

В. В. Кухарь, А. Г. Присяжный, Е. Ю. Балалаева, О. А. Тузенко,  
А. Г. Курпе, А. С. Анищенко, И. В. Кармазина

**КУХАРЬ Владимир Валентинович** – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой обработки металлов давлением, ГВУЗ “ПГТУ”

**ПРИСЯЖНЫЙ Андрей Григорьевич** – кандидат технических наук, доцент кафедры обработки металлов давлением, ГВУЗ “ПГТУ”

**БАЛАЛАЕВА Елена Юрьевна** – кандидат технических наук, доцент кафедры информатики, ГВУЗ “ПГТУ”

**ТУЗЕНКО Ольга Александровна** – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры информатики, ГВУЗ “ПГТУ”

**КУРПЕ Александр Геннадьевич** – кандидат технических наук, главный эксперт ООО «МЕТИНВЕСТ ХОЛДИНГ»

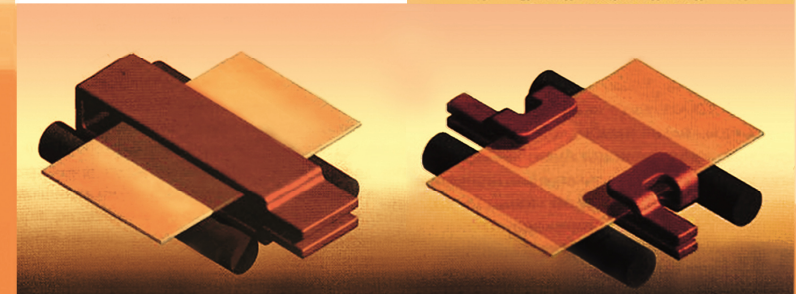
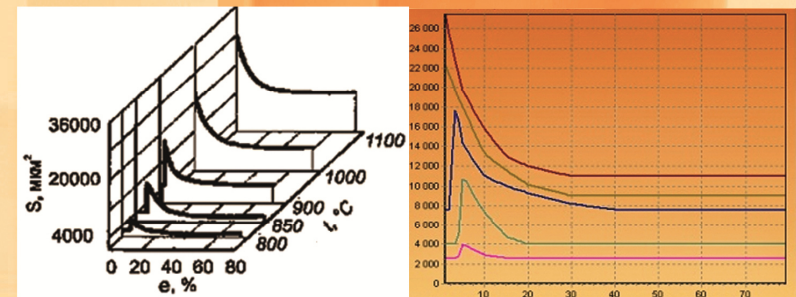
**АНИЩЕНКО Александр Сергеевич** – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, доцент кафедры обработки металлов давлением, ГВУЗ “ПГТУ”

**КАРМАЗИНА Ирина Васильевна** – аспирант кафедры обработки металлов давлением, преподаватель ММК ГВУЗ “ПГТУ”

*Рассмотрены вопросы совершенствования технологии и режимов горячей тонколистовой прокатки. Проанализированы методы управления тепловым состоянием поперечного сечения раската на непрерывных широкополосных станах (НШПС), влияние температуры на механические свойства тонких листов и полос. Изложена методика исследований и разработки математических моделей изменения температуры по ширине раската. Изучено явление подсыхания кромок полосы с использованием адаптированной математической модели и программного обеспечения. Выполнен расчет температурных и деформационных режимов прокатки широких полос с использованием индукционного подогрева полосы в условиях НШПС. Разработаны новые режимы прокатки относительно тонких полос и листов, обеспечивающие повышение равномерности распределения механических свойств проката.*

УПРАВЛЕНИЕ ТЕПЛОВЫМ СОСТОЯНИЕМ ТОНКОЛИСТОВОГО ПРОКАТА  
ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ РАВНОМЕРНОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ

УПРАВЛЕНИЕ ТЕПЛОВЫМ СОСТОЯНИЕМ  
ТОНКОЛИСТОВОГО ПРОКАТА ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ  
РАВНОМЕРНОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ  
МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ



Министерство образования и науки Украины  
Государственное высшее учебное заведение  
«Приазовский государственный технический университет»

В. В. Кухарь, А. Г. Присяжный, Е. Ю. Балалаева, О. А. Тузенко,  
А. Г. Курпе, А. С. Анищенко, И. В. Кармазина

**УПРАВЛЕНИЕ ТЕПЛОВЫМ СОСТОЯНИЕМ ТОНКОЛИСТОВОГО  
ПРОКАТА ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ РАВНОМЕРНОСТИ  
РАСПРЕДЕЛЕНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ**

Монография

*Рекомендовано Ученым советом  
ГВУЗ «Приазовский государственный  
технический университет»*

Мариуполь  
2018

УДК 621.771.23

У 67

Рекомендовано Ученым советом  
ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет»  
как учебное пособие для студентов высших учебных заведений  
(протокол № 8 от 20.12.2018 г.)

**Рецензенты:**

**Марков О. Е.** – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Механика пластического формоизменения» Донбасской государственной машиностроительной академии, г. Краматорск;

**Явтушенко А. В.** – доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Обработка металлов давлением» Запорожской государственной инженерной академии, г. Запорожье;

**Маслов В. А.** – доктор технических наук, профессор, и.о. заведующего кафедрой промышленных теплоэнергетических установок и теплоснабжения ГВУЗ Приазовский государственный технический университет, г. Мариуполь.

**Кухарь В.В.**

У 67

Управление тепловым состоянием тонколистового проката для повышения равномерности распределения механических свойств : монография / В. В. Кухарь, А. Г. Присяжный, Е. Ю. Балалаева, О. А. Тузенко, А. Г. Курпе, А. С. Анищенко, И. В. Кармазина. – Мариуполь : ПГТУ, 2018 – 144 с.

**ISBN 978-966-604-243-2**

Рассмотрены вопросы совершенствования технологии и режимов горячей тонколистовой прокатки. Проанализированы методы управления тепловым состоянием поперечного сечения раската на непрерывных широкополосных станах (НШПС), влияние температуры на механические свойства тонких листов и полос. Изложена методика исследований и разработки математических моделей изменения температуры по ширине раската. Изучены явления подстывания кромок полосы с использованием адаптированной математической модели и программного обеспечения. Выполнен расчет температурных и деформационных режимов прокатки широких полос с использованием индукционного подогрева полосы в условиях НШПС. Разработаны новые режимы прокатки относительно тонких полос и листов, обеспечивающие повышение равномерности распределения механических свойств проката.

**УДК 621.771.23**

**ББК 34.624**

© В. В. Кухарь, А. Г. Присяжный,  
Е. Ю. Балалаева, О. А. Тузенко, А. Г. Курпе,  
А. С. Анищенко, И. В. Кармазина, 2018  
© ГВУЗ «ПГТУ», 2018

**ISBN 978-966-604-243-2**

## СОДЕРЖАНИЕ

	Введение.....	6
1	АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ВОПРОСА УПРАВЛЕНИЯ ТЕПЛОВЫМ ПОЛЕМ ПОПЕРЕЧНОГО СЕЧЕНИЯ РАСКАТА НА НЕПРЕРЫВНЫХ ШИРОКОПОЛОСНЫХ СТАНАХ (НШПС) И ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ТОНКИХ ЛИСТОВ И ПОЛОС.....	10
1.1	Состояние и перспективы современного мирового производства тонких листов на широкополосных станах горячей прокатки.....	10
1.2	Способы управления распределением температур по длине и ширине тонколистового проката.....	18
1.2.1	Душирование.....	19
1.2.2	Установка контролируемого охлаждения.....	21
1.2.3	Электроннолучевой нагрев.....	22
1.2.4	Экраны.....	23
1.2.5	Индукционный подогрев.....	30
1.3	Влияние термомеханических условий деформации на механические свойства проката.....	33
1.3.1	Пластическая деформация и механические свойства проката.....	33
1.3.2	Рекристаллизация.....	34
1.3.3	Горячая пластическая деформация.....	36
1.3.4	Влияние размера зерен металла на его приемно-сдаточные характеристики .....	37
	Выводы по разделу 1.....	38
2	МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ И РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ.....	39
2.1	Температурное поле.....	39
2.2	Разработка математической модели распределения тепла в полосе..	41
2.3	Основы расчета индукторов при подогреве полосы (для нагрева в магнитном поле).....	44
2.3.1	Двухмерная модель индукционного нагрева ленты в продольном магнитном поле.....	44
2.3.2	Двухмерные модели индукционного нагрева ленты в поперечном магнитном поле.....	48
	Выводы по разделу 2.....	53

3	ПРОГНОЗИРОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ НА ОСНОВЕ РАЗРАБОТКИ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ПОДСТЫВАНИЯ КРОМОК ПОЛОСЫ ПЕРЕД ЧИСТОВОЙ ГРУППОЙ КЛЕТЕЙ НЕПРЕРЫВНОГО ШИРОКОПОЛОСНОГО СТАНА .....	54
3.1	Конечно-разностная математическая модель.....	54
3.2	Программная реализация модели.....	60
3.3	Аппроксимация диаграммы рекристаллизации для прогнозирования механических свойств в зависимости от температурно-деформационных условий прокатки полос.....	62
	Выводы по разделу 3.....	69
4	РАСЧЕТ ТЕМПЕРАТУРНЫХ И ДЕФОРМАЦИОННЫХ РЕЖИМОВ ПРОКАТКИ ШИРОКИХ ПОЛОС С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИНДУКЦИОННОГО ПОДОГРЕВА ПОЛОСЫ В УСЛОВИЯХ НЕПРЕРЫВНОГО ШИРОКОПОЛОСНОГО СТАНА 1700.....	71
4.1	Оценка неравномерности охлаждения горячекатаных полос по длине .....	71
4.2	Подогрев полосы перед чистовыми клетями индукционным способом .....	75
4.2.1	Электроиндукционный нагрев краев сляба.....	77
4.2.2	Щелевой индуктор (П–образный).....	84
4.2.3	Щелевой индуктор (С–образный) .....	87
4.3	Рациональные температурно - скоростные режимы прокатки полос на НШПГС.....	91
4.4	Оборудование и технологические режимы прокатки широких полос на НШПС 1700.....	96
4.4.1	Характеристика оборудования НШСП 1700.....	96
4.4.2	Разработка режима деформации полосы размером 1,8x1260 мм ....	99
	Выводы по разделу 4.....	106
5	УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЙ ТОНКОЛИСТОВОЙ ПРОКАТКИ НА НЕПРЕРЫВНЫХ ШИРОКОПОЛОСНЫХ СТАНАХ .....	107
5.1	Уточнение методики расчета тепловых потерь металла на непрерывных станах горячей прокатки.....	107
5.2	Освоение производства проката толщиной 1,2 мм на стане 1700 ЧАО «ММК ИМЕНИ ИЛЬИЧА».....	115

5.3	Освоение производства горячекатаных рулонов из марки стали X52M для дальнейшего производства труб согласно требованиям API-5L на стане 1700 ЧАО «ММК ИМЕНИ ИЛЬИЧА».....	120
	Выводы по разделу 5 .....	128
	Список использованных источников.....	129
	Приложение А.....	141

## ВВЕДЕНИЕ

На протяжении многих десятилетий благодаря усилиям нескольких поколений ученых и производственников основы теории и технологии тонколистовой прокатки разработаны и доведены до широкой аудитории пользователей. Тем не менее, развитие общества, его производительных сил обуславливают непрерывную эволюцию промышленности, в том числе металлургии, составной частью которой является прокатное производство, требующее постоянной модернизации, эффективно выполнять которую невозможно без надлежащего укрепления научного фундамента в этой области.

В Украине значительный вклад в развитие теории и технологии тонколистовой прокатки внесли ученые научной школы, созданной в Днепропетровске академиком Александром Петровичем Чекмаревым. В 1970 году по его инициативе на базе лаборатории листовой прокатки, организованной в Институте черной металлургии НАН Украины ещё в 1965 году, был сформирован отдел производства тонкого листа, которым в разные периоды руководили доктора наук В. И. Мелешко, В. Л. Мазур, А. М. Сафьян, И. Ю. Приходько. Отдел выполнял исследования, составившие научно–техническое обеспечение производства массовых видов широкополосного проката: автолиста, жести, сталей новых марок и назначений, обеспечивающих требуемые технологические свойства листового проката и далее продукции машиностроения. География работ отдела охватывала все без исключения листопрокатные комплексы металлургических комбинатов Украины, России, Казахстана. Достоинство проводимых в этот период научно-исследовательских работ и их результатов состояло, прежде всего, в том, что разработки выполнялись комплексно, одновременно на всех операциях и агрегатах технологического цикла, включая станы горячей и холодной прокатки, дрессировки, травильные линии, печи для термической обработки листовой стали, установки для резки металла и др.

Среди наиболее важных научных достижений, надолго опередивших результаты исследований зарубежных учёных, необходимо назвать разработки теорий формирования заданной микрогеометрии полосы [1], прокатки в режиме жидкостного и полужидкостного трения, образования напряжённого состояния рулонов, расчета и прогнозирования структуры и свойств продукции в потоке широкополосного стана [2–4], совмещённого регулирования профиля и формы полос. Результаты этих исследований были положены в основу монографий [1–11 и др.], многие из которых до настоящего времени являются настольными книгами специалистов металлургии и машиностроения.

Впервые в отечественной практике на основе исследований и разработанных технологических рекомендаций было освоено массовое производство листовой стали марки 08Ю высших категорий вытяжки и групп отделки поверхности, тонкой и тончайшей (полунагартованной) жести, гаммы экономно-легированных полосовых сталей для автомобилестроения, низколегированной полосовой стали горячекатаной травленой дрессированной листовой стали

взамен отдельных профилей холоднокатаной и др. [2, 3, 8, 10]. Результаты теоретических исследований явились научным фундаментом новых технических и технологических решений, внедренных в производство [11].

Наряду с названными выше руководителями отдела производства тонкого листа Института черной металлургии, существенный вклад в создание идеологии развития листопрокатного производства внесли его ведущие учёные, доктора и кандидаты наук А. А. Чернявский, А. П. Качайлов, С. Д. Адамский, В. Г. Иванченко, А. В. Ноговицын, С. А. Воробей, Г. В. Левченко, Л. А. Шевченко и многие другие специалисты.

Огромное влияние на формирование взглядов, идей в области теории и технологии тонколистовой прокатки оказали научные семинары, проводимые в Днепропетровском металлургическом институте (Национальной металлургической академии Украины) академиком А. П. Чекмаревым и заведующими кафедрой обработки металлов давлением А. П. Грудевым, В. Н. Данченко, А. Н. Головкин, Я. В. Фроловым, а также фундаментальные результаты ученых ВНИИМетмаша, Московского института стали и сплавов, Липецкого и Донецкого политехнических институтов, Уральской школы прокатчиков и многих других научных коллективов, проектных и конструкторских организаций. Неоценим вклад технических специалистов ЧАО «ЗАПОРОЖСТАЛИ», Магнитогорского, Карагандинского, Мариупольского металлургического комбината им. Ильича (ЧАО «ММК ИМЕНИ ИЛЬИЧА»), Череповецкого, Новолипецкого металлургических комбинатов в проведение научных экспериментов в промышленных условиях и внедрение результатов исследований в производственную практику.

В современных условиях оба украинских металлургических комбината тонколистового профиля ЧАО «ЗАПОРОЖСТАЛЬ» и ЧАО «ММК ИМ. ИЛЬИЧА» вошли в стадию глубокой реконструкции производства. При этом ученые-листопрокатчики Украины имеют необходимые подготовку и потенциал для научно-технического обеспечения и освоения новых технологий и проектирования оборудования, решения всех оперативных и перспективных вопросов. Среди научно-технических задач, требующих дальнейшей экспериментальной и теоретической разработок, назовем следующие: повышение качества и конкурентоспособности, расширение номенклатуры продукции, освоение её новых видов, экономия металла, топлива, воды, тепловой и электрической энергии, уменьшение отходов производства. Каждая из этих задач представляет собой комплекс проблем и нерешенных научно-технических вопросов.

Создание новых и совершенствование действующих технологий в условиях современных листопрокатных комплексов не может ограничиваться использованием полуэмпирических подходов, построенных преимущественно на базе производственного опыта, а должно опираться на надежный теоретический фундамент в области обработки металлов давлением. Именно поэтому теория листовой прокатки развивается путем всестороннего исследования поведения металла в очаге деформации при прокатке, выявления закономерно-

стей, связывающих показатели качества листов и полос с режимами их обжарки и последующей термической обработки. Используемые при этом методы механики сплошных сред и металлографического анализа позволяют выполнять количественные оценки происходящих в металле превращений непосредственно в процессе прокатки.

К новому классу теоретических и прикладных задач листопрокатного производства относятся задачи прогнозирования структуры и свойств стали; предупреждения дефектов, сплошности листового металла; оценки надежности технологических операций прокатки и последующей отделочной обработки; построения математических моделей, учитывающих вероятностную природу производственных процессов в металлургии; достаточно строгого моделирования изучаемых явлений с учетом многофакторности, сложной взаимозависимости, многостадийности производственных переделов. Разработанные в Институте черной металлургии НАН Украины (Ноговицыным А. В. с сотрудниками) математические модели позволяют прогнозировать структуру и механические свойства отдельных марок сталей в процессе горячей прокатки на станах различного типа достаточно достоверно [11]. Особое внимание должно быть уделено построению математических моделей и алгоритмов нового поколения, компьютерным системам расчета и оптимизации, процессов горячей и холодной прокатки, работающих в реальном масштабе времени и пригодных для использования в системах автоматического управления прокатными станами. Примером таких решений могут служить разработки, выполненные и внедренные в производство под руководством Приходько И. Ю. и Чернова П. П. на Новолипецком металлургическом комбинате.

Сегодня все крупные научные коллективы разработали и используют математические модели и алгоритмы расчета параметров процесса проката, которые дают результаты достаточно близкие к наблюдаемым в промышленной практике. При этом используемые модели различаются между собой набором допущений и выбором эмпирических констант [12].

Долгое время в металлургии требуемого внимания не уделялось вопросам снижения затрат энергии при прокатке. Сегодня же приоритет в промышленности состоит в существенном уменьшении энергоемкости производства металла. Реализация энергосберегающего направления развития металлургии рассматривается как неременное условие достижения энергонезависимости Украины. Тенденции на мировом рынке энергоносителей свидетельствуют о том, что цены на газ, нефть, уголь будут непрерывно возрастать. Скорее всего, добыча их в мире в перспективе не увеличится. Будет повышаться стоимость электроэнергии. Поэтому острота проблемы тепло- и энергосбережения в металлургии и прокатном производстве будет возрастать.

Энергия при прокатке стали на широкополосных станах горячей прокатки (ШСГП) расходуется, во-первых, на нагрев и, во-вторых, на деформацию металла. Затраты на нагрев слэбов составляют 55...60 % всех энергозатрат на ШСГП. Заметим, что на мелкосортных станах для нагрева заготовок перед прокаткой тратится 70...90 % энергии. Суммарный расход энергии зависит от

компоновки черновых и чистовых групп клетей конкретного стана и может быть минимальным при выборе оптимальных температур нагрева слябов, заготовок, режимов прокатки.

Энергия в производстве листов и полос существенно экономится при прямой подаче слябов на ШСГП, минуя нагревательные печи. Производственный опыт свидетельствует, что при организации горячего посада непрерывнолитых слябов в нагревательные печи при температуре 300 °С расход топлива на их нагрев сокращается примерно на 10...12 %. Если температура слябов при их посадке в печь составляет 900 °С и более, то экономится до 60 % топлива. Считается, что снижение температуры нагрева слябов перед прокаткой на ~ 10 °С позволяет уменьшить расход топлива 2 %. Возможности снижения температуры нагрева слябов в печах или осуществления «транзитной» прокатки возрастают при реализации мероприятий по уменьшению потерь тепла раскатами при их движении в линии ШСГП. Среди таких мероприятий можно назвать, во-первых, оснащение ШСГП перемоточным устройством («койлбоксом») на промежуточном рольганге. Во-вторых, применение теплосохраниющих устройств, экранирующих поверхность раскатов от взаимодействия с окружающей средой или подогревающих подстывающие участки (кромки раската). Можно ожидать, что процесс совершенствования теплосохраниющих установок и систем будет продолжаться и дальше по пути повышения их эффективности в части теплосбережения и надежности работы в условиях интенсивной эксплуатации. Наука здесь располагает широким полем для поиска.

При реконструкции и модернизации ШСГП, действующих, в частности, на комбинатах ЧАО «ЗАПОРОЖСТАЛЬ» и ЧАО «ММК ИМЕНИ ИЛЬИЧА», основное внимание уделяется поиску таких решений, (прежде всего, компоновки и модернизации клетей черновых групп станов), которые обеспечат, с одной стороны, минимальный расход энергии на нагрев и прокатку полос, а с другой необходимые для получения требуемых структуры и свойств горячекатаной стали температуры конца прокатки и смотки полос.

# **1 АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ВОПРОСА УПРАВЛЕНИЯ ТЕПЛОВЫМ ПОЛЕМ ПОПЕРЕЧНОГО СЕЧЕНИЯ РАСКАТА НА НЕПРЕРЫВНЫХ ШИРОКОПОЛОСНЫХ СТАНАХ (НШПС) И ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ТОНКИХ ЛИСТОВ И ПОЛОС**

## **1.1 Состояние и перспективы современного мирового производства тонких листов на широкополосных станах горячей прокатки**

Проблема производства полос толщиной 0,8...1,2 мм на широкополосных станах горячей прокатки (ШСГП) не нова. В работе [13] указано, что в Японии на ШСГП, построенных в 1969 – 1972 г.г., широко практикуется прокатка полос толщиной 0,8...1,0 мм. Это станы 1780 фирмы «Ниппон кокан» (Фукуяма), 2280 фирмы «Син Ниппон сэйтэцу» (Кимицу), 1780 фирмы «Сумитомо Киндзоку коге» (Касима). Причем на последнем из упомянутых станов первая группа моталок установлена на расстоянии 60...70 м от последней клетки чистой группы и служит для сматывания в рулон полос толщиной до 2 мм. Расстояние 60...70 м было выбрано из расчета прекращения биения выходящего из стана переднего конца полосы, предупреждения чрезмерного снижения температуры смотки полос, увеличения производства за счет сокращения периода работы стана на заправочной скорости. Во Франции в 1973 г. на заводе фирмы «Solmer» начал работать ШСГП 2285, предназначенный для прокатки полос толщиной 1...17,7 мм [14].

На большинстве ШСГП Европы и США в этот период времени проводили прокатку полос минимальной толщины 1,2 мм [15].

На сданном в эксплуатацию в 1960 г. ШСГП 1700 на ЧАО «ММК ИМЕНИ ИЛЬИЧА» также первоначально предусматривалась прокатка полос толщиной 1,2 мм.

Не нова и идея замены холоднокатаного листа горячекатаным. В Украине сотрудниками Института черной металлургии (ИЧМ, г. Днепропетровск (сейчас г. Днепр)) в 70-х годах прошлого века проведены работы по оценке возможности замены холоднокатаного листа для холодной штамповки горячекатаным. В частности выполнен анализ стандартов на холоднокатаную и горячекатаную сталь, сделана сопоставительная оценка механических свойств этих сталей, проведена некоторая корректировка технологии прокатки полос на ШСГП. Горячекатаные листы толщиной 4...6 мм использовали для штамповки деталей автомобилей. Получены удовлетворительные результаты [16, 17].

Обширный комплекс работ по замене холоднокатаного листа горячекатаным в 70-х годах прошлого века проведен сотрудниками ДонНИИчермета [18]. Причем работы были выполнены для весьма серьезных потребителей (для того времени) холоднокатаной листовой продукции – автомобильных заводах: Львовском автобусном, «Коммунаре» (ныне ЗАО «Авто ЗАЗ-ДЭУ»), Горьковском, а также на Волгоградском и Харьковском тракторном и «Ростсельмаше». В результате выполненных исследований была достигнута замена 7...9 % (от

общего потребления) холоднокатаной стали горячекатаной (в основном толщиной 2 мм).

В дальнейшем работы этого направления были приостановлены по следующим причинам:

1) производство полос толщиной менее 2 мм на действовавших в тот период времени ШСГП существенно снижало их производительность;

2) качество отделки поверхности горячекатаного листа соответствовало только III группе, а холоднокатаный лист поставляют в основном по II и I группам;

3) действовавшие в тот период времени автоматические системы регулирования толщины и плоскостности полос не позволяли обеспечить на горячекатаном металле такие же показатели, как на холоднокатаном;

4) горячекатаные полосы необходимо было подвергать травлению, смазке и упаковке в соответствии с требованиями к холоднокатаному листу, а это обуславливало создание специальных участков в цехах холодной прокатки;

5) в 70-х годах стоимость сырья, энергоносителей и труда была так низка, а дефицит металлопродукции так высок, что заниматься кропотливой работой как на самом металлургическом предприятии по повышению качества горячекатаного листа, так и на машиностроительных предприятиях по переработке нормативных документов и некоторой корректировке технологии никому не хотелось.

В связи с этим на старых ШСГП полосы толщиной менее 2 мм в массовом порядке не прокатывали даже на станах 2000 Новолипецкого и Череповецкого металлургических комбинатов, где такая возможность была. Поэтому утверждения авторов работы [19] о том, что только при холодной прокатке раньше было возможно получение листов толщиной 1,5 мм не точно.

Следующий раз проблема замены холоднокатаного листа горячекатаным образовалась в 90-х годах прошлого века. Конечная цель снижение себестоимости готовых изделий из металла. Характерно то, что решение этой проблемы в широких масштабах стало возможным не в результате реализации целенаправленных технических технологических решений, а в результате общего совершенствования технологии металлургического процесса получения высококачественного чугуна, выплавки, внепечной обработки и разливки стали, коренного усовершенствования и освоения новых технологических процессов и оборудования для листопрокатного производства, систем автоматики с необходимыми датчиками для их реализации.

На рис. 1.1 показаны объемы производства сверхтонких горячекатаных полос (принято, что это полосы толщиной 1,5 мм и менее). При этом предполагают, что ежегодные темпы роста будут 8,3 % в США; 6,7 % – в Европейском Союзе; 6,6 % – в Японии [19].

Поскольку, как показано в работе [19], при производстве горячекатаного листа его себестоимость ниже, как минимум, на 20 долларов США на тонне проката, чем себестоимость холоднокатаного листа, и имеется тенденция роста цен на холоднокатаный лист, то освоение производства сверхтонкого горячекатаного листа в Украине целесообразно.

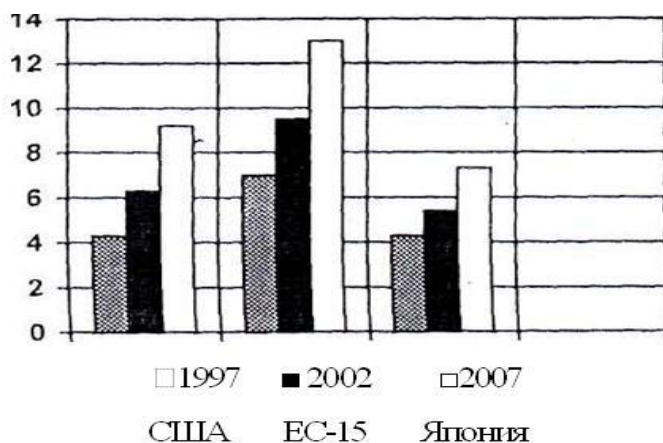


Рисунок 1.1 – Рынок сверхтонких горячекатаных полос [19]

Кроме того, внутренний рынок металлопродукции Украины в настоящее время крайне малоемок, а перспективы сохранения существующих объемов экспорта так малы, что более дешевые горячекатаные (в том числе оцинкованные) полосы и листы наверняка найдут сбыт в отечественном машиностроении и строительстве.

Целесообразность производства сверхтонких горячекатаных листов подтверждает и факт освоения производства полос толщиной 1,5 мм на стане 1700.

ЧАО «ММК ИМЕНИ ИЛЬИЧА», который является ШСГП первого поколения. Этому способствовало то, что на стане 1700 фирмой «Kvaerner Metals Clesim» (Франция) проведена модернизация, заключающаяся в установке систем автоматического регулирования толщины полос, базирующейся на гидронажимных устройствах, систем противоизгиба валков, стабилизации натяжения полосы, в установке гидравлических петледержателей, измерителей толщины, ширины и плоскостности полосы, осевой сдвижки валков. Средства автоматизации размещены в новом компьютерном зале, программное обеспечение также было разработано фирмой «Kvaerner Metals Clesim» [20].

Дальнейшему уменьшению толщины полос на стане 1700 препятствуют следующие факторы: большая протяженность черновой группы клетей и промежуточного рольганга (большое падение температуры металла); недостаточная прочность клетей и мощность электропривода; низкая скорость прокатки; устаревшее оборудование хвостовой части стана.

Таким образом, на стане 1700 в настоящее время производство полос толщиной менее 1,5 мм связано с объективными проблемами.

Вторым действующим в Украине ШСГП является стан 1680 ЧАО «ЗАПОРОЖСТАЛЬ». Этот стан построен в середине 30-х годов прошлого века. Он морально и физически устарел, нет современных систем автоматики на участке травления, отсутствует линия цинкования. Таким образом, стан 1680 ЧАО «ЗАПОРОЖСТАЛЬ» в ближайшее время с точки зрения организации производства сверхтонких полос бесперспективен.

Для решения задачи организации в Украине производства сверхтонкого горячекатаного листа целесообразно использовать зарубежный опыт.

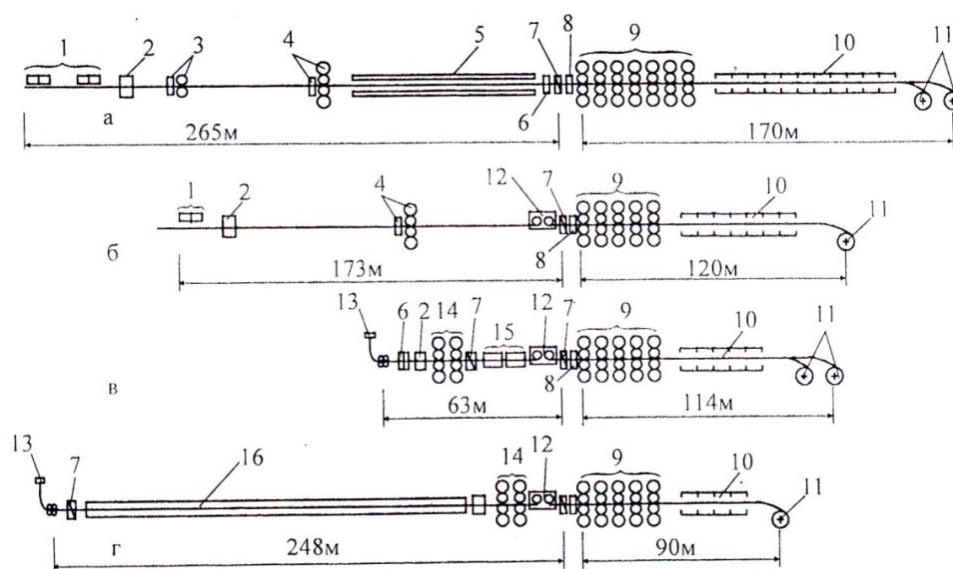
В работе [21] рассмотрены четыре схемы станов для производства горячекатаных полос толщиной 1...12 мм из слябов различной толщины (рис. 1.2, табл. 1.1 и 1.2).

Стан «а» – традиционный непрерывный ШСГП и, как видно из табл. 1.2, минимальная толщина прокатываемых полос на этом стане 1,2 мм.

Стан «б» отличается тем, что в черновой группе имеется только одна черновая клетка и уменьшена протяженность черновой линии за счет применения промежуточного перемоточного устройства (ППУ). Но минимальная толщина прокатываемых полос 1,5 мм. Станы «в» и «г» являются литейно-прокатными агрегатами (ЛПА), отличающиеся друг от друга типом подогревательных печей и за счет этого протяженностью технологической линии.

На стане «г» прокатывают полосу толщиной 1 мм, ее можно прокатывать и на стане «в».

Таким образом, из четырех рассмотренных схем, только схемы, базирующиеся на ЛПА, позволяют производить полосы толщиной 1 мм и менее.



1 – печи с шагающими балками; 2 – гидросбив печной окалины; 3 – черновая реверсивная клетка дуо и мощная клетка с вертикальными валками; 4 – универсальная черновая реверсивная клетка кварто; 5 – теплоизолирующий экран над промежуточным рольгангом; 6 – подогреватель кромок; 7 – ножницы; 8 – гидросбив вторичной окалины; 9 – чистовая группа клетей; 10 – душирующая установка над отводящим рольгангом; 11 – моталки; 12 – промежуточное перемоточное устройство (ППУ); 13 – машина непрерывного литья заготовок (МНЛЗ); 14 – черновые клетки кварто; 15 – индукционная печь для выравнивания температуры раската; 16 – проходная печь-буфер

Рисунок 1.2 – Схемы расположения основного оборудования станов: а – г (см. табл. 1.1 и 1.2)

Одним из вариантов освоения прокатки сверхтонких полос на традиционных ШСГП, может быть вариант, предложенный фирмой VAI (Австрия). Суть предложения такова. На традиционном ШСГП, использующим слябы толщиной 200...250 мм и имеющим семиклетевую чистовую группу клетей, непосредственно за последней клетью устанавливают моталку (рис. 1.3). На стане прокатывают полосу толщиной 1,5 мм, сматывают в рулон и специальным транспортным устройством передают на одноклетевый стан (разработчиками схемы он назван "PonyMill"). В клети кварто за один проход прокатывают полосу толщиной 0,8 мм. Рекомендована мощность привода валков 12 МВт, скорость прокатки 20 м/с [22].

Таблица 1.1 – Сведения о станах\* (см. рис. 1.2)

Условное обозначение	Год ввода в эксплуатацию	Стан	Место установки	
			Фирма	Страна
а	1994	2050	China Steel Corp.	Тайвань
б	1996	1800	Eko Stahl	Германия
в	1996	1500	Posco	Южная Корея
г	1998	1725	Saldanha Steel	ЮАР

\*Фирма изготовитель оборудования "Mannesmann–Demag"

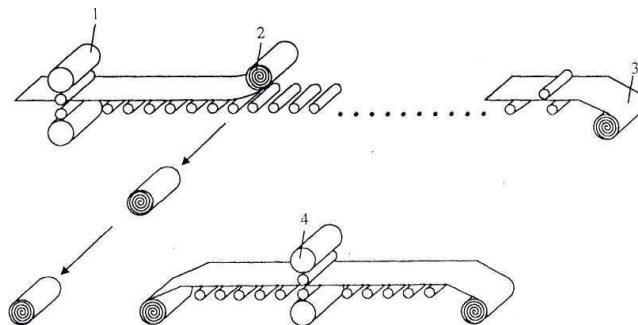
Таблица 1.2 – Характеристика станов

Параметры	Значение параметров станов (см. рис. 1.2)			
	а	б	в	г
Проектная мощность, млн.т.	3	1,6	1,8	2,5
Размеры слябов, мм				
Толщина	250...270	250	60...70	75...90
Ширина	950...1880	600...1650	900...1350	900...1560
Длина	6...9,7	4...12	–	8...34
Толщина готовой полосы, мм	1,2...12,7	1,5...13	1,8...12,7	1...8,5
Масса рулона, т	35,5	34	24	31,2
Удельная масса рулона, кг/мм	22,5	25,5	18	20

Решение ряда задач, связанных с прокаткой полос толщиной менее 1 мм на традиционных ШСГП предложено реализовать за счет применения технологии «бесконечной» прокатки. Классическим примером такой технологии может служить непрерывный стан 2050 фирмы «Кавасаки Стил» (Чиба, Япония). Схема оборудования стана 2050 показана на рис. 1.4. Новая технология освоена в 1997–1998 г.г.

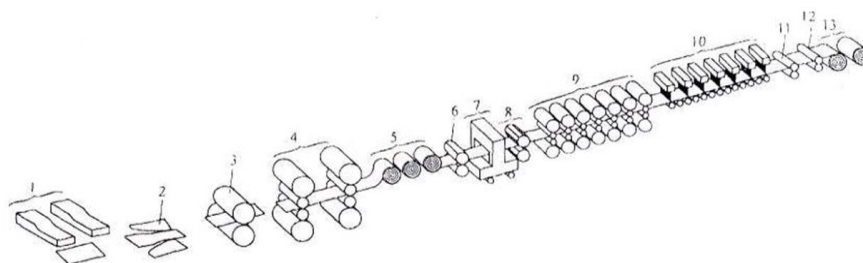
Основным агрегатом, позволяющим создать условия для «бесконечной» прокатки является участок сварки полос. Он состоит из ножниц для обрезки концов, машины для соединения и сварки концов, гратоснимателя. Длина агре-

гата 12 м, высота 6 м, ширина 6 м. Стоимость участка сварки с периферийной аппаратурой составила 12 млрд. иен (примерно 114 млн. долларов США), при общей стоимости стана 140 млрд. (примерно 1,33 млрд. долларов США).



1 – последняя клетка традиционного ШСГП; 2 – моталка, расположенная за станом; 3 – обычная моталка; 4 – стан "PonyMill"

Рисунок 1.3 – Схема расположения стана "PonyMill"



1 – нагревательные печи; 2 – пресс для редуцирования слябов по ширине; 3 – реверсивная клетка дуо; 4 – черновые клетки кварто; 5 – ППУ; 6 – ножницы; 7 – участок сварки полос; 8 – участок подогрева кромок, обрезки концов и сбива окалины; 9 – чистовая группа клеток; 10 – драпировочная установка; 11 – делительные ножницы; 12 – устройство поджатия полосы к рольгангу; 13 – моталки

Рисунок 1.4 – Схема расположения основного оборудования ШСГП 2050 фирмы "Кавасаки Стил" (Япония) [24]

Столь громадная стоимость обусловлена наличием на стане практически всего возможного для ШСГП оборудования и комплекса систем автоматики, зачастую дублирующих друг друга. Допустимая сила прокатки в клетях черновой и чистовой групп находится в диапазоне 38...50 МН. В сортамент стана входят полосы толщиной 0,8...6 мм. Максимальная ширина полос толщиной 0,8 мм – 900 мм; 0,9 мм – 1200 мм [23].

На стане достигнута высокая точность прокатки полос по толщине и ширине, высокая плоскостность. Сварка полос (до 15 штук) в «бесконечную» ленту позволяет поддерживать высокую и постоянную скорость прокатки, что обуславливает много положительных моментов.

Агрегатом, на котором стабильно прокатывают полосы толщиной менее 1 мм является ЛПА фирмы «Hylza» (Монтерей, Мексика). Изготовитель ЛПА

фирма «Shcloeman Siemag» (ныне «Shcloeman – Demag»). Разливку стали в ЛПА производят в непрерывнолитой слиток толщиной 50 мм. По сведениям на начало 2000 года на ЛПА фирмы «Hylza» доля полос толщиной 0,91...2,05 мм от общего объема производства составила 53 %, а полос толщиной 1...1,3 мм – 30 % [19].

Однако некоторые вопросы при «бесконечной» прокатке еще решены не в полной мере. Одним из них является постоянное повышение температуры валков, что изменяет их тепловую выпуклость. Это явление и обуславливает число прокатываемых полос в «бесконечном» режиме (не более 15). Несколько усложняет процесс «бесконечной» прокатки и то, что его приходится начинать с полос толщиной 2,5...2 мм (для обеспечения стабильного прохождения концов полос по отводящему рольгангу и надежного захвата переднего конца моталкой).

Аналогичная технология освоена и на ШСГП фирмы «Ниппон Стил» (Оита). Основное отличие заключается в том, что применена лазерная сварка (а не сварка встык под давлением) на стане 2050. Стоимость же оборудования для реализации «бесконечной» прокатки та же, что и на описанном выше стане 2050. Нигде, кроме Японии, процесс «бесконечной» прокатки не реализован и сообщений о таких намерениях нет.

Полосы минимальной толщины 0,8 мм получают также на аналогичном ЛПА фирмы «Thyssen Krupp Stahl» (Дуйсбург, Германия).

Ориентированный только на прокатку сверхтонких полос ЛПА действует на заводе фирмы «Trico Steel» (Декейтер, США). Особенностью агрегата является наличие двух черновых клетей и пятиклетевой чистой группы клетей, в которой первые две клетки имеют диаметр валков 825 мм, а остальные три – 680 мм, диаметр опорных валков 1450 мм. Для привода рабочих валков применены электродвигатели мощностью 6000 и 7500 кВт. Чистовая группа клетей оснащена автоматическими системами регулирования толщины полосы, противоизгиба и скрещивания валков, мощной системой охлаждения валков, чрезвычайно важной при прокатке сверхтонких полос [24].

Считать, что проблема производства сверхтонких полос на ЛПА полностью решена пока нельзя. Так, в работе [25] отмечено, что производство горячекатаных полос толщиной менее 1 мм при существующей концепции агрегата ISP затруднено. Причина заключается в том, что скорость полосы на выходе стана, необходимая для обеспечения требуемой температуры конца прокатки, с уменьшением толщины полосы увеличивается, а скорость транспортировки, допускаемая по соображениям устойчивости полосы, должна уменьшаться.

В технической литературе имеются предложения, обеспечивающие транспортировку переднего конца сверхтонких полос по отводящему рольгангу традиционных ШСГП [26]. При этом, в работе [26] впервые указано, что при прокатке полос на традиционных ШСГП трудности возникают не только при транспортировке переднего, но и заднего конца полосы (волнообразование). Для устранения этих явлений предложено формировать на концевых участках полосы ребра жесткости. Их два, они расположены симметрично относительно продольной оси полосы на некотором расстоянии от ее боковых кромок. Предложен также способ смотки, а точнее захвата переднего конца полосы моталкой

при скорости движения полосы до 20 м/сек. В промышленных условиях предложенные технические решения не опробованы, а их практическая реализация вызывает определенные сомнения.

Не исключено для производства сверхтонких полос применение стана «Стеккеля». На такую возможность, в частности, указано в работе [19]. Станы «Стеккеля» используют обычно при объемах производства проката до 1 млн. т. в год. Это чаще всего двухклетевые станы с универсальной черновой клетью чистовой клетью с моталками в печах, расположенными с передней и задней сторон рабочей клетки. Станы «Стеккеля» предлагается использовать в составе ЛПА. Опираясь на практику работы станом «Стеккеля», можно считать, что их возможности по прокатке сверхтонких полос, также как и на традиционных ШСГП, ограничиваются цифрой 1,5 мм. В технической литературе появились предложения о создании двухклетевых станом «Стеккеля». В этом случае появляется реальная возможность производства на них сверхтонких полос.

Подводя итог, можно таким образом сформулировать возможные варианты организации в Украине производства полос толщиной 0,8...1 (а может быть и 0,6...7 мм).

1. Дооборудование одного из действующих ШСГП станом «Pony Mill».

Этот вариант может быть рассмотрен только в привязке к ШСГП 1700 ЧАО «ММК ИМЕНИ ИЛЬИЧА», на котором, как показано выше, выполнена его модернизация, но требуется детальная проектная и техническая проработка, а также обеспечение его непрерывнолитыми слябами из конвертерной стали. При этом следует учитывать наличие на предприятии цеха холодной прокатки листа с агрегатами травления и цинкования.

2. Строительство ЛПА с непрерывной группой клетей на одном из действующих металлургических предприятий.

3. Строительство трехклетевого стана с универсальной черновой клетью и двухклетевого стана "Стеккеля".

При реализации второго или третьего вариантов следует иметь в виду такие обстоятельства:

а) используемая сталь должна выплавляться в конвертере или дуговой печи;

б) в большинстве случаев сверхтонкий горячекатаный лист подвергают оцинковыванию. Следовательно, необходимо будет строительство агрегатов травления и цинкования.

Согласно сведениям работ [27, 28] в Японии, США, Мексике и Испании освоена горячая прокатка полос толщиной 0,8...1,0 мм, практически не уступающих по точности и механическим свойствам холоднокатаному металлу. Прогнозируется ежегодный рост объемов производства горячекатаных особотонких полос на 8,3 % в США, 6,7 % в ЕС и 6,6 % в Японии [19]. С точки зрения обеспечения комплекса показателей качества горячекатаных сверхтонких полос необходимо осуществление научнообоснованного выбора частных обжатий при прокатке, температурных режимов, изгибов и профилировки валков [29–31].

## 1.2 Способы управления распределением температур по длине и ширине тонколистового проката

**Влияние температуры прокатки на изменение механических свойств по ширине полосы.** Определение влияния на поперечную разнотолщинность оказывает неравномерность распределения температуры по ширине полосы, наблюдающаяся при нерациональном охлаждении валков клетей чистовой группы стана [28–31]. Так, на одном из станов на выходе из чистовой 10-й клетки средняя часть ширины полос в некоторых периодах работы имела температуру  $t_{10}$  на 10...30 °С ниже, чем на боковых участках.

С целью изучения влияния градиента температур на механические свойства металла и поперечный профиль исследовались полосы из сталей марок 08 пс, 10 пс, 15 пс, 3 пс толщиной 2...3 мм и шириной 1000...1250 мм. Из одних и тех же плавок прокатывались рулоны без последующего душирования и с душированием полос после чистовой клетки. Образцы отбирались после остывания рулонов из средней части длины полос на расстоянии 40...50 мм от кромок и затем через 100...120 мм по ширине. Из каждого продольного сечения вырезалась полоска для трех образцов, данные испытаний которых затем усреднялись. На рис. 1.5 показано измерение механических свойств полос из стали 3 пс толщиной 2 (кривая 1) и 3 мм (кривая 2), шириной 1250 мм, которые после выхода из чистовой клетки при  $t_{10} = 800$  °С не подвергались душированию под водой, и поэтому температура полос при смотке на моталки равна  $t_{см} = 700...750$  °С. Предел прочности  $\sigma_B$  и предел текучести  $\sigma_T$  по ширине полосы оказываются неодинаковыми, причем кромочные участки ширины имеют большие значения  $\sigma_B$  и  $\sigma_T$ .

Четкой связи между относительным удлинением  $\delta$ , твердость  $R_{B100}$ , с одной стороны, и пределом текучести  $\sigma_T$ , с другой стороны, в данном опыте не обнаруживается. Иной характер изменения  $\sigma_B$  и  $\sigma_T$  по ширине полосы наблюдается в полосах тех же плавок, смотка которых соответствовала 530...550 °С, а температура конца прокатки составляла 880 (кривые 1, 2) и 870 °С (кривая 3). В этих случаях максимальные значения  $\sigma_B$  и  $\sigma_T$  оказались в средней части ширины полосы и минимальные на кромках (рис. 1.6).

Полосы, смотанные на моталки, охлаждаются не равномерно. Рассмотрим условия охлаждения рулонов, смотанных без душирования полосы. В первую очередь и более интенсивно охлаждаются кромки полосы, которые свободны для доступа окружающего воздуха. Средняя часть ширины рулона охлаждается медленнее. В результате различной скорости охлаждения участков ширины рулона до температуры окружающей среды изменяется интенсивность и степень структурных превращений.

Так, например, в работе [32] указывается, что при быстром охлаждении металла наблюдается замедление процесса выделения углерода из феррита, способствующего пресыщению свойств металла.

Очевидно, более интенсивное охлаждение кромок полосы в рулоне сопровождается замедлением выделения углерода из феррита, что и приводит к повышению значений  $\sigma_B$  и  $\sigma_T$  (рис. 1.5). Полосы, прошедшие душирование пе-

ред моталками, имеют температуру на кромках выше, чем в середине (порядка 590...630 °С). Таким образом, отпуск металла после смотки в средних участках ширины рулона начинается при меньших температурах, чем на участках кромок. Повышение здесь температуры отпуска способствует уменьшению предела текучести металла [33] по сравнению с его значением в более холодной средней части ширины рулона (рис. 1.6).

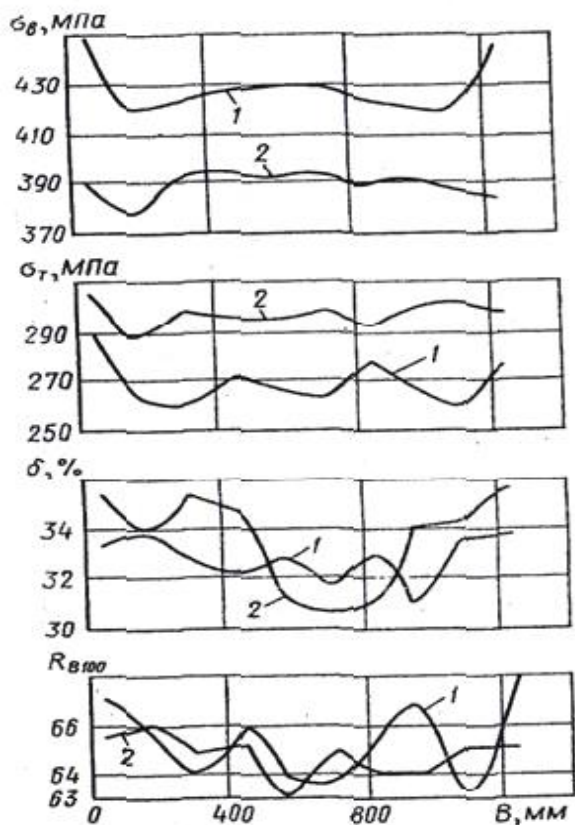


Рисунок 1.5 – Изменение механических свойств по ширине полосы без душирования после прокатки

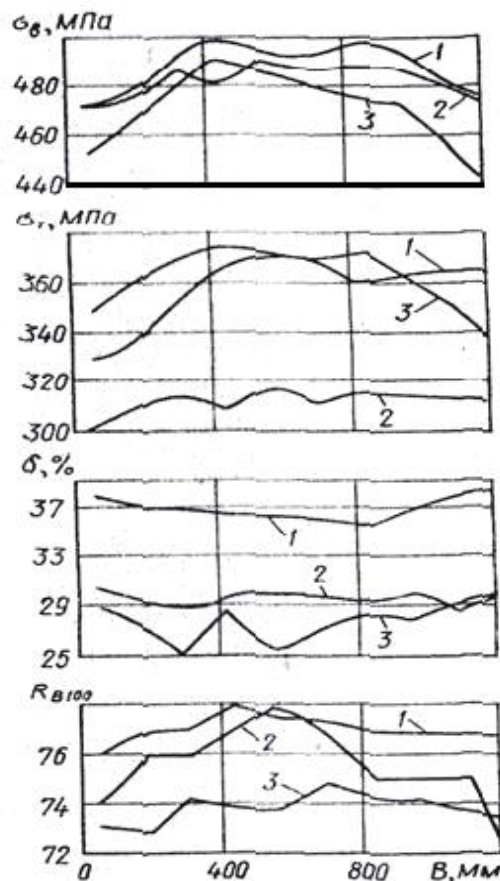


Рисунок 1.6 – Изменение механических свойств горячекатаной полосы с душированием после прокатки

Из представленных опытных результатов следует важный вывод о необходимости обеспечения равномерного распределения температуры по ширине полосы, прокатываемой на непрерывных станах.

### 1.2.1 Душирование

Проведенный анализ известных распыляющих устройств позволил выявить основные конструкционные особенности, которые могут использоваться для достижения максимальной производительности при распылении охлажденной жидкости [34, 35]. Для промышленных условий цехов горячей прокатки металла была разработана новая конструкция форсунки центробежного типа (рис. 1.7).

Количество используемых форсунок выбирается из соображений минимального расхода воды, при котором возможна стабильная и эффективная работа системы пылеподавления. Форсунки устанавливаются на коллектор, имеющий конструкцию «труба в трубе», где под давлением подается отдельно вода и воздух, которые смешиваются в камере смешения и образуют водовоздушную смесь.

Схема перекрытий факелов распыла для полосы шириной 2500 мм рассчитывается после выбора типа форсунки, которые имеют различный расход и угол раскрытия. Пример такой схемы представлен на рис. 1.8.

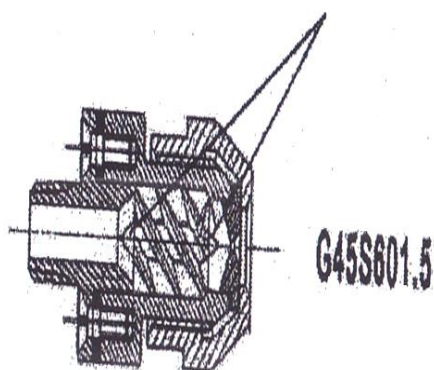


Рисунок 1.7 – Конструкция форсунки

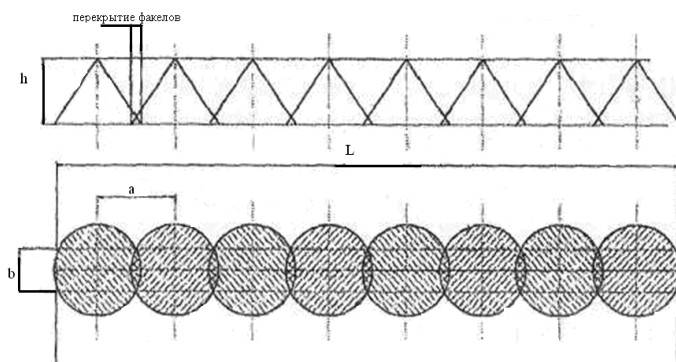
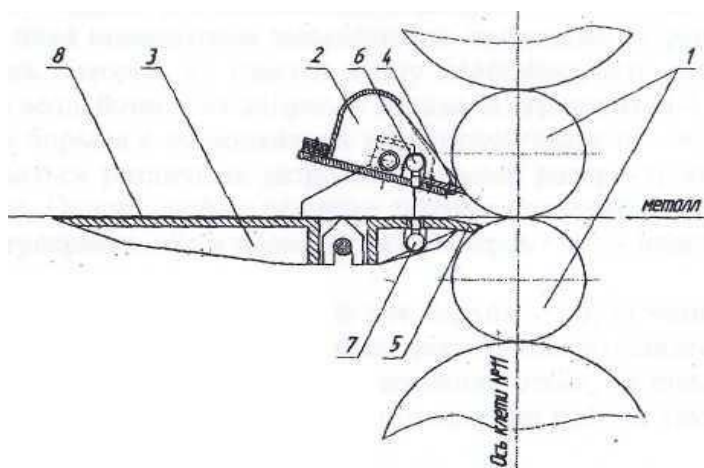


Рисунок 1.8 – Схема перекрытий факелов распыла

Коллекторы монтируются на проводковых ножах клетки стана непосредственно за опорными валками (рис. 1.9).



1 – рабочие валки; 2 – верхняя проводковая арматура; 3 – нижняя проводковая арматура; 4 – верхний нож; 5 – нижний нож; 6 – дополнительно устанавливаемый верхний коллектор; 7 – дополнительно устанавливаемый нижний коллектор; 8 – прокатываемая полоса

Рисунок 1.9 – Схема расположения коллекторов на проводковых ножах прокатной клетки стана

### 1.2.2 Установка контролируемого охлаждения

Установки управляемого или контролируемого охлаждения, по сути, можно назвать оборудованием нового поколения, которое позволяет улучшить показатели выпускаемой продукции при одновременном снижении затрат на ее производство.

Для разработки новых марок стали с улучшенными показателям металлурги, как правило, используют процесс легирования, т.е. добавления в состав стали дорогостоящих элементов, таких как никель, хром, медь, молибден, и дополнительных нагревов продукции, требующих больших энергозатрат. Использование же установок контролируемого охлаждения, позволяющих применять в производстве процесс термомеханической обработки, дает возможность отказаться от легирования и снизить затраты на производство высокопрочных сталей на 20...30 %.

В принципе, эффект термомеханической обработки стали известен достаточно давно. Так, еще в начале 1950-х годов известный ученый М. Л. Бернштейн в своих научных трудах описывал, что за счет быстрого охлаждения, фиксирующего внесенные при пластической деформации кристаллические строения, можно повысить прочность и вязкость стали, не меняя при этом уровень легирования.

Зарубежный опыт показывал, что для создания конкурентоспособных сталей разной прочности и с улучшенными в несколько раз характеристиками в прокатном цехе должна работать установка контролируемого охлаждения (УКО), позволяющая равномерно и быстро снижать температуру металла и поддерживать ее в строго заданном интервале в конце охлаждения. Однако, тогда на отечественных заводах термомеханическая обработка стали не осуществлялась, за исключением контролируемой прокатки, при которой металл охлаждают на воздухе.

Тем не менее, установки контролируемого охлаждения предоставляют возможность получения высококачественного листа с мелкозернистой структурой [28, 29]. Как известно, чем мельче зерно (структурные единицы металлов кристаллы неправильной формы), тем выше прочность стали и тем она более хладостойка. Данный процесс включает в себя несколько этапов. Сначала сталь нагревают на стане до заданной температуры и деформируют. Затем металл «подстуживают» на установке контролируемого охлаждения и возвращают на прокатный стан, где сталь повторно деформируют, но уже при более низкой температуре. Деформация металла в две стадии приводит к измельчению зерна на первой стадии прокатки и к его упрочнению за счет создания на второй стадии фрагментов внутри зерен.

Кроме того, за счет экранирования кромок, головного и хвостового участков раската, а также быстрого действия системы охлаждения наличие УКО позволяет получать сталь с пониженным уровнем напряжения и анизотропией свойств. Возможен также выпуск листа заданного химического состава с более высоким пределом текучести при сохранении заданного предела прочности, с

уменьшением числа и общего объема легирующих компонентов. С помощью УКО можно осуществлять и производство проката для тонкостенных труб. За счет использования УКО расширяется сортамент сталей для электросварных труб, стойких к сероводородному растрескиванию, повышается общая продуктивность прокатного оборудования благодаря высокой температуре прокатки и увеличению максимальных обжимов в чистой клетке.

К сожалению, несмотря на очевидные преимущества, в украинской металлургии сегодня практически не используются установки контролируемого охлаждения. В настоящее время такой агрегат есть на ОАО «Алчевский металлургический комбинат». Он был смонтирован в рамках технического перевооружения толстолистового прокатного стана 2800 в стан 3000 еще в 2006 году.

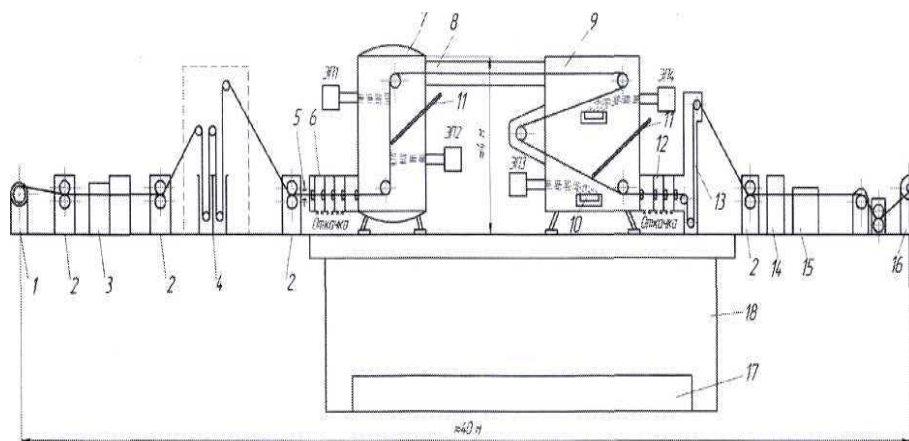
Однако в текущем году завершаются работы по сооружению комплекса установки контролируемого охлаждения производства фирмы SMS Siemag в толстолистовом цеху меткомбината «Азовсталь». В данный проект строительства только за 2012 год было вложено \$3,192 млн.

По словам представителей предприятия, ввод в эксплуатацию УКО позволил Азовстали снизить себестоимость листа за счет уменьшения количества легирующих элементов, улучшить свариваемость листа благодаря снижению углеродного эквивалента, повысить производительность стана благодаря более высокой температуре чистой прокатки, достичь более высокой степени обжата листа при чистой прокатке, а также улучшить механические свойства без увеличения расхода легирующих элементов.

### **1.2.3 Электроннолучевой нагрев**

Исследование электроннолучевого нагрева листового проката в установках вакуумной металлизации. Нагрев движущегося листа производится следующим образом. Лист движется поступательно со скоростью  $v$ , а электронные лучи ЭП1 и ЭП2, расположенные перпендикулярно поверхности листа с лицевой и обратной его сторон (см. рис. 1.10) движутся поперек, образуя линейный источник, причем, скорость  $v_{эл}$  более, чем в 10 раз выше линейной скорости движения стального листа. Учитывая вышеизложенное, считаем, что нагрев поверхности движущегося листа производится двумя линейными источниками постоянной мощности.

В соответствии с литературными данными [36], существуют следующие виды нагрева в вакууме: метод электросопротивления, индукционный метод, электрической дуги и нагрев с помощью электронного луча. Наиболее перспективным и экономичным в непрерывных линиях вакуумной металлизации является метод электроннолучевого нагрева, который обеспечивает высокую бесконтактную скорость нагрева и возможность быстрого регулирования температуры подложки.



1 – разматыватель; 2 – направляющие ролики; 3 – сварочная машина; 4 – камеры очистки, промывки и сушки (химическое травление, ультразвук); 5 – тормоз листа; 6 – система вакуумных сопротивлений (сторона входа); 7 – камера предварительного нагрева и очистки; 8 – соединительная труба; 9 – камера нанесения покрытия; 10 – тигель испарителя; 11 – терморара; 12 – система вакуумных сопротивлений (сторона выхода); 13 – камера охлаждения; 14 – датчик толщины покрытия; 15 – бункер для ленты; 16 – моталка; 17 – вакуумные насосы; 18 – рабочая площадка

Рисунок 1.10 – Схема проходной установки для электронно-лучевого нагрева листа, где: ЭП1, ЭП2 – электронные пушки для нагрева и очистки стального листа; ЭП3, ЭП4 – электронные пушки для напыления покрытия на стальной лист

#### 1.2.4 Экраны

Теплоизоляционные экранирующие установки рольганга полосового стана горячей прокатки могут базироваться на теплоотражательном и теплоаккумулирующем эффектах [28, 29]. В обоих случаях теплоизоляционная установка состоит из ряда идентичных секций, установленных на рольганге.

Известна секция теплоизоляционного экрана рольганга полосового стана горячей прокатки, базирующаяся на теплоаккумулирующем эффекте (см., например, патент РФ N 1519799).

Недостатками известной секции теплоизоляционного экрана являются: во-первых, инерционность в работе (необходимо прохождение под секцией нескольких штук горячих полос, чтобы секция вышла на стационарный тепловой режим и стала высокоэффективно экранировать металл); во-вторых, продолжительность теплового взаимодействия горячего металла с секцией экрана на различных участках рольганга полосового стана горячей прокатки существенно различна и колеблется от десятков до сотен секунд. В результате там, где продолжительность этого взаимодействия незначительна, эффект применения этих секций экранов весьма низок; в-третьих, в этих теплоизоляционных экранах используют дорогостоящие жаростойкие материалы.

Известны секции теплоизоляционного экрана рольганга полосового стана горячей прокатки, базирующиеся на теплоотражательном эффекте. Основными их достоинствами являются безинерционность в работе и относительно низкая стоимость. Известна секция теплоизоляционного экрана рольганга полосового стана горячей прокатки, содержащая несущую раму с закрепленными на ней теплоотражательными листами, выполненными из алюминия или его сплавов [26].

Недостатком известной секции теплоизоляционного экрана является низкая его работоспособность, особенно проявляющаяся на участках длительного теплового взаимодействия секции и горячего металла (например, в районе рольганга перед летучими ножницами). Последнее предопределяет необходимость установки теплоотражателей на значительном расстоянии от экранируемого металла (800...850 мм от рольганга), что существенно снижает эффект экранирования.

Известна секция теплоизоляционного экрана рольганга полосового стана горячей прокатки, содержащая несущую раму с закрепленными на ней сменными кассетами, состоящими из корпуса и сменного теплоотражательного элемента, закрепленного на корпусе с образованием между ними зазора, и трубой для подвода теплоносителя к этому зазору (см., например, а.с. СССР 1585044).

По существенным признакам эта известная секция теплоизоляционного экрана наиболее близка предлагаемой секции, поэтому принята за прототип.

Существенным недостатком такой секции теплоизоляционного экрана является то, что зазор между корпусом кассеты и теплоотражательным элементом выполнен не по всему контуру этого элемента; в конструкции предусмотрен плотный контакт между корпусом и теплоотражательным элементом по всему его периметру. Соответственно указанный зазор трансформируется в полость между корпусом и теплоотражательным элементом. При работе секции в качестве теплоизоляционного экрана имеет место интенсивной теплообмен между теплоотражательным элементом и корпусом кассеты, что требует использования в качестве теплоносителя воды. В реальных условиях работы полосового стана горячей прокатки для теплоотвода используют техническую воду. Имеющаяся в этой воде окалина накапливается в указанной полости и засоряет ее выходные отверстия. Прекращается охлаждение корпуса кассеты, вода в полости закипает, резко снижаются теплоотражательные показатели теплоизоляционного экрана. Конструкция секции разогревается, и секция теплоизоляционного экрана выходит из строя.

В совокупности указанный недостаток исключает высокоэффективное применение этих секций теплоизоляционного экрана на рольганге полосового стана горячей прокатки для снижения охлаждения металла.

Предлагаемая секция теплоизоляционного экрана рольганга полосового стана горячей прокатки свободна от указанного недостатка. В ней отсутствует по существу контакт корпуса кассеты и теплоотражательного элемента и практически исключено тепловое взаимодействие с горячим металлом элементов конструкции корпуса кассеты и несущей рамы секции экрана, тем самым мак-

симально предотвращается разогрев корпуса кассеты и через него всей секции экрана. Кроме того, развита теплоотдающая поверхность теплоотражательного элемента, что позволяет интенсифицировать отвод от этого элемента тепла, аккумулирующегося в нем при работе секции, и осуществлять этот теплоотвод подачей сжатого воздуха. Отмеченное позволяет длительное время сохранять высокие теплоотражающие свойства экрана, тем самым иметь установку с высоким эффектом сохранения тепла горячим полосовым металлом в процессе его нахождения на рольгангах стана. Предохранение конструкции секции экрана от нагрева исключает деформацию несущей рамы секции, повышает работоспособность секции теплоизоляционного экрана в целом.

Перечисленные технические результаты достигаются за счет того, что в секции теплоизоляционного экрана рольганга полосового стана горячей прокатки, содержащей несущую раму с закрепленными на ней сменными кассетами, состоящими из корпуса и сменного теплоотражательного элемента, закрепленного на корпусе с образованием между ними зазора, и трубкой для отвода теплоносителя к этому зазору, согласно предложению зазор выполнен по всему контуру теплоотражательного элемента, боковые кромки теплоотражательного элемента и корпуса кассеты закрыты дополнительными теплоотражателями, установленными с зазором относительно этих кромок, корпуса кассеты и несущей рамы секции, при этом на поверхности теплоотражательного элемента, обращенной к корпусу кассеты, выполнены ребра, расположенные вдоль рамы секции, а выходные отверстия трубы для подвода теплоносителя ориентированы вдоль рамы секции.

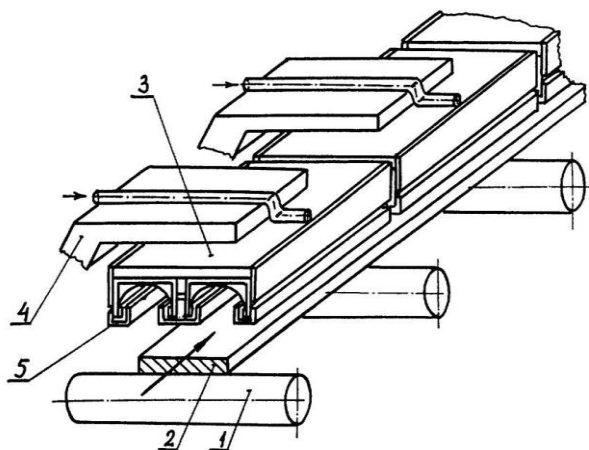


Рисунок 1.11 – Участок рольганга с установленными секциями теплоизоляционного экрана

Секция теплоизоляционного экрана рольганга полосового стана горячей прокатки пояснена чертежами на рис. 1.11 и 1.12. На рис. 1.11 показан участок рольганга с установленными секциями теплоизоляционного экрана; на рис. 1.12 – поперечное сечение секции.

Над рольгангом 1 (по рис. 1.11) полосового стана горячей прокатки, по которому транспортируют горячий полосовой металл 2, установлен ряд секций

2 теплоизоляционного экрана идентичной конструкции, снабженных приводом их перемещения 4 к (от) рольгангу 1; в каждой секции 3 установлена серия сменных кассет 5 идентичной конструкции.

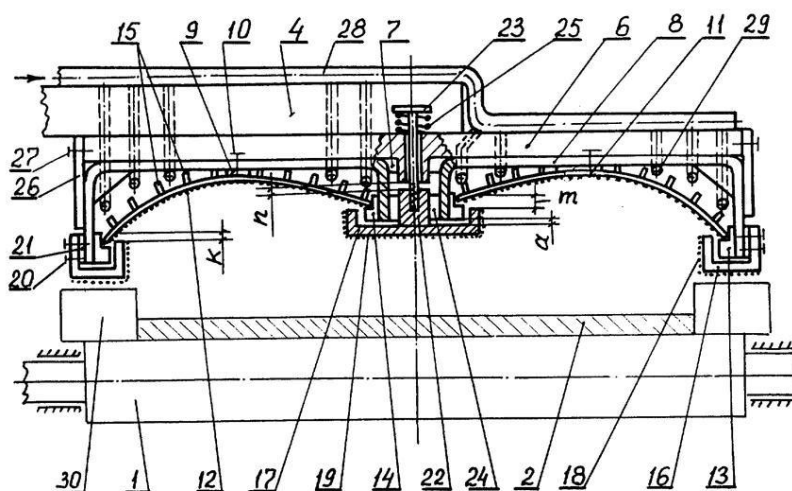


Рисунок 1.12 – Поперечное сечение секции теплоизоляционного экрана

Каждая секция (см. рис. 1.12) содержит несущую раму 6, на которой на направляющих 7 закреплены кассеты 5 с возможностью их замены. Число кассет в секции обычно четное (две, четыре и т.д.), но может быть и одна кассета. Это зависит от параметров полосового стана горячей прокатки (максимальной ширины прокатываемой на стане полосы). Каждая кассета содержит корпус 8, к которому через планки 9 болтами 10 прикреплены металлические листы 11, изогнутые в виде арки. Форма арки может быть симметричной и асимметричной; последнее зависит от места установки секции и параметров полосового стана горячей прокатки. Листы 11 на вогнутой стороне покрыты тонким слоем теплоотражающего материала 12 (на рис. 1.12 показано точками). Предпочтительно на лист 11 газотермическим способом нанесен алюминий толщиной 0,15...0,25 мм; возможна комбинация алюминия, никеля, хрома и других металлов, но в пределах отмеченных толщин. Лист 11 с нанесенным теплоотражающим материалом 12 образует теплоотражающий элемент кассеты 5. Лист 11 боковыми кромками свободно лежит на ребрах 13 и 14, приваренных к корпусу кассеты 8, не входя в соприкосновение с этим корпусом. По наружной поверхности листа 11 (сторона, обращенная к корпусу кассеты) могут быть расположены ребра 15, которые ориентированы вдоль рамы секции (по направлению движения металла 2). Таким образом, по всему периметру теплоотражательного элемента (листа 11) предусмотрен воздушный зазор, исключаяющий контакт этого элемента с корпусом кассеты 8. Боковые кромки листа 11 вместе с ребрами 13 и 14 закрыты дополнительными корытообразными балками 16 и 17, наружная сторона которых покрыта тонким слоем теплоотражающего материала 18 и 19 соответственно (на рис. 1.12 показано точками). В конечном итоге балки 16 и 17 образуют в конструкции секции дополнительные теплоотражающие элементы, предохраняющие конструкцию от прямого лучистого взаимо-

действия с горячим металлом. При этом балка 16, закрывающая кромки листа 11 с наружной стороны секции экрана, установлена с воздушным зазором относительно листа 11 (размер К на рис. 1.12) и корпуса кассеты 8 и закреплена на корпусе 8 болтами 20 через ребра 21. Балка 17, закрывающая кромки листа 11 и корпуса 8 двух oppositно установленных по ширине секции кассет 5, установлена с воздушными зазорами а и т относительно корпуса кассеты 8 и листа 11 соответственно. К балке 17 с внутренней ее стороны приварена траверса 22, которая с помощью болтов 23 подвешена к несущей раме 6. Кроме того, между траверсой 22 и корпусом кассеты 8 предусмотрено наличие ребер 24. Между болтами 23 и рамой 6 установлены пружины 25. Крепление балки 17 выполнено таким образом, что размер  $n < a$  и  $n < t$ . С наружной стороны секций 3 кассеты 5 крепятся с помощью пластин 26, прикрепленных болтами 27 к несущей раме 6. Составной частью конструкции секций теплоизоляционного экрана может быть труба 28, закрепленная на раме 6, с возможностью подвода по ней сжатого воздуха (рис. 1.11 и 1.12 указано стрелками). Выходные отверстия трубы 28 расположены на уровне воздушного зазора между листом 11 и корпусом кассеты 8 и ориентированы вдоль рамы секции. На рольганге полосового стана горячей прокатки, где установлены секции экранов, могут быть установлены направляющие линейки 30. Секции выполнены и расположены симметрично относительно продольной оси рольганга.

Секция теплоизоляционного экрана рольганга полосового стана горячей прокатки работает следующим образом.

Горячий полосовой металл 2 по рольгангу 1 транспортируют под рядом идентичных секций 3 так (рис. 1.11), что продольная ось полосы примерно совпадает с центральной осью установленных над рольгангом секций теплоизоляционного экрана. Происходит лучистый теплообмен между горячим металлом 2 и теплоотражательным слоем 12 на листах 11 и теплоотражательным слоем 18 и 19 на балках 16 и 17 соответственно (рис. 1.12). Благодаря низкой степени черноты указанных теплоотражательных слоев (для алюминия, нанесенного газотермическим способом на черный металл, степень черноты находится на уровне 0,2...0,25) основная часть лучистой энергии горячего металла отражается и тем самым экран выполняет теплоизоляционные свойства: снижает охлаждение металла при нахождении на рольганге.

При этом эффект сохранения тепла горячим металлом 2 зависит не только от степени черноты теплоотражательных слоев 12, 18 и 19, но и от высоты их расположения относительно рольганга 1. Чем эта высота меньше, тем эффект экранирования выше.

В свою очередь высота расположения секций теплоизоляционного экрана зависит от условий прохождения горячего полосового металла 2 по рольгангу 1.

После выхода из черновой группы клетей возможно передвижение полосового металла по рольгангу с излишне поднятой над рольгангом передней частью полосы, что не исключает удара переднего конца полосы по секции экрана. Последнее нежелательно, так как может разрушить секцию экрана.

На выходе в чистовую группу клетей, точнее перед летучими ножницами, для более точного ориентирования полосового металла 2 относительно продольной оси рольганга 1 применяют направляющие линейки 30. Так как ширина прокатываемого на стане полосового металла 2 может быть различной, то и положение, занимаемое линейками 30 на рольганге 1, является разным, в том числе таким, которое показано на рис. 1.12 (где представлен случай максимальной ширины прокатываемого полосового металла).

Отмеченное предопределяет расположение нижней части секции экранов относительно рольганга на уровне 270...300 мм в районе перед летучими ножницами и 300...350 мм в районе выхода полосового металла 2 на рольганг 1 после черновой группы клетей.

Дополнительно к отмеченному, при определении условий работы секций теплоизоляционного экрана необходимо учитывать, что время их теплового взаимодействия с горячей полосой 2 в районе выхода полосы из черновой группы клетей примерно в 2...7 раз меньше в сравнении с участком рольганга 1 перед чистовой группой клетей (перед летучими ножницами).

Перечисленные разные условия эксплуатации секций теплоизоляционного экрана, установленных на разных участках одного и того же рольганга полосового стана горячей прокатки, диктуют несколько разные требования к элементам его конструкции. При этом естественно общее конструктивное исполнение секций теплоизоляционного экрана должно быть одинаково.

Общее конструктивное исполнение секций теплоизоляционного экрана включает: одинаковость механизма привода секций к (от) рольгангу через элемент 4; одинаковость конструкции несущей рамы 6 и, соответственно, крепления к ней на направляющих 7 кассет 5; сменность кассет 5 и сменность в кассетах 5 листов 11 по мере потемнения теплоотражательного слоя 12; возможность замены балок 16 и 17 по мере их износа (повреждения из-за удара полосы или потемнения теплоотражательных слоев 18 и 19); максимальное исключение контакта листов 11 и балок 16 и 17 с корпусом кассеты 8 и рамой 6 секций (наличие отмеченных зазоров, составляющих существенный отличительный признак предлагаемой конструкции секции).

В районе выхода полосового металла 2 на рольганг 1 после черновой группы предпочтительна симметричная форма арки листа 11, так как другое исполнение приводит к увеличению высоты расположения основной теплоотражательной поверхности 12 относительно горячей полосы 2, тем самым снижается эффективность ее теплоизоляции. В случае удара переднего конца полосы по балке 17 прежде всего замыкается зазор  $n$  и удар через траверсу 22 передается на раму 6. Так как  $n < a$  и  $n < m$ , в этом случае не повреждаются ребра 14 и 24 и исключается контакт балки 17 с листом 11, не повреждается теплоизоляционный слой 12. Пружина 25 амортизирует усилия, возникающие при возвращении балки 17 после удара в исходное положение.

В районе нахождения горячего полосового металла 2 перед летучими ножницами предпочтительна асимметричная форма арки листа 11 (см. рис. 1.12), асимметричным соответственно принято исполнение по высоте

боковых участков корпуса кассет 8. Такое исполнение, во-первых, частично уменьшает высоту расположения теплоотражательной поверхности 12 относительно горячей полосы 2, во-вторых, уменьшает рассеивание лучистой энергии, исходящей от горячей полосы, за пределы секций экранов. В целом усиливается эффект теплоизоляции горячего полосового металла 2 на рольганге 1.

При любом исполнении теплоотражательных поверхностей 12, 18 и 19 часть тепла, исходящего от поверхности горячей полосы 2, аккумулируется в листах 11 и балках 16 и 17. Чем ниже степень черноты этих поверхностей и чем длительнее взаимодействие полосы 2 и секции экранов, тем выше разогрев листов 11 и балок 16 и 17. Реально при рассмотренных условиях взаимодействия температура этих частей секций может достигать 300...500 °С. При этом более высокие значения температуры присущи секциям, расположенным на участке рольганга перед летучими ножницами.

Наличие в конструкции кассет 5 воздушного зазора между листом 11 и корпусом кассеты 8 по всему контуру этого листа (контакт с корпусом кассет 8 выполнен только через ребра 13 и 14, число которых не превышает 3...4-х штук на одну сторону контакта) позволяет максимально избежать передачи тепла от листов 11 на корпус кассет 8. Аналогично благодаря ребрам 21 и 24 предотвращается передача тепла от балок 16 и 17 на корпус кассет 8. В конечном итоге несущая рама 6 секции теплоизоляционного экрана изолирована от тепла, проходящего под ней горячего металла, тем самым предотвращают коробление конструкции секции из-за ее разогрева.

В результате лучистого теплообмена с горячим металлом в листах 11 и балке 17 аккумулируется тепло, происходит их разогрев. Наиболее существенен разогрев этих частей кассет на участках длительного взаимодействия секций с горячим металлом (например, в районе установки летучих ножниц). Этот разогрев нежелателен для теплоотражателей, так как интенсивно снижает теплоотражательные свойства слоев 12, 18 и 19 и тем самым способствует еще большему разогреву листов 11 и балки 17. В конечном итоге эффективность работы теплоизоляционного экрана резко снижается конструкция, по существу, становится неработоспособной.

На участках рольганга с кратковременным взаимодействием секций с горячим металлом в листах 11 и балке 17 аккумулируется относительно меньшее количество тепла, и могут не требоваться какие-либо дополнительные мероприятия по отводу этого тепла (например, в случае применения секции экрана в черновой группе клетей).

Но в основном в конструкции кассет 5 применяют листы 11 с ребрами 15, выполненными на поверхности листа 11, обращенной к корпусу кассет 8. Тем самым увеличивают теплоотвод от листов 11. При этом указанные ребра 15 располагают вдоль рамы секции, чем способствуют, во-первых, лучшему обтеканию теплоносителя (воздуха) относительно листов 11, во-вторых, улучшают удаление воздушной окалины с поверхности листов 11.

В местах рольганга с длительным взаимодействием секций с горячим металлом, для отвода тепла от листов 11 и балки 17, обязательно используют сжа-

тый воздух, который подают по трубе 28, выходные отверстия 29 которой расположены на уровне воздушного зазора между листом 11 и балкой 17 и корпусом кассеты 8. Сжатый воздух омывает ребра 15, лист 11 и траверсу 22, тем самым отводится тепло, аккумулирующееся в указанных элементах конструкции секции. При этом воздух омывает также корпус кассеты 8, чем дополнительно уменьшает вероятность разогрева конструкции секции в целом.

Применение воздуха в конструкции секции, как уже отмечено, позволяет также удалять окалину, оседающую в виде пыли на поверхности листа 11 с наружной от горячего металла стороне. Тем самым устраняют утепляющее действие осевшей окалины на лист 1, т.е. дополнительно предотвращают разогрев этих листов.

Таким образом, применение предложенных секций теплоизоляционного экрана полосового стана горячей прокатки позволяет иметь установку с высоким эффектом снижения потерь тепла металла, надежно работающую на разных участках рольганга стана. При этом высокой надежности в работе достигают благодаря наличию воздушных зазоров между теплоотражательными элементами, корпусом кассеты и рамой секции. Высокого эффекта экранирования в конструкции дополнительно достигают благодаря сохранению экранами теплоотражательных свойств, которое обеспечивают исполнением на наружной от горячего металла поверхности теплоотражательных элементов ребер и возможностью подвода в воздушный зазор между теплоотражательными элементами и корпусом кассеты сжатого воздуха. При этом в полной мере используется важнейшее достоинство теплоотражательных экранирующих установок – эффект безинерционности в сохранении тепла горячим полосовым металлом.

### **1.2.5 Индукционный подогрев**

Для Чепецкого механического завода разработан технический проект линии также комбинированного нагрева (индуктор плюс печь сопротивления) мерных заготовок из титана и циркония с обеспечением точности нагрева  $\pm 7^\circ\text{C}$ .

Для этого же завода начата подготовка к работе по модернизации индукционных печей для нагрева слитков из титана и циркония диаметром до 450 мм и длиной до 2-х метров.

Метод комбинированного нагрева можно рекомендовать, взамен чисто газового нагрева, также при нагреве стальных слябов и крупных заготовок перед прокаткой. Снижение температуры подогрева заготовок в газовых печах до  $750^\circ\text{C}$ , с последующим эффективным догревом до температуры прокатки в индукторах, позволяет сократить в несколько раз длину нагревательного оборудования и время нагрева, снизить потери металла на окалину, существенно повысить работоспособность печей, увеличить межремонтный период.

На многих металлургических заводах Европы, Америки, Японии и других стран уже более 10 лет успешно решается чрезвычайно актуальная задача расширения сортамента листопрокатных станов и повышения качества ленты из среднеуглеродистых и трансформаторных сталей. Индукционные нагреватели, встраиваемые в линии листопрокатных станов, обеспечивают возможность по-

догрева подката на 150...250 °С перед чистовыми клетями, что позволяет получать ленту с уменьшенной толщиной проката и повышать ее качество (рис. 1.13).

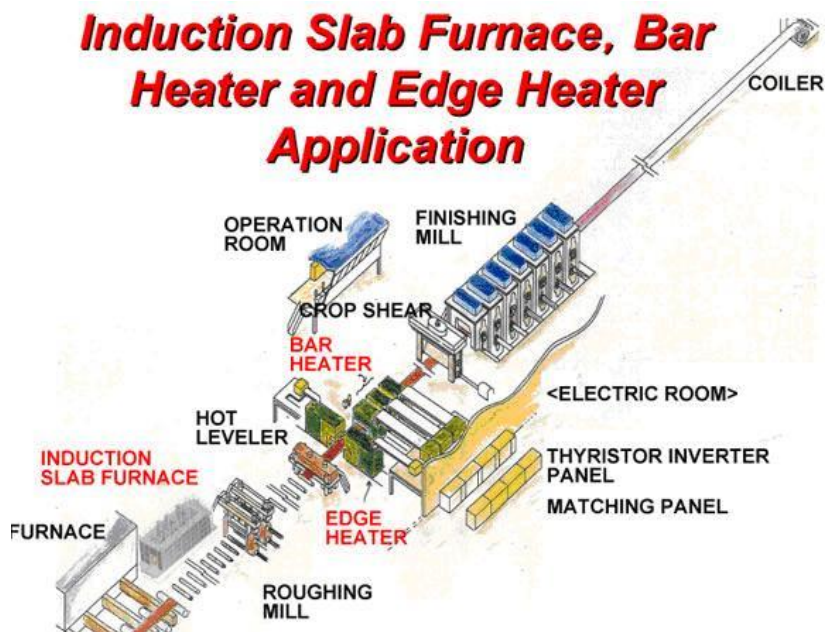


Рисунок 1.13 – Базовая схема листопрокатного стана с индукционным подогревом подката

Японская фирма TMEIC создала, начиная с 1998 года, более 12 индукционных печей мощностью от 17 до 46 МВт для подогрева подката в линиях прокатных станов по заказам Японии, Кореи, Китая и Тайваня.

Особенно эффективно проявляется возможность подогрева трансформаторных сталей, т.к. при этом появляется возможность добиться такой структуры стали, при которой происходит снижение потерь холостого хода и, соответственно, расход электроэнергии при использовании их для изготовления магнитопроводов мощных трансформаторов.

По заказу НЛМК во ВНИИТВЧ выполнено моделирование, расчет параметров и эскизное проектирование индукционного нагревателя мощностью 64 МВт для подогрева подката шириной 1880 мм и толщиной 50 мм с производительностью 600 т/час. Комбинируя и оптимизируя работу индукторов с поперечным и продольным магнитными полями, удалось достичь требуемой величины подогрева и точности распределения температуры по сечению подката (рис. 1.14 и 1.15). На рис. 1.16 приведены эскизные проработки конструкций индукторов с продольным и поперечными полями, мощность 3 МВт [37].

Одновременно с подогревом всего сечения подката возможен подогрев только кромок, температура которых при подходе к чистовым клетям, как правило, ниже середины подката на 50...70 °С. Особенно эффективно применение подогрева подката в листопрокатных станах, где подкат получают не черновой прокаткой слябов, а путем непрерывной разливки. Подобный стан с успехом эксплуатируется в Италии, г. Кремона.

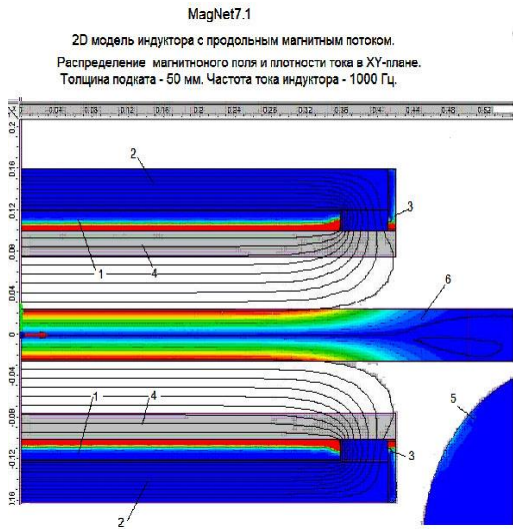


Рисунок 1.14 – Схема нагрева и распределение магнитного поля в индукторе с продольным полем

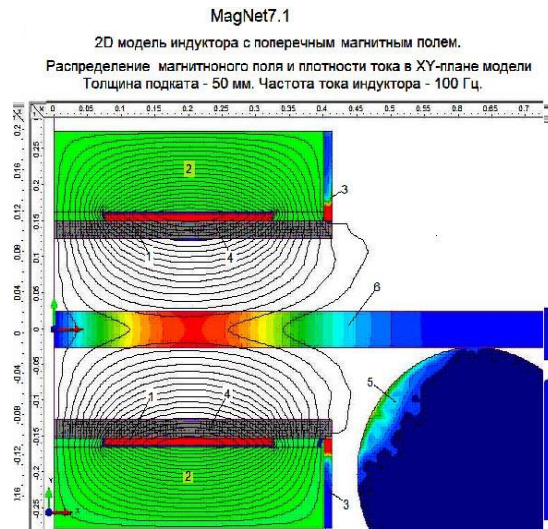
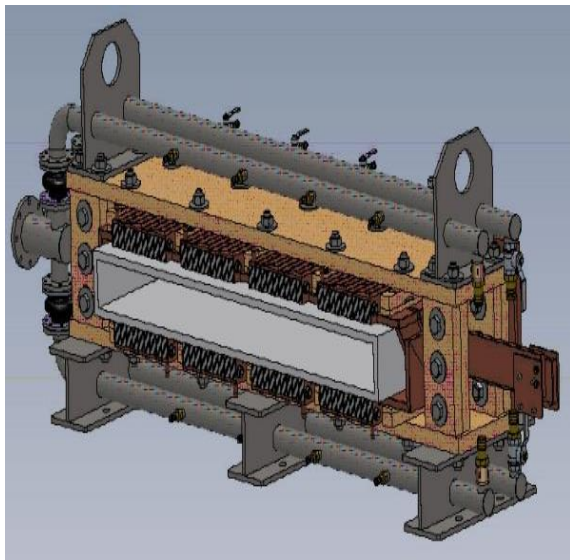
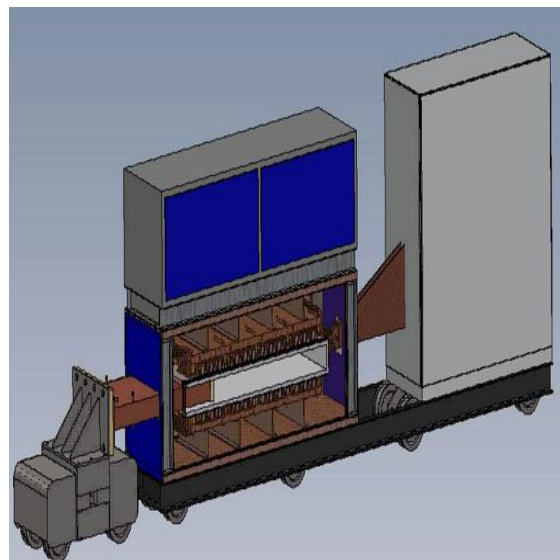


Рисунок 1.15 – Схема нагрева и распределение магнитного поля в индукторе с поперечным полем



а



б

а – с продольным полем, б – с поперечным полем

Рисунок 1.16 – Эскиз индукторов для нагрева подката

Безусловно, гораздо более экономичным было бы предусматривать использование подобных индукционных нагревателей на этапе разработок новых подобных агрегатов, т.к. встраивание нагревательных блоков в действующие прокатные агрегаты требуют существенной модернизации их конструкции [38].

Моделирование и расчеты показали теоретическую и практическую возможность реализации подобного проекта.

## 1.3 Влияние термомеханических условий деформации на механические свойства проката

### 1.3.1 Пластическая деформация и механические свойства проката

Пластическая деформация – это деформация, которая сопровождается изменением формы и размеров образца. При этом изменяется структура металла, а, следовательно, и его свойства. Пластическая деформация лежит в основе многих технологических способов обработки металлов давлением: прокатки,ковки, штамповки, прессования и т.д.

Основными механизмами пластической деформации являются: скольжение, двойникование, межзеренное перемещение.

Первые два характерны для деформации монокристалла, т.е. происходят в пределах одного зерна. Межзеренное перемещение происходит при деформации поликристаллического материала.

Величину деформации определяют степенью пластической деформации [40, 41]  $\varepsilon$ :

$$\varepsilon = \frac{h_0 - h}{h_0} \cdot 100\%, \quad (1.1)$$

где  $h_0$  и  $h$  – размер образца до и после деформации соответственно.

С увеличением степени пластической деформации свойства, характеризующие сопротивление деформации, (прочность, твердость) повышаются, а способность к пластической деформации (пластичность, ударная вязкость) уменьшаются (рис. 1.17). Упрочнение металла при пластической деформации называется наклепом или нагартовкой.

Упрочнение металла в процессе пластической деформации вызвано:

- увеличением плотности дефектов кристаллического строения (вакансий, межузельных атомов);
- увеличением плотности дислокаций до  $10^{11} \dots 10^{12} \text{ см}^{-2}$ ;
- искажением кристаллической решетки;
- дроблением зерен.

Уровень деформационного упрочнения зависит от кристаллического строения металла: металлы с ГЦК-решеткой упрочняются сильнее, чем металлы с ОЦК-решеткой.

Состояние наклепанного металла является неравновесным, и, в связи с этим, термодинамически неустойчиво. При нагреве деформированного металла происходит его переход в более стабильное состояние, так как при повышении температуры ускоряется перемещение точечных дефектов, создаются условия для перераспределения дислокаций и уменьшения их количества.

Процессы, происходящие при нагреве, проходят последовательно несколько стадий, их подразделяют на возврат и рекристаллизацию. Температурные интервалы этих процессов индивидуальны для каждого металла и определяются в зависимости от температуры плавления  $T_{\text{пл}}$ .

При нагреве до  $T = (0,2...0,3) T_{пл}$  начинается процесс возврата, который заключается в повышении структурного совершенства наклепанного металла без заметных изменений структуры и свойств.

### 1.3.2 Рекристаллизация

При дальнейшем повышении температуры диффузионная подвижность атомов возрастает, что приводит к изменениям в микроструктуре, зарождению новых равноосных зерен. Образование новой структуры из равноосных зерен взамен вытянутых зерен деформированного металла называется рекристаллизацией. Температура, при которой появляются первые равноосные зерна, называется температурой начала рекристаллизации (рис. 1.18). При этой температуре отмечается начало изменения механических свойств: прочность и твердость металла уменьшаются, а характеристики пластичности повышаются.

Температура начала рекристаллизации конкретного металла или сплава зависит от его температуры плавления [42, 43]:

$$T_{н.р.} = \alpha T_{пл}, \quad (1.2)$$

где  $\alpha$  – коэффициент, зависящий от состава сплава и степени его чистоты.

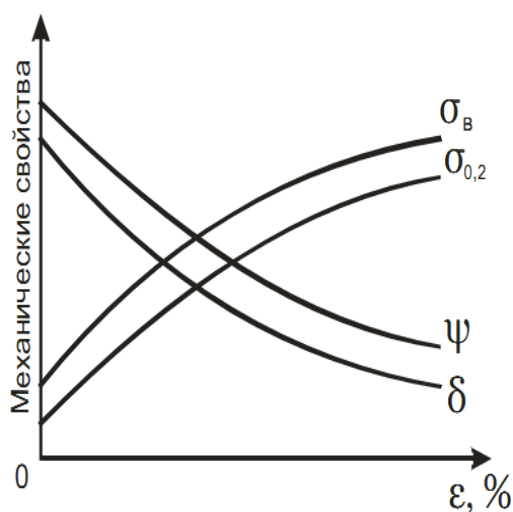


Рисунок 1.17 – Влияние степени пластической деформации на механические свойства металла

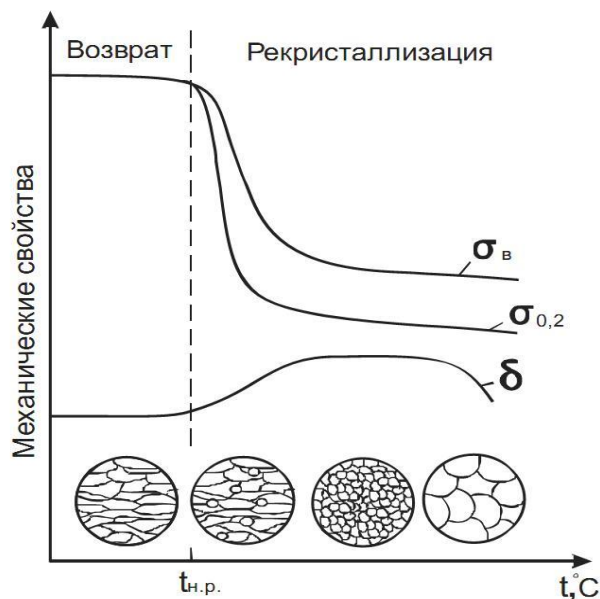


Рисунок 1.18 – Изменение структуры и свойств деформационно-упрочненного металла при нагреве

Для технически чистых металлов  $\alpha = 0,4$ , для сплавов со структурой твердых растворов  $\alpha = 0,5...0,6$ . Уменьшение количества примесей в металле понижает коэффициент  $\alpha$  до  $0,1...0,2$ , а наличие большого количества легирующих элементов увеличивает значение  $\alpha$  до  $0,7...0,8$ .

Температура начала рекристаллизации тем выше, чем меньше степень пластической деформации, меньше длительность нагрева и чем больше величина зерна до деформации.

При нагреве выше температуры начала рекристаллизации происходят структурные изменения, соответствующие стадиям рекристаллизации.

Первичная рекристаллизация начинается с образования мелких равноосных зерен при  $T_{н.р.}$ . При повышении температуры количество новых зерен увеличивается, а их размер практически не меняется, так как скорость зарождения зерен выше скорости их роста. Первичная рекристаллизация заканчивается полной заменой волокнистой структуры деформированного металла новыми равноосными зернами. Такие изменения в структуре сопровождаются снижением прочности и повышением пластичности металла (рис. 1.18). Собирательная рекристаллизация – это процесс роста рекристаллизованных зерен при дальнейшем нагреве (рис. 1.18).

Этот процесс происходит путем поглощения мелких зерен более крупными. Движущая сила этого процесса заключается в стремлении к снижению энергии границ зерен путем уменьшения их протяженности. В результате собирательной рекристаллизации наклеп практически полностью снимается: характеристики прочности снижаются, а показатели пластичности возрастают, приближаясь к исходным значениям до пластической деформации. Разупрочнение объясняется снятием искажений кристаллической решетки и уменьшением плотности дислокаций (до  $10^6 \dots 10^8 \text{ см}^{-2}$ ).

Вторичная рекристаллизация может происходить, если какие-либо из новых зерен имеют предпочтительные условия для роста. В результате в структуре наблюдается разнотернистость, наряду с множеством мелких зерен образуется небольшое количество очень крупных зерен. Такая структура неблагоприятно влияет на механические свойства металла.

Уровень механических свойств рекристаллизованного металла зависит от размера его зерна. Чем мельче зерно, тем большей прочностью и пластичностью обладает металл. При слишком высоких температурах нагрева происходит сильный рост зерна (перегрев), что сопровождается уменьшением характеристик пластичности (рис. 1.18).

**Влияние различных факторов на размер рекристаллизованного зерна.** При нагреве деформированного металла не происходит восстановления «старых» зерен, которые существовали в структуре металла до деформации, а появляется совершенно новое зерно, размер которого может существенно отличаться от исходного. Размер рекристаллизованного зерна зависит от: температуры рекристаллизации, продолжительности рекристаллизационного отжига, степени предварительной пластической деформации.

При данной степени пластической деформации повышение температуры и увеличение продолжительности рекристаллизационного отжига приводит к увеличению размера зерна (рис. 1.19, а, б).

Величина рекристаллизованного зерна тем меньше, чем больше степень пластической деформации (рис. 1.19, в). При очень малых степенях деформации нагрев не вызывает рекристаллизации.

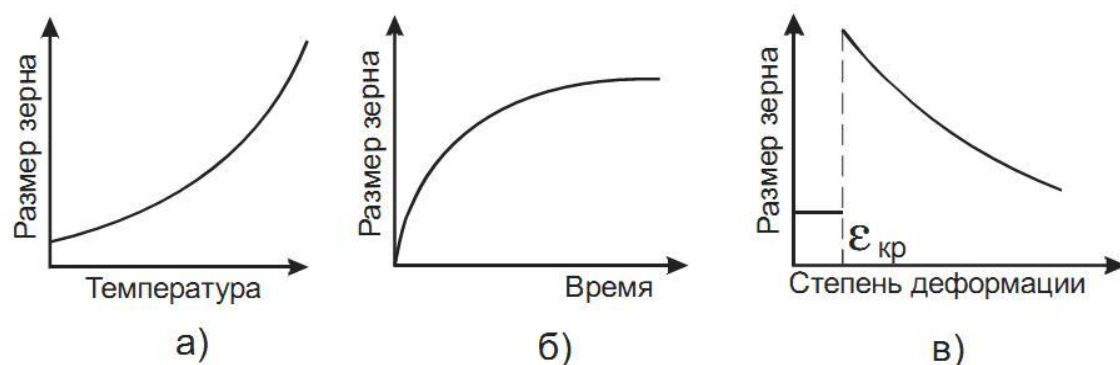


Рисунок 1.19 – Влияние температуры (а), продолжительности отжига (б) и степени деформации (в) на размер рекристаллизованного зерна

Минимальная степень деформации, выше которой при нагреве возможны рекристаллизационные процессы, называется *критической*, её величина обычно составляет 3...15 %, в зависимости от химического состава. При степени пластической деформации чуть выше критической величина зерна после рекристаллизации резко возрастает и может во много раз превосходить величину исходного зерна. Критическая степень деформации тем меньше, чем выше температура рекристаллизационного отжига.

### 1.3.3 Горячая пластическая деформация

Горячая деформация – это деформация, которая проводится при температуре выше температуры начала рекристаллизации. При горячей обработке давлением упрочнение в процессе деформации непрерывно чередуется с рекристаллизационными процессами разупрочнения при температуре обработки или при охлаждении. В результате формируется полностью рекристаллизованная структура. Размер получающихся новых зерен зависит от степени пластической деформации, сообщенной металлу, и от температуры нагрева, при которой идет процесс рекристаллизации. Чем выше температура нагрева, тем больше размер образующихся зерен. Влияние степени пластической деформации схематически представлено на рис. 1.20.

Вначале с увеличением степени деформации размер зерна при рекристаллизации сильно возрастает, затем, с дальнейшим увеличением степени деформации, уменьшается. Степень деформации, дающая максимальный размер зерна при нагреве, как сказано выше, называется *критической*. При ковке, прокатке и других видах обработки нужно следить за тем, чтобы металл не приобретал критической степени деформации, иначе при последующем нагреве получится крупнозернистый металл с неудовлетворительными свойствами [42, 43].

При горячей пластической деформации в металле протекают одновременно процессы упрочнения и разупрочнения. Если за время деформации рекристаллизация произойдет полностью, то вызываемого упрочнением изменения свойств металла не произойдет. Скорость процесса разупрочнения, вызванного рекристаллизацией, значительно меньше скорости процесса упрочнения. В

результате рекристаллизации металл в процессе горячей обработки разупрочняется и стремится приобрести равноосную неориентированную структуру.

Величина зерен (диаметр  $D$  и площадь  $S = \pi D^2/4$ ) металла зависит в основном от температуры  $t$  и относительной деформации  $\varepsilon$  (рис. 1.21).

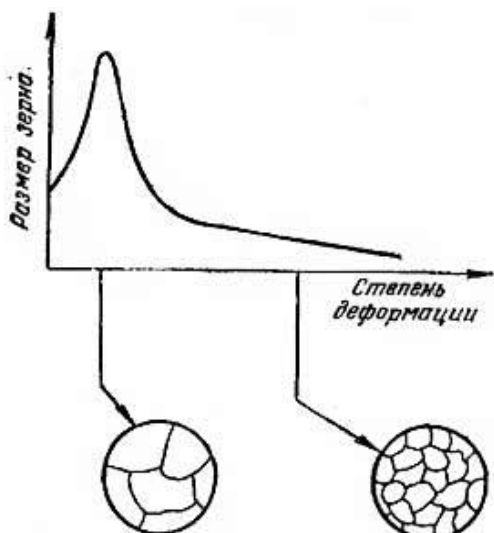


Рисунок 1.20 – Изменение величины зерна в зависимости от степени пластической деформации

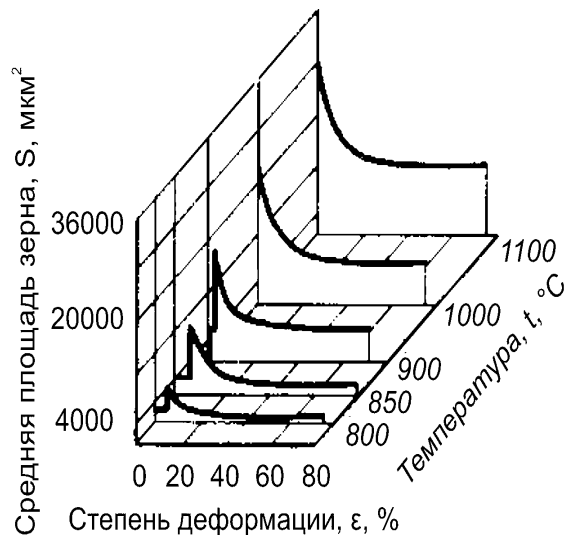


Рисунок 1.21 – Диаграмма рекристаллизации низкоуглеродистой стали

Величина зерна в металле тем меньше, чем больше послекритическая относительная деформация.

### 1.3.4 Влияние размера зерен металла на его прямо-сдаточные характеристики

Согласно источникам [41, 44] основными прямо-сдаточными характеристиками являются: предел текучести  $\sigma_T$ , временное сопротивление разрыву  $\sigma_B$ , относительное удлинение  $\delta_5$ , относительное сужением  $\psi$  и твердость по Виккерсу  $HV$ .

Значения предела текучести  $\sigma_0$  и твердости по Виккерсу  $HV$  связаны с диаметром зерна  $D$  соотношениями Холла-Петча [45–48]:

$$\sigma_m = \sigma_0 + k/\sqrt{D}; \quad (1.3)$$

$$HV = HV_0 + K/\sqrt{D}, \quad (1.4)$$

где  $\sigma_0$  – напряжение, необходимое для движения свободной дислокации;

$k$  – коэффициент, характеризующий прочность блокирования дислокаций;

$HV_0$  – твердость монокристалла по Виккерсу;

$K$  – коэффициент, характеризующий твердость монокристалла;

$D$  – диаметр зерна металла или сплава.

Таким образом, расчет размера зерен металла или сплава позволяет определять его механические свойства, такие как предел текучести и твердость.

### **Выводы по разделу 1**

1. В результате проведения анализа проблемы управления тепловым состоянием раската при прокатке на НШПС выявлен ряд прогрессивных способов влияния на распределение температур по ширине и длине полос и листов, которые позволяют достичь высокого уровня механических, геометрических и других приемо-сдаточных характеристик металлопродукции. Управление тепловым состоянием раската необходимо осуществлять на всех стадиях современных технологических производств от получения подката в тонкослябовых МНЛЗ или при валковой разливке–прокатке до завершающих пропусков в клетях непрерывных (НШПС) или реверсивных (например, Стеккеля) станов.

2. Применительно к НШПС, наиболее перспективным направлением управления тепловым состоянием раската является применение индукционного подогрева кромок тонких полос; так же энергосберегающим направлением является использование теплосберегающих и теплоотражающих экранов.

3. Выполнен комплексный анализ влияния температурных и механических условий прокатки на НШПС на размеры зерна металла и свойства проката. Указана важность механизма влияния рекристаллизационных процессов, а также условий горячей пластической деформации, на приемосдаточные характеристики проката.

4. Показано, что при прокатке тонких листов и полос процессы подстывания кромок раската оказывают существенное влияние на снижение равномерного распределения механических свойств катаной металлопродукции по ширине. Это требует внедрения и использования в технологических линиях новых способов выравнивания (уменьшения) температурных градиентов в поперечном сечении горячекатаных листов и полос.

5. Установлено, что для выполнения комплексного анализа влияния температурных условий, режимов и особенностей индукционного подогрева кромок раската требуется проведение теоретических исследований, разработка и реализация математической модели для оценки температурного градиента и степени его уменьшения в зависимости от технологических параметров прокатки на НШПС.

## 2 МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ И РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ

### 2.1 Температурное поле

Всякое физическое явление, в том числе и процесс теплопередачи, происходит в пространстве и времени. Поэтому аналитическое исследование теплопроводности сводится к излучению пространственно-временного изменения основной физической величины температуры, характерной для данного явления, т.е. к нахождению зависимости [49, 50]:

$$T = f(x, y, z, \tau), \quad (2.1)$$

где  $x, y, z$  – пространственные координаты в декартовой системе;

$\tau$  – время.

Совокупность мгновенных значений температуры во всех точках изучаемого пространства называется температурным полем. Так как температура есть величина скалярная, то и температурное поле является скалярным полем.

Различают стационарное и нестационарное температурные поля

Нестационарным температурным полем называется такое поле, температура которого изменяется не только в пространстве, но и с течением времени, или, как образно говорят, «температура есть функция пространства и времени» (неустановившееся состояние). Уравнение (2.1) есть математическая запись нестационарного температурного поля.

Стационарным температурным полем называется такое поле, температура которого в любой его точке не изменяется во времени, т.е. является функцией только координат (установившееся состояние) [49, 50]:

$$T = \Phi(x, y, z), \quad \frac{\partial T}{\partial \tau} = 0. \quad (2.2)$$

В некоторых задачах нестационарное температурное поле переходит асимптотически в стационарное, когда  $\tau \rightarrow \infty$ .

Температурное поле, соответствующее уравнению (2.1) или (2.2), является пространственным (трехмерным), так как  $T$  есть функция трех координат. Если температура есть функция двух координат, то поле называется двухмерным:

$$T = F(x, y, z), \quad \frac{\partial T}{\partial z} = 0.$$

Если же температура есть функция одной координаты, то поле называется одномерным:

$$T = \varphi(x, \tau), \quad \frac{\partial T}{\partial y} = \frac{\partial T}{\partial z} = 0.$$

Примером одномерного температурного поля может служить поле неограниченной пластины (пластина, ширина и длина которой очень велики, по сравнению с толщиной) при распространении тепла перпендикулярно к ее поверхности.

Если точки поля, имеющие одинаковую температуру, соединить, то получим изотермическую поверхность. Пересечение изотермической поверхности плоскостью дает на этой плоскости семейство изотерм (линии, соответствующие одинаковой температуре). Изотермические поверхности и изотермические линии не пересекаются между собой и при непрерывном поле не обрываются внутри него. На рис. 2.1 показаны изотермы, проведенные через точки, температуры которых отличаются на  $\Delta T$ .

Вдоль изотермы температура не изменяется, в любом другом направлении температура изменяется. Наибольший перепад температуры на единицу длины происходит в направлении нормали к изотермической поверхности.

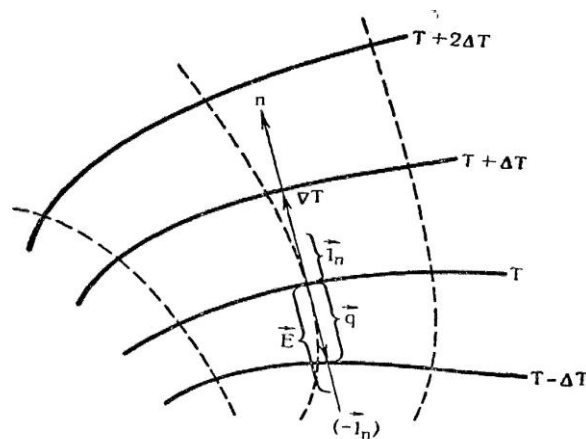


Рисунок 2.1 – Изотермы температурного поля

Возрастание температуры в направлении нормали к изотермической поверхности характеризуется градиентом температуры ( $grad T$ ). Градиент температуры есть вектор, направленный по нормали к изотермической поверхности в сторону возрастания температуры, т.е. [49, 50]:

$$grad T = l_n \frac{\partial T}{\partial n}, \quad (2.3)$$

где  $l_n$  – единичный вектор, направленный по нормали в сторону возрастания температуры (см. рис. 2.1);

$\frac{\partial T}{\partial n}$  – производная температура по направлению нормали  $n$  к изотермической поверхности.

Следовательно, градиент температуры численно равен первой производной температуры по нормали к изотермической поверхности. Градиент обозначается так же символом  $\nabla$ . Составляющие градиента по осям декартовых координат равны соответствующим частным производным, так что:

$$\text{grad}T = \nabla T = l_x \frac{\partial T}{\partial x} + l_y \frac{\partial T}{\partial y} + l_z \frac{\partial T}{\partial z}, \quad (2.4)$$

где  $l_x, l_y, l_z$  – ортогональные между собой векторы единичной длины, направленные по координатным осям.

Это соотношение обусловлено тем обстоятельством, что любой вектор можно представить как векторную сумму трех векторов, направленных по координатным осям. В итоге, вводят понятие напряженности температурного поля (вектор напряженности температурного поля) по определению [49, 50]:

$$E = -\text{grad}T. \quad (2.5)$$

## 2.2 Разработка математической модели распределения тепла в полосе

Целью настоящих исследований является изучение характеристик тепловых полей, созданных электроннолучевым нагревом на стальном прокате, например, перед нанесением покрытий.

Стационарное распределение температуры  $T$  в веществе в результате воздействия источника энергии подчиняется уравнению Пуассона [39, 40, 50, 51].

В декартовых координатах это уравнение имеет вид:

$$\left( \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right) \lambda(x, y, z) = f(x, y, z), \quad (2.6)$$

где  $\lambda$  – коэффициент теплопроводность материала, Дж/(м·с·°С);

$f(x, y, z)$  – удельная мощность Дж/с.

Уравнение распределения тепла по поверхности, движущегося с постоянной скоростью листа под воздействием линейного непрерывно действующего электронного источника постоянной мощности (2.7) имеет вид [39, 40, 50, 51]:

$$T(x_0, y_0, z_0, t) = \int \frac{2qdt'}{C_\gamma [4\pi a(t-t')]^{3/2}} \exp \left[ -\frac{(x_0 - vt)^2 + y_0^2 + z_0^2}{4a(t-t')} \right], \quad (2.7)$$

где  $q$  – линейная эффективная мощность линейного источника, Дж/с;

$C_\gamma$  – объемная теплоемкость, Дж/(м<sup>3</sup>·°С);

$a = \lambda / C_\gamma$  – коэффициент температуропроводности, м<sup>2</sup>/с;

$v$  – скорость перемещения листа, м/с;

$t$  – время перемещения источника, с;

$t'$  – момент времени начала нагрева, с.

После ряда преобразований уравнение предельного состояния процесса распределения тепла в движущемся с постоянной скоростью стальном листе под воздействием линейного источника постоянной мощности, отнесенное к подвижным координатам  $XYZ$ , принимает вид:

$$T(R, x) = \frac{q}{2\pi\lambda R} \exp\left(-\frac{vx}{2\alpha} - \frac{vR}{2\alpha}\right). \quad (2.8)$$

Расчеты показали, что распределение температуры по поверхности стального листа под воздействием линейного источника по отрицательной полуоси (рис. 2.2) в стальном листе незначительно зависит от скорости перемещения листа. Опытным путем установлено, что температура солидус листа достигается на расстоянии 25...30 см от координаты воздействия энергии линейного источника тепла.

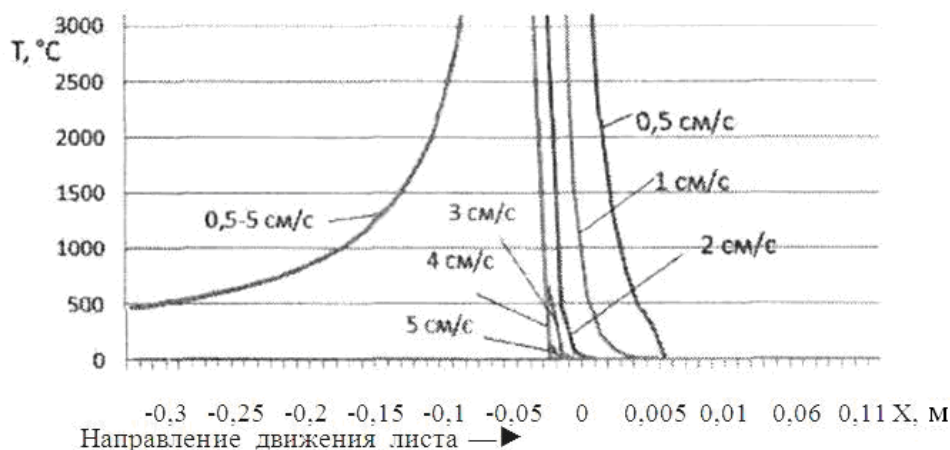


Рисунок 2.2 – Влияние скорости перемещения листа на распределение температуры предельного состояния по оси  $OX$  от линейного источника тепла ( $q = 40$  кДж/с;  $\lambda = 45,4$  Дж/(м·с·°C);  $a = 1,29 \cdot 10^5$  м<sup>2</sup>/с)

Распределение температур по оси  $OY$ , возможно рассматривать, как предельную форму температурного поля, выраженного уравнением (2.9):

$$T(R, x) = \frac{q}{2\pi\lambda\delta} \exp\left(-\frac{vx}{2\alpha}\right) K_0\left(R \sqrt{\frac{v^2}{4a^2} + \frac{b}{\alpha}}\right), \quad (2.9)$$

где  $\delta$  – толщина стального листа, м;

$K_0(u)$  – функция Бесселя от мнимого аргумента второго рода нулевого порядка;

$\alpha$  – коэффициент поверхностной теплоотдачи, Дж/(м<sup>2</sup>·с·°C);

$b = \frac{2\alpha}{C_\gamma \delta}$  – коэффициент температуротдачи,  $\text{с}^{-1}$ ;

$e^{-bt}$  – коэффициент, учитывающий теплоотдачу боковой поверхности пластины.

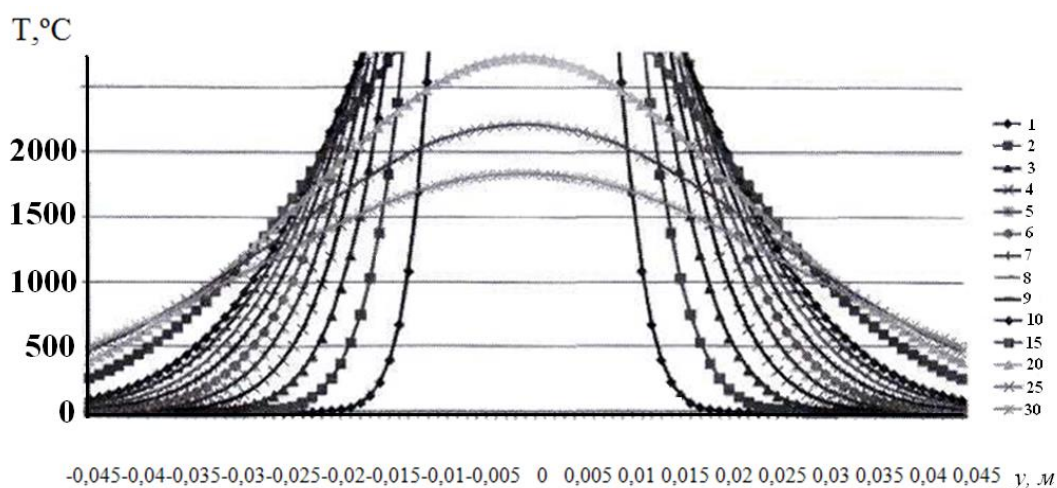
Уравнение предельного состояния процесса распространения тепла при нагреве движущегося листа мощным линейным источником имеет вид:

$$T(y_0, t) = \frac{q}{\nu \delta \sqrt{4 \cdot \pi \cdot C_\gamma \cdot t}} \exp\left(-\frac{y_0^2}{4at} - bt\right). \quad (2.10)$$

Расчитанное по формуле (2.10) распределение температуры от линейного источника (рис. 2.3) по оси  $OY$  в стальном листе зависит от скорости перемещения листа. С удалением от линейного источника в направлении противоположном движению листа (в направлении  $OX$ ) температура убывает медленно. Установившаяся температура и является температурой, обеспечивающей хорошую адгезию покрытия к подложке, и задается из условия ниже линии солидус материала.

Исходя из заданной температуры нагрева подложки, учитывая вышеприведенное распределение температурных полей и методику их расчета, открывается возможность оценки расчета индуктора при заданной скорости движения листа.

Так, например, согласно расчетам, для обеспечения рациональных условий подогрева стального листа толщиной  $\delta = 0,001$  м, шириной  $b = 1$  м, при скорости движения  $\nu = 0,01$  м/с и  $T_n = 500$  °С, энергия нагрева составляет 84,6 кВт.



$$q = 40 \text{ кДж/с}; \lambda = 45,4 \text{ Дж}/(\text{м} \cdot \text{с} \cdot \text{°C}); a = 1,29 \cdot 10^5 \text{ м}^2/\text{с};$$

$$C_\gamma = 3,51 \cdot 10^6 \text{ Дж}/(\text{м}^3 \cdot \text{°C}); \delta = 1 \text{ мм}; \nu = 0,05 \text{ м/с}; b = 0,019 \text{ с}^{-1}$$

Рисунок 2.3 – Кривые распределения температуры по оси  $OY$  в разные моменты времени

Для улучшения качества нагрева и его надежности устанавливаются несколько индукционных подогревателей, нагревающих движущийся лист одновременно с двух сторон (щелевые индукторы методического типа).

## 2.3 Основы расчета индукторов при подогреве полосы (для нагрева в магнитном поле)

### 2.3.1 Двухмерная модель индукционного нагрева ленты в продольном магнитном поле

Процесс индукционного нагрева проводящих тел прямоугольного сечения в двухмерной постановке сводится к решению квазистационарного нелинейного дифференциального уравнения в частных производных относительно напряженности магнитного поля ( $H$ ) и нестационарного уравнения теплопроводности [51–53]:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \rho \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \rho \frac{\partial H}{\partial y} \right) = j \omega \mu \mu_0 H \quad (\text{модель 1}), \quad (2.11)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \rho \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \rho \frac{\partial H}{\partial y} \right) = \mu \mu_0 H \frac{\partial P}{\partial t} \quad (\text{модель 2}), \quad (2.12)$$

$$C_\gamma \cdot \nu \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + w, \quad (2.13)$$

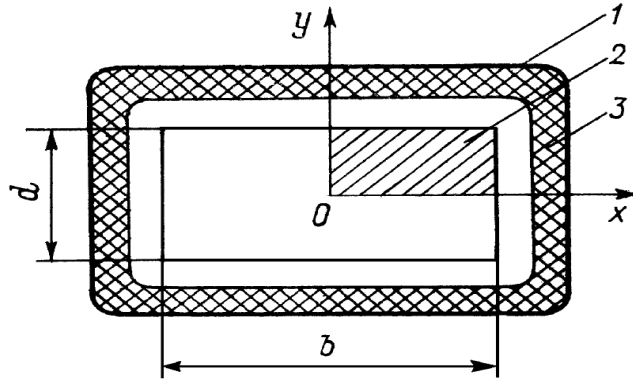
где источники теплоты равны  $w = \rho \left( - \left| \frac{\partial H}{\partial x} \right|^2 + \left| \frac{\partial H}{\partial y} \right|^2 \right)$ .

Для модели 2 (2.12) источники теплоты определяются по распределению поля на последнем периоде  $w = \rho \int_0^T \left( \left| \frac{\partial H}{\partial x} \right|^2 + \left| \frac{\partial H}{\partial y} \right|^2 \right) \frac{dt}{T}$ .

Предполагая симметрию распределения электромагнитного и температурного полей по прямоугольному сечению, будем рассматривать четвертую часть загрузки (рис. 2.4). Метод конечных разностей наиболее эффективный метод для вычисления температурных полей в этом случае [49, 50, 52–59].

Введя подстановку, преобразуем уравнение (2.11) относительно комплексной неизвестной в систему двух уравнений относительно скалярных переменных:

Для решения первых двух уравнений системы (2.15) воспользуемся итерационной схемой переменных направлений. В работах она приводится как одна из лучших для этой задачи. Однако, она имеет существенный недостаток – подбор двух итерационных параметров  $\tau_1$  и  $\tau_2$ , которые влияют на скорость сходимости задачи. Для простоты использования часто принимают  $\tau_1 = \tau_2$ .



1 – индуктор; 2 – футеровка; 3 – лента

Рисунок 2.4 – Эскиз индукционной системы для нагрева тел прямоугольной формы

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x} \left( \rho \frac{\partial U}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \rho \frac{\partial U}{\partial y} \right) &= \omega \mu \mu_0 V, \\ \frac{\partial}{\partial x} \left( \rho \frac{\partial V}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \rho \frac{\partial V}{\partial y} \right) &= \omega \mu \mu_0 U. \end{aligned} \quad (2.14)$$

Введем неравномерную сетку  $\overline{W}_k = \begin{cases} x_i \in [0, b/2], i = 1, 2, \dots, N, \\ y_m \in [0, d/2], m = 1, 2, \dots, M. \end{cases}$

Заменяя дифференциальные операторы их разностными аналогами, переходим от системы дифференциальных уравнений к системе сеточных уравнений вида:

$$\left. \begin{aligned} \Lambda_{xx}(\rho U) + \Lambda_{yy}(\rho U) + \omega \mu \mu_0 V &= 0; \\ \Lambda_{xx}(\rho V) + \Lambda_{yy}(\rho V) - \omega \mu \mu_0 U &= 0; \\ C_v \Lambda_t(T) - \Lambda_{xx}(\lambda T) - \Lambda_{yy}(\lambda T) &= w(U, V), \end{aligned} \right\} \text{ модель 1} \quad (2.15)$$

$$\left. \begin{aligned} \mu \mu_0 \Lambda_t(H) &= \Lambda_{xx}(\rho H) + \Lambda_{yy}(\rho H); \\ C_v \Lambda_t(T) - \Lambda_{xx}(\lambda T) - \Lambda_{yy}(\lambda T) &= w(U, V), \end{aligned} \right\} \text{ модель 2} \quad (2.16)$$

где  $\Lambda_t(T) = \frac{(T^{k+1} - T^k)}{\tau_\partial}$ ;

$k$  – индекс временного слоя;

$\tau_\partial$  – временной шаг решения тепловой задачи.

Запись оператора  $\Lambda_t(H)$  аналогична записи  $\Lambda_t(T)$ , только  $\tau_\partial$  будет обозначать шаг во временной области:

$$\Lambda_{xx}(\rho U) = \frac{1}{\eta} \left[ \rho_i^+ \frac{U_{i+1} - U}{h_{i+1}} - \rho_i^- \frac{U_i - U_{i+1}}{h_i} \right]; \quad \eta = 0,5 \cdot (h_i + h_{i-1}); \quad h_i = x_{i+1} - x_i;$$

$$\rho_i^+ = 0,5 \cdot (\rho_i + \rho_{i+1}); \quad \rho_i^- = 0,5 \cdot (\rho_i + \rho_{i-1})$$

Записи разностных операторов  $\Lambda_{yy}(\rho U)$ ,  $\Lambda_{xx}(\rho V)$ ,  $\Lambda_{yy}(\rho V)$ ,  $\Lambda_{xx}(\lambda T)$ ,  $\Lambda_{yy}(\lambda T)$  аналогичные записи  $\Lambda_{xx}(\rho V)$ .

Для оставшегося уравнения и для уравнений системы (2.16) применяются либо схема Писмена-Рэкфорда (продольно-поперечная), либо локально-одномерная схема (ЛОС) [54–56].

Результирующие совместные системы сеточных уравнений имеет вид: для модели 1:

$$\left. \begin{aligned} \frac{U^{j+1/2} - U^j}{\tau_1} &= \Lambda_{xx}(\rho U^{j+1/2}) + \Lambda_{yy}(\rho U^j) + \omega \nu \mu_0 V^{j+1/2}; \\ \frac{V^{j+1/2} - V^j}{\tau_2} &= \Lambda_{xx}(\rho V^{j+1/2}) + \Lambda_{yy}(\rho V^j) - \omega \mu \mu_0 U^{j+1/2}; \\ (1 + \xi) C_V \frac{T^{j+1/2} - T^j}{T_3} &= \Lambda_{xx}(\lambda T^{j+1/2}) + \xi \Lambda_{yy}(\lambda T^j) + \frac{1 + \xi}{2} \cdot w^j; \\ \frac{U^{j+1} - U^{j+1/2}}{\tau_1} &= \Lambda_{xx}(\rho U^{j+1/2}) + \Lambda_{yy}(\rho U^{j+1}) + \omega \mu \mu_0 V^{j+1}; \\ \frac{V^{j+1} - V^{j+1/2}}{\tau_2} &= \Lambda_{xx}(\rho V^{j+1/2}) + \Lambda_{yy}(\rho V^{j+1}) - \omega \mu \mu_0 U^{j+1}; \\ (1 + \xi) \cdot C_V \frac{T^{j+1} - T^{j+1/2}}{\tau_3} &= \Lambda_{xx}(\lambda T^{j+1/2}) + \xi \Lambda_{yy}(\lambda T^{j+1}) + \frac{1 + \xi}{2} \cdot w^j. \end{aligned} \right\} \quad (2.17)$$

для модели 2:

$$\left. \begin{aligned} (1 + \xi) \cdot \mu \mu_0 \frac{H^{j+1/2} - H^j}{\tau_4} &= \Lambda_{xx}(\rho H^{j+1/2}) + \xi \cdot \Lambda_{yy}(\rho H^j); \\ (1 + \xi) \cdot C_V \frac{T^{j+1/2} - T^j}{\tau_3} &= \Lambda_{xx}(\lambda T^{j+1/2}) + \xi \cdot \Lambda_{yy}(\lambda T^j) + \frac{1 + \xi}{2} \cdot w^j; \\ (1 + \xi) \cdot \mu \mu_0 \frac{H^{j+1} - H^{j+1/2}}{\tau_4} &= \Lambda_{xx}(\rho H^{j+1/2}) + \xi \cdot \Lambda_{yy}(\rho H^{j+1}); \\ (1 + \xi) \cdot C_V \frac{T^{j+1} - T^{j+1/2}}{\tau_3} &= \Lambda_{xx}(\lambda T^{j+1/2}) + \xi \cdot \Lambda_{yy}(\lambda T^{j+1}) + \frac{1 + \xi}{2} \cdot w^j. \end{aligned} \right\} \quad (2.18)$$

где  $j$  – номер итерации,

$j = 0, 1, \dots; j + 1/2$  – промежуточная итерация;

$\tau_1$  и  $\tau_2$  – итерационные параметры, подлежащие выбору из условия минимума итераций;

$\tau_3$  – временной шаг решения электромагнитной задачи во временной области;

$\xi$  – коэффициент, предполагающий использование для решения уравнения теплопроводности или для электромагнитной задачи во временной области либо схема Писмена-Рэкфорда ( $\xi = 1$ ), либо ЛОС ( $\xi = 0$ ).

Системы уравнений (2.17) и (2.18) замыкаются соответствующими крайними условиями и сводятся к каноническому виду:

$$A_i W_{i-1}^{j+1/2} - C_i W_i^{j+1/2} = -F_i^j, \quad (2.19)$$

где  $i = 1, 2, \dots, N - 1$ .

Модель 1:

$$A_i = \begin{bmatrix} \frac{\tau_1 \rho_i^-}{\eta_i \cdot h_i} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\tau_2 \rho_i^-}{\eta_i \cdot h_i} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\tau_3 \lambda_i^-}{\eta_i \cdot h_i} \end{bmatrix}; \quad B_i = \begin{bmatrix} \frac{\tau_1 \rho_i^+}{\eta_i \cdot h_{i+1}} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\tau_2 \rho_i^+}{\eta_i \cdot h_{i+1}} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\tau_3 \lambda_i^+}{\eta_i \cdot h_{i+1}} \end{bmatrix};$$

$$C_i = \begin{bmatrix} \frac{\tau_1}{\eta_i} \left( \frac{\rho_i^+}{\eta_{i+1}} + \frac{\rho_i^-}{h_i} \right) + 1 & -\omega \mu_i \mu_0 & 0 \\ \omega \mu_i \mu_0 & \frac{\tau_2}{\eta_i} \left( \frac{\rho_i^+}{\mu_{i+1}} + \frac{\rho_i^-}{h_i} \right) + 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\tau_3}{\eta_i} \left( \frac{\lambda_i^+}{\eta_{i+1}} + \frac{\lambda_i^-}{h_i} \right) + C_{Vi} \end{bmatrix};$$

$$F_i = \begin{bmatrix} \frac{\tau_1 \rho_m^-}{\eta_m \cdot h_m} U_{m-1}^j - \left[ \frac{\tau_1}{\eta_m} \left( \frac{\rho_m^+}{h_{m+1}} + \frac{\rho_m^-}{h_m} \right) - 1 \right] \cdot U_m^j + \frac{\tau_1 \rho_m^+}{\eta_m \cdot h_{m+1}} U_{m+1}^j \\ \frac{\tau_2 \rho_m^-}{\eta_m \cdot h_m} V_{m-1}^j - \left[ \frac{\tau_2}{\eta_m} \left( \frac{\rho_m^+}{h_{m+1}} + \frac{\rho_m^-}{h_m} \right) - 1 \right] \cdot V_m^j + \frac{\tau_2 \rho_m^+}{\eta_m \cdot h_{m+1}} V_{m+1}^j \\ \frac{\tau_3 \lambda_m^-}{\eta_m \cdot h_m} T_{m-1}^k - \left[ \frac{\tau_3}{\eta_m} \left( \frac{\lambda_m^+}{\eta_{m+1}} + \frac{\lambda_m^-}{h_m} \right) - C_{vm} \right] \cdot T_m^k + \frac{\tau_3 \lambda_m^+}{\eta_m \cdot h_{m+1}} T_{m+1}^k + \tau_3 w(U^i, V^i) \end{bmatrix}.$$

Модель 2:

$$\begin{aligned}
A_i &= \begin{bmatrix} \frac{\tau_3 \rho_i^-}{\eta_i \cdot h_i} & 0 \\ 0 & \frac{\tau_3 \lambda_i^-}{\eta_i \cdot h_{i+1}} \end{bmatrix}; \quad B_i = \begin{bmatrix} \frac{\tau_4 \rho_i^+}{\eta_i \cdot h_{i+1}} & 0 \\ 0 & \frac{\tau_3 \lambda_i^+}{\eta_i \cdot h_{i+1}} \end{bmatrix}; \\
C_i &= \begin{bmatrix} \frac{\tau_3}{\eta_i} \left( \frac{\rho_i^+}{h_{i+1}} + \frac{\rho_i^-}{h_i} \right) + \omega \mu \mu_0 & 0 \\ 0 & \frac{\tau_3}{\eta_i} \left( \frac{\lambda_i^+}{h_{i-1}} + \frac{\lambda_i^-}{h_i} \right) + C_{vi} \end{bmatrix}; \\
F_i &= \begin{bmatrix} \frac{\tau_3 \rho_m^-}{\eta_m \cdot h_m} H^{j_{m-1}} - \left[ \frac{\tau_3}{\eta_m} \left( \frac{\rho_m^+}{\eta_{m+1}} + \frac{\rho_m^-}{h_m} \right) - \omega \mu_i \mu_0 \right] \cdot H_m^j + \frac{\tau_3 \rho_m^+}{\eta_m \cdot h_{m+1}} \cdot H_{m+1}^j \\ \frac{\tau_3 \lambda_m^-}{\eta_m \cdot h_m} T^{k_{m-1}} - \left[ \frac{\tau_3}{\eta_m} \left( \frac{\lambda_m^+}{h_{m+1}} + \frac{\lambda_m^-}{h_m} \right) - C_{vm} \right] \cdot T_m^k + \frac{\tau_3 \lambda_m^+}{\eta_m \cdot h_{m+1}} \cdot T_{m+1}^k + \tau_3 w(U^j, V^j) \end{bmatrix}.
\end{aligned}$$

Так же, как и для одномерных моделей, для решения уравнения (2.20) используется метод прогонки для временной области и тепловых задач и метод матричной прогонки для электромагнитной задачи по первой гармонике. Уравнение (2.20) осуществляет прогонку в направлении координаты  $x$ . При прогонке по координате  $y$  матричное уравнение имеет аналогичный вид [54–40].

В отличие от одномерной модели, по первой гармонике в двухмерной модели решение электрической и тепловой задач производится поочередно. Это вызвано тем, что в начале расчета при задании «плохого» начального распределения электромагнитного поля, процесс может медленно сходиться или даже расходиться из-за чувствительности температурного поля на промежуточных итерациях к еще неустановившимся значениям мощности внутренних источников теплоты.

После завершения нагрева заготовки расчет параметров индуктора осуществляется методом общего потока. Для задания свойств материала  $\mu(H), \rho(H), \rho(T), \lambda(T), C_\gamma(T), \varepsilon(T)$  и свойства футеровки  $\lambda(T), C_\gamma(T), \varepsilon(T)$  используется база данных, разработанная для программы одномерной модели индукционного нагрева в продольном магнитном поле.

### 2.3.2 Двухмерные модели индукционного нагрева ленты в поперечном магнитном поле

Расчет индукционной системы с поперечным магнитным полем в общем случае требует решения уравнения электромагнитного поля в трехмерной постановке. В то же время для оценки энергетических затрат и использования в практике проектирования нагревательных установок необходим достаточно простой математический аппарат, легко реализуемый в виде программ расчета для ЭВМ.

Рассмотрим конструктивную схему широко распространенного типа нагревателей, состоящего из двух индукторов, обмотки которых уложены в пазы Ш-образных магнитопроводов. В зазоре между индукторами протягивается нагреваемая лента. Электромагнитные процессы в краевых зонах имеют ярко выраженный трехмерный характер и не поддаются расчету относительно простыми методами. Регулярная часть нагревателя может рассматриваться как плоскопараллельная система, процессы в которой неизменны по ширине ленты. Учитывая, что регулярная часть охватывает, как правило, значительную долю ширины нагревателя, можно с достаточной для инженерных расчетов точностью считать, что энергетические характеристики индукционной системы в целом определяются электромагнитными процессами в указанной части.

**Аналитическая двумерная модель электромагнитных процессов в пространственно-периодической системе.** Из известных способов расчета плоскопараллельных индукционных систем с поперечным магнитным полем наиболее простым для решения поставленной задачи является аналитический метод, основанный на решении двумерного уравнения Гельмгольца относительно векторного магнитного потенциала, который имеет в рассматриваемой системе только одну составляющую. Математическая модель для расчета энергетических характеристик индукционного нагревателя ленты в поперечном магнитном поле, базирующаяся на указанном методе, включает в себя следующие элементы:

- 1) расчет вносимых сопротивлений ленты и сопротивлений взаимной индукции секций индукторов;
- 2) расчет внутренних сопротивлений индуктирующих обмоток;
- 3) расчет энергетических характеристик нагревателя при различных схемах включения индукторов.

Вносимые сопротивления ленты и сопротивления взаимной индукции секций индукторов зависят от свойств нагреваемой ленты и геометрии системы. Рассмотрим индукционную систему, состоящую из нагреваемой ленты и многосекционных индукторов с магнитопроводами, расчетный эскиз которой показан на рис. 2.5.

Будем считать, что в обмотках соседних секций протекают токи взаимно противоположного направления. Если число секций велико, то поле в системе является периодическим в направлении оси  $x$ . Практически это условие выполняется с достаточной точностью уже при числе секций, равном двум, что позволяет с инженерной точностью рассчитывать энергетические характеристики даже односекционного индуктора [52, 53, 59].

Для адекватной оценки полученных с помощью данной модели результатов большое значение имеют допущения, сделанные при построении модели:

- 1) индуктирующая обмотка заменяется тонким токовым слоем с равномерным распределением тока;
- 2) магнитная проницаемость материала магнитопроводов бесконечно велика и потери в нем отсутствуют;

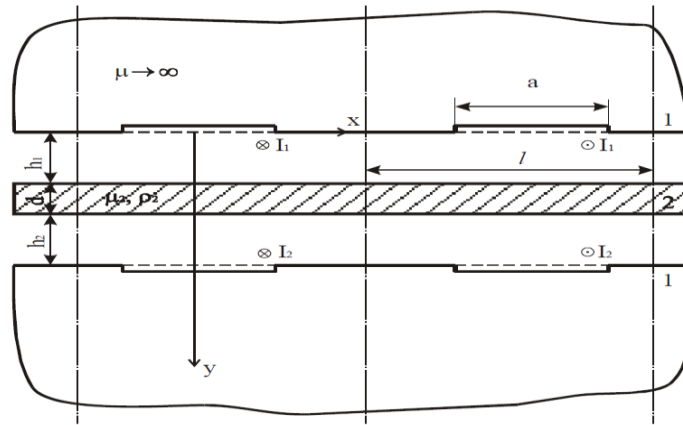


Рисунок 2.5 – Расчетный эскиз индукционной системы

3) удельное сопротивление и магнитная проницаемость материала ленты постоянны;

4) длина индукционной системы в направлении ширины ленты много больше полюсного шага индуктора.

В этом случае электромагнитное поле можно считать двухмерным и его удобно описывать векторным магнитным потенциалом  $A$ , который имеет только одну составляющую. В воздушных зазорах между индукторами и лентой векторный потенциал подчиняется уравнению Лапласа:

$$\Delta^2 A = 0, \quad (2.20)$$

а внутри ленты уравнению Гельмгольца:

$$\Delta^2 A = j\omega\mu\mu_0\gamma A, \quad (2.21)$$

где  $\omega$  – круговая частота;

$\gamma$  – удельная проводимость материала ленты;

$\mu$  – относительная магнитная проницаемость;

$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м}$  – абсолютная магнитная проницаемость вакуума.

Граничные условия имеют вид:

$$1) \ x = \pm \frac{\lambda}{2}, A = 0;$$

$$2) \ y = h_1, A_2 = A_3, H_{x1} = H_{x2};$$

$$3) \ y = h_1 + d, A_2 = A_3, H_{x2} = H_{x3};$$

$$(2.22)$$

$$\text{при } a/2 < |x| < \frac{\lambda}{2}; H_x = H_0 \text{ при } |x| \leq \frac{a}{2}.$$

С учетом принятых допущений напряженность магнитного поля  $H_x$  равна настилу тока  $H_0$  на поверхности обмоток:

$$H_0 = \frac{Iw}{a}, \quad (2.23)$$

где  $w$  – число витков обмотки.

В принятой системе координат потенциал  $A$  является четной периодической функцией  $x$ , поэтому уравнения (2.21) и (2.22) могут быть решены методом разделения переменных. В результате находятся вносимые сопротивления секций верхнего и нижнего индукторов, а также сопротивление взаимной индукции на единицу длины системы.

В общем случае, внутреннее сопротивление обмотки индуктора зависит от ее конструкции, геометрии индукционной системы, частоты тока и свойств нагреваемой ленты. Однако, для многовитковой обмотки с последовательным соединением витков, расположенной в пазу магнитопровода, можно пренебречь влиянием геометрии системы и свойств нагреваемой ленты на распределение тока в проводниках и считать настил тока по шире обмотки равномерным.

Внутренние сопротивления однослойной обмотки при сильном поверхностном эффекте определяются по известной формуле:

$$r_1 \approx x_{M_1} \approx \frac{\lambda}{a_1} \cdot \frac{\rho_1}{\Delta} w, \quad (2.24)$$

где  $\lambda$  – длина обмотки;

$a$  – ширина витка;

$\rho$  – удельное электрическое сопротивление материала проводников обмотки;

$\Delta$  – глубина проникновения тока в материал проводников;

$w$  – число витков обмотки.

При слабом поверхностном эффекте внутренние сопротивления обмотки легко определить по приближенным аналитическим формулам для проводника в поперечном магнитном поле. Дополнительно могут рассчитываться внутренние сопротивления обмотки с произвольным числом слоев при любой степени проявления поверхностного эффекта на основе расчета сопротивления плоского проводника с током в стороннем магнитном поле.

В зависимости от условий согласования с источником питания индукторы могут включаться по различным схемам: последовательной или параллельной. Расчет энергетических характеристик нагревателя, состоящего из пары (верхнего и нижнего) индукторов, производится по полной мощности нагревателя и мощности, выделяемой в ленте (КПД):

$$\eta = \frac{P_2}{Re I}, \quad (2.25)$$

и коэффициент мощности:

$$\cos \varphi = Re I |I|. \quad (2.26)$$

При большом количестве индукторов и сложной схеме их включения расчет энергетических характеристик нагревателя производится аналогичным

образом, но для соответствующей системы уравнений, связывающих напряжений, токи и сопротивления индукторов.

**Численная двумерная модель электромагнитных процессов на базе универсального коммерческого пакета ANSYS.** Программный комплекс ANSYS – универсальный конечно-элементный пакет, который используют для: статического и динамического анализа конструкций с учетом геометрической (в т.ч. двумерные и трехмерные контактные задачи) и физической нелинейности, анализа усталостных характеристик, решения задач линейной и нелинейной устойчивости конструкций, анализа электромагнитных полей (в т.ч. высокочастотных до 100 ГГц), решения стационарных и нестационарных задач теплофизики, гидрогазодинамики, акустики, оптимизации.

Электромагнитный модуль ANSYS позволяет решать задачи в двумерной (протяженные, осесимметричные) и в трехмерной постановках. В основе анализа задачи электромагнетизма лежит решение системы уравнений Максвелла.

Рассмотрим индукционную систему, состоящую из нагреваемой ленты и многосекционных индукторов с магнитопроводами, расчетный эскиз показан на рис. 2.6

Во многих случаях удобно решение системы (2.27) искать относительно векторного потенциала. В этом случае векторы напряженности электрического поля и магнитной индукции определяются уравнениями:

$$\begin{aligned}\bar{B} &= \text{rot } \bar{A}, \\ \bar{E} &= -\frac{\partial \bar{A}}{\partial t} + \text{grad}U.\end{aligned}$$

Допускают, что значения источников плотности тока и векторного потенциала  $\bar{A}$  определяются по первой гармонике от функции воздействующего сигнала на рассматриваемую область, т. е. можно перейти в плоскость комплексной переменной.

При этом используют для удобства следующие выражения:

$$\begin{aligned}\bar{A} &= A_x(x, y, z)\bar{e}_x + A_y(x, y, z)\bar{e}_y + A_z(x, y, z)\bar{e}_z, \\ A_{jk} &= \frac{\partial}{\partial k} A_j, \quad v_x = \frac{1}{\mu_x \mu_0}, \quad v_y = \frac{1}{\mu_y \mu_0}.\end{aligned}$$

В описываемой модели граничные условия определяются как  $A = 0; \frac{\partial A}{\partial n} = 0$ .

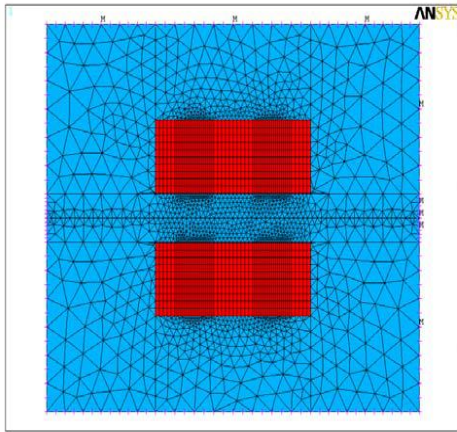


Рисунок 2.6 – Расчетный эскиз индукционной системы

Таким образом, получают систему уравнений, которая совместно с введенными условиями на границе области представляет собой краевую задачу, которая решается численными методами или с применением метода конечных элементов.

## Выводы по разделу 2

1. Определены основные математические зависимости, по которым следует рассчитывать параметры температурных полей в процессе прокатки полос и листов на НШПС. Установлено, что распределение температур в пространственных координатах изменяется во времени, то есть происходит неравномерное подствывание полосы по длине и ширине, что отражается на конечном распределении механических свойств проката. Показано, что температурное поле в процессе прокатки и подствывания между черновой и чистовой группой клетей стана является нестационарным.

2. Рассмотрены основные закономерности распределения тепла в стальной полосе (листе) и определено влияние скорости перемещения листа на распределения температур в координатном пространстве. Установлены основные зависимости для расчёта предельного температурного состояния, а также предпосылки для расчёта индивидуальных подогревателей полосы при заданных технологических параметрах процесса прокатки и геометрических характеристик полосы.

3. Приведена методика расчёта индукторов при подогреве полосы. При этом выполнен анализ двухмерной модели индукционного нагрева в продольном магнитном поле и поперечном магнитном поле. Проанализированы электромагнитные процессы, происходящие в нестационарном температурном поле в пространственной системе координат.

4. Показана перспективность применения пакетов для конечно-элементного анализа электромагнитных, тепловых и деформационных процессов в технологиях прокатки широких листов и полос. Определён характер расчётной схемы индукционной системы и физические параметры взаимосвязи электромагнитных и температурных составляющих в процессе подогрева полосы индукционным способом.

### 3 ПРОГНОЗИРОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ НА ОСНОВЕ РАЗРАБОТКИ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ПОДСТЫВАНИЯ КРОМОК ПОЛОСЫ ПЕРЕД ЧИСТОВОЙ ГРУППОЙ КЛЕТЕЙ НЕПРЕРЫВНОГО ШИРОКОПОЛОСНОГО СТАНА

#### 3.1 Конечно-разностная математическая модель

**Математическое моделирование изменения температурного поля неравномерно нагретой остывающей заготовки.**

Распределение температур по ширине подката при нагреве должно быть получено с учетом времени, проходящего от конца нагрева полосы до начала её деформирования на непрерывных широкополосных станах (НШПС).

Целью настоящих исследований является отыскание такой формы температурного поля, которое должен иметь подкат по ширине после нагрева, чтобы непосредственно перед прокаткой, которую проводят в группе чистовых клетей (рис. 3.1), он имел требуемый градиент распределения температур.

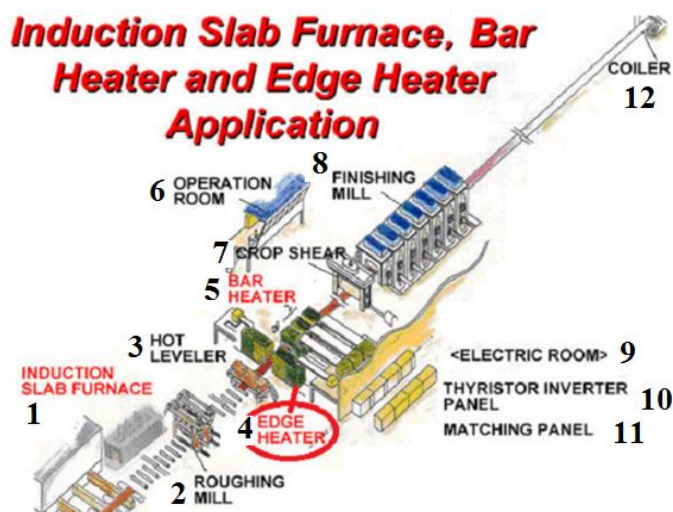
Для разработки математической модели изменения температурного поля во времени был выбран метод элементарных тепловых балансов. Выбранный метод требует условной дискретизации объема полосы и временного промежутка от окончания нагрева до начала деформирования. Рассматривали одномерную модель, т.е. плотность теплового потока  $q$  является функцией только координаты  $x$  по горизонтальной оси полосы и времени  $\tau$ . Перепадами температуры по толщине подката, в связи с ее малостью, пренебрегали.

Нагреваемую полосу (рис. 3.2) условно разбивали на элементарные объемы (слои) призматической формы длиной  $\Delta x$  и площадью  $F = h_0 \cdot l$ .

При условии симметричной относительно оси  $y$  формы температурного поля (рис. 3.2), половина ширины полосы составляет  $H_0 = 2H_{0n}$ , где  $H_{0n}$  – расстояние между средним поперечным сечением и снижением с минимальной (на кромке подката) температурами. Размеры  $\Delta x$  выбираем небольшими по сравнению с шириной заготовки  $H_{0n}$  [60, 61].

Принимаем следующие допущения:

- изотермические поверхности в пределах одного призматического элемента представляют собой параллельные плоскости, равноотстоящие друг от друга;
- средний тепловой поток, проходящий за элементарный промежуток времени  $\Delta \tau$  через любую поверхность, пропорционален начальному значению градиента температур за это же время;
- теплосодержание элемента возрастает (убывает) пропорционально приращению (снижению) температуры в средней точке его объема тепловой поток распространяется от более нагретых элементов к менее нагретым элементам.



1 – индукционная печь подогрева слябов; 2 – черновая клеть; 3 – выравниватель температур; 4 – подогреватель кромок; 5 – нагреватель заготовок; 6 – пост оператора; 7 – ножницы (сконы); 8 – группа чистовых клетей; 9 – электрощитовая; 10 – тиристорная инверторная панель; 11 – панель управления

Рисунок 3.1 – Схема расположения оборудования НШПС с индукционным подогревом кромок подката

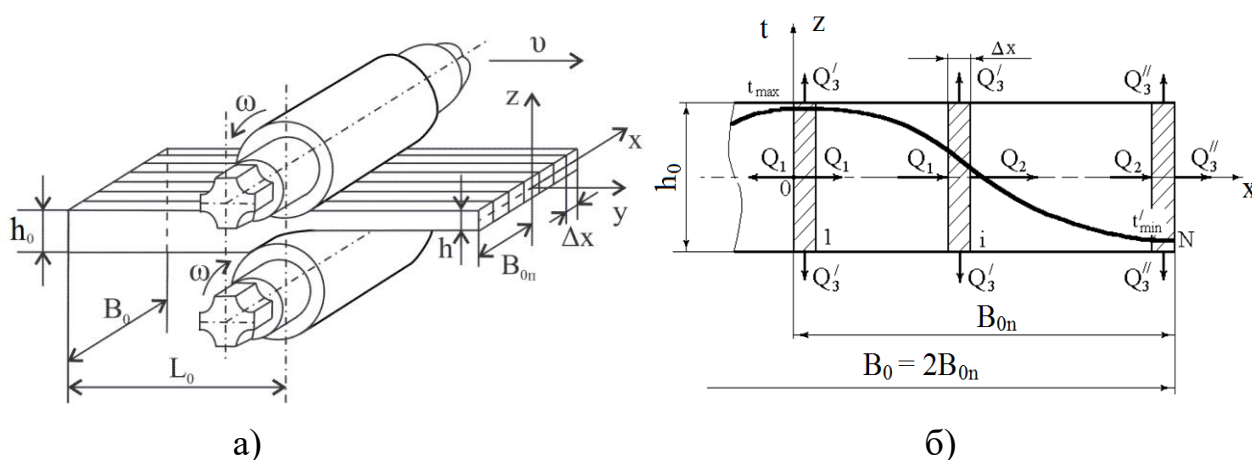


Рисунок 3.2 – Расчетная схема к моделированию температурного поля в подкате

Количество элементарных объемов при рассмотрении половины ширины подката [60, 61]:

$$N = \frac{H_{0n}}{\Delta x}, \quad (3.1)$$

тогда порядковый номер каждого элемента  $\Delta x$  обозначали как  $i = 1; 2; \dots; N$ . То есть элемент по середине ширины полосы имеет порядковый номер 1, а элементу на кромке подката соответствует порядковый номер  $N$ .

Время от окончания нагрева заготовки до начала её деформирования обозначали через  $\tau$  и разбивали на  $M$  элементарных промежутков  $\Delta\tau$  [60, 61]:

$$M = \frac{\tau}{\Delta\tau}, \quad (3.2)$$

при этом каждому элементарному промежутку времени  $\Delta\tau$  присваивали свой порядковый номер  $j = 1; 2; \dots; M$ . Учитывая, что спецификой рассматриваемой задачи является «счет назад», то  $M$  – индекс расчетного первого (исходного), а 1 – индекс расчетного последнего (искомого) временного промежутка с которого начинается охлаждение. Величина  $\tau_{(j)} = \sum_{j=1}^{j=1;2;\dots;M} j \cdot \Delta\tau$  подлежит определению.

Введём обозначения для температур (здесь и везде в градусах Цельсия,  $^{\circ}\text{C}$ ):  $t_{i;j}$  – температура произвольного слоя в любой промежуток времени, где  $i$  – номер произвольного слоя,  $j$  – номер промежутка времени. При заданной форме температурного поля, которую необходимо иметь подкату перед деформированием, решение задачи будет заключаться в поиске зависимости температуры  $i$ -го слоя  $t_{i;j-1}$  (в промежуток времени  $j-1$ ) от значения температуры этого и соседнего слоя в предыдущий расчетный временной промежуток  $j$ .

Элементарное количество теплоты  $\partial Q$ , которое проходит по нормали через элементарную площадку, согласно основному закону теплопроводности (закону Фурье) в дифференциальной форме [60, 61]:

$$\partial Q = -\lambda \frac{\partial t}{\partial x} \partial F \cdot \partial \tau, \quad (3.3)$$

где  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности для материала полосы при заданных условиях, Вт/м·град;

$\partial F$  – элементарная площадь поперечного сечения, нормально к которой проходит тепловой поток;

$\frac{\partial t}{\partial x}$  – градиент температур в направлении оси  $x$ ;

$\partial \tau$  – элементарный промежуток времени.

Тепловой поток, выходящий из поверхности кромки подката в окружающую среду, является лучистым, то есть по закону Стефана-Больцмана:

$$\partial Q = \sigma \left[ (t + 273)^4 - (t_{o.c} + 273)^4 \right] \cdot \partial F \cdot \partial \tau, \quad (3.4)$$

где  $\sigma = \varepsilon_{cm} \sigma_0$  – коэффициент излучения черного тела, здесь  $\varepsilon_{cm} = 0,8$  – степень черноты тела (полосы), при условии, что излучение осуществляется в пространство, которое значительно превышает размеры полосы,  $\sigma_0 \approx 5,67 \cdot 10^{-8}$  Вт/(м<sup>2</sup>·град<sup>4</sup>) – постоянная Стефана-Больцмана для абсолютно черного тела;

$t_{o.c}$  – температура окружающей среды (в расчетах принято  $t_{o.c}=20$  °С).

Согласно современным представлениям теории теплопереноса, передача тепла от тел, нагретых выше температуры красного свечения, происходит главным образом излучением. Влияние конвекционного механизма теплопередачи с ростом температуры поверхности заготовки уменьшается, и при технологических температурах около 1200 °С доля конвективного теплообмена не превышает 3...5 % . Поэтому при постановке задачи теплопередачу конвекцией не учитывали.

Составим уравнения теплового баланса в конечно-разностной форме для произвольного элементарного объема  $i$  в момент времени  $j$ , используя формулы (3.3) и (3.4):

- количество тепла, входящее в левую грань элемента:

$$Q_1 = \lambda \frac{t_{i-1;j} - t_{i;j}}{\Delta x} \cdot h_0 \cdot B_0 ; \quad (3.5)$$

- количество тепла, выходящее через правую грань элемента:

$$Q_2 = \lambda \frac{t_{i;j} - t_{i+1;j}}{\Delta x} \cdot h_0 \cdot B_0 ; \quad (3.6)$$

- количество тепла, выходящее излучением через боковую (свободную прямоугольную) поверхность произвольного элемента:

$$Q_3' = \sigma \left[ (t_{i;j} + 273)^4 - (t_{o.c} + 273)^4 \right] \cdot h_0 \cdot \Delta x ; \quad (3.7)$$

- количество тепла, излучаемое через кромку подката:

$$\begin{aligned} Q_3'' &= \sigma \left[ (t_{N;j} + 273)^4 - (t_{o.c} + 273)^4 \right] \cdot h_0 \cdot \Delta x + \sigma \left[ (t_{N;j} + 273)^4 - (t_{o.c} + 273)^4 \right] \cdot h_0 \cdot B_0 = \\ &= \sigma \left[ (t_{N;j} + 273)^4 - (t_{o.c} + 273)^4 \right] \cdot \left( h_0 \cdot \Delta x + \frac{\pi h_0^2}{4} \right). \end{aligned} \quad (3.8)$$

Если принять изменение удельной энтальпии:

$$\Delta h = \rho_3 \cdot c \cdot \Delta t , \quad (3.9)$$

тогда изменение энтальпии слоя (элементарного объема):

$$\Delta H = \rho_3 \cdot c \cdot (t_{i;j} - t_{i;j-1}) \cdot h_0 \cdot B_0 \cdot \Delta x , \quad (3.10)$$

где, в выражениях (3.9) и (3.10):

$\Delta h$  [Дж/м<sup>3</sup>] и  $\Delta H$  [Дж] – изменения удельной энтальпии и энтальпии элементарного объема соответственно;

$\rho_3$  – плотность материала заготовки при заданной температуре, кг/м<sup>3</sup>;

$C$  – теплоемкость материала заготовки при заданной температуре, Дж/(кг·град).

Начальные условия:

$$t_{i;M} = t(x;0) = t(x). \quad (3.11)$$

Граничные условия:

$$\left. \frac{\partial t(0; \tau_{(j)})}{\partial x} = 0; \quad t_{1;M} = t(0;0) = t_{max}; \quad t_{1;1} = t(0; \tau_{(M)}) \leq t_{max(k,m)}; \quad t_{N;M} = t(L_{0n};0) = t'_{min} \right\}. \quad (3.12)$$

Для обеспечения условий теплового баланса соседних слоёв заготовки, значение коэффициента теплопроводности  $\lambda$  следует брать при средней температуре соседних элементарных объемов в момент времени  $j$ , а плотность  $\rho_3$  и теплоемкость  $c$  – при температуре слоя, рассматриваемого в момент времени  $j$ .

Тепловой баланс произвольного элементарного слоя заготовки:

$$(Q_1 - Q_2 - Q_3') \cdot \Delta \tau = \Delta H, \quad (3.13)$$

или, с учетом (3.5)–(3.7):

$$\left\{ \lambda \frac{t_{i-1;j} - t_{i;j}}{\Delta x} \cdot h_0 \cdot B_0 - \lambda \frac{t_{i;j} - t_{i+1;j}}{\Delta x} \cdot h_0 \cdot B_0 - \sigma \left[ (t_{i;j} + 273)^4 - (293)^4 \right] \cdot \pi h_0 \cdot \Delta x \right\} \cdot \Delta \tau = \rho_3 \cdot c \cdot (t_{i;j-1} - t_{i;j}) \cdot h_0 \cdot B_0 \cdot \Delta x. \quad (3.14)$$

Из уравнения (3.14) не трудно получить:

$$t_{i;j-1} - t_{i;j} = \frac{\Delta \tau}{\rho_3 \cdot c \cdot \Delta x \cdot h_0 \cdot B_0} \cdot \left\{ \lambda \frac{t_{i-1;j} - 2t_{i;j} + t_{i+1;j}}{\Delta x} \cdot h_0 \cdot B_0 - \sigma \left[ (t_{i;j} + 273)^4 - (293)^4 \right] \cdot h_0 \cdot \Delta x \right\}. \quad (3.15)$$

Учитывая, что коэффициент температуропроводности  $a_m$ , м<sup>2</sup>/с, материала определяется как:

$$a_m = \lambda / \rho_3 \cdot c, \quad (3.16)$$

то уравнение (3.15) можно переписать в следующем виде:

$$t_{i;j-1} = t_{i;j} + \frac{a_m \cdot \Delta \tau}{\Delta x^2} (t_{i-1;j} - 2t_{i;j} + t_{i+1;j}) - \frac{a_m \cdot \Delta \tau}{\Delta x^2} \cdot \frac{4 \cdot \Delta x^2}{\lambda \cdot h_0} \cdot \sigma \left[ (t_{i;j} + 273)^4 - (293)^4 \right]. \quad (3.17)$$

Тогда получаем окончательную расчетную формулу для произвольного промежуточного ( $i$  – го) слоя заготовки:

$$t_{i;j-1} = t_{i;j} + Fo_{\Delta x} (t_{i-1;j} - 2t_{i;j} + t_{i+1;j}) - 4 \cdot Fo_{\Delta x} \cdot \frac{\sigma \cdot \Delta x^2}{\lambda \cdot h_0} \cdot \left[ (t_{i;j} + 273)^4 - (293)^4 \right], \quad (3.18)$$

где  $Fo_{\Delta x} = a_m \cdot \Delta \tau / \Delta x^2$  – критерий Фурье для элементарного объема шириной  $\Delta x$ .

Уравнение теплового баланса слоя с максимальным теплосодержанием ( $i=1$ ) составляем аналогично формулам (3.13) – (3.14), с учетом того, что тепло

у данного элементарного объема выходит с двух кромок (правой и левой). Принимаем для симметричной конечно-разностной формы записи  $i - 1 = i + 1 = 2$ , тогда:

$$\left\{ 2 \cdot \lambda \frac{t_{1;j} - t_{2;j}}{\Delta x} \cdot h_0 \cdot B_0 - \sigma \left[ (t_{1;j} + 273)^4 - (293)^4 \right] \cdot h_0 \cdot \Delta x \right\} \cdot \Delta \tau = \rho_3 \cdot c \cdot (t_{1;j-1} - t_{1;j}) \cdot h_0 \cdot B_0 \cdot \Delta x. \quad (3.19)$$

После проведения простых преобразований уравнения (3.19), можно записать окончательную расчетную формулу для элементарного объема с порядковым номером  $i = 1$ :

$$t_{1;j-1} = t_{1;j} + 2 \cdot Fo_{\Delta x} (t_{1;j} - t_{2;j}) - 4 \cdot Fo_{\Delta x} \cdot \frac{\sigma \cdot \Delta x^2}{\lambda \cdot h_0} \cdot \left[ (t_{1;j} + 273)^4 - (293)^4 \right]. \quad (3.20)$$

Тепловой баланс слоя на кромке с порядковым номером  $i = N$ , учитывая, что здесь тепло дополнительно излучается через поверхность торца:

$$(Q_2 - Q_3'') \cdot \Delta \tau = \Delta H. \quad (3.21)$$

Тогда, с учетом выражений (3.7) и (3.9) можно записать:

$$\left\{ \lambda \frac{t_{N-1;j} - t_{N;j}}{\Delta x} \cdot h_0 \cdot B_0 - \sigma \left[ (t_{N;j} + 273)^4 - (293)^4 \right] \cdot (\pi h_0 \cdot \Delta x + h_0 \cdot B_0) \right\} \cdot \Delta \tau = \\ = \rho_3 \cdot c \cdot (t_{N;j-1} - t_{N;j}) \cdot h_0 \cdot B_0 \cdot \Delta x. \quad (3.22)$$

После преобразований, по аналогии (3.12) – (3.18), получаем конечную расчетную формулу для слоя на кромке с порядковым номером  $i = N$ :

$$t_{N;j-1} = t_{N;j} + Fo_{\Delta x} (t_{N-1;j} - t_{N;j}) - \frac{\Delta \tau}{\rho_3 \cdot c \cdot \Delta x} \cdot \left( 1 + \frac{4 \cdot \Delta x}{h_0} \right) \cdot \sigma \cdot \left[ (t_{N;j} + 273)^4 - (293)^4 \right], \quad (3.23)$$

или

$$t_{N;j-1} = t_{N;j} + Fo_{\Delta x} (t_{N-1;j} - t_{N;j}) - 4 \cdot Fo_{\Delta x} \cdot \frac{\Delta x^2}{\lambda} \left( \frac{1}{4 \cdot \Delta x} + \frac{1}{h_0} \right) \cdot \sigma \cdot \left[ (t_{N;j} + 273)^4 - (293)^4 \right].$$

Рекуррентные зависимости (3.2), (3.18), (3.20), (3.23) составляют основу автоматизированного расчета требуемой формы неравномерного температурного поля методами математического моделирования.

Величины температур  $t_{i;j-1}$ ,  $t_{1;j-1}$  и  $t_{N;j-1}$  полосы могут колебаться в широких пределах в зависимости от избранного варианта нагрева под профилирование, при этом физические и теплофизические свойства материала являются функцией температуры. В большинстве источниках зависимости  $\rho_3$ ,  $\lambda$ ,  $c$  и  $a$  от температуры  $t$  заданы таблицей, т.е. дискретно, однако для расчетов темпера-

турных полей на ЭВМ необходимо иметь их непрерывные характеристики. Такие характеристики для сталей 20, 40ХА, 5ХНМ, 38ХНЗФА и ЭИ696 были получены по данным Г. Г. Немзера путем аппроксимации в MS Office пакете Excel'97 линиями тренда с приемлемым значением коэффициента  $R^2$ .

Процесс нагрева ограничен тем, что металл не может быть доведен до температуры, превышающей верхнюю границу температурного проката интервала  $t_{max(\kappa.m)}$ : Сталь 20 –  $t_{max(\kappa.m)} = 1280$  °С; Сталь 40ХА –  $t_{max(\kappa.m)} = 1200$  °С; 5ХНМ –  $t_{max(\kappa.m)} = 1200$  °С; 38ХНЗФА –  $t_{max(\kappa.m)} = 1180$  °С; ЭИ696 –  $t_{max(\kappa.m)} = 1160$  °С.

Численный счет завершают при достижении равенства  $t_{1;j-1} = t_{max(\kappa.m)}$ . Одновременно рассчитывают как полное время  $\tau_{(M)}$  и соответствующее ему поле температур, так и выборочные промежуточные значения  $\tau_{(j)}$  и соответствующие им виды температурных полей (температурные профили полосы), которые через время  $\tau_{(j)}$  примут требуемую (3.3) конфигурацию.

Для обеспечения устойчивости счета на ЭВМ по формулам (3.18), (3.20) и (3.24) и минимизации накопления погрешностей, следует удовлетворить условию по критерию Фурье:

$$Fo_{\Delta x} < \frac{1}{2}. \quad (3.24)$$

Величину  $\Delta x$  выбирают произвольно, однако желательно, чтобы  $N$  было не менее 10...15. Тогда для значения  $\Delta \tau$  должно выполняться требование:

$$\Delta \tau < \frac{1}{2} \cdot \frac{\Delta x^2}{a}. \quad (3.25)$$

Расчеты температур по формулам (3.18), (3.20) и (3.23) проводят при выбранном из условия (3.25) значении  $\Delta \tau$ . С целью оптимизации выполняют такие же расчеты при значении  $\Delta \tau' = \Delta \tau / 2$  и проводят сравнение полученных температур во всех слоях с предыдущими результатами. Если величины  $t_{i;j-1}$ ,  $t_{1;j-1}$ , и  $t_{N;j-1}$ , рассчитанные при  $\Delta \tau$  и при  $\Delta \tau'$ , отличаются менее чем на 1 %, то расчеты ведут при последнем значении  $\Delta \tau'$ ; если разница более 1 % – расчеты повторяют при новом значении  $\Delta \tau'' = \Delta \tau' / 2$ , затем проводят такое же сравнение и т.д.

### 3.2 Программная реализация модели

Для расчетов использована программа, разработанная в среде BORLAND C++ BUILDER4 в виде продукта FinalStick [60, 61]. Программа формирует файл отчета FinalStick.res в виде двумерного массива полных результатов расчета и поддерживает его импорт в пакет Excel для проведения детального анализа.

Для примера реализации разработанной математической модели, и с целью проведения исследований изменения распределения температуры по ши-

рине раската, конкретизируем расчеты для следующих условий:

- материал заготовки – Сталь 20;
- размеры полосы: толщина –  $h_0 = 20$  мм, ширина –  $B_0 = 2B_{0н} = 1400$  мм;
- $t_{max} = 1100$  °С,  $t'_{min} = 1000$  °С.

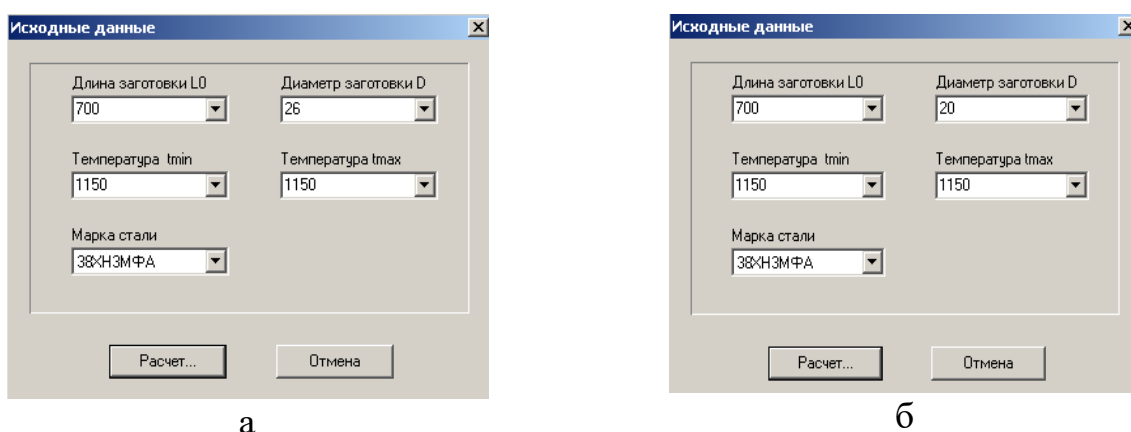
На рис. 3.3 показан интерфейс ввода данных. После расчета вывод результатов осуществляется в виде сети выборочных объёмных (рис. 3.4, а) и, при выборе, плоских (рис. 3.4, б) графических зависимостей:

- «Итерация 2» – количество итераций, на котором получена удовлетворительная сходимость решения,
- «tau(65) = 20,00557...» – полное время  $\tau_{(M)}$  с общим количеством  $M$  (в скобках) расчетных разбиений по времени,
- «dTau» – размер расчетного промежутка времени  $\Delta\tau$ .

Для реальных условий проката целесообразно использование первых 2-х – 3-х кривых. Увеличение градиента на гранях связано с тем, что программа приводит расчет до достижения максимума температуры в температурном интервале проката в среднем сечении полосы.

Результаты моделирования позволяют рассчитать распределение температур, которое необходимо иметь полосе, если время от окончания нагрева до начала деформирования составляет конкретное значение  $\tau = \tau_{(j)}$ , либо вычислить и оптимизировать это время. Реальное откорректированное значение  $\tau$  определяют нормировкой из принятого темпа прокатки с учетом всех факторов, действующих при передаче подката от черновой клетки к чистой. Индукторы проектируют по известной методике расчета индукционных нагревателей методического или периодического действия для нагрева в продольном или поперечном магнитном поле.

$\tau = \tau$  – время, через которое распределение температур примет заданную (5.10) форму (время до начала деформирования).



а – общий вид; б – пример выбора марки стали

Рисунок 3.3 – Интерфейс ввода исходных данных в программу FinalStick

Из полученных данных (см. рис. 3.4) видно, что увеличение времени  $\tau$  требует более резкого градиента в области максимальных температур.

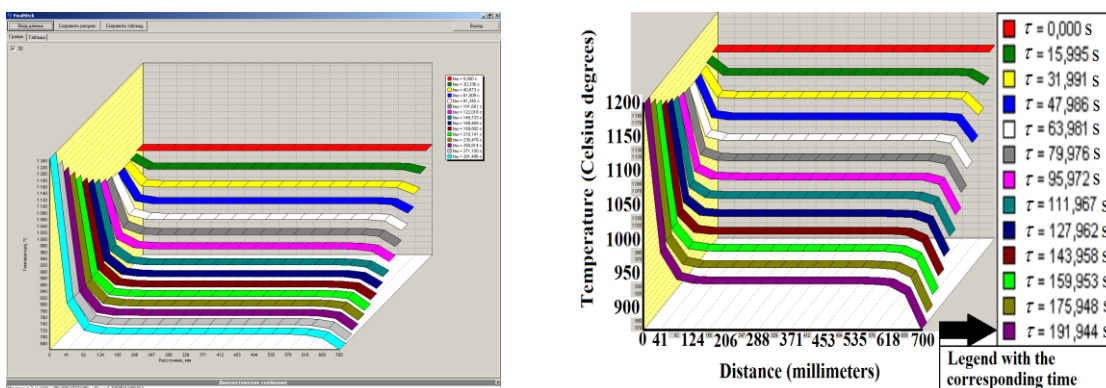


Рисунок 3.4 – Результаты расчета различных вариантов изменения неравномерного температурного поля по ширине полосы

### 3.3 Аппроксимация диаграммы рекристаллизации для прогнозирования механических свойств в зависимости от температурно-деформационных условий прокатки полос

Целью исследования является разработка методики обработки и анализа массива данных диаграмм рекристаллизации для выбора термомеханических режимов горячей прокатки на НШПС, которые на стадии технологического проектирования обеспечат необходимые механические свойства листов и полос.

Рекристаллизация является самым распространенным процессом, формирующим структуру металлов и сплавов, а, соответственно, и их структурно чувствительные механические и физические свойства [62]. Разделяют диаграммы рекристаллизации трех типов, для которых графически изображают зависимость среднего размера зерна от степени деформации и дополнительных условий обработки материала: для диаграмм первого рода (холодная деформация) – от температуры рекристаллизационного отжига при одинаковой его длительности во всех случаях; для диаграмм второго рода – от температуры горячей деформации без отжига после деформации; для диаграмм третьего рода – от температуры горячей деформации и условий окончательной термической обработки. При проектировании процессов прокатки используют диаграммы второго рода.

Средняя площадь зерна  $S$  зависит от температуры  $t$  и степени деформации  $e$ , т.е.:  $S = f(t, e)$ . Зная площадь  $S$  зерна, можно рассчитать его диаметр:  $D = \sqrt{4 \cdot S / \pi}$ . При этом, как и указывалось ранее в п. 1.3.4, основными контролируемыми механическими свойствами при сдаче-приемке изделий являются: предел текучести  $\sigma_T$ , временное сопротивление разрыву  $\sigma_b$ , относительное удлинение  $\delta_5$ , относительное сужение  $\psi$  и твердость по Виккерсу  $HV$ . Повторим здесь соотношения Холла-Петча в интерпритации источника [63]:

$$\sigma_T = \sigma_0 + k / \sqrt{D}; \quad (3.26)$$

$$HV = HV_0 + K / \sqrt{D}, \quad (3.27)$$

где  $\sigma_0$  – напряжение, характеризующее сопротивление пластической деформации со стороны кристаллической решетки;

$k$  – коэффициент, характеризующий вклад в упрочнение со стороны границ зерен;

$HV_0$  – твердость монокристалла по Виккерсу;

$K$  – коэффициент, характеризующий твердость монокристалла.

Поскольку экспериментальные данные, полученные при определении размера зерна, при различных температурах могут иметь различия, то целесообразно провести интерполяцию исходных данных несколькими методами, а затем выбрать тот, который дает наименьшую погрешность.

**Разработка методики аппроксимации. Линейная интерполяция.** Состоит в том, что заданные точки  $(x_i, y_i)$ , где  $(i = 0, 1, \dots, n)$ , соединяют отрезками прямой, а функция  $f(x)$  приближается к ломаной с вершинами в данных точках [64]. Уравнения каждого отрезка ломаной линии различные. Поскольку имеется  $n$  интервалов  $(x_i, x_{i+1})$ , то для каждого из них в качестве уравнения интерполяционного многочлена используют уравнение прямой, проходящей через две точки. В частности, для  $i$ -го интервала можно записать уравнение прямой, проходящей через точки  $(x_i, y_i)$  и  $(x_{i+1}, y_{i+1})$ , в виде:

$$\frac{y - y_i}{y_{i+1} - y_i} = \frac{x - x_i}{x_{i+1} - x_i}, \quad (3.28)$$

Отсюда:

$$y = a_i x + b_i, \quad x_i \leq x \leq x_{i+1}, \quad a_i = \frac{y_{i+1} - y_i}{x_{i+1} - x_i}, \quad b_i = y_i - a_i x_i. \quad (3.29)$$

Таким образом, формула кусочно-линейной интерполяции имеет вид:

$$f(x) = y_i \cdot \frac{x - x_{i+1}}{x_i - x_{i+1}} + y_{i+1} \frac{x - x_i}{x_{i+1} - x_i}, \quad (3.30)$$

Следовательно, при использовании линейной интерполяции сначала нужно определить интервал, в который попадает значение аргумента  $x$ , а затем подставить его в формулу (3.30) и найти приближенное значение функций в этой точке.

*Квадратичная интерполяция.* При квадратичной интерполяции в качестве интерполяционной функции на отрезке  $(x_{i-1}, x_{i+1})$  принимают квадратный трехчлен [64]:

$$y = a_i x^2 + b_i x + c_i, \quad x_{i-1} \leq x \leq x_{i+1} \quad (3.31)$$

Выражение (3.31) содержит три неизвестных коэффициента  $a_i$ ,  $b_i$ ,  $c_i$ , для определения которых необходимы три уравнения, которыми служат условия

прохождения параболы (3.31) через точки  $(x_{i-1}, y_{i-1})$ ,  $(x_i, y_i)$  и  $(x_{i+1}, y_{i+1})$ . Эти условия записывают в виде:

$$\begin{cases} a_i x_{i-1}^2 + b_i x_{i-1} + c_i = y_{i-1}; \\ a_i x_i^2 + b_i x_i + c_i = y_i; \\ a_i x_{i+1}^2 + b_i x_{i+1} + c_i = y_{i+1}. \end{cases} \quad (3.32)$$

Интерполяцию для любой точки  $x \in [x_0, x_n]$  проводят по трем ближайшим точкам.

*Кубическая сплайн-интерполяция.* В общем случае, для функции  $y = f(x)$  требуется найти приближение  $y = j(x)$  таким образом, чтобы  $f(x_i) = j(x_i)$  в точках  $x = x_i$ , а в остальных точках отрезка  $[a, b]$  значения функций  $f(x)$  и  $j(x)$  были близкими между собой. Кубическим интерполяционным сплайном, соответствующим данной функции  $f(x)$  и данным узлам  $x_i$ , называют функцию  $S(x)$ , удовлетворяющую следующим условиям [65, 66]: а) на каждом сегменте  $[x_{i-1}, x_i]$ ,  $i = 1, 2, \dots, N$  функция  $S(x)$  является полиномом третьей степени; б) функция  $S(x)$ , а также её первая и вторая производные непрерывны на отрезке  $[a, b]$ ; в)  $S(x_i) = f(x_i)$ ,  $i = 0, 1, \dots, N$ .

На каждом из отрезков  $[x_{i-1}, x_i]$ ,  $i = 1, 2, \dots, N$  ищут функцию  $s(x) = S_i(x)$  в виде полинома третьей степени:

$$S_i(x) = a_i + b_i(x - x_{i-1}) + c_i(x - x_{i-1})^2 + d_i(x - x_{i-1})^3, \quad x_{i-1} \leq x \leq x_i, \quad (3.33)$$

где  $a_i$ ,  $b_i$ ,  $c_i$ ,  $d_i$  – коэффициенты, подлежащие определению на всех  $n$  элементарных отрезках.

Чтобы система алгебраических уравнений имела решение, нужно, чтобы число уравнений равнялось числу неизвестных. Поэтому нужно получить  $(4 \cdot n)$  уравнения.

Первые  $(2 \cdot n)$  уравнения получают из условия, что график функции  $S(x)$  должен проходить через заданные точки, т.е.  $S_i(x_{i-1}) = y_{i-1}$ ,  $S_i(x_i) = y_i$ . Эти условия записывают в виде:

$$S_i(x_{i-1}) = a_i = y_{i-1}, \quad (3.34)$$

$$S_i(x_i) = a_i + b_i h_i + c_i h_i^2 + d_i h_i^3 = y_i, \quad (3.35)$$

где  $h_i = x_i - x_{i-1}$ ,  $i = 1, 2, \dots, n$ .

Следующие  $(2 \cdot n - 2)$  уравнения вытекают из условия непрерывности первых и вторых производных в узлах интерполяции, т.е. условия гладкости кривой во всех точках [65]. После преобразований, выполненных согласно

теории сплайнов [64, 65], окончательно получают следующую систему уравнений для коэффициентов  $c_i$  ( $c_1 = 0, c_{n+1} = 0$ ):

$$h_{i-1}c_{i-1} + 2(h_{i-1} + h_i)c_i + h_ic_{i+1} = 3\left(\frac{y_i - y_{i-1}}{h_i} - \frac{y_{i-1} - y_{i-2}}{h_{i-1}}\right). \quad (3.36)$$

По найденным коэффициентам  $c_i$  вычисляют  $d_i$  и  $b_i$  [43–44]:

$$d_i = (c_{i+1} - c_i)/3h_i, \quad i = 1, 2, \dots, n-1, \quad d_n = -c_n/3h_n \quad (3.37)$$

$$b_i = \frac{y_i - y_{i-1}}{h_i} - \frac{h_i}{3}(c_{i+1} + 2c_i), \quad i = 1, 2, \dots, n-1, \quad b_n = \frac{y_n - y_{n-1}}{h_n} - \frac{3}{2}(h_n c_n). \quad (3.38)$$

*Глобальная интерполяция.* Классический подход основывается на требовании строгого совпадения значений  $f(x)$  и  $\varphi(x)$  в точках  $x_i$  ( $i = 0, 1, \dots, n$ ) [65, 66]. Будем искать интерполяционную функцию  $\varphi(x)$  в виде полинома степени  $n$ . Этот полином имеет  $n + 1$  коэффициентов. При этом имеем  $n + 1$  условий:

$$\varphi(x_0) = y_0, \quad \varphi(x_1) = y_1, \quad \dots, \quad \varphi(x_n) = y_n. \quad (3.39)$$

Условия (3.40) накладываются на полином:

$$\varphi(x) = a_n x^n + a_{n-1} x^{n-1} + \dots + a_1 x + a_0. \quad (3.40)$$

Таким образом, можно однозначно определить коэффициенты полинома (3.40). Требуя для  $\varphi(x)$  выполнения условий (3.39), получаем систему  $n + 1$  уравнений с  $n + 1$  неизвестными:

$$\sum_{k=0}^n a_k x_i^k = y_i, \quad (i = 0, 1, \dots, n). \quad (3.41)$$

Решая эту систему относительно неизвестных  $a_0, a_1, \dots, a_n$ , получаем аналитическое выражение полинома (3.40). Система (3.41) имеет единственное решение, т.к. её определитель запишется в виде:

$$\Delta = \begin{vmatrix} x_0^n & x_0^{n-1} & x_0 & \dots & 1 \\ x_1^n & x_1^{n-1} & x_1 & \dots & 1 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & 1 \\ x_n^n & x_n^{n-1} & x_n & \dots & 1 \end{vmatrix}. \quad (3.42)$$

Определитель Вандермонда (3.42) является отличным от нуля. Следовательно, интерполяционный полином  $\varphi(x)$  для функции  $f(x)$ , заданной таблично, существует и единственен.

Аппроксимация результатов для получения расчетных зависимостей. Для получения аналитических выражений для расчета показателей механических свойств при заданных условиях горячей деформации использовали стандартные методы аппроксимации данных [64–66]: метод наименьших квадратов и метод перебора. В качестве моделей уравнений регрессии в методе наименьших квадратов использовали: линейную модель, экспоненциальную модель, квадратичную модель, степенную модель и кубическую модель. Методом перебора по аргументу находили коэффициенты уравнений регрессии, при которых минимально отклонение [66]:

$$\Delta = \sum_{i=1}^n (y_i^p - y_i)^2 / n,$$

где  $n$  – количество пар экспериментальных данных;

$y_i$  и  $y_i^p$  – заданные и расчетные значения соответственно.

При итеративных вычислениях расчеты прекращают после достижения заданной разности между значениями коэффициентов уравнений регрессии на соседних итерациях.

**Программное обеспечение и анализ результатов исследования.** На основании указанных методик аппроксимации разработано программное обеспечение в пакете Borland C++ Builder 4 (программа «Recrystallization»). При нажатии на заставку программы открывается вкладка «Исходные данные» (рис. 3.5). В левой части окна приведен пример типовой диаграммы рекристаллизации низкоуглеродистой стали, а в правой части окна – таблица данных диаграммы. Для ввода и редактирования исходных данных используют панель навигации, расположенную в правом нижнем углу окна. Для расчета размера зерна нажимают кнопку «Перейти к расчету размера зерна», которая расположена под таблицей исходных данных.

Вкладка «Расчет размера зерна» представлена на рис. 3.6. В качестве примера зададим данные диаграммы рекристаллизации по рис. 1 и выполним её анализ для температуры рекристаллизации  $t = 800$  °С. Пользователь может выбрать один или все виды интерполяции. При температуре  $t = 800$  °С диаграмму рекристаллизации (см. рис. 3.6) можно условно разбить на 4 участка: 1) при степени деформации от 0 до 4 % – линейный участок, характеризующийся постоянной площадью зерна; 2) при степени деформации от 4 до 5 % – резкое возрастание площади зерна; 3) при степени деформации от 5 до 15 % – экспоненциальное уменьшение площади зерна; 4) при степени деформации от 15 до 80 % – линейный участок, характеризующийся постоянной площадью зерна.

Наиболее точной (во всех случаях) является линейная интерполяция, т.к. при заданном числе участков разбиения замена отрезков кривой прямолинейными сопряженными участками дает ломаную, близкую к предполагаемой кривой. При степени деформации  $e = 4...5$  % наблюдается резкое возрастание площади зерна, а затем её постепенное уменьшение,

поэтому наблюдается осцилляция при квадратичной интерполяции в окрестностях  $e = 4 \%$ , а при интерполяции кубическими сплайнами – на участке  $e = 5...30 \%$ , при глобальной интерполяции – на участке  $e = 60...80 \%$ .

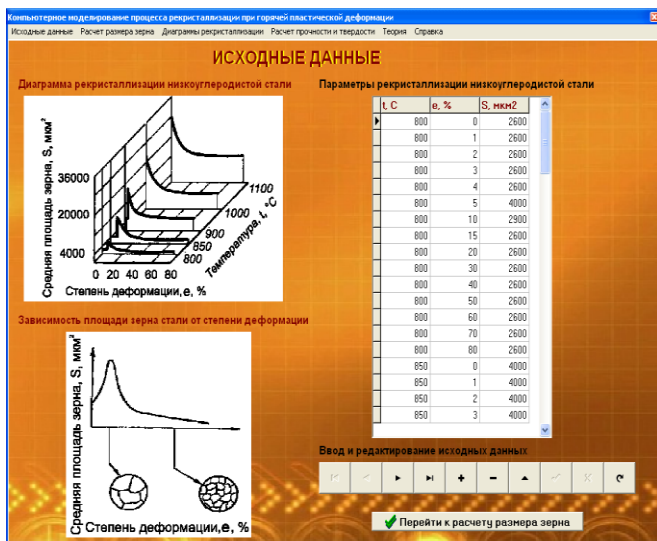


Рисунок 3.5 – Вкладка «Исходные данные»

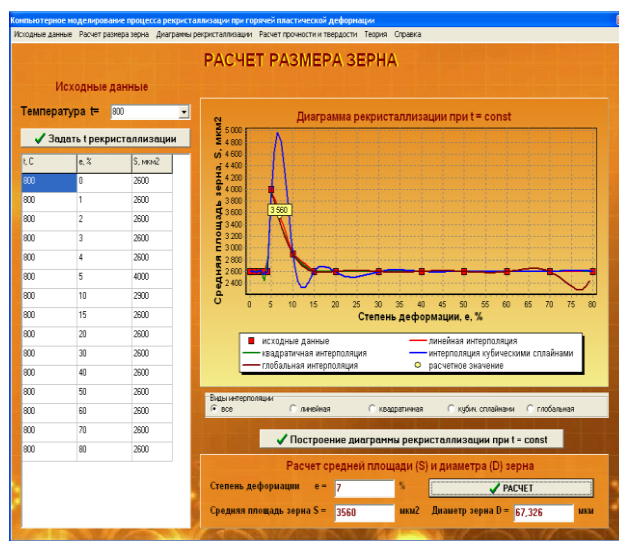


Рисунок 3.6 – Вкладка «Расчет размера зерна», построение диаграммы рекристаллизации при  $t = 800 \text{ }^\circ\text{C}$  и расчет размера зерна при  $e = 7 \%$

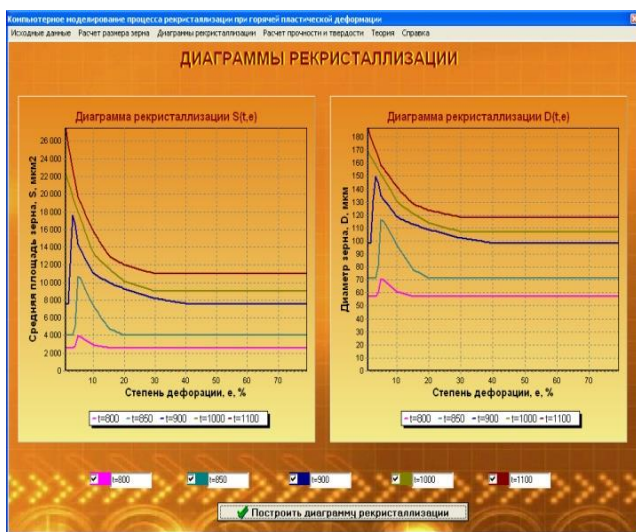


Рисунок 3.7 – Вкладка «Диаграммы рекристаллизации»

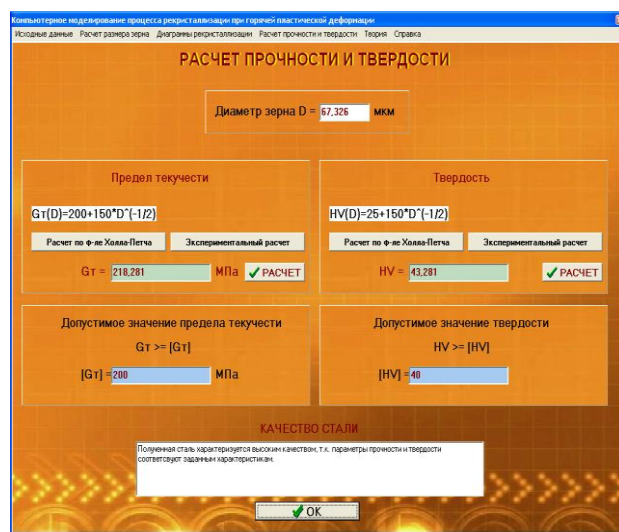


Рисунок 3.8 – Вкладка «Расчет прочности и твердости», расчет  $Gt$  и  $HV$  при диаметре зерна  $D = 67,326 \text{ мкм}$  с использованием формулы Холла-Петча

В результате расчетов при  $t = 800 \text{ }^\circ\text{C}$  и  $e = 7 \%$  имеем: средняя площадь зерна  $S = 3560 \text{ мкм}^2$ , диаметр зерна  $D = 67,326 \text{ мкм}$  (см. рис. 3.6). Аналогичный анализ можно провести для любой температуры и степени

деформации, в пределах, обозначенных диаграммой. Например, при  $e = 7\%$  рассчитывали площадь и диаметр зерна для других температур:

- при  $t = 850\text{ °C}$  –  $S = 9520\text{ мкм}^2$ ,  $D = 110,1\text{ мкм}$ ;
- при  $t = 900\text{ °C}$  –  $S = 12920\text{ мкм}^2$ ,  $D = 128,26\text{ мкм}$ ;
- при  $t = 1000\text{ °C}$  –  $S = 16104\text{ мкм}^2$ ,  $D = 143,19\text{ мкм}$ ;
- при  $t = 1100\text{ °C}$  –  $S = 18100\text{ мкм}^2$ ,  $D = 151,81\text{ мкм}$ .

Таким образом, при заданной степени деформации  $e = 7\%$  с увеличением температуры увеличиваются размеры зерна [63].

Вкладка «Диаграммы рекристаллизации» (рис. 3.7) содержит построенные диаграммы рекристаллизации для определения среднего размера ( $S$ ) и диаметра зерна ( $D$ ) при различных температурах ( $t$ ) и степенях деформации ( $e$ ). Пользователь может отображать кривые по выбору и оценивать диапазон изменения размеров зерна.

Вкладка «Расчет прочности и твердости» (рис. 3.5) содержит расчет предела текучести ( $G_T = \sigma_T$ ) и твердости по Виккерсу ( $HV$ ) при заданном диаметре зерна ( $D$ ). На вкладке отображается диаметр зерна, предварительно рассчитанных при заданных  $t$  и  $e$  на вкладке «Расчет размера зерна» (рис. 3.4). Для расчета предела текучести  $G_T$  по формуле Холла-Петча необходимо нажать на кнопку «Расчет по формуле Холла-Петча». В появившейся форме задают константы:  $G_0 = \sigma_0$  и  $K = k$ , а затем нажимают кнопку «Перейти к расчету». Для расчета твердости ( $HV$ ) по формуле Холла-Петча задают константы:  $HV_0 = HV_0$  и  $K$ , а затем нажимают кнопку «Перейти к расчету».

При диаметре зерна  $D = 67,326\text{ мкм}$  ( $t = 800\text{ °C}$  и  $e = 7\%$ ) и константах, предел текучести равен  $G_T = 218\text{ МПа}$ , а твердость по Виккерсу –  $HV = 43$  (рис. 3.8). Сравнение полученных значений с минимально допустимыми ( $[G_T] = 200\text{ МПа}$  и  $[HV] = 40$ ) для низкоуглеродистых сталей, показало, что полученная сталь после указанных термомеханических режимов деформационной проработки характеризуется высоким качеством, т.к. выполняются соотношения:  $G_T \geq [G_T]$  и  $HV \geq [H_V]$ .

Пользователь может самостоятельно выбирать тип аппроксимирующей зависимости, а может нажатием кнопки «Наилучшая аппроксимация» выбрать аппроксимирующую зависимость, для которой величина среднеквадратической ошибки  $\delta$  минимальна [63].

В результате проведения аппроксимации получили следующие зависимости:

- линейная аппроксимация:

$$G_T = -0,115D + 224,626; \quad \delta = 0,8930; \quad (3.43)$$

- квадратичная аппроксимация:

$$G_T = 0,001D^2 - 0,224D + 231,681; \quad \delta = 0,1651; \quad (3.44)$$

- кубическая аппроксимация:

$$G_T = 0,0000001D^3 + 0,0024D^2 - 0,412D + 234,652; \delta = 0,1093; \quad (3.45)$$

– экспоненциальная аппроксимация:

$$G_T = 2,638 \cdot \exp(0,049D); \delta = 829,3703; \quad (3.46)$$

– степенная аппроксимация:

$$G_T = 1,313D^{1,124}; \delta = 238,9619; \quad (3.47)$$

– обратная аппроксимация формулой Холла – Петча:

$$G_T = 195,7 + 166,62D^{-1/2}; \delta = 0,1720. \quad (3.48)$$

Таким образом, в результате проведенных расчетов получено, что наилучшей аппроксимирующей моделью для указанного примера является кубическая зависимость, т.к. для неё величина среднеквадратической ошибки минимальна и составляет  $\delta = 0,1093$ . Для сравнения, среднеквадратическая ошибка для расчета по формуле Холла-Петча равна  $\delta = 0,1720$ , т.е. отличается незначительно.

Аналогично проводится аппроксимация данных для определения зависимости твердости по Виккерсу  $HV$  от диаметра зерна  $D$ . Получено, что наилучшей аппроксимирующей зависимостью в данном случае является кубическая зависимость, т.к. для неё величина среднеквадратической ошибки минимальна и составляет  $\delta = 0,1954$ . Для экономии времени можно воспользоваться кнопкой «Наилучшая аппроксимация», и программа автоматически выберет наилучшую аппроксимирующую зависимость из списка предложенных.

### Выводы по разделу 3

1. На основе метода элементарных балансов разработана конечно-разностная рекуррентная математическая модель изменения во времени неравномерного по ширине полосы температурного поля с учетом явлений теплопереноса. За основу взята реализация математической модели в среде BORLAND C++BUILDER 4, что позволяет, определять неравномерное распределение температур, которое необходимо сообщить полосе при подогреве. Результаты расчетов являются основой для рекомендаций по проектированию индукционных подогревателей, и так же позволяют оптимизировать скорость прокатки и выбрать режимы подогрева для достижения требуемого распределения температур перед прокаткой в чистовой группе клетей.

2. В результате проведенного математического моделирования изменения неравномерного температурного поля установлено, что увеличение величины промежутка времени между окончанием черновой прокатки и началом деформирования металла в чистовых клетях требует большего подогрева кромок полосы, т.е. получения более резкого градиента температур по ширине проката. Это возможно при использовании способов высокоскоростного нагрее-

ва, к которым и относят индукционный нагрев.

3. Разработана автоматизированная методика аппроксимации диаграмм рекристаллизации для проектного или оперативного выбора термомеханических режимов прокатки, обеспечивающих требуемые механические свойства листов и полос.

4. Выполнено развитие метода автоматизированной обработки диаграмм рекристаллизации, взятых из технической литературы, для расчета средних размеров зерен и прогнозирования механических свойств (предела текучести и твердости по Виккерсу) материала полосы при заданных термомеханических режимах обработки давлением.

5. На примере показаны возможности разработки, позволяющие предлагать расчетные зависимости для определения значений механических свойств металлопродукции при заданных термомеханических режимах, определять точность аппроксимирующих моделей и оценивать качество металла полос и листов.

## **4 РАСЧЕТ ТЕМПЕРАТУРНЫХ И ДЕФОРМАЦИОННЫХ РЕЖИМОВ ПРОКАТКИ ШИРОКИХ ПОЛОС С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИНДУКЦИОННОГО ПОДОГРЕВА ПОЛОСЫ В УСЛОВИЯХ НЕПРЕРЫВНОГО ШИРОКОПОЛОСНОГО СТАНА 1700**

### **4.1 Оценка неравномерности охлаждения горячекатаных полос по длине**

Одним из требований к полосе, прокатанной на непрерывном широкополосном стане (НШПС), является обеспечение равномерной структуры металла по длине горячекатаной полосы. Неравномерность структуры в последующем проявляется и на холоднокатаном металле. Проведена оценка влияния условий охлаждения полос на отводящем рольганге НШПС на неравномерность свойств по длине полос. Установлено, что неравномерность свойств обусловлена изменением температуры начала ускоренного охлаждения.

По длине горячекатаных полос наблюдается неравномерность свойств, которая наследуется холоднокатаным прокатом. Например, на холоднокатаных полосах толщиной 0,8 мм условный предел текучести металла может уменьшаться на 10...20 Н/мм<sup>2</sup> по длине полосы (табл. 4.1).

Как известно [67, 68], на механические свойства полосы из малоуглеродистых сталей существенно влияют следующие факторы: температура конца прокатки; температура смотки; температура начала ускоренного охлаждения; температура окончания ускоренного охлаждения; скорость ускоренного охлаждения.

На НШПС контролируются только два технологических параметра: температура конца прокатки и температура смотки полосы. Оба параметра указываются в технологической документации в виде режима прокатки. Режим охлаждения на отводящем рольганге, при использовании душирующей установки, не регламентируется в виде скорости охлаждения, температур начала и окончания ускоренного охлаждения. В качестве параметра, определяющего условия охлаждения полосы на отводящем рольганге, задаётся начальная полусекция душирующей установки, с которой осуществляется подача воды при ускоренном охлаждении. Прокатка полосы в чистой группе клетей осуществляется с ускорением. Несмотря на то, что условия прокатки и охлаждения изменяются по длине, положение начальной секции душирования неизменно по длине полосы [69].

Скорость охлаждения полосы на отводящем рольганге определяли расчётом. Существующая на стане 2000 ОАО «Новолипецкий металлургический комбинат» система ускоренного охлаждения состоит из 80 верхних и нижних коллекторов струйного охлаждения [69]. Общая длина рольганга 206 м. Коллекторы ускоренного охлаждения расположены на участке 110 м. После выхода из последней клетки стана полоса охлаждается на воздухе, затем водой, и затем вновь на воздухе. Соответственно можно выделить три участка на отводящем рольганге, где скорости охлаждения различны [69]:

- 1 участок – охлаждение на воздухе от последней клетки стана до первой включенной секции душирующей установки;  
 2 участок – охлаждение водой;  
 3 участок – охлаждение на воздухе после душирования.

Таблица 4.1 – Результаты испытаний образцов холоднокатаного проката

Полоса	Длина полосы	$\sigma_{0,2}$ , Н/мм <sup>2</sup>	$\sigma_s$ , Н/мм <sup>2</sup>	$\delta_4$ , %
1	500	170.0	307	44.5
	1000	170.0	300	43.5
	1500	165.0	300	42.0
	2000	163.0	300	43.0
	2500	160.0	305	44.5
2	500	197.5	325	43.0
	1000	182.5	305	42.0
	1500	182.5	302	42.0
	2000	177.5	305	43.0
	2500	175.0	305	42.5
3	500	170.0	300	44.0
	1000	172.5	302	44.5
	1500	177.5	302	43.0
	2000	172.5	292	43.0
	2500	157.5	290	43.0
	3000	155.0	287	44.5

Определить скорость охлаждения на втором участке достаточно сложно, т.к. охлаждение полосы осуществляется не по всей поверхности одновременно, а струями воды, имеющими конечный размер. Охлаждённые водой участки, в промежутках между контактом с водой, разогреваются теплом соседних неохлаждённых участков, а те, в свою очередь, охлаждаются. Кроме того, необходимо учитывать подвод и отвод тепла по толщине полосы, наличие паровой рубашки и т.д.

Для определения скоростного и температурного режима охлаждения на отводящем рольганге использовали алгоритм, в котором рассчитывается снижение температуры на первом участке от измеренной температуры конца прокатки и снижение температуры на третьем участке при известной температуре смотки. На втором участке скорость охлаждения при известных температурах начала ( $T_{нд}$ ) и окончания душирования ( $T_{од}$ ) и времени охлаждения ( $\tau_2$ ), определяется как среднее значение скорости охлаждения на участке ускоренного охлаждения (душирования) [69]:

$$\omega_2 = \frac{T_{нд} - T_{од}}{\tau_2}. \quad (4.1)$$

Расчёт температур начала и окончания душирования произведен с учётом конвективного и лучистого теплообмена.

Для упрощения расчётов модель содержит следующие допущения [69]:

- 1) условия охлаждения поверхностей полосы одинаковы;
- 2) не учитывается влияние на тепловое состояние полосы полиморфного превращения и контакт с роликами отводящего рольганга;
- 3) длина участков охлаждения верхними и нижними секциями принята одинаковой длине участка охлаждения верхними секциями;
- 4) полоса рассматривается как термически тонкое тело, т.е. не учитывается распределение температур по сечению.

Алгоритм расчёта температур  $T_{нд}$  и  $T_{од}$  основан на разбиении всей длины отводящего рольганга на участки длиной 10 м, на которых производится пересчёт параметров теплового состояния сечения полосы: температуры, коэффициента теплопроводности, средней теплоёмкости и коэффициента теплоотдачи. Температура полосы на каждом участке рассчитывается как распределение по толщине, а затем усредняется по массе.

Распределение температуры по толщине рассчитывается из формулы безразмерной температуры:

$$\Theta = \frac{t - t_B}{t_H - t_B}, \quad (4.2)$$

где  $t$  – температура сечения в данный момент времени, °С;

$t_B = 20$  °С, температура окружающего воздуха;

$t_H$  – температура сечения в начальный момент времени, °С.

Формула безразмерного температурного поля для термически тонкого тела имеет вид [70]:

$$\Theta = \cos(\xi \sqrt{Bi}) e^{-Bi \cdot Fo}, \quad (4.3)$$

где  $\xi$  – безразмерная координата сечения;

$Bi$  – число Био;

$Fo$  – безразмерное время, или число Фурье.

Безразмерная координата рассчитывается по формуле:

$$\xi = \frac{x}{\delta}, \quad (4.4)$$

где  $\delta$  – половина толщины полосы;

$x$  – координата сечения ( $0 \leq x \leq \delta$ ).

Число Фурье определяем по формуле:

$$Fo = \frac{a\tau}{\delta^2}, \quad (4.5)$$

где  $a$  – средний коэффициент температуропроводности, м<sup>2</sup>/с;

$\tau$  – время транспортирования полосы на участке разбиения, с.

Средний коэффициент температуропроводности определяем по формуле:

$$a = \frac{\lambda}{C \cdot \rho} \cdot \frac{m^2}{c}, \quad (4.6)$$

где  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К);

$C$  – средняя теплоёмкость, Дж/(кг·К),

$\rho = 7800$  кг/м<sup>3</sup> – плотность стали.

Число Био рассчитывается по формуле:

$$Bi = \frac{a\delta}{\lambda}, \quad (4.7)$$

где  $a$  – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м<sup>2</sup>·К).

Коэффициент теплоотдачи рассчитывается как сумма коэффициентов лучистой теплоотдачи  $a_l$  и конвективной теплоотдачи  $a_k$ :

$$a = a_l + a_k, \quad \text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}), \quad (4.8)$$

Конвективный коэффициент рассчитывается по формуле:

$$a_k = \sqrt{a_{\text{вын}}^2 + a_{\text{св}}^2}, \quad \text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}), \quad (4.9)$$

где  $a_{\text{вын}}$  – коэффициент теплоотдачи вынужденной конвекцией, Вт/(м<sup>2</sup>·К);

$a_{\text{св}} = 11,1$  – коэффициент теплоотдачи свободной конвекцией Вт/(м<sup>2</sup>·К), [71].

Коэффициент теплоотдачи вынужденной конвекцией определяется по формуле [48]:

$$\alpha_{\text{вын}} = 4,39V_n^{0,8}x_c^{-0,2}, \quad (4.10)$$

где  $V_n$  – скорость полосы, м/с;

$x_c$  – координата сечения полосы на отводящем рольганге от последней клетки стана, м.

Коэффициент лучистой теплоотдачи определяем по формуле [71]:

$$\alpha_l = \varepsilon C_o [(\frac{T_n}{100})^4 - (\frac{T_e}{100})^4] / (T_n - T_e), \quad \text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}), \quad (4.11)$$

где  $\varepsilon$  – степень черноты металла;

$C_o = 5,7$  Вт/(м<sup>2</sup>·К<sup>4</sup>) – константа излучения абсолютно чёрного тела;

$T_n$  – температура полосы, К;

$T_a = 293$  К – температура окружающего воздуха.

Достоверность изложенной модели была проверена на передних участках 51 полосы, которые не подвергаются ускоренному охлаждению водой, путём определения  $T_{см}$  и сравнения её с фактическим измеренным значением [69]. Относительная ошибка находилась в интервале 0,1...2,8 % при среднем значении 0,87 %, что меньше погрешности измерения двух пирометров ( $T_{см}$  и  $T_{кн}$ ). Ошибка обратного расчёта (определение  $T_{кн}$ ) находилась в интервале 4...6 °С.

Расчёт на участке охлаждения водой показал, что уровень  $\omega_2$  на переднем конце полосы составляет 64...68 для 38 полос, а на заднем конце полосы – 55...62 °C/c для 33 полос, при средних значениях 66 и 63 °C/c соответственно. Разброс значений  $\omega_2$  связан с неточностью определения номера последней включенной полусекции. При прокатке в системе АСУ ускоренного охлаждения (УО) присутствует только номер первой полусекции и количество включенных полусекций, причем не реально функционирующих в определенный момент времени для каждого сечения полосы, а значение, установленное АСУ УО, которое рассчитывается по определенному алгоритму. В алгоритме АСУ УО заложено соотношение на количество включенных нижних и верхних секций. Количество включенных нижних секций больше на 25 %, чем верхних, из-за меньшей охлаждающей способности. Таким образом, участок охлаждения водой состоит из двух участков: участка охлаждения верхними и нижними секциями и участка только с нижними секциями.

Результаты расчёта условий охлаждения полос с неравномерными по длине свойствами представлены в табл. 4.2.

Таблица 4.2. - Режим охлаждения полос

№ полосы	$T_{нд.н},$ °C	$T_{нд.к},$ °C	$T_{од.н},$ °C	$T_{од.к},$ °C	$\omega_{1н},$ °C/c	$\omega_{1к},$ °C/c	$\omega_{2н},$ °C/c	$\omega_{2к},$ °C/c	$\omega_{3н},$ °C/c	$\omega_{3к},$ °C/c
1	805	858	743	721	11,12	14,55	52,18	56,72	6,83	7,32
2	814	866	725	719	11,61	14,96	54,85	57,00	6,65	7,34
3	815	867	750	697	11,51	14,97	55,74	65,26	6,95	6,85

По результатам расчётов можно сделать вывод о том, что скорость охлаждения  $\omega_2$  не изменяется по длине полос и от полосы к полосе. Она зависит от скорости распространения тепловых потоков в полосе, т.е. от толщины. Определяющей скоростью охлаждения при формировании механических свойств проката является скорость охлаждения на участке душирования водой и имеет различную величину только для различных типоразмеров. Таким образом, при изменении технологических параметров (температура, скорость, ускорение) по длине полос, факторами, влияющими на свойства полосы, являются температуры начала и окончания ускоренного охлаждения.

#### 4.2 Подогрев полосы перед чистовыми клетями индукционным способом

Необходимость подогрева стальной полосы на промежуточном рольганге между черновыми и чистовыми клетями стана горячей прокатки связана с общими требованиями повышения качества проката и снижения энергозатрат при прокатке. Стабилизация температуры на входе в чистовую группу стана исклю-

чает ускорение при прокатке и позволяет получить постоянные физико-механические свойства по длине полосы. Появляется возможность поддерживать с высокой точностью толщину конечного продукта по длине.

Равномерное температурное поле по ширине полосы улучшает условия эксплуатации валков прокатного стана и уменьшает неравномерность износа валков и соответственно увеличивает их срок эксплуатации.

Неравномерное распределение температуры по ширине полосы подката перед чистовыми клетями имеет также ряд негативных последствий, отражающихся на качестве полосы:

- На кромках может образоваться иная металлургическая структура, нежели в остальной части ленты.

- Если после прокатки необходим еще один вид термообработки стали, то температура наиболее холодных зон материала, т.е. кромок ленты, должна быть выше температуры переходного состояния.

- Если кромки недогреты, то это может привести к повышению хрупкости и образованию трещин на кромках ленты.

За время транспортировки полоса подката теряет среднюю температуру, дополнительно подстыывают кромки на некоторую величину, и образуется температурный перепад по длине полосы. По этим причинам, в технологическом процессе, как правило, должен быть предусмотрен подогрев полосы подката.

Для этой цели могут быть использованы различные нагревательные установки. Индукционный способ нагрева наиболее подходит как для одновременного повышения общего уровня температуры, так и для подогрева кромок и выравнивания температуры по ширине, и компенсации температурного градиента по длине полосы и обеспечения стабилизации температуры на входе в чистовую клеть.

Подъем общего уровня температуры полосы перед входом в чистовые клетки прокатного стана обычно осуществляются в овальных неразъемных индукторах с продольным магнитным полем. При использовании относительно высокой частоты тока можно частично компенсировать падение температуры на кромках полосы, но зона воздействия ограничена несколькими глубинами проникновения тока в металл и не будет превышать нескольких миллиметров. Поэтому необходимая компенсация температуры на кромке в зоне 100...150 мм при нагреве в этом типе индуктора не представляется возможным.

Для подогрева кромок полосы и сечения полосы существуют различные методы, устройства и индукторы, приведенные в Приложении А.

Для достижения требуемых показателей геометрической точности широких полос выравнивание температуры по ширине полосы согласовывается с работой систем автоматизированной регулировке профиля полосы (САРП) и толщины проката (САРТ). Данные процессы непосредственно связаны с функционированием механизмов противоизгиба валков, нагружение которых зависит от реализуемых в каждом отдельном пропуске силовых режимов листовой прокатки, автоматизированный расчет которых предложен в работе авторов [72]. Для расчета перепадов (градиентов) температур по длине и ширине

полосы предложены автоматизированные продукты на основе методов конечных разностей [49, 50, 60, 73–75], в том числе адаптированные к условиям прокатки широких полос [61]. Использование таких компьютерных модулей позволяет определять исходные данные для проектирования индукционных нагревателей (подогревателей) различных типов (овальных, щелевых, с переменным шагом витков, двухслойных и т.п.), установка которых необходима для обеспечения требуемой формы градиентной кривой распределения температур по ширине раската перед входом в чистовую клетку. Между черновой клеткой и первой чистовой клеткой в системе НШПС выполняется установка одного или нескольких подряд (что более эффективно) индукционных подогревателей, которые включаются и выключаются согласованно с ритмом прокатки полосы [76]. Т.е. данный способ [76] нагрева кромок листового и полосового раската заключается в том, что подача раската в секции щелевого индуктора и продольное его перемещение в электромагнитном поле в межклетьевом пространстве производится до обеспечения необходимой температуры раската. Причем секции индукторов включают в автоматизированном режиме последовательно в момент входа в них передней кромки раската и выключают при выходе из них задней кромки раската [76]. В патентах [77, 78] также приведены рациональные технические решения, предложенные авторами, по сути, развивающие методы градиентного нагрева и обеспечения стабильности температурного поля металла перед его обработкой давлением.

#### **4.2.1 Электроиндукционный нагрев краев сляба**

Типичный индуктор с поперечным магнитным потоком содержит индукционную катушку, имеющую две секции [79]. Электропроводящий листовый материал, сплошной или состоящий из отдельных секций, может подвергаться индукционному нагреву вдоль поперечного сечения посредством: помещения материала между двумя секциями катушки; подачи переменного тока к катушке; и перемещения материала через две секции катушки. Например, на рис. 4.1 индукционная катушка содержит секцию 101 катушки и секцию 103 катушки, расположенные, соответственно, над и под материалом, который может представлять собой, например, металлическую полосу 90, которая непрерывно перемещается через катушку в направлении, показанном стрелкой. Для ориентации трехмерное ортогональное пространство определено осями X, Y и Z, показанными на рис. 4.1. Соответственно, полоса перемещается в направлении X. Зазор  $g_c$  или просвет между секциями катушки для ясности показан на фигуре утрированно увеличенным, но с сохранением длины поперек поперечного сечения полосы. Концы 101a и 101b секции 101 катушки и концы 103a и 103b секции 103 катушки подсоединены к одному или большему числу источников переменного тока (не показанных на рисунках) так, что они имеют текущие полярности, указанные на рис. 4.1. Ток через катушку создает общий магнитный поток, показанный типовой линией 105 магнитного потока (пунктирной линией), которая проходит через полосу под прямым углом и вызывает возникновение вихревых токов в плоскости полосы. Для направления

магнитного поля в сторону полосы могут применяться концентраторы 117 магнитного потока (частично показанные на рисунке вокруг секции 101 катушки), например, элементы из слоистого материала или других материалов с высокой магнитной проницаемостью и низким магнитным сопротивлением [79].

Подбор частоты ( $f$ , Гц) переменного тока для эффективного нагрева проводится по следующей формуле [79]:

$$f = 2 \cdot 10^6 \frac{\rho \cdot g_c}{\tau^2 \cdot d_s}, \quad (4.12)$$

где  $\rho$  – электрическое сопротивление полосы, Ом·м;

$g_c$  – зазор (просвет) между секциями катушки, м;

$\tau$  – шаг полюсов катушки, м;

$d_s$  – толщина полосы, м.

На рис. 4.2 показан типичный профиль нагрева в сечении полосы, полученный при помощи установки [79], показанной на рис. 4.1, при относительно малом шаге катушки и, соответственно, с учетом вышеприведенной формулы с малой частотой. По оси X на рис. 4.2 отложена нормированная координата, в поперечном сечении полосы, причем центру полосы соответствует координата 0.0, а противоположным краям полосы соответствуют координаты +1.0 и –1.0. По оси Y отложена нормированная температура, полученная при индукционном нагреве полосы, причем нормированная температура 1.0 соответствует по существу равномерной температуре нагрева в средней зоне 111 полосы. Ближе к краям полосы, в зонах 113 (называемых плечевыми зонами), полученные температуры в сечении полосы уменьшаются от нормированной температуры 1.0, а затем увеличиваются в крайних зонах 115 полосы до величины, превышающей нормированную температуру 1.0 [79].

В некоторых многоэтапных промышленных процессах материал первоначально нагревается, а затем перемещается на второй этап процесса. При перемещении от начального нагрева ко второму этапу процесса края материала могут существенно охладиться. Следовательно, между первоначальным нагревом и вторым этапом процесса необходимо выполнить какой-то краевой нагрев.

При электроиндукционном нагреве полоса может быть определена, как листовой материал, подвергаемый индукционному нагреву, при котором стандартная глубина проникновения индуцированного вихревого тока в материал меньше, чем толщина материала. И, наоборот, сляб может быть определен, как листовой материал, подвергаемый индукционному нагреву, при котором стандартная глубина проникновения индуцированного вихревого тока в материал больше толщины материала. Технический подход к индукционному нагреву краев листового материала может быть различным в зависимости оттого является материал полосой или слябом [79].

Одной из целей изобретения [79] является разработка аппарата и способа нагрева электропроводящего сляба за счет нестандартного использования поперечной индукционной магнитной катушки, при котором индукционный нагрев в большей степени производится на краях сляба, а не распределяется равномерно по его ширине.

Краткое описание графического материала, приведенного на рис. 4.1 – 4.7

Для иллюстрации изобретения [79] на рис. 4.1 – 4.7 показана предпочтительная в настоящее время форма; однако следует понимать, что данное изобретение не ограничивается показанными компоновкой и оборудованием.

Осуществление изобретения [79]. На рис. 4.3, рис. 4.4(a), рис. 4.4(b), рис. 4.4(c) и рис. 4.4(d) чертежей, на которых одинаковыми позициями обозначены подобные элементы, показан один пример аппарата для индукционного нагрева краев сляба согласно изобретению [79].

Устройство, соответствующее изобретению [79], может настраиваться на диапазон поперечной ширины сляба, для этого оно снабжено средством 96 (см. рис. 4.3) перемещения компенсаторов в направлении Y (в поперечном направлении) для компенсации изменения ширины сляба. Например, аппарат для перемещения компенсаторов может представлять собой прямолинейные рельсы или стержни, конструктивно соединенные с компенсаторами и прикрепленные к выходному элементу одного или большего числа линейных приводов (либо приводимые вручную).

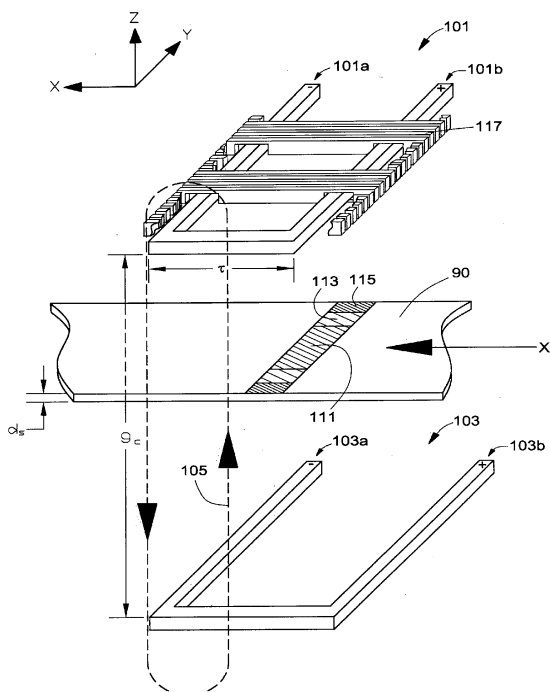


Рисунок 4.1 – Электромагнитная индукционная установка текущего уровня техники [79]

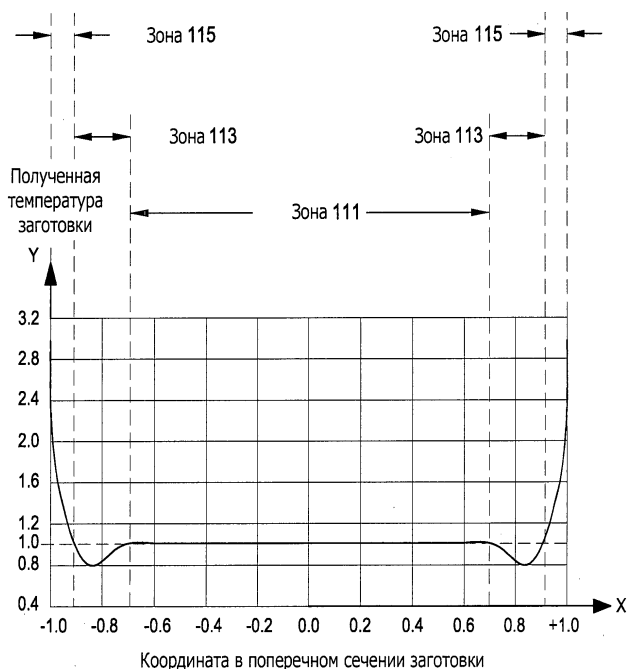


Рисунок 4.2 – Типичная характеристика индукционного нагрева в поперечном сечении для электромагнитной индукционной установки, показанной на рис. 4.1 [79]

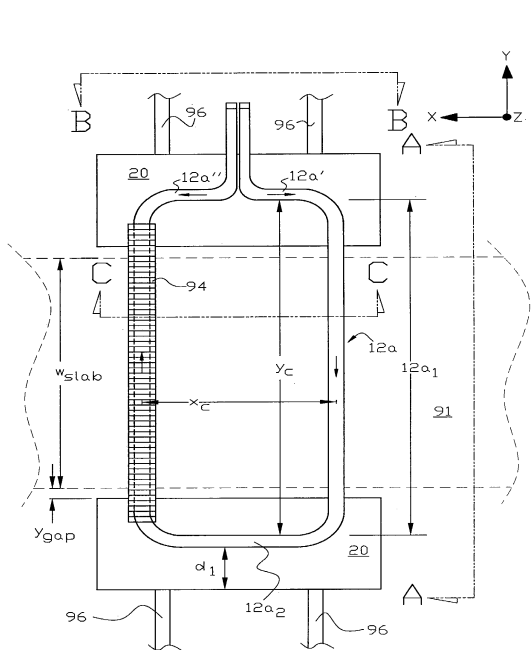


Рисунок 4.3 – Вид сверху примера аппарата индукционного нагрева краев сляба по изобретению, на котором показана только верхняя секция индукционной поперечной магнитной катушки [79]

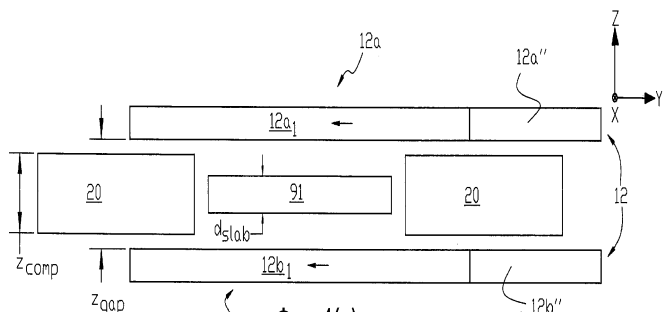


Рисунок 4.4(a) – Вид по линии А–А рис. 4.3 аппарата индукционного нагрева краев сляба, приведенного на рис. 4.3 [79]

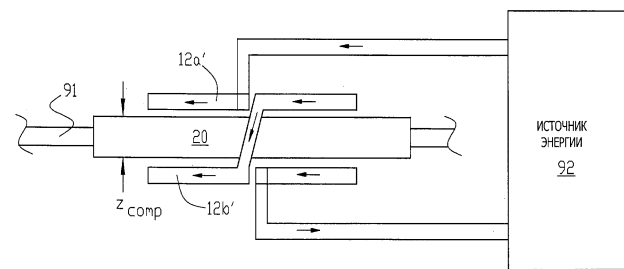


Рисунок 4.4 (b) – Вид по линии В–В рис. 4.3 аппарата индукционного нагрева краев сляба, приведенного на рис. 4.3, с одним из вариантов подключения к источнику тока [79]

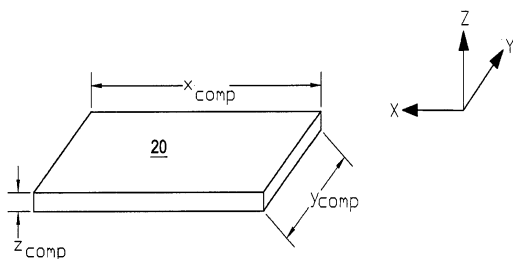


Рисунок 4.4(c) – Вид в изометрии примера компенсатора магнитного потока, применяемого для аппарата индукционного нагрева краев сляба, приведенного на рис. 4.3 [79]

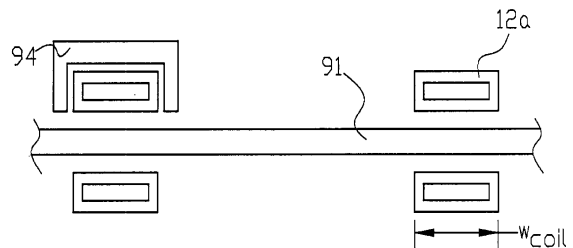


Рисунок 4.4(d) – Вид по линии С–С рис. 4.3 аппарата индукционного нагрева краев сляба, приведенного на рис. 4.3 [79]

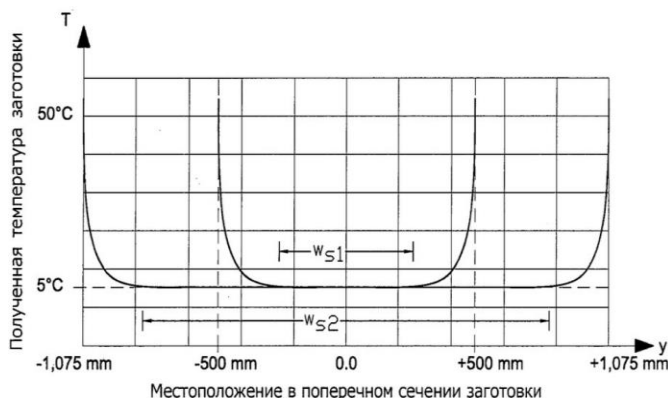


Рисунок 4.5 – Типичный график характеристики индукционного нагрева в сечении для установки индукционного нагрева краев сляба, показанной на рис. 4.3, рис. 4.4(a), рис. 4.4(b), рис. 4.4(c) и рис. 4.4(d) [79]

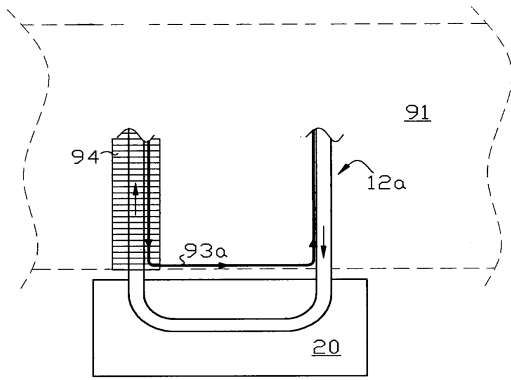


Рисунок 4.6(a) – Предпочтительное применение аппарата индукционного нагрева при помощи поперечного магнитного потока, имеющего поперечные края, выходящие за пределы краев сляба [79]

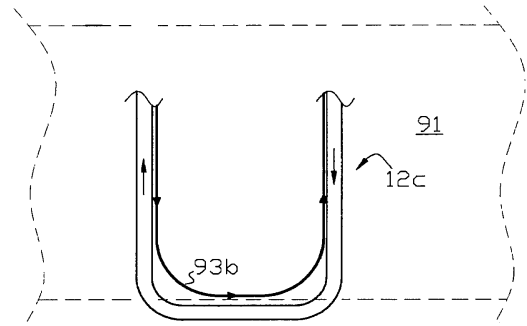


Рисунок 4.6(b) – Катушка с поперечным магнитным потоком, поперечные края которой расположены рядом с краями листа материала [79]

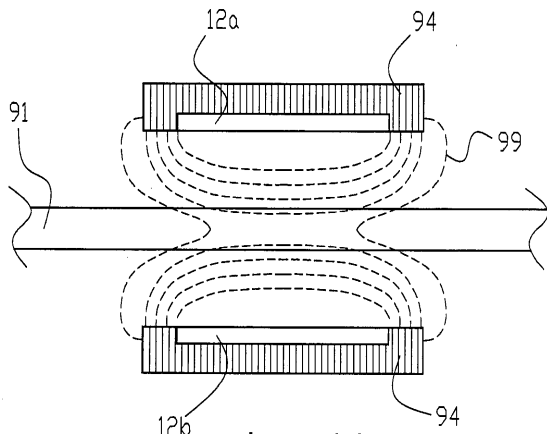


Рисунок 4.7(a) – Предпочтительное распределение магнитного потока, полученное в настоящем изобретении по сравнению с характерным распределением магнитного потока, получаемым в аппаратах-аналогах, показанным на рис. 4.7(b) [79]

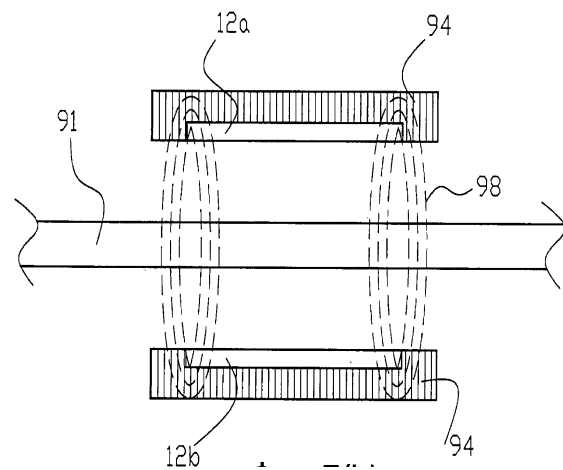


Рисунок 4.7(b) – Характерное распределением магнитного потока, получаемым в аппаратах-аналогах [79]

Конструкция и способы реализации технического решения [79] поясняются следующими пунктами.

1. Аппарат индукционного нагрева края сляба для индукционного нагрева по меньшей мере одного поперечного края сляба электропроводящего материала, содержащий [79]: пару поперечных секций магнитной катушки, причем каждая из секций пары поперечных секций магнитной катушки содержит пару поперечных сегментов катушки, при этом пара поперечных сегментов катушки одной из пары поперечных секций магнитной катушки расположена на расстоянии от пары поперечных сегментов катушки другой

секции из пары поперечных секций магнитной катушки для образования зоны индукционного нагрева сляба, через которую проходит сляб при ориентации его длины, по существу, перпендикулярно паре поперечных сегментов катушки каждой из пары поперечных секций магнитной катушки, причем поперечные сегменты катушки каждой из пары поперечных секций магнитной катушки находятся в одной плоскости и отделены друг от друга расстоянием шага катушки, при этом поперечные сегменты катушки каждой из пары поперечных секций магнитной катушки имеют выступающие края, которые выступают в поперечном направлении за пределы по меньшей мере одной кромки сляба в зоне индукционного нагрева сляба, причем выступающие поперечные края поперечных сегментов катушки каждой из пары поперечных секций магнитной катушки соединены друг с другом отдельным продольным сегментом катушки, ориентированным, по существу, параллельно длине сляба в зоне индукционного нагрева сляба, при этом выступающие поперечные края и продольный сегмент катушки образуют краевую компенсирующую зону между выступающими поперечными краями и продольным сегментом катушки каждой из пары поперечных секций магнитной катушки; по меньшей мере один концентратор магнитного потока, окружающий по меньшей мере поперечные сегменты катушки пары поперечных секций магнитной катушки, по существу, во всех направлениях от зоны индукционного нагрева сляба; по меньшей мере один источник переменного тока, подсоединенный к паре поперечных секций магнитной катушки так, чтобы мгновенный ток протекал в одном и том же направлении через каждую секцию из пары поперечных секций магнитной катушки, при этом каждый из указанных источников переменного тока имеет выходную частоту  $f_{slab}$ , определяемую согласно выражению [79]:

$$f_{slab} > 0,5 \cdot 10^7 \cdot \left( \frac{\rho_{slab}}{d_{slab}^2} \right), \quad (4.13)$$

где  $\rho_{slab}$  – электрическое удельное сопротивление сляба;

$d_{slab}$  – толщина сляба и электропроводящий компенсатор, размещенный в пределах краевой компенсирующей зоны.

2. Аппарат индукционного нагрева сляба по п. 1, в котором электропроводящий компенсатор имеет, по существу, прямоугольную форму, причем длина электропроводящего компенсатора больше, чем величина полюсного шага, высота электропроводящего компенсатора, по существу, равна расстоянию между выступающими поперечными краями и продольным сегментом катушки пары поперечных секций магнитной катушки при сохранении электрической изоляции между парой поперечных секций магнитной катушки, при этом высота электропроводящего компенсатора больше толщины сляба [79].

3. Аппарат индукционного нагрева сляба по п. 1 или 2, в котором, по меньшей мере, один поперечный край сляба индукционно нагревается до температуры, по меньшей мере, в 10 раз превышающей температуру на 65%

внутренней части поперечной ширины сляба [79].

4. Аппарат индукционного нагрева сляба по п. 1 или 2, в котором отношение толщины сляба к стандартной глубине проникновения индуцируемого вихревого тока больше 3 [79].

5. Аппарат индукционного нагрева сляба по п. 1 или 2, дополнительно содержащий аппарат для перемещения электропроводящего компенсатора при изменении поперечной ширины сляба в зоне индукционного нагрева сляба [79].

6. Способ индукционного нагрева по меньшей мере одного поперечного края электропроводящего сляба, содержащий этапы, на которых, согласно [79]: пропускают электропроводящий сляб между парой поперечных секций магнитной катушки, причем каждая секция из пары поперечных секций магнитной катушки содержит пару поперечных сегментов магнитной катушки, а пара поперечных сегментов магнитной катушки одной секции из пары поперечных секций магнитной катушки расположена на расстоянии от пары поперечных сегментов катушки другой секции из пары поперечных секций магнитной катушки с образованием зоны индукционного нагрева сляба, через которую пропускают сляб при ориентации его длины, по существу, перпендикулярно паре поперечных сегментов катушки каждой секции из пары поперечных секций магнитной катушки, при этом поперечные сегменты катушки каждой секции из пары поперечных секций магнитной катушки находятся в одной плоскости и отделены друг от друга расстоянием шага катушки, причем поперечные сегменты катушки каждой секции из пары поперечных секций магнитной катушки имеют выступающие края, которые выступают в поперечном направлении за пределы по меньшей мере одной кромки сляба в зоне индукционного нагрева сляба, при этом выступающие поперечные края поперечных сегментов катушки каждой секции из пары поперечных секций магнитной катушки соединены друг с другом отдельным продольным сегментом катушки, ориентированным, по существу, параллельно длине сляба в зоне индукционного нагрева сляба, причем выступающие поперечные края и продольный сегмент катушки образуют краевую компенсирующую зону между выступающими поперечными краями и продольным сегментом катушки каждой секции из пары поперечных секций магнитной катушки, и по меньшей мере поперечные сегменты катушки пары поперечных секций магнитной катушки окружены по меньшей мере одним концентратором магнитного потока, по существу, во всех направлениях от зоны индукционного нагрева сляба; подают переменный ток к паре поперечных секций магнитной катушки таким образом, чтобы мгновенный ток протекал в одном и том же направлении через каждую секцию из пары поперечных секций магнитной катушки; устанавливают частоту переменного тока равной частоте  $f_{\text{slab}}$  нагрева сляба [79].

7. Способ по п. 6, дополнительно содержащий этап, на котором выполняют индукционный нагрев по меньшей мере одного поперечного края электропроводящего сляба до температуры, по меньшей мере в 10 раз превышающей температуру 65% внутренней части поперечной ширины сляба [79].

8. Способ по п. 6 или 7, дополнительно содержащий этап, на котором перемещают электропроводящий компенсатор при изменении поперечной ширины сляба в зоне индукционного нагрева сляба [79].

#### **4.2.2 Щелевой индуктор (П-образный)**

Техническое решение [80] относится к области индукционного нагрева тонких плоских изделий в электромагнитном поле. В частности, такая конструкция [80] может использоваться для нагрева кромок тонких слябов с толщиной 20...50 мм и полос подката в современных линиях "непрерывная разливка – непрерывная прокатка"; для подогрева кромок металлических лент в непрерывных линиях нанесения покрытий и в других тому подобных случаях, когда необходим нагрев длинномерных плоских тонких изделий в электромагнитном поле.

Необходимость локального нагрева кромок тонких плоских длинномерных изделий (полос, слябов, подката и т.п.) возникает в связи с тем, что в процессе изготовления при перемещении изделия от операции к операции возникает неравномерность распределения температуры по ширине изделия вследствие более быстрого остывания кромок по сравнению с основной массой изделия. Это приводит к неравномерности свойств готового изделия. Особо остро эта проблема стоит в области металлургии в станах непрерывного изготовления проката. В настоящее время наиболее эффективным средством ее решения признано применение дополнительного локального подогрева кромок между операциями с использованием индукционного нагрева с помощью щелевых индукторов различных конструкций [80].

Известен щелевой индуктор с продольным магнитным полем, позволяющий сосредоточить нагрев в области кромок и представляющий собой витки индуктирующего провода, расположенные параллельно на небольшом расстоянии друг от друга и образующие щель, через которую пропускается обрабатываемое плоское изделие, например полоса. Витки выполнены в форме плоских, близких к прямоугольным, рамок, электрически соединенных последовательно. Зона нагрева в такой конструкции определяется шириной витков над кромкой. Такой индуктор конструктивно достаточно прост [80].

Недостатком такого индуктора [80] является необходимость использования достаточно высокой частоты тока, при которой глубина проникновения тока не превышала бы 2,5...3 толщины изделия, что ведет к существенному удорожанию источника питания. Неправильный выбор частоты приводит к резкому ухудшению эффективности нагрева. Кроме того, из-за больших потоков рассеивания данный тип индуктора имеет низкий коэффициент мощности [80].

Через щель пропускается кромка полосы, магнитный поток пронизывает ее поперек, и наведенные в плоскости полосы токи концентрируются у кромки, вызывая ее нагрев, и замыкаются по основной массе металла, не приводя к ее заметному нагреву, то есть в этом случае выделение мощности происходит непосредственно на кромке полосы [80].

Основное достоинство такого индуктора, по мнению авторов [80], заключается в том, что нагрев происходит на существенно более низкой частоте, чем при нагреве в продольном магнитном поле, резко улучшаются энергетические показатели индуктора (КПД и коэффициент мощности) и возможность согласования его с источником питания без дополнительного трансформатора путем выбора оптимального количества витков [80].

Недостатком такого индуктора является необходимость строгого позиционирования магнитопровода индуктора относительно кромок полосы с достаточно небольшим зазором между полосой и торцами магнитопровода. Такой индуктор позволяет очень незначительно менять ширину зоны нагрева путем сдвига всей конструкции индуктора относительно полосы вследствие концентрации тока непосредственно на кромке изделия. Такая конструкция предполагает обязательное наличие магнитопровода для получения электромагнитной связи между индуктором и металлом полосы и, следовательно, делает устройство достаточно тяжелым и металлоемким [80].

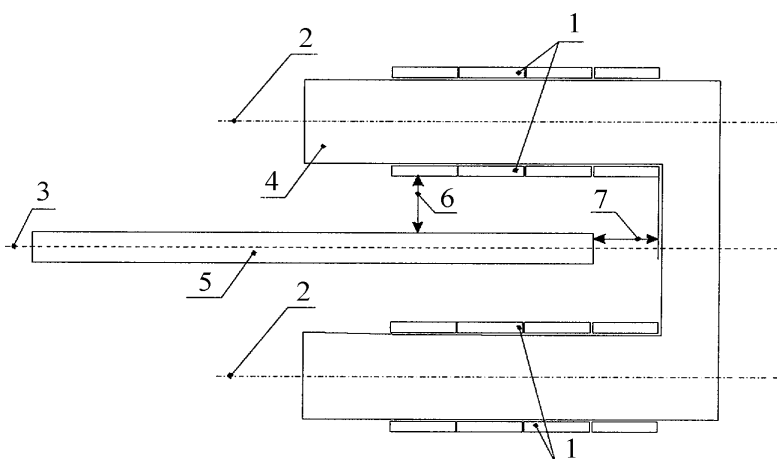
Техническим эффектом, обеспечивающим решение задачи, является то, что в предлагаемой конструкции нагрев объекта осуществляется не только за счет общего магнитного потока, создаваемого двумя катушками, но и за счет внешних полей каждой катушки. При этом если кромка нагревается главным образом за счет общего магнитного потока, то в целом зона нагрева определяется шириной индуктора над кромкой полосы при возможности регулирования ширины зоны нагрева путем выбора необходимого сдвига катушек относительно изделия при значительном упрощении всего нагревательного устройства и снижении его металлоемкости и хороших возможностях согласования с источником питания путем выбора числа витков катушек [80].

Предлагаемая конструкция индуктора [80] обеспечивает также возможность нагрева в продольном или в поперечном магнитном поле путем выбора соответствующих подключения или намотки катушек индуктора. При подключении катушек к двум источникам питания можно производить нагрев в смешанном поле, например, добавляя в поперечное магнитное поле составляющую продольного магнитного поля. Это приводит к расширению возможностей регулирования процессом нагрева [80].

Возможность регулирования ширины зоны нагрева дает возможность при установке по обе стороны обрабатываемого изделия двух индукторов с шириной индуктора над кромкой, равной практически половине ширины изделия, одновременно подогревать как кромки, так и основную массу изделия. Это позволяет отказаться от использования других индукторов для подогрева общей массы изделия [80].

Индуктор может дополнительно содержать П-образный магнитопровод, незамкнутые стороны которого расположены внутри спиралей индуктирующего провода [80].

Сущность изобретения [80] поясняется рис. 4.8



1 – спираль (катушка) индуктирующего провода; 2 – ось спирали индуктирующего провода; 3 – плоскость щели; 4 – П-образный магнитопровод; 5 – нагреваемая полоса металла; 6 – зазор между нагреваемой полосой и спиралью индуктора; 7 – сдвиг полосы в щели индуктора

Рисунок 4.8 – Схематическое изображение предлагаемого щелевого индуктора и расположения нагреваемой полосы металла [80]

Предлагаемое изобретение [80] является новым, так как в настоящее время не известны аналогичные щелевые индукторы, характеризуемые приведенной совокупностью признаков.

Основным отличием предлагаемого устройства является новое взаимное расположение элементов конструкции. Это отличие приводит к достижению указанного технического эффекта. Дополнительные отличия вариантов выполнения обеспечивают достижение дополнительных преимуществ [80].

Индуктор по изобретению [80] представляет собой две спирали 1 из витков индуктирующего провода, оси 2 которых параллельны плоскости 3 щели индуктора, а плоскости сечения – перпендикулярны плоскости 3. Приведенный вариант индуктора включает П-образный магнитопровод 4, вокруг незамкнутых ветвей которого расположены витки спиралей 1. Нагреваемая полоса металла 5 устанавливается в щели индуктора относительно спирали 1 с зазором 6 и сдвигом 7 относительно дальнего (удаленного от края полосы) конца спирали 1.

Таким образом, приведенные данные наглядно доказывают преимущества предлагаемого изобретения [80], суть которого поясняется следующими пунктами.

1. Щелевой индуктор, включающий две спирали индуктирующего провода, расположенные на расстоянии друг от друга по обе стороны от плоскости щели и электрически соединенные между собой, отличающийся тем, что оси спиралей индуктирующего провода расположены параллельно плоскости щели, а плоскости поперечного сечения спиралей ориентированы перпендикулярно плоскости щели [80].

2. Щелевой индуктор по п. 1, отличающийся тем, что витки спирали имеют овальную форму, длинные стороны которых ориентированы вдоль плоскости щели [80].

3. Щелевой индуктор по п. 1 или 2, отличающийся тем, что индуктор дополнительно содержит П-образный магнитопровод, незамкнутые стороны которого расположены внутри спиралей индуктирующего провода.

#### **4.2.3 Щелевой индуктор (С-образный)**

Изобретение относится к области индукционного нагрева, в частности к устройствам для индукционного нагрева кромок плоских изделий в поперечном магнитном поле. Изобретение может использоваться для нагрева кромок плоских изделий прямоугольного и со скругленными углами поперечного сечения, таких, например, как тонких слябов с толщиной 20...50 мм и полос подката в современных линиях "непрерывная разливка – непрерывная прокатка"; для нагрева кромок металлических лент в непрерывных линиях нанесения покрытий и в других тому подобных случаях, когда необходим нагрев кромок плоских длинномерных изделий с использованием индукционного нагрева.

Необходимость локального нагрева кромок плоских длинномерных изделий (полос, слябов, подката и т.п.) возникает в связи с тем, что в процессе изготовления при перемещении изделия от операции к операции возникает неравномерность распределения температуры по ширине вследствие более быстрого остывания кромок по сравнению с основной массой изделия. Это приводит к неравномерности свойств готового изделия. Особенно остро эта проблема стоит в области металлургии в станах непрерывного изготовления проката. В настоящее время наиболее эффективным средством ее решения признано применение дополнительного локального подогрева кромок между операциями с использованием индукционного нагрева с помощью различных типов щелевых индукторов как с продольным, так и с поперечным магнитным полем.

Главные достоинства такого индуктора – выделение мощности непосредственно на кромке полосы и возможность согласования его с источником питания путем выбора оптимального количества витков и отказа от дополнительного трансформатора.

Недостатками такого индуктора являются:

– обязательное наличие магнитопровода для получения достаточной электромагнитной связи между индуктором и металлом полосы, причем для получения большой мощности нагревателя магнитопровод должен быть массивным, иначе потери в нем могут вызвать местные перегревы и прогары; все это делает устройство достаточно сложным, тяжелым и металлоемким;

– необходимость строгого позиционирования индуктора относительно кромок полосы с достаточно небольшим зазором между полосой и торцами магнитопровода для достижения достаточно эффективного нагрева кромки.

Существенным недостатком данного индуктора является невозможность обеспечить неравномерность температурного поля по толщине (поперечному сечению) изделия, что ограничивает возможности регулирования распределе-

ния температуры по толщине.

При использовании такого индуктора для нагрева необходимо использовать достаточно высокую частоту тока, при которой глубина проникновения тока не превышала бы 2,5...3 толщины изделия, что ведет к существенному удорожанию источника питания. При неправильном выборе частоты резко снижается эффективность нагрева.

Задача, решаемая предлагаемым изобретением, – создание щелевого индуктора для нагрева кромок плоских изделий прямоугольного и со скругленными углами поперечного сечения (полосы, ленты, сляба и т.п.) конструктивно простого, компактного, более универсального.

Технический эффект, обеспечивающий решение задачи – возможность управления равномерностью нагрева кромки по толщине (поперечному сечению) изделия, то есть создание возможности управления распределением температурного поля по толщине полосы. Предлагаемое изобретение, пр. мне нию авторов [81], является новым, так как в настоящее время не известны щелевые индукторы, характеризующиеся приведенной совокупностью признаков.

Отличием предлагаемого изобретения от известного из уровня техники является электрическое соединение витков индуктора. Это отличие приводит к достижению указанного технического эффекта. Наличие магнитопроводов, расположенных с внешней стороны витков, дополнительно приводит к уменьшению тока индуктора, что приводит к уменьшению нагрева его при работе и улучшению электромагнитной связи между индуктором и металлом изделия. Как следствие, увеличивается КПД и улучшается коэффициент мощности индуктора [81]. Такой индуктор является более универсальным, так как позволяет решать более широкий круг технологических задач на одном и том же оборудовании (легко адаптируется к изменению технологической задачи).

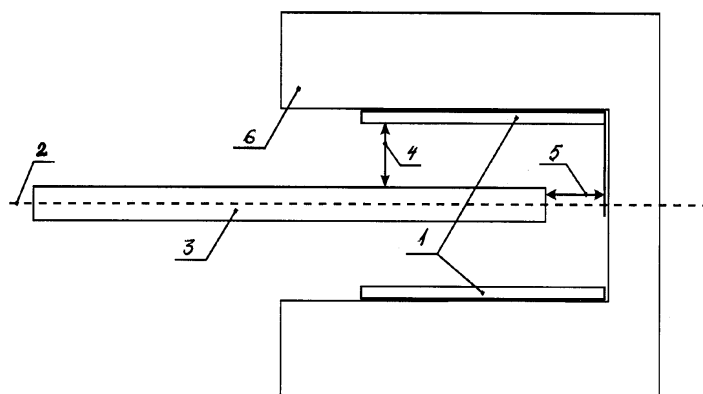
Сущность технического решения [81] поясняют рис. 4.9 – 4.11.

Индуктор (рис. 4.9) представляет собой два витка 1 индуктирующего провода, расположенных параллельно плоскости симметрии 2 щели индуктора и электрически параллельно соединенных между собой [81].

Нагреваемая полоса металла 3 располагается в щели индуктора с зазором 4 от витка с определенным сдвигом 5 относительно витка 1 индуктора. Магнитопроводы 6 расположены с внешней стороны витков 1 индуктора [81].

На рис. 4.10: 2а – кривая распределения мощности по ширине полосы при нагреве кромки в С – образном индукторе (аналог); 2б – кривая распределения мощности по ширине полосы при нагреве кромки в щелевом индукторе (прототип); 2в – кривая распределения мощности по ширине полосы при нагреве кромки в предлагаемом щелевом индукторе без магнитопровода [81].

При использовании в непрерывных линиях обработки металлических полос щелевой индуктор для подогрева кромок устанавливается, как правило, по ходу движения полосы по роликам рольганга после индукционного нагревателя, обеспечивающего подогрев общей массы металла изделия, например овального индуктора, и непосредственно перед устройством следующей операции обработки, например прокатным станом.



1 – виток индуктирующего провода; 2 – плоскость симметрии щели между витками; 3 – нагреваемая полоса металла; 4 – верхний зазор между полосой и витком индуктора; 5 – сдвиг между полосой и индуктором; 6 – магнитопровод

Рисунок 4.9 – Схематическое изображение предлагаемого щелевого индуктора и расположения нагреваемой полосы металла [81]

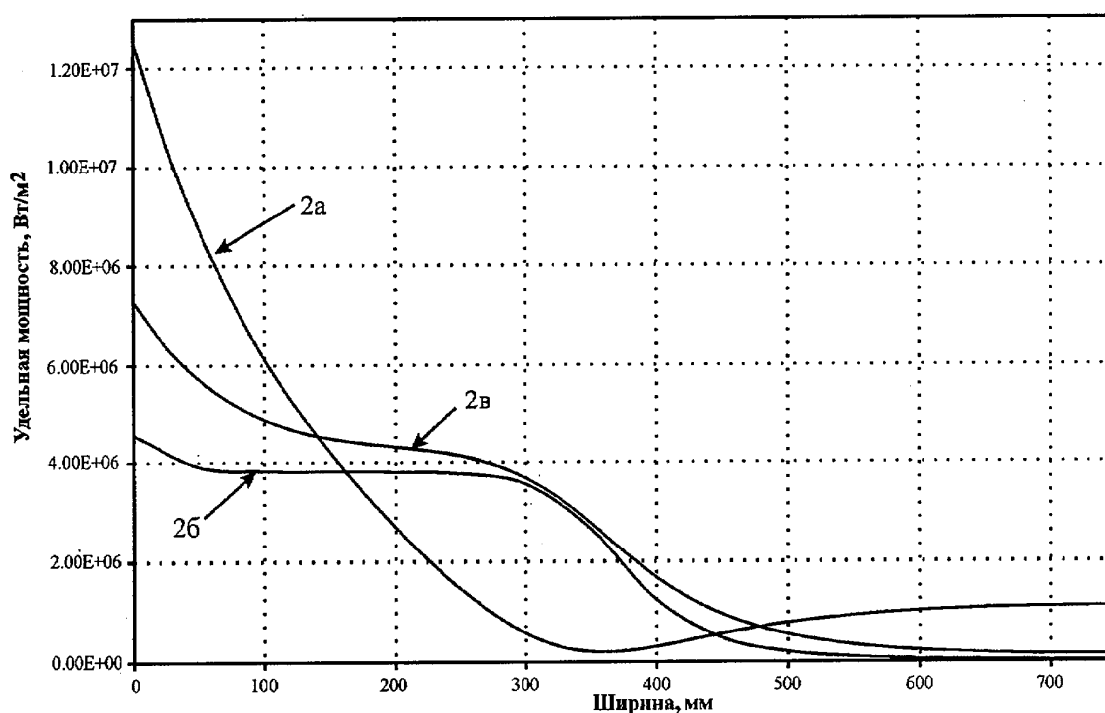


Рисунок 4.10 – Распределение удельной мощности по ширине заготовки для различных конструкции индукторов [81]

В зависимости от конкретных условий производства и свойств обрабатываемого металла выбираются [81]: взаимное расположение витков индуктора и обрабатываемой полосы, режимы нагрева, в том числе необходимая для выполнения поставленной задачи мощность. Как правило, скорость движения изделия определяется из условия получения необходимой производительности обрабатывающего оборудования [81].

На рис. 4.11: 3а – распределение удельной мощности по толщине при зазорах: верхний – 11 см, снизу – 3 см; 3б – распределение удельной мощности по толщине при зазорах: верхний – 9 см, снизу – 5 см; 3в – распределение удельной мощности по толщине при зазорах: верхний – 7 см, снизу – 7 см (расположение в плоскости 2 индуктора) [81].

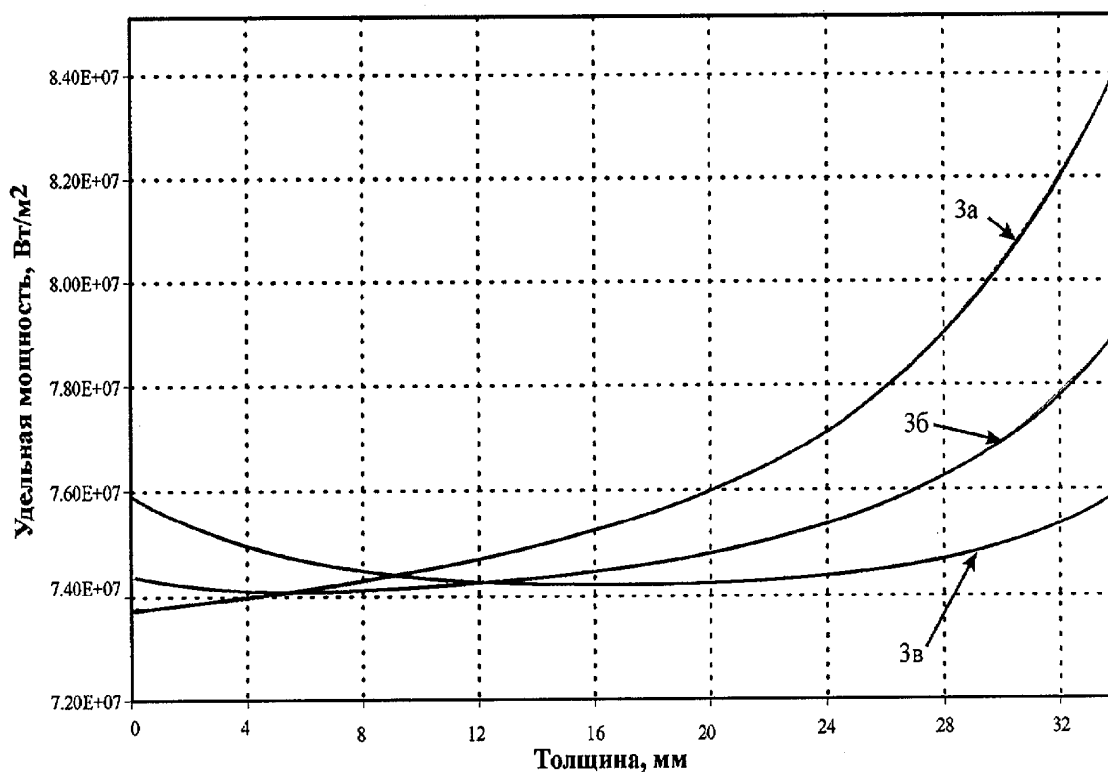


Рисунок 4.11 – Влияние разного зазора между верхним и нижним витком и заготовкой на распределение мощности по толщине заготовки при нагреве в индукторе [81]

На рис. 4.10 и рис. 4.11 приведены результаты [81], полученные при испытании предлагаемого индуктора в листопрокатном стане для подогрева кромки полосы подката стали шириной 1500 мм, толщиной 34 мм. Скорость движения полосы – 0,7 метров в секунду.

При мощности индуктора 2 МВт необходимо подогреть непосредственно кромку полосы на 70...80 °С. Кроме того, для обеспечения необходимого запаса энергии для последующей транспортировки к прокатному стану надо прогреть 200...300 мм кромки по длине полосы [81].

При сравнении трех видов индукторов при равных условиях по КПД и коэффициенту мощности ( $\cos \varphi$ ) получены приведенные в таблице 4.3 результаты [81]: индуктор по изобретению наиболее полно использует потребляемую мощность (наибольший КПД), то есть является более экономичным. При использовании магнитопровода КПД увеличивается на 3...5 %.

Таблица 4.3 – Сравнение различных индукторов

Тип индуктора	КПД, %	$\cos \varphi$
С-образный (аналог)	90,10	0,197
Щелевой (прототип)	73,71	0,065
Щелевой по изобретению	93,72	0,558

Приведенные данные наглядно доказывают преимущества предлагаемого технического решения [81], которые изложены в следующих пунктах:

1. Щелевой индуктор, включающий два одинаковых витка индуктирующего провода, расположенных параллельно на некотором расстоянии относительно друг друга и электрически соединенных между собой, отличающийся тем, что витки электрически соединены между собой параллельно [81].

2. Щелевой индуктор по п. 1, отличающийся тем, что дополнительно включает магнитопроводы, расположенные с внешних сторон витков [81].

### 4.3 Рациональные температурно-скоростные режимы прокатки полос на НШПГС

Повышение качества проката, получаемого в условиях непрерывных широкополосных станов горячей прокатки (НШСГП), является актуальной задачей в условиях рыночного производства. В соответствии с этим проанализировали возможность прокатки полос из малоуглеродистых сталей (подката для последующей холодной прокатки) с обратным температурным клином на НШСГП. Использование режимов прокатки с «обратным температурным клином» позволяет на 8...10 % уменьшить машинное время прокатки полос в чистой группе клетей НШСГП при обеспечении требуемых механических свойств по длине холоднокатаных полос [67–69].

Повышение производительности НШСГП при минимальных затратах также является актуальной задачей в условиях рыночного производства. В настоящее время НШСГП является узким местом в общей цепочке производства холоднокатаного проката. Дальнейшее увеличение объемов производства требует строительства новых НШСГП, либо использования имеющихся скрытых резервов увеличения производства. Одним из таких резервов является использование режимов прокатки с «обратным температурным клином» [67–69].

На всех высокопроизводительных НШСГП имеется проблема захлаживания заднего конца раската полосы на промежуточном рольганге. В результате температура конца прокатки по длине полосы снижается от переднего к заднему концу полосы. Образующийся «температурный клин» негативно влияет на распределение механических свойств проката по длине полосы [67, 82, 83].

Можно выделить два мнения о температурных режимах прокатки, исходя из результатов анализа работ [67–69, 82, 83].

Первое – температура конца прокатки по длине полос должна быть постоянной, что должно обеспечить одинаковую структуру по длине полос.

Для получения постоянной температуры конца прокатки по длине полосы прокатка в чистой группе клетей ведётся с ускорением. Ускорение устраняет «температурный клин» по длине полосы за счёт более интенсивной деформации подстуженного заднего конца раската и сокращения его времени прокатки.

Ускорение в пределах  $0,01 \dots 0,10 \text{ м/с}^2$  практически полностью выравнивает температуру конца прокатки по длине полосы. На ряде современных станов применяют большие величины ускорения ( $0,2 \dots 0,5 \text{ м/с}^2$  и выше), при этом для устранения «обратного температурного клина» (температура конца прокатки заднего конца полосы превышает температуру переднего) обеспечивают принудительное охлаждение полосы в межклетевых промежутках [67, 82, 83].

Второе мнение – на формирование структуры по длине полосы оказывает влияние не только сам температурный режим прокатки, но и процессы рекристаллизации, протекающие в межклетевых промежутках непрерывной группы. При постоянной температуре полосы и степени деформации в каждой клетке чистой группы, по мере увеличения скорости прокатки, время нахождения участков полосы в межклетевых промежутках непрерывной группы клетей сокращается от переднего к заднему концу полосы [67–69, 82, 83].

После деформации в клетке наклёпанная структура полосы рекристаллизуется. Процесс рекристаллизации начинается через некоторый промежуток времени после деформации –  $\tau_n$ . Полностью рекристаллизация завершается через некоторый больший промежуток времени после деформации –  $\tau_p$ . Временные интервалы начала и завершения рекристаллизации  $\tau_n$  и  $\tau_p$  зависят от величины наклёпа структуры и температуры металла [43, 84, 85].

Наклёпанная полоса находится в межклетевом промежутке некоторое время  $\tau_m$ , зависящее от скорости прокатки в данной клетке и расстояния до следующей клетки непрерывной группы:

$$\tau_m = \frac{L}{V}, \quad (4.14)$$

где  $L$  – расстояние до следующей клетки непрерывной группы;  
 $V$  – скорость прокатки в данной клетке.

На входе в следующую клетку материал полосы может быть:

– полностью рекристаллизован, если время нахождения в межклетевом промежутке достаточно для полной рекристаллизации ( $\tau_m \geq \tau_p$ );

– частично рекристаллизован, если времени недостаточно для полного завершения рекристаллизации ( $\tau_p > \tau_m \geq \tau_n$ );

– не рекристаллизован, если рекристаллизация не началась ( $\tau_n > \tau_m$ ).

На выходе из последней клетки непрерывной группы клетей при заданных режимах деформации и температуре конца прокатки формируется структура, обеспечивающая требуемые механические свойства материала полосы.

При прокатке с ускорением, по мере повышения скорости, длительность междеформационных пауз уменьшается, что приводит к изменению состоя-

ния структуры на входе в следующую клетку и на выходе стана. Особенно это актуально для последних межклетевых промежутков, при прокатке тонких и тончайших полос, когда температура металла существенно снижается, а время пауз между деформациями составляет доли секунды. Разная степень наклёпа отдельных участков по длине полосы приводит к разнотекучности после рекристаллизации [43, 84]. Разнотекучность обуславливает различие свойств по длине полосы, например, в соответствии с уравнением Холла-Петча [85]:

$$\sigma_T = \sigma_0 + kd^{-\frac{1}{2}}, \quad (4.15)$$

где  $\sigma_T$  – предел текучести;

$\sigma_0$  и  $k$  – константы, определяемые экспериментально;

$d$  – размер зерна.

Диаграмму рекристаллизации аустенита в координатах «температура-время» (при постоянной степени деформации полосы) можно представить в виде трёх областей, когда структура полностью или частично рекристаллизована, или нерекристаллизована [86].

Для получения одинаковой степени рекристаллизации по длине прокатываемой полосы (при сокращении времени междеформационной паузы при прокатке) температуру деформации следует повышать, то есть прокатку следует вести с повышением температуры по длине полосы, обеспечивающим постоянную по длине полосы степень рекристаллизации на входе, в последнюю клетку. Этого можно достичь применением ускорения, обеспечивающего «обратный температурный клин» на выходе из непрерывной группы клетек. Величина ускорения зависит от марки стали, толщины полосы, конструктивных особенностей промежуточного рольганга и чистовой группы стана [67–69].

Использование режима прокатки с «обратным температурным клином» позволяет сократить машинное время прокатки полосы, и, соответственно, повысить производительность стана. Однако имеющиеся математические модели не дают возможности оценить вклад процесса рекристаллизации в формирование структуры по длине полосы, поэтому необходимо проведение дополнительных исследований.

Возможность обеспечения равномерных по длине полосы механических свойств при использовании режима прокатки с «обратным температурным клином» оценивали по результатам экспериментальных исследований. Ниже представлены данные исследований, полученные в промышленных условиях авторами работ [67–69].

В соответствии с данными исследованиями для первого эксперимента был выбран металл, назначенный на холоднокатаный лист толщиной 0,8 мм категории вытяжки  $\Gamma$  из стали марки 08пс по ГОСТ 16523 объемом 6 рулонов с последующей термообработкой в колпаковых печах и порезкой на листы.

Первые три рулона плавки прокатаны с постоянной по длине полосы температурой конца прокатки ( $T_{кп}$ ) равной 850 °С и температуре смотки 670 °С. Ускорение чистовой группы при прокатке полос составляло 0,025 м/с<sup>2</sup>.

Остальные три рулона прокатаны с «обратным температурным клином», то есть. повышением  $T_{\text{кп}}$  от переднего конца к заднему концу полосы. Увеличение  $T_{\text{кп}}$  на  $40^\circ \text{C}$  достигнуто использованием большего ускорения, чем при прокатке с постоянной  $T_{\text{кп}}$  по длине полосы. Ускорение чистовой группы увеличили в  $3...3,5$  раза и при прокатке опытных полос оно составляло  $0,080...0,095 \text{ м/с}^2$ .

По результатам горячей прокатки выбраны два рулона в качестве контрольных. Рулон А прокатан по режиму прокатки с постоянной  $T_{\text{кп}}$  по длине полосы, а второй (Б) – по опытному режиму. На этих рулонах проводилось сравнение режимов обработки, и в последующем отбирались пробы для определения механических свойств металла.

Выполняли сравнение температурного и скоростного режимов прокатки контрольных рулонов. Время прокатки рулона А массой 25,68 т составило 81 с. При использовании опытного режима время прокатки рулона Б массой 25,62 т составило 73 с. Соответственно, при использовании опытного режима сокращение машинного времени прокатки в чистовой группе клетей составило 10,7 %. Температурный и скоростной режимы прокатки контрольных рулонов представлены на рис. 4.12.

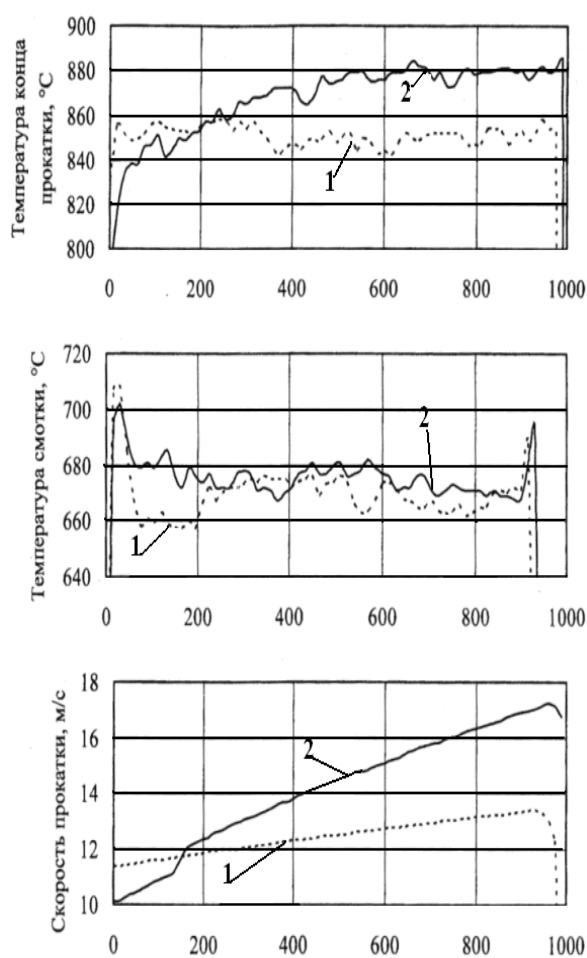
На непрерывном травильном агрегате от концов и середины полос контрольных рулонов отобраны пробы для проведения механических испытаний. Как следует из результатов испытаний, механические свойства проката с «обратным температурным клином» более равномерны по длине полосы и металл более пластичен. Предел текучести металла заднего конца полосы, прокатанной с «обратным температурным клином», ниже на 20 МПа и временное сопротивление разрыву ниже на 30 МПа по сравнению со свойствами полосы, прокатанной с постоянной  $T_{\text{кп}}$  [68, 69].

После травления, холодной прокатки, отжига в колпаковых печах и дроссировки рулоны порезаны на листы на агрегате поперечной резки. От каждой контрольной полосы отобраны по пять проб по длине полосы. Результаты механических испытаний металла приведены на рис. 4.13. По результатам испытаний механические свойства холоднокатаного металла, прокатанного с «обратным температурным клином», более равномерны по длине полосы и металл более пластичен. Предел текучести металла, прокатанного по опытному режиму, составляет 200...215 МПа, а у металла с постоянной  $T_{\text{кп}}$  по длине полосы – 215...240 МПа. Аналогично и по относительному удлинению – соответственно, 34...40 % и 32...36 %. Штампуемость стали, оцениваемая по испытанию на выдавливание лунки, также выше: соответственно, 10,4...10,5 мм и 10,3...10,4 мм [68, 69].

Весь опытный металл удовлетворяет требованиям заказа. Для проката глубокой вытяжки группы прочности К270В (ГОСТ 16523–97) временное сопротивление разрыву должно составлять 270–410 Н/мм<sup>2</sup>, относительное удлинение – не менее 25 %, а глубина лунки при испытании на выдавливание не менее 9,5 мм.

Для второго эксперимента выбрана партия металла из стали марки 08Ю объемом 6 рулонов одной плавки с назначением на холоднокатаный лист толщиной 0,75 мм категории вытяжки СВ и I группы отделки поверхности по ГОСТ 9045 с отжигом в колпаковых печах.

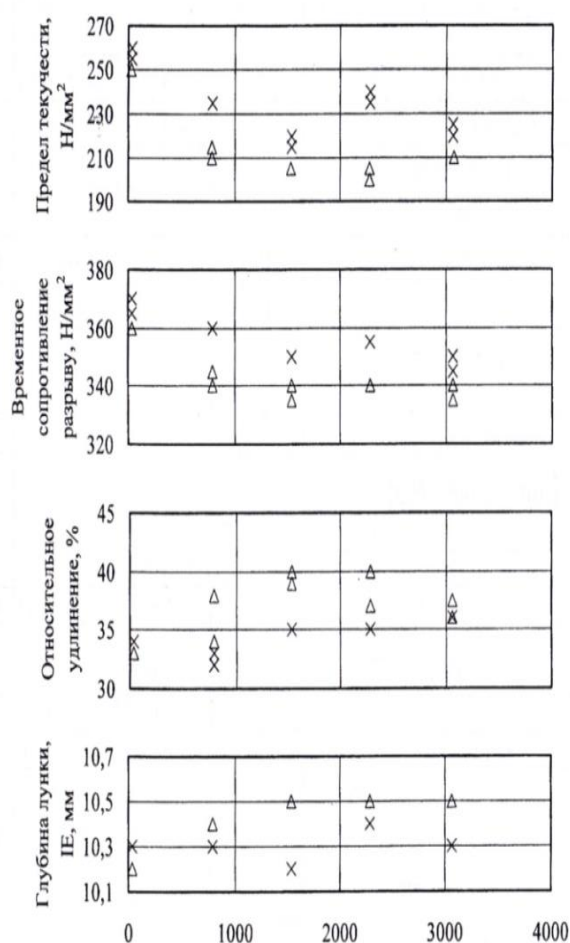
Первые три рулона прокатаны с постоянной по длине  $T_{кп}$ . Заданная температура конца прокатки составляла  $840^{\circ}\text{C}$ , а температура смотки –  $560^{\circ}\text{C}$ . Ускорение чистовой группы при прокатке полос составляло  $0,032\text{ м/с}^2$ . Остальные три рулона прокатаны с «обратным температурным клином». Увеличение  $T_{кп}$  по длине полос на  $30^{\circ}\text{C}$  достигнуто использованием большего ускорения, чем при прокатке, когда требуется обеспечить постоянную температуру конца прокатки по длине полосы. Ускорение чистовой группы составляло  $0,060 \dots 0,076\text{ м/с}^2$ .



Длина полосы, м

1 – рулон А; 2 – рулон Б (опытный режим прокатки)

Рисунок 4.12 – Температурный и скоростной режимы прокатки контрольных рулонов полос сечением (по данным Ю. А. Мухина и соавторов)



Длина полосы, м

x – рулон А; Δ – рулон Б (опытный режим прокатки)

Рисунок 4.13 – Механические свойства холоднокатаной отожженной полосы сечением 0,8x1270 мм (по данным Ю. А. Мухина и соавторов)

Время прокатки рулона, прокатанного по обычной технологии, массой 23,5 т составило 83 с. При использовании опытного режима время прокатки рулона массой 22,0 т составило 71 с. Соответственно, при использовании опытного режима сокращение машинного времени прокатки в чистовой группе клетей составило 8,6 %.

Рекристаллизационный отжиг холоднокатаной полосы толщиной 0,75 мм проведен в колпаковых печах. От каждой контрольной полосы на агрегате поперечной резки отобраны по четыре пробы по длине полосы. По механическим свойствам весь металл удовлетворяет требованиям ГОСТ 9045: предел текучести не более 205 Н/мм<sup>2</sup>, временное сопротивление разрыву 250...380 Н/мм<sup>2</sup>, относительное удлинение не менее 34 %, твердость не более 78 HR 15 T, глубина лунки при испытании на выдавливание не более 10,0 мм. Следует отметить, что металл, прокатанный по опытному режиму, более пластичен.

Обобщая результаты, полученные Ю. А. Мухиным с соавторами, можно отметить, что для холоднокатаного металла из малоуглеродистой стали при использовании режимов горячей прокатки полос с «обратным температурным клином» характерно следующее:

- механические свойства холоднокатаного проката из стали марки 08Ю и 08пс удовлетворяют требованиям соответственно ГОСТ 9045–93 и ГОСТ 16523–97;

- по длине полос механические свойства стабильны;

- снижение машинного времени прокатки составляет 8...10 %.

#### **4.4 Оборудование и технологические режимы прокатки широких полос на НШСГП 1700**

##### **4.4.1 Характеристика оборудования НШСГП 1700**

Стан 1700 ЧАО «ММК » (г. Мариуполь) – непрерывный широкополосный стан горячей прокатки, введенный в эксплуатацию в 1960 г. Цех был спроектирован на производство 3,6 млн. т в год горячекатаных рулонов и листов толщиной от 2,0 до 8,0 мм и шириной от 1000 до 1540 мм из углеродистых и низколегированных марок стали. В настоящее время освоена минимальная толщина полос, составляющая 1,5 мм, а также ведутся работы по освоению технологии получения горячекатаных полос толщиной 1,2 мм.

Первоначально цех имел в своем составе пять методических толкательных нагревательных печей 1 (рис. 4.14), черновую группу, состоящую из пяти клетей 2, летучие ножницы 3, чистовую группу, имеющую в своем составе окалиноломатель и шесть рабочих клетей 4, отводящий рольганг с системой дублирования 5 и три моталки 6 грузоподъемностью до 9 т [87]. В последние годы для НШСГП 1700 спроектирована и установлена моталка грузоподъемностью 15 т. Оборудование стана вплоть до 90-х годов эксплуатировалось без существенной модернизации. В 1993 году была проведена реконструкция чистовой группы клетей с установкой систем «Клесим».

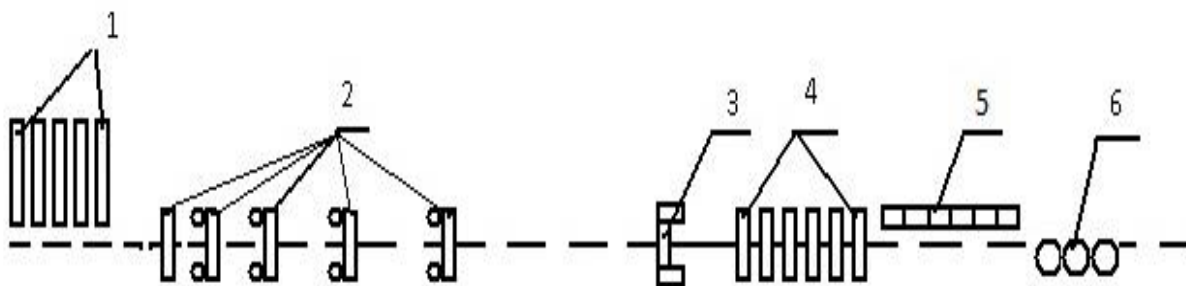


Рисунок 4.14 – Последовательность расположения основного оборудования стана 1700 ЧАО «ММК ИМЕНИ ИЛЬИЧА»

К настоящему времени многие технологические процессы, в частности нагрев металла, настройка оборудования, контроль и управление технологическим процессом не отвечают современным критериям. Изменились и требования рынка горячекатаного металла в части [16–23, 26–29, 82–83]:

- уменьшения минимальной толщины полос до 1,5 мм и менее;
- увеличения потребности проката из низколегированных марок сталей;
- ужесточения требований к качеству металлопродукции;
- увеличения массы рулона

Так, если ранее потребителей вполне устраивали рулоны массой 5...8 т, то сегодня для многих потребителей, требующих рулоны массой от 16 т и выше, приходится поставлять маловесные рулоны со значительной потерей в цене.

Существенным изменениям подверглась и структура рынка сбыта металлопроката – если до распада СССР на экспорт отгружалось не более 25 % продукции НШСГП 1700, то в настоящее время около 90 % проката отгружается на внешний рынок. Поэтому для выпуска конкурентоспособной высокорентабельной продукции, отвечающей всем требованиям внешнего рынка, необходима модернизация НШСГП 1700.

Участок отделки НШСГП 1700 имеет в своём составе [87]:

- два агрегата поперечной резки для порезки рулонов на листы толщиной 1,2–4,0 мм (АПР-1) и 4,0–8,0 мм (АПР-2), состоящих из приёмного конвейера, кантователя рулонов, поворотного стола, сбрасывателя, отгибателя концов, разматывателя, пятироlikовой и одиннадцатироlikовой правильных машин, петлеобразующего устройства, летучих ножниц и листоукладчиков;
- агрегат продольной резки рулонов (АПР-3) толщиной 1,2...6,0 мм, состоящих из приёмного конвейера, кантователя рулонов, сбрасывателя, отгибателя концов, разматывателя, наклонного стола, гильотинных ножниц с нижним резом для обрезки концов, дисковых ножниц с кромкокрошителями и намоточного устройства;
- участок отгрузки металла в рулонах, склад.

Краткая техническая характеристика основного оборудования НШСГП 1700 приведена в табл. 4.4 – 4.7.

Таблица 4.4 – Характеристика рабочих клеток

Наименование клетки	Тип клетки	Диаметр рабочих валков, мм	Диаметр опорных валков, мм	Максимальный раствор валков, мм	Главный электродвигатель	
					Мощность, кВт	Число оборотов
Черновой окалиноломатель	дуо	900...810	–	250	4000	600
№1	кварто	1020...900	1500...1250	200	9000	—   —
№2	—   —	1020...900	1500...1250	200	9000	—   —
№3	—   —	880...810	1300...1170	150	7000	110...240
№5	—   —	675...625	1325...1220	—   —	7000	175...330
№6	—   —	—   —	—   —	—   —	8000	110...240
№7	—   —	—   —	—   —	—   —	—   —	—   —
№8	кварто	675...625	1325...1220	150	8000	110...240
№9	—   —	692...676	—   —	—   —	—   —	175...330
№10	—   —	705...692	—   —	—   —	5000	—   —

Таблица 4.5 – Техническая характеристика моталок

Наименование параметра	№1–3
Максимальная масса рулона, т	9
Диаметр барабана, мм	700
Длина барабана, мм	2350
Диаметр тянущих роликов, мм	
верхний	900
нижний	500
Длина бочки тянущих роликов, мм	1700
Диаметр формирующих роликов, мм	300

Таблица 4.6 – Техническая характеристика листопривальной машины

Наименование	Размерность	Значение	
		№1	№2
Количество роликов	шт	5	11
Мощность двигателя	кВт	400	400
Диаметр роликов	мм	215	115
Число оборотов двигателя	об/мин	1000	1000
Толщина листа	мм	до 4	до 12

Таблица 4.7 – Техническая характеристика порезочных агрегатов

Наименование параметра	АПР-1	АПР-2	АПР-3
Назначение	Порезка рулонов на листы		Продольная резка рулонов
Максимально допустимое временное сопротивление разрезаемого металла, Н/мм <sup>2</sup>	735	735	735
Толщина листов, мм	1,2...4,0	4,0...8,0	1,2...6,0
Ширина рулонов (листов), мм	1000...1500	1000...1500	1000...154
Ширина полос, мм	–	–	180...700
Длина листов, мм	2000...6000	4000...6000	–
Диаметр рулонов, мм внутренний внешний	–	–	720...780 900...1350
Система мерного пореза основная резервная	механическая механическая	микропроцессорная электронная	... ...
Наименование параметра	АПР-1	АПР-2	АПР-3
Назначение	Порезка рулонов на листы		Продольная резка рулонов
Дисковые ножницы: скорость резания, м/сек мощность двигателя, кВт максимальное усилие реза, кН Диаметр барабана моталки, мм	... ... ... ...	... ... ... ...	0,7...2,5 290 460 750

#### 4.4.2 Разработка режима деформации полосы размером 1,8x1260 мм

Ниже рассмотрен технологический процесс и разработан режим деформации полосы сечением 1,8x1260 мм с учетом возможной реконструкции НШСГП 1700 ЧАО «ММК ИМЕНИ ИЛЬИЧА»: установки в черновой группе реверсивных универсальных клетей №№ 1 и 2.

В качестве исходной заготовки предполагается использовать слябы МНЛЗ массой до 30 т. Со склада слябы подаются грузоподъемным краном на загрузочные тележки, которые транспортируют их к подъемным столам, слябы по одному сталкиваются на рольганг, взвешиваются на весах и загружаются в печь. Нагретые до температуры 1180...1250 °С слябы выдаются из печи и укладываются на приемный рольганг, по которому направляются к черновой группе стана.

Нагретые слябы подаются к черновому окалиноломателю и далее к универсальным реверсивным клетям «кварто» №№ 1, 2. В указанных клетях сляб за три прохода через две клетки прокатывается в подкат толщиной 25...45 мм. Во время черновой прокатки предусматривается возможность гидросбива окалины. Обжатие в вертикальных валках черновых универсальных клеток принимается таким, чтобы компенсировать уширение металла, возникающее при прокатке в горизонтальных валках.

После прокатки в черновой группе подкат по промежуточному рольгангу поступает в чистовую группу стана, температура подката составляет 1030...1120° С (меньшее значение температуры соответствует меньшей толщине подката). Перед чистовой группой имеются летучие ножницы для обрезки переднего и заднего концов подката, что необходимо для уменьшения динамических нагрузок при захвате и стабилизации процесса прокатки.

Передний и задний концы проката в большинстве случаев вытянуты в виде «языка» или «хвоста», они имеют пониженную температуру. Основная причина получения «языка» или «хвоста» – не прямоугольная форма сляба или неточная задача сляба в одну из черновых клеток [8, 82, 83]. В непрерывной группе «язык» и «хвост» могут оставлять отпечатки на валках, а также приводить к простоям стана.

После обрезки концов подкат направляется в чистовую группу. Окончательная прокатка до заданной толщины проводится в клетях чистовой группы, где полоса находится одновременно во всех или нескольких клетях (при прокатке переднего и заднего концов полосы). В клетях непрерывной группы прокатка ведётся с натяжением, которое обеспечивает устойчивость процесса прокатки и некоторое уменьшение расхода энергии в результате уменьшения сил трения на контактных поверхностях [8, 82, 83].

Необходимым условием стабильной прокатки в чистовой группе является постоянство секундных объёмов металла по клетям [8, 82, 83]. После выхода полосы из непрерывной группы она транспортируется отводящим рольгангом к моталкам. На отводящем рольганге полоса охлаждается на 200...250 °С в зависимости от марки стали и требуемых механических свойств. Перед задачей в моталку полоса центрируется, а затем сматывается с натяжением в плотный рулон. Рулон снимается с барабана моталки и после кантовки в вертикальное положение устанавливается на цепной транспортёр; после прокатки рулоны и направляются по межцеховым подземным конвейерам в цех холодной прокатки или в отделение отделки горячекатаных рулонов.

В отделении отделки полосы разрезают на листы на агрегатах поперечной резки №1 и №2, сортируют в линии агрегатов резки или на стеллажах в зависимости от требований заказа и состояния поверхности. На агрегате продольной резки АПР №3 рулоны распускают на штрипс требуемой ширины. Далее после правки на роликотправильных машинах листы при помощи листоукладчика набирают в пакеты массой до 15 т, упаковывают и отправляют на склад готовой продукции.

Возможность прокатки на НШСГП 1700 полос толщиной, которая меньше проектной толщины, может быть обеспечена за счет применения двухклетевой реверсивной черновой группы; при этом также сокращаются длина технологической линии стана и цикл прокатки в черновой группе клеток. Расчет режима деформации сляба в двухклетевой реверсивной черновой группе клеток производили на основе работ [8, 82, 83].

Ширину сляба  $B_{сл}$  определяли как:

$$B_{сл} = v_n + (0...50) \text{ мм} \quad , \quad (4.16)$$

где  $v_n$  – требуемая ширина полосы.

Суммарное обжатие  $\Delta h_{\Sigma}$ , а также распределение его между черновой  $\Delta h_{\Sigma_{черн}}$  и чистовой  $\Delta h_{\Sigma_{чист}}$  группами клеток устанавливали так:

$$\begin{aligned} \Delta h_{\Sigma} &= H_{сл} - h_n; \\ \Delta h_{\Sigma_{черн}} &= (0,8 - 0,9)\Delta h_{\Sigma}; \\ \Delta h_{\Sigma_{чист}} &= (0,1 - 0,2)\Delta h_{\Sigma}, \end{aligned} \quad (4.17)$$

где  $H_{сл}$  – толщина сляба;

$h_n$  – требуемая толщина полосы.

В большинстве случаев суммарная деформация в черновых клетях составляет 85 % и более, а при прокатке наиболее тонких полос ( $h \leq 1,4$  мм) достигает 90 % [8, 82, 83].

Толщину подката, направляемого в чистовую группу клеток, определяли как:

$$H_{черн} = H_{сл} - \Delta h_{\Sigma_{черн}} \quad (4.18)$$

После определения обжатий  $\Delta h_{\Sigma_{черн}}$  и  $\Delta h_{\Sigma_{чист}}$  каждой  $n$ -ой клетки НШСГП 1700 определяли:

– толщину полосы в каждом проходе:

$$h_{n-1} = h_n \cdot \eta_n \quad (4.19)$$

где  $h_{n-1}$ ,  $h_n$  – толщина полосы до и после прохода, соответственно;

$\eta_n$  – коэффициент обжатия в длинном проходе;

– абсолютное обжатие:

$$\Delta h_n = h_{n-1} - h_n \quad (4.20)$$

– угол захвата:

$$\alpha_n = \sqrt{\frac{\Delta h_n}{R_p}} \quad (4.21)$$

где  $R_p$  – радиус рабочих валков.

Уширение в черновых клетях имеет свои особенности, связанные с наличием вертикальных валков. При обжати по ширине полосы в вертикальных валках на широких гранях полосы вблизи боковых кромок образуются напльвы, которые при последующем обжати горизонтальными валками перейдут в уширение. Таким образом, уширение, полученное полосой при прокатке в горизонтальных валках, можно представить как сумму естественного  $\Delta v_e$  и дополнительного  $\Delta v_o$  уширения, обусловленного обжатием напльвов. При этом, расчет уширения при прокатке в клетях черновой группы выполняли по методике, разработанной Н. А. Карнаушенко и дополненной А. В. Васекиным.

В соответствии с указанной методикой при ширине полос 600...1800 мм и  $0,7 \leq (h_{cp}/l_o) \leq 8$  ( $h_{cp}$  – средняя толщина полосы,  $l_d$  – длина очага деформации) естественное уширение с достаточной степенью точности может быть подсчитано по формуле:

$$\Delta v_e = K_{np} \cdot \Delta h_r, \quad (4.22)$$

где  $\Delta h_r$  – абсолютное обжатие в горизонтальных валках;

$K_{np}$  – коэффициент приведенного уширения, значение которого может быть найдено по формуле, предложенной Н. А. Карнаушенко и уточненной А. В. Васекиным:

$$K_{np} = \left[ 990B^{0,14} - 1,22 \frac{B^{1,12}}{\Phi_h'} + 8,94 \frac{B^{0,8}}{\Phi_h'} - \frac{3e^{(-3+\Phi_h)}}{\Phi_h^{-5,4}} \right] \cdot 10^{-4}, \quad (4.23)$$

где  $B$  – ширина раската перед пропуском;

$$\Phi_h = h_{cp}/l_g$$

При прокатке полосы размерами 1,8x1260 мм в последнем пропуске черновой группы клетей величина соотношения  $h_{cp}/l_o$  согласно расчетным данным получается менее 0,7 (см. табл. 4.8), что не позволяет пользоваться формулой (4.22). Поэтому в случаях, когда не соблюдалось соотношение  $h_{cp}/l_o \geq 0,7$  расчет абсолютного уширения осуществляли по методике Д. И. Старченко:

$$\Delta v_e = \frac{\Delta h}{2\sqrt{Hh}} \left[ \sqrt{R_p \cdot \Delta h_r} - \frac{\Delta h_r}{2f_y} \right]. \quad (4.24)$$

где  $H, h$  – это величина полосы до и после пропуска;

$f_y$  – коэффициент трения в установившемся процессе прокатки.

Дополнительное уширение  $\Delta v_o$  зависит от размера предварительного обжати в вертикальной клетке  $\Delta h_v$ , коэффициента обжати в горизонтальной клетке  $\eta_r$  и отношения средней ширины раската  $v_{cp}$  к его средней толщине  $H_{cp}$  в вертикальной клетке. Дополнительное уширение определяли в соответствии с методикой Н. А. Карнаушенко:

$$\Delta v_{\delta} = K_{\delta} \cdot \eta_{\Gamma} \cdot \Delta h_{\delta}. \quad (4.25)$$

где  $K_{\delta}$  – коэффициент дополнительного уширения равный:

$$K_{\delta} = 0,51 - \frac{0,5}{\left(\frac{v_{cp}}{H_{cp}}\right)} - \frac{0,12}{\left(\frac{v_{cp}}{H_{cp}}\right)^2}, \quad (4.26)$$

где  $v_{cp}$  – средняя ширина раската при обжатии в вертикальных валках;

$H_{cp}$  – толщина раската перед вертикальными валками.

С целью обеспечения более равномерного распределения температуры и, следовательно, показателей механических свойств по ширине раската перед чистой группой клетей НШСГП 1700 следует предусмотреть индукционный подогреватель кромок подката, возможные конструкции которого рассмотрены в подразделе 4.2 и Приложении А.

При разработке технологии прокатки на НШСГП важным вопросом является уменьшение продольной разнотолщинности горячекатаных полос. Точность продольного профиля полос, прокатываемых на существующих НШСГП, зависит от постоянства условий процесса прокатки. Любые изменения технологических параметров приводят к изменению величины силы прокатки, межвалкового зазора и толщины полосы по длине [8, 82, 83, 88].

В табл. 4.8 приведены результаты расчета режима обжатий в черновой группе клетей. При этом, принимая во внимание данные работ [8, 82, 85], для чистой группы клетей разработали затухающий режим обжатий, результаты расчета которого сведены в табл. 4.9 ( $K_{zd}$  – коэффициент затухания деформации).

Фундаментальные исследования по уменьшению продольной разнотолщинности горячекатаных полос были проведены под руководством профессора Ю. В. Коновалова. Его разработки были положены в основу совершенствования технологии прокатки на ряде НШСГП. Для повышения продольной точности полос применяются различные системы автоматического регулирования, технологические методы и устройства, рассмотренные в работах [8, 82, 83, 88] и позволяющие в определенной степени уменьшить продольную разнотолщинность. Однако, полностью устранить негативное влияние температурного перепада по длине прокатываемой полосы, а также отсутствия при прокатке концов полосы полного натяжения не представляется возможным.

Вследствие сказанного толщина заднего конца полосы оказывается на  $\delta h_n = 0,05 \dots 0,25$  мм больше номинальной толщины ( $\delta h_n$  – продольная разнотолщинность). Продольная разнотолщинность на остальных локальных участках (передний конец полосы, участок глиссажных меток, колебания температуры и механических свойств металла, биение валков) существенно меньшая и составляет  $\delta h_n = 0,02 \dots 0,12$  мм [82, 88].

Таблица 4.8 – Режим обжатый в черновой группе (подкат для полосы размером 1,8x1260 мм)

Математическая операция или параметр	Номер клетки и прохода						
	0К	1	2	2	1	1	2
	1	2		3		4	
1	2	3	4	5	6	7	8
$H$ , мм	233	213	169,7	131,2	98,5	71,8	50,8
$\eta$ , мм	1,094	1,255	1,293	1,332	1,372	1,413	1,455
$h = H / \eta$	213	169,7	131,2	98,5	71,8	50,8	35
$\Delta h = H - h$ , мм	20	43,3	38,5	32,7	26,7	21	15,8
$\Delta h_e$ , мм	0	60	55	25	14	10	5
$D_k$ , мм	810	900	900	900	900	900	900
$f = 0,4$	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
$h_{cp} / l_\partial$	2,5	1,37	1,15	0,94	0,78	0,63	0,51
$\Delta \vartheta_e$ , мм	3	6	6	6	7	12	12
$\Delta \vartheta_\partial$ , мм	0	33	32	0	16	16	4
$\Delta \vartheta = \Delta \vartheta_e + \Delta \vartheta_\partial$ , мм	3	39	38	6	23	28	16
$B$ , мм	1316	1259	1243	1256	1248	1261	1284
$\vartheta = B + \Delta \vartheta$ , мм	1319	1298	1281	1262	1271	1289	1300
$\alpha$ , рад	0,222	0,31	0,292	0,27	0,244	0,216	0,187
$\varepsilon = \Delta h / H$	0,09	0,2	0,23	0,25	0,27	0,29	0,31

Таблица 4.9 – Режим обжатый в чистовой группе (полоса 1,8x1260 мм)

Математическая операция или параметр	Номер клетки						
	3	5	6	7	8	9	10
$K_{3\partial}$	—	0,87	0,87	0,87	0,87	—	—
$H$ , мм	35	15,8	8,2	4,9	3,4	2,7	2,14
$\eta$	2,22	1,931	1,679	1,46	1,27	1,262	1,189
$h = H / \eta$ , мм	15,8	8,2	4,9	3,4	2,7	2,14	1,8
$\Delta h = H - h$ , мм	19,2	7,6	3,3	1,5	0,7	0,56	0,34
$D_k$ , мм	810	675	675	675	675	690	705
$\vartheta$ , мм	1300	1300	1300	1300	1300	1300	1300
$\alpha$ , рад	0,218	0,15	0,099	0,067	0,046	0,04	0,031
$\varepsilon = \Delta h / H$	0,55	0,48	0,4	0,31	0,21	0,18	0,16

Продольная разнотолщинность полос и листов – есть разница между толщиной полосы на утолщенном участке ( $h_k$ ) и номинальной (минимальной) фактической толщиной ( $h_n$ ) (рис. 4.15) и рассчитывается как [82, 88]:

$$\delta h = h_k - h_n. \quad (4.27)$$

Снижение продольной разнотолщинности полос на НШСГП 1700 может быть достигнуто за счет [8, 82, 83, 88]:

- а) выбора рациональной жесткости клеток;
- б) рационального выбора обжатий по клетям
- в) использования предварительно напряженных клеток и системы автоматического реулирования толщины (САРТ) полосы.

Рациональная жесткость клетки определяется сортаментом прокатываемых полос, требованиями к их точности (продольной разнотолщинности), а также условиями прокатки (температурным режимом валков, их биением). При прокатке полос большой толщины, где абсолютные допуски на толщину сравнительно большие (при горячей прокатке), увеличение жесткости клетки снижает продольную разнотолщинность. И, напротив, при прокатке или дрессировке тонких полос, где доля влияния эксцентриситета валков в абсолютном значении допуска на толщину составляет значительную величину, повышение жесткости клетки приводит к увеличению продольной разнотолщинности [8, 82, 83, 88]. Возможные варианты распределения относительных обжатий по клетям тонколистовых станов представлены на рис. 4.16 [8], откуда следует целесообразность использования в условиях прокатки на НШСГП нарастающе-затухающего режима деформации.

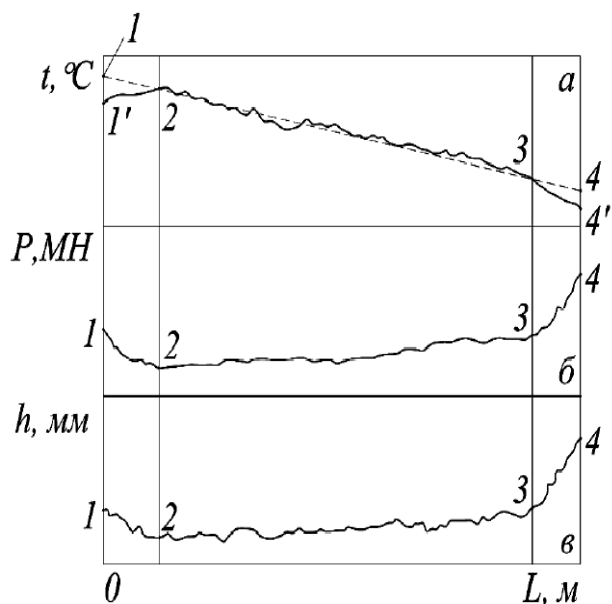


Рисунок 4.15 – Изменение температуры (а), силы прокатки (б) и толщины (в) по длине полосы [88]

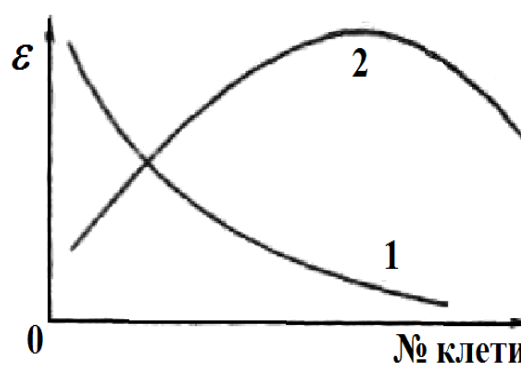


Рисунок 4.16 – Рациональное распределение обжатий при горячей 1 и холодной 2 прокатке с точки зрения максимального уменьшения продольной разнотолщинности [8]

Оптимальные режимы обжатий полос и листов при горячей и холодной прокатке можно рассчитывать по разным критериям оптимальности, например, по равномерной загрузке оборудования (равным силам прокатки, равной нагрузке двигателей по проходам), минимальному расходу энергии, получению минимальной разнотолщинности и т. д. [8, 82, 83, 88]. При заданной исходной и конечной толщине полосы суммарное обжатие, известно, и расчет оптимального режима обжатий по критерию получения минимальной разнотолщинности сводится к рациональному распределению обжатий по клетям для непрерывного стана. Как следует из рис. 4.16, для снижения продольной разнотолщинности холоднокатаных полос целесообразно снижение обжатий по ходу прокатки.

#### **Выводы по разделу 4**

1. Выполнена оценка неравномерного охлаждения горячекатаных полос по длине на основе результатов исследований, полученных учеными Липецкого государственного университета (ЛГУ). Согласно данным исследования вводится допущение равномерного охлаждения полосы до черновой клетки широкополосного стана горячей прокатки. Для расчетов охлаждения полосы между черновой и чистовой группой клетей расчет проводят по конечно-разностной модели. Это позволяет минимизировать время машинных расчетов для определения неравномерности распределения температур по длине и ширине полосы при прокатке с удовлетворительной точностью.

2. Для обеспечения равномерного распределения температур по ширине полосы, и, следовательно, для равномерного распределения механических свойств проката, подтверждена целесообразность индукционного подогрева полосы перед чистовой клетью и выбран ряд устройств и способов для реализации электротермического подогрева кромок подката. Среди выбранных способов и устройств наиболее простым в техническом исполнении и рациональным вариантом является использование группы целевых индукторов между черновыми и чистовыми клетями широкополосного стана.

3. На основе результатов исследований ученых ЛГУ проведена оценка прокатки полос на широкополосных станах с «обратным температурным клином», установлено, что технология прокатки с «обратным температурным клином» обеспечивает требуемые металлографические показатели материала проката и приемо-сдаточные свойства готовой металлопродукции.

4. Применительно к НШСГП 1700 разработан режим обжатий при прокатке полосы сечением 1,8x1260 мм с индукционным подогревом кромок полосы. Использование предложенных технологических усовершенствований и рекомендаций позволит обеспечить повышение комплекса показателей качества готового металлопроката сортамента НШСГП 1700 ЧАО «ММК ИМЕНИ ИЛИЧА».

## **5 УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЙ ТОНКОЛИСТОВОЙ ПРОКАТКИ НА НЕПРЕРЫВНЫХ ШИРОКОПОЛОСНЫХ СТАНАХ**

### **5.1 Уточнение методики расчета тепловых потерь металла на непрерывных станах горячей прокатки**

Требования рынка по расширению сортамента горячекатаных рулонов обуславливает необходимость в освоении новых технологий прокатки на широкополосных станах, таких как 1680 ЧАО «ЗАПОРОЖСТАЛЬ» и 1700 ЧАО «ММК ИМЕНИ ИЛЬИЧА». Проектирование технологии, перед её реализацией на существующем оборудовании, и определение узких мест, возможно с помощью инструментов математического моделирования технологического процесса, важной составляющей которого является расчет температурного режима прокатки. Разработка такого инструмента, с учетом особенностей оборудования стана 1680 и стана 1700, позволит оценить их технические возможности и расширить сортамент, в том числе производимый по технологии ТМСР (Thermo-Mechanical Control Process).

Моделирование температурного режима горячей прокатки широко исследовано авторами работ [89–100].

Предложенные решения ориентированы как на конкретные комплексы прокатного оборудования, так и на лабораторные образцы станов. Остаются вопросы по универсальности существующих математических моделей, с возможностью их применения для расчета прокатных комплексов с различным составом основного технологического оборудования.

Важным моментом, отмеченным в работе [89] является потребность в получении точных моделей, для проектирования технологии контролируемой прокатки (ТМСР) микролегированных марок стали. Также, важность точного определения температуры отмечена авторами работ [90, 91], с целью обеспечения требуемой структуры механических свойств и качественных характеристик проката.

Следует отметить, что в работах [8–91, 95] авторами изучались дискретные процессы прокатки без привязки к конкретным производственным комплексам.

В тоже время, в работе [92] авторы предлагают расчеты и обосновывают использование различных конструктивных исполнений технологического оборудования с установкой CoilBox, в том числе с индукционной печью, что позволяет дополнительно повысить температуру и снизить нагрузки на прокатное оборудование.

Так, в работе [97] авторами описан способ расчета потерь температуры на установке CoilBox учитывающий потери на каждом витке. Данный способ представляет интерес, однако, методика расчета и расчётные зависимости в работе не приведены. Также необходима проверка погрешности, получаемой при использовании данного метода, так как общая погрешность модели по данным

автора, составляет более 6 %. В тоже время, авторы исследовали технологию в широком диапазоне температур, в том числе, в двухфазной области, что позволяет применять модель для процессов низкотемпературной контролируемой прокатки.

Точности математических моделей, разработанных различными учеными, имеют отличия, что связано с различной структурой моделей, подходами и способами расчета.

Так, авторами работы [96] предложен адаптированный способ расчета, погрешность которого не превышает 3,4 % по клетям, по сравнению с неадаптированным, погрешность которого составляла до 6 % от фактических данных, по силе прокатки. В работе [97] общая погрешность модели также определена расчетом силы прокатки.

В виде самостоятельного элемента, авторами работ [91, 98] предложена температурная модель, погрешность которой определена в градусах Цельсия ( $^{\circ}\text{C}$ ). Так, отклонение температуры в работе [91], определяемое двумя способами, составляет  $4,2^{\circ}\text{C}$ , в работе [98] отклонение температуры на поверхности двух опытных листов составило от  $-20^{\circ}\text{C}$  до  $+10^{\circ}\text{C}$  и от  $+10^{\circ}\text{C}$  до  $+30^{\circ}\text{C}$  соответственно.

В работе [100] авторами исследовано влияние скоростных процессов на температурный перепад по длине полосы, с учетом смотки на установке CoilBox, однако сама зависимость не приведена. Также, данными авторами принято, что температура металла, смотанного в рулон, не меняется.

В тоже время, в работе [101] приведены зависимости для определения потерь температуры при смотке на CoilBox, которые базируются на дифференциальном уравнении теплопроводности. Данные уравнения не учитывают потери температуры в процессе смотки и размотки полосы, что ограничивает их применение.

Таким образом, существующие зависимости и методы для расчета потерь температуры на установках CoilBox являются упрощенными, не учитывают часть факторов и не обеспечивают необходимую точность расчетов. Имеющейся в литературных источниках информации недостаточно для универсального математического описания процессов охлаждения металла в установках CoilBox. Расчеты, выполняемые инжиниринговыми компаниями, имеют ограниченный доступ. Существующие ограничения обуславливают необходимость в разработке зависимостей для широкого применения в инженерных расчетах температурных процессов прокатки в комплексе с оборудованием CoilBox.

Актуальность данных расчетов обусловлена применением оборудования CoilBox на ЧАО «ЗАПОРОЖСТАЛЬ», а также его установкой в ходе предстоящей реконструкции стана 1700 ЧАО «ММК ИМЕНИ ИЛЬИЧА».

Целью работы является уточнение методики расчета потерь температуры металла при использовании оборудования CoilBox, учитывающей факторы скорости движения полосы, длину рольганга и длину раската, применительно к условиям непрерывных станов горячей прокатки ЧАО «ЗАПОРОЖСТАЛЬ» и ЧАО «ММК ИМЕНИ ИЛЬИЧА».

Типовая модель расчета станов горячей прокатки включает в себя следующие этапы [93, 94]:

- расчет размеров исходной заготовки, который содержит расчет удельного расхода металла на прокат, пересчет размеров заготовки в горячем состоянии;
- расчет энергосиловых параметров прокатки, который включает расчет температурного режима прокатки, коэффициент трения, истинное сопротивление деформации, силу и момент прокатки;
- расчет скоростного режима прокатки, который включает расчет времени прокатки в зависимости от типа скоростного режима, цикла прокатки;
- расчет среднего квадратичного момента электродвигателя, который состоит из расчета моментов по каждому циклу прокатки, среднеквадратичного интеграла, а также мощности двигателя прокатного стана.

Принципы, изложенные в такой структуре расчета, являются универсальным и могут быть применены для моделирования технологии на различных станах горячей прокатки.

В данной работе рассмотрены особенности моделирования технологии горячей прокатки на непрерывных полосовых станах на примере комплекса оборудования стана 1700 ЧАО «ММК ИМЕНИ ИЛЬИЧА», с учетом проекта реконструкции (позиции 8 и 9), рис. 5.1. Типовой проект непрерывного стана горячей прокатки, на примере стана 1700 ЧАО «ММК ИМЕНИ ИЛЬИЧА», приведен на рис. 5.1.

Основное технологическое оборудование непрерывных станов может состоять из одной или нескольких универсальных реверсивных клетей или комбинации реверсивных и нереверсивных клетей вместо нереверсивной черновой группы, промежуточного перемоточного устройства типа CoilBox перед чистой группой, также возможны и другие варианты.

Расчет температурного режима прокатки учитывает следующие факторы [90, 91, 93–95, 98, 100]:

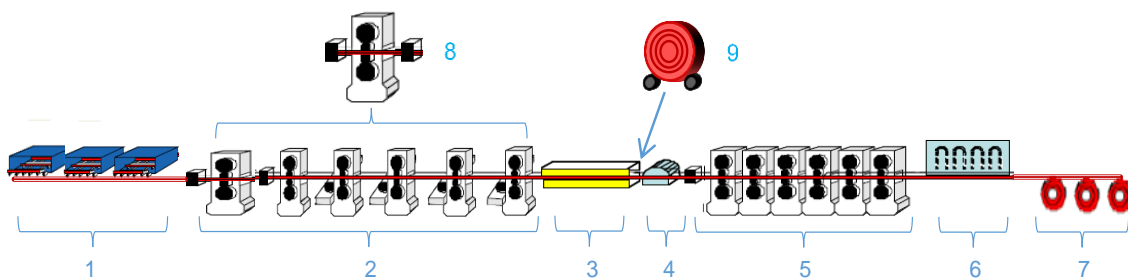
- снижение температуры раската за счет потерь тепла излучением;
- потери тепла конвекцией;
- потери температуры при контакте металла с валками;
- падение температуры вследствие потерь тепла при гидросбиве;
- повышение температуры раската за счет энергии деформации.

В нереверсивных клетях черновой и чистой групп суммарное время, затрачиваемое на потери тепла излучением и конвекцией, определяется зависимостью:

$$\tau_{\Sigma} = \tau + \tau_t, \quad (5.1)$$

где  $\tau$  – время, затрачиваемое на прокатку раската в клетях, с;

$\tau_t$  – время транспортировки раската между клетями черновой группы, с.



- |                                 |                                       |
|---------------------------------|---------------------------------------|
| 1 – участок методических печей; | 6 – установка ускоренного охлаждения; |
| 2 – черновая группа клетей;     | 7 – моталки;                          |
| 3 – теплосохраниющие экраны;    | 8 – реверсивная черновая клеть;       |
| 4 – летучие ножницы;            | 9 – установка CoilBox                 |
| 5 – чистовая группа клетей;     |                                       |

Рисунок 5.1 – Проект расположения основного оборудования стана 1700

При расчете чистовой группы, в формуле (5.1) параметр  $\tau_t$  заменяется на

$\tau_{t1}$  – время транспортировки раската между клетями чистовой группы, с;

При этом, для черновой группы, где прокатка осуществляется последовательно в каждой клетке, время, затрачиваемое на прокатку  $\tau$ , определяется расчетом скоростного режима прокатки [93, 94].

Время транспортировки раската между клетями черновой группы, определяется зависимостью:

$$\tau_t = \frac{l_r - l}{v_r}, \quad (5.2)$$

где  $v_r$  – скорость движения полосы по рольгангу, м/с;

$l_r$  – длина рольганга, м;

$l$  – длина транспортируемого раската, м, при условии  $l_r > l$ .

Для чистовой группы, где прокатка осуществляется одновременно в нескольких клетях, время, затрачиваемое на прокатку в клетке, определяется по формуле:

$$\tau = \frac{l_g}{v_{roll} \times 1000}; \quad (5.3)$$

где  $l_g$  – длина дуги контакта, мм;

$v_{roll}$  – скорость прокатки, м/сек.

Время транспортировки раската между клетями чистовой группы определяем по зависимости:

$$\tau_{t1} = \frac{l_r}{v_{roll}}, \quad (5.4)$$

Расчет потерь температуры металла при смотке раската на установке CoilBox определяем из уравнения Ю.В. Коновалова и В.В. Кисиля [94]:

$$\Delta t = k_{uk} \left( \frac{t_o + 273}{100} \right)^4 \cdot \frac{\tau_c}{h_c}, \quad (5.5)$$

где  $h_c$  – толщина рулона, мм;

$t_o$  – температура раската, поступающего на установку CoilBox, °С;

$\tau_c$  – длительность технологической операции, сек;

$k_{uk}$  – коэффициент, определяемый, согласно рекомендациям авторов, по графику [94].

Преобразовав график [94] для определения коэффициента  $k_{uk}$ , получаем зависимость, рис. 5.2:

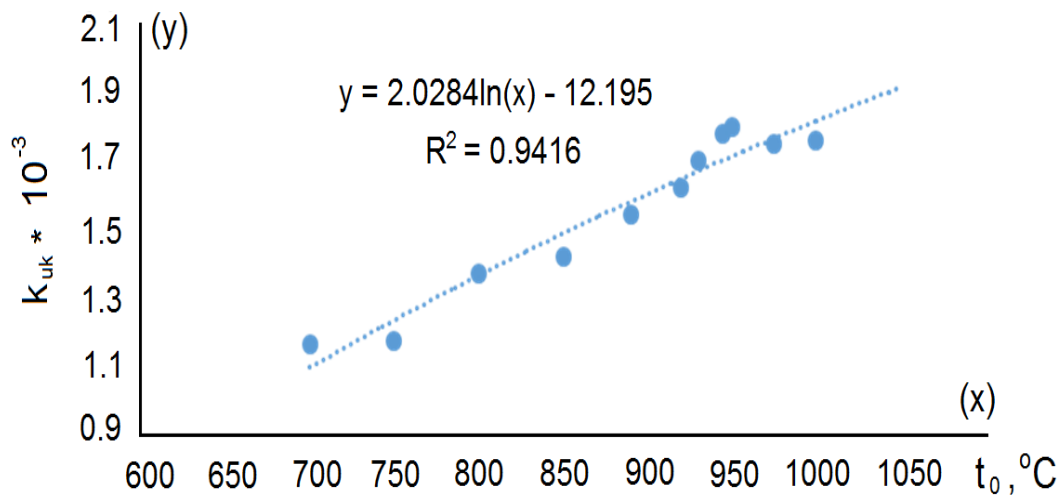


Рисунок 5.2 – Зависимость коэффициента  $k_{uk}$  от температуры раската

$$k_{uk} = \frac{(2.0284 \ln(t_o) - 12.195)}{1000} \quad (5.6)$$

С учетом зависимости (5.6), формула для расчета потерь температуры раската после установки CoilBox имеет вид:

$$\Delta t_1 = \left( \frac{\left( \frac{2.0284 \ln(t_o) - 12.195}{1000} \right) \cdot \left( \frac{\tau_c}{h_c} \right) \cdot (t_o + 273)}{100^4} \right), \quad (5.7)$$

Длительность технологической операции смотки и размотки рулона определяем следующим образом:

$$\tau_c = \frac{L}{v_w \cdot 1000} + \frac{L}{v_{uw} \cdot 1000} + \tau_p, \quad (5.8)$$

где  $L$  – длина раската, мм;

$v_w$  – скорость смотки, м/с;

$v_{uw}$  – скорость размотки, м/с;

$\tau_p$  – время нахождения смотанного рулона на установке, с.

Толщину рулона определяем из уравнения:

$$H \cdot B \cdot L \cdot p = (\pi R^2 - \pi r^2) B \cdot p, \quad (5.9)$$

где  $H, B, L$  – толщина, ширина и длина сматываемого раската, мм;

$p$  – плотность стали, 7,85 г/см<sup>3</sup>;

$R$  – наружный радиус рулона после смотки на установке CoilBox, мм;

$r$  – внутренний формируемый радиус рулона, согласно характеристикам установки, мм.

После преобразования уравнения (5.9) получаем зависимость для определения наружного радиуса рулона:

$$R = \sqrt{\frac{H \cdot L}{\pi} + r^2}, \quad (5.10)$$

Толщина рулона, получаемого после смотки, рассчитывается:

$$h_c = \left( \sqrt{\frac{H \cdot L}{p} + r^2} - r \right) \cdot 1,05, \quad (5.11)$$

где 1,05 – коэффициент неплотности смотки.

С учетом зависимости (5.8) и (5.11), формула для расчета потерь температуры раската после установки CoilBox приобретает вид:

$$\Delta t_1 = \left( \frac{(2,0284 \ln(t_o) - 12,195)}{1000} \right) \cdot \left( \frac{\frac{L}{v_w \cdot 1000} + \frac{L}{v_{uw} \cdot 1000} + \tau_p}{\left( \sqrt{\frac{H \cdot L}{\pi} + r^2} - r \right) \cdot 1,05} \right) \cdot \left( \frac{t_o + 273}{100^4} \right). \quad (5.12)$$

Следует отметить, что полученная зависимость учитывает потери температуры металла в стационарном состоянии смотанного рулона. Для учета дополнительных потерь температуры металла от неучтенных факторов (влияние толщина подката, потери температуры на начальном этапе смотки и в конце

размотки, влияние эффекта «термоса» при выдержке рулона в смотанном состоянии) выполнена обработка массива расчетных данных компании «Primetals», рис. 5.3.

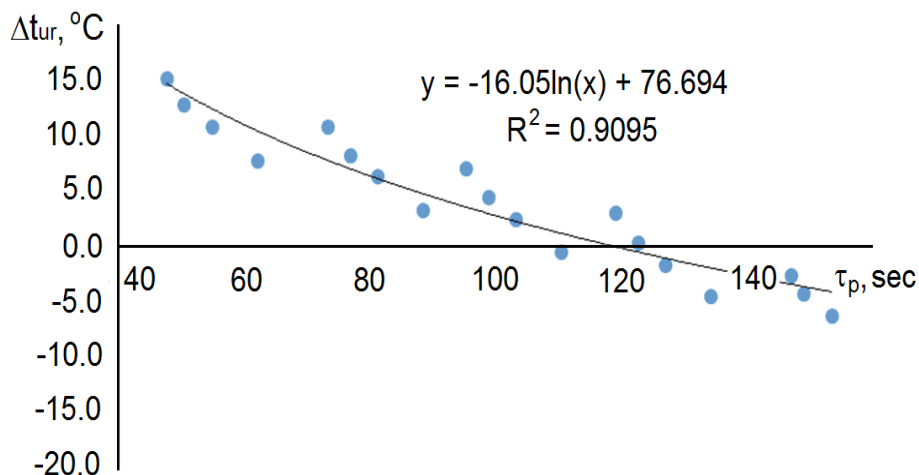


Рисунок 5.3 – Зависимость потерь температуры от неучтенных факторов, выраженных через  $\tau_p$

В результате обработки данных получена следующая зависимость для определения потерь температуры от неучтенных факторов:

$$\Delta t_{ur} = -16.05 \ln(\tau_p) + 76.694. \quad (5.13)$$

Таким образом, с учетом зависимости (5.13), суммарные потери температуры металла после установки CoilBox определяем:

$$\Delta t_{\Sigma} = \Delta t_1 + \Delta t_{ur} \quad (5.14)$$

Изменение температуры металла на установке CoilBox в зависимости от времени охлаждения (изменение скорости смотки/размотки) и толщины сформированного рулона, при прочих равных условиях, полученные с использованием зависимости (5.14) приведены на рис. 5.4.

Полученные формулы (5.12–5.14) применимы в температурном диапазоне 700–1100 °С, времени охлаждения рулона на установке от 30 с до 1000 с, для углеродистых и микролегированных марок сталей.

Для проверки результатов расчетов в других диапазонах требуется проведение дополнительных исследований. Проверка зависимости (5.14) выполнялась на данных, полученных авторами работы [92].

Отклонение расчетной температуры металла на выходе из CoilBox от фактической составило от -4,2 % до -6,4 %, табл. 5.1.

В табл. 5.1,  $t_1 = t_o - \Delta t_{\Sigma}$  – температура металла на выходе из CoilBox, °С.

В табл. 5.2,  $t_1$  – температура раската после прокатки в соответствующей клетки.

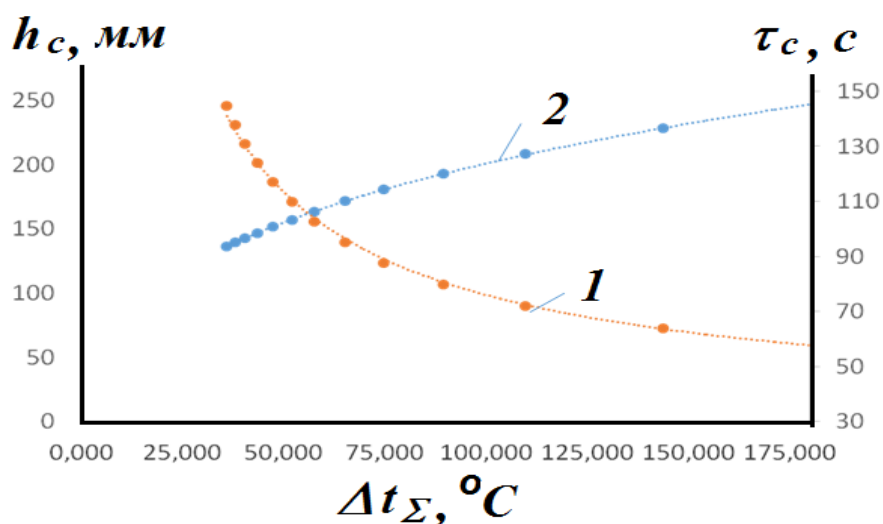


Рисунок 5.4 – Зависимость потерь температуры от толщины смотанного рулона (1), времени охлаждения (2)

Таблица 5.1 – Проверка зависимости для определения потерь температуры металла при смотке на установке CoilBox

* $r$ , мм	$t_o$ , °C	$L$ , мм	$v_w$ , м/с	$v_{uw}$ , м/с	* $\tau_p$ , с	$H$ , мм	$t_1$ (факт), °C	$h_c$ , мм	$\Delta t_\Sigma$ (факт), °C	$\tau_c$ , с	$\Delta t_\Sigma$ (расчет), °C	$t_1$ (расчет), °C	$\Delta$ , %
700	1096	64558	2,2	1,79	70	23	992	295,2	104,0	135,4	41,0	1055,0	-6,4
700	1018	243417	6,5	6,25	70	6,1	942	295,2	76,0	146,4	36,4	981,6	-4,2
700	1053	228437	6,5	6,25	70	6,5	965	295,2	88,0	141,7	38,6	1014,4	-5,1

\* данные отсутствуют в работе [92], приняты по характеристикам аналогичного оборудования на МК «ЗАПОРОЖСТАЛЬ».

Полученные отклонения могут быть связаны с отсутствием информации о дополнительных факторах потерь и месте установки пирометров для замера температур.

Также, проверка выполнена на расчетных данных компании «Primetals».

Отклонение температуры металла на выходе из CoilBox, определенное по зависимости (5.14), от расчетных данных компании «Primetals» составило от -0,91 % до 0,39 %. Стандартное отклонение составило 2,95 °C.

Проверка точности расчета температурного режима прокатки с учетом зависимостей (5.1–5.4) выполнена на математической модели [93], адаптированной для условий непрерывного стана 1700 ММК «ИМЕНИ ИЛЬИЧА», табл. 5.2.

Отклонения расчетных температур проката от фактических в клетях 4а черновой группы и в клетях 6 – 9 чистовой группы, по результатам прокатки горячекатаных рулонов размерами 1,2x1000 мм из стали марки 08пс по

ГОСТ 9045 (аналог DC01 по EN 10130), плавка №262753-3 составили от 0,66 % до 1,21 %.

Таблица 5.2 – Проверка расчета температурного режима прокатки

Параметр	Черновая группа	Чистовая группа			
	№ клетки				
	кл4а	клб	кл7	кл8	кл9
$t_1$ (расчет), °С	1068	972	932	885	854
$t_1$ (факт), °С	1075	963	921	874	845
$\Delta$ , %	-0,66	0,89	1,19	1,21	1,1

Таким образом, точность усовершенствованного расчета температурного режима прокатки, в том числе с использованием оборудования CoilBox, позволяет его использовать при проектировании технологии ТМСП.

## 5.2 Освоение производства проката толщиной 1,2 мм на стане 1700 ЧАО «ММК ИМЕНИ ИЛЬИЧА»

Попытки снизить себестоимость прокатной продукции конечных переработчиков привели к появлению на рынке большого потребительского сектора сверхтонкого рулонного горячекатаного проката. Классификация термина «сверхтонкий сортамент» может отличаться на разных предприятиях. В большинстве случаев к такой продукции относятся горячекатаные рулоны толщиной меньше, чем 1,5 мм.

Существенное снижение себестоимости конечной продукции обеспечивается за счет замены переработчиками холоднокатаного проката на горячекатаный. Таким образом, из звена формирования себестоимости и цены изымается целый холоднокатаный передел. Ранее толщины меньше, чем 1,5 мм изготавливались только способом холодной прокатки. Но и до сих пор есть конечная продукция, которая производится только из холоднокатаного проката исходя из некоторых его индивидуальных особенностей.

Следует отметить, что большинство станов в мире, построенных с 1970 по 2000 года, имеют возможность изготавливать горячекатаные рулоны толщиной до 1,2 мм, а некоторые станы имеют возможность прокатки рулонов толщиной до 0,8 мм [102–107]. В то время как ранее минимальная толщина горячекатаных рулонов, которую можно было прокатать, составляла 1,5 мм [108].

Таким образом, большинством металлургических компаний в мире освоено производство сверхтонкого рулонного горячекатаного проката.

В настоящее время такой сортамент рулонов является распространенным видом продукции. В связи с чем, в литературных источниках практически отсутствует информация по рекомендациям и технологическим особенностям освоения сверхтонкого сортамента горячекатаных рулонов.

Следует отметить, что в нашей стране рулоны толщиной меньше чем 1,5 мм не изготавливаются [102]. Поэтому весьма важным для отечественных производителей является замещение экспорта собственным производством.

Для освоения такой продукции на отечественных производствах необходимо выполнить оценку технических возможностей существующего оборудования и провести ряд технологических экспериментов.

Актуальность разработки технологии производства горячекатаных рулонов толщиной до 1,2 мм на стане 1700 ЧАО «ММК ИМЕНИ ИЛЬИЧА» обусловлена планами по расширению сортамента производства экспортно заменяемой продукции, в том числе, в соответствии с требованиями стандартов ЕС.

Целью проведения работы является оценка технической возможности, разработка технологии и освоение производства горячекатаных рулонов толщиной 1,2 мм на стане 1700 ЧАО «ММК ИМЕНИ ИЛЬИЧА».

Существующее оборудование стана 1700 на данное время состоит из четырех методических печей, три из которых (толкательного типа) были модернизированы с целью нагрева слябов размерами до 250x1550x6200 мм. Одна печь производства фирмы «Stein Heurtey», Франция, шагающего типа с возможностью нагрева слябов размерами до 250x1600x10500 мм. Сляб толщиной 250 мм применяется только в случае предварительного редуцирования на сляббинге. Схема расположения основного оборудования стана 1700 приведена на рис. 5.1. Черновая группа клеток включает одну клетку «дуо» № 01 (черновой окалиноломатель) и 5 клеток «кварто» (1-4 и 4а), четыре из которых являются универсальными (2-4 и 4а). Также установлены теплосохраниющие экраны, летучие ножницы. Чистовая группа состоит из 6 клеток «кварто» (5-10), установки ускоренного охлаждения, которая, в свою очередь, состоит из 14 секций и 3-х моталок, две из которых могут сматывать рулоны массой до 9 т, а одна, последняя, по ходу прокатки может сматывать рулоны массой до 26 т. Следует отметить, что на стане установлено 7 гидросбивов окалины с давлением в пределах 80...140 атм.

Согласно с проектом и действующей технологией, прокатный стан производит горячекатаные рулоны весом до 9 т, толщиной от 1,5 до 9 мм, шириной от 1000 до 1530 мм, в зависимости от сортамента, от марок 08пс (соответственно, по ГОСТ 1050) до 09Г2С (соответственно, по ГОСТ 19281), S355 всех категорий, соответственно, по EN 10025-5 и другой аналогичный сортамент, ограниченный временным сопротивлением в холодном состоянии не более, чем 590 МПа.

Для эксперимента по освоению сверхтонкого сортамента рулонов был выбран следующий сортамент: размеры 1,2x1000 мм, марка стали 08пс согласно с ГОСТ 1050 (или ее аналог DD11 согласно с EN 10111), который не является проектным, но имеет высокий рыночный спрос. В качестве заготовки использовался непрерывнолитой сляб размерами 150x1000x6150 мм.

После нескольких итераций предварительного расчета, при условии обеспечения работы действующего оборудования в пределах проектных нагрузок,

предложен следующий температурно-деформационный режим прокатки, табл. 5.3.

Проведенный расчет показывает возможность прокатки горячекатаных рулонов размерами 1,2x1000 мм из стали марки 08пс или ее аналогов на стане 1700 в пределах технических характеристик оборудования.

Таблица 5.3 – Температурно-деформационный режим прокатки рулонов размерами 1,2x1000 мм на стане 1700

№ клетки	Показатели				
	Толщина*, мм	Температура, °С	Сила прокатки, МНх100	Максимально допустимая сила прокатки, МНх100	Скорость прокатки, м/с
0**	150				
01	128	1260	469,4	800	0,85
1	95	1240	771,9	2500	1,26
2	58	1219	998,0	2500	1,63
3	40	1183	736,2	2000	1,78
4	30	1134	627,2	2000	1,78
4а	23	1063	702,9	2000	2,89
5	12	1000	1177,5	2400	1,39
6	5,6	985	1238,5	2400	2,79
7	3,3	963	923,2	2000	4,24
8	2	932	860,3	1800	6,36
9	1,4	888	766,3	1700	8,84
10	1,2	814	432,3	1500	11,31

\* – толщина после прохода

\*\* – начальные данные

Расчет выполнен при сохранении следующих действующих технологических условий [109, 110]:

– толщина подката для чистовой группы должна быть не более чем 23 мм с целью поддержания температуры раската, а также обеспечения условий обжима для получения конечной толщины рулонов;

– температура прокатки в клетке 4а не должна быть ниже чем 1040 °С.

Также, согласно с рассчитанным и максимально допустимым уровнем силы прокатки, имеется резерв, благодаря которому возможно дальнейшее освоение производства сверхтонкого сортамента горячекатаных рулонов с более прочных марок стали и/или большей ширины.

С целью подтверждения технической возможности производства, согласно с расчетами, приведенными в табл. 5.3, была прокатана опытная партия рулонов. По результатам прокатки получены следующие технологические параметры, табл. 5.4.

Таблица 5.4 – Технологические параметры, полученные по результатам прокатки

Показатель	Значение
Толщина подката, мм	23
Температура за клетью 4а, °С	1082-1075
Температура за клетью 10, °С	800-700

Полученные значения по результатам прокатки являются сравнительными и подтверждают достоверность сделанных предварительных расчетов и ограничений.

Оценку качества произведенных рулонов выполняли на основе сравнения механических особенностей и геометрических параметров проката.

Результаты оценки механических свойств и сравнение с требованиями разных стандартов приведены в табл. 5.5.

Таблица 5.5 – Механические свойства опытной партии рулонов размера 1,2x1000 мм

Плавка / требования	Марка стали / категория	Механические особенности		
		Предел текучести, МПа	Временное сопротивление, МПа	Относительное удлинение, %
262753-3	08пс	330	395	25
Требования ДСТУ 2834 (ГОСТ 16523)	K270B	-	270-410	24
Требования EN 10111	DD11	170-360	≤440	22

Таким образом, произведенная партия рулонов по механическим свойствам соответствует требованиям группы прочности K270B, согласно с ДСТУ 2834 (ГОСТ 16523) и марки стали DD11 согласно с EN 10111.

Для оценки полученных геометрических характеристик по длине и ширине полосы один рулон был порезан на листы размерами 1,2x1000x2000 мм. Измерение толщины и плоскостности производили на каждом десятом листе. Всего с одного рулона было нарезано 340 листов. Результаты измерений приведены в табл. 5.6.

Изготовленные рулоны соответствуют требованиям ГОСТ 19903 для проката нормальной точности по толщине и улучшенной плоскостности (если продукция будет производиться в листах), а также требованиям EN 10051 по тол-

щине для проката с низкоуглеродистых марок сталей и нормальными отклонениями по плоскостности (если продукция будет производиться в листах).

Таблица 5.6 – Результаты измерений полосы по толщине и ширине

Показатель	Измерения толщины по точкам, мм					Плоскость, мм
	25	40	Середина	-40	-25	
Минимальное значение	1,02	1,08	1,10	1,02	1,03	3
Максимальное значение	1,18	1,19	1,22	1,20	1,16	14
Среднее значение	1,08	1,12	1,16	1,13	1,09	8,7
Требования ГОСТ 19903			1,2+/-0,13 (для нормальной точности)			15 (для улучшенной плоскостности в листах)
Требования EN 10051			1,2+/-0,13			18 (нормальные отклонения в листах)

Сечение прокатанной полосы, которое построено на данных по средним замерам, приведено на рис. 5.5.

Согласно рис. 5.5, прокатанная полоса имеет сечение в форме «чечевицы», которая соответствует большинству требований дальнейших переработчиков продукции. Средняя толщина смещена до минусового допусков (допуска). Динамика изменения средней толщины по длине полосы приведена на рис. 5.6.

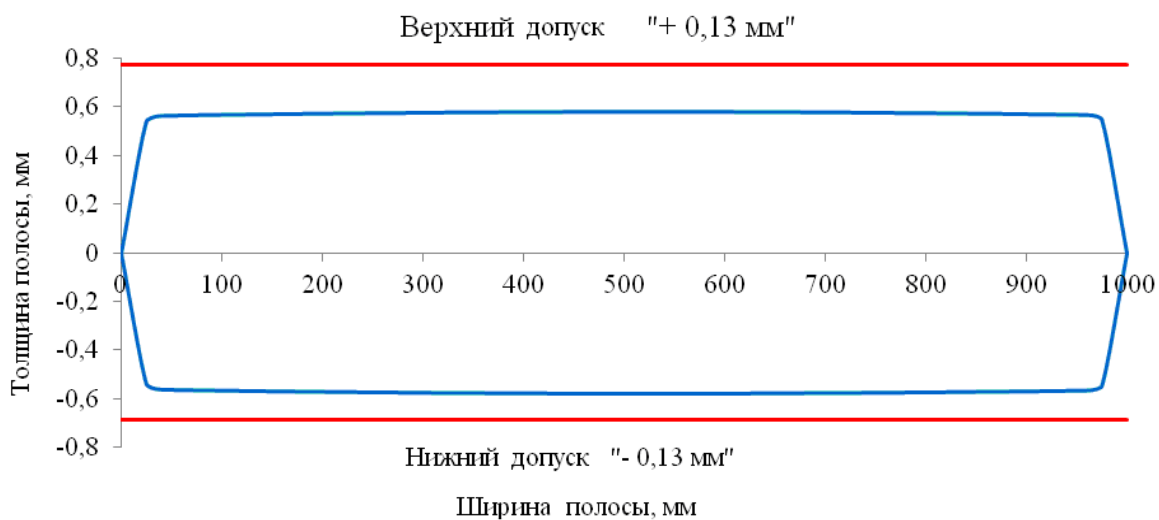


Рисунок 5.5 – Сечение прокатной полосы



Рисунок 5.6 – График изменения средней толщины по длине полосы

На рис. 5.6 изменения толщины полосы по номиналу от начала прокатки и ее приближения к минусовому допуску 1,12...1,11 мм практически с середины полосы и к концу прокатки связано с отработкой системы автоматизации стана и накоплением статистической информации, которую система получает в процессе прокатки нового сортамента.

При дальнейших этапах освоения сверхтонкого сортамента рулонов автоматический процесс прокатки может быть скорректирован внесением изменений в систему регулирования толщины в чистовой группе клетей.

### 5.3 Освоение производства горячекатаных рулонов из марки стали X52M для дальнейшего производства труб согласно требованиям API-5L на стане 1700 ЧАО «ММК ИМЕНИ ИЛЬИЧА»

В настоящее время огромные ресурсы тратятся на добычу углеводородов и их транспортировку, что является неотъемлемым сегментом мировой экономики. Строительство нефтегазотранспортных систем представляет значительную часть общих расходов. Целый ряд институтов задействован в процессах понижения металлоемкости транспортных систем, начиная с их проектирования, обеспечения сварными трубами и заканчивая изучением возможностей металлургических производителей удовлетворить установленные требования. Это, безусловно, является очень важным и комплексным вопросом.

Природное стремление разработчиков к снижению металлоемкости проектов привело к всестороннему углублению изучения проблем, связанных с производством листового проката для сварных труб. Всестороннее развитие получило изучение влияния различных микролегирующих элементов в стали (таких как Ti, Nb, V, Mo, в последнее время Cr, Cu, B) на свойства проката и

труб, а также влияние различных технологий прокатки (термообработка нормализацией, нормализующая прокатка, контролируемая прокатка, термомеханическая контролируемая прокатка с ускоренным охлаждением и т. п.). В этой области задействован целый ряд научных институтов, металлургических производств и предприятий, в том числе по добыче и обогащению руд, которые содержат перечисленные микролегирующие элементы.

На сегодняшний день продукт в виде рулонов и толстого листа, который используется для дальнейшего производства электросварных труб является, наверное, наиболее наукоемким, а разработанные на их основе процессы дают импульс для внедрения новых и усовершенствования существующих технологий и продукции другого предназначения (например, для строительства, машиностроения, судостроения).

Целью данных исследований является разработка технологии производства горячекатаных рулонов из стали марки X52M для дальнейшего производства электросварных труб по стандарту API-5L, размерами 8x1260 мм в условиях стана 1700 ЧАО «ММК ИМЕНИ ИЛЬИЧА».

Развитие технологий производства проката из микролегированных марок стали для дальнейшего изготовления электросварных труб в мире началось в 70-х годах прошлого века. Ему предшествовали исследования влияния микролегирующих элементов на свойства сталей, которые начались на 30 лет раньше. Но в те годы состояние уровня оборудования не позволяло получить желаемого эффекта, поэтому большинство разработанных марок сталей так и остались не исследованы [116, 117]. С развитием оборудования промышленное внедрение прогрессивных технологий стало возможным.

Современный уровень оборудования и технологии, благодаря введению в стали микролегирующих элементов, позволяет получать разнообразные комплексы механических свойств проката [118–126].

Возрастание мировых потребностей в увеличении объемов транспортировки углеводородов спровоцировали появление соответствующих технических требований, которые требовали от производителей постоянно осваивать производство проката с более высоким уровнем механических свойств [127–131]. Существующая классификация американского института нефти API, в зависимости от требований, предлагает следующий перечень марок стали: от В, X42 до X120, которые широко применяются для производства труб. Также известны и распространены аналоги, например, по стандартам ISO.

Современные исследования авторов, в большинстве случаев, направлены на углубленное изучение и внедрение таких марок стали, как X70, X80, X100, X120 [128, 129, 132–138].

Но потребность в менее прочных марках также остается. Эти марки нужны для выполнения ремонтов газонефтегазотранспортных объектов, которые были построены ранее, строительства небольших участков для транспортировки относительно малых объемов продукции. Поэтому, и на сегодняшний день вопрос производства марок сталей с уровнем свойств ниже чем X70 является актуальным.

Разработка технологии термомеханической контролируемой прокатки для производства горячекатаных рулонов сечением 8x1260 мм из стали марки X52M и дальнейшего производства электросварных труб по стандарту API-5L в условиях стана 1700 является актуальной задачей. Решение этой задачи позволит обеспечить производство рулонов, которые соответствуют современным мировым требованиям и удовлетворяют потребности отечественных и зарубежных производителей электросварных труб.

Требования по химическому составу, согласно стандарта API-5L, по большей части, лимитируют только верхний предел состава химических элементов и дают широкое поле деятельности производителям в обеспечении необходимого уровня свойств (разделяют две составляющие: базовую – PSL-1 и с дополнительными требованиями – PSL-2, табл. 5.7).

Таблица 5.7 – Требования к химическому составу стали марки В согласно стандарту API-5L

Требования	Марка стали	Химический состав, %						
		C	Si	Mn	P	S	Nb+V+Ti	CE P <sub>cm</sub>
API-5L PSL-1	X52	≤0,28	-	≤1,40	≤0,030	≤0,030	≤0,15	-
API-5L PSL-2	X52M	≤0,22	≤0,45	≤1,40	≤0,025	≤0,015	≤0,15	≤0,25

Дополнительные требования PSL-1: Cu ≤ 0,50 %; Ni ≤ 0,50 %; Cr ≤ 0,50 %; Mo ≤ 0,15 %.  
 Дополнительные требования PSL-2: Cu ≤ 0,50%; Ni ≤ 0,30%; Cr ≤ 0,30%; Mo ≤ 0,15 %  
 Углеродный коэффициент рассчитывается по формуле:

$$CE P_{cm} = C + \frac{Si}{30} + \frac{Mn}{20} + \frac{Cu}{20} + \frac{Ni}{60} + \frac{Cr}{20} + \frac{Mo}{15} + \frac{V}{10} + 5B$$

Формула применяется при составе углерода ≤0,12%.

Согласно требований PSL-1 API-5L, марка В может изготавливаться любым следующим способом: горячая прокатка, прокатка с нормализацией, термомеханическая прокатка. Марка ВМ может изготавливаться только способом термомеханической прокатки. В требованиях также приведены способы поставки после различных способов термической обработки, но в данной работе мы их не рассматриваем.

Для производства опытной партии горячекатаных рулонов из стали марки X52M размерами 8x1260 мм было разработано два варианта химического состава и изготовлены две разные плавки, табл. 5.8. При освоении данного сортамента в качестве требований к прокату применялись базовые требования API-5L, дополнительные требования с учетом трубного передела заказчиком не выставлялись.

В качестве микролегирующих элементов использован Nb (с разным составом в плавках) и Ti. Разработанный химический состав соответствует требованиям PSL-1 и PSL-2 и может быть использован при производстве марок сталей X52 и X52M.

Таблица 5.8 – Химический состав плавки марки X52

Плавка	Массовая часть химических элементов, %													
	C	Mn	Si	S	P	Cr	Ni	Cu	V	Mo	Nb	Ti	Al	CE
254077-2	0,10	1,40	0,21	0,009	0,020	0,03	0,02	0,02	0,003	0,004	0,040	0,017	0,032	0,18
164022-3	0,12	1,36	0,03	0,009	0,019	0,02	0,01	0,01	0,003	0,002	0,026	0,019	0,043	0,19

На основе химического состава двух плавков табл. 5.8 рассчитаны целевые термомеханические показатели процесса прокатки [117, 139] с целью обеспечения необходимого комплекса механических свойств готового проката стали марки X52 и оценки влияния разного уровня микролегирующих элементов, табл. 5.9.

Таблица 5.9 – Термомеханические показатели процесса прокатки

Параметр	Единица измерения	Значение параметра
Температура прокатки после клетки 10	°C	820-880
Температура смотки рулонов	°C	580-630
Количество секций, которые используются для ускоренного охлаждения	шт	10-14
Скорость охлаждения	°C/с	45-55

С целью проверки технической возможности производства, а также обеспечения технологических параметров, необходимых для реализации термомеханического процесса прокатки, предварительно, для двух плавков, был рассчитан целевой температурно-деформационный режим, табл. 5.10 и 5.11 [140–144].

Следует отметить, что плавка 164022-3 была разлита в слябы размерами 150x1620x6200 мм, плавка 254077-2 была разлита в слябы размерами 250x1550x6200 мм, которые после редуцирования до размеров 150x1260x5800 мм (с одного сляба 250x1550x6200 мм после редуцирования получено два сляба с указанными размерами) были использованы для дальнейшей прокатки.

При этом, целевые деформационные параметры прокатки металла двух плавков являются одинаковыми. Незначительное отличие в температурах, силе прокатки, затрачиваемой мощности двигателей по проходам связано с разным химическим составом двух плавков (табл. 5.6), а также разной длиной слябов, которые использовались. Отличие в силе прокатки при производстве рулонов из металла двух плавков по проходам приведено на рис. 5.7.

Таблица 5.10 – Температурно-деформационный режим прокатки рулонов плавки 254077-2 размерами 8x1260 мм из марки стали X52 на стане 1700

№ клетки	Показатели					
	Толщина*, мм	Температура, °С	Расчитанная сила прокатки, МНх100	Максимально допустимая сила прокатки, МНх100	Скорость прокатки, м/с	Мощность двигателя, кВт
0**	150					
01	130	1260	551,4	800	0,85	1047,3
1	95	1238	1036,6	2500	1,26	3452,1
2	58	1215	1315,0	2500	1,36	4874,9
3	41	1177	936,1	2000	1,78	3380,0
4	30	1131	891,0	2000	1,78	2608,9
4а	24	1056	856,4	2000	2,89	3054,5
5	19	934	1097,8	2400	2,21	3169,7
6	14	918	1340,0	2400	3,06	5357,0
7	11	906	1115,7	2000	3,92	4397,5
8	9,5	891	764,6	1800	4,63	2608,1
9	8,5	871	646,3	1700	5,16	2060,6
10	8	850	429,5	1500	5,70	1130,5

\* – толщина после прохода

\*\* – начальные данные

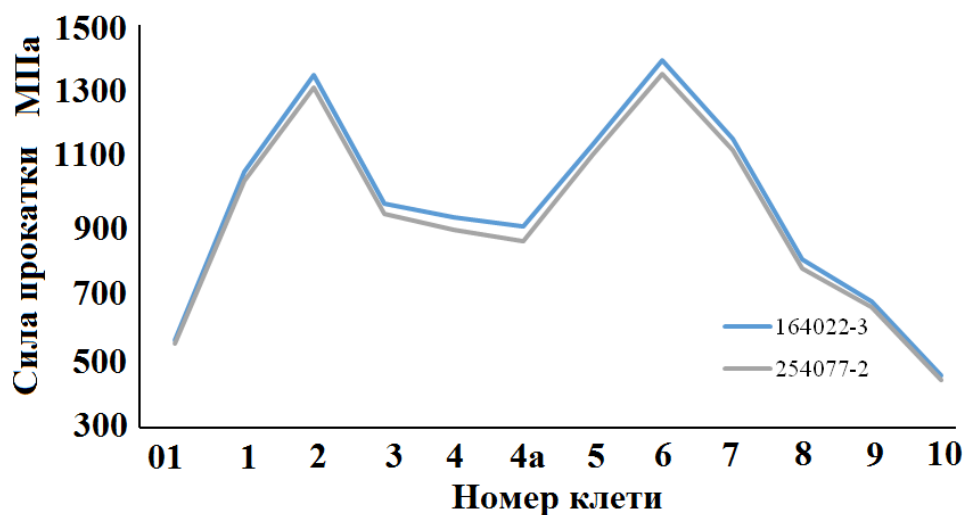


Рисунок 5.7 – Сравнение силы прокатки по клетям при производстве рулонов с плавки 164022-3 (1) и плавки 254077-2 (2)

Таким образом, согласно с расчетом, при производстве рулонов размерами 8x1260 мм по одинаковым режимам прокатки, плавка 164022-3 с большим

содержанием углерода (С) и с меньшим содержанием ниобия (Nb) имеет лучшие прочностные свойства, чем плавка 254077-2.

Таблица 5.11 – Температурно-деформационный режим прокатки рулонов плавки 164022-3 размерами 8x1260 мм из марки стали X52 на стане 1700

№ кле- ти	Показатели					
	Толщина*, мм	Температура, °С	Расчитанная сила прокатки, МНх100	Максимально допустимая сила прокатки, МНх100	Скорость прокатки, м/с	Мощность двигателя, кВт
0**	150					
01	130	1260	561,7	800	0,85	1067,0
1	95	1237	1061,7	2500	1,26	3535,6
2	58	1213	1352,4	2500	1,36	5013,3
3	41	1174	969,9	2000	1,78	3501,6
4	30	1127	926,7	2000	1,78	2713,6
4а	24	1050	900,9	2000	2,89	3213,2
5	19	934	1125,7	2400	2,21	3250,3
6	14	918	1377,7	2400	3,06	5508,1
7	11	907	1145,5	2000	3,92	4515,1
8	9,5	892	786,7	1800	4,63	2683,4
9	8,5	873	662,6	1700	5,16	2112,7
10	8	852	440,6	1500	5,70	1159,7

\* – толщина после прохода

\*\* – начальные данные

Этот расчет подтверждает преимущества термомеханического способа прокатки и возможность его внедрения на оборудовании, которое не было рассчитано на производство проката при уровнях мощности двигателей, которые превышают проектные.

Сталь, которая используется для термомеханической прокатки, обычно имеет более низкое сопротивление деформации при прокатке, чем стали, которые производятся другими способами, благодаря меньшему количеству легирующих элементов.

Особенностью этого способа является то, что формирование конечных свойств происходит уже после процесса прокатки. Таким образом, прокатное оборудование работает без превышения эксплуатационных характеристик.

Согласно с выполненными расчетами, установленные эксплуатационные ограничения оборудования черновой и чистовой группы клетей не были превышены. Таким образом, опытная партия проката может быть изготовлена на

имеющемся оборудовании с применением рассчитанных температурно-деформационных режимов.

Производство опытной партии горячекатаных рулонов сечением 8x1260 мм из марки стали X52, согласно базовым требованиям API-5L, выполняли из слябов двух плавов (164022-3 и 254077-2) с разным химическим составом. После прокатки рулоны были обработаны на установке ускоренного охлаждения. Фактические термомеханические параметры производства опытной партии приведены в табл. 5.12.

Таблица 5.12 – Фактические термомеханические показатели процесса прокатки

Параметр	Единица измерения	Значение параметра
Температура прокатки после клетки 10	°С	865-885
Температура сматывания рулонов	°С	622-644
Количество секций для ускоренного охлаждения	шт	10-11
Скорость охлаждения	°С/с	49

Следует отметить, что все температуры после клетки 10 и температуры сматывания находились в верхних значениях диапазона, а на некоторых рулонах превысили верхний уровень. После сматывания рулоны были отправлены на дополнительное контролируемое воздушное охлаждение до температуры 450 °С, которое производили при помощи промышленных агрегатов, с целью уменьшения толщины слоя воздушной окалины. После контролируемого охлаждения рулоны были отправлены на склад для окончательного естественного охлаждения.

Анализ качества полученных результатов производился на основе механических испытаний и металлографического исследования. Пробы для оценки механических свойств от рулонов опытной партии были отобраны после окончательного охлаждения. Результаты механических испытаний приведены в табл. 5.13. Полученные результаты механических испытаний соответствуют требованиям уровня PSL-1 и PSL-2 API-5L для стали марки X52 и X52M.

Однако, следует отметить, что полученный сравнительно низкий уровень относительного удлинения и ударной вязкости не является типичным для опытной марки стали. Такие результаты по этим показателям получены вследствие недостаточного ускоренного охлаждения и повышенных температур конца прокатки в клетке 10 и температуры сматывания.

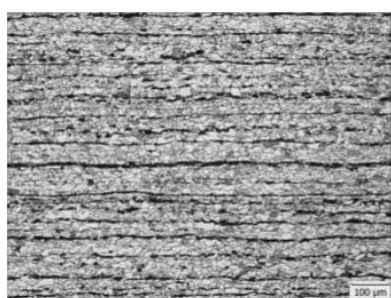
Микроструктура образцов от рулонов плавки 254077-2 мм является феррит-перлитной с зерном феррита на поверхности 9...10 номера, в оси – 8...9 номера. Полосчатость на поверхности образцов – 1 балл, в оси – 2 балла. Микроструктура образцов от рулона плавки 164022-3 является феррит-перлитной с

зерном феррита 10 номера. Полосчатость на поверхности образцов – 2 балла, в оси – 3...4 балла.

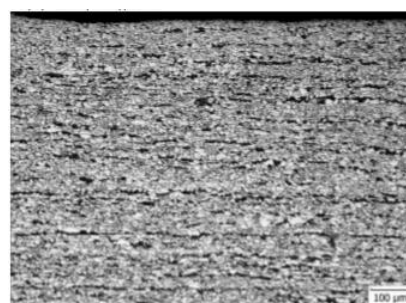
Таблица 5.13 – Результаты механических испытаний опытной партии рулонов

№ плавки, требования стандарта	Механические свойства					Ударная вязкость, KV, Дж/см <sup>2</sup> , при температуре испытаний, °С			
	Предел текучести, $\sigma_m$ , МПа	Временное сопротивление, $\sigma_e$ , МПа	Относительное удлинение, $\delta$ , %	Выгон по оправе 180°	$\sigma_m / \sigma_e$	0	-20	-40	-60
254077-2	425	520	24	Без растрескивания	0,82	-	41	37	34
	430	520	24		0,83		37	38	33
164022-3	380	500	24	Без растрескивания	0,76	-	32	30	30
	390	500	27		0,78		34	32	32
Требования API-5L PSL-1	$\geq 360$	$\geq 460$	16	Без растрескивания	-	-	-	-	-
Требования API-5L PSL-2	360...530	460-760	16	Без растрескивания	0,93	27	-	-	-

Для анализа внутреннего качества проката проведены металлографические испытания образцов от рулонов плавки 254077-2 и плавки 164022-3. Микроструктура образцов приведена на рис. 5.8 и 5.9.



поверхность



ось

Рисунок 5.8 – Микроструктура поперечных образцов от рулонов толщиной 8 мм, плавка 254077-2 после травления, x100

Полученные показатели микроструктуры свидетельствуют о недостаточно совершенном ускоренном охлаждении проката и указывают на превышение целевых термомеханических температур на обеих плавках, что также подтверждается результатами механических испытаний.

Более лучшая микроструктура и механические свойства получены на плавке 254077-2 за счет большего содержания Nb = 0,040 %, по сравнению с

плавкой 164022-3 ( $Nb = 0,026 \%$ ), при одинаковых температурно-деформационных параметрах.

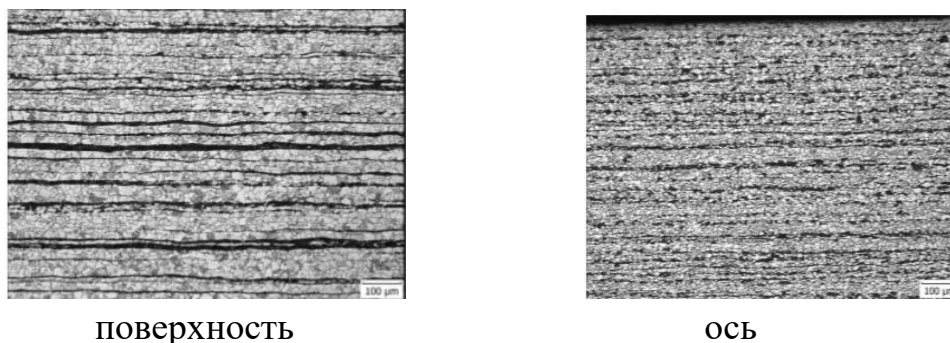


Рисунок 5.9 – Микроструктура поперечных образцов от рулонов толщиной 8 мм, плавка 164022-3 после травления,  $\times 100$

Таким образом, подтверждено положительное влияние Nb на формирование микроструктуры и свойства проката при термомеханическом способе обработки. С целью улучшения микроструктуры и механических свойств рулонов толщиной 8 мм из марки стали X52 необходимо дополнительное исследование с корректировкой технологии в части понижения температур смотки рулонов, увеличения количества охлаждающих секций. Также следует отметить важность проведения таких исследований, так как производство проката толщиной 8 мм находится на грани технических возможностей стана 1700.

### Выводы по разделу 5

1. Уточнена методика расчета времени, затрачиваемого на потери тепла излучением и конвекцией на непрерывных станах при последовательной непрерывной прокатке и прокатке раската одновременно в нескольких клетях. Погрешность расчета температурного режима прокатки на базе фактических данных по стану 1700 «ММК ИМЕНИ ИЛЬИЧА» составила от 0,66 % до 1,2 %;

2. Получена зависимость для определения потерь температуры раската при смотке на установке CoilBox учитывающая влияние скорости смотки/размотки, времени нахождения рулона на установке, а также дополнительные потери, такие как влияние толщины подката, потери температуры на начальном этапе смотки и в конце размотки, влияние эффекта «термоса» при выдержке рулона в смотанном состоянии. Погрешность предложенной зависимости проверена на опытных данных и составила от -0,91 % / 0,39 % до -4,2 % / -6,4 %.

3. Подтверждена техническая возможность производства сверхтонких рулонов размерами 1,2x1000 мм с низкоуглеродистых марок сталей в условиях существующего оборудования стана 1700 «ММК ИМЕНИ ИЛЬИЧА». Предложены режимы прокатки рулонов размерами 1,2x1000 мм из стали марки 08пс согласно с ГОСТ 1050 и её зарубежных аналогов.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Отделка поверхности листа / В. И. Мелешко, А. П. Чекмарев, В. Л. Мазур, А. П. Качайлов. – М.: Металлургия, 1975. – 272 с.
2. Беняковский М. А. Производство автомобильного листа / М. А. Беняковский, В. Л. Мазур, В. И. Мелешко. – М.: Металлургия, 1979. – 256 с.
3. Повышение качества листового проката / Мазур В. Л., Качайлов А. П., Иванченко В. Г. [и др.]. – К.; Техника, 1979. – 143 с.
4. Мазур В. Л. Производство листа с высококачественной поверхностью / В. Л. Мазур. – Киев: Техника, 1982. – 166 с.
5. Мазур В. Л. Прокатка металла со сварными соединениями / В. Л. Мазур, В. И. Мелешко, Д. П. Галкин. М.: Металлургия, 1985. – 112 с.
6. Мазур В. Л. Предупреждение дефектов листового проката / В. Л. Мазур, А. И. Добронравов, П. П. Чернов. – К.: Техника, 1986. – 142 с.
7. Мазур В. Л. Теория прокатки (гидродинамические эффекты смазки) / В. Л. Мазур, В. И. Тимошенко. – М.: Металлургия, 1989. – 192 с.
8. Технология процессов прокатки и волочения. Листопрокатное производство: учебник / М. М. Сафьян, В. Л. Мазур, А. М. Сафьян, А. И. Молчанов – К.: Вища шк., 1988 – 351 с.
9. Надежность технологического процесса производства листового проката / В. Л. Мазур, С. А. Воробей, Д. Л. Романовский [и др.]. – К.: Техника, 1992. – 170 с.
10. Управління якістю тонколистового прокату / В. Л. Мазур, О. М. Саф'ян, І. Ю. Приходько, О. І. Яценко. – К.: Техника, 1997. – 384 с.
11. Мазур В. Л. Теория и технология тонколистовой прокатки (численный анализ и технические приложения) / В. Л. Мазур, А. В. Ноговицын. – Днепропетровск : РВА «Дніпро – VAL», 2010. – 500 с.
12. Теория и технология несимметричной прокатки / В. А. Николаев, В. Л. Мазур, А. К. Голубченко, Е. В. Бинкеви. – М.: Агенство «Инфомарт», 1996. – 262 с.
13. Липухин В. А. Современные непрерывные широкополосные станы горячей и холодной прокатки Японии / В. А. Липухин // Бюл. Института Черметинформация. – 1972. – № 2. – С. 3–14.
14. Ройзман С. Е. Высокоавтоматизированный стан 2285 горячей прокатки полосы / С. Е. Ройзман // Бюл. Института Черметинформация. – 1977. – № 23. – С. 62–63.
15. Целиков А. И. Современное развитие прокатных станов / А. И. Целиков, В. И. Зюзин // М.: Металлургия, 1972. – 399 с.
16. Перспективы замены холоднокатаного листа для холодной штамповки горячекатаным / Ф. Е. Долженков, В. И. Мелешко, А. Г. Тубольцев, В. Д. Гуренко // Сб. Листопрокатное производство: М.: Металлургия, 1973. – С. 132–436.

17. Исследование процессов производства и штамповки горячекатаной листовой кипящей стали по ГОСТ 4041–71 / Ф. Е. Долженков, В. Г. Иваненко, А. И. Яценко и др. // Листопрокатное производство: Сб. науч. трудов. – М.: Металлургия, 1974. – С. 34–44.
18. Долженков Ф. Е. Возможность замены на машиностроительных заводах холоднокатаного листового проката горячекатаным / Ф. Е. Долженков, Ю. В. Коновалов, Л. Б. Горский // Бюл. института Черметинформация. – 1977. – № 6. – С. 29–35.
19. Новейшая технология производства горячекатаной полосы / В. Бальд, Г. Кнеппе, Д. Розенталь, П. Зудай // Черные металлы. – 2000. – Февраль. – С. 36–44.
20. Магин Н. Модернизация широкополосного стана горячей прокатки на металлургическом комбинате им. Ильича (Украина) / Н. Магин // МРТ. – 2000. – С. 58–62.
21. Четыре оптимальные конфигурации агрегатов для производства горячекатаной полосы / Б. Гензер, П. Шмиц, У. Школа–Допп, Ф. Вернер // Черные металлы. – 1999. – Сентябрь. – С. 36–45.
22. Дегнер М. Разработка в области производства сверхтонкой горячекатаной полосы / М. Дегнер, Т. Хеллер, П. Тезе // Черные металлы. – 2000. – Март. С. 24–26.
23. Дегнер М. 7–ая международная конференция по прокатному производству – технические разработки в производстве горячекатаной полосы / М. Дегнер, У. Мюллер // Черные металлы. – 1999. – Август. – С. 11–18.
24. Тарасевич Ю. Р. Литейно–прокатные агрегаты воздействуют на структуру производства и рынок тонколистовой стали / Ю. Р. Тарасевич, С. П. Ефименко, В. С. Юсупов // Производство проката. – 2000. – № 5. – С. 33–42.
25. Современный уровень развития технологии литья тонких слябов ISP // Й. Шёнбек, Б. Крюгер, Х.–Д. Хоппман, К. Маффини // Черные металлы, – 1997. – Апрель – С. 31–38.
26. Хлопонин В. Н. Технические проблемы транспортировки по отводящему рольгангу и сматыванию особотонких полос / В. Н. Хлопонин // Бюл. института «Черметинформация». – 2000. – № 9–10. – С. 41–43.
27. Руденко Е. А. Исследование параметров горячей прокатки особо тонких полос / Е. А. Руденко, Л. А. Курдюкова, Н. В. Тимошенко // Обработка металлов давлением. – 2010. – № 2 (23). – С. 168–173.
28. Современные тенденции развития технологии производства горячекатаных особотонких полос / В. Г. Иванченко, В. Т. Тилик, О. Н. Штехно и др. // Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии: Сб. научн. трудов. – Дніпропетровськ: ІСМ НАН України, 2004. – Вип. 8. – С. 232–238.
29. Куренков Ю. М. Обзор технологических решений и оборудования для производства сверхтонкой горячекатаной полосы / Ю. М. Куренков // Всероссийская научно-техническая конференция студентов. Студенческая научная

весна 2015: Машиностроительные технологии. – Режим доступа : [http://studvesna.ru/db\\_files/articles/1217/article.pdf](http://studvesna.ru/db_files/articles/1217/article.pdf)

30. Хлопотин М. В. Исследование теплового режима валков широкополосных станов горячей прокатки и его влияние на поперечный профиль горячекатаных полос : дис. ... канд.техн.наук : 05.02.13. – Череповец, 2010. – 141 с.

31. Шопин И. И. Исследование формоизменения горячекатаной стальной полосы при смотке в рулон для прогнозирования плоскостности в холодном состоянии : дис. ... канд.техн.наук : 05.16.05. – Москва, 2018. – 238 с.

32. Влияние деформации, предшествующей ускоренному охлаждению, на свойства термически упроченной угловой стали / К. Ф. Стародубов, В. Я. Савенков, В. Т. Худик и др // *Металлургия и коксохимия* : Науч.–техн. сб. – Респ. Межвед., 1970. – Вып. 2. – С. 124–131.

33. Fundamentals of Annealing Low Carbon Steel / G. Sachs, L. G. Ebert, G. V. Kasik, G. F. Nejedlik // *Iron and Steel Engineer*. – 1946. – November. – pp. 88–99.

34. Кувшинов Д. А. Разработка устройства распыления жидкости для эффективного охлаждения проката / Д. А. Кувшинов // *Наука и образование*. – М. : Изд. ФГБОУ ВПО «МГТУ им. Н. Э. Баумана», 2016. – № 6. – Режим доступа : <http://technomag.bmstu.ru/doc/64700/html>.

35. Кувшинов Д. А. Повышение эффективности охлаждения горячекатаного проката / Д. А. Кувшинов, А. В. Ярославцев // *Наука и образование*. – М. : Изд. ФГБОУ ВПО «МГТУ им. Н. Э. Баумана», 2007. – № 6. – Режим доступа : <http://technomag.bmstu.ru/doc/65006/html>.

36. Патон Б. Е. Электронно-лучевая плавка / Б. Е. Патон, Н. П. Тригуб, Д. А. Козлятин [и др.]. – К.: Наук, думка, 1997. – 265 с.

37. Иванов В. Н. Современное промышленное оборудование для различных технологических процессов в металлургической промышленности / В. Н. Иванов, Б. М. Никитин // Интернет-сайт Международного союза «Металлургмаш». – Октябрь, 2012. – Режим доступа : [www.metallurgmash.ru/publications/vniitvch2012.html](http://www.metallurgmash.ru/publications/vniitvch2012.html)

38. Кухарь В. В. Проектирование индукционных нагревателей и безопасность при электротермическом нагреве: учеб. пособ. / В. В. Кухарь, Ю. П. Нижельская, А. С. Анищенко. – Мариуполь: ПГТУ, 2016. – 173 с.

39. Рыкалин Н. Н. Расчеты тепловых процессов при сварке / Н. Н. Рыкалин. – М.: Машгиз, 1951. – 296 с.

40. Кухарь В. В. Неравномерность деформации при свободном формоизменении заготовок из цветных металлов и сплавов / В. В. Кухарь, О. А. Лаврентик, В. А. Бурко // *Вісник Приазовського державного технічного університету* : зб. наук. праць / ПДТУ. – Маріуполь, 2006. – Вип. 16. – С. 123–127.

41. Анализ пластического формоизменения в частных задачахковки и штамповки: монография / В. А. Гринкевич, В. В. Кухарь, М. В. Краев, В. А. Бурко. – Мариуполь: Газета «Приазовский рабочий», 2011. – 336 с.

42. Технологія кування / Л. М. Соколов, І. С. Алієв, О. Є. Марков, Л. І. Алієва. – Краматорськ : ДДМА, 2011. – 268 с.
43. Горелик С. С. Рекристаллизация металлов и сплавов / С. С. Горелик. – М. : Металлургия, 1978. – 568 с.
44. Кухарь В. В. Испытание армирующих профилей и определение их прочностных и геометрических характеристик / В. В. Кухарь, Н. Н. Нагнибеда // Проблемы трибологии (Problems of Tribology). – 2016. – № 1. – С. 30–36.
45. Особенности морфологии и прочность конструкционных сталей / С. А. Беженев, В. Ю. Коцюба, С. Н. Пахолка [и др.] // Вестник двигателестроения. – 2009. – № 2. – С. 133–138.
46. Роль границ зерен в радиационном упрочнении и охрупчивании материалов / Н. А. Азаренков, С. В. Литовченко, Л. С. Ожигов, А. А. Пархоменко. – Харьков : ХНУ им. В. Н. Каразина, 2008. – 64 с.
47. Борисовская Е. М. Моделирование зависимости предела текучести от размера зерна методом клеточных автоматов / Е. М. Борисовская // Электронная микроскопия и прочность материалов: сб. научн. тр. – Сер. : Физическое материаловедение, структура и свойства материалов. – К: ПИМ НАН України, 2010. – Вип. 17. – С. 23–28.
48. Образцов С. М. Нейросетевые модели эволюции физико-механических свойств конструкционных материалов ядерных реакторов : автореф. дис. на соискание степени д-ра физ.-мат. наук : спец. 05.13.18 / Образцов Сергей Михайлович. – Обнинск, 2011. – 34 с.
49. Тузенко О. А. Моделирование и анализ динамических процессов: учебное пособие / О. А. Тузенко, В. В. Кухарь, Е. Ю. Балалаева. – Мариуполь: ПГТУ, 2016. – 169 с.
50. Кухарь В. В. Моделирование теплообменных процессов при интенсификации формоизменения заготовок градиентным нагревом: монографія / В. В. Кухарь, О. А. Тузенко, Е. Ю. Балалаева. – Мариуполь: ПГТУ, 2016. – 136 с.
51. Рыкалин Н. Н. Основы электроннолучевой обработки материалов / Н. Н. Рыкалин, И. В. Зуев, А. А. Углов. – М.: Машиностроение, 1978. – 239 с.
52. Руднев В. И. Исследование и разработка электромагнитных систем для индукционного нагрева крупногабаритных слитков перед пластической деформацией : дис. ... канд.техн.наук : 05.09.10. – Л., 1986. – 142 с.
53. Никаноров А. Н. Моделирование, исследование и разработка индукционных систем для нагрева ленты в поперечном магнитном поле : дис. ... канд.тех.наук : 05.09.10. – Л., 1989. – 146 с.
54. Самарский А. А. Теория разностных схем / А. А. Самарский. – М.: Наука, 1977. – 656 с.
55. Самарский А. А. Введение в численные методы / А. А. Самарский. – М.: Наука, 1978. – 512 с.
56. Самарский А. А. Методы решения сеточных уравнений / А. А. Самарский, Е. С. Николаев. – М.: Наука, 1978. – 532 с.

57. Калиткин Н. Н. Численные методы / Н. Н. Калиткин. – М.: Наука, 1978. – 512 с.
58. Крылов В. И. Вычислительные методы / В. И. Крылов, В. В. Бобков, П. И. Монастырный. – М.: Наука, 1976.
59. Ши Д. Численные методы в задачах теплообмена / Д. Ши. – М.: Мир, 1988. – 544 с.
60. Кухарь В. В. Моделирование температурного поля неравномерно нагретой по длине заготовки при её остывании на штампе / В. В. Кухарь, О. А. Лаврентик, В. А. Бурко, М. В. Крестников // Вісник Приазовського державного технічного університету: зб. наукових праць. – Маріуполь: ПДТУ, 2007. – Вип. 17. – С. 125–129.
61. Designing of induction heaters for the edges of pre-rolled wide ultrafine sheets and strips correlated with the chilling end-effect / Volodymyr Kukhar, Andrii Prysiaznyi, Elena Balalayeva, Oleksandr Anichshenko // Modern Electrical and Energy System (MEES'2017), IEEE. – Kremenchuk, Ukraine : Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University, November 15–17, 2017. – pp. 404–407, DOI: 10.1109/MEES.2017.8248945.
62. Термокинетические диаграммы и механизмы рекристаллизации при многопроходной горячей деформации специальных сталей / Я. И. Спектор, И. Н. Куницкая, А. Н. Тумко [и др.] // Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні. – 2009. – № 1. – С. 11–17.
63. Розробка автоматизованої методики апроксимації діаграм рекристалізації для вибору термомеханічних режимів кування, що підвищують експлуатаційні властивості поковок валів / В. В. Кухар, О. О. Тузенко, О. Ю. Балалаєва, О. В. Василевський // Вісник Вінницького політехнічного інституту / ВНТУ. – Вінниця : ВНТУ, 2015. – № 2. – С. 123–130.
64. Денисова Э. В. Основы вычислительной математики / Э. В. Денисова, А. В. Кучер. – СПб: ИТМО, 2010. – 164 с.
65. Де Бор К. Практическое руководство по сплайнам / К. Де Бор. – М.: Радио и связь, 1985. – 235 с.
66. Петросян В. Г. Методы перебора в решении физических задач / В. Г. Петросян, Т. В. Петросян // Информатика и образование. – 1996. – № 3. – С. 73–83.
67. Коцарь С. Л. Технология листопрокатного производства / С. Л. Коцарь, А. Д. Белянский, Ю. А. Мухин. – М: Металлургия, 1997. – 272 с.
68. Мухин Ю. А. Влияние температурных условий прокатки на НШСГП на формирование микроструктуры проката / Ю. А. Мухин, Е. Б. Бобков, В. Н. Соловьёв, К. В. Бахаев // Теория и практика производства листового проката. Сборник научных трудов. Часть 1. – Липецк: ЛГТУ, 2005. – С. 162–166.
69. Оценка неравномерности условий охлаждения по длине горячекатаных полос / Ю. А. Мухин, В. Н. Соловьёв, Е. В. Макаров, Е. Б. Бобков, К. В. Бахаев // Теория и практика производства листового проката: Сб. науч. трудов. – Часть 1. – Липецк, 2008. – С. 101–107.

70. Теплопередача / В. С. Чередниченко, В. А. Сеницын, А. И. Алиферов, Л. П. Горева. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2004. – 200 с.
71. Лабейш В. Г. Жидкостное охлаждение высокотемпературного металла / В. Г. Лабейш. – Л. : Изд-во Ленингр. ун-та, 1983. – 172 с.
72. Кухарь В. В. Математическая модель тепловых процессов в штампе и остывающей неравномерно нагретой заготовке / В. В. Кухарь, В. А. Бурко // *Машини і пластична деформація металів : тез. Міжнар. наук.-техн. конф., присв. 100-річчю з дня народження С. З. Юдовича / ЗНТУ. – Запоріжжя, 2007. – С. 37–38.*
73. Хііш Л. І. Розрахунок температурного поля заготовки при нерівномірному нагріванні / Л. І. Хііш, В. В. Кухар, І. В. Дмитренко // *Вісник технологічного університету Поділля. – Хмельницький, 2001. – № 5 (36). – С. 155–159.*
74. Математичне моделювання зміни температурного поля заготовки при охолодженні після нерівномірного нагрівання / К. К. Діамантопуло, Л. І. Хііш, В. В. Кухар, І. В. Дмитренко // *Наукові вісті. Сучасні проблеми металургії. – Дніпропетровськ, 2002. – Т. 5 : Пластична деформація металів. – С. 175–179.*
75. Кухарь В. В. Тепловое состояние заготовки с предварительно заданным распределением температур по высоте при остывании на плоском штампе / В. В. Кухарь // *Вісник Національного технічного університету “ХПІ” : зб. наук. пр. / НТУ “ХПІ”. – Харків, 2010. – Темат. вип. : Нові рішення в сучасних технологіях, № 17. – С. 77–81.*
76. Пат. 115981 (UA, Україна), МПК C21D 1/42 (2006.01). C21D 1/34 (2006.01), Спосіб нагріву кромки листового та полосового розкату / Кухар В. В., Аксьонова О. М. : Заявник та патентовласник Державний вищий навчальний заклад «Приазовський державний технічний університет». – № u201608169; заявл. 25.07.2016; опубл. 10.05.2017, Бюл. № 9. – 3 с.
77. Пат. 105807 (UA, Україна), МПК (2016.01) C 21 D 1/34 (2006.01) B 21 C 29/00. Спосіб нагрівання заготовок / Кухар В. В., Балалаєва О. Ю., Ніколенко Р. С., Саврухіна Н. О. : Заявник та патентовласник Державний вищий навчальний заклад «Приазовський державний технічний університет». – № u201508438; заявл. 28.08.2015; опубл. 11.04.2016, Бюл. № 7. – 2 с.
78. Пат. 112941 (UA, Україна), МПК (2016.01) C21D 1/34 (2006.01) B21C 29/00. Спосіб нагрівання заготовок / Кухар В. В., Аніщенко О. С., Каргін Б. С., Присяжний А. Г., Ніколенко Р. С., Нагнібеда М. М. : Заявник та патентовласник Державний вищий навчальний заклад «Приазовський державний технічний університет». – № u201605331; заявл. 17.05.2016; опубл. 10.01.2017, Бюл. № 1. – 2 с.
79. Патент РФ 2497314, Н 05 В 6/36. Электро-индукционный нагрев краев электропроводящего сляба / Пейсакович В. А. (US). – № 2011106954/07; заявл. 25.07.2009; опубл. 27.10.2013, Бюл. № 30.
80. Патент РФ 2286394, С 21 D 1/10 (2006.01), Н 05 В 6/36 (2006.01). Щелевой индуктор / Демидович В. А. (RU), Малышев А. А. (RU), Чмилен-

ко Ф. В. (RU), Червинский В. И. (RU). – № 2004122608/02; заявл. 14.07.2004; опубл. 27.10.2006, Бюл. № 30.

81. Патент РФ 2272367, Н 05 В 6/36. Щелевой индуктор / Демизович В. Б. (RU), Червинский В. И. (RU), Малішев А. А. (RU), Чмиленко Ф. В. (RU). – № 2004122607/09; заявл. 14.07.2004; опубл. 20.03.2006, Бюл. № 8.

82. Николаев В. О. Виробництво плоского прокату : підручник для студентів вищих навчальних закладів / В. О. Николаев, В. Л. Мазур. – Запоріжжя : ЗДІА, 2009. – 319 с.

83. Технология прокатного производства. В 2 кн. Кн. 2. Справочник / М. А. Беняковский [и др.]. – М. : Metallurgia, 1991. – 423 с.

84. Преобразование зерна при первичной рекристаллизации / М. А. Штремель, В. И. Лизунов, В. В. Шкатов, А. В. Алдунин // МиТОМ, 1984. – № 6. – С. 2–5.

85. Новиков И. И. Теория термической обработки металлов: Учебник. 2–е изд. / И. И. Новиков. – М.: Metallurgia, 1974. – 95 с.

86. Штремель М. А., Лизунов В. И., Шкатов В. В. Многомерные диаграммы кинетики превращений для прогноза состояния сплава / М. А. Штремель, В. И. Лизунов, В. В. Шкатов // Заводская лаборатория. – 1983. – Т. 49. – № 12. – С. 40–44.

87. Прокатные станы : справочник. В 3 т. Т. 3. Листопрокатные станы и профилирующие агрегаты / В. Г. Антипин [и др.]. – М. : Metallurgia, 1992. – 428 с.

88. Николаев В. А. Формирование толщины полосы при прокатке на широкополосных станах / В. А. Николаев, А. Ю. Путники. – Запорожье : Дикое поле, 2011. – 180 с.

89. Kim J. An analytical model for the prediction of strip temperatures in hot strip rolling / J. Kim, J. Lee, S. M. Hwang // International journal of heat mass transfer. – 2009. – № 52. – pp. 1864–1874.

90. Kiuchi M. (I). Overall Thermal Analysis of Hot Plate/Sheet Rolling / M. Kiuchi (I), J. Yanagimoto, E. Wakamatsu // Institute of Industrial Science, The University of Tokyo. – Tokyo. – Japan Received on January 3. – 2000. – pp. 209–212.

91. Moon C. H. An approximate method for computing the temperature distribution over material thickness during hot flat rolling / C. H. Moon, Y. Lee // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2012. – № 55. – pp. 310–315.

92. Васильев А. А. Новая технология горячей прокатки широкополосной стали / А. А. Васильев, В. А. Николаев // Вестник Череповецкого государственного университета, Череповец. – 2013. – Вып. 4. – Т. 2. – С. 5–10.

93. Курпе А. Г. Моделирование технологического процесса прокатки толстых листов на стане 3600 ОАО «МК «Азовсталь»: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. тех. наук : спец. 05.16.05 / ФГУП ЦНИИчермет им. И.П.Бардина. – М., 2006. – 23с.

94. Коновалов Ю. В. Расчет параметров листовой прокатки. Справочник / Ю. В. Коновалов, А. Л. Остапенко, В. И. Пономарев. – М.: Металлургия, 1986. – 430 с.
95. Pal S. K. Temperature distribution in steel during hot rolling: pseudo-bond graph view / S. K. Pal, D. A. Linkens // *Simulation Modelling Practice and Theory*. – 2002. – № 10. – pp. 69–85.
96. Optimization of Temperature and Force Adaptation Algorithm in Hot Strip Mill / W. Peng, Z. Liu, X. Yang, J. Cao, D. Zhang // *Journal of iron and steel research, International*. – 2014. – № 21 (3). – pp. 300–305.
97. Phaniraj M. P. Thermo-mechanical modeling of two phase rolling and microstructure evolution in the hot strip mill Part I. Prediction of rolling loads and finish rolling temperature / M. P. Phaniraj, B. B. Behera, A. K. Lahiri // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2005. – № 170. – pp. 323–335.
98. Estimation of plate temperatures in hot rolling based on an extended Kalman filter / K. Speicher, A. Steinboeck, D. Wild, T. Kiefer, A. Kugi // *16th IFAC Symposium on Automation in Mining, Mineral and Metal Processing*. – San Diego, California, USA. – August 25-28. – 2013. – pp. 409–414.
99. Temperature field analysis and its application in hot continuous rolling of Inconel 718 superalloy / F. Sui, L. Chen, X. Liu, L. Wang, W. Li Sin // *Acta Metall. Science Direct (Engl. Lett.)* Vol.22. – April. – 2009. – № 2. – pp. 81–90.
100. Коноводов Д. В. Исследование влияния скоростных режимов смотки и размотки подката в "coilbox" на температурный перепад по длине полосы / Д. В. Коноводов, А. В. Мокиевец, О. М. Кузьмина // *Plastic deformation of metals, сб. научн. трудов: в 2-х т. – Т. 1. – Днепропетровск: Акцент ПП. – 2014. – Т. 1. – 264 с. – С. 39–43.*
101. Коноводов Д. В. Исследование изменения температуры полосы в промежуточном перемоточном устройстве на широкополосных станах горячей прокатки / Д. В. Коноводов, Е. А. Каракаш, А. В. Мокиевец, В. С. Панченко // *Обработка материалов давлением*. – 2013. – № 3. – ISSN 2076-2151. (36). – С. 160–164.
102. Коновалов Ю. В. Справочник прокатчика. Производство горячекатаных листов и полос: Справочное издание в 2-х книгах / Ю. В. Коновалов. – М.: «Теплотехник», Книга 1. – 2008. – 640 с.
103. John G. Lenard. Primer on Flat Rolling / G. John Lenard // *Mathematical and Physical Modelling of the Flat Rolling Process: Elsevier Ltd, Chapter 3*. – 201. – pp. 36-98. – Режим доступа: <https://doi.org/10.1016/B978-008045319-4/50005-X>.
104. Okamoto K. Process Control System of Ultra Thin Strip Production Line at Tangshan Iron and Steel Group Co. in China / K. Okamoto, Y. Wakamiya, N. Shimoda, T. Itoh, Wan Hailong, Liu Wenzhong // *IFAC New Technologies for Automation of Metallurgical Industry*. – Shanghai, P.R. China. – 2003. – pp. 263–268. – Режим доступа: [https://doi.org/10.1016/S1474-6670\(17\)37640-1](https://doi.org/10.1016/S1474-6670(17)37640-1).
105. Quan-Ke Pan A mathematic model and two-stage heuristic for hot rolling scheduling in compact strip production / Pan Quan-Ke, Chen Qing-da, Tao Meng,

Bing Wang, Liang Gao // Elsevier, Volume 48. – 2017. – pp. 516–533. – Режим доступа: <https://doi.org/10.1016/j.apm.2017.03.067>.

106. Hiroshi Hirano Width necking at the rougher in a hot-strip mill / Hirano Hiroshi, Iбата Haruhiro, Kawatani Hiroshi, Kokubo Ichiro // Journal of Mechanical Working Technology. Elsevier Scientific Publishing Company. – 1983. – №7. – pp. 367–383. – Режим доступа: [https://doi.org/10.1016/0378-3804\(83\)90066-9](https://doi.org/10.1016/0378-3804(83)90066-9).

107. W. Y. D. Yuen The modelling of the mechanics of deformation in flat rolling / Yuen W. Y. D., A. Dixon, D. N. Nguyen // Journal of Materials Processing Technology. – 1996. – pp. 87-94. – Режим доступа: [https://doi.org/10.1016/0924-0136\(96\)02312-6](https://doi.org/10.1016/0924-0136(96)02312-6).

108. Belgrano F. A Mathematical Model to Control a Six Stand Hot Strip Finishing Mill / F. Belgrano, G. Chighizola, F. Delfino, V. Giori, V. Neglia // IFAC Proceedings Volumes. – 1980. – pp. 283-290. Режим доступа: [https://doi.org/10.1016/S1474-6670\(17\)64581-6](https://doi.org/10.1016/S1474-6670(17)64581-6).

109. Максименко О. П. Теоретический анализ момента при прокатке с натяжением полосы / О. П. Максименко, А. Г. Присяжный, В. В. Кухарь, Е. В. Кузьмин // Обработка материалов давлением : сб. науч. тр. / ДГМА. – Краматорск. – 2017. – № 1 (44). – С. 199–203.

110. Кухарь В. В. Уточнение методики расчета тепловых потерь металла на непрерывных станах горячей прокатки / В. В. Кухарь, А. Г. Курпе // Обработка материалов давлением : сб. науч. тр. / ДГМА. – Краматорск. – 2018. – № 1 (46). – С. 159–166.

111. Xiang-dong QI Optimization of Pass Schedule in Hot Strip Rolling / QI Xiang-dong, WANG Tao, XIAO Hong // Journal of Iron and Steel Research, International. – 2012. 19 (8). – pp. 25–28. – Режим доступа: [https://doi.org/10.1016/S1006-706X\(12\)60135-6](https://doi.org/10.1016/S1006-706X(12)60135-6).

112. Kitao N. On-Line Quality Control System in Hot Strip Mill / N. Kitao, A. Urano // IFAC Proceedings Volumes. – 1984. – pp. 1911–1916. – Режим доступа: [https://doi.org/10.1016/S1474-6670\(17\)61255-2](https://doi.org/10.1016/S1474-6670(17)61255-2).

113. Kawanami Takao Development of high-precision shape and crown control technology for strip rolling / Takao Kawanami, Takashi Asamura, Hiromi Matsumoto // Journal of Materials Processing Technology. – 1990. – pp. 257–275. – Режим доступа: [https://doi.org/10.1016/0924-0136\(90\)90016-N](https://doi.org/10.1016/0924-0136(90)90016-N).

114. Yoshiharu Anbe Tension control of a hot strip mill finisher / Yoshiharu Anbe, Kunio Sekiguchi, Hiroyuki Imanari // 13th Triennial World Congress. – San Francisco. – USA IFAC Proceedings Volumes. – 1996. – pp. 6233–6238. Режим доступа: [https://doi.org/10.1016/S1474-6670\(17\)58681-4](https://doi.org/10.1016/S1474-6670(17)58681-4).

115. Zhong-feng GUO Shape Setup System for 1700 Hot Strip Mill / Zhong-feng GUO, Jian-zhong XU, Chang-sheng LI, Xiang-hua LIU // Journal of Iron and Steel Research, International. – 2007. – pp. 27–30. – Режим доступа: [https://doi.org/10.1016/S1006-706X\(07\)60069-7](https://doi.org/10.1016/S1006-706X(07)60069-7).

116. Malcolm J. Gray Technology of microalloyed steel for large diameter pipe / J. Gray Malcolm // International Journal of Pressure Vessels and Piping,

Vol. 2. – 1974. – pp. 95–122. – Режим доступа: [https://doi.org/10.1016/0308-0161\(74\)90019-2](https://doi.org/10.1016/0308-0161(74)90019-2).

117. Zinchenko Yu. A. Prospects of the technology used to make skelp at the Azovstal metallurgical combine / Yu. A. Zinchenko, A. G. Kurpe, O. A. Bagmet. – Metallurgist, Vol. 52, Nos. 7–8. – 2008. – pp. 461–463. – Режим доступа: <https://doi.org/10.1007/s11015-008-9065-4>.

118. Militzer M Thermomechanical Processed Steels Reference Module in Materials Science and Materials Engineering Comprehensive / M Militzer. – Materials Processing, Vol. 1. – 2014. – pp. 191–216. – Режим доступа: <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-096532-1.00115-1>.

119. LI Hai-jun, LI Zhen-lei, YUAN Guo, WANG Zhao-dong, WANG Guo-dong / Development of New Generation Cooling Control System After Rolling in Hot Rolled Strip Based on UFC / Hai-jun LI, Zhen-lei LI, Guo YUAN, Zhao-dong WANG, Guo-dong WANG // Journal of Iron and Steel Research, International. – 2013, 20 (7). – pp. 29–34.

120. LIU En-yang Algorithm Design and Application of Laminar Cooling Feedback Control in Hot Strip Mill / En-yang LIU, Dian-hua ZHANG, Jie SUN, Liang-gui PENG, Bai-hong GAO, Li-tao SU // Journal of Iron and Steel Research, International. – 2012. – 19 (4). – pp. 39–42. – Режим доступа: [https://doi.org/10.1016/S1006-706X\(12\)60085-5](https://doi.org/10.1016/S1006-706X(12)60085-5).

121. Xu Yunbo Modeling of microstructure evolution and mechanical properties during hot-strip rolling of Nb steels / Yunbo Xu, Yongmei Yu, Xianghua Liu, Guodong Wang // Journal of University of Science and Technology. – Beijing, Vol. 15. – 2008. – pp. 396–401. – Режим доступа: [https://doi.org/10.1016/S1005-8850\(08\)60075-4](https://doi.org/10.1016/S1005-8850(08)60075-4).

122. Korczak P. Investigation of microstructure prediction during experimental thermo-mechanical plate rolling / P. Korczak, H. Dyja // Journal of Materials Processing Technology, 109. – 2001. – pp. 112–119.

123. Xiangwei Kong, Liangyun Lan Optimization of mechanical properties of low carbon bainitic steel using TMCP and accelerated cooling, 11th International Conference on Technology of Plasticity, ICTP. – 2014. – pp. 19–24. – Nagoya Congress Center, Nagoya, Japan. – Procedia Engineering 81. – 2014. – pp. 114–119. – Режим доступа: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.09.136>.

124. Sir Harshad Bhadeshia Thermomechanical Treatment of Steels, Microstructure and Properties (Fourth edition). – 2017. – pp. 271–301. – Режим доступа: <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100270-4.00010-X>.

125. Carretero Olalla V. Analysis of the strengthening mechanisms in pipeline steels as a function of the hot rolling parameters / V. Carretero Olalla, V. Bliznuk, N. Sanchez, P. Thibaux, L. A. I. Kestens, R. H. Petrov // Materials Science & Engineering A 604. – 2014. – pp. 46–56. – Режим доступа: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2014.02.066>.

126. Sumit Ghosh Thermomechanical processing of low carbon Nb–Ti stabilized microalloyed steel: microstructure and mechanical properties / Ghosh Sumit,

Mula Suhrit // *Materials Science and Engineering*, Vol. 646. – 2015. – pp. 218–233. – Режим доступа: <http://dx.doi.org/10.1016/j.msea.2015.08.072>.

127. DONG Rui-feng Microstructures and Properties of X60 Grade Pipeline Strip Steel in CSP Plant / Rui-feng DONG, Li-gang SUN, Zhe LIU, Xuelian WANG, Qing-you LIU // *Journal of Iron and Steel Research, International*. – 2008. – pp. 71–75. – Режим доступа: [https://doi.org/10.1016/S1006-706X\(08\)60035-7](https://doi.org/10.1016/S1006-706X(08)60035-7).

128. Zhao J. A Novel thermo-mechanical controlled processing for large-thickness microalloyed 560 MPa (X80) pipeline strip under ultra-fast cooling / J. Zhao, W. Hu, X. Wang, J. Kang, Y. Cao, G. Yuan, H. Di, R. D. K. Misra // *Materials Science & Engineering A* 673. – 2016. – pp. 373–377. – Режим доступа: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2016.07.089>.

129. Zhao J. Effect of microstructure on the crack propagation behavior of microalloyed 560 MPa (X80) strip during ultra-fast cooling / J. Zhao, W. Hu, X. Wang, J. Kang, Y. Cao, G. Yuan, H. Di, R. D. K. Misra // *Materials Science & Engineering A* 666. – 2016. – pp. 214–224. – Режим доступа: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2016.04.073>.

130. Спосіб виробництва сталевих високоміцних електрозварних одношовних труб великого діаметра для магістральних трубопроводів: пат. 98214 Україна: МПК (2012.01), B21C 37/08 (2006.01) B21B 1/32 (2006.01) C22C 38/00 C21D 8/02 (2006.01) C21D 8/10 (2006.01) B23K 9/025 (2006.01). – № а 2010 11473. – заява 27.09.2010. – публ. 25.04.2012, Бюл. № 8. – С. 7.

131. Спосіб виробництва сталевих високоміцних електрозварних двошовних труб великого діаметра для магістральних трубопроводів: пат. 96097 Україна: МПК (2011.01), B21C 37/08 (2006.01) C22C 38/00 C21D 1/00 B21B 1/22 (2006.01) B23K 9/00. – № а201011469. – зава 27.09.2010. – публ. 26.09.2011, Бюл. № 18. – С. 5.

132. Liang-yun LAN Dynamic and Static Recrystallization Behavior of Low Carbon High Niobium Microalloyed Steel / LAN Liang-yun, QIU Chun-lin, ZHAO De-wen, GAO Xiu-hua, DU Lin-xiu // *Journal of Iron and Steel Research, International*, 18 (1). – 2011. – pp. 55–60. – Режим доступа: [https://doi.org/10.1016/S1006-706X\(11\)60011-3](https://doi.org/10.1016/S1006-706X(11)60011-3).

133. Natarajan V. V. The Determining Impact of Coiling Temperature on the Microstructure and Mechanical Properties of a Titanium-Niobium Ultrahigh Strength Microalloyed Steel: Competing Effects of Precipitation and Bainite / V. V. Natarajan, V. S. A. Challa, R. D. K. Misra // *Materials Science and Engineering*, Vol. 665. – 2016. – pp. 1–9. – Режим доступа: <http://dx.doi.org/10.1016/j.msea.2016.04.007>.

134. Venkatsurya P. K. C. Z. Understanding mechanical property anisotropy in high strength niobium-microalloyed linepipe steels / P. K. C. Venkatsurya, Z. Jia, R. D. K. Misra, M. D. Mulholland, M. Manohar, J. E. Hartmann Jr. // *Materials Science and Engineering*, Vol. 556. – 2012. – pp. 194–210. – Режим доступа: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2012.06.078>.

135. ZHANG Ji-ming Mechanical Properties and Microstructure of X120 Grade High Strength Pipeline Steel / Ji-ming ZHANG, Wei-hua SUN, Hao SUN //

Journal of Iron and Steel Research, International. – 2010, 17 (10). – pp. 63–67. – Режим доступа: [https://doi.org/10.1016/S1006-706X\(10\)60185-9](https://doi.org/10.1016/S1006-706X(10)60185-9).

136. Zhao Wengui Static strain aging behavior of an X100 pipeline steel / Wengui Zhao, Meng Chen, Shaohui Chen, Jinbo Qu. // Materials Science and Engineering A 550. – 2012. – pp. 418–422. – Режим доступа: <http://dx.doi.org/10.1016/j.msea.2012.04.095>.

137. Hillenbrand Hans-Georg Development and production of high strength pipeline steels / Hans-Georg Hillenbrand, Michael Gräf, Christoph Kalwa. – Niobium 2001. – EUROPIPE GmbH. – 2001. – pp. 1–29.

138. Gräf Michael Production of Large Diameter Pipes Grade X 70 with High Toughness using Acicular Ferrite Microstructures / Michael Gräf, Jens Schröder, Volker Schwinn, Klaus Hulka // International Conference on Application and Evaluation of High Grade Linepipes in Hostile Environments. – Yokohama, Japan. – 2002. – pp. 1–14.

139. Багмет О. А. Формирование оптимальных структур и свойств при проведении контролируемой прокатки трубных сталей, содержащих ниобий // автореферат дис. М. «Графикс В». – 2007. – С. 23.

140. Теоретический анализ момента при прокатке с натяжением полосы / О. П. Максименко, А. Г. Присяжный, В. В. Кухарь, Е. В. Кузьмин // Обработка материалов давлением : сб. науч. тр. / ДГМА. – Краматорск : ДГМА, 2017. – № 1 (44). – С. 199–203.

141. Кухарь В. В. Уточнение методики расчета тепловых потерь металла на непрерывных станах горячей прокатки / В. В. Кухарь, А. Г. Курпе // Обработка материалов давлением : сб. науч. тр. / ДГМА. – Краматорск : ДГМА, 2018. – № 1 (46). – С. 159–166.

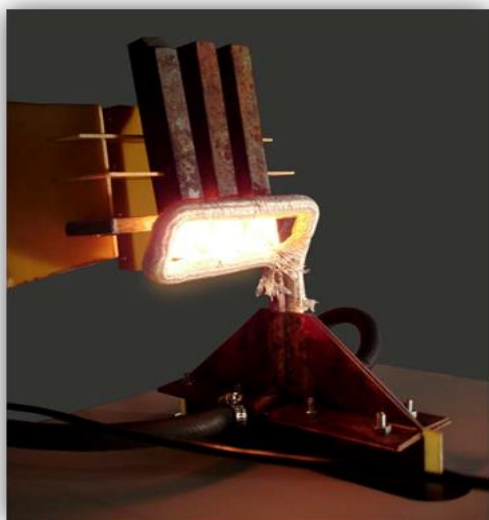
142. Курпе О. Г. Уточнения розрахунку теплових втрат металу на станах Стеккеля / О. Г. Курпе, В. В. Кухар, Є. В. Змазнева // Проблеми трибології = Problems of Tribology. – 2018. – № 1. – С. 78–84.

143. В. В. Кухар Розробка технології виробництва листового прокату товщиною 4 мм на стані 3200 заводу Trametel SpA Metallургическая и горно-рудная промышленность / В. В. Кухарь, О. Г. Курпе. – 2018. – N 2. – p. 24-29.

144. Kukhar Volodymyr Experimental Research and Method for Calculation of Upsetting-with-Buckling' Load at the Impression-Free (Dieless) Preforming of Workpiece / Volodymyr Kukhar, Viktor Artiukh, Andrii Prysiashnyi, Andrey Pustovgar // E3S Web of Conference (HRC 2017), Vol. 33, 02031. – 2018. – Режим доступа: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20183302031>.

## ПРИЛОЖЕНИЕ А

### Графический материал



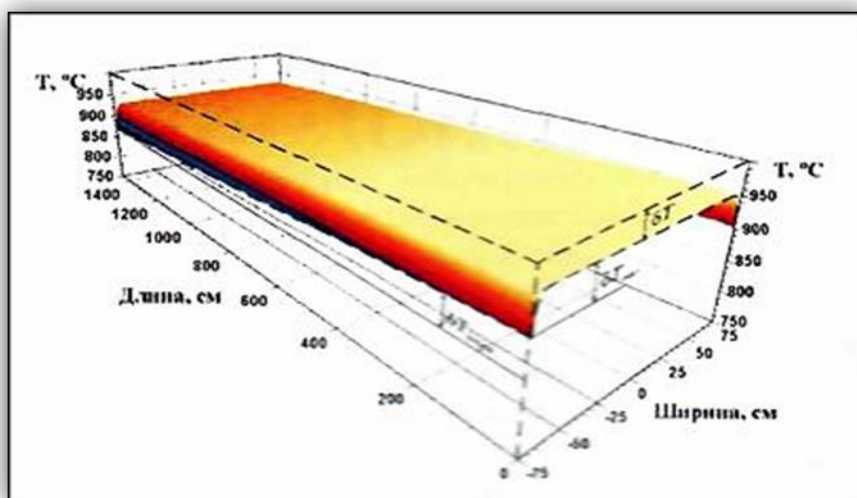
[[elisit.ru/materiali/?pid=51](http://elisit.ru/materiali/?pid=51)]

Рисунок А.1



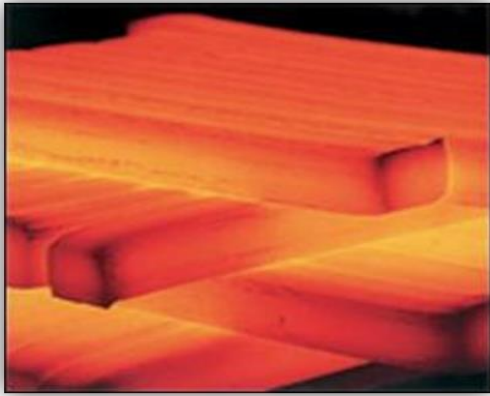
[[tool-land.ru/payka-metallov.php](http://tool-land.ru/payka-metallov.php)]

Рисунок А.2



[[elisit.ru/materiali/?pid=55](http://elisit.ru/materiali/?pid=55)]

Рисунок А.3



[elisit.ru/materiali/?pid=49]

Рисунок А.4

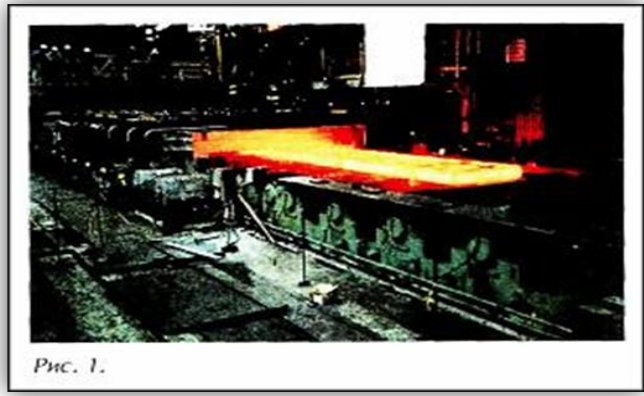
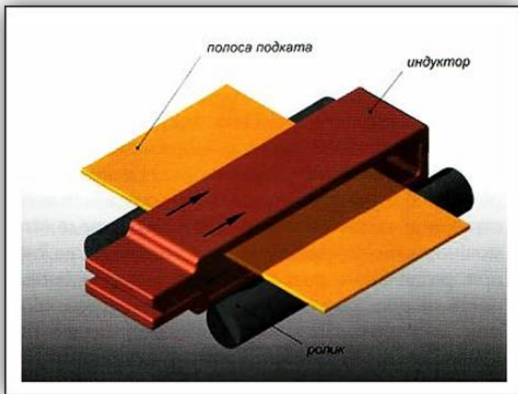


Рис. 1.

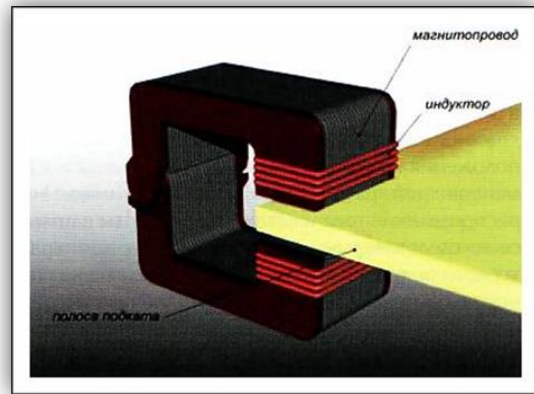
[elisit.ru/materiali/?pid=55]

Рисунок А.5



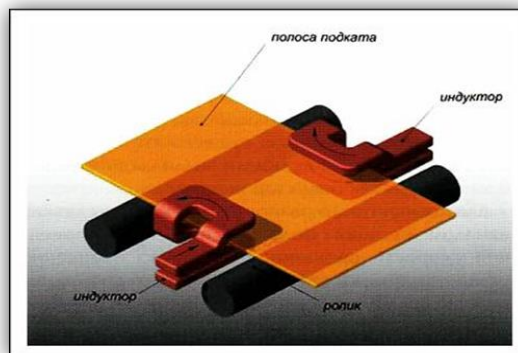
[elisit.ru/materiali/?pid=55]

Рисунок А.6



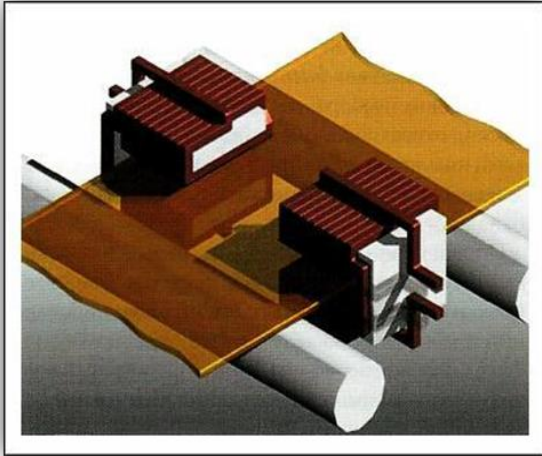
[elisit.ru/materiali/?pid=55]

Рисунок А.7



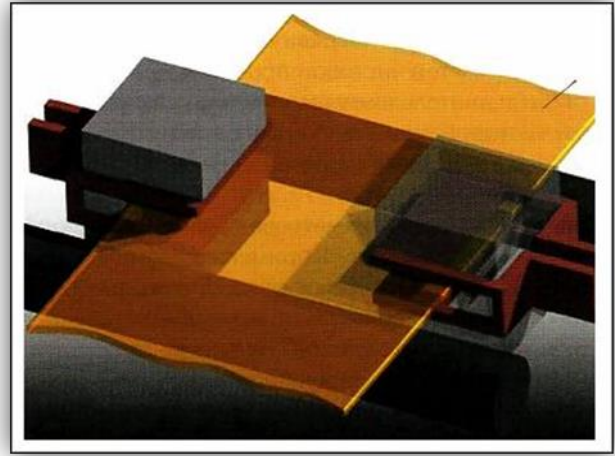
[elisit.ru/materiali/?pid=55]

Рисунок А.8



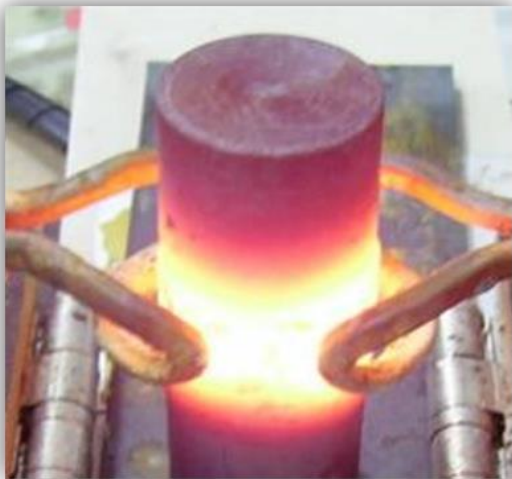
[[elisit.ru/materiali/?pid=55](http://elisit.ru/materiali/?pid=55)]

Рисунок А.9



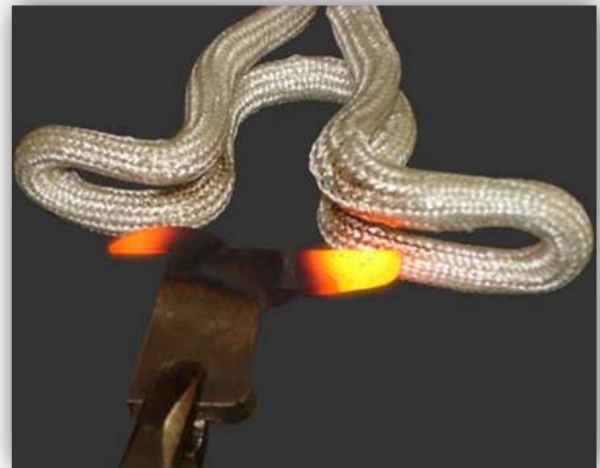
[[elisit.ru/materiali/?pid=55](http://elisit.ru/materiali/?pid=55)]

Рисунок А.10



[[clubpechnikov.ru/indukcionnaya-pech/](http://clubpechnikov.ru/indukcionnaya-pech/)]

Рисунок А.11



[[elisit.ru/foto](http://elisit.ru/foto)]

Рисунок А.12

Научное издание

**УПРАВЛЕНИЕ ТЕПЛОВЫМ СОСТОЯНИЕМ  
ТОНКОЛИСТОВОГО ПРОКАТА ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ  
РАВНОМЕРНОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ  
МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ**

Монография

**Кухарь Владимир Валентинович  
Присяжный Андрей Григорьевич  
Балалаева Елена Юрьевна  
Тузенко Ольга Александровна  
Курпе Александр Геннадиевич  
Кармазина Ирина Васильевна**

Формат 60x84 <sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Усл. печ. л. 7,0  
Тираж 300 экз. Зак. № .

Напечатано в Полиграфическом центре  
ГВУЗ «Приазовский государственный  
технический университет»  
ул. Университетская, 7, г. Мариуполь, 87555,  
Донецкая обл., Украина  
Тел. (0629) 44 64 07

Свидетельство внесения субъекта  
издательской деятельности  
ДК № 3729 от 15.03.2010 г.