



е)

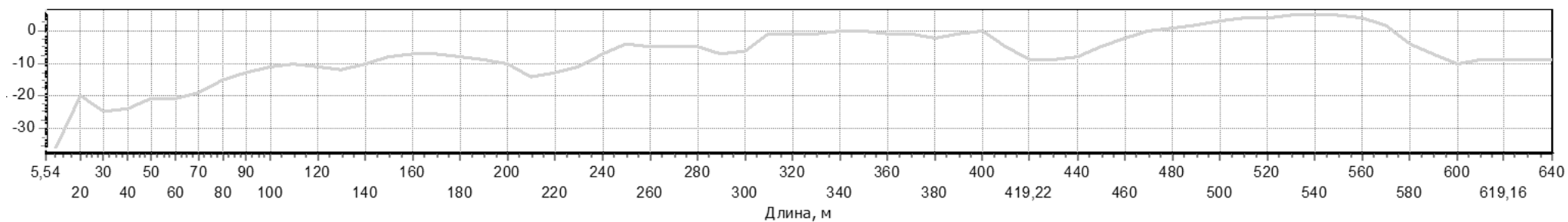
Рис. 1. (продолжение)

Прокатка 02.11.2013 01:43:19; плавка №9370459; партия №25609; рулон №3;  
марка стали - СтЗпс; позиция №115; печь №3; типоразмер 3x1250 мм;  
Тренды по длине



Ж)

Прокатка 02.11.2013 01:44:30; плавка №9370459; партия №25609; рулон №4;  
марка стали - СтЗпс; позиция №115; печь №1; типоразмер 3x1250 мм;  
Тренды по длине



з)

Рис. 1. (продолжение)

Справка об использовании в учебном процессе

УТВЕРЖДАЮ

Первый проректор ФГБОУ ВО  
«Липецкий государственный  
технический университет»

К. т. н., доцент



Качановский Ю. П.

06 2018 г.

**СПРАВКА**

об использовании в учебном процессе материалов,  
содержащихся в кандидатской диссертации аспиранта кафедры «Обработка  
металлов давлением» Стоякина А.О. «Исследование формирования клиновидности  
и серповидности горячекатаных полос для улучшения их качества»

Настоящей справкой удостоверяется, что результаты диссертационной работы на соискание ученой степени кандидата наук по специальности 05.16.05 – Обработка металлов давлением – используются в учебном процессе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Липецкий государственный технический университет» в рамках образовательной программы по направлениям подготовки бакалавров 22.03.02 «Металлургия» и магистров 22.04.02 «Металлургия», а именно: математические модели образования клиновидности профиля поперечного сечения и серповидности полос в черновой группе НШСП при чтении лекций в курсах «Теория прокатки», «Теория непрерывной прокатки» и «Неравномерность деформации».

Использование результатов диссертационной работы обсуждено на заседании кафедры «Обработка металлов давлением» от 15.03.2018 г. протокол № 8.

Начальник отдела по науке

П.А. Кровопусков

Директор Metallургического  
института ЛГТУ к. т. н., доцент

В.Б. Чупров

Заведующий кафедрой ОМД  
д-р техн. наук, профессор

И.П. Мазур

Справка об использовании практических рекомендаций

«УТВЕРЖДАЮ»  
 Директор по прокатному производству  
 ПАО «НЛМК»

  
 С.И. Мазур

« 27 » 06 2018 г.



СПРАВКА

об использовании результатов диссертационной работы  
 аспиранта кафедры ОМД ФГБОУ ВО ЛГТУ Стоякина А.О.

В результате выполнения работ по теме «Исследование формирования клиновидности и серповидности горячекатаных полос для улучшения их качества» разработаны математические модели процессов образования клиновидности профиля поперечного сечения и серповидности полос, прокатываемых в черновой группе НШСГП 2000 Цеха горячего проката.

На основе разработанных математических моделей выработаны рекомендации по корректировке перекосов межвалковых зазоров клеток черновой группы для уменьшения клиновидности и серповидности горячекатаных полос. Рекомендации по корректировке перекосов межвалковых зазоров клеток черновой группы НШСГП 2000 переданы в ЦГП для использования в технологическом процессе.

Начальник ЦГП



Н.Н. Жовнодий

И.о. начальника отдела  
 по технологии и качеству ЦГП



А.А. Щеглов

От ФГБОУ ВО ЛГТУ

Научный руководитель  
 д-р техн. наук профессор



С.М. Бельский

Аспирант



А.О. Стоякин

Патент на способ горячей прокатки полос

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



**ПАТЕНТ**

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2615670

**СПОСОБ ГОРЯЧЕЙ ПРОКАТКИ ПОЛОС**

Патентообладатель: *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Липецкий государственный технический университет" (ЛГТУ) (RU)*

Авторы: *Мухин Юрий Александрович (RU), Бельский Сергей Михайлович (RU), Бахаев Константин Вячеславович (RU), Стоякин Александр Олегович (RU), Саурин Василий Викторович (RU)*

Заявка № 2015142324

Приоритет изобретения 05 октября 2015 г.

Дата государственной регистрации в

Государственном реестре изобретений

Российской Федерации 06 апреля 2017 г.

Срок действия исключительного права

на изобретение истекает 05 октября 2035 г.

*Руководитель Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности*

 Г.П. Измаилов

