

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«МАГНИТОГОРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ ИМ. Г.И. НОСОВА»

На правах рукописи



**Масленников Константин Борисович**

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ И ОБОРУДОВАНИЯ  
ПРОИЗВОДСТВА ТРУБНОГО ПРОКАТА КЛАССА ПРОЧНОСТИ К60 НА  
ОСНОВЕ МОДЕЛИРОВАНИЯ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ**

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени кандидата технических наук

2.5.7. Технологии и машины обработки давлением

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор

Платов Сергей Иосифович

Магнитогорск, 2023

**СОДЕРЖАНИЕ**

ВВЕДЕНИЕ .....	4
ГЛАВА 1. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ПРОИЗВОДСТВА ТОЛСТОЛИСТОВОГО ТРУБНОГО ПРОКАТА.....	12
1.1 Оборудование толстолистовых станов (ТЛС) .....	13
1.2 Технология КТМО .....	21
1.3 Моделирование физических процессов при КТМО .....	28
1.4 Выводы по главе 1 .....	35
ГЛАВА 2. МОДЕЛЬ ИЗМЕНЕНИЯ ТЕПЛОВОГО СОСТОЯНИЯ ПРОКАТА НА ЛИНИИ ТЛС ГОРЯЧЕЙ ПРОКАТКИ .....	37
2.1 Проведение предварительных промышленных экспериментов .....	37
2.2 Анализ влияния элементов конструкции ТЛС «5000» ПАО «ММК» на процессы теплоотдачи .....	45
2.3. Длительности технологических операций .....	60
2.4. Настройка адаптационных параметров модели к условиям ТЛС «5000» ПАО «ММК» .....	62
2.5. Эмпирические исследования проката .....	64
2.6. Построение расчетной модели .....	69
2.7. Результаты математического моделирования теплового состояния металла на линии ТЛС.....	74
2.8. Проверка сходимости модели .....	86
2.9. Выводы по главе 2 .....	88
ГЛАВА 3. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РАСЧЕТА ЗНАЧЕНИЙ ФИЗИКО- МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ТРУБНОГО ПРОКАТА .....	89
3.1 Построение и проверка сходимости расчетной модели .....	89
3.2 Программная реализация математической модели.....	100
3.3 Выводы по главе 3 .....	104
ГЛАВА 4. ВНЕДРЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ РАБОТЫ .....	105
4.1 Внедрение программного комплекса в производственные процессы ПАО «ММК» .....	105

4.2. Рекомендации по совершенствованию технологических режимов производства проката .....	106
4.3. Рекомендации по совершенствованию системы КИП.....	110
4.4. Технические рекомендации по совершенствованию оборудования.....	114
4.4 Выводы по главе 4 .....	117
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	119
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	125
ПРИЛОЖЕНИЕ А – ВАРИАТИВНОСТЬ НЕЗАВИСИМЫХ ПЕРЕМЕННЫХ ВЫБОРКИ.....	142
ПРИЛОЖЕНИЕ Б – КОЭФФИЦИЕНТЫ ПРИ НЕЗАВИСИМЫХ ПЕРЕМЕННЫХ УРАВНЕНИЙ РЕГРЕССИЙ .....	145
ПРИЛОЖЕНИЕ В – АКТЫ ВНЕДРЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ РАБОТЫ.....	156

## ВВЕДЕНИЕ

Магистральные нефте- и газопроводы являются критически важными элементами транспортной инфраструктуры, как в России, так и во многих промышленно развитых странах мира. Интенсивный поиск залежей нефти и природного газа показал, что, как правило, они расположены в отдалении от индустриальных регионов, которые являются основными потребителями энергоносителей.

К трубной продукции предъявляются повышенные требования, соответствующие ее назначению. Стоит отметить, что производители труб зачастую сталкиваются с комплексными требованиями, в некоторой степени противоречащими друг другу. К примеру, важным требованием является повышение экономической эффективности транспортировки нефти и газа. С целью выполнения данного требования проводятся активные работы, направленные на решение таких задач, как повышение рабочего давления в магистральной трубе, конверсия газа в жидкость, обеспечение эффективной транспортировки жидкого газа. С другой стороны, не менее важным актуальным требованием является обеспечение надежной и безопасной эксплуатации магистральных трубопроводов. Поскольку длина магистральных трубопроводов велика (в России общая протяженность магистральных трубопроводов двух ведущих отечественных компаний – ПАО «Газпром» и ПАО «Транснефть» – превышает 230 тысяч километров), решение данного комплекса требований требует существенных затрат. Таким образом, вопросы снижения стоимости труб и обеспечения экономической эффективности их эксплуатации становятся первостепенными.

По этим причинам, несмотря на текущий уровень науки и техники, исследования в области производства трубной заготовки и труб для магистральных трубопроводов постоянно продолжаются. Этот блок исследований носит комплексный характер и включает решение вопросов всего цикла производства, от

выплавки и прокатки стали до технологии производства труб, монтажа и методов контроля (для вновь созданных трубопроводов и для трубопроводов, находящихся в эксплуатации). Одной из важнейших целей данных исследований является прогноз прочностных и пластических характеристик материала на основе данных мониторинга и контроля технологического процесса.

Уровень физико-механических свойств стального толстолистового трубного проката определяется его фазовым, структурным и тепловым состояниями в процессе и по завершению производства. Ключевой задачей в разработке новых технологий является выбор режима контролируемой прокатки (КП) и термической обработки, обеспечивающего достижение необходимого фазового и структурного состояний. Понимание механизмов, контролирующих кинетику распада аустенита, протекание фазовых превращений и формирование структур в стали имеет важное практическое значение [1,2,3].

Традиционные представления, основанные на принципах равновесной термодинамики, играют важную роль в выборе технологических режимов. Однако в большинстве случаев высокий уровень свойств достигается не только в результате выделения равновесных продуктов фазовых превращений, но и благодаря формированию тех или иных метастабильных структур [4,5]. Особое значение приобретают закономерности, определяющие зарождение и развитие фазовых и структурных составляющих.

Прорывной скачок в повышении прочностных характеристиках малоуглеродистых низколегированных сталей произошёл в 70-е годы XX века. Он был связан с внедрением в прокатное производство технологии контролируемой термомеханической обработки (КТМО), сущность которой заключается в контролируемой прокатке с обеспечением температурно-деформационного режима и последующим контролируемом ускоренном охлаждении (УО), позволяющим достичь требуемого уровня дисперсности микроструктуры. С целью реализации данного способа производства в требуемых объёмах на промышленных площадках отечественных лидеров металлургической промышленности – ПАО «Магнитогорский металлургический комбинат», ПАО «Северсталь», АО

«Выксунский металлургический завод» – построен и введён в эксплуатацию ряд специализированных толстолистовых станов (ТЛС) горячей прокатки «5000».

В современных низкоуглеродистых сталях для магистральных трубопроводов высокая конструктивная прочность обеспечивается следующими аспектами:

- 1) высокая чистота сталей по примесям и обеспечение требуемой композиции легирующих элементов;
- 2) микроструктура, характеризующаяся малым размером зерна и минимизированным присутствием перлита;
- 3) сбалансированное сочетание всех механизмов упрочнения.

Высокая дисперсность достигается за счет применения контролируемой прокатки и ускоренного охлаждения, обеспечивающего распад значительной части аустенита в интервалах температур и мощностей тепловыделений, характерных для бейнитного превращения. Как следствие, понимание условий протекания процессов изменения и формирования теплового и структурного состояний при КТМО является необходимым для повышения эффективности технологии производства.

Для решения задач существенного ускорения и удешевления процессов разработки новых сталей и стальных изделий используют физически обоснованное моделирование, описывающее процессы распада аустенита, изменения теплового и формирования структурного состояний.

Значительные успехи в этом направлении достигнуты такими специалистами, как: Вакс В.Г., Салганик В.М., Кристиан Дж., Счастливец В.М., Румянцев М.И., Эфрон Л.И., Шаталов Р.Л., Колбасников Н.Г., Горностырев Ю.Н., Кацнельсон М.И., Лобанов М.Л., Мазур И.П., Мунтин А.В., Яковлева И.Л., Шишов И.А., Мирзаев Д.А., Хотинев В.А., Разумов И.К., Дёма Р.Р., Чикишев Д.Н., Моллер А.Б., Лихтенштейн А.И. При этом следует отметить, что, несмотря на высокий уровень проработки данной области, многие аспекты моделирования формирования структурного и изменения теплового состояний стали продолжают быть актуальными и нуждаются в дальнейшем исследовании.

**Актуальность работы** обусловлена требованиями, предъявляемыми к трубной промышленности, в отношении обеспечения стабильности получения необходимого уровня физико-механических свойств трубной заготовки для повышения надёжности эксплуатации магистральных трубопроводов.

**Объект исследования** - низколегированный малоуглеродистый стальной прокат толщиной до 40 мм класса прочности К60, предназначенный для производства электросварных прямошовных высокопрочных труб большого диаметра.

**Предмет исследования** – механизм формирования теплового состояния целевого проката при его производстве.

**Целью работы** является обеспечение требуемого уровня физико-механических свойств трубного проката класса прочности К60 путем разработки комплекса мероприятий по совершенствованию технологии и оборудования его производства с использованием теплофизического и математического моделирования.

В соответствии с целью работы поставлены следующие **задачи**:

- 1) проведение анализа влияния технологических процессов горячей прокатки и ускоренного охлаждения на тепловое и структурное состояния проката; определение граничных условий и длительностей процессов теплообмена при каждой значимой технологической операции;
- 2) определение критических температур, зависимости теплоёмкости от температуры и величины теплового эффекта распада аустенита в целевой стали в условиях, соответствующих производственным; построение модели изменения теплового состояния проката на линии толстолистового стана (ТЛС) горячей прокатки;
- 3) разработка математической модели прогнозирования значений физико-механических свойств проката на основе расчетных данных о его тепловом состоянии при прохождении линии ТЛС;
- 4) разработка программного комплекса, реализующего расчет теплового состояния и прогнозирование физико-механических свойств трубного проката;

5) предоставление рекомендаций по совершенствованию машин и технологии процесса КТМО трубного проката.

**Научная новизна работы** заключается в следующем:

1) разработана научно-обоснованная методика расчёта распределения температуры по толщине горячекатаного трубного проката после реверсивной прокатки и ускоренного охлаждения, отличающаяся от известных учётом приращения температуры, обусловленного процессами распада аустенита в установленном диапазоне температур  $A_3 \sim [880 \text{ }^\circ\text{C}) - A_1 \sim [700 \text{ }^\circ\text{C})$ ;

2) получены новые зависимости, описывающие изменение коэффициента теплоёмкости ( $C_p$ ) от температуры при горячей деформации и последующем охлаждении. Использование предложенных зависимостей позволило уточнить известные теплофизические модели изменения теплового состояния прокатываемой заготовки на всех этапах её производства; для трубных марок сталей определен диапазон изменения коэффициента теплоёмкости:  $[0,42-1,31]$  Дж/(г·К);

3) уточнена математическая модель прогнозирования значений физико-механических свойств трубного проката (временного сопротивления, предела текучести, ударной вязкости, твёрдости и доли вязкой составляющей при испытаниях падающим грузом), отличающаяся тем, что модель позволяет использовать данные разработанной модели теплового состояния трубного проката с учётом приращения температуры обусловленного процессами распада аустенита; достоверность прогнозных значений уточнённой модели составляет: для временного сопротивления –  $[98,3]$  %, для предела текучести –  $[97,9]$  %, для ударной вязкости –  $[94,19]$  %, для твёрдости –  $[96,28]$  %, для доли вязкой составляющей при испытаниях падающим грузом –  $[97,95]$  %.

**Практическая значимость работы** заключается в следующем:

1) разработан программный алгоритм, реализующий методику расчёта распределения температуры проката для линии ускоренного охлаждения; проверка достоверности результатов расчета программного комплекса проведена с использованием данных автоматизированной системой управления



технологическими процессами (АСУТП) ТЛС «5000» ПАО «ММК»; показано, что средняя погрешность расчета составляет 13,7 %;

2) создано программное обеспечение (ПО), позволяющее прогнозировать значения физико-механических свойств трубного проката; для прогноза используются расчёты послыного теплового состояния; достоверность результатов расчета ПО верифицирована с использованием данных, предоставляемых автоматизированной системой управления производством (АСУП) ТЛС «5000» ПАО «ММК»; показано, что при сравнении расчетных и фактических данных средняя относительная погрешность составляет [1,03...5,81] %;

3) с использованием разработанных программных средств спроектирован технологический режим производства трубного проката, обеспечивающий приращение значений физико-механических свойств до 14 %;

4) предложена усовершенствованная система контрольно-измерительных приборов (КИП) ТЛС «5000» ПАО «ММК», позволяющая расширить область пирометрических измерений и обеспечить прогнозирование теплового состояния и физико-механических свойств проката по его ширине;

5) разработана новая конструкция коллектора ламинарного охлаждения, обеспечивающая снижение внутренних напряжений проката и позволяющая настраивать подачу охладителя по ширине проката при УО.

#### **Основные положения, выносимые на защиту:**

1) теплофизическая модель прогнозирования распределения температуры по толщине проката на технологической линии ТЛС «5000» ПАО «ММК», основанная на данных, полученных в результате проведения промышленных экспериментов, реализующая учёт теплового эффекта распада аустенита и использующая полученные эмпирически значения коэффициента теплоёмкости ( $C(t)$ );

2) математическая модель прогнозирования физико-механических свойств, использующая результаты расчётов послыного теплового состояния проката на технологической линии ТЛС «5000» ПАО «ММК»;

3) результаты внедрения комплекса моделей в составе специализированного программного обеспечения, включённого в бизнес-процессы ПАО «ММК» в качестве инструмента проектирования технологических режимов производства трубного проката;

4) комплекс технических и технологических рекомендаций по совершенствованию оборудования ТЛС «5000» ПАО «ММК», направленных на обеспечение требуемого уровня качества трубного горячекатаного проката и выявление влияния на него параметров технологического процесса.

Настоящая работа является комплексным исследованием, основанным на современных методах и практиках в области машин и технологий обработки давлением, используемых в прокатном производстве.

Для решения поставленных задач использовано современное исследовательское и экспериментальное оборудование: комплекс пробоподготовки Buehler, световой инвертированный металлографический микроскоп Nikon EPIPHOT-TME, цифровая камера PixeLINK, анализатор SIAMS 600, микротвердомер MICROMET 1, прибор синхронного теплового анализа Netzsch STA 449C Jupiter и др. Адекватность полученных экспериментальных данных подтверждена при помощи современной аттестованной аппаратуры. Достоверность работы основана на сопоставлении результатов теоретических исследований с промышленными экспериментами.

Основные результаты работы представлены на следующих конференциях, симпозиумах и форумах:

1) Международном симпозиуме «Перспективные материалы и технологии» (г. Брест, 2019 г.);

2) Национальной научно-практической конференции «Современные проблемы и перспективы развития науки, техники и образования» (г. Магнитогорск, 2020 г.);

3) Международной конференции «International conference on modern trends in manufacturing technologies and equipment» (г. Севастополь, 2020 г.);

- 4) Национальной научно-практической конференции «Фазовые и структурные превращения в стали и сплавах» (г. Екатеринбург, 2020 г.);
- 5) Международной научно-технической конференции «Пром-Инжиниринг» (г. Сочи, 2020 г.);
- 6) Евразийской научно-практической конференция «Прочность неоднородных структур» (г. Москва, 2021 г.);
- 7) 78-79 международных научно-технических конференциях «Актуальные проблемы современной науки, техники и образования» (г. Магнитогорск, 2020-2021 гг.);
- 8) Международной научной конференции «Актуальные проблемы прочности» (г. Витебск, 2022 г.).
- 9) Всероссийской научно-технической конференции с международным участием, посвященной 90-летию со дня рождения лауреата Государственной премии СССР, доктора технических наук, профессора Дмитриева Льва Борисовича (г. Тула, 2023 г.).

По материалам настоящей работы опубликовано 30 печатных работ в научно-технических изданиях, 6 работ опубликованы в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК, 9 статей в журналах, индексируемых в международных наукометрических базах данных Scopus и Web of Science.

## ГЛАВА 1. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ПРОИЗВОДСТВА ТОЛСТОЛИСТОВОГО ТРУБНОГО ПРОКАТА

Глобальный рост потребности в углеводородных энергоносителях подразумевает под собой рост протяжённости транспортных плеч от районов добычи до районов потребления. Протяженные участки магистральных трубопроводов часто располагаются в зонах повышенного риска эксплуатации. Высокие требования к прочностным характеристикам материала трубопроводов обусловлены экономической эффективностью их использования, которая достигается за счет повышения рабочего давления и утонения стенки трубы. Толстолистовой трубный прокат из малоуглеродистых низколегированных сталей, являющийся объектом данного исследования, относится к классу прочности K60 (Таблица 1.1) [6–9]. Следует отметить, что государственного отраслевого стандарта на классы прочности K65, K70, K80 на момент проведения описываемых работ не существует.

Таблица 1.1 – Требования к прочностным характеристикам основного металла труб для основных классов прочности с учётом их условного соответствия [6,7,8]

Класс прочности	Предел текучести $\sigma_{T0,5}$ , МПа (psi)		Временное сопротивление $\sigma_B$ , МПа (psi)		Отношение $\sigma_{T0,5} / \sigma_B$ , максимум
	минимум	максимум	минимум	максимум	
K48/X52/L360	360 (52200)	530 (76900)	460 (66700)	760 (110200)	0,93
K52/X60L415	415 (60200)	565 (81900)	520 (75400)	760 (110200)	0,93
K60/X70/L485	485 (70300)	635 (92100)	570 (82700)	760 (110200)	0,93
K65/X80/L555	555 (80500)	705 (102300)	625 (90600)	825 (119700)	0,93
K70/X100/L690	690 (100100)	840 (121800)	760 (110200)	990 (143600)	0,97

## Продолжение таблицы 1.1

Класс прочности	Предел текучести $\sigma_{T0,5}$ , МПа (psi)		Временное сопротивление $\sigma_B$ , МПа (psi)		Отношение $\sigma_{T0,5} / \sigma_B$ , максимум
	минимум	максимум	минимум	максимум	
К80/Х120/Л830	830 (120400)	1050 (152300)	915 (132700)	1145 (166100)	0,99

Для обеспечения данного комплекса требований к прокату необходимо получение целевого химического состава стали (путём микролегирования, Таблица 1.2) [10–17] и использование специальных технологий производства, обеспечивающих формирование высокодисперсной микроструктуры [18–20]. В современной металлургической практике наиболее распространён процесс КТМО [10,14,15,21], заключающийся в контролируемой прокатке с последующим контролируемым ускоренным охлаждением, формирующим высокодисперсную бейнитную микроструктуру с прокатного нагрева [22–25]. В мировой практике данный технологический процесс обычно называют «ТМСР».

Таблица 1.2 – Концентрация химических элементов в трубных сталях

Класс прочности	Максимальная концентрация химических элементов, масс. %									
	C	Si	Mn	Ni	Mo	V	Nb	Ti	Cu	Cr
К52	0,15	0,55	1,6	0,30	-	0,08	0,08	0,035	0,3	0,3
К60	0,09	0,15	1,85	0,30	0,3	0,06	0,06	0,035	0,3	0,3
К65	0,07	0,3	1,9	0,35	0,35	0,10	0,10	0,030	0,3	0,3

Реализуется данная технология на современных толстолистовых станах, представляющих собой сложные комплексы оборудования.

### 1.1 Оборудование толстолистовых станов (ТЛС)

Прокат для производства труб магистральных трубопроводов в России производится на трёх ТЛС:

- Стан «5000» ПАО «Северсталь», г. Череповец;
- ТЛС «5000» ПАО «ММК», г. Магнитогорск;
- МКС «5000» ПАО «ОМК», г. Выкса.

Техническое оснащение данных станов схоже, рассмотрим более детально ТЛС «5000» ПАО «ММК». На Рисунке 1.1 изображена упрощённая схема расположения оборудования данного стана.

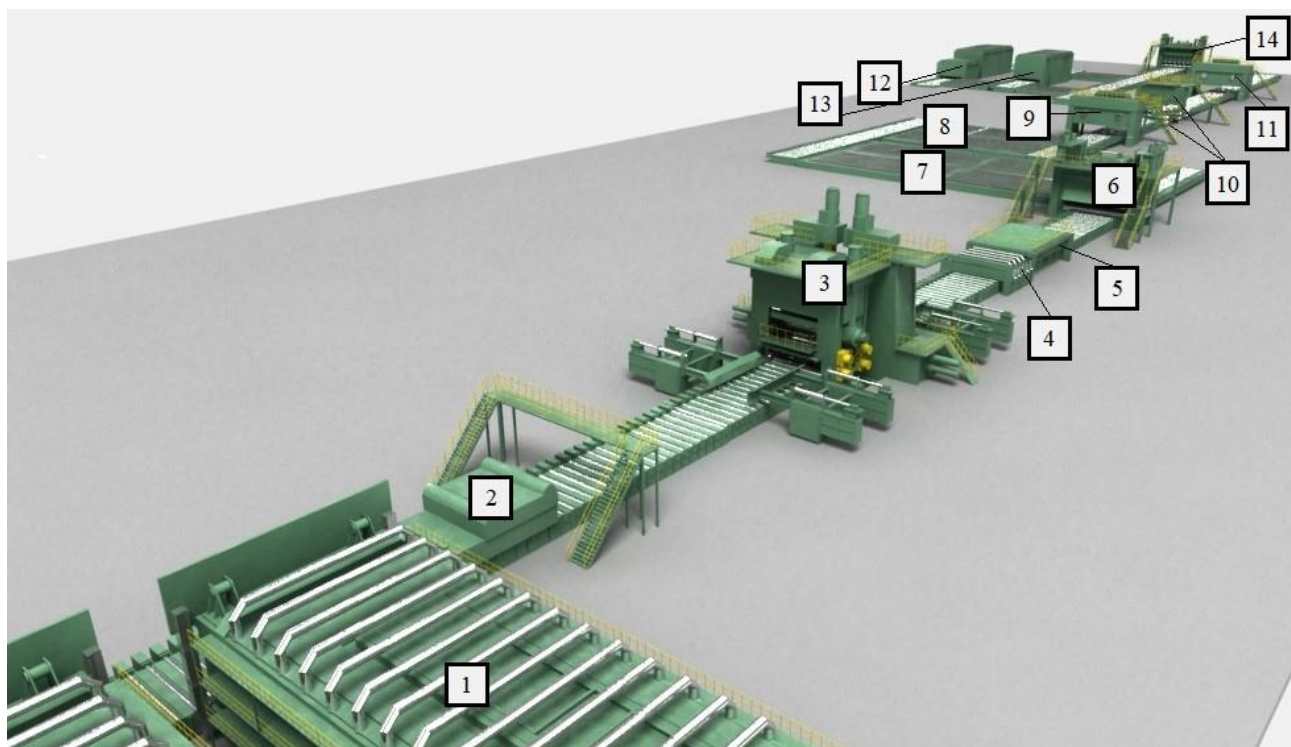


Рисунок 1.1 – Схема расположения оборудования ТЛС «5000» ПАО «ММК»:

1 – методические печи с шагающими балками, 2 – установка гидросбива печной окалины, 3 – прокатная клеть, 4 – спрейерная установка УО, 5 – ламинарная установка УО, 6 – роликотправильная машина горячей правки, 7 – холодильник, 8 – инспекторский стол, 9 – ультразвуковой контроль (УЗК), 10 – ножницы поперечной и продольной резки, 11 – делительные ножницы (порезка на мерные), 12 – роликовая печь закалки, 13 – роликовая печь нормализации, 14 – роликотправильная машина холодной правки

Подкатом для стана служат непрерывнолитые слябы или предварительно обжатые (катаные) непрерывнолитые слябы, соответствующие следующим размерам [9]:

- толщина – от 180 до 350 мм;

- ширина – от 1400 до 2700 мм;
- длина – от 2500 до 4800 мм.

Нагрев слябов производится в методических печах. Применяются печи проходного типа, многозонные, с шагающей балкой. Для отопления используется природный газ и коксо-доменная смесь (удельная теплота сгорания  $\sim 25$  МДж/м<sup>3</sup>).

Зональное деление печей следующее: зона предварительного нагрева, три зоны основного нагрева и «томильная» зона выравнивания температуры. В предварительной зоне осуществляется щадящий нагрев слябов до 700–1000 °С, в зонах основного нагрева сляб постепенно прогревается до температуры выдачи, в зоне выравнивания поддерживается температура на 20–50 °С ниже предыдущей для минимизации разности температур по толщине сляба. Наличие нескольких основных зон позволяет гибко настраивать режим нагрева для обеспечения требуемой микроструктуры сляба при выдаче.

ТЛС «5000» является одноклетьевым реверсивным станом. Клеть универсальная, типа «кварто». Размеры рабочих валков: диаметр бочки  $D_6$  – 1110–1210 мм, длина бочки  $L_6$  – 5300 мм. Размеры опорных валков: диаметр бочки  $D_6$  – 2100–2300 мм, длина бочки  $L_6$  – 4950 мм. Максимальное усилие прокатки  $\sim 120$  МН. Максимальная мощность главного привода  $\sim 24$  МВт ( $2 \times 12$  МВт). Максимальный крутящий момент при прокатке  $\sim 7,64$  МН/м ( $2 \times 3,82$  МН/м) [9].

Прокатка осуществляется реверсивно. При необходимости, после чётных проходов заготовка подвергается вертикальному обжатию, для чего перед рабочей клетью установлен эджер. Диаметр вертикальных валков – 900–1000 мм, длина бочки – 600 мм. Максимальное усилие прокатки  $\sim 5$  МН, максимальное обжатие  $\sim 50$  мм, мощность главного привода  $\sim 2,5$  МВт ( $2 \times 1,25$  МВт) [9].

На стане предусмотрена возможность осуществления поперечной прокатки [9,16,26] (Рисунок 1.2) с применением поворотных рольгангов, располагающихся перед и за клетью.

Конечные размеры проката соответствуют следующим диапазонам [9]:

- толщина – от 8 до 160 мм;
- ширина – от 1500 до 4800 мм;

- длина – от 4500 до 24000 мм.

После прокатки в технологическом процессе участвует установка УО. С её помощью осуществляется тепловое упрочнение стали с прокатного нагрева [9,22,27]. Стан «5000» оснащён комбинированной установкой УО, включающей в себя участки спрейерного и ламинарного охлаждения.

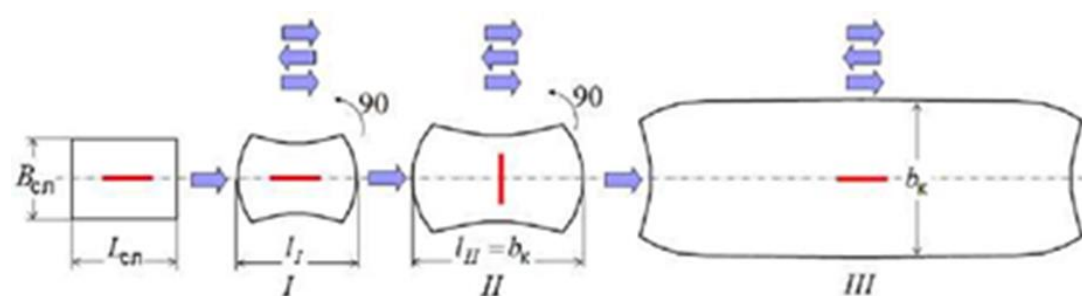


Рисунок 1.2 – Реверсивная прокатка сляба с разворотом [16]:  
I – протяжка; II – разбивка ширины; III – прокатка на заданную толщину

Установка спрейерного охлаждения осуществляет снятие теплоты с поверхности проката водо-воздушной смесью в виде дисперсного факела распыления. Особенностью данного процесса является высокий уровень равномерности охлаждения при сравнительно низком теплосъёме. Также следует отметить высокую шумность спрейерного охлаждения. При производстве трубного проката целевого класса прочности данная установка используется в комплексе с установкой ламинарного охлаждения. Длина установки – 6400 мм, максимальный расход охладителя  $\sim 70000$  м<sup>3</sup>/ч, максимальное давление в коллекторе  $\sim 5$  бар.

Установка ламинарного охлаждения с U-образными трубками (Рисунок 1.3) обеспечивает достаточный диапазон скоростей охлаждения для производства трубного проката. Конструкция установки сравнительно проста, надёжна и относительно низкочатратна в эксплуатации, однако она не оснащена инструментом, способным обеспечить различный теплосъём по ширине проката. Длина установки – 24000 мм, максимальный расход охладителя  $\sim 13000$  м<sup>3</sup>/ч, рабочее давление в коллекторе  $\sim 0,7-0,8$  бар [9]. Рабочая температура охладителя  $\sim 21-25$  °С.



Современные установки УО обеспечивают широкий диапазон скоростей охлаждения: 5–50 °С/с. Возможна комбинированная настройка охлаждения по длине установки вплоть до полного вывода произвольного ряда коллекторов из работы для обеспечения охлаждения на воздухе при условии соблюдения рабочей температуры охладителя.



Рисунок 1.3 – Современная установка ламинарного УО с U-образными трубками производства SMS-Group [28]

Для производства трубного проката повышенных классов прочности используют следующие режимы УО с возможной последующей термообработкой:

- ускоренное охлаждение со скоростью 5–20 °С/с до температуры 450–650 °С;
- интенсивное ускоренное охлаждение со скоростью от 20 до 50 °С/с до температуры 400–200 °С и отпуск в печах теплового отделения (ТО) при необходимости;
- закалка с прокатного нагрева листов толщиной до 30 мм (при больших толщинах трудно избежать переохлаждения поверхности) со скоростью до 50 °С/с до комнатной температуры; после чего проводят высокий отпуск в печах теплового отделения.

Несмотря на широкие возможности применения современных установок ламинарного охлаждения, следует отметить наличие проблемы получения требуемой плоскостности проката после УО. Дефекты плоскостности (волнистость, коробоватость, серповидность, загнутые концы листов, дугообразность) возникают вследствие таких причин, как [29–34]:

- тепловой клин проката по длине и ширине;
- излишние внутренние напряжения в прокате после деформации вследствие погрешностей при настройке клетки;
- неоднородность химического состава по длине и ширине проката;
- неравномерный теплоотвод при УО.

В частности, в работе [29] приведены результаты анализа влияния неравномерности теплового поля раската по длине и ширине заготовки на формирование дефектов плоскостности. На основании обширной выборки изображений тепловых полей заготовок, полученных после УО, и данных контроля качества продукции было установлено, что удовлетворительный уровень плоскостности проката достигается при равномерном характере тепловых полей. При превышении площади зон, значительно отличающихся температурой поверхности, порогового значения в 15–20% вероятность получения дефектов плоскостности значительно возрастает. Также в работе [33] показано влияние неравномерности теплового поля проката на появления ряда дефектов, в том числе на дефекты плоскостности.

Значительный вклад в снижение внутренних напряжений заготовки может внести повышение гибкости настройки отвода тепла от заготовки по её ширине. Наряду с имеющимися на современных ТЛС системами обдува кромки, варьирование объёмами подачи охладителя позволит в значительной степени компенсировать исходное неравномерное распределение температуры. Данная технология может быть реализована за счет использования контролируемого уменьшения подачи охладителя в прикормочные области проката. Отличительной особенностью данного подхода также является значительное снижение расхода воды чистого рабочего контура стана.

Для компенсации имеющихся отклонений плоскостности продукции, современные ТЛС оборудованы специальными агрегатами – роlikоправильными машинами (РПМ), на которых осуществляется упругопластический изгиб [35] посредством пропуска проката через правильные ролики, расположенные в шахматном порядке. Примером современных машин такого типа могут служить РПМ производственной линейки MultiFlex (Рисунок 1.4) компании SMS Siemag [28].



Рисунок 1.4 – РПМ MultiFlex производства компании SMS Siemag

На ТЛС «5000» ПАО «ММК» и АО «ВМЗ» установлены по три РПМ данного типа:

- предварительной правки листа после прокатки (пятироликсовая);
- горячей правки после ламинарного охлаждения (девятироликсовая);
- холодной правки после остывания проката (девятироликсовая).

На данных РПМ реализована возможность индивидуальной настройки правильных роликов с помощью клиновых пар и позиционно регулируемых гидравлических цилиндров. Поддерживаемый предел текучести проката: 250–1250 Н/мм<sup>2</sup> в зависимости от толщины. Возможна правка в реверсивном режиме. Поддерживаемая толщина проката – 8–50 мм, ширина – 900–4800 мм, длина – до 24 м.

РПМ горячей правки оснащена 9 правильными роликами (4 сверху, 5 снизу) с диаметром бочки  $D_6 = 360$  мм и длиной бочки  $L_6 = 5200$  мм и 48 опорными роликами с  $D_6 = 360$  мм и различными длинами бочек. Максимальное усилие правки  $\sim 40$  МН.

РПМ холодной правки оснащена 9 правильными роликами (4 сверху, 5 снизу) с  $D_6 = 220$  мм и  $L_6 = 5100$  мм и 252 опорными роликами с  $D_6 = 220$  мм и  $L_6 = 120$  мм. Максимальное усилие правки  $\sim 35$  МН, мощность главного привода  $\sim 1620$  кВт (9x180 кВт) [9].

Значительный вклад в минимизацию данных дефектов может внести внедрение в технологию УО «неравномерного» отвода теплоты от заготовки по ширине, что позволит в значительной степени компенсировать исходное неравномерное распределение температуры. Данная технология может быть реализована за счет использования контролируемого уменьшения подачи охладителя в прикормочные области. Одной из отличительных особенностей данного подхода является значительное снижение расхода воды чистого рабочего контура стана.

Порезка проката на листы осуществляется на линии стана. Используются следующие виды ножниц:

- поперечной резки, концевые;
- продольной резки и сдвоенные кромкообрезные;
- поперечной резки, делительные, катящегося реза.

Концевые ножницы обеспечивают усилие реза – 16 МН, кромкообрезные ножницы – 6,5 МН, ножницы продольной – 11 МН. Все ножницы рассчитаны на твердость ножа HRC – 52–54.

Комплекс оборудования стана рассчитан на производство металлопроката со следующими предельными прочностными характеристиками при температуре  $+20$  °С:

- $\sigma_B - 1200$  МПа;
- $\sigma_T$  при толщине листа  $\leq 40$  мм – 1000 МПа;
- $\sigma_T$  при толщине листа  $> 40$  мм – 1200 МПа;

## 1.2 Технология КТМО

Технология производства проката заключается в последовательном прохождении заготовкой ряда технологических операций. На Рисунке 1.5 представлена технологическая схема производства толстого листа на современном ТЛС. Для производства исследуемого сортамента наиболее распространена схема КТМО с контролируемой прокаткой, УО и без последующей термообработки.

Основные диапазоны параметров технологических режимов исполнения процесса КТМО приведены в Таблице 1.3.

Таблица 1.3 – Технологические параметры производства толстолистного проката и плит на ТЛС «5000»

№ п/п	Вид КТМО	Температура нагрева слябов, °С	Температура конца прокатки, °С	Скорость охлаждения проката, °С/сек	Конечная температура охлаждения, °С	Температура отпуска, °С
1	КП	1150–1200	690–740	-	-	-
2	КП+УО	1150–1200	750–890	10–0	600–450	-
3	КП+УО	1150–1200	750–890	20–35	400–200	600–650

Как показано в Таблице 1.3, температура нагрева сляба перед прокаткой для сталей классов прочности К60–К65 составляет 1150–1200 °С.

Конечная температура сляба должна обеспечить:

- однородность температуры в объеме сляба ( $\pm 20$  °С по толщине);
- требуемый размер зерна аустенита (в зависимости от химического состава стали от 20 мкм до 200 мкм);
- растворение в аустените необходимого количества карбонитридов микролегирующих элементов.

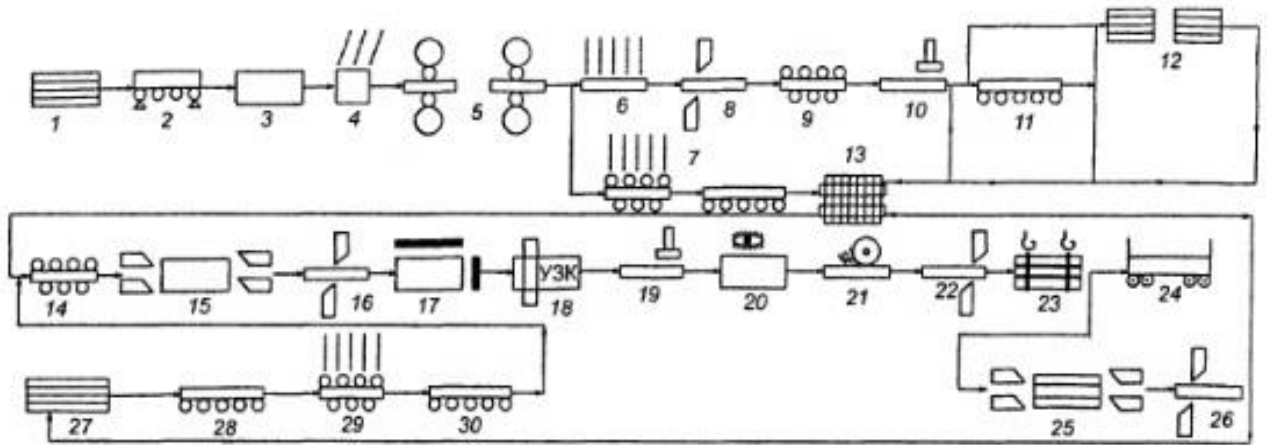


Рисунок 1.5 – Технологическая схема производства толстого листа на ТЛС: 1 – склад слябов; 2 – весы; 3 – нагрев слябов; 4 – гидросбив окалины; 5 – прокатка; 6 – ускоренное охлаждение; 7 – закалка с отпуском; 8 – обрезка концов; 9 – горячая правка; 10 – клеймение; 11 – нормализация; 12 – охлаждение в стопах; 13 – охлаждение на холодильнике; 14 – холодная правка; 15 – обрезка кромок; 16 – резка на мерные длины; 17 – контроль размеров; 18 – УЗК ; 19 – маркировка; 20 – инспекция; 21 – зачистка; 22 – отбор проб; 23 – пакетирование; 24 – отгрузка листов; 25 – роспуск листов; 26 – вырезка брака; 27 – промежуточный склад; 28 – нагрев под закалку; 29 – закалка; 30 – отпуск

Требуемая температура выгрузки из печи зависит от химического состава стали. При этом с точки зрения упрочнения трубного сортамента, наибольший интерес представляют карбонитриды Nb, V, Ti, так как они образуют достаточно стабильные частицы, постепенно выделяющиеся из аустенита в требуемых для прокатки температурных диапазонах.

После разливки и выдержки сляба на складе эти частицы сравнительно велики, и в процессе нагрева сляба достаточно большой их объём необходимо растворить в аустените. В работах [17,36,37] приведены детальные данные по растворимостям различных карбидов и нитридов, основанные на экспериментальных исследованиях.

Для большинства марок стали целевого класса прочности результирующую температуру нагрева сляба определяют в зависимости от содержания углерода и ниобия (Рисунок 1.6), что является следствием особенностей выделения NbC, NbN [37–40].

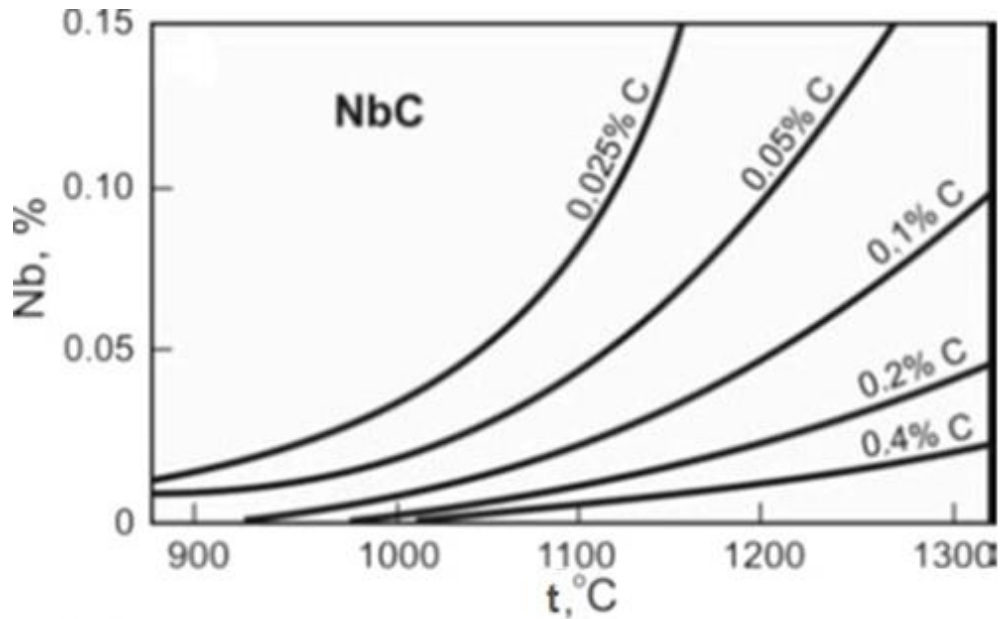


Рисунок 1.6 – Кривые растворимости NbC в аустените в зависимости от температуры и содержания углерода и азота [41]

С другой стороны, для обеспечения большей технологичности процесса контролируемой прокатки микролегированных сталей целесообразно по мере возможности снизить конечную температуру сляба, так как это позволит сократить время «подстуживания» проката на рольганге перед чистовой фазой прокатки.

Как отмечалось ранее, для получения требуемых физико-механических свойств при производстве трубного проката используется КП, отличием которой является контролирование одновременно режима обжатия и температуры заготовки при деформации (прежде всего, контролируются температуры конца черновой и чистовой прокатки), что создаёт условия для последующего формирования окончательной структуры при повышенной плотности плоскостей скольжения.

Иными словами, КП, наряду с требуемыми линейными размерами заготовки, позволяет получить высокую плотность субграниц в зернах аустенита (в процессе наклёпа) [11,13,14,39], а наличие выделяющихся из аустенита высокодисперсных частиц карбидов и нитридов Nb, Ti, V препятствует процессу динамического

возврата [14,42] (перераспределения дислокаций с формированием ячеистой структуры).

Подробно технология поперечной прокатки, методика расчёта режимов и анализ целесообразности её применения описаны в [9–12,15,22,43,44,45]. Как отмечалось ранее, контролируемая прокатка проходит в 2 фазы с промежуточным конвективным охлаждением проката на рольганге [23,46]. По данным работ [10,13] для исследуемого сортамента на черновой стадии прокатки наиболее целесообразно получать зерно аустенита со средним размером зерна  $D_{cp} \leq 50$  мкм, поэтому температура окончания стадии черновой прокатки не должна превышать значений 980–950 °С.

Следует отметить, что для получения необходимого уровня физико-механических свойств проката ключевым моментом технологии КТМО является соблюдение температурного «баланса» в различных фазах прокатки. Температура проката с одной стороны должна быть достаточно низкой, чтобы происходил достаточный наклёп аустенита, а с другой – достаточно высокой, чтобы во время чистовой фазы в поверхностных слоях не начался  $\gamma \rightarrow \alpha$ -переход, который серьёзно затрудняет деформацию и может приводить к формированию протяжённых областей структуры с текстурой прокатки ОЦК металлов, склонных к продольному растрескиванию [47,48,49]. Так, например, по данным работы [43] снижение температуры черновой фазы прокатки с 1140 до 1020 °С для Nb-V-низколегированной стали приводит к понижению температуры разрушения образца при испытаниях ударной вязкости (KCV) с –70 до –110 °С, что обусловлено формированием более дисперсной структуры.

Также при КП важным фактором является степень обжатия, так как она влияет на процессы рекристаллизации, от которых зависит дисперсность размера зерна аустенита по толщине проката, которая, в свою очередь, влияет на последующее образование участков речного бейнитного феррита, негативно сказывающегося на физико-механических свойствах проката, в особенности на результаты ИПГ [50,51].



Практика контролируемой прокатки трубного сортамента на ТЛС «5000» для черновой фазы свидетельствует о следующем:

- температура конца прокатки в черновой стадии должна составлять 1040–980 °С и выдерживаться с точностью  $\pm 10$  °С;
- суммарное обжатие в черновой стадии должно быть не менее 60 % (количество проходов не менее 4–5, обжатия в каждом проходе в диапазоне 12–15 %);
- черновую прокатку не следует проводить при пониженных температурах, чтобы не допустить массивного выделения соединений Nb по границам зёрен и не снизить последующую температуру чистовой фазы в зону, близкую к температуре  $A_3$ .

Второй этап контролируемой прокатки (чистовая фаза) характеризуется высокой суммарной степенью деформации и обеспечивает формирование конечной плотности границ субзёрен аустенита. На этом этапе аустенитные зёрна имеют уплощённую, вытянутую в направлении прокатки форму с множественными плоскостями скольжения и границами двойников.

Необходимо отметить, что величина и скорость деформации в чистовой фазе не должна способствовать развитию динамической рекристаллизации, для чего максимальная степень обжатия в чистовой фазе не должна превышать 15 %.

Для прогнозирования конечной микроструктуры трубного проката при КТМО крайне важно учитывать температуру конца прокатки (ТКП), так как она оказывает серьёзное влияние на физико-механические свойства трубных сталей. Для получения проката с высокой прочностью (классы прочности К60 и выше) и высоким процентом вязкой составляющей в изломе при температуре до  $-40$  °С необходимо обеспечить температуру конца прокатки для полос толщиной 6–12 мм в диапазоне 790–840 °С. В работах [47,52,53] отмечается, что повышение ТКП выше 890 °С приводит к формированию достаточно разнотекстурированной конечной структуры, представленной сравнительно крупными ( $D_{cp} \sim 3,4\text{--}4$  мкм) зёрнами и рекристаллизованной текстурой.

По данным работ [24,49,54,55,56] чистовая прокатка заготовки в температурных диапазонах, близких к температуре  $A_3$ , способна серьёзно повлиять на трещиностойкость готовой продукции. В частности, наихудшая с точки зрения характера разрушения картина поверхности (Рисунок 1.7 в, е) наблюдается на образцах, полученных при  $T_{\text{кл}} = 770 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Рисунок 1.7 демонстрирует присутствие микротрещин, свидетельствующих о склонности проката к «лавинообразному» разрушению в аварийных ситуациях. Такое поведение материала способно приводить к формированию протяженных магистральных трещин трубопроводов протяженностью до нескольких километров.

С точки зрения моделирования физических процессов при КТМО и, соответственно, прогнозирования физико-механических свойств готового проката, ТКП является отправной точкой для моделирования процессов охлаждения и кинетики распада аустенита при ускоренном охлаждении.

Основной характеристикой данного процесса является скорость охлаждения. Варьирование этого параметра осуществляется посредством задания определённой скорости движения проката в установке и настройкой расхода воды на коллекторы.

На ТЛС «5000» для трубного проката класса прочности К60 толщиной 21,6 мм, который в основном используется для магистральных трубопроводов, являются следующие значения параметров УО:

- виды УО — ламинарное и спрейерное;
- скорость транспортировки проката – 1,5–1,8 м/с;
- суммарный расход воды на участке спрейерного охлаждения ~ 627 л/м<sup>2</sup> мин;
- суммарный расход воды на участке ламинарного охлаждения ~ 11745 л/м<sup>2</sup> мин;
- скорость охлаждения – 12–18 °С/с.

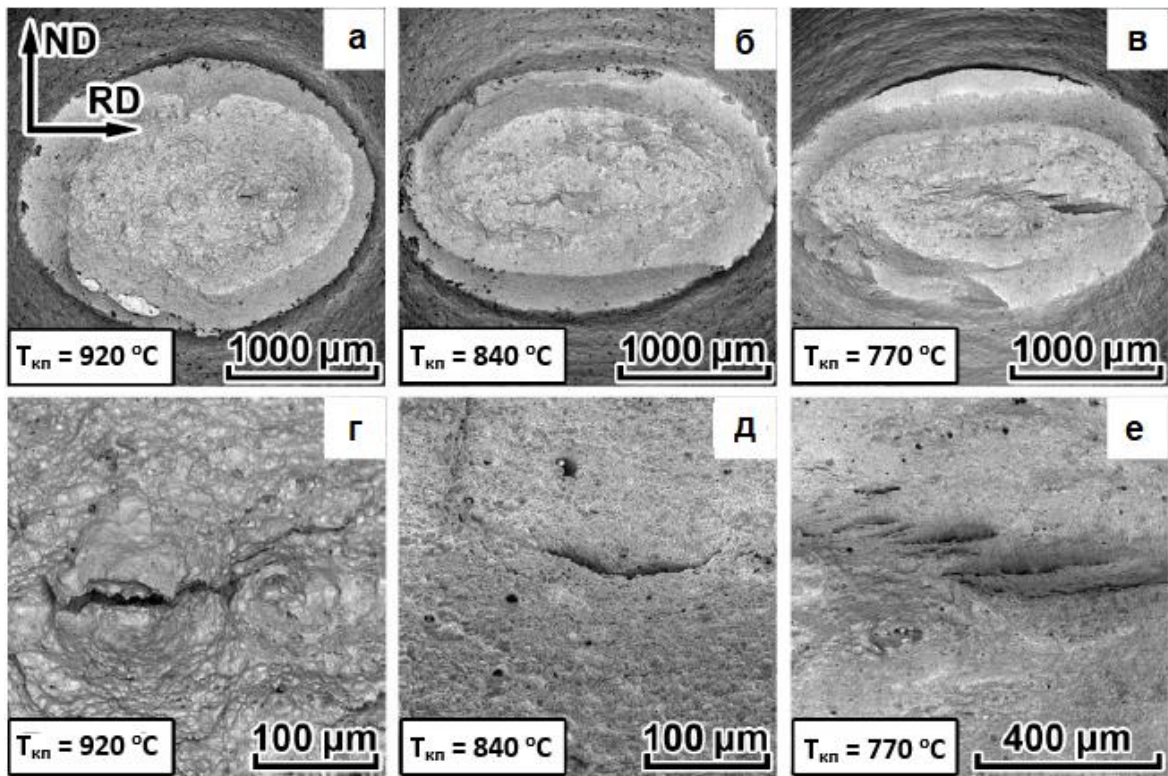


Рисунок 1.7 – Поверхность шейки разрушения после стандартного дилатометрического испытания цилиндрических образцов, полученных после различных режимов КТМО:

а, г –  $T_{кп} = 920 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $V_{yO} = [25-45] \text{ }^{\circ}\text{C/c}$ ; б, д –  $T_{кп} = 840 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $V_{yO} = [25-35] \text{ }^{\circ}\text{C/c}$ ;

в, е –  $T_{кп} = 770 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $V_{yO} = [20-30] \text{ }^{\circ}\text{C/c}$  [57]

Конечная микроструктура трубного листа, производимого посредством КТМО, формируется при и по завершению УО, таким образом, моделирование охлаждения и структурных превращений по толщине проката на участке УО представляет особый интерес. Следует отметить, что данный процесс является достаточно сложным ввиду толщины проката. Кроме того, интенсивное отведение теплоты с поверхности проката, частично компенсируемое кондуктивным поступлением теплоты из глубины [58], порождает различную кинетику образования бейнитной и ферритно-бейнитной структур по толщине [52,59,60,61]. При моделировании необходимо учитывать тепловой эффект этих превращений [62–65], который имеет значительное влияние на тепловое поле проката.

В работах [23,37,61,66] исследование образцов, полученных в результате промышленных экспериментов, показало, что изменение траектории охлаждения при одинаковых диапазонах ТКП может приводить к формированию различной

дисперсности в конечной микроструктуре. В рамках данных исследований  $D_{cp}$  уменьшился на  $\sim 5\%$  за счёт повышения интенсивности УО.

Исходя из изложенного выше, можно отметить, что для получения высококачественного трубного проката важнейшее значение имеет получение требуемой микроструктуры. Для осуществления достоверного прогноза структурного состояния проката в технологической линии ТЛС требуется применение различного рода моделей физических процессов, протекающих в стали в процессе производства.

Таким образом, на данный момент реализовано значительное количество исследований, касающихся прогнозирования и моделирования теплового и структурного состояния проката, однако проблема получения требуемых физико-механических свойств остаётся актуальной.

### **1.3 Моделирование физических процессов при КТМО**

Современные теоретические модели кинетики бейнитного превращения достаточно правдоподобно описывают базовые аспекты превращений в бейнитной стали [32,53,67–77]. В частности, в работах [68,69] был предложен микроскопический подход к теоретическому обоснованию полиморфных превращений на основании первопринципных расчётов с учётом решёточных и магнитных степеней свободы и диффузионного перераспределения углерода и легирующих элементов.

В ряде работ рассматривается влияние легирующих элементов на кинетику структурообразования в низкоуглеродистой высокопрочной стали. В данном контексте можно выделить работы [27,68,69,70,78]. Микролегирование Mo и B, размер зерен, а также накопленная на стадии чистой прокатки деформация, особенно если прокатка заканчивается ниже температуры  $A_3$  (при этом может наблюдаться ускорение ферритного превращения, DIFT – Deformation Induced Ferrite Transformation), могут существенно влиять на кинетику

структурообразования и приводить к повышению дисперсности конечной микроструктуры.

Распространено мнение, что легирование Mo и В может существенно замедлять кинетику феррито-перлитного превращения [38,78–81], так как данные химические элементы активно выделяются на границах аустенитных зерен, что приводит к торможению процессов зарождения феррито-перлитной фазы. На бейнитное превращение данные элементы, судя по всему, практически не влияют, так как его развитие в основном определяется ростом ферритных пластин в объёме зерна. Однако по данным [68,69] при повышенных температурах (650–700 °С), образование феррита ускоряется в стали, содержащей В и Мо, в то время как замедление ферритного превращения наблюдается при пониженных температурах (550–600 °С). Судя по всему, данное обстоятельство указывает на повышение барьера образования зародышей  $\alpha$ -фазы на границах зерен, содержащих сегрегации В или Мо. В то же время эти элементы увеличивают движущую силу роста  $\alpha$ -фазы, ускоряя превращение в области повышенных температур.

Важным инструментом повышения дисперсности ферритной структуры является ДИФТ. Измельчение зерна в процессе прокатки также может ускорять образование феррита при ускоренном охлаждении (Рисунок 1.8) [82], но на кинетику бейнитного превращения уровень предшествующей деформации и исходный размер зерна значимого воздействия не имеет. Она в большей степени определяется химическим составом стали. По достижении температуры старта ( $V_s$ ) бейнитное превращение развивается достаточно стремительно. Вопрос определения  $V_s$  для различного химического состава широко представлен в публикациях – для расчёта температуры  $V_s$  было предложено большое количество эмпирических формул [83].

Наиболее существенным фактором, определяющим формирование конечного структурного состояния проката, является его траектория охлаждения [55,66,84]. В зависимости от интенсивности охлаждения может реализовываться феррито-перлитная, феррито-бейнитная, бейнитные и бейнито-мартенситная [85,86,87] структуры. При этом температура и, как следствие,

структурообразование не однородны по толщине проката, поэтому моделирование процессов, происходящих при КТМО, имеет послойный характер. В работах [27,68,69,70,78,88–96] приведены описания ряда существующих моделей структурообразования в сталях. Несмотря на их достоверность, практическое применение данных моделей для процессов УО в значительной степени ограничено вследствие включения в них несовместимых с производственным процессом допущений. В частности, с их помощью с достаточной точностью описываются кинетики ферритного, перлитного и бейнитного превращений в условиях изотермической выдержки, но для непрерывного охлаждения, реализуемого в производственном процессе, применение их весьма затруднительно.

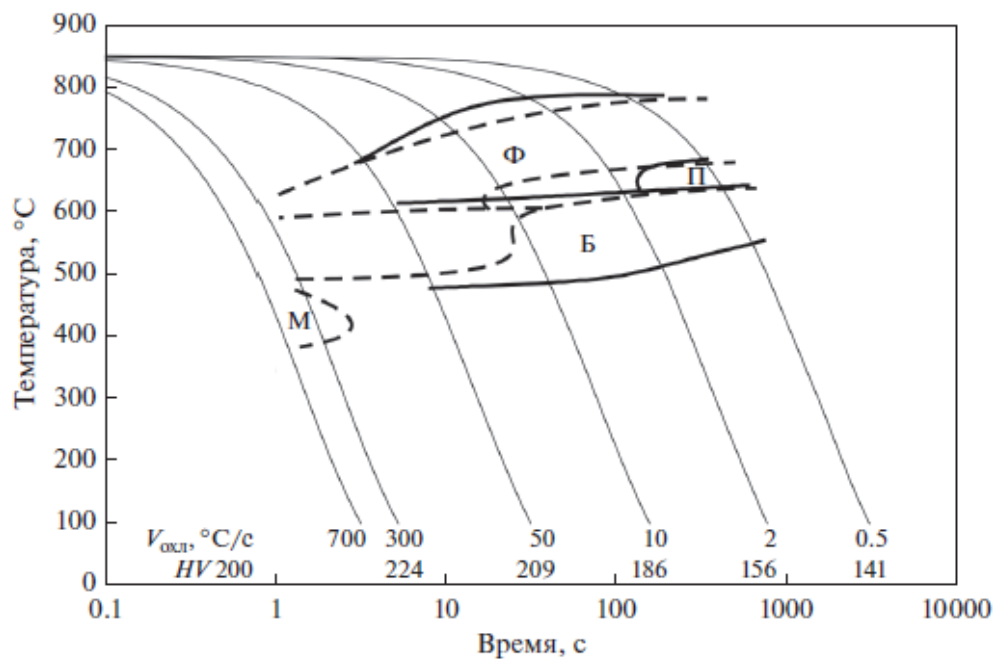


Рисунок 1.8 В, Термокинетическая диаграмма превращений в малоуглеродистой низколегированной стали [97]: сплошные линии – под воздействием деформации (15–20 % при 850 °С), штриховые – без деформации; Ф, П, Б, М – области формирования феррита, перлита, бейнита и мартенсита соответственно

Формированию микроструктуры и свойств трубной заготовки при КТМО на ТЛС «5000» посвящены работы [98–106]. Данные работы носят комплексный характер и рассматривают полный технологический цикл производства трубного проката. Описание физических процессов выполнялось методами

конечно-элементного и нейросетевого моделирования. Численные модели реализованы в программных комплексах Deform, Abaqus и Ansys. В работе [104] затронута тема компенсационных технологических воздействий при КТМО на отклонения и изменения технологического процесса предшествующих переделов: предложены компенсирующие режимы КП и УО, а также альтернативная схема легирования для экономии Nb, V, Ti. Однако, по нашему мнению, моделирование с учётом неравномерности теплового поля заготовки по её толщине может повысить достоверность прогнозирования физико-механических свойств.

Для осуществления прогнозирования конечного структурного состояния проката требуются результаты расчета его теплового состояния на линии стана. В частности, в работе [15] подробно описано послойное тепловое состояние заготовки при прокатке (Рисунок 1.9), полученное с использованием современного ПО моделирования деформации материалов Deform. Данный программный комплекс реализует моделирование распределения деформации и теплового состояния материалов. Модель базируется на системе уравнений (1.1–1.6) [15] и включает в себя уравнение состояния (1.1), условие несжимаемости (1.2), условие теплового баланса (1.3), модель напряжения текучести материала в зависимости от параметров деформации (1.4), дифференциальное уравнение движения (1.5) и кинематическое соотношение (1.6):

$$\left[ \begin{array}{l} \sigma_{ij} = \sigma_0 \delta_{ij} + (2\bar{\sigma} / 3\bar{\epsilon}); \\ v_{ii} = 0; \\ \rho c T = (k_l, T_i)_i + \beta \bar{\sigma} \bar{\epsilon}; \\ \bar{\sigma} = f(\bar{\epsilon}, \dot{\bar{\epsilon}}, T); \\ \sigma_{ij,j} + p(dv_i/dt) = 0; \\ \dot{\epsilon}_{ij} = 1/2(v_{i,j} + v_{j,i}), \end{array} \right. \quad \begin{array}{l} (1.1) \\ (1.2) \\ (1.3) \\ (1.4) \\ (1.5) \\ (1.6) \end{array}$$

где  $\sigma_{ij}$ ,  $\dot{\epsilon}_{ij}$ ,  $v_i$  – компоненты тензоров напряжения, скорости деформации и вектора скорости течения;

$\sigma_0$  – среднее нормальное напряжение;

$\delta_{ij}$  – символ Кронекера;

$\bar{\sigma}, \bar{\epsilon}, \bar{\dot{\epsilon}}$  – интенсивности напряжений, деформаций и скоростей деформации;

$\rho$  – плотность;

$c$  – удельная теплоёмкость;

$T$  – температура;

$k_i$  – теплопроводность;

$\beta$  – коэффициент перехода механической энергии в теплоту (0,9–0,95).

Тепловые граничные условия на свободной поверхности учитывают теплообмен конвекцией и излучением [15].

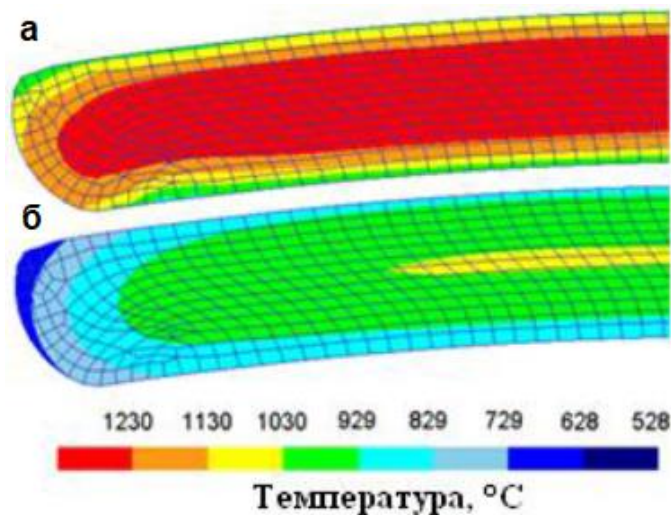


Рисунок 1.9 – Температурное поле в среднем сечении проката:

а – после черновой прокатки, б – после подстуживания

Результатом расчёта, осуществляемого методом конечных элементов, являются тепловые поля проката после деформации. Следует отметить достаточную точность данных расчетов. Их результаты применимы для прогнозирования физико-механических свойств проката, однако точность прогнозирования может быть повышена с применением моделирования, учитывающего деформационный разогрев металла при прокатке, а также теплоотвод и энтальпию ( $\gamma \rightarrow \alpha$ -переход) заготовки при УО.



В работе [107] приведён комплекс моделей, описывающих тепловое состояние полосы при горячей прокатке. Расчет теплового состояния в очаге деформации основан на численном решении одномерной задачи теплопроводности (граничные условия 2-го рода). Распределение температур по толщине полосы в установке ламинарного охлаждения описывается на основе применения граничных условий 3-го рода в пятне контакта с охладителем. Данное описание базируется на модели Y. Miyasaka [108] и ряда экспериментальных работ других авторов. Для расчета теплоотдачи при пленочном кипении использована аналитическая модель, представленная в работе [108]. Данные модели позволяют с достаточной достоверностью рассчитывать конечные температуры поверхностей горячекатаной полосы, однако являются неприменимыми для решения задач настоящей работы, ввиду значительной толщины целевого сортамента (до 40 мм), влекущей за собой неравномерное распределения температур по толщине проката при его охлаждении и, как следствие, возможное влияния данного распределения на физико-механические свойства готового проката.

В работах [58,98,109–116] достаточно подробно описывается методика моделирования охлаждения горячего проката на основе решения уравнения теплового баланса, получаемого при применении уравнения Остроградского к энтальпии системы, в интегральной форме с применением метода конечных элементов. Данный подход достаточно универсален и, что весьма важно, может быть применен в темпе с производством. В частности, в работах [109,110] подробно описано моделирование ускоренного охлаждения мелкосортного проката, которое с рядом поправок применимо и для листового проката [58,59,98–102,112–115].

В работах [98,99,100] предметной областью является производство на ТЛС «5000» ПАО «ММК». В данных работах достаточно подробно с точки зрения теплового состояния рассмотрено производство трубного проката класса прочности К60, однако в них не учтён тепловой эффект фазовых и структурных превращений при УО.

Вопрос деформационного разогрева при горячей прокате на текущий момент является достаточно спорным. В частности, существует мнение [117], что участие сил внутреннего трения при горячей прокатке не приводит к разогреву заготовки более чем на 5 % и им можно пренебречь. Для условий чистовой прокатки на ТЛС «5000» целесообразно учесть деформационный разогрев в связи с особенностями технологического процесса. Кроме того, чистовая фаза КП может проходить при температурах близких к  $A_3$ , в связи с чем возникает вероятность комплексного влияния деформационного разогрева и теплового эффекта  $\gamma \rightarrow \alpha$ -превращения на конечное распределение температуры по толщине проката.

Наряду с аналитическим и численным моделированием достаточно широко применяются средства статистического моделирования. В частности, в работах [43,118] представлены результаты масштабной работы по систематизации, аккомодации и верификации множества аналитических, численных и статистических моделей с широким применением статистических методов анализа и моделирования для различных исследуемых сортаментов, в том числе и для толстолистового проката.

В работе [118] описано решение задачи прогнозирования физико-механических свойств регрессионными и нейросетевыми методиками с авторскими наборами предикторов. Отклонения полученных результатов составили 1,4–14,5 % для регрессионных моделей и 0,4–3,4 % при применении нейросетей, что является признаком весьма высокой точности прогноза. В работе [119] применено нейросетевое моделирование для прогнозирования твёрдости горячекатаного проката на основании химического состава стали и значений некоторых параметров микроструктуры. Средняя квадратичная ошибка составила  $\sim 3$  HRB. Следует отметить, что достижение более высокой точности прогноза может быть осуществлено за счет применения в качестве независимых переменных, наряду с традиционными параметрами, результаты моделирования теплового состояния проката с учётом энтальпии системы при УО.

Традиционно статистические методы широко применяются в эмпирических исследованиях. Так в работах [120,121] на основе эмпирических исследований описывается формирование ряда физико-механических свойств трубного проката. Статистическими зависимостями определены условия формирования оптимальных значений данных свойств. Стоит отметить, что рассмотренный комплекс физико-механических свойств ограничен и применение комплексного (теплофизического и статистического) многофакторного моделирования способно предоставить более широкий набор результатов с достаточной сходимостью.

#### **1.4 Выводы по главе 1**

1. Производство исследуемой продукции осуществляется на сложных многостадийных технологических линиях, включающих несколько переделов.

2. Обусловлена целесообразность развития оборудования ТЛС для обеспечения контролируемого по ширине теплоотвода от проката в процессе УО.

3. Показано, что на текущий момент достаточно подробно изучено формирование теплового и структурного состояния проката в процессе деформации, однако вопрос деформационного разогрева металла при чистовой прокатке требует более детальной проработки.

4. Установлено, что конечное формирование микроструктуры и физико-механических свойств горячекатаного толстого листа формируется в процессе и по завершению УО.

5. Показано, что корректировка параметров УО позволяет получать достаточно широкий диапазон структурных состояний и прочностных характеристик проката.

6. В качестве ключевого аспекта развития технологии производства исследуемого сортамента предложено внедрение моделирования теплофизического состояния заготовки во время и после УО. Выявлена

необходимость послойного моделирования теплового состояния заготовки, вследствие значительной толщины проката.

## ГЛАВА 2. МОДЕЛЬ ИЗМЕНЕНИЯ ТЕПЛООВОГО СОСТОЯНИЯ ПРОКАТА НА ЛИНИИ ТЛС ГОРЯЧЕЙ ПРОКАТКИ

При разработке модели изменения теплового состояния проката на линии ТЛС использовались подходы, изложенные в [58,59,98–102,109–116,122,123].

В процессе построения модели изменения теплового состояния проката на ТЛС проведен анализ состава оборудования и определены механизмы воздействия элементов конструкции ТЛС «5000» ПАО «ММК» на температурное состояние проката. Определены типы и параметры граничных условий, а также длительности взаимодействия элементов конструкции с прокатом.

### 2.1 Проведение предварительных промышленных экспериментов

В рамках настоящей работы с целью последующей адаптации модели изменения теплового состояния проката к условиям ТЛС «5000» ПАО «ММК» проведены опытные КТМО слябов плавки № 104920-2015 класса прочности К60 по 5 технологическим режимам (Таблица 2.1), значительно отличающимся интенсивностью охлаждения заготовок в установке УО. Плавочный химический состав опытного проката приведен в Таблице 2.2.

Таблица 2.1 – Технологические режимы промышленных экспериментов

Номер режима	Номер раската	Температура раската перед УО, °С	Скорость транспортировки раската при УО, м/с
1	19112	922	1,9
2	19111	844	1,9
3	19121	838	1,0
4	19122	760	1,9
5	19131	770	1,0

Таблица 2.2 – Химический состав плавки № 104920-2015, масс. %

C	Si	Mn	S	P	Cr	Ni	Cu	Al	N	V	Ti	Nb	As	Mo	B	Sn
0,06	0,08	1,69	0,002	0,006	0,03	0,21	0,13	0,03	0,005	0,003	0,017	0,054	0,001	0,144	0,0003	0,003

Для определения целевых температур конца прокатки использовано расчётное значение  $A_3 \sim 840$  °С, полученное с помощью программного пакета Thermo Calc для указанной химической композиции. Вариативность скоростей транспортировки обусловлена стандартным для данного сортамента значением  $\sim 1,9$  м/с. Температурные режимы опытных прокаток, начиная с выдачи металла из печи и заканчивая выходом его из установки УО, иллюстрируют данные Таблицы 2.3 и Рисунка 2.1.

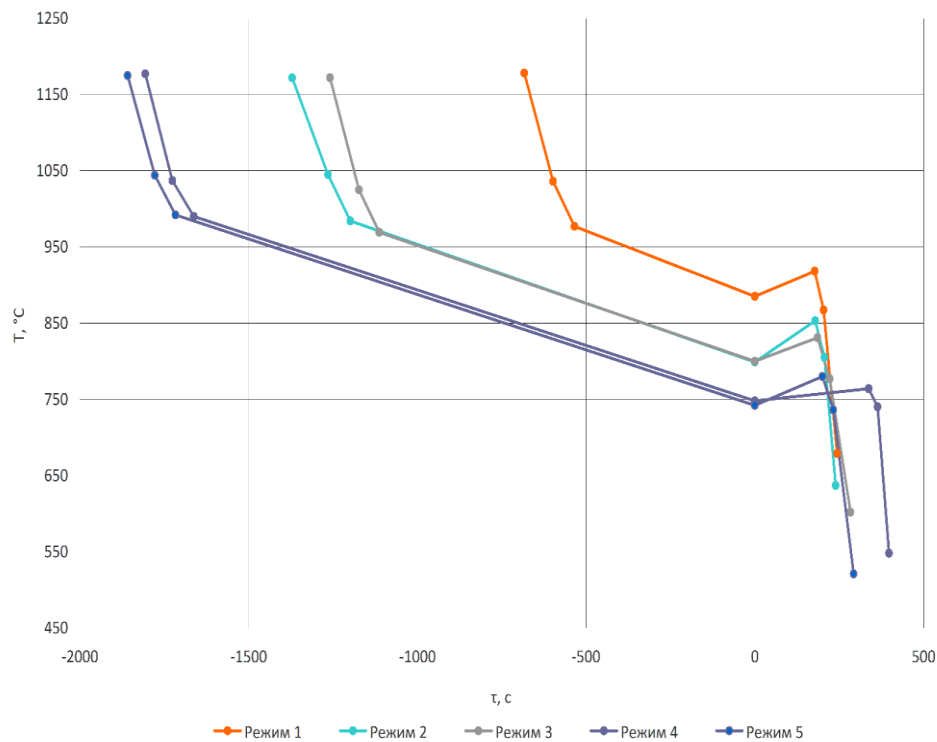


Рисунок 2.1 – Температурные режимы опытных прокаток

Следует отметить весьма широкую вариативность используемых режимов. Режим 1 отличается сравнительно высокими температурами конца прокатки и, соответственно, начала УО. Данный режим необходим для оценки возможности протекания частичной рекристаллизации металла в процессе транспортировки

проката от клетки до установки УО и влияния этих процессов на физико-механические свойства.

Режимы 2 и 3 являются стандартными для данного сортамента, однако отличаются интенсивностью УО. Режимы 4 и 5 отличаются пониженными температурными диапазонами. Таким образом, данный комплекс режимов отражает все наиболее вероятные вариации ТКМО для исследуемого сортамента.

Таблица 2.3 – Температурно-временные режимы опытных прокаток

Операция	Температура поверхности проката, °С		Длительность, с
	Начало	Конец	
<b>Режим 1</b>			
Нагрев	15	1178	4452
рольганг 1			85,45
Черновая прокатка	1036	977	63,40
МДП			534,57
Чистовая прокатка	885	918	177,55
рольганг 2			26,27
УО	867	679	40,08
<b>Режим 2</b>			
Нагрев	15	1172	4285
рольганг 1			105,99
Черновая прокатка	1045	984	66,23
МДП			1198,77
Чистовая прокатка	799	853	178,87
рольганг 2			27,08
УО	805	637	33,59
<b>Режим 3</b>			
Нагрев	15	1172	4328
рольганг 1			85,49
Черновая прокатка	1025	969	60,55
МДП			1112,83
Чистовая прокатка	800	831	185,83
рольганг 2			36,04
УО	777	602	61,60
<b>Режим 4</b>			
Нагрев	15	1177	4597
рольганг 1			80,35

## Продолжение таблицы 2.3

Операция	Температура поверхности проката, °С		Температура поверхности проката, °С
	Начало	Конец	
Черновая прокатка	1037	990	63,30
МДП			1662,60
Чистовая прокатка	748	764	337,35
рольганг_2			26,53
УО	740	548	33,62
<b>Режим 5</b>			
Нагрев	15	1175	5331
рольганг_1			80,62
Черновая прокатка	1044	992	61
МДП			1716,83
Чистовая прокатка	742	780	200,18
рольганг_2			32,19
УО	736	521	60,50

Деформационные режимы опытных прокаток представлены в Таблицах 2.4–2.8.

Таблица 2.4 – Деформационные режимы опытных прокаток – режим № 1

Черновая прокатка									
№ пр.	Темпер.	Скорость прокатки	Абс. обжатие	Длина ОД	Длит. прокатки в ОД	Длит. прокатки	Длит. паузы после прохода (сред.раск.)	Степень деформ.	Скорость деформ.
	Т, °С	V, м/с	$\Delta h$ , мм	l <sub>x</sub> , мм	$\tau$ , с	$\tau_{пр}$ , с	$\tau_{п}$ , с	$\xi$	$\vartheta$ , с <sup>-1</sup>
1	1036	1,60	21,33	113,60	0,071	1,42	24,07	0,071	1,00
2	1006	2,50	14,31	93,05	0,037	1,00	7,27	0,051	1,38
3	982	2,46	15,49	96,81	0,039	1,00	10,24	0,059	1,49
4	958	2,50	16,11	98,72	0,039	1,17	8,65	0,065	1,64
5	968	2,45	16,33	99,40	0,041	0,01	8,94	0,070	1,73
6	977	2,50	16,81	100,85	0,040	1,35	535,96	0,078	1,93
7		2,50	0,00	0,00	0,000				
8		2,50	0,00	0,00	0,000				



Продолжение таблицы 2.4

Чистовая прокатка									
№ пр.	Темпер.	Скорость прокатки	Абс. обжатие	Длина ОД	Длит. прокатки в ОД	Длит. прокатки	Длит. паузы после прохода (серед.раск.)	Степень деформ.	Скорость деформ.
	T, °C	V, м/с	$\Delta h$ , мм	$l_x$ , мм	$\tau$ , с	$\tau_{пр}$ , с	$\tau_{п}$ , с	$\xi$	$\vartheta$ , 1/с
1	885	2,50	10,33	79,05	0,032	1,46	9,42	0,052	1,64
2	868	2,50	10,71	80,50	0,032	1,53	7,76	0,057	1,76
3	876	2,50	10,02	77,86	0,031	1,62	9,40	0,056	1,80
4	884	2,50	9,64	76,37	0,031	1,72	19,48	0,057	1,87
5	887	2,48	8,44	71,46	0,029	1,83	10,03	0,053	1,84
6	889	2,50	8,79	72,92	0,029	1,07	8,96	0,058	2,00
7	870	2,49	9,03	73,91	0,030	1,14	9,77	0,064	2,15
8	851	2,50	9,27	74,89	0,030	1,21	6,50	0,070	2,33
9	874	2,48	9,41	75,45	0,030	1,31	8,81	0,076	2,51
10	896	2,50	9,50	75,81	0,030	1,41	7,03	0,083	2,75
11	899	2,90	9,52	75,89	0,026	1,32	8,99	0,091	3,48
12	901	2,50	9,34	75,17	0,030	1,69	7,69	0,098	3,27
13	907	3,40	9,17	74,48	0,022	1,37	8,76	0,107	4,89
14	913	3,70	8,99	73,75	0,020	1,41	7,39	0,118	5,90
15	913	4,03	8,20	70,43	0,017	1,47	6,51	0,122	6,95
16	912	4,30	7,30	66,46	0,015	1,57	7,28	0,123	7,97
17	916	4,48	6,84	64,33	0,014	1,71	7,65	0,132	9,17
18	920	4,90	5,79	59,19	0,012	1,80	6,64	0,128	10,62
19	913	5,02	5,10	55,55	0,011	2,02	6,63	0,130	11,72
20	915	5,64	4,31	51,06	0,009	2,06	6,55	0,126	13,91
21	918	5,64	3,65	46,99	0,008	2,36	27,45	0,122	14,64

Таблица 2.5 – Деформационные режимы опытных прокаток – режим № 2

Черновая прокатка									
№ пр.	Темпер.	Скорость прокатки	Абс. обжатие	Длина ОД	Длит. прокатки в ОД	Длит. прокатки	Длит. паузы после прохода (серед.раск.)	Степень деформ.	Скорость деформ.
	T, °C	V, м/с	$\Delta h$ , мм	$l_x$ , мм	$\tau$ , с	$\tau_{пр}$ , с	$\tau_{п}$ , с	$\xi$	$\vartheta$ , с <sup>-1</sup>
1	1045	1,60	21,27	113,44	0,071	1,42	23,15	0,071	1,00
2	1009	2,50	14,08	92,30	0,037	1,00	12,60	0,051	1,37
3	995	2,46	15,50	96,84	0,039	1,12	10,15	0,059	1,49
4	991	2,50	15,88	98,02	0,039	1,17	7,87	0,064	1,63
5	988	2,45	16,65	100,37	0,041	1,28	9,46	0,071	1,74
6	984	2,50	16,96	101,30	0,041	1,35	1200,17	0,078	1,93
7		2,50	0,00	0,00	0,000				
8		2,50	0,00	0,00	0,000				

## Продолжение таблицы 2.5

Чистовая прокатка									
№ пр.	Темпер.	Скорость прокатки	Абс. обжатие	Длина ОД	Длит. прокатки в ОД	Длит. прокатки	Длит. паузы после прохода (сред.раск.)	Степень деформ.	Скорость деформ.
	T, °C	V, м/с	$\Delta h$ , мм	$l_x$ , мм	$\tau$ , с	$\tau_{пр}$ , с	$\tau_{п}$ , с	$\xi$	$\vartheta$ , с <sup>-1</sup>
1	799	2,50	12,85	88,17	0,035	1,46	9,39	0,064	1,82
2	796	2,50	9,48	75,73	0,030	1,54	7,79	0,051	1,68
3	792	2,50	9,31	75,05	0,030	1,63	9,34	0,053	1,75
4	788	2,50	9,22	74,69	0,030	1,72	19,74	0,055	1,84
5	793	2,50	9,30	75,01	0,030	1,81	15,98	0,059	1,95
6	790	2,50	9,84	77,16	0,031	1,07	7,60	0,066	2,13
7	787	2,50	9,76	76,84	0,031	1,15	9,68	0,070	2,27
8	784	2,50	9,71	76,65	0,031	1,23	7,63	0,075	2,44
9	781	2,50	9,79	76,96	0,031	1,33	8,93	0,081	2,65
10	791	2,50	9,90	77,39	0,031	1,45	7,75	0,090	2,90
11	801	2,50	9,94	77,55	0,031	1,59	9,28	0,099	3,19
12	806	2,80	9,70	76,61	0,027	1,57	7,86	0,107	3,91
13	811	2,71	9,58	76,13	0,028	1,82	9,42	0,118	4,22
14	812	2,80	9,37	75,29	0,027	2,00	8,21	0,131	4,89
15	812	2,80	9,23	74,73	0,027	2,30	7,51	0,149	5,59
16	822	2,80	8,41	71,33	0,025	2,70	8,91	0,160	6,27
17	831	2,80	7,17	65,86	0,024	3,21	8,83	0,162	6,89
18	842	2,80	6,02	60,35	0,022	3,83	9,01	0,162	7,53
19	853	4,70	4,75	53,61	0,011	2,73	28,44	0,153	13,40

Таблица 2.6 – Деформационные режимы опытных прокаток – режим № 3

Черновая прокатка									
№ пр.	Темпер.	Скорость прокатки	Абс. обжатие	Длина ОД	Длит. прокатки в ОД	Длит. прокатки	Длит. паузы после прохода (сред.раск.)	Степень деформ.	Скорость деформ.
	T, °C	V, м/с	$\Delta h$ , мм	$l_x$ , мм	$\tau$ , с	$\tau_{пр}$ , с	$\tau_{п}$ , с	$\xi$	$\vartheta$ , с <sup>-1</sup>
1	1025	1,60	21,32	113,57	0,071	1,42	22,99	0,071	1,00
2	994	2,50	14,09	92,33	0,037	0,99	7,35	0,051	1,37
3	988	2,46	15,71	97,49	0,040	1,12	10,11	0,059	1,50
4	982	2,50	16,11	98,72	0,039	1,17	7,80	0,065	1,64
5	975	2,45	16,34	99,43	0,041	1,28	9,49	0,070	1,73
6	969	2,50	16,78	100,76	0,040	1,35	1114,23	0,078	1,92
7		2,50	0,00	0,00	0,000				
8		2,50	0,00	0,00	0,000				

Продолжение таблицы 2.6

Чистовая прокатка									
№ пр.	Темпер.	Скорость прокатки	Абс. обжатие	Длина ОД	Длит. прокатки в ОД	Длит. прокатки	Длит. паузы после прохода (сред.раск.)	Степень деформ.	Скорость деформ.
	T, °C	V, м/с	$\Delta h$ , мм	$l_x$ , мм	$\tau$ , с	$\tau_{пр}$ , с	$\tau_{п}$ , с	$\xi$	$\vartheta$ , с <sup>-1</sup>
1	800	2,50	12,81	88,03	0,035	1,46	9,33	0,064	1,82
2	797	2,50	9,55	76,01	0,030	1,54	7,77	0,051	1,68
3	793	2,50	9,32	75,09	0,030	1,63	9,44	0,053	1,75
4	798	2,50	9,22	74,69	0,030	1,72	18,98	0,055	1,84
5	796	2,50	9,38	75,33	0,030	1,81	15,65	0,059	1,96
6	794	2,50	9,83	77,12	0,031	1,07	8,06	0,066	2,13
7	791	2,50	9,81	77,04	0,031	1,15	9,90	0,070	2,28
8	789	2,50	9,77	76,88	0,031	1,23	7,80	0,075	2,45
9	787	2,50	9,85	77,20	0,031	1,33	9,27	0,082	2,66
10	803	2,50	9,91	77,43	0,031	1,45	8,01	0,090	2,91
11	814	2,50	9,87	77,27	0,031	1,59	9,73	0,099	3,19
12	819	2,80	9,73	76,72	0,027	1,58	8,06	0,108	3,93
13	824	2,71	9,56	76,05	0,028	1,83	9,77	0,119	4,23
14	821	2,80	3,36	45,09	0,016	2,01	8,55	0,047	2,94
15	818	2,80	15,17	95,80	0,034	2,31	7,97	0,224	6,55
16	826	2,80	8,35	71,08	0,025	2,71	9,14	0,159	6,26
17	853	2,80	7,08	65,45	0,023	3,22	8,38	0,160	6,86
18	842	2,80	5,98	60,15	0,021	3,84	9,70	0,161	7,51
19	831	4,70	4,78	53,78	0,011	2,73	37,41	0,154	13,43

Таблица 2.7 – Деформационные режимы опытных прокаток – режим № 4

Черновая прокатка									
№ пр.	Темпер.	Скорость прокатки	Абс. обжатие	Длина ОД	Длит. прокатки в ОД	Длит. прокатки	Длит. паузы после прохода (сред.раск.)	Степень деформ.	Скорость деформ.
	T, °C	V, м/с	$\Delta h$ , мм	$l_x$ , мм	$\tau$ , с	$\tau_{пр}$ , с	$\tau_{п}$ , с	$\xi$	$\vartheta$ , с <sup>-1</sup>
1	1037	1,60	21,36	113,68	0,071	1,42	24,24	0,071	1,00
2	983	2,50	14,23	92,79	0,037	0,99	8,70	0,051	1,38
3	985	2,46	15,46	96,71	0,039	1,12	10,18	0,058	1,49
4	987	2,50	15,93	98,17	0,039	1,18	7,78	0,064	1,63
5	988	2,50	16,52	99,97	0,040	1,25	9,48	0,071	1,77
6	990	2,50	16,84	100,94	0,040	1,35	1664,01	0,078	1,93
7		2,50	0,00	0,00	0,000				
8		2,50	0,00	0,00	0,000				

## Продолжение таблицы 2.7

Чистовая прокатка									
№ пр.	Темпер.	Скорость прокатки	Абс. обжатие	Длина ОД	Длит. прокатки в ОД	Длит. прокатки	Длит. паузы после прохода (серед.раск.)	Степень деформ.	Скорость деформ.
	T, °C	V, м/с	$\Delta h$ , мм	$l_x$ , мм	$\tau$ , с	$\tau_{пр}$ , с	$\tau_{п}$ , с	$\xi$	$\vartheta$ , с <sup>-1</sup>
1	748	2,50	11,36	82,90	0,033	1,46	9,38	0,057	1,72
2	743	2,50	9,38	75,33	0,030	1,54	7,92	0,050	1,65
3	738	2,50	10,02	77,86	0,031	1,62	9,49	0,056	1,80
4	730	2,50	9,50	75,81	0,030	1,72	17,53	0,056	1,85
5	725	2,50	8,32	70,95	0,028	1,82	11,56	0,052	1,84
6	720	2,50	8,47	71,58	0,029	1,06	9,93	0,056	1,96
7	735	2,50	8,52	71,80	0,029	1,12	10,20	0,060	2,08
8	749	2,50	8,44	71,46	0,029	1,19	9,24	0,063	2,20
9	748	2,50	8,56	71,96	0,029	1,28	8,91	0,068	2,37
10	747	2,50	8,65	72,34	0,029	1,37	8,20	0,074	2,55
11	748	2,50	8,78	72,88	0,029	1,48	9,20	0,081	2,78
12	748	2,50	8,90	73,38	0,029	1,61	8,32	0,089	3,04
13	751	2,73	8,59	72,09	0,026	1,61	9,59	0,095	3,58
14	753	2,80	8,40	71,29	0,025	1,74	154,79	0,102	4,02
15	744	2,71	8,24	70,61	0,026	2,00	12,35	0,112	4,29
16	736	4,10	8,19	70,39	0,017	1,49	7,70	0,125	7,28
17	728	3,75	8,09	69,96	0,019	1,86	6,54	0,141	7,56
18	735	4,04	7,11	65,59	0,016	2,00	7,54	0,144	8,89
19	742	4,27	6,21	61,29	0,014	2,21	6,85	0,147	10,27
20	752	4,58	5,35	56,89	0,012	2,42	6,89	0,149	11,99
21	764	5,07	4,45	51,89	0,010	2,57	27,81	0,146	14,22

Таблица 2.8 – Деформационные режимы опытных прокаток – режим № 5

Черновая прокатка									
№ пр.	Темпер.	Скорость прокатки	Абс. обжатие	Длина ОД	Длит. прокатки в ОД	Длит. прокатки	Длит. паузы после прохода (серед.раск.)	Степень деформ.	Скорость деформ.
	T, °C	V, м/с	$\Delta h$ , мм	$l_x$ , мм	$\tau$ , с	$\tau_{пр}$ , с	$\tau_{п}$ , с	$\xi$	$\vartheta$ , с <sup>-1</sup>
1	1044	1,60	21,30	113,52	0,071	1,42	23,04	0,071	1,00
2	938	2,50	14,30	93,01	0,037	0,99	7,44	0,051	1,38
3	952	2,46	15,39	96,49	0,039	1,12	10,19	0,058	1,48
4	965	2,50	16,04	98,51	0,039	1,18	7,86	0,064	1,63
5	979	2,45	16,42	99,67	0,041	1,28	9,59	0,070	1,73
6	992	2,50	16,94	101,24	0,040	1,35	1721,09	0,078	1,93
7		2,50	0,00	0,00	0,000				
8		2,50	0,00	0,00	0,000				

## Продолжение таблицы 2.8

Чистовая прокатка									
№ пр.	Темпер.	Скорость прокатки	Абс. обжатие	Длина ОД	Длит. прокатки в ОД	Длит. прокатки	Длит. паузы после прохода (сред.раск.)	Степень деформ.	Скорость деформ.
	T, °C	V, м/с	$\Delta h$ , мм	$l_x$ , мм	$\tau$ , с	$\tau_{пр}$ , с	$\tau_{п}$ , с	$\xi$	$\dot{\vartheta}$ , с <sup>-1</sup>
1	742	2,50	11,30	82,68	0,033	1,46	6,90	0,057	1,71
2	735	2,50	9,65	76,41	0,031	1,54	7,94	0,051	1,68
3	728	2,50	9,90	77,39	0,031	1,62	9,43	0,055	1,79
4	733	2,50	9,53	75,93	0,030	1,72	22,40	0,056	1,86
5	742	2,50	8,29	70,82	0,028	1,82	11,32	0,052	1,84
6	743	2,50	8,41	71,33	0,029	1,06	8,86	0,056	1,95
7	743	2,50	8,46	71,54	0,029	1,12	10,54	0,059	2,07
8	742	2,50	8,43	71,42	0,029	1,19	8,72	0,063	2,20
9	741	2,50	8,56	71,96	0,029	1,27	9,16	0,068	2,37
10	734	2,50	8,63	72,26	0,029	1,37	6,89	0,074	2,55
11	727	2,50	8,83	73,09	0,029	1,48	9,16	0,081	2,78
12	736	2,50	8,79	72,92	0,029	1,61	7,90	0,088	3,02
13	745	2,73	8,65	72,34	0,026	1,61	9,87	0,095	3,59
14	751	2,80	8,49	71,67	0,026	1,74	8,09	0,103	4,04
15	756	2,71	8,42	71,37	0,026	2,00	9,50	0,114	4,34
16	759	2,80	8,22	70,52	0,025	2,19	8,37	0,126	5,00
17	761	2,80	7,88	69,05	0,025	2,50	7,29	0,138	5,60
18	764	2,80	7,00	65,08	0,023	2,90	9,20	0,142	6,13
19	766	2,80	6,14	60,95	0,022	3,38	8,34	0,146	6,69
20	773	2,80	5,30	56,63	0,020	3,95	9,12	0,147	7,27
21	780	4,70	4,40	51,59	0,011	2,76	33,57	0,143	13,04

Для определения длины ОД, степени и скорости деформации использованы общеизвестные зависимости.

## 2.2 Анализ влияния элементов конструкции ТЛС «5000» ПАО «ММК» на процессы теплоотдачи

В настоящем разделе рассматривается оборудование и технические характеристики стана, влияющие на тепловое состояние проката.

На Рисунке 2.2 приведена упрощенная схема расположения оборудования стана.

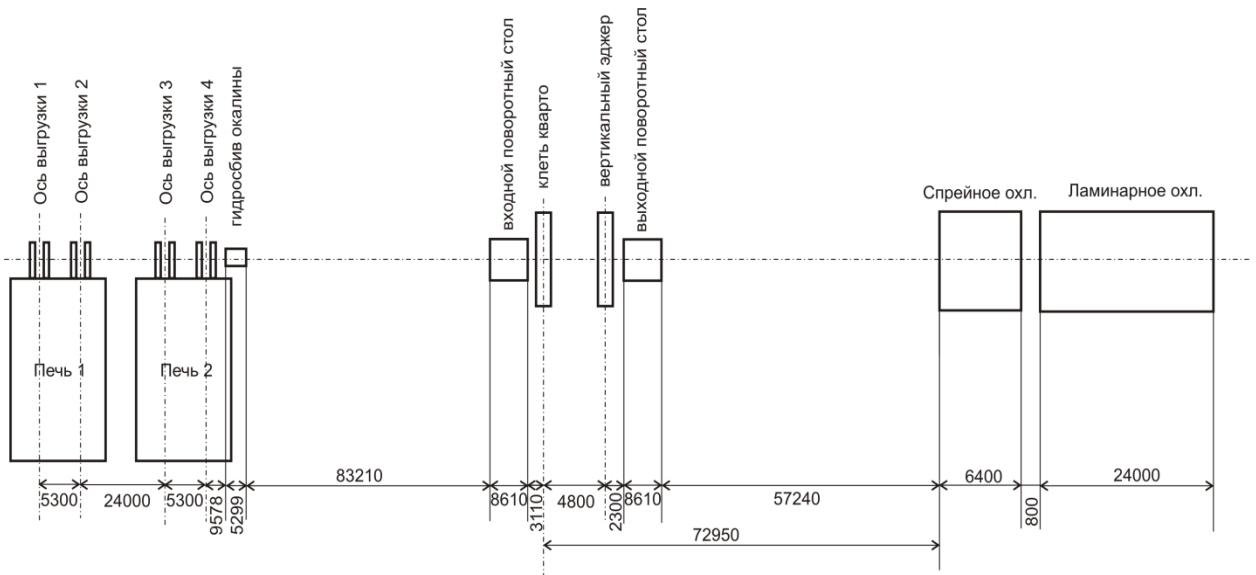


Рисунок 2.2 – Схема расположения оборудования ТЛС «5000»

В каждой из печей слябы перемещаются в 2 ряда, всего для 2-х печей имеется 4 ряда. При выгрузке, в зависимости от ряда, сляб может попасть в 4 координаты, в соответствии с положением осей выгрузки. Слябы, выгруженные из разных рядов, имеют разное время транспортировки до установки гидросбива, и, соответственно, разные тепловые потери.

В гидросбиве поверхность металла очищается от окалины, которую взламывает высоконапорная струя воды. При взаимодействии с металлом вода охлаждает его поверхность.

Прошедший через зону гидросбива металл транспортируется к клетки, в которой прокатывается реверсивно в рамках первой фазы прокатки. При этом при каждом проходе заготовка контактирует с валками, отдавая им некоторое количество тепла. Между обжатиями металл остывает в основном за счет излучения с поверхности. При прокатке на части проходов включаются гидросбивы, что увеличивает потери тепла прокатом.

Поскольку головной и хвостовой участки проката имеют разные относительные тепловые потери, на прокате образуется температурный клин. Реверсивный характер прокатки снижает данный эффект. Между некоторыми проходами прокат разворачивается на поворотных столах, что также приводит к уменьшению суммарно накопленного температурного клина. Для соблюдения

термических режимов контролируемой прокатки металл «подстуживается» выдержкой на рольганге.

По завершении чистовой фазы прокатки металл транспортируется к установке УО через установку предварительной правки. Установка УО состоит из двух участков – спрейерного и ламинарного. Если температура проката на входе в установку УО выше температуры начала ферритного превращения, то формирование фазового и структурного состояний проката полностью происходит во время и после УО.

Потеря тепла прокатом при его нахождении на рольгангах происходит в основном по радиационному механизму, который описывается уравнением Стефана-Больцмана:

$$q = \varepsilon\sigma(T^4 - T_0^4), \quad (2.1)$$

где  $q$  – плотность мощности, излучаемой поверхностью, Вт/м<sup>2</sup>;

$\varepsilon$  – коэффициент черноты поверхности;

$\sigma$  – коэффициент Стефана–Больцмана, Вт/м<sup>2</sup>К<sup>4</sup>;

$T$  – температура излучающей поверхности, град. К;

$T_0$  – температура окружающей среды, град. К.

При движении металла по рольгангу он обдувается встречным потоком воздуха, что приводит к его охлаждению вынужденной конвекцией. При «подстуживании» металла на рольганге также включается конвективный механизм теплоотдачи. Величина конвективной теплоотдачи с поверхности определяется числом Нуссельта; для вынужденной конвекции число Нуссельта зависит от чисел Рейнольдса и Прандтля:

$$Nu = \frac{\alpha L}{\lambda} = f(Re, Pr); \quad (2.2)$$

для свободной конвекции число Нуссельта находится в функциональной зависимости от чисел Прандтля и Грасхофа:

$$Nu = \frac{\alpha L}{\lambda} = f(Gr, Pr), \quad (2.3)$$

где  $\alpha$  – безразмерный коэффициент теплоотдачи;

$L$  – характерный размер потока;

$\lambda$  – коэффициент теплопроводности;

$Re$  – число Рейнольдса (характеризует соотношение сил инерции и внутреннего трения в потоке);

$Pr$  – число Прандтля (определяет соотношение интенсивностей термодинамических процессов);

$Gr$  – число Грасхофа (характеризует соотношение архимедовых сил, сил инерции и внутреннего трения в потоке).

Наши оценки показывают, что радиационная теплоотдача является основным механизмом тепловых потерь при перемещении проката по линии стана.

Плотность потока энергии при кондуктивной теплоотдаче определяется формулой:

$$q = \frac{\lambda(T)dT}{dx}, \quad (2.4)$$

где  $\lambda(T)$  – зависимость от температуры коэффициента теплопроводности;

$dT/dx$  – градиент температуры в теплопроводящем теле.

Величина полного потока энергии определяется площадью теплового контакта тел, участвующих в теплообмене. В условиях ТЛС «5000» контакт полосы с окружающими телами (в частности, с роликами рольганга) точечный. Малый кондуктивный теплообмен проката с роликами не означает их малого разогрева – разогрев роликов происходит в основном за счет лучистого теплообмена.

Вышесказанное несправедливо для теплообменных процессов в очаге деформации металла (Рисунок 2.3). При деформации прокат плотно прилегает к металлу валка по всей площади соприкосновения.



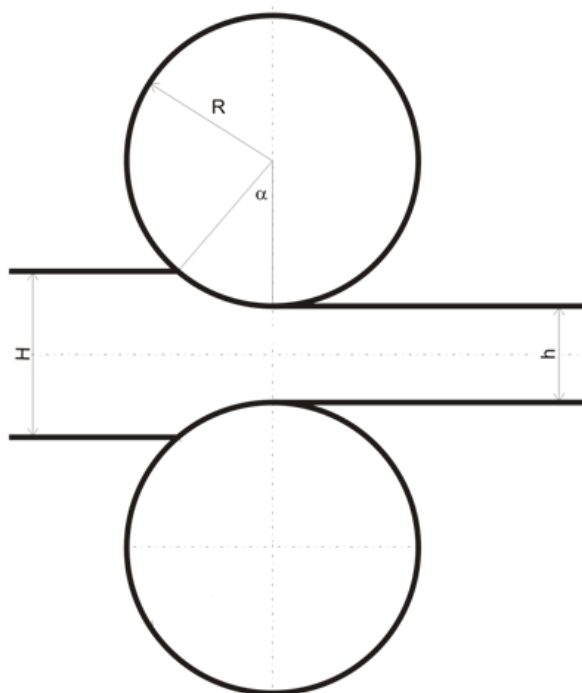


Рисунок 2.3 – Контакт проката с валками в зоне деформации

Время взаимодействия металла с валком мало, а радиус валка достаточно велик. Поэтому для расчета теплообмена можно рассматривать плоскую задачу теплообмена двух полубесконечных тел.

Основные потери тепла прокатом происходят в струйных устройствах – гидросбивах и установке ускоренного охлаждения. При этом в гидросбивах металл взаимодействует с компактной высоконапорной струей, в системе спрейерного охлаждения – с дисперсным факелом распыления, в системе ламинарного охлаждения – с компактной струей относительно низкого напора.

Рассмотрим процесс взаимодействия воды с горячим металлом. В момент столкновения струи воды с металлом вода нагревается и начинает кипеть. После удара струи о поверхность часть воды испаряется, а оставшая часть дробится и изменяет направление движения. Если струя компактна, она не препятствует удалению продуктов кипения из зоны взаимодействия с металлом. Вместе с тем, испарение воды увеличивает объем хладагента примерно в 1000 раз, поэтому импульс, прижимающий воду к металлу, за пределами первичной струи близок к нулю. Это приводит к тому, что в зоне проекции струи на металл режим кипения – пузырьковый, а за пределами струи – пленочный. Исследования [107,108,113,114]

показывают, что коэффициент теплоотдачи в зоне пузырькового кипения даже при небольшом температурном напоре может достигать очень высоких значений. Для высоких температурных напоров (характерных для горячей прокатки) теплоотвод с поверхности при пузырьковом кипении заведомо больше, чем возможности доставки тепла к поверхности из глубины металла.

Оценим возможные величины тепловых потоков. Предположим, что вода, соприкасающаяся с металлом, нагревается до температуры кипения и испаряется [113]. Тогда:

$$W_1 = k \cdot g(c\Delta T_B + \delta) = \frac{G}{S(c\Delta T_E + \delta)}, \quad (2.5)$$

где  $W$  – удельная (на единицу площади) мощность теплоотвода;  
 $g$  – удельный (на единицу площади контакта с металлом) расход воды;  
 $G$  – абсолютный, в килограммах в секунду, расход воды в струе;  
 $S$  – площадь струи при контакте с металлом;  
 $k$  – доля испаренной воды от общего расхода;  
 $c$  – теплоемкость воды;  
 $\Delta T_B$  – разность начальной температуры воды и температуры кипения;  
 $\delta$  – удельная теплота испарения воды.

С другой стороны, снимаемый с поверхности тепловой поток поступает из глубины металла, то есть доставляется к поверхности кондуктивной теплопередачей.

$$W_2 = \lambda \frac{\Delta T_m}{\Delta x}, \quad (2.6)$$

где  $\Delta T_m$  – разность начальной температуры металла и температуры его поверхности;

$\Delta x$  – глубина, с которой доставляется тепло;

$\lambda$  – коэффициент теплопроводности.

Если выполняется условие:

$$W_1 > W_2, \quad (2.7)$$

то попадающая на поверхность вода не успевает выкипать, и температура поверхности стабилизируется на 100 °С (температура кипения при нормальном давлении). Если выполняется соотношение:

$$W_1 \gg W_2, \quad (2.8)$$

то вода не будет разогрета до температуры кипения. Оценки [113] показывают, что тепловой поток с поверхности в условиях ТЛС в этих двух случаях отличается слабо. Для практических расчетов в описанном выше случае можно принимать граничные условия первого рода с температурой поверхности 100 °С.

Если не выполняется условие (2.7), то граничные условия первого рода становятся непригодными. В этом случае с поверхности снимается количество тепла, пропорциональное расходу, а температура поверхности не должна регламентироваться, то есть используются граничные условия второго рода.

Следует отметить, что при больших теплосъемах с поверхности кипение быстро прекращается. Это происходит вследствие того, что приповерхностный слой металла теряет тепло быстрее, чем оно поступает, одновременно уменьшается градиент температуры в металле, определяющий скорость доставки тепла к поверхности.

Оценим глубину проникновения тепловой волны в металл при взаимодействии со струей воды в условиях граничного условия 1-го рода. Рассмотрим слой горячего металла единичной площади с малой толщиной. При подаче воды на поверхность металла температура поверхности становится равной температуре кипения, а кондуктивный тепловой поток поступает из толщины, соответствующей глубине проникновения тепловой волны:

$$W = 2\lambda \frac{T_0 - 100}{\Delta x}. \quad (2.9)$$

С другой стороны,

$$Q = cm\Delta T_0 = c\rho\Delta x\Delta T_0 = W\tau, \quad (2.10)$$

где  $\rho$  – плотность;

$c$  – теплоемкость;

$\Delta T_0$  – температура, на которую остыл металл за время  $\tau$ .

Время взаимодействия определяется скоростью движения металла и диаметром падающей на поверхность струи. Если считать, что металл в слое охлаждается до прекращения кипения, то

$$c\rho\Delta x(T_0 - 100) = 2\lambda\tau \frac{T_0 - 100}{\Delta x}, \quad (2.11)$$

что приводит к оценке глубины проникновения тепловой волны в металл

$$\Delta x = \sqrt{\frac{2\lambda\tau}{c\rho}}. \quad (2.12)$$

Если струя имеет относительно малые размеры и высокий напор, она «пробивает» продукты кипения и полным расходом достигает поверхности металла, при этом инерция удерживает ее от «разбрызгивания». В этом случае коэффициент  $k$  в соотношении (2.5) близок к единице и практически всегда выполняется условие (2.8).

Основное отличие низконапорной струи от высоконапорной заключается в том, что последняя может потерять компактность и разрушиться при «взрывном» испарении. В этом случае может реализоваться механизм теплоотвода с граничными условиями как первого, так и второго рода. Если реализуется механизм второго рода, то большую роль играет доля воды, провзаимодействовавшая с металлом, то есть коэффициент  $k$  в соотношении (2.5). В случае практических расчетов он является адаптационным коэффициентом.

В отличие от компактной струи, механизм взаимодействия распыленной струи с горячим металлом иной. Если распыленная вода полностью достигает поверхности, то единственная особенность распыленного потока в том, что коэффициент расхода  $k$  может быть меньше единицы только в том случае, когда температура поверхности снижается ниже температуры кипения. Все введенные выше соотношения выполняются.

На участках гидросбивов выполняется соотношение (2.8). Для расчета тепловых потерь в них применяются граничные условия первого рода.

На стане установлен гидросбив удаления печной окалины, расположенный на выходе подпечных секций рольганга. Этот гидросбив при транспортировке через него металла включается всегда. Схема расположения оборудования этого гидросбива приведена на Рисунке 2.4.

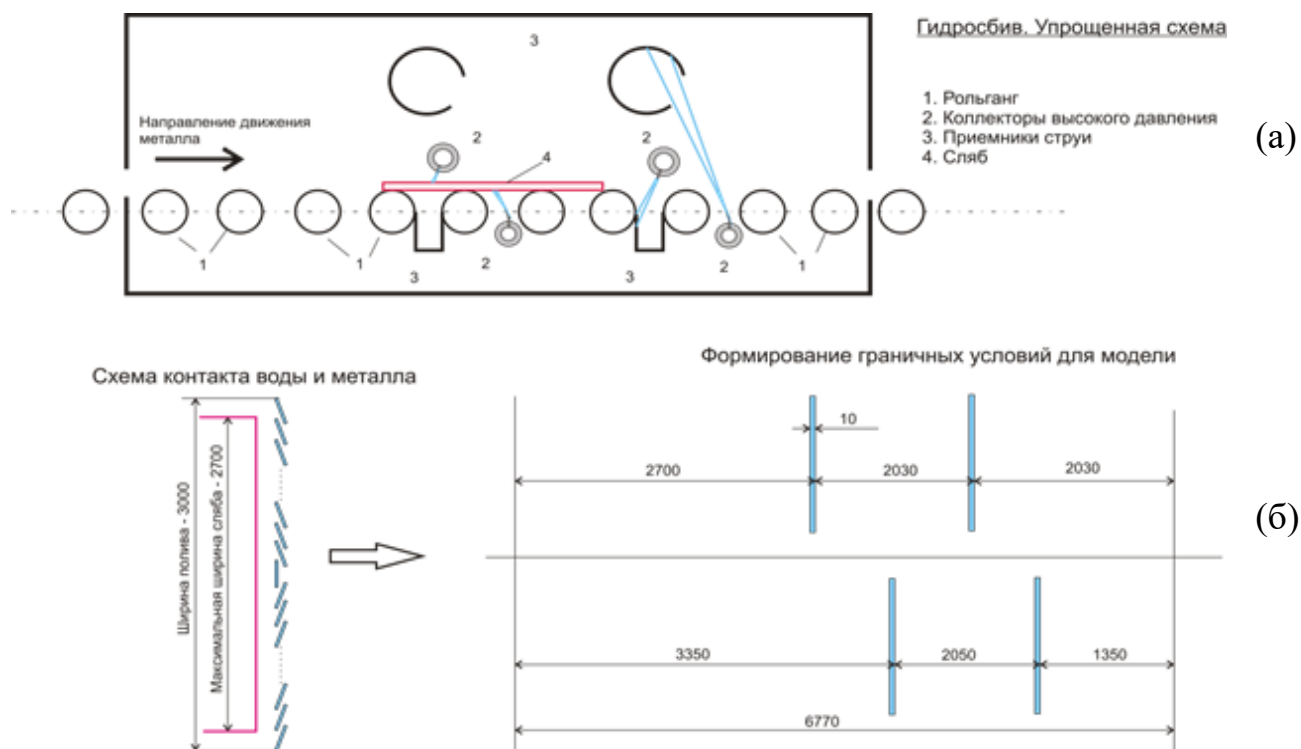


Рисунок 2.4 – Гидросбив удаления печной окалины: а – упрощенная схема; б – данные для формирования граничных условий математической модели

Для удаления прокатной окалины применяются гидросбивы, расположенные непосредственно в прокатной клети. Из двух установленных гидросбивов

включается тот, струи воды в котором направлены против движения металла. Гидросбивы удаления прокатной окалины включаются не на каждом проходе. Упрощенная схема их расположения приведена на Рисунке 2.5.

Кроме гидросбивов, в клетки расположены дополнительные струйные системы (например, система смыва взломанной гидросбивом окалины), которые практически не влияют на величину тепловых потерь проката.

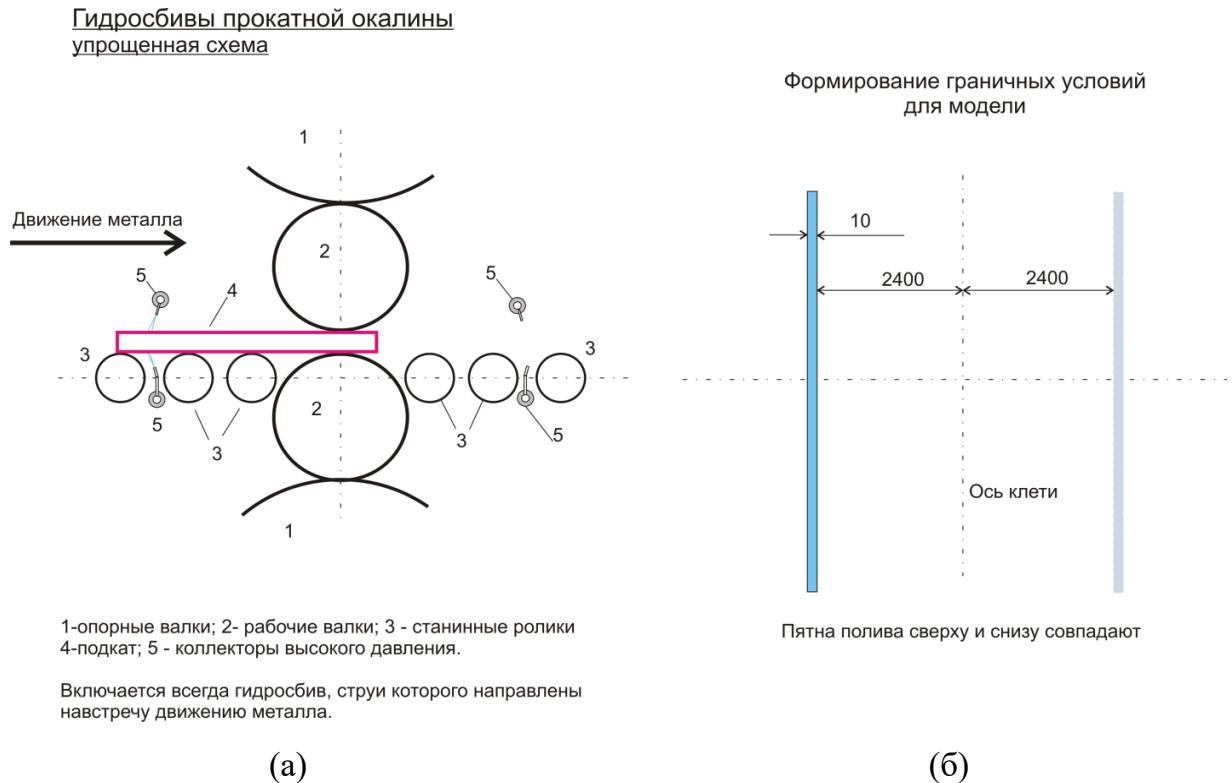


Рисунок 2.5 – Гидросбивы удаления прокатной окалины: а – упрощенная схема; б – данные для формирования граничных условий математической модели

На Рисунке 2.6 приведена схема орошения металла в установке спрейерного охлаждения. Оценка удельной величины теплосъема для установки показывает, что при расходах в системе спрейерного охлаждения, соответствующих режимам опытной прокатки, выполняется соотношение (2.7), при этом теплоотвод в 3–5 раз превышает возможности по доставке тепла из глубины металла. Время взаимодействия металла с водой, в зависимости от скорости металла, составляет 30–60 мс, глубина проникновения волны охлаждения в металл во время однократного взаимодействия со струей – менее 1 мм.

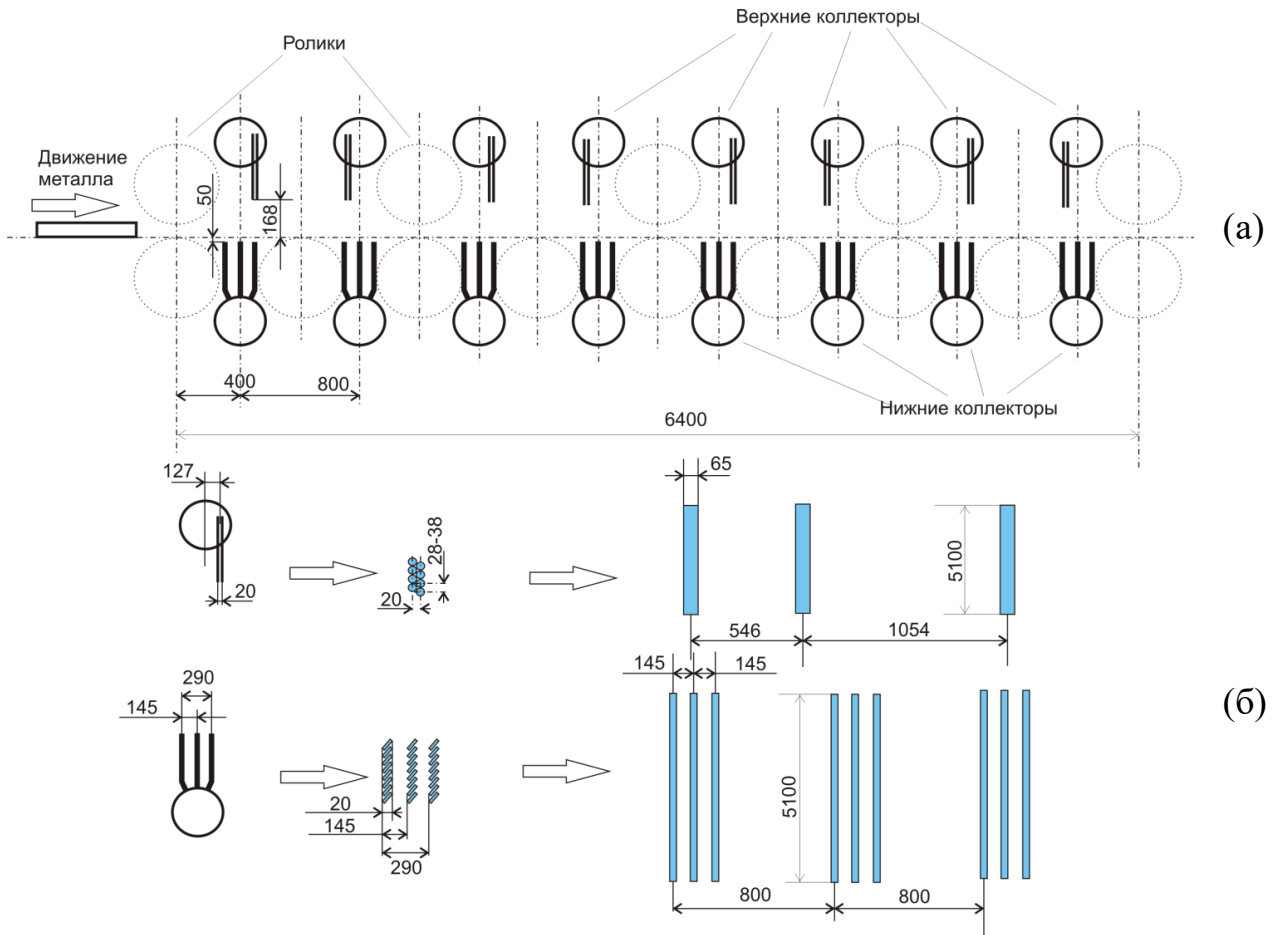


Рисунок 2.6 – а – прошенная схема установки спрейерного охлаждения;  
б – данные для формирования граничных условий математической модели

Следует отметить, что на нижнем пределе расхода через коллектор (менее 20–30 % от номинального) соотношение (2.7) может перестать выполняться. Это приведет к значительной зависимости интенсивности теплосъема от расходов и к необходимости расчетов теплообмена по граничным условиям второго рода. При этом значительное снижение расхода через коллектор с большой вероятностью приведет к нерасчетному режиму работы сопел.

На Рисунке 2.7 приведена упрощенная схема установки ламинарного охлаждения. При управлении установкой расход задается и регулируется в каждом из 15 верхних коллекторов, нижние коллекторы объединены в 15 индивидуально управляемых пар.

Путем настройки расходов в коллекторах осуществляется регулировка скорости воды на срезе U-образных трубок верхних и нижних сопел

$$V_0 = \frac{4G}{\pi d_0^2 n}, \quad (2.13)$$

где  $G$  – объемный расход через коллектор;

$d_0$  – внутренний диаметр трубок на коллекторе;

$n$  – количество трубок на коллекторе.

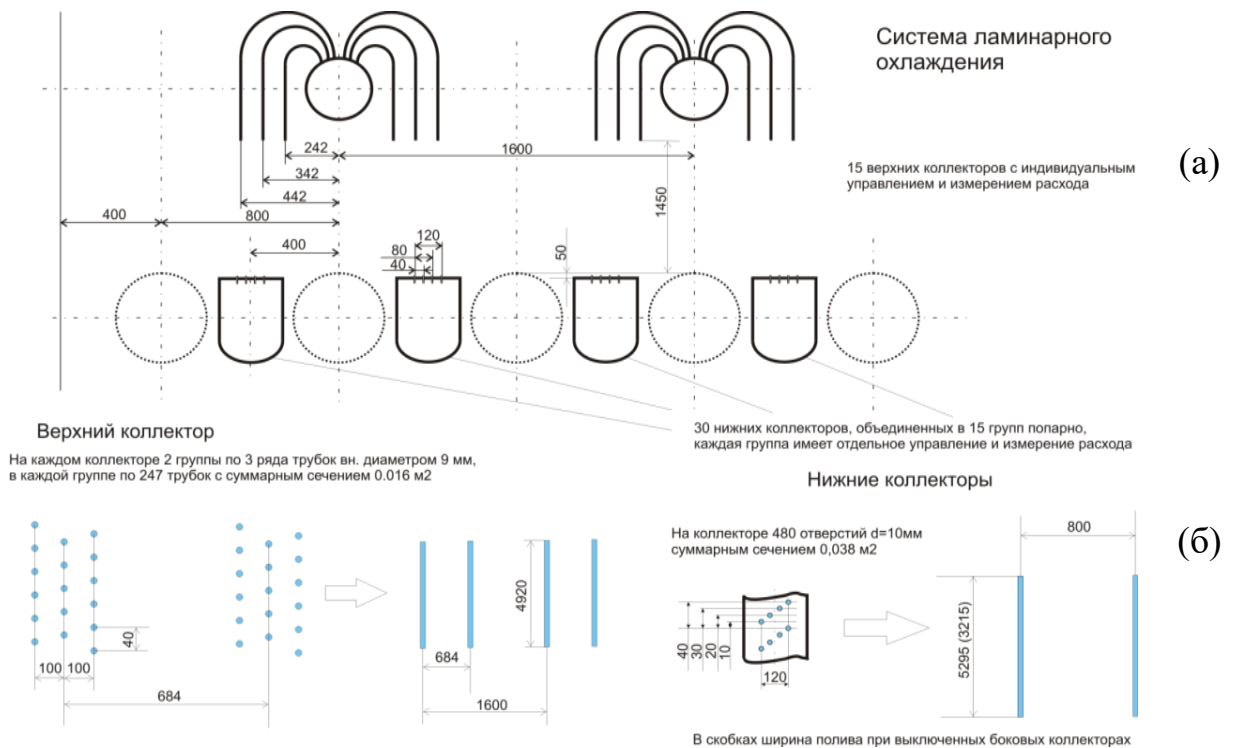


Рисунок 2.7 – а – упрощенная схема установки ламинарного охлаждения;

б – данные для формирования граничных условий математической модели

Минимальный диаметр пятна контакта воды с металлом выражается следующим образом:

$$d = 2 \sqrt{\frac{s}{\pi}}. \quad (2.14)$$

На самом деле, площадь эффективного теплосъема может быть несколько больше, чем сечение проекции струи на металл из-за того, что вода при растекании



по поверхности теряет вертикальный импульс не сразу. Диаметр взаимодействия струи с металлом – адаптационный параметр модели.

Расчет по приведенным выше соотношениям показывает, что при типичных расходах диаметр пятна контакта воды с металлом для верхних коллекторов составляет 6,5 мм, а для нижних – 10 мм. Оценка тепловых потоков по соотношениям (2.5) и (2.6) указывает на то, что скорость теплоотвода в пятне контакта превышает возможности кондуктивного теплоподвода примерно на порядок. Таким образом, на установке ламинарного охлаждения также необходимо использовать граничные условия первого рода. Такие граничные условия применимы вплоть до расходов, составляющих 10–12 % от номинальных.

Во время УО может возникать зависимость теплосъема от расхода через коллектор на установке, причем определяется она изменением площади пятна контакта. В этой связи в некотором диапазоне расходов на нижних коллекторах может наблюдаться даже слабая падающая зависимость – снижение теплосъема при росте расхода.

Следует отметить, что размеры пятна контакта на участке ламинарного охлаждения существенно меньше, чем на участке спрейерного охлаждения. В этой связи, несмотря на большее число коллекторов, суммарные возможности теплосъема установки ламинарного охлаждения ниже.

Для обеспечения достоверности модельных расчётов наряду с теплоотводом с поверхности заготовки требуется учесть деформационный разогрев при КП. Разогрев является следствием работы сил внутреннего трения, которые с точностью до КПД механизмов клетки равна механической мощности главного привода. Механическая мощность определяется либо по электрической мощности привода, либо по его моменту и угловой скорости

$$P = \eta M \omega = \frac{2\eta MV}{D}, \quad (2.15)$$

где  $\eta$  – КПД механизма клетки;

$M$  – момент на валу привода;

$\omega$  – угловая скорость его вращения.

При этом деформационный разогрев единичного участка длины заготовки (Рисунок 2.8) окажется сопоставим с зависимостью следующего вида:

$$\Delta T \sim \frac{\eta M}{Rwhc\rho'} \quad (2.16)$$

где  $w$  – ширина полосы.

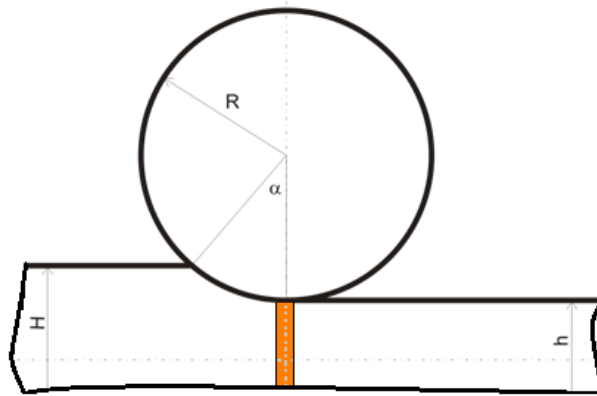


Рисунок 2.8 – Выделение единичного участка длины заготовки

Величина моментов привода и скоростей прокатки приведена в паспортах, генерируемых АСУТП ТЛС.

Для режимов опытных прокаток, принимая КПД привода равным 0,75, получаем мощности 7,5–23 МВт при пластической деформации в фазе 1 и мощности 20–55 МВт в фазе 2 горячей прокатки.

Оценим деформационный разогрев металла. В Таблице 2.9 приведены данные АСУТП стана по опытной прокатке металла в последнем проходе фазы 2 опытного режима №1. В Таблице 2.10 приведен пример расчёта деформационного разогрева для данного режима.

При мощности энерговыделения 33,5 МВт, с учетом КПД механизмов клетки 0,75, расходе металла через клетку равным 4700 кг/с и считая теплоемкость металла равной 623 Дж/кг град, можно получить оценку величины разогрева за проход. Расчёты показали, что она не превышает 11,8 °С, что, в целом, коррелирует с оценками, приведёнными в [107].

Таблица 2.9 – Данные для расчета энерговыделения при пластической деформации для режима №1

Параметр	Значение
КПД механизма клетки	0,75
Скорость прокатки	5,07 м/с
Радиус рабочих валков	586,5 · мм

Таблица 2.10 – Расчёт деформационного разогрева проката для режима №1

№ прохода	Момент прокатки, КНм	Ширина, проката, мм	Толщина проката, мм	$\Delta T$ , °C
1	3294	2635	278,73	1,18
2	2531	2526	264,65	1
3	2692	2527	249,15	1,13
4	2773	2528	233,27	1,24
5	2873	2529	216,62	1,38
6	2829	2530	199,66	1,47
7	2770	2518	186,81	1,55
8	3217	2518	177,33	1,90
9	3362	2518	168,02	2,09
10	3465	2519	158,8	2,28
11	6910	2520	149,5	2,68
12	6609	4536	139,66	2,74
13	6934	4537	129,9	3,10
14	6842	4537	120,19	3,30
15	6856	4538	110,4	3,60
16	6971	4539	100,5	4,02
17	6902	4540	90,56	4,42
18	6739	4541	80,86	4,83

Продолжение таблицы 2.10

№ прохода	Момент прокатки, КНм	Ширина, проката, мм	Толщина проката, мм	$\Delta T$ , °C
19	6735	4542	71,28	5,47
20	6712	4544	61,91	6,28
21	6792	4546	52,68	7,46
22	6636	4548	44,27	8,67
23	5790	4551	37,1	9,02
24	5432	4554	31,08	10,10
25	4576	4556	26,33	10,04

Данная методика обладает рядом спорных моментов, в частности, отсутствием доподлинного значения КПД механизмов клетки. Однако получаемая величина деформационного разогрева, с одной стороны, сопоставима с усреднёнными показаниями пирометрии, получаемыми из АСУТП ТЛС, а с другой – укладывается в допустимую погрешность пирометров. Тем не менее, незначительные приращения температуры за каждый проход оказывают значительное суммарное воздействие на тепловое состояние заготовки при прокатке, которое частично компенсирует теплопотери от контакта с валками, а в некоторых случаях превышает их.

Применение в модели деформационного разогрева позволяет более точно прогнозировать тепловое состояние проката в междеформационной паузе и после чистовой прокатки, что, в свою очередь, повышает итоговую точность расчёта теплового состояния заготовки при УО.

### 2.3. Длительности технологических операций

Автоматизированная система управления производством (АСУП) ТЛС «5000» формирует два основных электронных документа, содержащих технологическую информацию о прокатке – паспорт раската уровня 3 и паспорт уровня 2. Для контроля достоверности входящих в паспорта данных применялась информация, сохраняемая в базе данных АСУТП. Эта информация является

исходной для обоих паспортов. Оба паспорта формируются обработкой данных первого уровня на основе специализированных алгоритмов.

Основной исходной информацией для модели являются длительности применения различных граничных условий. В базе данных АСУТП регистрируется информация так называемого «трекинга» – системы слежения за металлом. Регистрируется зависимость координаты головной части металла от времени для каждой находящейся на линии стана единицы проката. В Таблице 2.11 приведён пример используемого в расчёте графика движения проката по технологической линии при прокатке и УО, полученного посредством анализа данных трекинга для опытного режима № 1.

Таблица 2.11 – Длительности технологических операций на линии ТЛС «5000» до начала УО – режим № 1

Проход	Длительность, с	Время от выгрузки, с	Окалинном	Толщина, мм	Обжатие, %	Длина, мм	Скорость, м/с	Примечание
Фаза 1								
1	1,6	85,45	+	278,67	7,11	2491	1,6	поворот
пауза	22,86	87,05						
2	1,3	109,91	+	264,36	5,13	2758	2,5	поворот
пауза	6,27	111,21						
3	1,37	117,48	+	248,87	5,86	2931	2,46	
пауза	9,15	118,85						
4	1,41	128	+	232,76	6,47	3129	2,5	
пауза	8,06	129,41						
5	1,53	137,47		216,43	7,02	3365	2,45	
пауза	8,26	139						
6	1,59	147,26		199,62	7,76	3644	2,5	
выдержка	534,56	148,85						
Фаза 2								
9	1,74	683,42		189,29		3821	2,5	
пауза	7,93	685,16						
10	1,76	693,09		178,58	5,66	4049	2,5	
пауза	6,19	694,85						
11	1,83	701,04		168,56	5,61	4291	2,5	
пауза	7,73	702,87						
12	1,88	710,6		158,92	5,72	4547	2,5	
пауза	17,71	712,48						
13	1,22	730,19		150,48	5,31	2665	2,5	поворот

## Продолжение таблицы 2.11

Проход	Длительность, с	Время от выгрузки, с	Окалинном	Толщина, мм	Обжатие, %	Длина, мм	Скорость, м/с	Примечание
пауза	8,58	731,41						
14	1,23	739,99		141,69	5,85	2831	2,48	
пауза	7,86	741,22						
15	1,28	749,08		132,66	6,37	3024	2,5	
пауза	8,6	750,36						
16	1,37	758,96		123,39	6,99	3248	2,49	
пауза	5,24	760,33						
17	1,45	765,57		113,98	7,62	3515	2,5	
пауза	7,45	767,02						
18	1,58	774,47		104,48	8,34	3831	2,48	
пауза	5,67	776,05						
19	1,69	781,72		94,96	9,11	4214	2,5	
пауза	7,49	783,41						
20	1,65	790,9		85,62	9,84	4671	2,9	
пауза	6,16	792,55						
21	1,72	798,71		76,45	10,72	5229	3,4	
пауза	7,37	800,43						
22	1,85	807,8		67,46	11,76	5923	3,7	
пауза	5,95	809,65						
23	1,99	815,6		59,26	12,16	6739	4,03	
пауза	4,99	817,59						
24	2,19	822,58		51,96	12,32	7679	4,3	
пауза	5,64	824,77						
25	2,43	830,41		45,12	13,16	8826	4,48	
пауза	5,89	832,84						
26	2,62	838,73		39,33	12,84	10122	4,9	
пауза	4,73	841,35						
27	2,89	846,08		34,23	12,96	11627	5,02	
пауза	4,59	848,97						
28	3,07	853,56		29,92	12,59	13316	5,64	
пауза	4,34	856,63						
29	3,48	860,97		26,27	12,21	15139	5,64	
УО	40,08							

#### 2.4. Настройка адаптационных параметров модели к условиям ТЛС «5000» ПАО «ММК»

При формировании комплекса исходных данных для моделирования часть параметров известна приближенно. В настоящей работе такими параметрами являются:

- 1) величина коэффициента черноты поверхности металла;
- 2) диаметр пятна контакта воды с металлом на установке спрейерного охлаждения;
- 3) диаметр пятна контакта воды с металлом на установке ламинарного охлаждения.

В настоящем разделе рассмотрена чувствительность результатов расчета к варьированию этих параметров и подбор адаптационных параметров с точки зрения максимального совпадения расчетных данных с результатами прокатки.

Результаты адаптационных расчетов приведены в Таблицах 2.12, 2.13, все результаты измерений и технологических операций соответствуют опытному режиму № 1.

Таблица 2.12 – Результаты адаптационных расчетов на участке клеть-установка  
УО

№	Данные уровня 1			Результаты расчета	
	Температура конца прокатки, °С	Время движения, с	Температура на входе в УО, °С	Коэффициент черноты	Температура поверхности, °С
1	893–920	30,28	842–877	0,75	875
2				0,8	872
3				0,83	871
4				0,85	869

Таблица 2.13 – Результаты адаптационных расчетов на участке ускоренного охлаждения

№	Данные уровня 1			Результаты расчета				
	Т перед УО, °С	v, м/с	Т после УО, °С	D пятна воды спрейерное охл.		D пятна воды лам. охл		Температура, верх/низ, °С
				Верх, мм	Низ, мм	Верх, мм	Низ, мм	
1	842–877	1,8	620–656	64	20	5,7	10	665/641
2				36	14	5,7	10	672/652
3				64	20	6,84	12	653/631

Таким образом, при изменении коэффициента черноты поверхности металла в разумном диапазоне значений, результат расчета изменяется незначительно (в

пределах погрешности пирометров). Расчетные значения температур поверхности проката находятся в диапазоне показаний пирометров.

Варьирование диаметров пятен контакта воды с поверхностью металла также не оказывает значительного влияния на результаты расчета. Изменение диаметров в реалистичном диапазоне приводит к изменениям расчетной температуры менее чем на 20 °С. При этом погрешность показаний пирометров составляет  $\pm 35$  °С. Наилучшее совпадение с результатами измерений обеспечивают расчеты, выполненные в соответствии с результатами строки 3 Таблицы 2.13, однако все остальные варианты также попадают в диапазон измеренных значений.

## 2.5. Эмпирические исследования проката

Для расчётов теплового состояния проката требуются значения коэффициента теплоёмкости стали для определенной химической композиции при различных температурах. На момент проведения исследований в открытых источниках данная информация отсутствовала, вследствие чего потребовалось проведение дополнительного эмпирического исследования [124]. Для определения температур  $A_1$  и  $A_3$  для исследуемой химической композиции, необходимых для более достоверного определения теплового эффекта, было также проведено дополнительное дилатометрическое исследование.

Материал для образцов был отобран от листов, полученных в результате проведения предварительных промышленных экспериментов, и соответствовал типичной для исследуемого сортамента химической композиции (Таблица 2.2).

Дилатометрические эксперименты проводились в вакууме на закалочном дилатометре Linseis L78 R.I.T.A. Для обеспечения полного  $\alpha \rightarrow \gamma$  превращения во всём объёме образцов, нагрев осуществлялся до температуры 1000 °С. Выдержка при данной температуре составляла 5 минут. Скорость нагрева и охлаждения составляла  $\sim 20$  °/мин. Использовались кварцевые держатели, температура регистрировалась термопарой. Частота сбора показаний составляла  $\sim 5$  точек/°.



Температуры  $A_1$  и  $A_3$  определялись графически по дилатометрическим кривым как место отрыва касательной, проведенной к прямолинейному участку кривой. Данная методика соответствует стандарту ASTM A1033-18 [125]. Результирующая дилатометрическая кривая приведена на Рисунке 2.9.

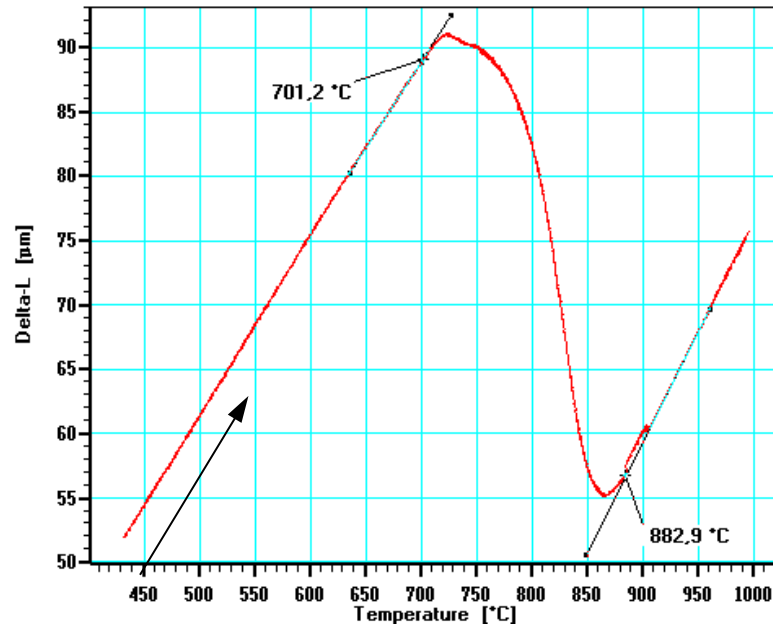


Рисунок 2.9 Определение критических температур при нагреве исследуемой стали по дилатометрическим данным

На Рисунке 2.9 продемонстрировано, что критические температуры составили:  $A_1 \sim 700$  °C,  $A_3 \sim 880$  °C. Данные температуры были применены при определении теплового эффекта распада аустенита в качестве опорных значений для анализа кривых теплоёмкости. Необходимо отметить, что эти значения, находятся в согласии с данными ряда работ [14,32,61,64] и расчётным значением  $A_3$ , полученном в пакете ThermoCalc. Отклонение от расчётного значения составило  $\sim 40$  °C или 4,7 %.

Экспериментальное определение теплоёмкости и теплового эффекта распада аустенита было произведено методом дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК) на приборе Netzsch STA 449C Jupiter. Методика исследования описана в [124,126,127]. Оборудование и условия эксперимента соответствовали

рекомендациям стандарта ASTM E1269-11 [127]: предварительная выдержка составляла 5 минут; скорость нагрева (и охлаждения) – 20 °/мин.; выдержка при максимальной температуре нагрева (1250 °С) – 5 минут; термические циклы реализовывались в потоке аргона – 20 мл/мин; частота опроса при нагреве и охлаждении составляла ~ 5 точек/° или 100 точек/мин.

Для построения зависимости теплоемкости исследуемых сталей от температуры последовательно реализовывались идентичные термические циклы с записью сигнала ДСК пустой системы, сапфира (эталона) и исследуемого образца. Сапфир был поставлен вместе с оборудованием и представлял собой диск диаметром ~ 5,2 мм, высотой ~ 1,0 мм.

Расчет теплоемкости (как при нагреве, так и при охлаждении) выполнялся методом соотношений, рекомендованным производителем оборудования и соответствующим стандарту ASTM E1269-11 [127], по следующей формуле:

$$C_P^{\text{обр}} = \frac{m_{\text{эт}}}{m_{\text{обр}}} \cdot \frac{ДСК_{\text{обр}} - ДСК_{\text{баз}}}{ДСК_{\text{эт}} - ДСК_{\text{баз}}} \cdot C_P^{\text{эт}}, \quad (2.17)$$

где  $C_P^{\text{обр}}$  – теплоемкость образца при данной температуре, Дж/(г×К);

$m_{\text{эт}}$  – масса сапфира, мг;

$m_{\text{обр}}$  – масса исследуемого образца, мг;

$ДСК_{\text{обр}}$  – значение сигнала ДСК (ДТА) при данной температуре, зарегистрированное для образца, мкВ;

$ДСК_{\text{баз}}$  – значение сигнала ДСК (ДТА) при данной температуре, зарегистрированное для пустой системы, мкВ;

$ДСК_{\text{эт}}$  – значение сигнала ДСК (ДТА) при данной температуре, зарегистрированное для сапфира, мкВ;

$C_P^{\text{эт}}$  – теплоемкость сапфира при данной температуре, Дж/(г×К), конкретные значения в интересующем диапазоне температур предоставлены производителем оборудования, для промежуточных температур значения интерполируются.

Результаты расчётов теплоёмкости для первого цикла нагрева-охлаждения приведены на Рисунке 2.10.

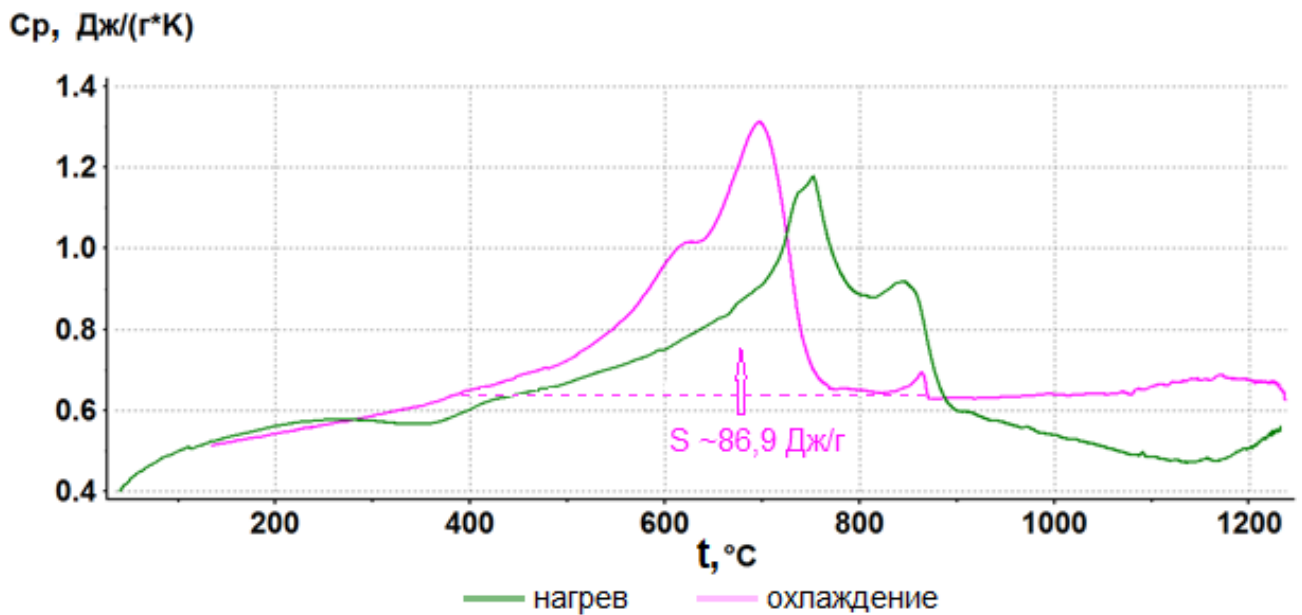


Рисунок 2.10 – Теплоемкость стали при первом цикле нагрева и охлаждения

При нагреве стали с исходной структурой наблюдается плавный рост зависимости теплоемкости от температуры. При температуре  $\sim 550$  °C рост теплоемкости заметно усиливается за счет как минимум трех накладывающихся друг на друга процессов, реализующихся с поглощением тепловой энергии. Первый асимметричный экстремум (максимум при температуре  $\sim 750$  °C), по-видимому, связан с одновременным протеканием рекристаллизационных процессов и образованием аустенита. Следующий тепловой эффект в интервале температур 800–900 °C (максимум при температуре  $\sim 850$  °C), очевидно, связан с интенсивным протеканием фазового  $\alpha \rightarrow \gamma$ -превращения. Температурный диапазон коррелирует с данными исследований [14,32,61,64].

Снижение теплоемкости при нагреве в интервале температур 900–1150 °C, предположительно связано с процессами рекристаллизации аустенита и растворением в нем карбонитридов легирующих элементов.

При охлаждении образца на кривой изменения теплоемкости регистрируется меньшее количество тепловых эффектов (Рисунок 2.10), но при этом фиксируются

новые, в более высокотемпературной области. Анализ зависимости теплоемкости от температуры при охлаждении демонстрирует отсутствие процессов в аустените (исчез последний тепловой эффект, отмеченный при нагреве). При температурах  $\sim 870\text{--}840\text{ }^\circ\text{C}$  фиксируется сравнительно небольшой тепловой эффект, ранее отсутствовавший на кривой нагрева.

Последующие превращения, реализующиеся в температурном интервале  $800\text{--}500\text{ }^\circ\text{C}$ , идущие с выделением тепла, по-видимому, являются магнитным превращением и растянутым по шкале температур  $\gamma\rightarrow\alpha$ -превращением.

По площади отклонения кривой от горизонтали (Рисунок 2.10), взятой от точки  $A_3$ , определённой посредством дилатометрических экспериментов для исследуемой химической композиции, получена суммарная величина теплового эффекта  $\gamma\rightarrow\alpha$  превращения. Она составила  $\sim 87\text{ Дж/г}$ .

При охлаждении после повторного нагрева теплоемкость  $\gamma$ -фазы в интервале температур  $1050\text{--}900\text{ }^\circ\text{C}$  практически линейно снижается (Рисунок 2.11). При температуре  $\sim 850\text{ }^\circ\text{C}$  также наблюдается тепловой эффект, связанный с  $\gamma\rightarrow\alpha$ -превращением в окисленной и обезуглероженной приповерхностной зоне образца. Тепловой эффект, регистрируемый ниже температуры  $\sim 750\text{ }^\circ\text{C}$ , связан с протеканием  $\gamma\rightarrow\alpha$ -превращения в основном объеме образца.

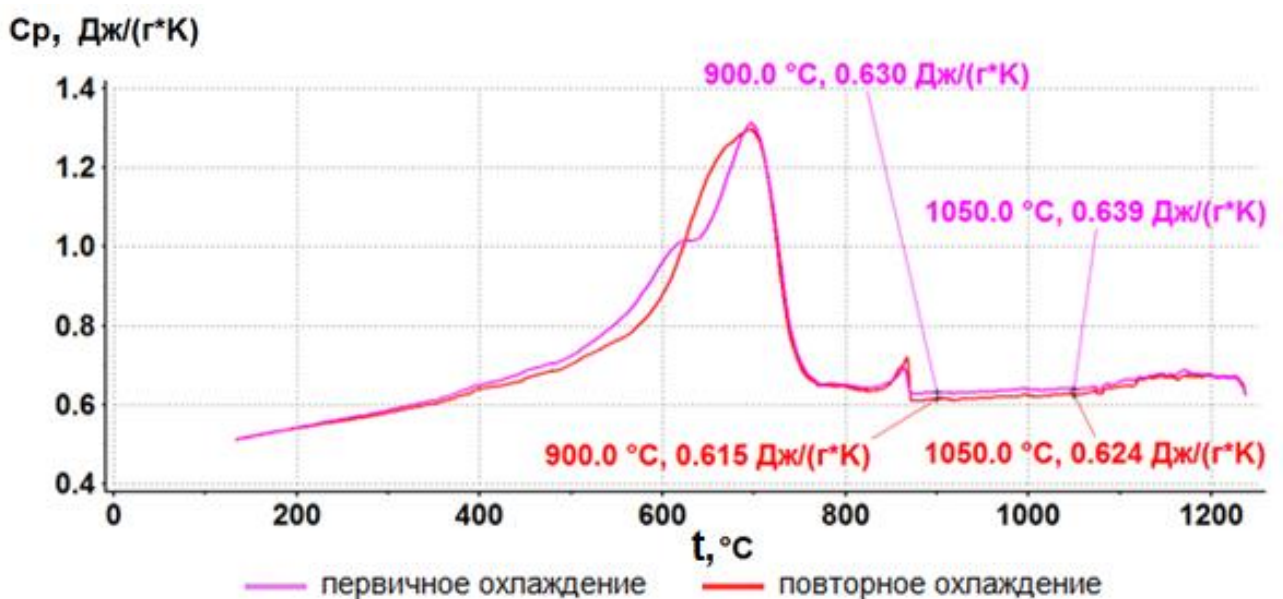


Рисунок 2.11 – Теплоемкость стали при первичном и повторном охлаждении

Поведения кривых охлаждения схожи; тепловой эффект при первичном и повторном охлаждении оказался сопоставим.

На основе кривых теплоёмкости были получены аппроксимирующие уравнения. Наилучшие коэффициенты детерминации ( $R^2$ ) получены при разбиении кривой на 2 части по оси абсцисс:  $t \leq 700$  °C и  $t > 700$  °C. Таким образом получены следующие эмпирические уравнения для определения теплоёмкости исследуемой стали: для температур менее 700 °C включительно:

$$C_p = 0,0007t^3 - 0,0129t^2 + 0,0897t + 0,3251, \quad (2.25)$$

где  $C_p$  – теплоёмкость стали, Дж/(г·К);  
 $t$  – температура стали, °C,  $t \leq 700$  °C;  
 и для больших температур:

$$C_p = -0,0003t^5 + 0,0088t^4 - 0,113t^3 + 0,6809t^2 - 1,9138t + 2,6381, \quad (2.26)$$

где  $t > 700$  °C.

Коэффициент детерминации обоих уравнений составил:  $R^2 \sim 0.99$ . Данное значение позволяет сделать вывод о высокой сходимости расчётных значений и эмпирических данных, что позволило использовать уравнения при построении вычислительного алгоритма модели. Тепловой эффект распада аустенита для вычислительных целей был принят равным 87 Дж/г.

## 2.6. Построение расчетной модели

Построение расчетной модели включает в себя создание вычислительного алгоритма, а также формирование граничных условий и начальных данных, соответствующих моделируемому объекту [105,128].

Базовый алгоритм вычислительного модуля основан на решении уравнения теплового баланса (уравнения теплопроводности в интегральной форме). Это уравнение можно получить применением соотношения Остроградского к энтальпии некоторого объема исследуемого тела:

$$\int_S \vec{Q}_S d\vec{S} = \int_V (h_i - q_i) dV, \quad (2.23)$$

где  $\vec{Q}_S$  – мощность потока тепла через элемент поверхности  $d\vec{S}$ ;

$h_i$  – изменение энтальпии элемента объема  $dV$ ;

$q_i$  – энерговыделение в элементе объема  $dV$ . Интегрирование справа ведется по объему, слева – по поверхности этого объема.

Изменение энтальпии удобно рассчитывать, зная теплоемкость при постоянном давлении  $C_p(T)$  при температуре:

$$\Delta h(T_1 \rightarrow T_2) = \int_{T_1}^{T_2} C_p(T) dT, \quad (2.24)$$

Считая объем достаточно малым для того, чтобы условия внутри него были постоянными, можно получить уравнение теплового баланса:

$$q(t - t_0) = C_p(T)m(T - T_0), \quad (2.25)$$

где  $q$  – мощность теплового потока на поверхности;

$t$  – время;

$m$  – масса;

$C_p(T)$  – удельная теплоемкость металла.

Применение интегральной формы уравнения обеспечивает простое формирование численной схемы решения.

Для решения задачи теплопроводности выбран разностный метод, который заключается в разбиении тела на элементарные элементы (ячейки), размер которых позволяет считать внутри них однородными температуру, теплоёмкость, теплопроводность и плотность (см. Рисунок 2.12).

Плотность принята константой  $= 7600 \text{ кг/м}^3$ . Теплоёмкость и теплопроводность приняты массивами, индексированными по температуре. Значения теплоёмкости соответствуют результатам эмпирического исследования (см. Раздел 2.5), значения теплопроводности взяты из справочной таблицы [129] для стали схожей химической композиции.

Между ячейками приняты граничные условия 2-го рода. Для расчета температуры ячейки необходимо воспользоваться уравнением теплового баланса:

$$T' = \frac{\sum_{i=0}^n q_i t}{c_v(T)m} + T, \quad (2.26)$$

где  $n$  – количество соседних ячеек;

$q_i$  – тепловой поток от  $i$ -ой ячейки;

$t$  – шаг по времени;

$c_v(T)$  – теплоемкость ячейки;

$m$  – масса ячейки;

$T$  – температура ячейки до теплообмена;

$T'$  – температура ячейки после теплообмена.

Алгоритм вычислений сводится к следующей последовательности действий:

1) для каждой ячейки производится определение коэффициентов теплоемкости, теплопроводности и производных от них параметров, зависящих от локальной температуры материала;

2) для каждой ячейки производится вычисление мощности всех тепловых потоков; в число этих потоков входят как внутренние тепловые потоки, так и внешние, которые определяются граничными условиями;

3) для каждой ячейки определяется мощность внутренних энерговыделений; если температура ячейки предполагает протекание процесса распада аустенита, учитывается его тепловой эффект (см. Раздел 2.5); для определения доли распавшегося аустенита используются модельные расчёты по кинетике распада согласно [60];

4) из условия устойчивости вычисляется шаг по времени и производится перерасчет температур ячеек сетки.

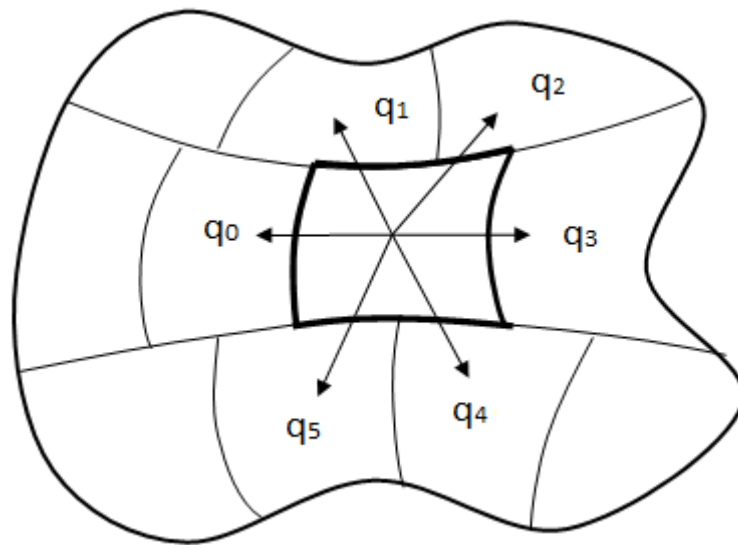


Рисунок 2.12 – Разбиение на элементарные ячейки

Условие устойчивости для интегрального уравнения определяется требованием того, чтобы в течение шага по времени не происходило изменение знаков тепловых потоков при неизменном граничном условии. Это приводит к следующему соотношению для шага по времени:

$$t_i < \frac{1}{k} \lambda \frac{\Delta T}{\Delta x Q_0}, \quad (2.27)$$

где  $t_i$  – величина шага по времени;

$\Delta T / \Delta x$  – приповерхностный градиент температуры;

$Q_0$  – тепловой поток граничного условия;

$k$  – коэффициент устойчивости ( $0 < k < 1$ );



$\lambda$  – коэффициент теплопроводности.

Особенностью данной вычислительной процедуры является то, что приведенные выше соотношения явно не содержат параметров, связанных с метрикой или типом системы координат. Соответственно, одна и та же вычислительная процедура может применяться для одномерных, двумерных и трехмерных задач, сформулированных в декартовых, цилиндрических и сферических координатах.

Конфигурация расчета осуществляется посредством системы текстовых конфигурационных файлов. В них описаны как системные константы, так и константы самого расчёта.

Входные данные поступают в расчётный модуль из внешней (по отношению к модулю) базы данных (БД). Для расчёта во внешней БД создана специальная сущность. Результатом запроса из данной сущности является массив входных данных. В эту же БД осуществляется запись результатов. Настройки подключения к внешней БД, запросы на чтение и запись находятся в конфигурационном файле.

Поскольку код модуля расчёта скомпилирован в виде исполняемого файла (расширение – .exe) и не требует параметров вызова, он может быть вызван как вручную, так и любым фоновым процессом операционной системы. При вызове модуля константы загружаются в глобальную память, осуществляется выборка входного массива, выполняется цикл расчётов по каждому элементу входного массива, после чего осуществляется запись результатов для каждого элемента по отдельности. Такая реализация позволяет достаточно эффективно использовать память, так как в глобальной области хранятся только константы.

Исполняемый код реализован в виде объекта с настройкой видимости полей и методов. Такая реализация позволяет применять данный программный код (с минимальными изменениями) для компиляции его как исполняемого модуля в рамках какой-либо иной автоматизированной информационной системы.

## 2.7. Результаты теплофизического моделирования теплового состояния металла на линии ТЛС

Все расчеты выполнены на сетке, состоящей из 65 слоев (ячеек). Температура стали при моделировании в рамках ячейки сетки считается постоянной по координате и изменяется только по времени. В этой связи приводимые ниже температуры можно считать средними по соответствующему слою, составляющему 1/65 от толщины проката.

На линии ТЛС в качестве начальных данных задается распределение температуры по толщине сляба при выгрузке из печи. На большинстве станов горячей прокатки величина перепада температуры по толщине металла ограничивается технологической инструкцией, поэтому в модели принимается однородное распределение температуры.

Сразу после подпечного рольганга расположен гидросбив печной окалины. На Рисунке 2.13 показано влияние гидросбивов на температуру поверхностного слоя металла. Можно отметить, что потери тепла за счет гидросбивов невелики на фоне радиационного остывания металла.

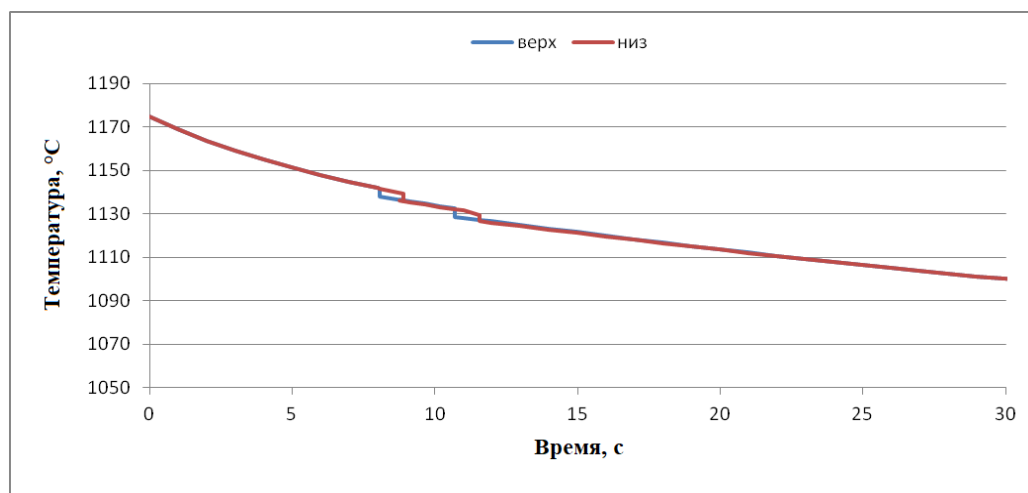


Рисунок 2.13 – Влияние гидросбива на температуру поверхностного слоя – опытный режим № 1

На Рисунке 2.14 приведены результаты моделирования остывания металла в черновой фазе прокатки.

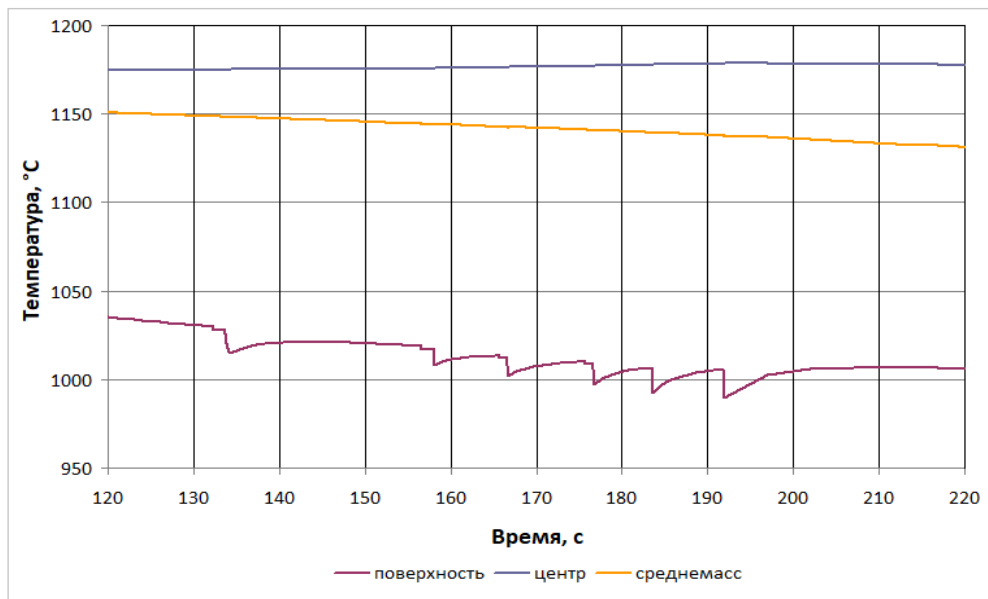


Рисунок 2.14 – Тепловые потери при черновой прокатке опытного режима № 1

Кондуктивные потери тепла при черновой прокатке даже для поверхностного слоя крайне незначительны, а на глубине 0,16 толщины металла возмущения температуры от отдельных проходов становятся незаметны. Слабое возмущение температуры приповерхностного слоя перед обжатием на первых четырех проходах объясняется влиянием гидросбивов.

На Рисунке 2.15 приведена динамика изменения температуры металла в процессе прокатки. После выгрузки из печи поверхность металла остывает радиационно, кроме того, некоторое количество тепла при прокатке отнимают гидросбивы и кондуктивные потери при контакте с валками. При чистовой прокатке эти потери заметны в виде «зубцов» на графике температуры внешнего слоя и изменения угла наклона графика температуры глубинных слоев. Следует отметить, что в черновой фазе энерговыделение при деформации практически равно потерям на теплопередачу валкам. В чистовой фазе влияние деформационного разогрева заметнее, однако общие потери тепла все же превышают разогрев – среднемассовая температура снижается.

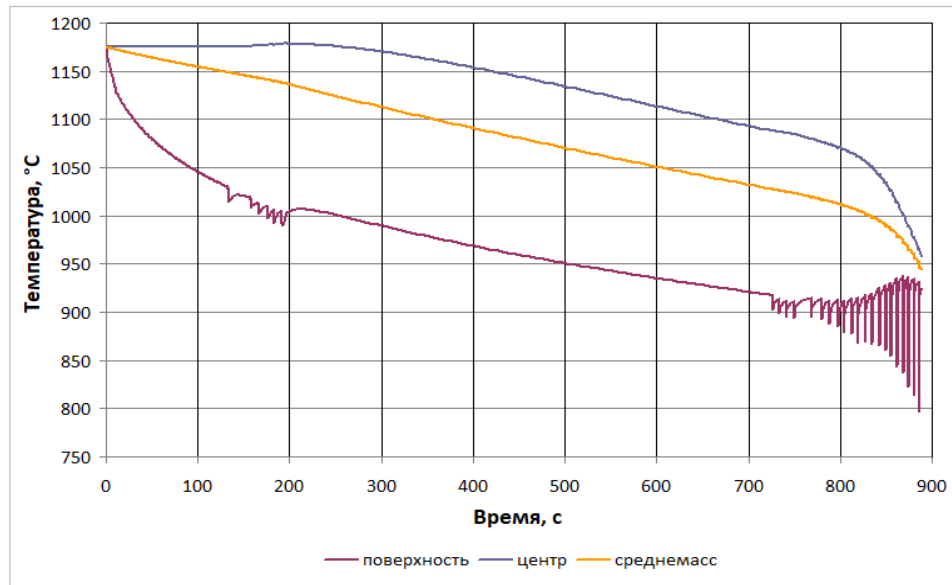


Рисунок 2.15 – Динамика изменения температуры металла при прокатке на ТЛС «5000» с учетом энерговыделения при пластической деформации – режим № 1

Расчет температуры поверхности в точке, соответствующей положению пирометра, показывает, что расчетная температура поверхности после завершения чистовой прокатки находится в согласии с показаниями пирометра.

Для управления температурой в фазе 2 контролируемой прокатки применяется «подстуживание» проката выдержкой на рольганге. При этом из-за достаточно большой толщины и значительной площади боковых граней проката после фазы 1 краевые эффекты охлаждения могут оказать значительное влияние на конечные свойства полосы.

На Рисунке 2.16 приведено распределение температуры в крае полосы, выдержанной на рольганге. Время остывания соответствует максимальной выдержке полосы во время опытных прокаток.

Распределение получено двумерным расчетом края полосы шириной 600 мм, на срезе, направленном к центру полосы, в качестве граничного условия задавался нулевой поток энергии. Считалось, что тепловые потоки на верхней и нижней гранях симметричны, поэтому выполнялся расчет для половины толщины проката. По плоскости симметрии в качестве граничных условий также задавался нулевой поток. В качестве начальных данных в задаче использовалось распределение

температуры по толщине, полученное в расчетах для прокатки в фазе 1. Рисунок 2.16 демонстрирует, что краевой эффект существенно снижает температуру на крае проката.

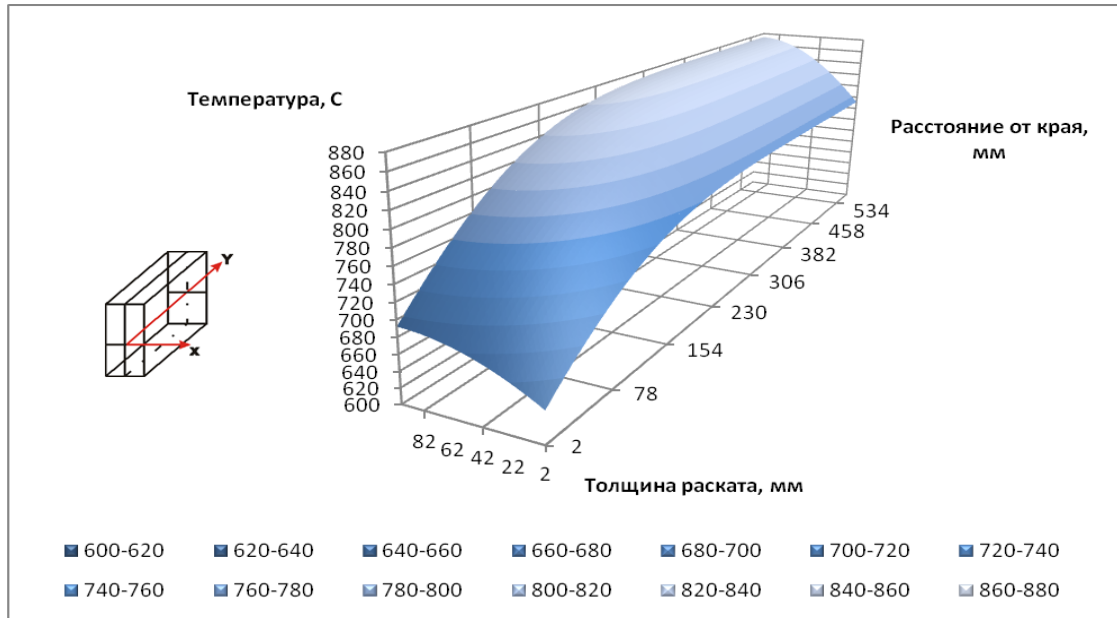


Рисунок 2.16 – Распределение температуры по толщине на краю проката через 1800 с «подстуживания» после завершения первой фазы прокатки – режим № 1

На Рисунке 2.17 изображено распределение среднemasсовой по толщине заготовки температуры вблизи края в зависимости от времени выдержки. Для оценки глубины проникновения тепловой волны в металл построены кривые, соответствующие глубине, на которой среднemasсовая температура металла снижается на 5 °C (оранжевая кривая) и 20 °C (голубая кривая) по сравнению с центром полосы.

По мере уменьшения толщины металла относительная величина краевых потерь снижается вместе с площадью боковых граней проката. Краевое захлаживание, накопленное при подстуживании, «консервируется» и приводит к появлению области измененных свойств на боковых краях проката. Поскольку уширение проката в фазе 2 незначительно, Рисунок 2.17 дает хорошую оценку ширины этой области после последнего разворота заготовки на рольганге.

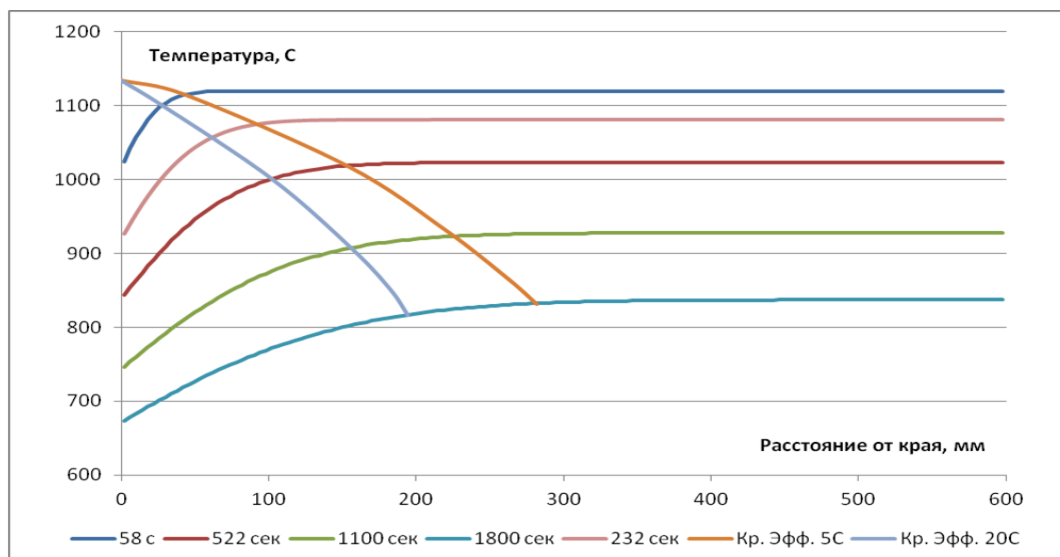


Рисунок 2.17 – Динамика изменения среднемассовой температуры на краю проката – режим № 1

При захлаживании проката в его головной и хвостовой частях ситуация несколько иная. Толщина полосы в фазе 2 существенно снижается, что приводит к формированию области измененных свойств металла длиной до 2,5 м.

На Рисунке 2.18 приведены зависимости среднемассовой температуры проката в установке УО от времени для опытных режимов №№ 1–5.

Рисунок 2.19 иллюстрирует типичную картину зависимости температур в сечении проката от времени для опытного режима № 1. На участке до начала ускоренного охлаждения перепад температуры по толщине металла невелик и равен ~ 10–12 °С. При подаче воды разница температур между приповерхностным и средним слоями превышает 600 °С. Тепловая волна достигает центра проката через 3–4 секунды, после чего начинается снижение температуры центральных слоев.

На Рисунке 2.20 приведены зависимости температуры от времени для различных слоев по толщине листа, прокатанного по режиму № 3. Хорошо просматривается «размывание» тепловой волны по мере продвижения ее в глубину металла. На Рисунке 2.21 приведено распределение температуры по сечению листа в разные моменты времени (опытный режим № 2).

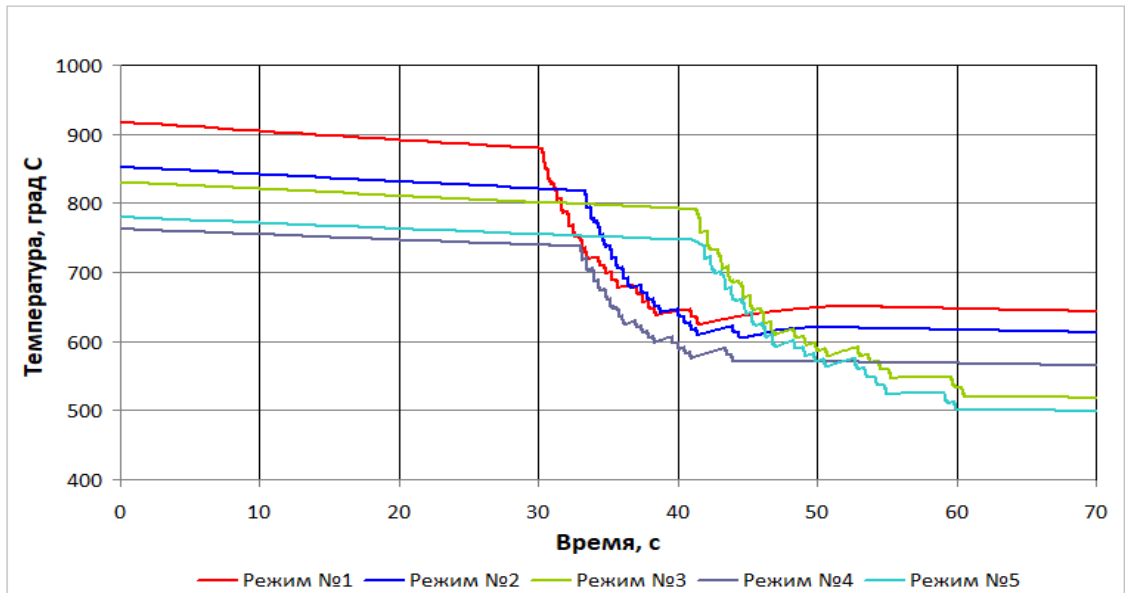


Рисунок 2.18 – Расчетная среднemasсовая температура проката  
в установке ускоренного охлаждения

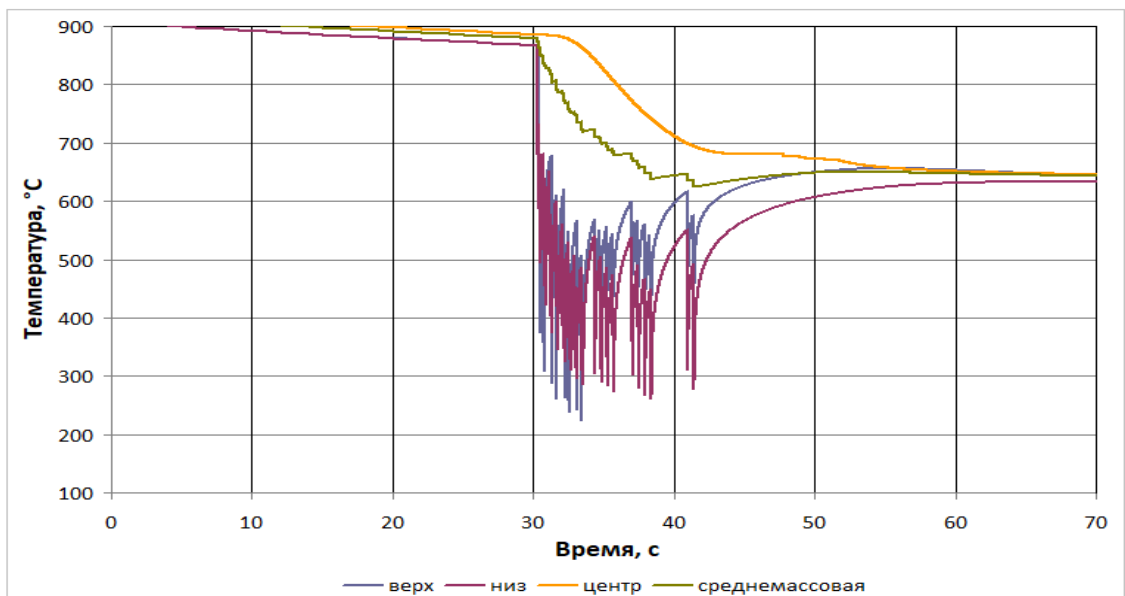


Рисунок 2.19 – Зависимость температуры в сечении проката от времени – режим № 1

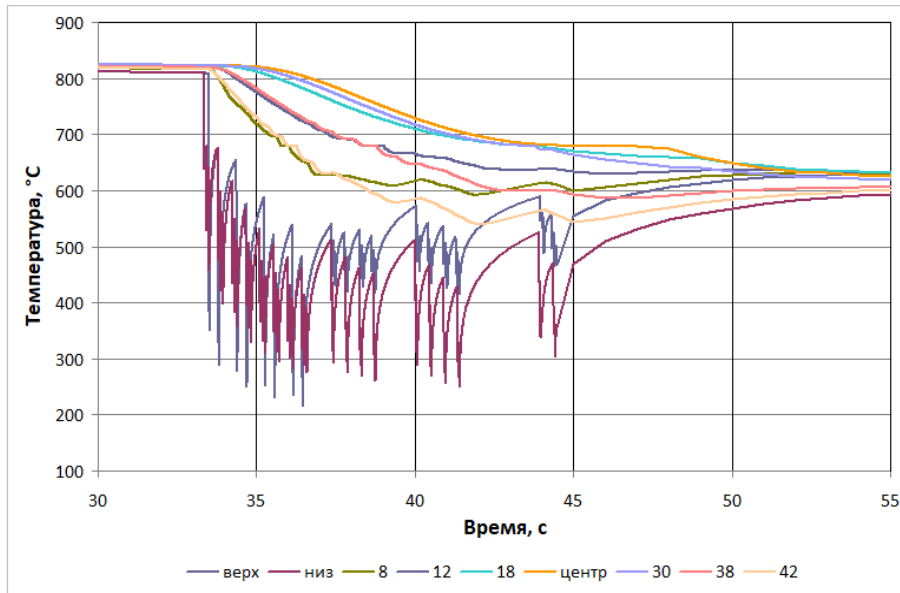


Рисунок 2.20 – Зависимость температуры слоев проката от времени – режим № 2

На Рисунках 2.19–2.21 отчетливо заметна асимметрия, связанная с конструктивными особенностями установки и различием режимов охлаждения сверху и снизу. Эта асимметрия приводит к достаточно значительной разнице температур нижней и верхней поверхностей металла.

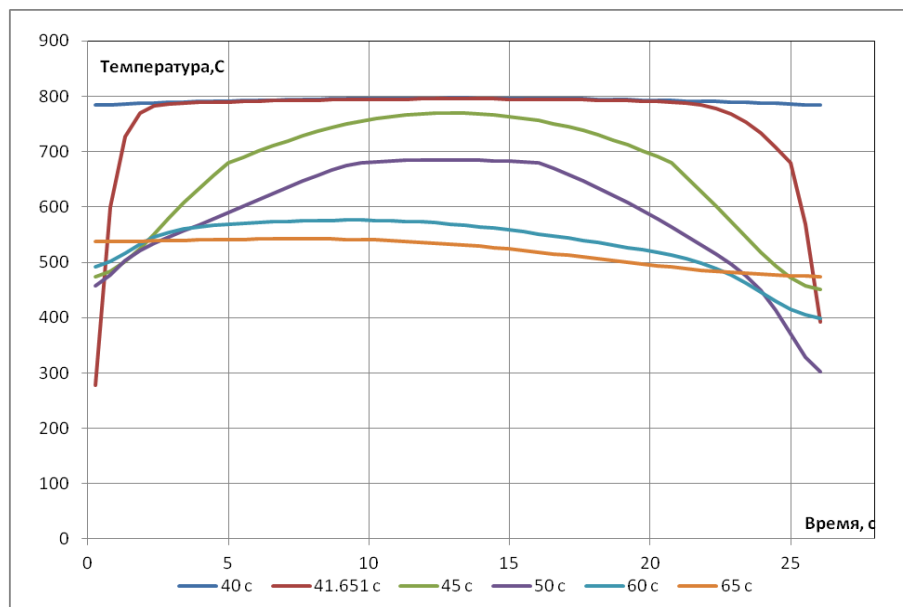


Рисунок 2.21 – Распределение температуры по сечению листа в разные моменты времени в установке УО – режим № 2



Расчетные температурные траектории слоев проката вплоть до момента завершения чистовой фазы прокатки представлены на Рисунках 2.22–2.26.

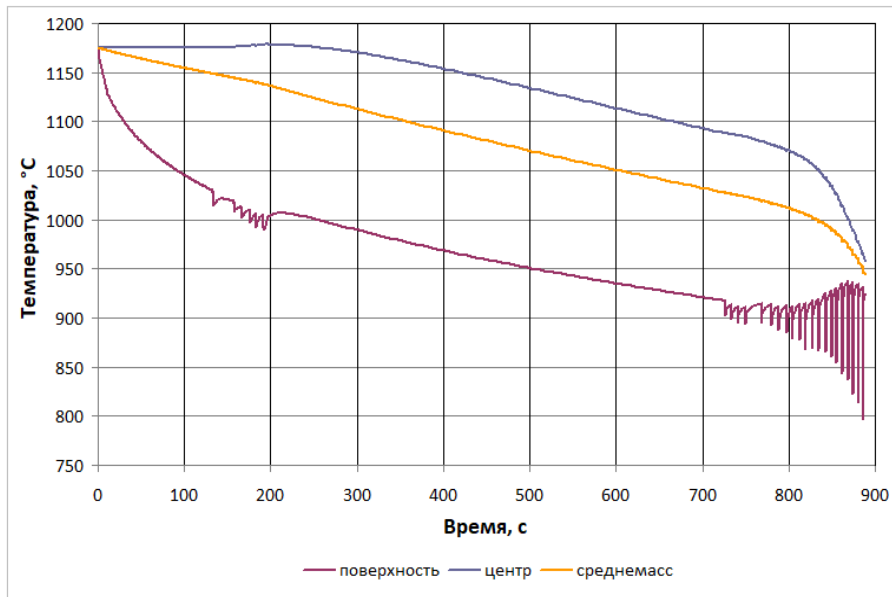


Рисунок 2.22 – Расчетные температурные траектории слоев проката при прохождении им технологической линии ТЛС «5000» вплоть до момента завершения чистовой фазы прокатки – режим № 1

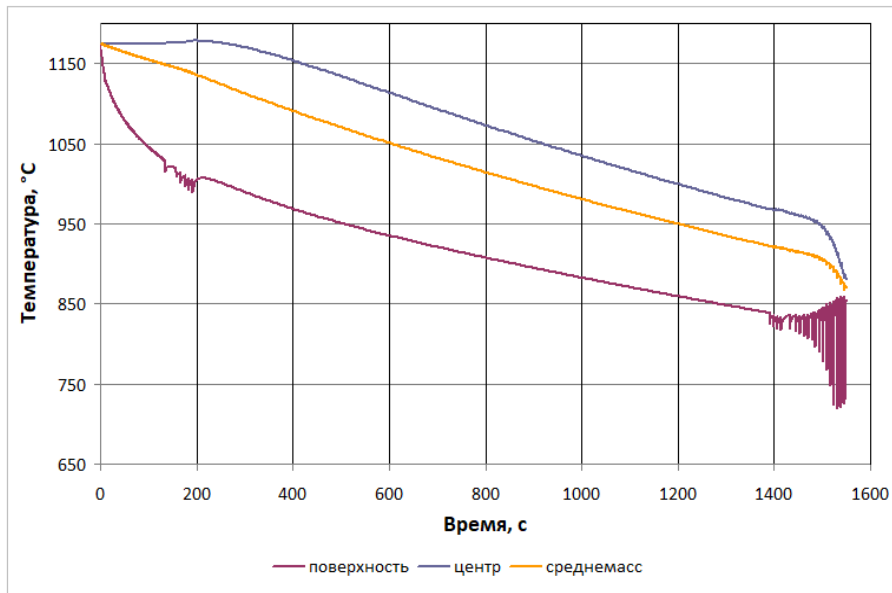


Рисунок 2.23 – Расчетные температурные траектории слоев проката при прохождении им технологической линии ТЛС «5000» вплоть до момента завершения чистовой фазы прокатки – режим № 2

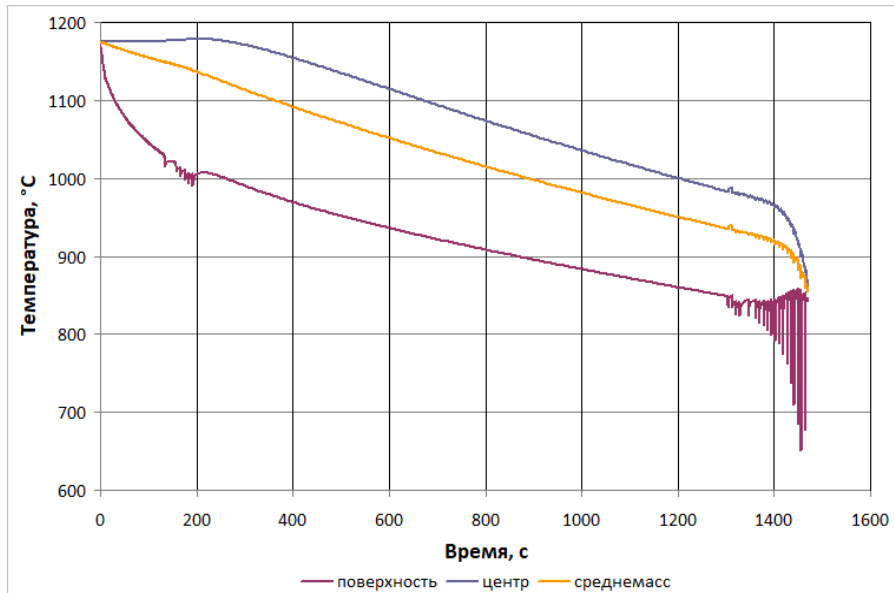


Рисунок 2.24 – Расчетные температурные траектории слоев проката при прохождении им технологической линии ТЛС «5000» вплоть до момента завершения чистовой фазы прокатки – режим № 3

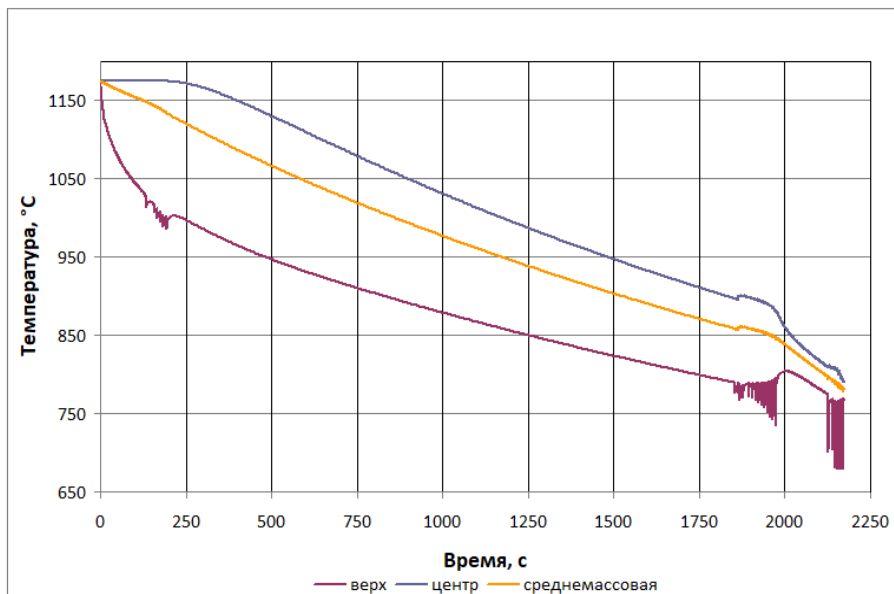


Рисунок 2.25 – Расчетные температурные траектории слоев проката при прохождении им технологической линии ТЛС «5000» вплоть до момента завершения чистовой фазы прокатки – режим № 4

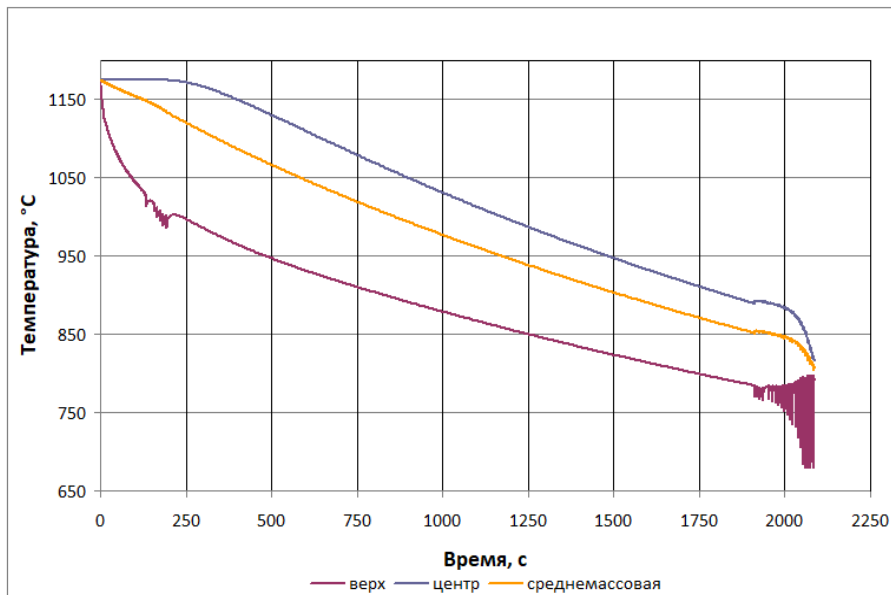


Рисунок 2.26 – Расчетные температурные траектории слоев проката при прохождении им технологической линии ТЛС «5000» вплоть до момента завершения чистой фазы прокатки – режим № 5

На практике отправной точкой расчёта теплового состояния проката может быть любая температура поверхности заготовки в привязке к этапу производства. Средства АСУТП ТЛС позволяют получить фактические значения температуры выгрузки сляба из печи, температур начала и конца фаз прокатки или каждого прохода по отдельности и температуру входа в установку УО. Таким образом, возможна адаптация (уточнение) результатов прогнозирования к условиям производства конкретной заготовки. Исходя из особенностей организации контролируемой прокатки исследуемого сортамента на ТЛС «5000» ПАО ММК и степени влияния УО на конечные физико-механические свойства проката, наиболее востребованным вариантом моделирования для целей ПАО «ММК» является вариант, базирующийся на температуре конца прокатки.

Для моделирования теплового состояния заготовки во время УО температура поверхности проката в нулевой момент времени принимается равной температуре конца прокатки, градиент температур между поверхностью и центром проката принимается равным  $\sim 15$  °C. Расчетные температурные траектории слоев проката при его ускоренном охлаждении представлены на Рисунках 2.27–2.31.

На данных траекториях можно заметить явные интенсивные теплотери проката в приповерхностных слоях, провоцирующих более «плавный» кондуктивный теплоотвод из глубины. Постепенно градиент температуры уменьшается.

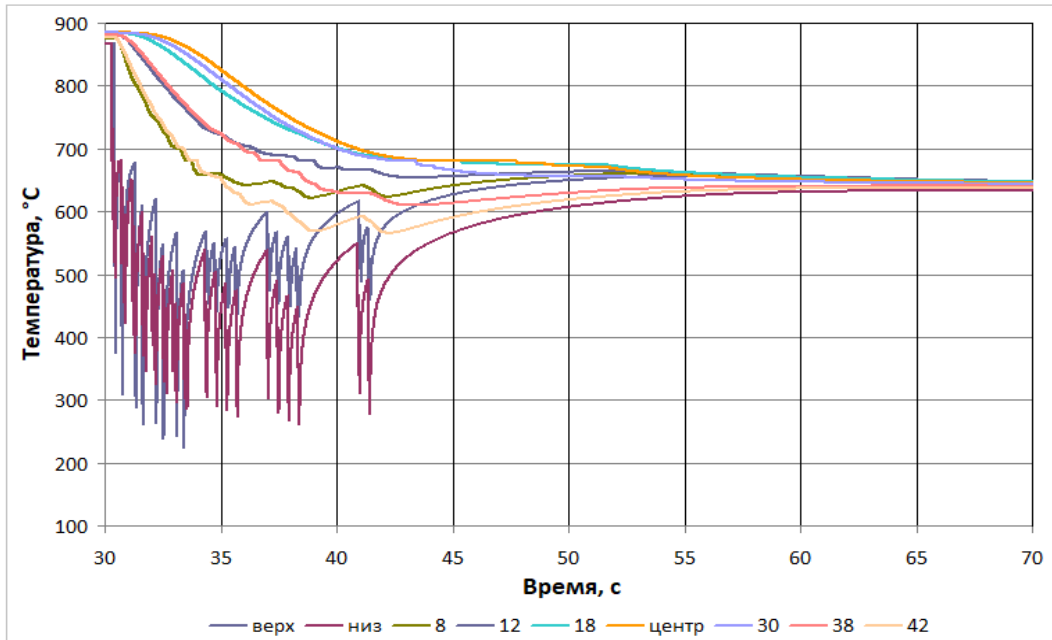


Рисунок 2.27– Температурные траектории слоев проката при прохождении им линии УО ТЛС «5000» – режим № 1

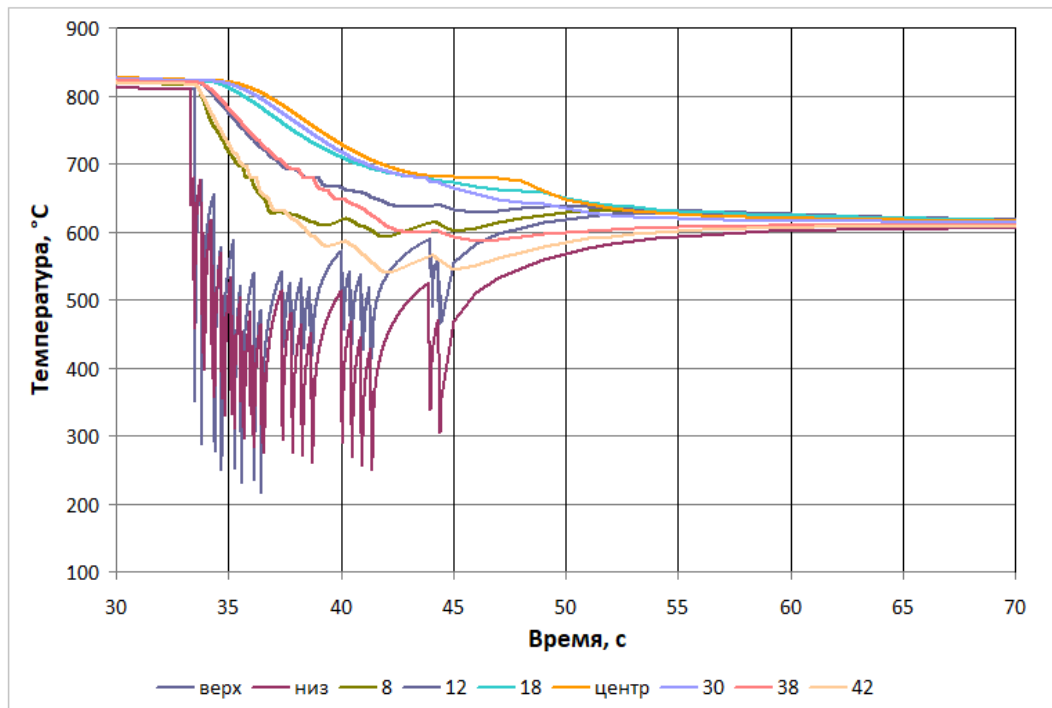


Рисунок 2.28 – Температурные траектории слоев проката при прохождении им линии УО ТЛС «5000» – режим № 2

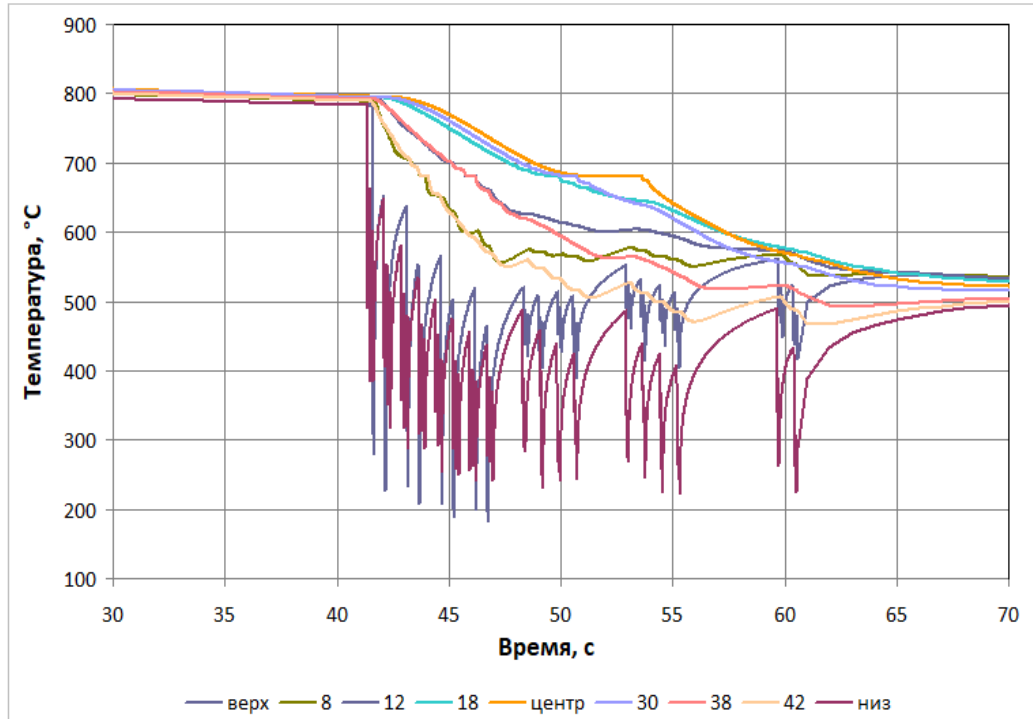


Рисунок 2.29 – Температурные траектории слоев проката при прохождении им линии УО ТЛС «5000» – режим № 3

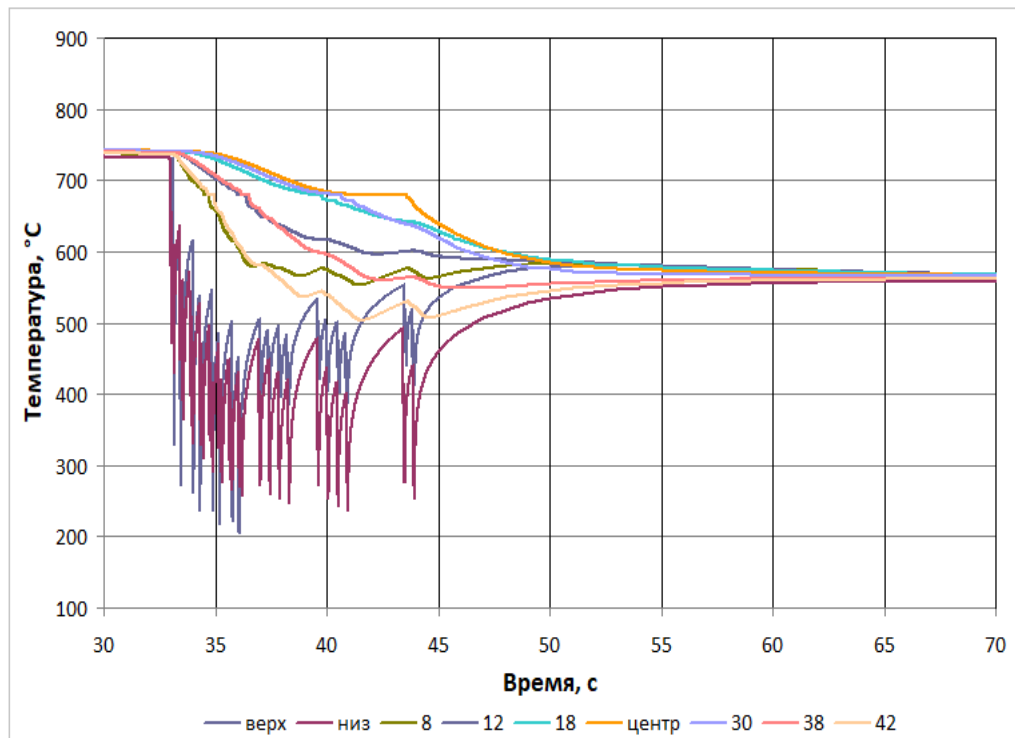


Рисунок 2.30 – Температурные траектории слоев проката при прохождении им линии УО ТЛС «5000» – режим № 4

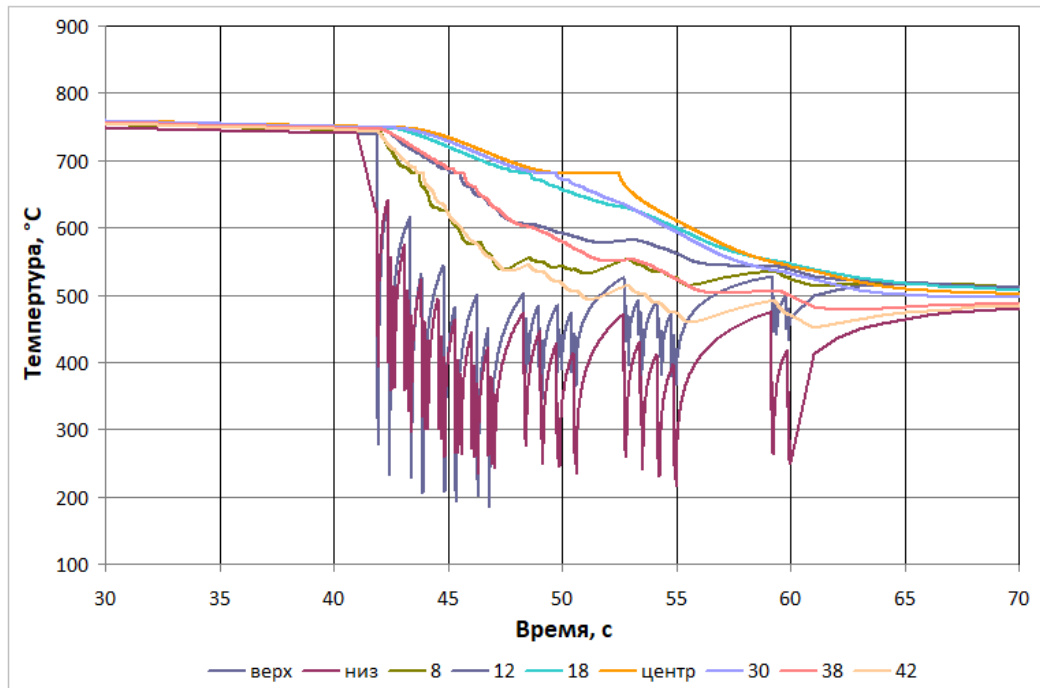


Рисунок 2.31 – Температурные траектории слоев проката при прохождении им линии УО ТЛС «5000» – режим № 5

Также на графиках можно заметить «возмущения» температурных траекторий внутренних слоёв, являющиеся следствием изменения энтальпии системы в результате структурных превращений в стали по достижению определённых температурных диапазонов.

## 2.8. Проверка сходимости модели

Оценка достоверности модели произведена с применением данных пирометрии АСУТП ТЛС «5000» по ~ 30000 единиц проката класса прочности К60. Для валидации использовались значения расчётной и фактической температур поверхности проката после установки УО. В качестве фактических данных применены усреднённые данные пирометров отводящего рольганга установки УО. В качестве расчётных величин взяты конечные значения температур первого слоя, который соответствует 1/65 толщины проката. Сравнение результатов в виде точечной диаграммы представлено на Рисунке 2.32.

Оценка сходимости показала следующие результаты:

- $\Delta_{абс}$  составила 78,5 °С;
- $\Delta_{отн}$  составила 13,7 %.

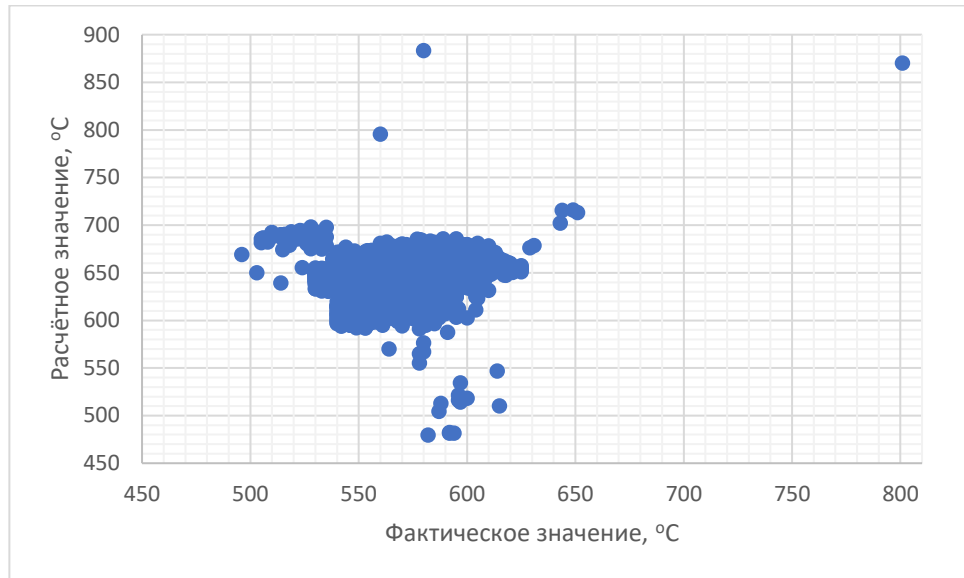


Рисунок 2.32 – Сравнение фактических и расчётных значений температуры поверхности 30000 раскатов класса прочности К60

На Рисунке 2.33 приведено частотное распределение  $\Delta_{отн}$ . Следует отметить, что более 90 % значений отклонений не превышает значения «20 %», что в случае теплофизической модели указывает на высокую степени сходимости модельных расчётов.

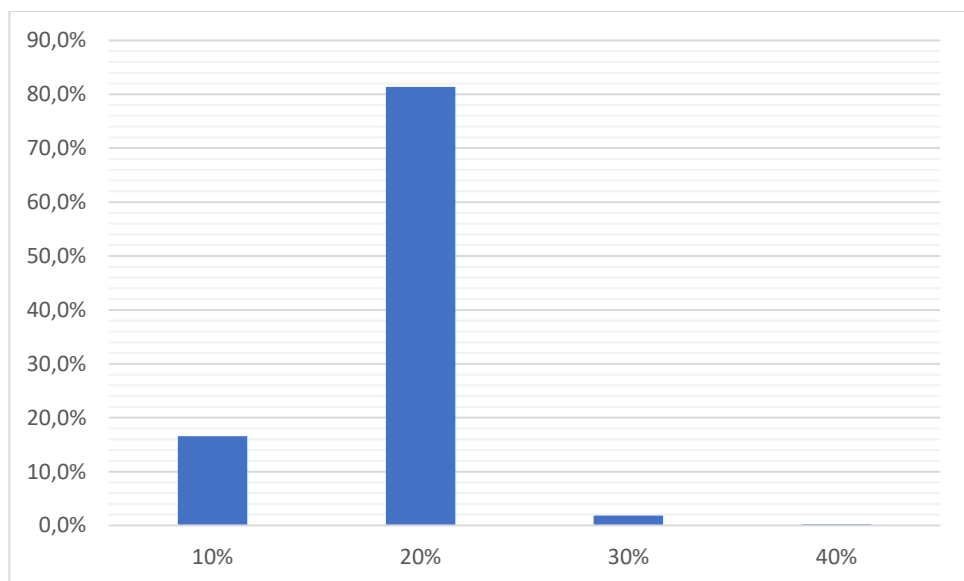


Рисунок 2.33 – Частотное распределение  $\Delta_{отн}$  теплофизической модели на верификационной выборке

## 2.9. Выводы по главе 2

1. На ТЛС «5000» ПАО ММК проведены предварительные промышленные эксперименты в виде опытных КТМО проката категории прочности К60 с типичной для исследуемого сортамента химической композицией. Выбор применённых режимов обеспечил вариативность формирования теплового состояния проката по завершению КТМО.

2. С применением данных, полученных при опытных КТМО, проведен анализ процессов, протекающих при КТМО на линии ТЛС, влияющих на тепловое состояние заготовки. Показано влияние деформационного разогрева и теплопотерь заготовки на распределение температуры по толщине проката в процессе КТМО. Определены граничные условия процессов теплообмена для каждой значимой технологической операции. Показано, что наибольшее влияние на формирование физико-механических свойств проката оказывают параметры ускоренного охлаждения.

3. Для применения различных граничных условий модели определены характерные длительности технологических операций, влияющих на тепловое состояние заготовки, при ее прохождении по линии ТЛС «5000» ПАО «ММК» с момента выдачи сляба из методической печи до момента окончания ускоренного охлаждения проката.

4. Произведён подбор адаптационных параметров модели, обеспечивающих наибольшую сходимость результатов.

5. Определены значения коэффициента теплоёмкости исследуемой стали при различных температурах и величина теплового эффекта распада аустенита.

6. С применением описанных выше данных построена модель изменения теплового состояния заготовки в линии прокатного стана.

7. Произведена проверка сходимости модели с применением данных пирометрии АСУТП ТЛС «5000» по ~30000 раскатам. Показано, что на 90% выборки величина относительного отклонения не превышает 20%.



## ГЛАВА 3. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РАСЧЕТА ЗНАЧЕНИЙ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ТРУБНОГО ПРОКАТА

### 3.1 Построение и проверка сходимости расчетной модели

Для построения регрессионной модели расчета значений физико-механических свойств проката использовались данные по ~ 26 000 единиц проката класса прочности К60, предназначенных для производства труб большого диаметра. В качестве значений зависимых переменных (см. Таблицу 3.1) использовались фактические данные о физико-механических испытаниях соответствующих листов.

Для построения уравнений регрессии применялись следующие методики [130–134]:

- 1) отсев некачественных данных;
- 2) нормализация независимых переменных;
- 3) методика исключения, заключающаяся в отсеке независимых переменных из их максимально полного набора;
- 4) методика включения, заключающаяся в поэтапном введении независимых переменных в модель;
- 5) группировка схожих независимых переменных;
- 6) сокращение массива данных путем введения ограничивающих диапазонов значений некоторых независимых переменных.

Для каждого из приведенного в Таблице 3.1 физико-механического свойства были построены частные массивы и соответствующие регрессионные уравнения с выявлением наиболее благоприятных для прогнозирования комбинаций независимых переменных.

Описание вариативности независимых переменных приведено в Приложении А.

Таблица 3.1 – Основные параметры частных выборок по физико-механическим свойствам

Параметр	Размер выборки	Минимум	Максимум	Среднее значение
НЗФ min	16796	6	12	10.78
НЗФ max	16796	4.75	11	9.67
НЗД max	5056	8	11	9.74
НЗД min	5056	9	12	10.79
Полосчатость	14637	1	3	1.92
НВ10, ед.	25963	104.5	243	202.91
КСV-20 ср, Дж/см <sup>2</sup>	18550	227	441	348.10
КСV-40 ср, Дж/см <sup>2</sup>	773	185	432	318.72
КСU-60 ср, Дж/см <sup>2</sup>	18627	173	440	310.67
КV-20 ср, Дж	17	189	329	228.75
Дол вяз KV-20 ср, %	17	100	100	100.00
Пр т, Н/мм <sup>2</sup>	15600	510	592	552.41
Пр т L, Н/мм <sup>2</sup>	4949	455	624	527.67
Пр т T, Н/мм <sup>2</sup>	4995	486	641	547.04
Пр т усл0,2 L, Н/мм <sup>2</sup>	7	464	626	530.49
Пр т усл0,2 T, Н/мм <sup>2</sup>	23	483	640	549.80
Пр т П0.5, Н/мм <sup>2</sup>	72	480	640	553
Пр т П0.5 L, Н/мм <sup>2</sup>	4820	464	626	530.49
Пр т П0.5 T, Н/мм <sup>2</sup>	4825	483	640	549.80
BC, Н/мм <sup>2</sup>	16162	593	754	630.34
BC L, Н/мм <sup>2</sup>	9863	518	703	601.94
BC T, Н/мм <sup>2</sup>	9920	545	742	622.44
Пр т/BC	15606	0.81	0.91	0.88
Пр т/BC T	4995	0.73	0.94	0.88
Пр т/BC L	4949	0.68	0.94	0.88
Пр т0.2/BC T	23	491	574	548.85
Пр т0.2/BC L	2	521	564	543.88
Пр тП0.5/BC	417	0.88	0.9	0.89
Пр тП0.5/BC L	4914	0.81	0.93	0.88
Пр тП0.5/BC T	4919	0.7	0.98	0.88
Дельта 5, %	16186	19	26	22.38
Дельта 5 L, %	10071	19.5	56	25.54
Дельта 5 T, %	10140	16.5	33	23.47
Дельта p, %	6221	6	53	11,74
Дельта p L, %	274	8	18	13.07
Дельта p T, %	199	6.5	16	12.39
OC L, %	199	61	85	73.55
OC T, %	199	63.66	83	72.96
ИПГ -20 ср, %	17733	63	100	95.87
ИПГ -31 ср, %	1038	70	100	95.19
ИПГ -40 ср, %	198	75	95	87.21
DWTT-10 ср, %	17	91	100	95.81
CTOD-20, мм	2	0.28	0.61	0.45

Наилучший результат прогнозирования был достигнут при использовании расчетных данных о тепловом состоянии проката, полученных посредством использования построенной в рамках настоящей работы модели теплового состояния проката, адаптированной к условиям ТЛС «5000» ПАО «ММК».

Кроме того, при построении регрессионной модели использовались фактические данные:

- геометрические параметры листов (толщина);
- технологические параметры производства проката (температуры на входе в установку УО, скорости транспортировки, схемы включения коллекторов и расходы хладагента (воды) в линии УО);
- данные о химическом составе стали.

Наибольшая точность прогноза уровня физико-механических свойств проката достигнута при использовании регрессионных уравнений с количеством независимых переменных  $\sim 120$ . Следует отметить, что регрессионные модели с таким количеством независимых переменных следует считать надежными только при условии наличия достаточно больших массивов данных о зависимых переменных (фактически измеренных физико-механических свойствах). В данный момент это условие может быть выполнено для 12 зависимых переменных.

Применение нейросетей позволяет обеспечить получение более достоверного прогноза в случае попадания независимых переменных за границы обучающего массива данных. Однако по причине ограниченности частных массивов данных применение нейросетей является нецелесообразным, так как они ещё более требовательны к объёмам входных данных. Для указанного количества независимых переменных крайне высока вероятность переобучения даже однослойной нейросети, что и показали подобные попытки осуществления расчёта. При ограничении количества независимых переменных, достоверность прогноза также снижалась в  $\sim 1-2$  раза по сравнению с регрессионными моделями.

Полный набор коэффициентов при независимых переменных регрессионных уравнений, используемых в математической модели, приведены в Приложении Б.

В Таблице 3.2 приведены коэффициенты при наиболее значимых независимых переменных – фактических параметрах технологии производства и концентраций химических элементов.

Таблица 3.2 – Коэффициенты при наиболее значимых независимых переменных регрессионных уравнений

Параметр	Механическое свойство											
	Пр_т/BC_Т	Пр_т/BC_L	ИПГ_-20_ср	HV10	НЗФ_min	НЗФ_max	Пр_т_L	KCV-20_ср	Пр_т_Т	Пр_тПЮ.5/BC_L	Пр_тПЮ.5/BC_Т	BC_Т
ТН	9,5	6,8	387,04	819,59	-60,3	-50,14	138,4	-114,25	-371,24	2,6867	4,0591	-4974,82
Т01	0	0,0000	0,02	0,03	0	0	-0,07	-0,02	-0,21	0	0	-0,11
С	-0,55	-0,54	-5,98	2,77	-0,11	-0,32	-7,12	-114,79	-134,33	-0,33	-0,39	219,13
SI	-0,15	-0,14	-4,22	47,84	-0,25	-0,29	17,65	-48,71	36,65	-0,11	-0,09	122,41
MN	-0,15	-0,16	220,00	-5,86	1,22	1,31	14,58	17,78	35,18	-0,05	-0,06	143,52
S	1,00	0,76	-45,94	1147,69	-16,67	-17,63	1650,36	-1507,96	2744,06	1,58	1,28	22,94
P	-1,03	-0,38	52,98	599,67	-11,04	-13,51	384,94	-134,90	-208,82	-0,43	-0,77	582,15
CR	-0,16	-0,24	-4,66	48,17	-1,71	-1,06	-115,95	293,54	-46,34	-0,19	-0,20	120,57
NI	-0,03	-0,06	-7,38	-21,27	1,16	1,02	32,77	-12,03	47,49	-0,07	-0,07	51,01
CU	-0,07	-0,07	9,93	-44,35	1,59	1,56	20,30	-141,30	-8,42	-0,09	-0,04	42,19
AL	-0,02	-0,13	-8,61	-138,17	3,66	3,44	53,56	-17,37	124,22	0,09	-0,25	125,54
TI	0,01	-0,07	-32,28	33,89	-0,37	-0,37	1090,27	-105,71	1252,65	0,57	0,85	1374,48
V	-0,72	-1,30	-5,82	250,48	-1,13	-0,16	-307,99	-616,93	-34,26	-0,20	-0,49	304,19
NB	0,52	0,42	2,47	190,96	-2,36	-3,47	146,13	590,59	233,03	0,08	-0,06	-33,01
MO	-0,26	-0,29	2,11	30,91	0,69	0,97	72,49	-143,20	151,94	-0,04	-0,13	276,42
B	-56,26	-59,18	-3614,30	-9367,23	-22,37	-11,92	-4776,04	8973,18	-1808,19	-52,61	-49,47	44289,27
CA	-1,41	0,11	-77,29	-617,96	-7,22	-4,45	1371,57	229,46	319,95	0,60	-0,21	1237,87
SN	0,45	0,28	-24,05	126,84	-0,99	-1,85	-10,32	67,70	151,14	0,03	-0,12	-64,35
N	-1,05	-0,51	191,33	-634,22	16,91	16,41	-2918,71	101,77	-4039,01	0,14	-0,35	-3585,31

Следует отметить стабильно высокое влияние бора и ряд сравнительно высоких значений коэффициентов по прочим химическим элементам. Сравнительно низкое влияние величин концентраций некоторых основных легирующих элементов (С, Мn, Ni, Nb, V) вызвано достаточно низкой дисперсией данных параметров в исходном массиве данных. Примечательно влияние концентрации S, которое может быть объяснено широкими временными рамками исходного массива данных – достаточно высокая вариабельность качественных

показателей руды и чугуна привела к сравнительно высокой дисперсии данного параметра.

В Таблице 3.3 приведены коэффициенты при расчётных параметрах послыонного теплового состояния проката по завершению УО.

Таблица 3.3 – Коэффициенты регрессий при расчётных температурах 65 слоев проката по завершению УО

Параметр	Механическое свойство											
	Пр_т/ВС_Т	Пр_т/ВС_Л	ИПГ_-20_ср	HV10	H3Ф_min	H3Ф_max	Пр_т_Л	KCV-20_ср	Пр_т_Т	Пр_тП10.5/ВС_Л	Пр_тП10.5/ВС_Т	ВС_Т
T1	0,90	1,35	-151,13	317,28	-2,81	-4,08	-679,75	529,41	7,26	0,73	-0,02	-640,24
T2	1,25	-0,22	150,82	523,88	-10,57	-9,38	220,83	-156,37	384,01	-0,80	0,18	-166,17
T3	-1,89	-0,96	78,11	-257,61	10,80	10,88	693,77	-191,08	-262,73	0,29	0,14	228,36
T4	-0,40	0,07	40,65	-584,24	5,44	8,07	301,87	-867,03	19,20	0,22	0,17	623,08
T5	-0,78	-0,53	-88,15	-434,30	4,35	-2,07	-176,34	1049,10	-369,58	0,02	-0,37	317,42
T6	0,13	0,10	-45,15	-65,60	-0,82	3,00	-328,19	-357,22	-995,01	-0,74	0,05	-323,00
T7	0,62	0,09	-110,70	482,56	-2,72	-2,51	766,16	12,37	2073,95	0,05	-0,57	804,83
T8	0,83	0,65	30,24	-89,60	1,43	1,38	-712,50	-449,34	263,37	0,33	-0,58	-873,77
T9	-0,30	-0,09	68,30	114,15	-9,05	-8,73	323,04	-109,83	-594,32	0,66	1,79	-127,03
T10	-0,55	-0,68	132,11	470,39	-13,71	-9,22	-1021,62	1235,06	-1121,76	-1,28	-0,90	-73,26
T11	0,20	-0,30	-23,85	-122,75	13,52	7,28	-207,86	-727,80	-196,31	-0,49	-0,31	-298,90
T12	0,16	0,59	-97,00	-470,25	2,28	1,22	1165,77	-74,05	1113,54	0,57	0,44	885,27
T13	-0,28	-0,43	55,72	-13,40	2,07	2,89	-611,26	367,34	-806,68	0,97	0,00	-398,12
T14	0,14	-0,66	-53,60	-184,76	6,35	10,22	-643,27	-96,23	508,95	-0,20	-0,18	145,04
T15	-0,46	1,01	-40,11	296,16	-5,09	-7,12	1033,46	-427,36	313,38	-0,15	0,57	96,88
T16	-1,18	1,13	99,65	23,11	-1,65	-0,45	759,52	2,83	-2145,35	0,40	-0,16	-436,69
T17	2,45	-0,57	-74,32	-13,70	-1,20	-1,20	-400,52	262,64	2592,26	-0,97	-0,06	590,53
T18	0,61	-1,10	73,00	-122,81	4,91	0,82	-979,47	413,13	766,39	-0,07	-0,94	-188,51
T19	-1,27	-0,02	3,68	240,67	0,38	0,64	-1197,59	308,04	-1865,79	0,26	0,80	-723,40
T20	-0,34	-0,13	-42,61	-131,08	-0,76	-2,41	1426,86	-1138,96	-490,05	0,38	0,13	217,40
T21	-0,23	0,71	-14,15	-119,94	6,22	14,22	195,51	-454,24	491,70	0,08	-0,34	338,08
T22	-0,19	-0,30	-115,72	45,87	-21,52	24,58	-53,92	252,95	-298,22	-0,17	0,46	250,50
T23	0,14	1,03	36,48	198,08	-0,23	-4,53	1228,75	1602,42	1000,11	0,36	-0,35	265,76
T24	0,20	-1,75	63,69	331,68	7,92	12,45	-1315,36	-206,15	-485,21	-0,66	0,19	-681,66
T25	0,70	0,98	117,58	-571,31	17,71	14,94	-573,55	-981,80	160,73	-0,02	0,04	632,95
T26	-0,71	-0,53	-15,55	-108,47	0,59	1,96	757,37	554,98	201,94	0,36	-0,08	-465,47
T27	1,03	0,81	-129,87	86,29	-7,30	-5,55	693,64	-454,68	1129,93	0,40	-0,62	520,98
T28	0,30	0,79	9,59	239,62	-6,97	-7,40	1008,76	-1245,21	-544,11	-0,14	0,58	-811,19
T29	-1,37	-1,24	-19,11	101,84	0,80	2,59	-1802,38	1632,72	-1512,83	-0,35	-0,05	-51,74

Продолжение таблицы 3.3

Параметр	Механическое свойство											
	Пр_т/BC_Т	Пр_т/BC_L	ИПГ_-20_ср	HV10	HЗФ_min	HЗФ_max	Пр_т_L	KCV-20_ср	Пр_т_Т	Пр_тП0.5/BC_L	Пр_тП0.5/BC_Т	BC_Т
T30	0,14	0,48	27,60	328,16	-11,59	-18,74	-287,74	-455,31	-309,01	-1,04	-0,81	-225,84
T31	0,62	-0,17	102,88	-244,86	-1,70	0,90	-537,25	542,88	998,04	0,74	0,56	450,22
T32	-0,37	0,13	-3,10	-194,60	-4,13	0,09	-133,90	708,95	-723,92	0,80	0,69	-396,50
T33	-1,65	-0,53	-78,15	-296,84	8,02	5,03	599,56	-1379,54	-502,96	-0,39	0,00	594,76
T34	1,62	1,42	95,97	-525,21	11,24	14,47	1557,23	-434,91	1559,07	-0,58	-0,63	-252,01
T35	-0,07	0,03	-106,95	186,62	16,07	12,03	199,16	18,48	-72,76	-0,23	0,27	4,70
T36	-0,42	-1,11	93,14	373,39	3,27	0,48	11,52	822,43	806,47	0,68	-0,31	456,10
T37	0,58	0,90	-25,77	190,60	-2,63	-1,00	1477,37	-430,42	821,24	-0,51	-0,11	459,57
T38	0,72	-0,88	-118,75	671,39	-26,32	-20,01	-2325,50	1358,75	-1190,70	0,51	0,00	-817,52
T39	0,07	-0,61	28,15	214,47	-11,96	-11,58	-1233,14	-949,37	-939,56	0,90	0,06	-290,81
T40	-2,03	-1,86	23,77	-150,61	1,49	-2,73	-79,31	72,38	-207,32	-0,49	0,50	589,28
T41	0,45	1,50	49,85	-514,25	14,13	13,41	448,24	187,37	-113,17	-0,12	0,16	-822,12
T42	0,78	0,69	-78,71	-985,49	10,58	6,10	446,69	68,63	1010,34	-0,41	0,38	1060,54
T43	-1,29	-0,74	-1,86	-586,48	6,06	6,54	-1766,28	-1627,59	-2067,08	-0,28	-0,36	-239,92
T44	0,89	-0,40	30,58	653,97	-0,73	6,39	345,55	1197,90	858,49	0,96	-0,40	215,02
T45	-0,99	1,32	48,49	289,01	-8,62	-11,24	1191,76	-1190,83	-83,54	-0,47	-0,53	15,73
T46	1,65	0,79	-9,16	857,78	-2,04	-4,82	209,65	886,54	844,40	-0,23	0,19	-553,92
T47	1,08	1,53	-79,37	423,42	-18,58	-11,96	193,79	619,91	294,26	0,00	-0,53	-393,28
T48	-1,08	-0,78	134,08	-30,95	3,91	5,92	168,46	834,64	-536,42	-0,10	-0,31	376,11
T49	0,46	-0,25	26,15	-143,22	3,25	2,11	-439,81	-380,88	-150,14	-0,92	0,76	-80,14
T50	-0,23	-1,25	-72,18	-240,33	16,22	14,33	274,73	-621,90	774,58	1,51	1,20	144,51
T51	1,66	0,28	42,05	-416,52	4,45	-0,63	-480,55	305,91	828,30	-0,37	0,32	591,52
T52	-1,82	-0,96	7,57	-367,81	4,01	2,62	-40,30	838,10	-1351,23	-0,11	0,04	-774,51
T53	0,74	0,20	-187,76	-331,46	-15,48	-18,15	926,24	-1447,70	1254,86	0,38	-0,45	202,83
T54	-1,86	-0,45	-15,03	-144,73	-3,24	-0,47	-178,39	332,13	-356,12	0,40	-1,17	950,07
T55	-0,86	-0,01	25,60	-58,29	-0,52	1,54	329,67	-1469,96	-645,35	-1,00	-1,31	-760,53
T56	0,24	0,97	-31,34	300,32	-0,37	-1,88	-362,57	-503,21	-1105,84	0,43	1,34	-654,56
T57	-0,41	-0,48	126,78	302,70	8,55	11,24	-75,56	-53,43	-78,84	-0,58	-0,12	122,33
T58	-0,23	-1,59	120,67	432,75	3,25	8,95	-1950,95	875,81	215,66	0,25	0,96	124,02
T59	-0,06	0,14	28,67	580,04	-11,82	-12,20	196,26	1144,63	-572,68	1,24	0,98	-915,40
T60	1,76	1,77	-54,19	108,45	2,22	2,35	2061,05	2421,88	2020,12	-1,46	-1,54	1169,81
T61	0,80	-0,32	-48,53	-311,63	3,75	2,36	-867,52	-725,13	684,01	0,29	-0,24	432,60
T62	1,91	2,66	0,05	-123,02	-6,32	-15,51	785,61	-468,13	-286,50	0,34	0,40	-591,32
T63	-1,54	0,04	-136,70	-387,08	14,07	16,20	-448,39	-1912,84	-1608,69	-0,08	-0,09	-145,43
T64	0,58	-0,81	-92,22	35,69	-20,39	-18,06	84,53	-721,37	720,30	0,41	0,07	202,45
T65	-1,55	-1,49	189,16	-77,24	11,53	12,56	-171,41	1249,60	-126,91	-0,52	0,00	93,74

Следует отметить сравнительную равномерность распределения значений коэффициентов по слоям проката для каждого уравнения.

По значениям коэффициентов при независимых переменных теоретически можно оценить степень их влияния на значение зависимой переменной. Однако данная оценка может иметь весьма спекулятивный характер ввиду сложности физических процессов, протекающих при КТМО, и, как следствие, присутствия скрытых транзитивных зависимостей между независимыми переменными, которые невозможно в полной мере отследить средствами классической статистики.

Наилучшие метрики, используемые для оценки достоверности прогнозирования, были получены с применением нормализации независимых переменных (приведение к значениям в диапазоне от 0 до 1), что, в сущности, является классическим решением для регрессионного моделирования. Вследствие этого значения свободного члена (Intercept) не столь показательны и указывают отчасти на порядок зависимой переменной. По этой причине данные значения не выведены в Таблицы 3.2 и 3.3.

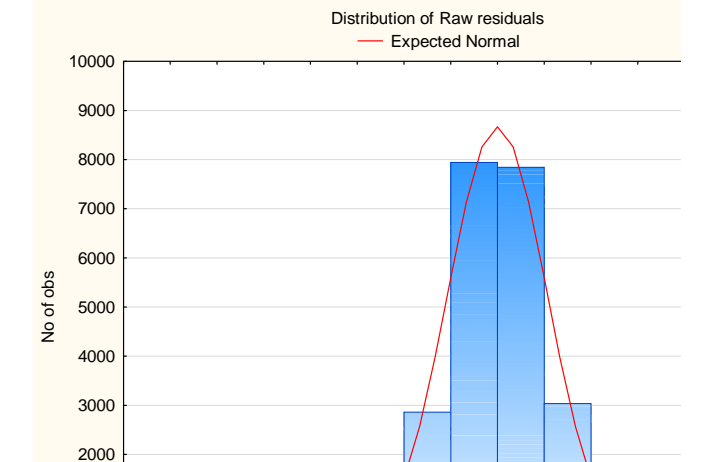
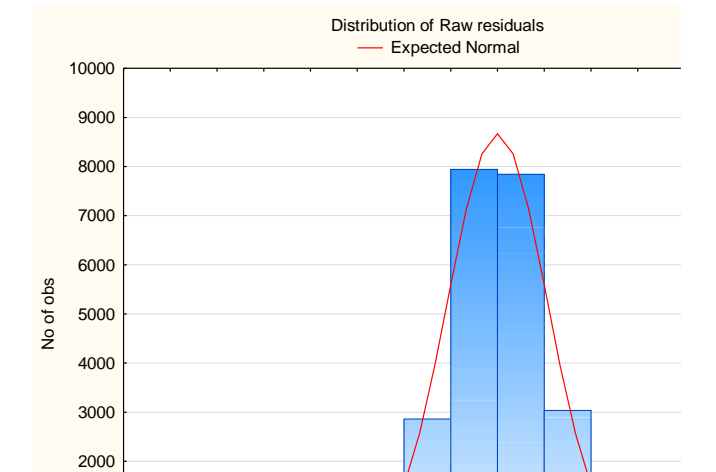
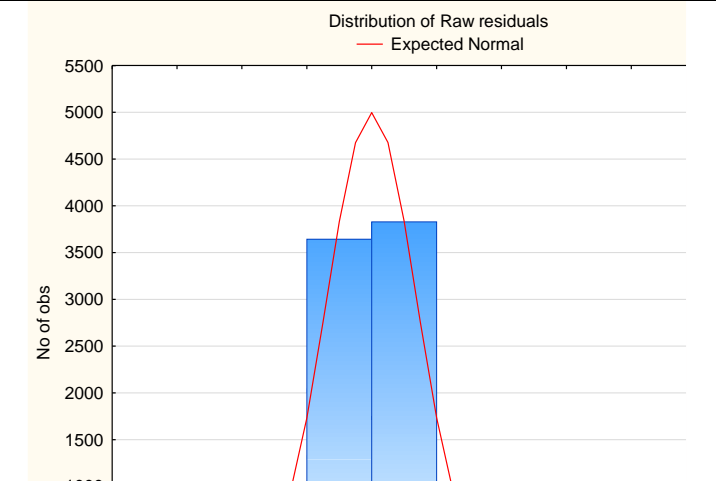
Для подтверждения достоверности результатов расчета, производимого математической моделью, применялось сравнение прогнозируемых значений с соответствующими фактическими данными о механических испытаниях проката.

В Таблице 3.4 представлены результаты верификации достоверности результатов расчета значений физико-механических свойств, полученных с использованием регрессионной модели, а также диаграммы распределения остатков прогнозных значений.

Отметим, что средняя ошибка прогнозирования лежит в диапазоне от 1,03 до 5,81 %, а коэффициенты множественной корреляции – от 0,49 до 0,79. Значения критерия Фишера ( $F$  – величина критерия,  $F_{обр}$  – обратного распределения вероятности) превышают доверительный уровень минимум в 6 раз, что является показателем высокой достоверности прогноза.

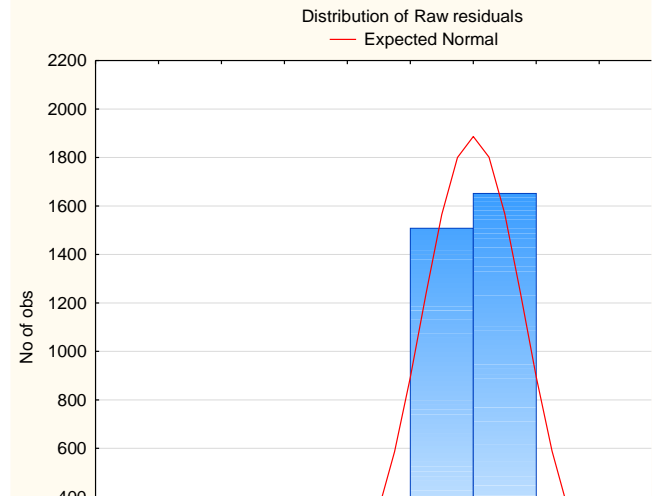
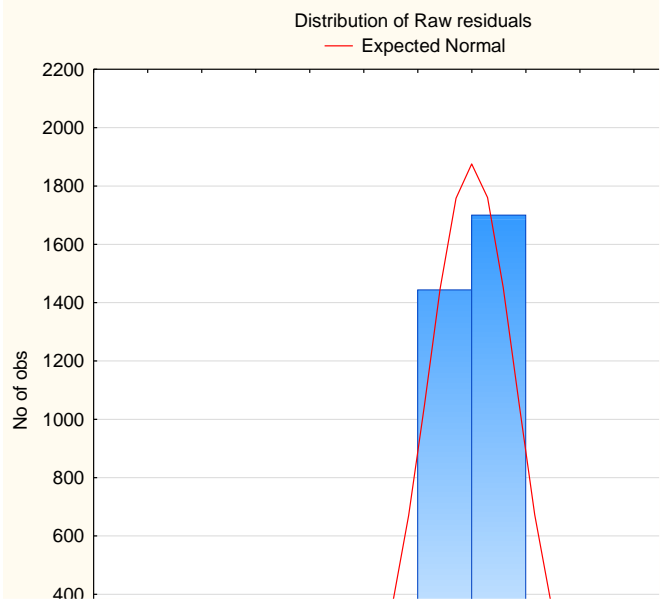
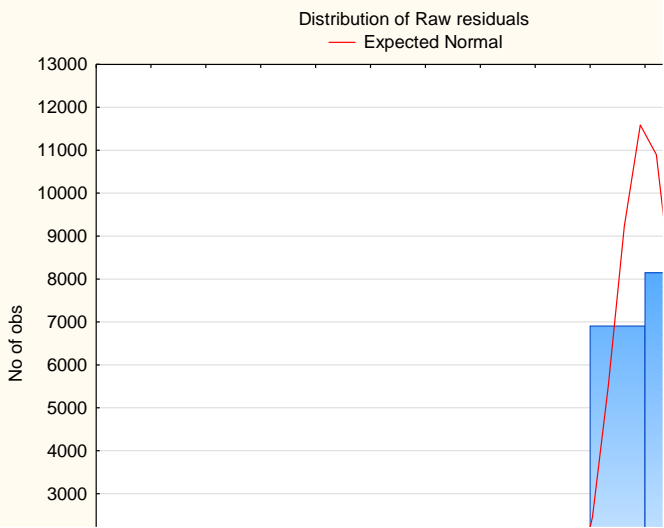
Стоит отметить характеры распределения остатков – для всех указанных уравнений они либо явно обладают свойством нормальности, либо характеризуются незначительной асимметричностью.

Таблица 3.4 – Результаты верификации достоверности расчета уровня физико-механических свойств трубного проката

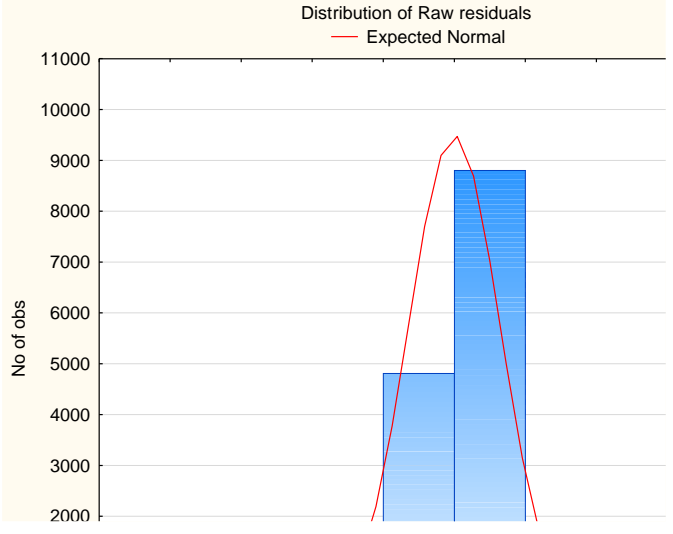
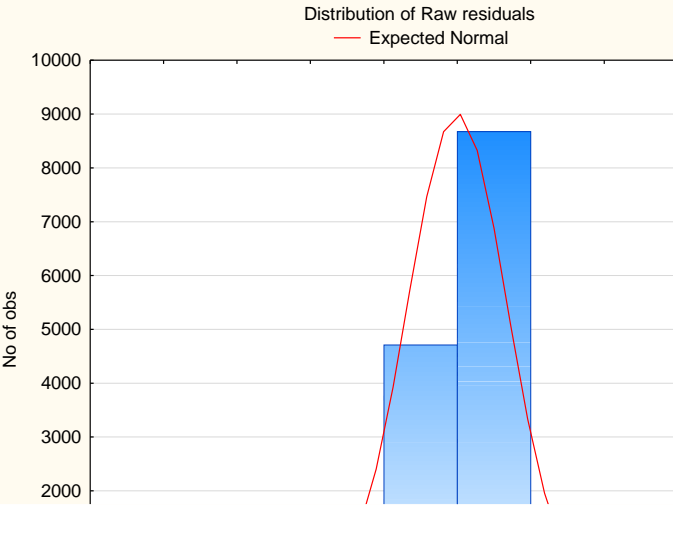
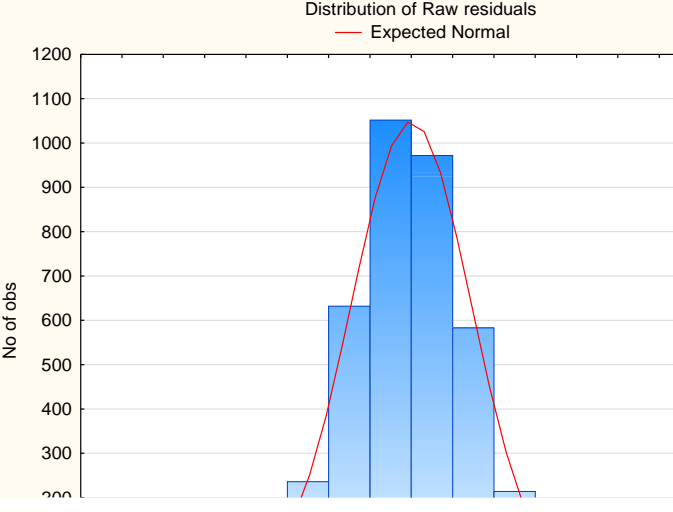
Достоверность прогноза	Распределение остатков
<p>Твердость по Виккерсу:</p> <p>средн. откл. абс. = <math>\pm 8,24</math> ед.;</p> <p>средн. откл. отн. = <math>\pm 3,72</math> %;</p> <p><math>R_m = 0,79</math>;</p> <p><math>F = 29</math> при <math>F_{обр} = 1,12</math>.</p>	 <p>Distribution of Raw residuals — Expected Normal</p> <p>The histogram shows the number of observations (No of obs) on the y-axis, ranging from 2000 to 10000. The distribution is centered around a mean value, with a peak frequency of approximately 8000. A red line represents the expected normal distribution, which closely follows the shape of the blue bars.</p>
<p>Ударная вязкость при температуре <math>-20</math> °C:</p> <p>средн. откл. абс. = <math>\pm 19,01</math> Дж/см<sup>2</sup>;</p> <p>средн. откл. отн. = <math>\pm 5,81</math> %;</p> <p><math>R_m = 0,72</math>;</p> <p><math>F = 6,8</math> при <math>F_{обр} = 1,12</math>.</p>	 <p>Distribution of Raw residuals — Expected Normal</p> <p>The histogram shows the number of observations (No of obs) on the y-axis, ranging from 2000 to 10000. The distribution is centered around a mean value, with a peak frequency of approximately 8000. A red line represents the expected normal distribution, which closely follows the shape of the blue bars.</p>
<p>Предел прочности на поперечных образцах:</p> <p>средн. откл. абс. = <math>\pm 10,61</math> Н/мм<sup>2</sup>;</p> <p>средн. откл. отн. = <math>\pm 1,7</math> %;</p> <p><math>R_m = 0,65</math>;</p> <p><math>F = 31</math> при <math>F_{обр} = 1,12</math>.</p>	 <p>Distribution of Raw residuals — Expected Normal</p> <p>The histogram shows the number of observations (No of obs) on the y-axis, ranging from 1000 to 5500. The distribution is centered around a mean value, with a peak frequency of approximately 3800. A red line represents the expected normal distribution, which closely follows the shape of the blue bars.</p>



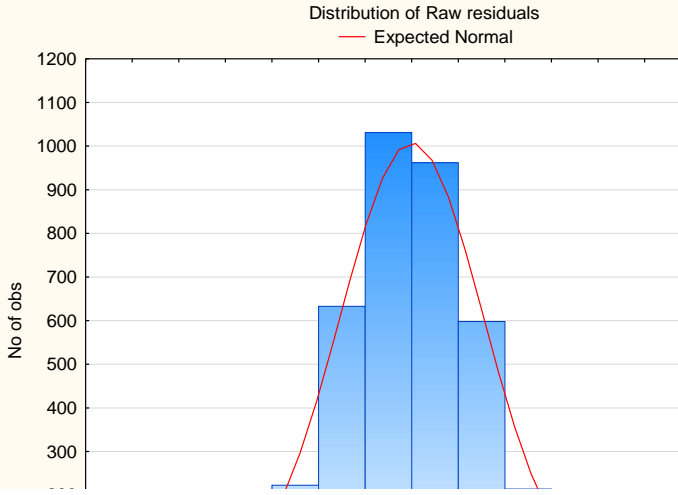
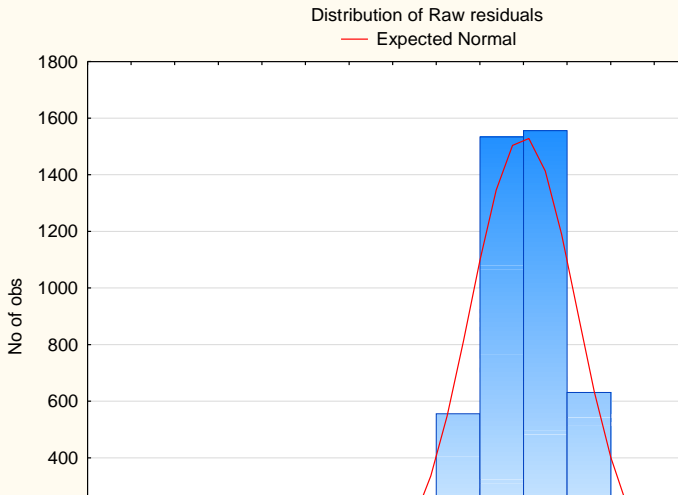
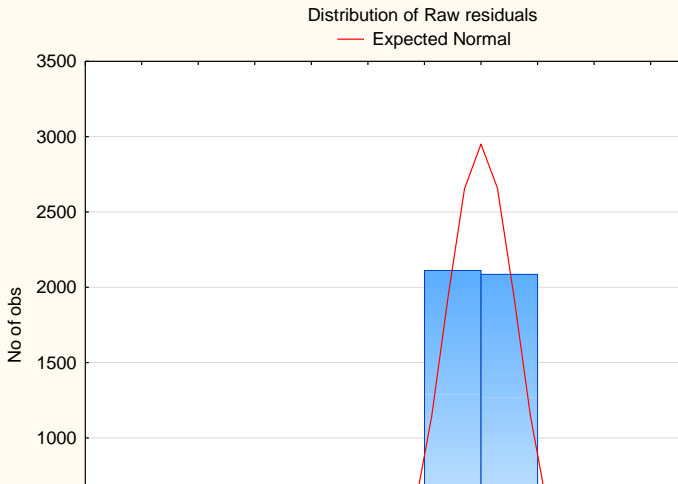
## Продолжение таблицы 3.4

Достоверность прогноза	Распределение остатков
<p>Отношение предела текучести к пределу прочности на поперечных образцах:</p> <p>средн. откл. абс. = <math>\pm 0,012</math>;</p> <p>средн. откл. отн. = <math>\pm 1,42\%</math>;</p> <p><math>R_m = 0,75</math>;</p> <p><math>F = 26,5</math> при <math>F_{обр} = 1,13</math>.</p>	
<p>Отношение предела текучести к пределу прочности на продольных образцах:</p> <p>средн. откл. абс. = <math>\pm 0,012</math>;</p> <p>средн. откл. отн. = <math>\pm 1,4\%</math>;</p> <p><math>R_m = 0,74</math>;</p> <p><math>F = 23,3</math> при <math>F_{обр} = 1,13</math>.</p>	
<p>Доля вязкой составляющей при ИПГ при температуре <math>-20\text{ }^\circ\text{C}</math>:</p> <p>средн. откл. абс. = <math>\pm 1,95\%</math>;</p> <p>средн. откл. отн. = <math>\pm 2,05\%</math>;</p> <p><math>R_m = 0,69</math>;</p> <p><math>F = 23</math> при <math>F_{обр} = 1,12</math>.</p>	

## Продолжение таблицы 3.4

Достоверность прогноза	Распределение остатков
<p>Балл зерна минимальный:  средн. откл. абс. = <math>\pm 0,22</math>;  средн. откл. отн. = <math>\pm 2,04</math> %;  <math>R_m = 0,65</math>;  <math>F = 17,9</math> при <math>F_{обр} = 1,12</math>.</p>	
<p>Балл зерна максимальный:  средн. откл. абс. = <math>\pm 0,23</math>;  средн. откл. отн. = <math>\pm 2,4</math> %;  <math>R_m = 0,64</math>;  <math>F = 17,9</math> при <math>F_{обр} = 1,12</math>.</p>	
<p>Предел текучести на продольных образцах:  средн. откл. абс. = <math>\pm 11,3</math> Н/мм<sup>2</sup>;  средн. откл. отн. = <math>\pm 2,1</math> %;  <math>R_m = 0,49</math>;  <math>F = 9,7</math> при <math>F_{обр} = 1,13</math>.</p>	

Продолжение таблицы 3.4

Достоверность прогноза	Распределение остатков
<p>Предел текучести на поперечных образцах:</p> <p>средн. откл. абс. = <math>\pm 11,8</math> Н/мм<sup>2</sup>;</p> <p>средн. откл. отн. = <math>\pm 2,1</math> %;</p> <p><math>R_m = 0,53</math>;</p> <p><math>F = 9,4</math> при <math>F_{обр} = 1,13</math>.</p>	
<p>Отношение предела текучести к пределу прочности на продольных образцах (0,5):</p> <p>средн. откл. абс. = <math>\pm 0,01</math>;</p> <p>средн. откл. отн. = <math>\pm 1,03</math> %;</p> <p><math>R_m = 0,62</math>;</p> <p><math>F = 21,6</math> при <math>F_{обр} = 1,12</math>.</p>	
<p>Отношение предела текучести к пределу прочности на поперечных образцах (0,5):</p> <p>средн. откл. абс. = <math>\pm 0,01</math>;</p> <p>средн. откл. отн. = <math>\pm 1,08</math> %;</p> <p><math>R_m = 0,64</math>;</p> <p><math>F = 20,8</math> при <math>F_{обр} = 1,12</math>.</p>	

Полученные метрики сходимости прогнозных и фактических значений физико-механических свойств являются достаточными для внедрения комплексной математической модели прогнозирования в производственный

процесс с целью обеспечения требуемого уровня качества и эффективности производства исследуемого сортамента путём применения данной модели в качестве базы для предиктивных численных экспериментов.

### 3.2 Программная реализация математической модели

В рамках настоящей работы разработано ПО прогнозирования комплекса физико-механических свойств горячекатаного толстолистового трубного проката. Интерфейс ПО представлен на Рисунке 3.1. В ПО реализована математическая модель прогнозирования 12 физико-механических свойств, приведенных в разделе 3.1.

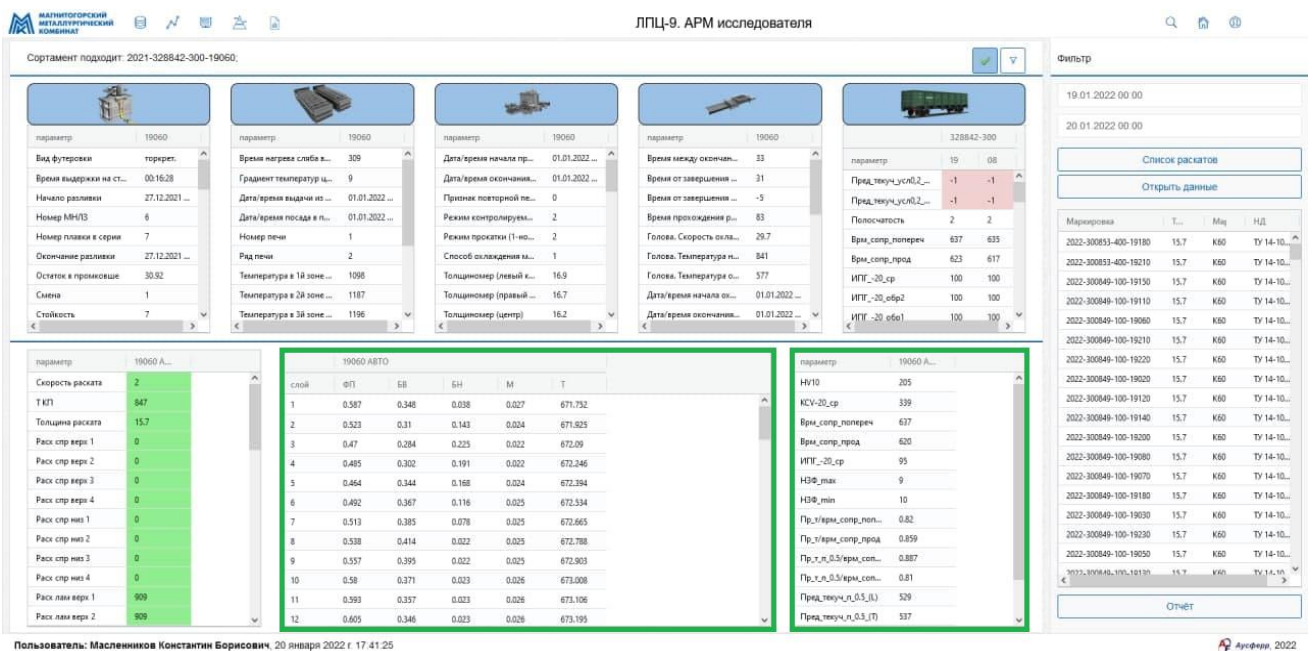


Рисунок 3.1 – ПО прогнозирования физико-механических свойств (выделенная область – результаты расчета)

Архитектура ПО клиент-серверного типа, с тонким клиентом, что позволяет эффективно контролировать актуальность исполняемых алгоритмов. Его структура достаточно сложна и включает в себя как функции, инициируемые пользовательским интерфейсом, так и ряд фоновых процессов. Расчёты осуществляются на базе различных аппаратно-программных платформ, и

распределены по целому ряду серверов. Подробно архитектура ПО раскрыта в схеме на Рисунке 3.2. Входные данные учёта производства и протоколирования технологического процесса производства проката загружаются из внешней БД. Настройки подключения описаны в конфигурационных файлах. Результирующие выходные данные записываются в БД приложения в виде специальной сущности – запроса на осуществление расчёта. После записи запросов в БД, модуль расчёта теплового состояния проката в линии ТЛС, исполняемый на сервере приложений, получает их и осуществляет расчёт температурных траекторий по слоям проката. По выполнению расчёта, его результаты загружаются в ту же сущность БД приложения, и на основании этих данных, на стороне сервера БД рассчитываются значения физико-механических свойств.

Пользовательский интерфейс реализован в виде веб-приложения, функционирующего на любом веб-сервере с интерпретатором языка программирования PHP. Большая часть пользовательского функционала реализована в исполняемых скриптах на языке программирования JavaScript с использованием внешних библиотек (jQuery, agGrid).

Автоматическое формирование запросов на расчёт осуществляется фоновым процессом на сервере БД в темпе поступления входных данных.

Расчёт температурных кривых выполняется специальным приложением, функционирующем на платформе «.net» в виде автономного исполняемого файла с хранением настроек в текстовых файлах конфигурации. Реализована возможность осуществления фонового вызова любой системой исполнения расписаний (например, планировщик заданий Windows). Данная структура обеспечивает высокую гибкость эксплуатации и конфигурируемости исполнения модельных расчётов, а также позволяет настроить данный комплекс на любом сервере с операционной системой Windows.

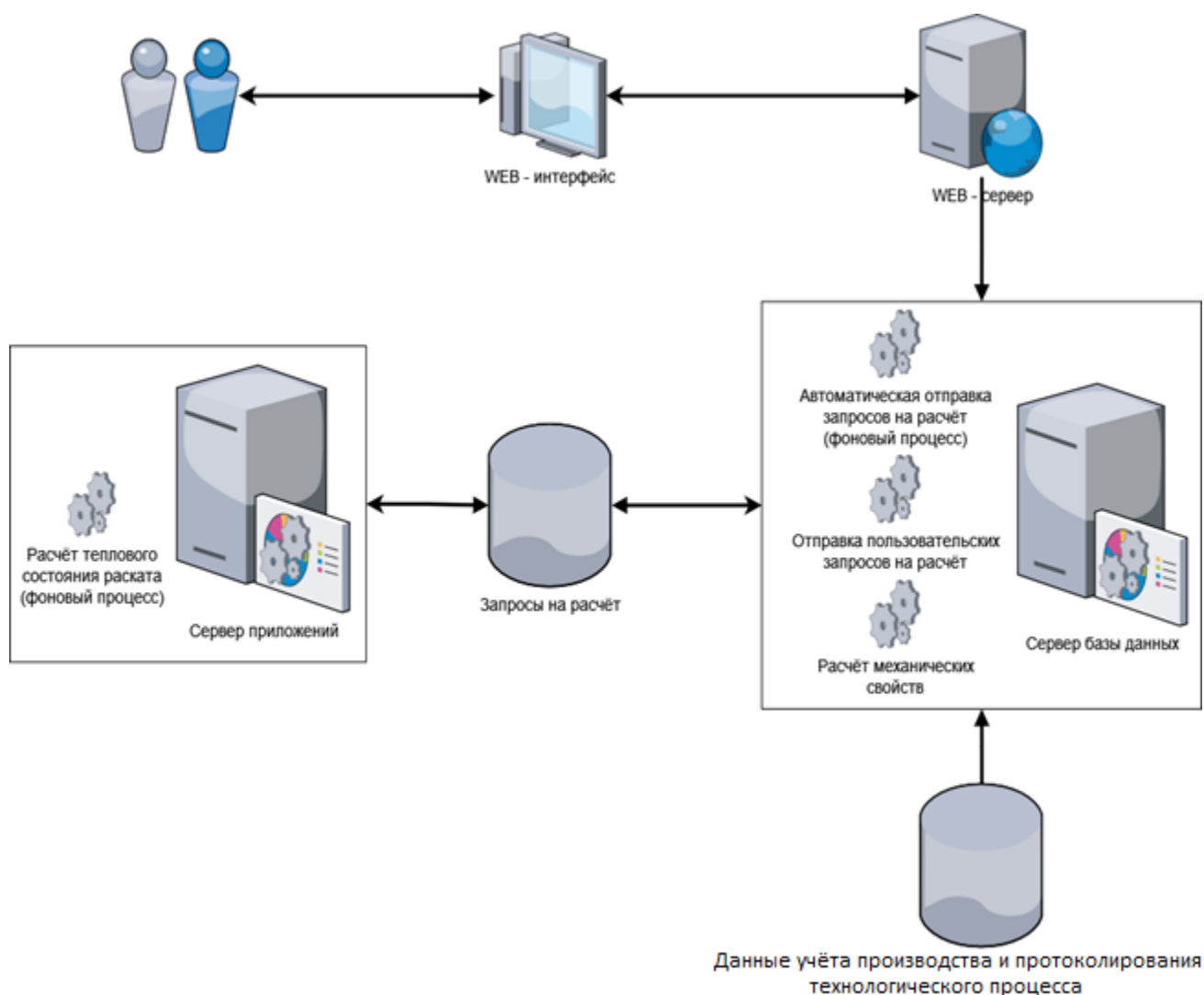


Рисунок 3.2 – Архитектура ПО расчёта физико-механических свойств

Расчёт физико-механических свойств выполняется функцией PL/SQL в момент выборки данных для отображения в пользовательском интерфейсе. Такой подход обусловлен удобством сопровождения и валидации программного кода.

В пользовательском интерфейсе предусмотрена возможность ручного редактирования некоторых технологических данных (например, температуры проката на входе в линию УО) с последующим перерасчетом и отображением результатов, как по тепловому состоянию проката, так и по его прогнозируемым физико-механическим свойствам. Кроме того, в программном комплексе реализована версияность расчётов.

В специализированном отчете предусмотрена возможность отображения результатов расчета для нескольких листов одновременно (см. Рисунок 3.3).

МАШИНОГОРСКИЙ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИЙ КОМБИНАТ

Фильтр отчета с 14.10.2020 00:00 по 15.10.2020 00:00

ОСНОВНЫЕ				СВОЙСТВА АВТО																				
Г...	Пл...	Пл	ИФ р...	И	НУ...	КСУ-4...	КВ...	Вр...	Врм...	Дел...	Дел...	Дел...	Дел...	Делм...	ИПУ_20...	ИПУ_31...	НЗ...	НЗ	Отн...	Отн...	Пр...	Пр...	П...	Прмд...
2020	119780	200	19100	K80	201.776	340.835	583.826	618.299	603.811	23.659	24.253	25.998	13.043	14.183	98.207	60.171	10	11	76.587	40.866	0.915	466.055	539.0...	527.699
2020	119780	200	19050	K80	201.581	338.775	574.692	619.04	602.94	23.68	24.257	25.996	13.012	14.081	98.449	61.374	10	11	76.123	43.889	0.918	460.205	539.5...	528.174
2020	119780	200	19040	K80	201.88	329.289	577.934	615.986	603.207	23.636	24.248	25.971	12.792	14.109	98.512	60.17	10	11	75.677	38.785	0.914	466.239	540.1...	527.886
2020	119780	200	19090	K80	201.595	353.648	593.459	619.534	604.207	23.63	24.245	26.084	13.418	14.322	98.064	58.532	10	11	76.864	41.613	0.911	456.794	537.8...	527.724
2020	119780	200	19080	K80	201.672	337.826	568.877	619.622	603.366	23.679	24.255	25.948	13	14.081	98.416	61.572	10	11	76.155	43.528	0.918	465.271	539.5...	528.104
2020	119780	200	19030	K80	202.043	352.286	596.538	619.858	604.54	23.632	24.245	25.942	13.058	14.262	98.167	58.835	10	11	76.671	39.832	0.919	458.576	539.8...	527.949
2020	119789	200	19200	K80	201.984	338.011	605.286	626.348	609.297	23.613	24.25	25.89	13.373	14.488	98.912	57.691	10	11	74.23	41.449	0.898	436.773	539.9...	528.208
2020	119789	200	19210	K80	201.384	352.192	590.262	621.638	606.385	23.643	24.248	26.019	13.406	14.288	97.966	58.893	10	11	76.516	41.521	0.915	459.13	538.0...	527.858
2020	119789	200	19180	K80	201.414	352.873	595.191	619.454	604.107	23.621	24.243	26.01	13.446	14.313	98.006	58.129	10	11	76.816	41.58	0.917	457.82	537.9...	527.806
2020	119789	200	19190	K80	201.671	339.519	577.468	618.566	603.048	23.664	24.255	25.944	13.004	14.129	98.332	60.598	10	11	76.414	43.227	0.915	455.654	539.2...	527.762
2020	119789	200	19170	K80	201.97	337.165	604.44	624.89	607.967	23.628	24.253	25.916	13.357	14.488	98.882	58.046	10	11	74.69	41.189	0.902	443.469	539.8...	528.173
2020	119780	200	19110	K80	201.987	337.221	600.357	626.119	608.905	23.63	24.253	25.917	13.321	14.447	98.782	58.796	10	11	74.402	41.331	0.899	443.615	540.0...	528.231
2020	119780	200	19010	K80	201.467	338.331	575.964	619.25	603.677	23.687	24.258	25.906	13.009	14.093	98.493	61.334	10	11	75.991	43.072	0.917	463.247	539.4...	528.211
2020	119780	200	19060	K80	201.784	322.238	544.912	618.329	603.497	23.631	24.236	25.96	12.72	13.912	98.391	63.437	10	11	75.272	40.4	0.923	485.847	541.4...	528.475
2020	119780	200	19070	K80	202.042	352.055	594.999	619.736	604.221	23.631	24.245	26.014	13.041	14.266	97.967	58.867	10	11	76.849	38.828	0.918	461.512	539.7...	527.836
2020	119780	200	19120	K80	201.946	352.475	599.542	620.395	604.565	23.634	24.247	25.929	13.069	14.267	98.071	58.49	10	11	76.613	39.649	0.919	458.38	539.8...	527.977
2020	119780	200	19130	K80	201.351	351.355	593.073	619.693	604.231	23.623	24.243	25.986	13.419	14.289	97.944	58.694	10	11	76.893	41.679	0.916	460.972	538.1...	527.82
2020	119780	200	19150	K80	201.275	344.448	599.892	623.916	608.566	23.602	24.241	25.871	13.589	14.389	98.5	58.144	10	11	74.478	40.807	0.905	456.161	538.2...	528.054
2020	119780	200	19200	K80	201.506	345.117	594.963	624.216	608.962	23.612	24.245	25.913	13.372	14.412	98.602	58.247	10	11	74.566	41.585	0.903	451.704	538.02	527.835
2020	119748	100	19030	K80	203.897	384.879	332.502	627.403	606.207	22.375	23.829	25.847	14.298	13.66	94.26	69.239	10	11	76.675	53.729	0.893	569.071	546.9...	530.917
2020	119748	100	19050	K80	205.465	339.255	392.994	630.618	604.964	22.527	23.914	25.651	13.375	13.802	95.154	71.842	10	11	74.521	54.714	0.848	513.449	547.4...	526.443
2020	119748	100	19160	K80	204.434	380.724	343.01	624.596	601.719	22.417	23.844	25.722	13.919	13.373	94.841	69.322	10	11	76.625	54.359	0.896	554.002	548.1...	530.513
2020	119748	100	19070	K80	204.24	378.812	336.384	627.234	603.669	22.429	23.846	25.722	13.93	13.562	94.836	69.631	10	11	76.111	54.848	0.898	555.752	548.3...	530.713
2020	119748	100	19120	K80	204.623	368.744	324.9	628.11	607.553	22.411	23.839	25.75	13.667	13.487	95.26	70.416	10	11	74.629	53.137	0.893	565.259	549.4...	530.987
2020	119748	100	19170	K80	205.772	318.897	278.008	626.228	604.868	22.526	23.872	25.494	12.768	13.172	96.629	76.256	10	11	72.739	54.621	0.861	557.239	550.2...	527.232

Рисунок 3.3 – Отчет, отображающий результаты расчета

Отчёт позволяет производить произвольную фильтрацию результирующего массива, варьировать набор полей, произвольно агрегировать значения и экспортировать данные в различных форматах (Excel, PDF, JSON). Данный аспект позволяет использовать результаты модельных расчётов в стороннем ПО. Кроме того, в пользовательском интерфейсе реализована возможность построения различного вида диаграмм.

Разработанное ПО позволяет прогнозировать значения физико-механических свойств проката, варьируя значения технологических параметров его производства, что предоставляет широкие возможности для проверки и модернизации технологий производства, а также освоивания новых методов аттестации и неразрушающего контроля.

Стоит отметить, что результирующая сущность данной системы также интегрирована в «Информационную систему предиктивной аналитики», функционирующую в условиях ПАО «ММК», что позволяет использовать результаты модельных расчётов в различных исследованиях технологических процессов ПАО «ММК» средствами как классического машинного обучения так и нейросетевого анализа и моделирования.

Разработанный программный комплекс включён в государственный реестр программ для ЭВМ [135].

### **3.3 Выводы по главе 3**

1. Создан исходный массив данных путём расчета послойных температурных траекторий ~ 26 000 единиц проката исследуемого сортамента, произведенного на ТЛС «5000» ПАО «ММК», включающий в себя ряд фактических отслеживаемых параметров технологического процесса, данные о химическом составе и результатах механических испытаний проката.

2. На основании полученного массива данных построена комплексная математическая модель прогнозирования уровня физико-механических свойств трубного проката.

3. Для обеспечения применимости данной модели в производственном процессе разработано соответствующее ПО.

4. Проверка сходимости результатов осуществляемого им прогнозирования показала, что средняя арифметическая относительная погрешность расчета составила от 1,03 до 5,81 %, что является достаточным уровнем для внедрения данной модели в производственный процесс ПАО «ММК».



## ГЛАВА 4. ВНЕДРЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ РАБОТЫ

### 4.1 Внедрение программного комплекса в производственные процессы ПАО «ММК»

Как отмечалось выше, результаты настоящего исследования в виде комплекса моделей (модель теплового состояния проката и модель прогнозирования физико-механических свойств) были реализованы в составе программного продукта, разработанного в рамках НИРиТР «Разработка информационной системы прослеживаемости и идентификации комплекса потребительских свойств горячекатаного листа для электросварных прямошовных труб». Заказчиком данного проекта являлся научно-технический центр (НТЦ) ПАО «ММК». Основными пользователями информационной системы являются специалисты НТЦ по горячекатаному прокату.

Программный продукт реализован на базе существующей АИС «Хранилище технологических данных» ввиду аккумуляции в рамках данной системы полного комплекса результатов протоколирования технологических процессов ТЛС «5000» (и смежных цехов) и возможности использования модельных расчётов смежными системами. Данный подход значительно упрощает дальнейшие потенциальные исследования и развитие функционала ПО.

На момент написания настоящей работы результаты НИРиТР внедрены в производство. Программный продукт используется специалистами НТЦ для исследования влияния параметров технологического процесса на значения физико-механических свойств готового проката с целью обеспечения стабильности их получения в удовлетворяющих требования заказчиков диапазонах. Особое значение результаты модельных расчётов имеют при необходимости корректировки действующих технологических инструкций. Модельные эксперименты позволяют специалистам НТЦ достоверно спрогнозировать

результаты данных корректировок, не прибегая к опытному производству [106,136].

#### **4.2. Рекомендации по совершенствованию технологических режимов производства проката**

С использованием ПО прогнозирования физико-механических свойств был проведен вычислительный эксперимент по варьированию ряда технологических параметров производства трубного проката класса прочности К60 в линии ТЛС «5000» с определением соответствующих расчетных значений физико-механических свойств. Технологические параметры и их диапазоны варьирования приведены в Таблицах 4.1 и 4.2. Варьирование параметров производилось с учетом технологических и производственных возможностей ТЛС «5000» ПАО «ММК».

Таблица 4.1 – Параметры производства, использованные в эксперименте

Параметр	Мин.	Макс.	Сред.
Температура нагрева сляба под прокатку, °С	1100	1200	1180
Температура начала черн. прок., °С	990	1110	1050
Температура конца черновой прокатки, °С	920	1100	1010
Максимальное относительное обжатие в черновой фазе, %	20	20	20
Толщина раската после черновой фазы, мм	80	190	100
Температура раската в начале чистой фазы, °С	780	920	860
Температура конца прокатки, °С	770	890	840
Максимальное относительное обжатие в чистой фазе, %	15	15	15
Толщина раската после чистой фазы, мм	20	23,5	21,6
Температура на входе в УО, °С	700	880	811
Толщина, м	0,008	0,05	0,021
Скорость, м/с	0,5	3	1,83

Таблица 4.2 – Расходы хладагента в линии УО, л/м<sup>2</sup>×мин., использованные в эксперименте

Кол-лектор	Спрейерное, верх			Спрейерное, низ			Ламинарное, верх			Ламинарное, низ		
	Мин.	Макс.	Ср.	Мин.	Макс.	Ср.	Мин.	Макс.	Ср.	Мин.	Макс.	Ср.
1	0	1425	382	0	2650	612	0	1760	743	0	2700	1416
2	0	1425	514	0	2650	859	0	1760	531	0	2700	1132
3	0	1425	389	0	2650	620	0	1760	323	0	2700	868
4	0	1425	529	0	2650	883	0	1760	378	0	2700	919
5	-	-	-	-	-	-	0	1760	717	0	2700	1394
6	-	-	-	-	-	-	0	1760	318	0	2700	789
7	-	-	-	-	-	-	0	1760	390	0	2700	1003
8	-	-	-	-	-	-	0	1760	456	0	2700	992
9	-	-	-	-	-	-	0	1760	250	0	2700	734
10	-	-	-	-	-	-	0	1760	300	0	2700	702
11	-	-	-	-	-	-	0	1760	271	0	2700	543
12	-	-	-	-	-	-	0	1760	24	0	2700	163
13	-	-	-	-	-	-	0	1760	124	0	2700	265
14	-	-	-	-	-	-	0	1760	105	0	2700	224
15	-	-	-	-	-	-	0	1760	14	0	2700	26

Расчетные значения физико-механических свойств проката, полученные в результате варьирования технологических параметров производства приведены в таблице 4.3

Таблица 4.3 – Значения физико-механических свойств, полученные при проведении вычислительного эксперимента

Параметр	Мин.	Макс.	Среднее
НЗФ min	9	12	11
НЗФ max	8	11	10
HV10, ед.	174	258	221,3
KCV-20 ср, Дж/см <sup>2</sup>	125	514	328,1
Пр <sub>т</sub> L, Н/мм <sup>2</sup>	418	630	528
Пр <sub>т</sub> T, Н/мм <sup>2</sup>	447	659	547,6
BC T, Н/мм <sup>2</sup>	545	784	625,6
Пр <sub>т</sub> /BC T	0,73	0,94	0,88
Пр <sub>т</sub> /BC L	0,68	0,94	0,87
Пр <sub>т</sub> Π0.5/BC L	0,79	0,95	0,88
Пр <sub>т</sub> Π0.5/BC T	0,71	0,98	0,88
ИПГ -20 ср, %	30	100	95,4

Наибольший прирост пределов текучести, твёрдости и доли вязкой составляющей при ИПГ при минимальном приросте отношений предела текучести

к временному сопротивлению для проката толщиной ~ 21,6 мм прогнозируется моделью при использовании значений технологических параметров, приведенных в таблице 4.4. Соответствующий этим значениям технологический режим охлаждения трубного проката рекомендован к использованию в линии ТЛС «5000» ПАО «ММК».

Таблица 4.4 – Параметры рекомендованного режима

Параметр	Целевое значение
Температура нагрева сляба под прокатку, °С	1180
Температура начала черновой прокатки, °С	1050
Температура конца черновой прокатки, °С	1010
Максимальное относительное обжатие в черновой фазе, %	20
Толщина проката после черновой фазы, мм	100
Температура проката в начале чистовой фазы, °С	860
Температура конца прокатки, °С	840
Максимальное относительное обжатие в чистовой фазе, %	15
Толщина проката после чистовой фазы, мм	21,6
Температура проката на входе в линию ускоренного охлаждения, °С	835
Скорость транспортировки роката в линии УО, м/с	1
Расход верхних спрейерных коллекторов № № 1-4, л/м <sup>2</sup> ×мин.	640
Расход нижних спрейерных коллекторов № № 1-4, л/м <sup>2</sup> ×мин.	1190
Расход верхних ламинарных коллекторов №№ 1-7, л/м <sup>2</sup> ×мин.	550
Расход верхних ламинарных коллекторов №№ 8-15, л/м <sup>2</sup> ×мин.	0
Расход нижних ламинарных коллекторов №№ 1-7, л/м <sup>2</sup> ×мин.	1480
Расход нижних ламинарных коллекторов №№ 8-15, л/м <sup>2</sup> ×мин.	0

Расчёты производились для химической композиции, представленной в Таблице 2.2, однако стоит отметить, что результаты расчетов модели показали достаточный уровень сходимости при применении их к массивам данных, включающих значительную вариабельность значений содержания химических элементов, включая основные легирующие для исследуемого сортамента. Данный факт даёт основания для применения указанного режима для вариаций

химического состава, соответствующих обучающему массиву (Приложение А, Таблица А.3).

Расчётные значения физико-механических свойств, получаемые при рекомендованном производственном режиме приведены в Таблице 4.5. Следует отметить прирост значений баллов зерна, ударной вязкости, переделов текучести и доли вязкой составляющей при ИПГ.

Таблица 4.5 – Расчётные физико-механические свойства по текущему и рекомендованному режиму

Свойство	Текущий режим – средние значения	Рекомендуемый режим	$\Delta_{\text{отн}}, \%$	$\Delta_{\text{абс}}, \text{ед}$
НЗФ_min	8	9	12,50	1
НЗФ_max	7	8	14,29	1
HV10, ед.	208	231	11,06	23
КСV-20_ср, Дж/см <sup>2</sup>	318	321	0,94	3
Пр_т_L, Н/мм <sup>2</sup>	508	518	1,97	10
Пр_т_T, Н/мм <sup>2</sup>	543	554	2,03	11
BC_T, Н/мм <sup>2</sup>	606	607	0,17	1
Пр_т/BC_T	0,9	0,9	0,00	0
Пр_т/BC_L	0,88	0,9	2,27	0,02
Пр_тП0.5/BC_L	0,88	0,88	0,00	0
Пр_тП0.5/BC_T	0,87	0,88	1,15	0,01
ИПГ_-20_ср, %	91	98	7,69	8

Расчитанные значения физико-механических свойств находятся в согласии с действующими в Российской Федерации, и на ПАО «ММК» в частности, нормативными документами, регламентирующими уровень потребительских свойств исследуемого проката. В Таблице 4.6 приведено сравнение расчётных значений с действующими нормативными диапазонами в соответствии с ТУ 14-101-1162-2019, ТУ 14-101-1165-2022. Следует обратить внимание на негативный прирост твёрдости и отношений пределов текучести к пределу прочности, получаемый при рекомендованном режиме. Данный прирост находится в допустимых по нормативной документации диапазонах.

Таблица 4.6 – Расчётные значения физико-механических свойств в сравнении с нормативными значениями

Свойство	Нормативный мин.	Нормативный макс.	Расчёт
НЗФ_min	8	15	9
НЗФ_max	8	15	8
HV10, ед.	-	260	231
KCV-20_ср, Дж/см <sup>2</sup>	150	-	321
Пр_т_L, Н/мм <sup>2</sup>	435	580	518
Пр_т_T, Н/мм <sup>2</sup>	435	580	554
BC_T, Н/мм <sup>2</sup>	590	700	607
Пр_т/BC_T	-	0,9	0,9
Пр_т/BC_L	-	0,9	0,9
Пр_тП0.5/BC_L	-	0,88	0,88
Пр_тП0.5/BC_T	-	0,88	0,88
ИПГ_-20_ср, %	90	100	98

Данный режим является частным примером применения разработанного программного комплекса для совершенствования процесса производства исследуемого проката.

### 4.3. Рекомендации по совершенствованию системы КИП

Внедрения описанного выше программного комплекса предоставляет возможность формирования прогноза значений физико-механических свойств на основании задания комплекса параметров технологического процесса производства трубного проката. Однако на текущий момент существует возможность оценки теплового состояния и, как следствие, физико-механических свойств лишь по центральной оси проката. Данный аспект связан с текущими ограничениями системы КИП в отношении пирометрии проката на технологической линии ТЛС «5000». Дело в том, что исходным входным параметром для модели расчёта является усреднённая температура поверхности проката на входе в установку УО. Рассчитывается она в АСУТП ТЛС на основании

показаний пирометров входного участка рольганга. На Рисунке 4.1 изображена схема расположения пирометров на рольганге участка УО ТЛС «5000». Участок, представляющий интерес в данном контексте, выделен красным цветом. Отметим, что на входе в установку используется установленный по центру рольганга спаренный пирометр с рабочим диапазоном измерения температуры 600–1600 °С.

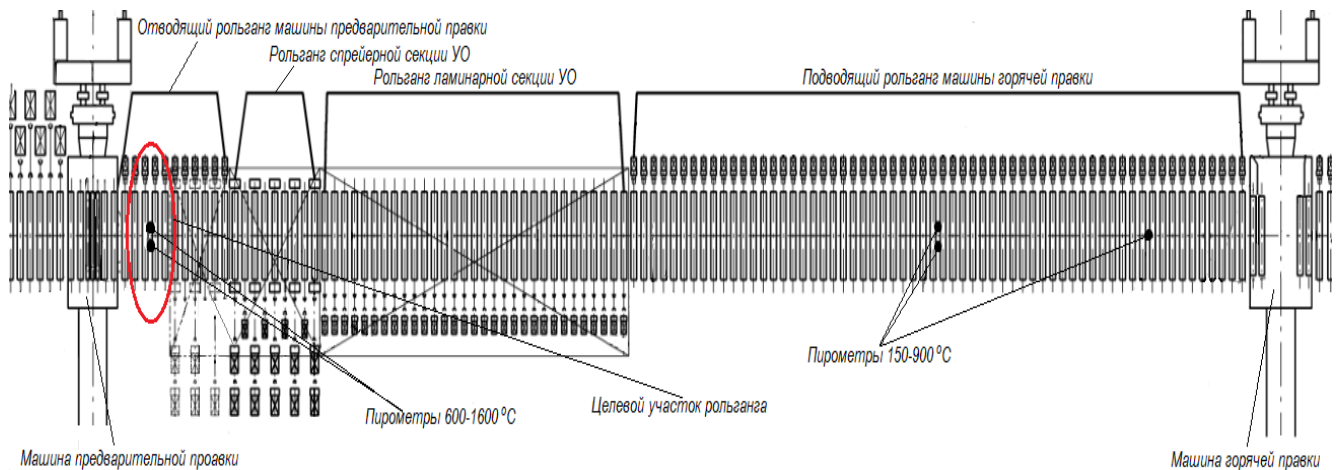


Рисунок. 4.1 – Схема расположения пирометров на участке УО ТЛС «5000»

Данная схема пирометрии ограничивает возможности использования моделей расчётов теплового состояния и физико-механических свойств одной центральной «плоскостью расчёта». В случае, если на вход модели будет поступать ряд значений температуры входа в УО по ширине, появится возможность получения картины соответствующего распределения температуры и физико-механических свойств.

Для этой цели в рамках настоящей работы предложена схема расположения пирометров, проиллюстрированная на Рисунке 4.2.

Предполагается регистрация температуры поверхности, измеренной рядом пирометров, расположенных по ширине рольганга. Покрытие ширины рольганга ~ 4900 мм, является целесообразным, так как оно обеспечит уверенное покрытие всей ширины проката исследуемого сортамента, которая обычно составляет ~ 4500 мм. Для обработки получаемых показаний предлагается использовать уже существующую схему, согласно которой данные записываются в промежуточную

базу данных АСУТП, после чего они интерполируются в одно усреднённое значение по каждому пирометру.

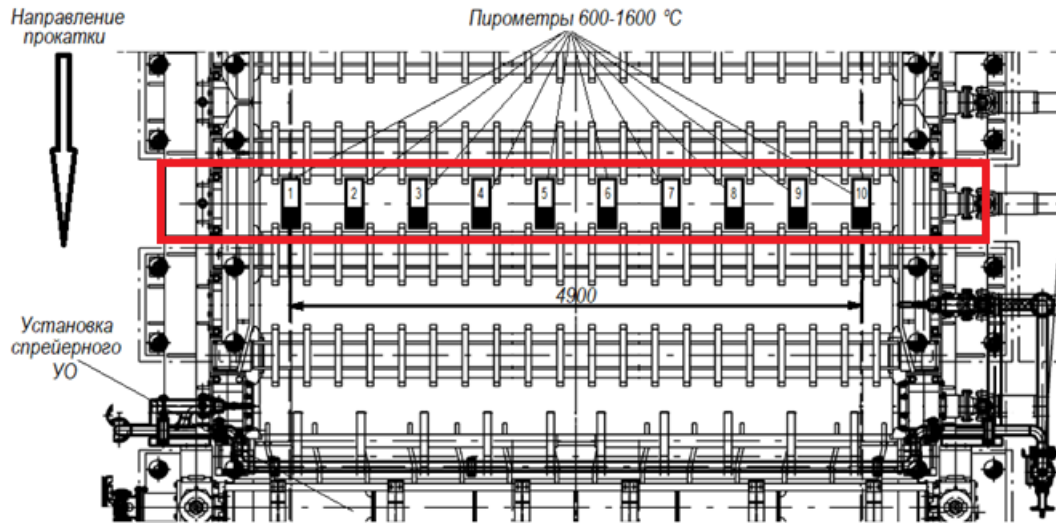


Рисунок. 4.2 – Предлагаемая схема расположения расширенного набора пирометров на отводящем рольганге машины предварительной правки

Предлагаемая система способна принимать в качестве входных параметров агрегированные значения рядов с каждого пирометра и производить расчёт физико-механических свойств по ширине проката.

Приведём пример расчёта, демонстрирующий реакцию модели прогнозирования физико-механических свойств на расширение области измерения температур (входных параметров). Для данного расчёта подобраны нестандартные значения технологических параметров производства, приведённые в Таблице 4.7.

Таблица 4.7 – Технологические параметры выбранной единицы продукции

Параметр	Значение
Толщина проката, мм	22,18
Ширина проката, мм	4488
Температура перед УО, °C	806
Скорость транспортировки проката, м/с	1,7



## Продолжение таблицы 4.7

Параметр	Значение
Расходы воды по коллекторам: спр. верх, л/м <sup>2</sup> ×мин	496; 0; 496; 0
Расходы воды по коллекторам: спр. низ, л/м <sup>2</sup> ×мин	1131; 0; 1131; 0
Расходы воды по коллекторам: лам. верх, л/м <sup>2</sup> ×мин	0; 634; 0; 634; 634; 0; 634; 634; 0; 634; 0; 634; 0; 0; 0
Расходы воды по коллекторам: лам. низ, л/м <sup>2</sup> ×мин	1575; 1571; 1078; 1571; 1571; 1078; 1571; 1571; 1078; 1571; 1078; 1571; 1078; 1571; 0; 0; 0

Как можно заметить, данный режим отличается типичной температурой перед УО и скоростью транспортировки проката при сравнительно большом расходе охладителя на нижние коллекторы установки УО. Модельные расчёты показывают, что данный технологический режим позволяет реализовать «сглаживания» температурного градиента от поверхностей к центру вследствие повышенного теплоотвода с нижней поверхности проката.

Из 10 предлагаемых пирометров ширину данного проката будут уверенно покрывать 8. Соответственно, в качестве входных температур для серии модельных расчётов использована некоторая правдоподобная вариативность значений измерений пирометров со второго по девятый. Входные значения варьируемого параметра и результаты расчётов приведены в Таблице 4.8.

Таблица 4.8 – Пример результата модельных расчётов по ширине проката

№ пирометра	Т входа, °С	Т выхода, °С				Расчётные физико-механические свойства											
		Т пов. верх.	Т центр	Т пов. ниж.	Средняя	HV10	KCV-20_ср	Пр_т_Т	Пр_т_L	BC_Т	ИПГ_-20_ср	Пр_т/BC_Т	Пр_т/BC_L	Пр_т_П0.5/BC_(L)	Пр_т_П0.5/BC_(Т)	H3Ф_min	H3Ф_max
2	787	642	634	618	632	215	329	545	514	609	97	0,90	0,89	0,91	0,91	9	8
3	795	645	638	622	636	218	328	547	518	612	97	0,89	0,89	0,92	0,91	9	8
4	803	649	642	625	639	214	326	545	511	612	97	0,89	0,88	0,92	0,91	9	8
5	806	651	643	626	641	212	332	548	514	613	96	0,89	0,89	0,91	0,91	9	8
6	807	651	644	627	641	216	334	543	513	611	96	0,89	0,88	0,92	0,91	9	8
7	800	648	641	624	638	215	324	541	512	611	97	0,89	0,88	0,92	0,91	9	8
8	791	643	636	620	634	212	331	543	513	612	97	0,89	0,88	0,92	0,91	9	8
9	790	643	636	619	633	213	336	544	515	611	97	0,89	0,89	0,92	0,91	9	8

Отметим, что отклик моделей на изменения входной температуры явно присутствует. Приняв особенности данного технологического режима, система учла повышенный теплоотвод с нижней поверхности: присутствует градиент выходной температуры от верхней поверхности к нижней. Также присутствует некоторая вариабельность значений физико-механических свойств, но для данной дисперсии входной температуры она сравнительно слабо выражена в абсолютных значениях. Однако можно заметить некоторые изменения уровня физико-механических свойств от центра к краям: рост твёрдости и доли вязкой составляющей при ИПГ и незначительные снижения предела текучести в поперечном направлении и временного сопротивления разрушению.

Кроме того, следует отметить, что при более значимых перепадах температуры вариабельность значений физико-механических свойств будет более существенной. Даже полученная в данном эксперименте вариативность допускает ситуацию, при которой получение значений свойств центральной «плоскости расчёта», близких к провальным, указывает на высокую вероятность получения неудовлетворительных значений по другим «плоскостям».

#### **4.4. Технические рекомендации по совершенствованию оборудования**

Известно, что в процессе КП происходит деформационное упрочнение проката, повышение плотности дислокаций и субзёрненных границ, вследствие чего происходит рост внутренних напряжений [29,121]. При последующем УО происходит интенсивное структурообразование, базирующееся на полученной при деформировании субструктуре [14]. Распределение теплового поля проката после подсуживания, изображённое на Рисунке 2.16, значения критических температур, приведённые в Разделе 2.5, результаты модельных расчётов, изображённые на Рисунках 2.27–2.31, а также распределения тепловых полей и структурного состояния проката по данным работ [14,15,29] позволяют сделать вывод о том, что градиент температуры по ширине заготовки с высокой вероятностью может

повысить структурную неоднородность после УО, в особенности в области кромок, что может увеличить внутренние напряжения проката. Рост внутренних напряжений способен влиять на конечную плоскостность трубной заготовки [29]. Проведенные в рамках настоящей работы промышленные эксперименты показали, что рост интенсивности охлаждения оказывает значительное влияние на конечную дисперсность микроструктуры [23], однако рост внутренних напряжений при этом может приводить к значительной коробоватости проката после УО [43,121].

Минимизировать внутренние напряжения заготовки возможно посредством управления тепловым полем проката путём регулирования подачи хладагента в линии ламинарного охлаждения по ширине (Рисунок. 4.3). Выбор участка УО обусловлен значениями суммарной теплоотдачи заготовки, подробно раскрытыми в Главе 2. Ламинарное УО оказывает наибольшее влияние на теплоотвод и, как следствие, на структурообразование и формирование физико-механических свойств проката.

Регулировать подачу хладагента предлагается посредством реализации системы охлаждения согласно схеме, изображённой на Рисунке 4.3, предполагающей использование усовершенствованной конструкции коллекторов с применением дроссельных заслонок в отводящих трубках.

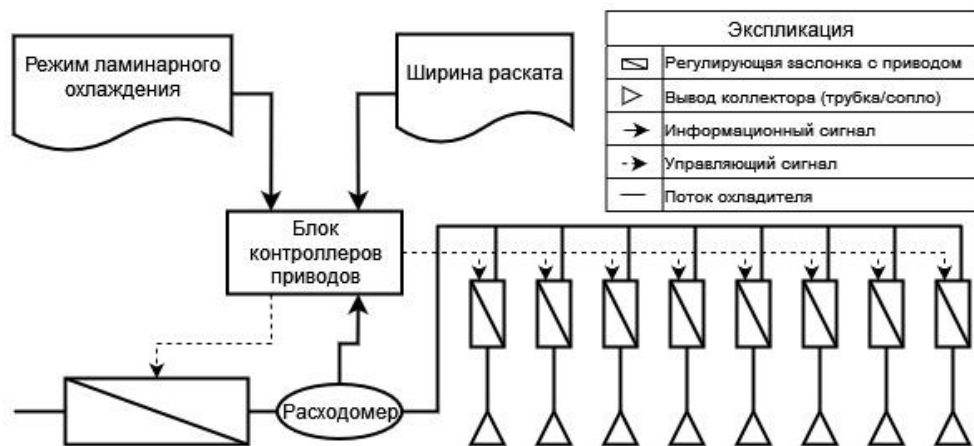


Рисунок. 4.3 – Концептуальная схема рекомендованной системы контроля ламинарного охлаждения

Схема конструкции отводящей трубки верхнего коллектора с дроссельной заслонкой представлена на Рисунке 4.4.

Предлагаемая заслонка имеет плоскоцилиндрическую форму, её толщина ограничена внутренним диаметром трубки и способна минимизировать снижение внутренней площади сечения. Герметизацию отверстий в корпусе трубки предполагается осуществлять посредством нанесения на вал твёрдой или полутвёрдой гидрофобной смазки или фторопластовыми шайбами.

Управление дроссельными заслонками осуществляется с использованием сервоприводов, зафиксированных на поверхности корпуса коллектора. При ограничении подачи охладителя через ряд трубок требуется корректировка суммарного расхода охладителя на коллектор. Управление данным процессом предполагается осуществлять аппаратными и программными мощностями автоматизированной системы управления технологическим процессом ТЛС в соответствии со схемой, представленной на Рисунке 4.3.

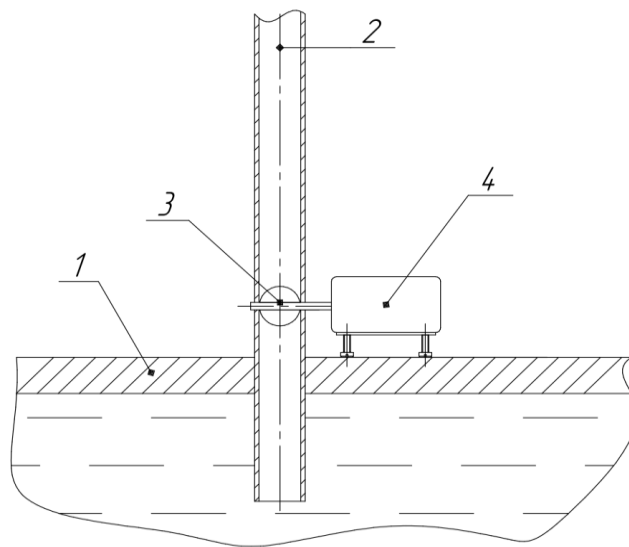


Рисунок. 4.4 – Схема конструкции U-образной трубки с регулируемой дроссельной заслонкой: 1 – корпус коллектора; 2 – U-образная трубка; 3 – дроссельная заслонка; 4 – сервопривод

Расположение заслонки у начала трубки призвано снизить вероятность возникновения турбулентности потока охладителя на выходе из трубки. Также целесообразно увеличение длины выпускных трубок с заслонками для повышения вероятности затухания возможной турбулентности.

В зависимости от ширины заготовки, часть «лишних» для данной ширины выпускных трубок коллектора предполагается полностью перекрывать, часть трубок, заливающих участки заготовки, близкие к кромке, необходимо перекрывать частично, понизив теплоотвод, а расход остальных трубок целесообразно оставить без изменения. Количество трубок с заслонками целесообразно подбирать исходя из загрузки ТЛС по сортаментам. В частности, для сортаментного ряда ТЛС «5000» ПАО «ММК» трубки с заслонками должны быть установлены на крайних 1,5 м коллекторов с каждой стороны.

Данная техническая рекомендация оформлена в виде заявки на полезную модель. На текущий момент заявка находится в обработке ФИПС.

#### **4.4 Выводы по главе 4**

1. Результаты работы использованы при проведении НИРиТР по теме «Разработка информационной системы прослеживаемости и идентификации комплекса потребительских свойств горячекатаного листа для электросварных прямошовных труб» по заказу ПАО «ММК». Результаты данной НИРиТР в полном объёме внедрены в промышленную эксплуатацию. С применением разработанного ПО осуществляется управление технологическим процессом КТМО толстолистового трубного проката класса прочности К60 на ТЛС «5000» ПАО «ММК».

2. С использованием указанного ПО предложен технологический режим производства, основанный на результатах вычислительного эксперимента, обеспечивающий сбалансированный комплекс физико-механических свойств. Отличительной особенностью режима является пониженная скорость транспортировки проката в линии УО.

3. Показано, что текущая схема расположения пирометров на подводящем рольганге установки УО ограничивает возможности применения ПО прогнозирования физико-механических свойств одной «плоскостью расчёта», соответствующей центральной оси проката. Предложена схема совершенствования

системы КИП ТЛС «5000» в отношении расширения пирометрического контроля проката на входе в установку УО с целью детализации распределения расчётных значений физико-механических свойств по ширине проката.

4. С применением ПО прогнозирования физико-механических свойств открываются перспективы повышения управляемости тепловым полем проката. В этой связи предложена система контроля расхода охладителя по ширине проката, основанная на усовершенствованной конструкции коллекторов ламинарного охлаждения.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Проведены предварительные промышленные эксперименты на ТЛС «5000» ПАО «ММК» в виде опытных КТМО проката категории прочности К60 с типичной для исследуемого сортамента химической композицией. На основе данных, полученных при проведении промышленных экспериментов, проведен анализ процессов, протекающих при КТМО на линии ТЛС, влияющих на тепловое состояние трубного проката. Выбор применённых режимов обеспечил вариативность формирования теплового состояния проката по завершению КТМО. Показано, что наибольшее влияние на формирование физико-механических свойств проката оказывают параметры ускоренного охлаждения. Определены граничные условия и длительности технологических операций, влияющих на тепловое состояние заготовки при производстве. Данные анализа использованы для построения теплофизической модели.

2. Проведена дифференциальная сканирующая калориметрия образцов толстолистового трубного проката, полученного в результате проведения промышленных экспериментов, с целью определения теплоёмкости стали требуемой химической композиции и теплового эффекта распада аустенита. Эмпирически определены характерные значения критических температур  $A_1$  и  $A_3$  ( $\sim [700)$  °С и  $\sim [880)$  °С соответственно). Получены кривые зависимости теплоёмкости от температуры и суммарный удельный тепловой эффект распада аустенита, составивший  $\sim [87)$  Дж/г. Произведена настройка адаптационных параметров моделирования. Построена модель изменения теплового состояния заготовки в линии прокатного стана. Выполнен расчет послыонных температурных траекторий  $\sim 30000$  единиц проката, произведенного на ТЛС «5000». На основании данных пирометрии АСУТП произведена проверка сходимости модели. Средняя погрешность расчёта составила  $[13,7)$  %.

3. На основании расчетных данных о распределении температуры по толщине проката построена математическая модель прогнозирования уровня физико-механических свойств трубного проката. Для построения модели также использовались фактические данные о химическом составе, технологическом процессе производства и результатах физико-механических испытаний проката. Проверка сходимости результатов расчетов модели путем сравнения прогнозных и фактических значений физико-механических свойств показала, что средняя арифметическая относительная погрешность расчета составила [1,03...5,81] %.

4. С целью обеспечения применимости указанных моделей в производственном процессе разработано ПО, реализующее расчет теплового состояния заготовки и прогнозирование физико-механических свойств на основании распределения температуры по толщине проката после УО. ПО внедрено в промышленную эксплуатацию. На основании расчетов данного ПО осуществляется управление технологическим процессом КТМО исследуемого сортамента.

5. С использованием указанного ПО произведён вычислительный эксперимент, по результатам которого предложен технологический режим производства, обеспечивающий повышение значений ряда физико-механических свойств на [1...14] %. С целью улучшения прослеживаемости распределения физико-механических свойств с применением ПО прогнозирования предложена схема совершенствования системы КИП ТЛС «5000», заключающаяся в расширении пирометрического контроля проката на входе в установку УО. С применением ПО прогнозирования физико-механических свойств появляются перспективы повышения управляемости тепловым полем проката. С этой целью предложена система контроля расхода охладителя по ширине проката, основанная на усовершенствованной конструкции коллекторов ламинарного охлаждения.

Результаты работы использованы при выполнении НИРиТР по теме «Разработка информационной системы прослеживаемости и идентификации комплекса потребительских свойств горячекатаного листа для электросварных



прямошовных труб» по заказу ПАО «ММК». Составлены соответствующие Акты внедрения (см. Приложение В).

Материалы данного исследования использованы в учебном процессе на кафедре «Машины и технологии обработки давлением и машиностроения» при преподавании ряда дисциплин. Составлен соответствующий акт (см. Приложение Г).

Таким образом, цель, поставленная перед настоящей работой, достигнута – разработан комплекс мероприятий по совершенствованию технологии и оборудования производства трубного проката класса прочности К60 для обеспечения требуемого уровня его физико-механических свойств.

При этом следует отметить, что результат работы имеет серьезные перспективы дальнейшего развития как с точки зрения его применимости в разрезе аттестации и неразрушающего контроля качества проката, так и с точки зрения его адаптации к более широкому кругу сортамента и стадий многопередельного металлургического производства.

Диссертационные исследования проводились при поддержке Правительства Российской Федерации в виде стипендии Президента РФ для аспирантов в 2021–2022 гг.

## СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

КТМО –	контролируемая термомеханическая обработка;
ТЛС –	толстолистовой стан;
УО –	ускоренное охлаждение;
ПО –	программное обеспечение;
АСУТП –	автоматизированная система управления технологическими процессами;
АСУП –	автоматизированная система управления производством;
ОЦК –	объемно-центрированная кубическая кристаллическая решетка;
МДП –	междеформационная пауза;
ДСК –	дифференциальная сканирующая калориметрия;
Средн. откл. абс. –	абсолютное среднее арифметическое отклонение;
Средн. откл. отн. –	относительное среднее арифметическое отклонение;
Rm –	коэффициент множественной корреляции;
STOD-20 –	критическое раскрытие в вершине трещины, мм;
HV10 –	твердость по Виккерсу, ед.;
KCU-60_cp –	ударная вязкость KCU при температуре –60 °С (среднее значение), Дж/см <sup>2</sup> ;
KCV-20_cp –	ударная вязкость KCV при температуре –20 °С (среднее значение), Дж/см <sup>2</sup> ;
KCV-40_cp –	ударная вязкость KCV при температуре –40 °С (среднее значение), Дж/см <sup>2</sup> ;
KV-20_cp –	работа удара KV при температуре –20 °С (среднее значение), Дж;
BC –	временное сопротивление, Н/мм <sup>2</sup> ;
BC_T –	временное сопротивление на поперечных образцах, Н/мм <sup>2</sup> ;
BC_L –	временное сопротивление на продольных образцах, Н/мм <sup>2</sup> ;
Дельта_p_L –	относительное удлинение равномерное в продольном направлении, %;

Дельта_p_T –	относительное удлинение равномерное в поперечном направлении, %;
Дельта_5 –	относительное удлинение, %;
Дельта_5_T –	относительное удлинение на поперечных образцах, %;
Дельта_5_L –	относительное удлинение на продольных образцах, %;
ОС_L –	относительное сужение на продольных образцах L, %;
ОС_T –	относительное сужение на поперечных образцах T, %;
Пр_t –	предел текучести, Н/мм <sup>2</sup> ;
Пр_t_T –	предел текучести на поперечных образцах, Н/мм <sup>2</sup> ;
Пр_t_L –	предел текучести на продольных образцах, Н/мм <sup>2</sup> ;
Пр_t_п_0.5_L –	условный предел текучести на продольных образцах, деформация в пределах 0,5%, Н/мм <sup>2</sup> ;
Пр_t_п_0.5_T –	условный предел текучести на поперечных образцах, деформация в пределах 0,5%, Н/мм <sup>2</sup> ;
Пр_t_усл0,2_T –	условный предел текучести на поперечных образцах, деформация в пределах 0,2%, Н/мм <sup>2</sup> ;
Пр_t_усл0,2_L –	условный предел текучести на продольных образцах, деформация в пределах 0,2%, Н/мм <sup>2</sup> ;
Пр_t/BC –	отношение предела текучести и временного сопротивления;
Пр_t/BC_T –	отношение предела текучести и временного сопротивления в поперечном направлении;
Пр_t/BC_L –	отношение предела текучести и временного сопротивления в продольном направлении;
Пр_tП0.5/BC –	отношение условного предела текучести и временного сопротивления;
Пр_tП0.5/BC_L –	отношение условного предела текучести и временного сопротивления в продольном направлении;
Пр_tП0.5/BC_T –	отношение условного предела текучести и временного сопротивления в поперечном направлении;
Пр_t0.2/BC_попер –	отношение условного предела текучести и временного сопротивления на поперечных образцах;
Пр_t0.2/BC_L –	отношение условного предела текучести и временного сопротивления на продольных образцах;
НЗД_max –	балл зерна действительный максимальный;
НЗД_min –	балл зерна действительный минимальный;

НЗФ_max –	балл зерна феррита максимальный;
НЗФ_min –	балл зерна феррита минимальный;
Полосчатость –	балл полосчатой структуры;
DWTT-10_cp –	доля вязкой составляющей в изломе (среднее значение), %;
Дол_вяз_KV-20_cp –	доля вязкой составляющей в образцах для определения работы удара KV-20 (среднее значение), %;
ИПГ_-20_cp –	количество вязкой составляющей при температуре –20 °С (среднее значение), %;
ИПГ_-31_cp –	количество вязкой составляющей при температуре –31 °С (среднее значение), %;
ИПГ_-40_cp –	количество вязкой составляющей при температуре –40 °С (среднее значение), %;
Intercept –	свободный член уравнения регрессии;
ТН –	нормализованная фактическая толщина проката;
Т01 –	нормализованная фактическая температура поверхности проката на входе в УО;
SPEED_PLATE –	нормализованная фактическая скорость транспортировки проката в линии УО;
WF_SPR_T <sub>i</sub> –	нормализованный фактический расход i-го верхнего коллектора в спрейерной секции линии УО;
WF_SPR_B <sub>i</sub> –	нормализованный фактический расход i-го нижнего коллектора в спрейерной секции линии УО;
WF_LAM_T <sub>i</sub> –	нормализованный фактический расход i-го верхнего коллектора в ламинарной секции линии УО;
WF_LAM_B <sub>i</sub> –	нормализованный фактический расход i-го нижнего коллектора в ламинарной секции линии УО;
T <sub>i</sub> –	расчетная температура i-го слоя проката на выходе из УО;
БД –	база данных;
КП –	контролируемая прокатка;
ТМСР –	Thermo-mechanical Controlled Processing;
КИП –	контрольно-измерительные приборы.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Кристиан, Дж., Теория превращений в металлах и сплавах / Дж. Кристиан. – М.: Мир, 1978. – 806 с.
2. Курдюмов, Г. В., Превращения в железе и стали / Г. В. Курдюмов, Л. М. Утевский, Р. И. Энтин. – М.: Наука, 1977. – 238 с.
3. Ройтбурд, А. Л., Современное состояние теории мартенситных превращений / А. Л. Ройтбурд // несовершенства кристаллического строения и мартенситные превращения: сб. – М.: Наука, 1972. – С. 7-32; УФН, 1974. – Т.113. – № 1. – С.105–128.
4. Olson, G., New directions in martensite theory / G. Olson // Mater. Sci. Eng, 1999. – V. A273-275. –P. 11–20.
5. Cahn R.W., Haasen P., Kramer E.J. Materials Science and Technology, Phase Transformations in Materials (Materials Science and Technology: A Comprehensive Treatment) / R.W. Cahn, P. Haasen, E.J. Kramer. – New York.: VCH Wiley, 1996. – 649 с.
6. American Petroleum Institute. API 5L: Specification for Line Pipe / American Petroleum Institute. – Washington, D.C.: API Publishing Services, 2004. – 166 p.
7. ГОСТ ISO 3183-2015. Трубы стальные для проводов нефтяной и газовой промышленности. Общие технические условия. – Введ. 01.06.2016. – Взамен ГОСТ ISO 3183-2012. – М.: Стандартинформ, 2015. – 149 с.
8. ГОСТ 31447-2012. Трубы стальные сварные для магистральных газопроводов, нефтепроводов и нефтепродуктопроводов. Технические условия. – Введ. 15.03.2012. – М.: Стандартинформ, 2013. – 31 с.
9. ТИ-101-П-ГЛ9-2-2011. Технология производства горячекатаных листов на стане 5000. – Введ. 21.02.2011. – Магнитогорск: ПАО ММК, 2011. – 58 с.

10. Баскаков, И. Е., Особенности производства горячекатаного листа на стане 5000 ПАО «ММК» / И. Е. Баскаков, Д. Н. Чикишев // Моделирование и развитие процессов ОМД. – 2019. – № 2(29). с С. 11–15. – EDN LOOTNP.
11. Погоржельский, В. И., Контролируемая прокатка / В. И. Погоржельский, Д. А. Литвиненко, Ю. И. Матросов, А. В. Иваницкий. – М.: Металлургия, 1979. – 184 с.
12. Irvine, K.J., Controlled Rolling of Structural Steel / K. J. Irvine, F. V. Pickering, J. J. Gladman // JISI. – 1970. – Vol. 208. – No 8. – PP. 717– 726.
13. Ковалев, А.И., Особенности структуры по сечению листового проката из высокопрочных штрипсовых сталей / А. И. Ковалев, Д. Л. Вайнштейн // Metallurg. – 2011. – No1. – С. 61–68.
14. Урцев, В. Н., Формирование структурного состояния высокопрочной низколегированной стали при горячей прокатке и контролируемом охлаждении / В. Н. Урцев, В. Л. Корнилов, А. В. Шмакова, М. Л. Краснов, П. А. Стеканов, С. И. Платов, Е. Д. Мокшин, Н. В. Урцев, В. М. Счастливец, И. К. Разумов, Ю. Н. Горностырев // Физика металлов и металловедение. – 2019. – № 12. – С. 1335–1344.
15. Мунтин, А. В., Разработка технологии прокатки толстого листа с заданными свойствами из трубных марок стали на стане 5000: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.02.09 / Мунтин Александр Вадимович. – М., 2014. – 22 с. – EDN ZPNUHJ.
16. Салганик, В. М., Тонкослябовые литейно-прокатные агрегаты для производства стальных полос: учеб. пос. / В. М. Салганик, И. Г. Гун, А. С. Карандаев и др. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2003. – 506 с.
17. Lagneborg, R., The role of vanadium in microalloyed steels / R. Lagneborg, T. Siwecki, S. Zajac et al. // Scandinavian Journal of Metallurgy. – 1999. – Vol. 28. – P. 1.
18. Babu, S.S., Crystallographic texture and the austenite grain structure of low-alloy steel weld deposits / S.S. Babu, H.K.D.H. Bhadeshia, L.E. Svensson // Journal Of Materials Science Letters. – 1991. – Vol 10. – P. 142–144.

19. Aaronson, H.I., The Decomposition of Austenite by Diffusional Processes / H.I. Aaronson, V.F. Zackay. – New York: Interscience Publishers. – 1962. – P. 295–311.
20. Счастливец, В. М. Новые представления о природе бейнитного превращения в сталях / В. М. Счастливец // *Металловедение и термическая обработка металлов.* – 2005. – № 7(601). – С. 24-29.
21. Колбасников, Н. Г. Моделирование и управление структурой и свойствами материалов в процессах термомеханической обработки: учебное пособие для студентов высших учебных заведений / Н. Г. Колбасников, А. А. Наумов. – Санкт-Петербург: Изд-во Политехнического ун-та, 2011. – 273 с.
22. Платов, С. И., Структурообразование в микролегированном трубном прокате на технологической линии современного толстолистого стана / С. И. Платов, К. Б. Масленников, Н. В. Уртцев // *Актуальные проблемы прочности;* под ред. чл.-корр. Рубаника В.В. – Молодечно, 2020. – С. 434–449.
23. Платов, С. И., Технология прогнозирования прочностных характеристик при производстве толстолистого трубного проката / С. И. Платов, К. Б. Масленников, М. Л. Лобанов // *Перспективные материалы и технологии: монография в 2-х т.;* под ред. чл.-корр. Рубаника В. В. / УО «ВГТУ». – Витебск, 2019. – Т.2. – С. 67–86.
24. Эфрон, Л. И., Особенности реализации термомеханической прокатки на станах различных типов / Л. И. Эфрон, Д. А. Рингинен, А. В. Мунтин // *Металлург.* – 2022. – № 4. – С. 45-59.
25. Полецков, П. П., Исследование влияния режимов контролируемой прокатки трубной стали на структурное состояние горячедеформированного аустенита / П. П. Полецков, М. С. Гущина, Д. Ю. Алексеев [и др.] // *Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова.* – 2018. – Т. 16, № 3. – С. 67-77.
26. Maslennikov, K. B., Ensuring control of the rolling technological process and the quality of rolled products at mill 5000 / K. B. Maslennikov, S. I. Platov, O. R. Latypov, N. V. Urtsev, V. S. Banshchikov, R. R. Dema // *AIP Conference Proceedings.* – Vol. 2315. – 2022. – P. 070012.

27. Смирнов, М. А., Основы термической обработки стали: учеб. пос. / М. А. Смирнов, В. М. Счастливцев, Л. Г. Журавлев. – Екатеринбург: УрО РАН, 1999. – 494 с.

28. Heavy plate mill [Электронный ресурс] // [www.sms-group.com](http://www.sms-group.com): официальный сайт SMS group GmbH. URL: <https://www.sms-group.com/ru-ru/plants/heavy-plate-mill> (дата обращения: 15.03.2023).

29. Салганик, В. М., Исследование неплоскостности толстолистового проката на стане 5000 ОАО ММК на основе анализа температурных полей раскатов / В. М. Салганик, С. В. Денисов, Д. Г. Набатчиков и др. // Черные металлы. Спец. выпуск. – 2011. – С. 67–69.

30. Голи-Оглу, Е. А., Неравномерность физико-механических свойств толстолистового проката после контролируемой прокатки с ускоренным охлаждением / Е. А. Голи-Оглу, Л. И. Эфрон // Металлург. – 2013. – № 1. – С. 58–63.

31. Стеканов, П. А., Асимметричная прокатка как способ коррекции формы раската при несоответствии линии прокатки и уровня рольганга на толстолистовом стане 5000 / П. А. Стеканов // Производство проката. – 2013. – № 8. – С. 5–9.

32. Лобанов, М. Л., Влияние скорости охлаждения на структуру низкоуглеродистой низколегированной стали после контролируемой термомеханической обработки / М. Л. Лобанов, М. Л. Краснов, В. Н. Урцев и др. // МиТОМ, 2019. – № 1. – С. 31–36.

33. Мазур, С. И., Исследование температурного поля и клиновидности профиля поперечного сечения полос, на стане горячей прокатки 2000 ОАО "НЛМК" / С. И. Мазур, Ю. А. Мухин, С. М. Бельский [и др.] // Современная металлургия нового тысячелетия : сборник научных трудов, Липецк, 08–11 декабря 2015 года. Том 1. – Липецк: Липецкий государственный технический университет, 2015. – С. 18–25.

34. Бельский, С. М., Регулирование плоскостности прокатываемых полос на базе математической модели распределения продольных напряжений /



С. М. Бельский, И. П. Мазур, В. И. Дождиков, В. Б. Васильев // Вестник Тамбовского университета. Серия: Естественные и технические науки. – 2013. – Т. 18, № 1. – С. 17–22.

35. Максимов, Е. А., Исследование параметров горячей правки толстых стальных листов на роликовой правильной машине / Е. А. Максимов, Р. Л. Шаталов // *Металлург.* – 2018. – № 2. – С. 42-45.

36. Хорнбоген, Е., Физическое металловедение сталей // Физическое металловедение: в 3 т. / Под ред. Р. У. Кана и П. Т. Хаазена. – М.: *Металлургия.* – 1989. – С. 493–550.

37. Gladman, T., *The physical metallurgy of microalloyed steels* / T. Gladman // *The Institute of Metals*, 1997. – 363 с.

38. Madariaga, I., Role of the particle matrix interface on the nucleation of acicular ferrite in a medium carbon microalloyed steel / I. Madariaga, I. Gutiérrez // *Acta Materialia.* – 1999. – Vol. 47, No. 3. – P. 951-960.

39. Cuddy, L. J., The Effect of Microalloy Concentration on the Recrystallization of Austenite during Hot Deformation // *Proc. Conf. Thermomechanical Processing of Microalloyed Austenite* / Pittsburgh PA, Aug. 1981; TMS-AIME / Warrendale, PA, 1981. – PP.129–140.

40. Maruyama, N., Interaction of the solute niobium or molybdenum with grain boundaries in  $\alpha$ -iron / N. Maruyama, G. D.W. Smith, A. Cerezo // *Materials Science and Engineering.* – 2003. – A353. – P. 126–132.

41. Adamczyk, J., *Engineering of metallic materials* / J. Adamczyk. – Gliwice: The Silesian University of Technology Publishers, 2004. – 9 p.

42. Platov, S. I., Structure formation by thermomechanical treatment of pipe products of K60 strength grade / S. I. Platov, K. B. Maslennikov, M. L. Lobanov, N. V. Urtsev // *Magnitogorsk Rolling Practice 2022 : Proceedings of the VI International Youth Scientific and Technical Conference*, Magnitogorsk, 31 мая – 04 2022 года. – Magnitogorsk: Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, 2022. – P. 105-106.

43. Румянцев, М. И., Моделирование процесса прокатки и охлаждения на толстолистовом стане / М. И. Румянцев, Д. Е. Малаховский, В. С. Митасов и др. // Неделя металлов в Москве: сб. тр. конф. / ОАО «ВНИИМЕТМАШ». – М., 2009. – С. 322–331.

44. Пат. [2447163](#) Российская Федерация, МПК С21D 1/19 (2006.01), С21D 6/00 (2006.01), С21D 1/78 (2006.01), В82В 3/00 (2006.01). Способ термической обработки изделий из сплавов на основе железа (варианты) / В. И. Воронин, Ю. Н. Горностырев, В. Н. Дегтярев и др.; – правообладатель ООО "Исследовательско-технологический центр «Аусферр». – 2010133286/02; заявл. 10.08.2010; опубл. 10.04.2012, Бюл. № 10.

45. Пат. 2207204 Российская Федерация, МПК В21В 37/00 (2000.01). Способ оптимизации технологии производства проката / С. А. Морозов, В. Н. Урцев, Д. М. Хабибулин и др.; заявитель и правообладатель ООО «Сорби стил». – 2002114912/02; заявл. 06.06.2002; опубл. 27.06.2003, Бюл. № 18.

46. Губанов, С. А., Контролируемая прокатка трубных сталей / С. А. Губанов, Д. Н. Чикишев, Е. Б. Блондинская // Наука и производство Урала. – 2014. – № 10. – С. 82-85.

47. Платов, С. И., Влияние параметров термомеханической обработки на микроструктуру толстолистового трубного проката / С. И. Платов, К. Б. Масленников, М.Л. Лобанов // Перспективные материалы и технологии: сб. матер. междунар. симпозиума. – Брест, 2019. – С. 516–517.

48. Lobanov, M. L., Tensile Deformation and Fracture Behavior of API-5L X70 Line Pipe Steel / M. L. Lobanov, V. A. Khotinov, V. N. Urtsev, S. V. Danilov, N. V. Urtsev, S. I. Platov, S. I. Stepanov // Materials. –2022. – № 15. – P. 501.

49. Lobanov, M. L., EBSD Analysis of Plane and Direction Combinations with the Weakest Crack Resistance in Pipe Plate Steels / M. L. Lobanov, S. V. Danilov, N. V. Urtsev, S. I. Stepanov // AIP Conference Proceeding, 2022. – 2503. – 060009.

50. Danilov, S. V., Influence of structural and textural states of low-carbon steels on the cracking resistance of tube products / S. V. Danilov, M. L. Lobanov, N. V. Urtsev [et al.] // AIP Conference Proceedings : 14th International Conference on Mechanics,

Resource and Diagnostics of Materials and Structures, MRDMS 2020, Ekaterinburg, 09–13 ноября 2020 года. Vol. 2315. – Ekaterinburg: American Institute of Physics Inc., 2020. – P. 030006.

51. Danilov, S. V., A study of steel grain structure after TMCP by orientation microscopy / S. V. Danilov, N. N. Nikul'chenkov, M. L. Lobanov [et al.] // AIP Conference Proceedings: 14th International Conference on Mechanics, Resource and Diagnostics of Materials and Structures, MRDMS 2020, Ekaterinburg, 09–13 ноября 2020 года. Vol. 2315. – Ekaterinburg: American Institute of Physics Inc., 2020. – P. 050003. – DOI 10.1063/5.0037043. – EDN OSKSXU.

52. Платов, С. И., Особенности прогнозирования микроструктуры при производстве толстолистового трубного проката / С. И. Платов, К. Б. Масленников, В. Л. Корнилов [и др.] // Производство проката. – 2019. – № 11. – С. 6-12.

53. Platov, S.I., Forecasting the microstructure of a microalloyed steel plate strip / S. Platov, K. Maslennikov, N. Urtsev // Solid State Phenomena. – 2021. – Vol. 316. – P. 306-312.

54. Гервасьев, А. М., Влияние микроструктуры и текстуры на трещиностойкость высокопрочных сталей для магистральных газопроводов нового поколения: дис. ... канд. техн. наук: 05.16.01 / Алексей Михайлович Гервасьев. – М.: 2011. – 127 с.

55. Дегтярев, В. Н., Исследование влияния структуры стали 06Г2МБ, формирующейся при контролируемой термомеханической прокатке, на трещиностойкость / В. Н. Дегтярев, Н. В. Урцев, А. В. Шмаков [и др.] // Прочность неоднородных структур - ПРОСТ 2023 : Сборник трудов XI Евразийской научно-практической конференции, Москва, 18–20 апреля 2023 года. – Москва: Общество с ограниченной ответственностью "Студио-Принт", 2023. – С. 102.

56. Дегтярев, В. Н., Адаптация модели изменения термического состояния горячекатаного листа для электросварных прямошовных труб / В. Н. Дегтярев, К. Б. Масленников, С. И. Платов [и др.] // Бернштейновские чтения по термомеханической обработке металлических материалов : Сборник тезисов. Научно-технический семинар, Москва, 25–27 октября 2022 года. – Москва:

Национальный исследовательский технологический университет "МИСиС", 2022.  
– С. 136.

57. Лобанов, М. Л., Исследование механизма разрушения трубного проката / М. Л. Лобанов, С. И. Платов, К. Б. Масленников, Р. Р. Дема // Перспективные материалы и технологии. – Минск : Белорусский государственный университет, 2021. – С. 624-637.

58. Гареев, А. Р., Баланс тепла подката на широкополосном стане горячей прокатки / А. Р. Гареев, С. А. Муриков, С. И. Платов, В. Н. Урцев, А. В. Шмаков // Моделирование и развитие процессов обработки металлов давлением: междунар. сб. науч. тр. под. ред. В.М. Салганика / Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им Г.И.Носова – Магнитогорск, 2014. – С. 250–258.

59. Гареев, А. Р., Расчет термомеханических режимов и практических настроек ШСГП при опытных прокатках сложного сортамента / А. Р. Гареев, С. А. Муриков, С. И. Платов, В. Н. Урцев, А. В. Шмаков // Производство проката. – 2015. – №5. – С. 14–17.

60. Урцев, В. Н., Феноменологическая модель кинетики распада аустенита низкоуглеродистых низколегированных высокопрочных сталей / В. Н. Урцев, А. В. Шмаков, Н. В. Урцев, Е. Д. Мокшин, Д. М. Хабибулин, В. Н. Дегтярев, П. А. Стеканов, Ю. Н. Горностырев, М. Л. Лобанов, С. И. Платов, К. Б. Масленников // Сталь. – 2020. – № 7. – С. 54–57.

61. Платов, С. И., Исследование процесса охлаждения заготовки при ускоренном охлаждении / С. И. Платов, К. Б. Масленников, М. Л. Лобанов [и др.] // Актуальные проблемы прочности: Материалы международной научной конференции, Витебск, 23–27 мая 2022 года. – Минск: УП "ИВЦ Минфина", 2022. – С. 267-269.

62. Quidort, D., A model of isothermal and nonisothermal transformation kinetics of bainite in 0,5% C steels / D. Quidort, Y. J. M. Brechet // ISIJ International. – 2002. – No 42. – P. 1010-1017.

63. Glover, S.G., The Mechanism of Phase Transformation in Metals / S. G. Glover. – The Institute of Metals, London. –1956.

64. Лобанов, М. Л., Тепловой эффект бейнитного превращения в трубных сталях при ускоренном охлаждении. / М. Л. Лобанов, Г. М. Русаков, В. Н. Урцев, М. Л. Краснов, Е. Д. Мокшин, А. В. Шмаков, С. И. Платов // Письма о материалах. – 2018. – Т.8. – №3. – С.246–251.
65. Salganik, V. M., Analysis of Structural and Phase Transformation in Low-alloy Steels Based on Dilatometric Studies / V. M. Salganik, D. N. Chikishev, E. B. Pozhidaeva, D. G. Nabachikov // Metallurgist. – 2016. – Vol. 59. – No 9–10. – P. 766-773.
66. Лобанов, М. Л., Влияние режимов контролируемой термомеханической обработки на структурно-текстурные состояния низкоуглеродистой низколегированной стали / М. Л. Лобанов, С. И. Платов, М. А. Зорина [и др.] // Металловедение и термическая обработка металлов. – 2023. – № 8(818). – С. 27-35.
67. Liu, C., A bainite transformation kinetics model and its application to X70 pipeline steel / C. Liu, X. Di, C. Chen [et al.] // Journal of Materials Science. – 2015. – Vol. 50, No. 14. – P. 5079–5090. – DOI 10.1007/s10853-015-9060-7. – EDN FNMRGH.
68. Chester. N. A., Mathematical modelling of bainite transformation kinetics / N. A. Chester, H. K. D. H. Bhadeshia // J. Phy. IV. – 1997. – Vol. 7(C5). P. 41–47.
69. Разумов, И. К., К теории фазовых превращений в железе и стали на основе первопринципных подходов / И. К. Разумов, Ю. Н. Горностырев, М. И. Кацнельсон // Физика металлов и металловедение. – 2017. – Т. 118, № 4. – С. 380–408.
70. Морозов, О. П., Верхний и нижний бейнит в углеродистой эвтектоидной стали / О. П. Морозов, В. М. Счастливец, И. Л. Яковлева // Физика металлов и металловедение. – 1990. – № 2. – С. 150-159.
71. Hillert, M., Role of interfacial energy during solid-state transformations / M. Hillert // Jerkontorets Annaler. – 1957. –Vol 141. – P. 757–789.
72. Zener, C., Kinetics of Decomposition of an Austenite / C. Zener // Transactions of the AIME. – 1946. – Vol. 167. – P. 550–595.
73. Turnbull, D., Theory of cellular precipitation / D. Turnbull // Acta Metall. –

1955. – V. 3. – № 1. – P. 55-63.

74. Abbaschian, R., Physical Metallurgy Principles / R. Abbaschian, R. E. Reed-Hill. – SI Version. – Stamford, CT: Cengage Learning, 2009. – 750 p.

75. Bhadeshia, H. K. D. H., Bainite in steels / H. K. D. H. Bhadeshia. – London: IOM Communications Ltd. – 2001. – 454 P.

76. van Bohemen, S. M. C., Experimental evidence for bainite formation below  $M_s$  in Fe–0.66C / S.M.C. van Bohemen, M. J. Santofimia, J. Sietsma // Scripta Materialia. – 2008. – Vol 58. – P. 488–491.

77. Matsuda, H., Kinetics of the Bainite Transformation / H. Matsuda, H. K. D. H. Bhadeshia // Proceedings: Mathematical, Physical and Engineering Sciences. – 2004. – Vol. 460. – P. 1707–1722.

78. Madariaga, I., Acicular ferrite formation in a medium carbon steel with a two stage continuous cooling / I. Madariaga, I. Gutierrez, C. Garca-De Andres, C. Capdevila // Scripta Materialia. – 1999. – Vol. 41, No. 3. – P. 229-235.

79. Вакс, В. Г., Экспериментальное и теоретическое исследование процессов зарождения и роста перлитных колоний в эвтектоидных сталях / В. Г. Вакс, А. Ю. Строев, В. Н. Урцев, А. В. Шмаков // Журнал экспериментальной и теоретической физики. – 2011. – Т. 139. – № 6. – P. 1098–1118.

80. Pandit, A.S., Divorced pearlite in Steels / A. S. Pandit, H. K. D. H. Bhadeshia // Proceedings of the Royal Society A. – 2012. – V. 468. – № 2145. –P. 2767–2778.

81. Ankit, K., Deviations from cooperative growth mode during eutectoid transformation: insights from phase field approach / K. Ankit, R. Mukherjee, T. Mitnacht, B. Nestler // Acta Mater. – 2014. – V. 81. – P. 204–209.

82. Bhadeshia, H. K. D. H., Steels: Microstructure and Properties, ed 2 / R. W. K. Honeycombe, H. K. D. H. Bhadeshia. – Oxford: Butterworth–Heinemann. – 1995.

83. Lee, J.K., Empirical formula of isothermal bainite start temperature of steels / J.K. Lee // Materials Science Letters. – 2002. – V. 21. – PP.1253– 1255.

84. Платов, С. И., Моделирование кинетики физических процессов, определяющих структурное состояние низкоуглеродистых сталей / С. И. Платов,

Н. В. Урцев, К. Б. Масленников // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования : Тезисы докладов 81-й международной научно-технической конференции, Магнитогорск, 17–21 апреля 2023 года. Том 1. – Магнитогорск: Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, 2023. – С. 186.

85. Wayman, C.M., Introduction to the Crystallography of Martensitic Transformations / C. M. Wayman. – McMillan, London, 1964. – 138 p.

86. Kelly, P. M., The morphology of martensite / P.M. Kelly, J. J. Nutting // Journal of the Iron and Steel Institute. – 1961. – Vol. 197. – P. 199–211.

87. Olson G. B., A general mechanism of martensitic nucleation: Part I. General concepts and the FCC → HCP transformation / G.B. Olson, Cohen M. // Metallurgical Transactions A. – 1976. – Vol. 7. – P. 1897–1905.

88. Rees, G. I., Thermodynamics of acicular ferrite nucleation / G. I. Rees, H. K. D. H. Bhadeshia // Materials Science and Technology. – 1994. – Vol. 10(5), – P. 353–358.

89. Babu, S.S., Stress and the acicular ferrite transformation / S.S. Babu, H.K.D.H. Bhadeshia // Materials Science and Technology. – 1990. – Vol 6. – P. 1005–1020.

90. Счастливец, В. М., Перлит в углеродистых сталях / В. М. Счастливец, Д. А. Мирзаев, И. Л. Яковлева, К. Ю. Окишев, Т. И. Табатчикова, Ю. В. Хлебникова. – Екатеринбург: УрО РАН, 2006. – 310 с.

91. Sundquist, B. E., The edgewise growth of pearlite / B. E. Sundquist // Acta Metall. – 1968. – V. 16. – № 12. – P. 1413–1422.

92. Yamanaka, A., Multi-Phase-Field Study for Pearlite Transformation with Grain Boundary Diffusion / A. Yamanaka, T. Yamamoto, T. Takaki, Y. Tomita // IV International Conference Multiscale Materials Modeling (MMM2008) / Florida, USA, October 27–31, 2008.

93. Hillert, M., The formation of pearlite / M. Hillert // In: Decomposition of Austenite by Diffusional Processes; ed. by Zackay V.F., Aaronson H.I. – N.Y.: Interscience, 1962. – P. 197–237.

94. Zhang, X., Structural transformations among austenite, ferrite and cementite in Fe-C alloys: A unified theory based on ab initio simulations / X. Zhang, T. Hickel, J. Rogal, S. Fähler, R. Drautz, J. Neugebauer // *Acta Mater.* – 2015, – V. 99. – P. 281–289.
95. Pickering, F.B., Transformation and Hardenability in Steels / F.B. Pickering. – Ann Arbor, MI: Climax Molybdenum Co. – 1968.– P.109.
96. Okatov, S. V., Effect of magnetic state on the  $\gamma$ - $\alpha$  transition in iron: First-principles calculations of the Bain transformation path / S. V. Okatov, A. R. Kuznetsov, Yu. N. Gornostyrev, V. N. Urtsev, M. I. Katsnelson // *Physical Review B.* – 2009. – V. 79. – P. 94–111.
97. Настич, С.Ю., Освоение производства на стане 5000 ОАО «ММК» проката из низколегированных сталей с повышенными характеристиками прочности и хладостойкости / С.Ю. Настич, Ю.Д. Морозов, М.Ю. Матросов, С.В. Денисов, В.В. Галкин, П.А. Стеканов // *Металлург.* – 2011. – № 11. – С. 57–64.
98. Шмаков, А.В., Разработка и анализ температурных режимов толстолистовой прокатки с использованием математического моделирования процесса / А. В. Шмаков, В. М. Салганик, С. В. Денисов, Д. О. Пустовойтов // Сборник докладов XVIII Международной научно-технической конференции «ТРУБЫ-2010». – Челябинск, 13–15 сентября 2010.
99. Salganik, V., Plate rolling modeling at mill 5000 of OJSC «Magnitogorsk Iron and Steel» for analysis and optimization of temperature rates / V. Salganik, A. Shmakov, A. Pesin, D. Pustovoytov // *Proceedings of the 10th International Conference on Numerical Methods in Industrial Forming Processes NUMI-FORM 2010.* – Pohang, Republic of Korea, June 13–17, 2010. – P. 602–60.
100. Салганик, В. М., Моделирование процесса контролируемой прокатки трубной заготовки в условиях стана 5000 ОАО «ММК» / В. М. Салганик, А. В. Шмаков, Д. О. Пустовойтов // Сборник трудов VIII Международного конгресса прокатчиков. – Магнитогорск, 11 – 15 октября 2010.
101. Муриков, С. А., Математическая модель термообработки изделия в условиях протекания фазовых переходов / С. А. Муриков, В. Н. Урцев,



Ю. Н. Горностырев, А. В., Шмаков // Фазовые и структурные превращения в сталях: сб. науч. тр., вып. 6; под ред. В. Н. Урцева / МГТУ им. Носова. – Магнитогорск, 2010. – С. 397–407.

102. Шмаков, А. В., Комплексное моделирование технологии контролируемой прокатки трубной заготовки на основе моделирования температурных условий процесса / А. В. Шмаков, В. М. Салганик, С. В. Денисов, А. Р. Гареев, Д. О. Пустовойтов // Сталь. – 2012. – № 2. – С. 42–46.

103. Салганик, В. М., Разработка режимов контролируемой прокатки трубной заготовки повышенных классов прочности / В. М. Салганик, Д. Н. Чикишев, С. В. Денисов, Д. О. Пустовойтов, Д. Г. Набатчиков, Е. Б. Пожидаева. – Магнитогорск: изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2016. – 87 с.

104. Чикишев, Д. Н., Совершенствование технологии производства высококачественного толстолистового проката из микролегированных трубных сталей на основе применения методологии эффективной технологической компенсации / Д. Н. Чикишев // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Metallurgy. – 2021. – Т. 21, № 1. – С. 42–53.

105. Платов, С. И., Математическая модель процесса ускоренного охлаждения металла при толстолистовой горячей прокатке / С. И. Платов, С. М. Горбатюк, М. Л. Лобанов [и др.] // Metallurg. – 2022. – № 4. – С. 89-93.

106. Платов, С. И., Совершенствование технологии и оборудования толстолистового стана 5000 на основе автоматизированного прогнозирования микроструктуры / С. И. Платов, К. Б. Масленников, Е. Ю. Звягина [и др.] // Современные проблемы и перспективы развития науки, техники и образования : Материалы I Национальной научно-практической конференции, Магнитогорск, 30 ноября 2020 года. – Магнитогорск: Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, 2020. – С. 796-799.

107. Дема, Р. Р., Математическое моделирование термомодеформационных процессов при горячей прокатке / Р. Р. Дема, С. И. Платов, О. Р. Латыпов, М. А. Леванцевич // Физико-химические основы металлургических процессов

(ФХОМП 2022): сб. тр. междунар. научн. Конф. Им. академика А.М. Самарина, посвященной 120-летию со дня рождения выдающегося ученого-металлурга, академика АН СССР Самарина А.М., 265-летию со дня основания Выксунского металлургического завода и 20-летию Выксунского филиала НИТУ «МИСиС», Выкса, 10–14 октября 2022 года. – Выкса: АО "Выксунский металлургический завод", 2022. – С. 477–481.

108. Miyasaka, Y., Critical Heat Flux And Subcooled Nucleate Boiling In Transient Region Between A Two-Dimensional Water Jet And A Heated Surface / Y. Miyasaka, S. Inada, Y. Owase // Journal of chemical engineering of Japan. – 1980, – Vol. 13(1), – PP. 29–35.

109. Хабибулин, Д. М., Моделирование процессов охлаждения катанки / Д. М. Хабибулин, С. А. Морозов, А. В. Капцан, В. Н. Урцев // Совершенствование технологии в ОАО «ММК»: сб. тр. Центральной лаборатории ОАО «ММК»; вып. 6. – Магнитогорск, 2002. – С. 336–345.

110. Урцев, В. Н., Математическое моделирование процесса охлаждения металла при мелкосортной прокатке / В. Н. Урцев, С. И. Платов, С. А. Муриков и др. // Труды Шестого конгресса прокатчиков (г. Липецк, 18-21 октября 2005 г.). – М., 2005. – Т.1. – С. 342–344.

111. Виер, И. В., Математическое моделирование температурных полей в рабочих валках стана горячей прокатки / И. В. Виер, А. В. Козюлина, С. А. Муриков / Фазовые и структурные превращения в сталях: сб. науч. тр., вып. 2; под ред. В. Н. Урцева. – Магнитогорск, 2002. – С. 374–384.

112. Гареев, А. Р., Разработка программного комплекса для расчета термического состояния металла на линии стана горячей прокатки // А. Р. Гареев, А. В. Шмаков, С. А. Муриков, В. Н. Урцев, Д. Х. Девятов // Металлург. – 2011. – № 12. – С. 82–86.

113. Гареев, А. Р., Математическое описание взаимодействия струи воды с горячим металлом / А. Р. Гареев, А. В. Шмаков, С. А. Муриков, В. Н. Урцев, Д. Х. Девятов // Теплотехника и информатика в образовании, науке и производстве: Материалы 1 Всерос. науч.-практ. конф. / УрФИ. – Екатеринбург, 2012. – С. 32–36.

114. Gareev, A. R., Creation of a software package for calculating the thermal state of metal in a hot-rolling-mill line / A. R. Gareev, A. V. Shmakov, S. A. Murikov, V. N. Urtsev, D. Kh. Devyatov. // Metallurgist: Springer New York Consultants Bureau ISSN: March 2012. – Volume 55. – Issue 11–12. – PP. 935–940.

115. Гареев, А. Р., Исследование возможностей прокатного оборудования по достижению термических режимов на примере ШСГП 2000 ОАО «ММК» / А. Р. Гареев, С. А. Муриков, С. И. Платов, В. Н. Урцев, А. В. Шмаков // Фундаментальные и прикладные исследования в современном мире: Материалы X междунар. науч.-практ. конф. / Изд-во Стратегия будущего. – Санкт-Петербург, 2015. – Том №1. – С. 30–34.

116. Гареев, А. Р., Анализ и экспериментальная верификация модели тепловыделения при фазовых превращениях / А. Р. Гареев, С. А. Муриков, С. И. Платов, В. Н. Урцев, А. В. Шмаков // Производство проката. – 2015. – №2. – С. 30–34.

117. Шичков, А. Н., Тепломассообмен при производстве листового проката / А. Н. Шичков, В. Г. Лабейш. – Л.: СЗПИ, 1982. – 80 с.

118. Румянцев, М. И., Развитие методологии проектирования технологий листопрокатного производства: теория и практика: дис. ... докт. техн. наук: 05.16.05 / Румянцев Михаил Игоревич. – Магнитогорск.: изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2018. – 466 с.

119. Шкатов, В. В., Прогнозирование твердости горячекатаных листовых сталей с использованием нейросетевых моделей / В. В. Шкатов, И. П. Мазур, В. В. Шкатов // Современные материалы, техника и технологии. – 2017. – № 7(15). – С. 103–107.

120. Хошинов, В. А., Структурные аспекты пластичности и вязкости конструкционных сталей / В. А. Хошинов // Прочность неоднородных структур - ПРОСТ 2020/2021: сб. тр. X Евразийской науч.-практ. конф., 20–22 апреля 2021 года, НИТУ «МИСиС». – Москва: ООО «Студио–Принт». – 2021. – С. 15.

121. Пышминцев, И. Ю., Особенности разрушения трубных сталей класса прочности X80 (K65) / В. А. Хошинов, И. Ю. Пышминцев, В. М. Фарбер //

Инновации в материаловедении и металлургии : Материалы 1-ой международной интерактивной научно-практической конференции, Екатеринбург, 13–19 декабря 2011 года. Часть 1. – Екатеринбург: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина. – 2012. – С. 289–300.

122. Салганик, В. М., Разработка и анализ технологии контролируемой толстолистовой прокатки трубной заготовки на основе моделирования температурных условий процесса / В. М. Салганик, А. В. Шмаков, Д. О. Пустовойтов [и др.] // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования. – 2011. – Т. 1, № 69. – С. 201-204.

123. Гареев, А.Р., Направления совершенствования технологии и оборудования ускоренного охлаждения на широкополосных станах горячей прокатки / А. Р. Гареев, С. А. Муриков, С. И. Платов и др. // Производство проката. – 2015. – №3. – С.14–21.

124. Масленников, К. Б., Экспериментальное определение теплоёмкости и теплового эффекта распада аустенита низкоуглеродистой микролегированной трубной стали / К. Б. Масленников, Н. В. Урцев, П. А. Ухина [и др.] // Проблемы и перспективы развития автоматизации технологических процессов : Сборник научных трудов Всероссийской научно-технической конференции с международным участием, посвященной 90-летию со дня рождения лауреата Государственной премии СССР, доктора технических наук, профессора Дмитриева Льва Борисовича, Тула, 23 июня 2023 года. – Тула: Тульский государственный университет, 2023. – С. 72-78.

125. ASTM A1033-18. Standard Practice for Quantitative Measurement and Reporting of Hypoeutectoid Carbon and Low-Alloy Steel Phase Transformations / ASTM International. – 2018. – 14 P.

126. Brown, M.E., Introduction to Thermal Analysis: Techniques and Applications / M. E. Brown. – Springer, 2001. – 264 p.

127. ASTM E1269-11 (2018). Standard Test Method for Determining Specific

- Heat Capacity by Differential Scanning Calorimetry. ASTM International, 2018. – 14 p.
128. Platov, S. I., Model of layer-by-layer cooling trajectory in rolled products by tmcp / S. I. Platov, K. B. Maslennikov, N. V. Urtsev [et al.] // Materials Science Forum. – 2021. – Vol. 1037 MSF. – P. 390-399.
129. Бабичев, А. П., Физические величины. Справочник / А. П. Бабичев, Н. А. Бабушкина, А. М. Братковский и др.; под ред. И.С. Григорьева, Е. З. Мейлихова. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 1232 с.
130. Дрейпер, Н., Прикладной регрессионный анализ / Н. Дрейпер. – М.: Вильямс И.Д., 2019. – 912 с.
131. Радченко, С. Г., Устойчивые методы оценивания статистических моделей / С. Г. Радченко – К.: ИП «Санспарель», 2005. – 504 с.
132. Радченко, С. Г., Методология регрессионного анализа / Радченко С. Г.– К.: «Корнийчук», 2011. – 376 с.
133. Лесковец, Ю., Анализ больших наборов данных / Ю. Лесковец, А. Раджараман. – М.: ДМК, 2016. – 498 с.
134. Cameron, A.C., Regression Analysis of Count Data / A. C Cameron, P. K. Trivedi. – Second Edition. – Cambridge, 2013. – 596 p.
135. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ 2020661517 Российская Федерация. Программа расчета структуры проката, формирующейся при его охлаждении: Кинетика 1.0 / А. В. Шмаков, В. Н. Урцев, Н. В. Урцев, И. К. Разумов, Ю. Н. Горностырев, К. Б. Масленников, Н. С. Сидоренко, С. И. Платов; заявитель и правообладатель Общество с ограниченной ответственностью «Исследовательско-технологический центр «Аусферр». – № 2020660646; заявл. 14.09.2020; опубли. 24.09.2020. – 1с.
136. Platov, S. I., Strength, ductility and impact toughness of tube steels after hot rolling / S. I. Platov, V. A. Nekit, K. B. Maslennikov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering : International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment 2019, ICMTME 2019, Sevastopol, 09–13 сентября 2019 года. Vol. 709, 3, Issue 2. – Sevastopol: Institute of Physics Publishing, 2020. – P. 033110.

**ПРИЛОЖЕНИЕ А – ВАРИАТИВНОСТЬ НЕЗАВИСИМЫХ  
ПЕРЕМЕННЫХ ВЫБОРКИ**

Таблица А.1 – Геометрические и технологические параметры в линии УО

Параметр	Минимум	Максимум	Среднее значение
Температура конца прокатки, °С	666	878	816.5
Толщина проката, мм	11	33.4	18.9
Скорость транспортировки, м/с	0.99	2.37	1.80
Температура на выходе из УО, °С	410	610	540,2

Таблица А.2 – Схемы включения (1 – включен, 0 – выключен) коллекторов в линии УО

Спрейерное, верх	Спрейерное, низ	Ламинарное, верх	Ламинарное, низ	Кол-во раскатов
0000	00000000	110011010010000	1111111111111111111100000000	1276
0101	00110011	101011001100000	111111111111111111110000000000	1211
0101	00110011	110110110110110	11111111111111111111111111100	746
0000	00000000	000110101010110	00000011111111111111111111100	628
1111	11111111	110110011100000	111111111111111111111000000000	412
0000	00000000	111010101000000	111111001100110011000000000000	369
0101	00110011	110110110110000	111111111111111111111100000000	269
1101	11110011	110110110110000	111111111111111111111100000000	209
0111	00111111	110110110110000	111111111111111111111100000000	134
0000	00000000	101010101011110	110011001100110011001111111100	79
0101	00110011	101010101010000	111111111111111111111100000000	65
0000	00000000	110110110110111	1111111111111111111111111111111	58
1111	11111111	101101101110000	111111111111111111111100000000	57
0000	00000000	101010101010100	111111111111111111111111110000	22
1111	11111111	101101101100000	111111111111111111111000000000	16
1111	11111111	101111101110000	111111111111111111111100000000	15
0000	00000000	110011010010000	111111001111001100001100000000	12
0000	00000000	101010111011100	110011001100111111001111110000	12
0101	00110011	101011001101000	1111111111111111111111111000000	10
0101	00110011	101011001100000	1111111111111111111110000000011	9
0101	00110011	101011001110000	111111111111111111111100000000	8
0101	00110011	101011001111000	11111111111111111111110000000	8
0101	00110011	110110110110100	11111111111111111111111110000	8
0000	00000000	101111011110101	11001111111100111111100110011	7
1111	11111111	101101101111000	11111111111111111111111000000	6
0000	00000000	111111111111100	11111111111111111111111110000	5
0000	00000000	111111111111110	1111111111111111111111111100	5
0111	00111111	110110110110010	11111111111111111111100000011	5

## Продолжение таблицы А2

Спрейерное, верх	Спрейерное, низ	Ламинарное, верх	Ламинарное, низ	Кол-во раскатов
0000	00000000	110110101010000	1111111111111111111100000000	5
1111	11111111	111111111110000	1111111111111111111110000000	4
0000	00000000	101111011110010	110011111111001111111100001100	4
0011	00001111	101011001100000	111111111111111111111000000000	4
1001	11000011	110110110110000	111111111111111111111100000000	4
0000	00000000	111111111111111	111111111111111111111111111111	4
0000	00000000	111111111111000	11111111111111111111111000000	3
1111	11111111	111111111100000	111111111111111111111000000000	3
1111	11111111	111011101100000	111111111111111111111000000000	3
1111	11111111	111111100000000	111111111111110000000000000000	3
1111	11111111	111111111000000	111111111111111111100000000000	3
0111	00111111	110011100110000	111111111111111111111100000000	2
1111	11111111	111111111111000	11111111111111111111111000000	2
1111	11111111	110110011000000	111111111111111111100000000000	2
0000	00000000	000001101101010	000000000011111111111111111100	2
1111	11111111	001011001100000	000011001111000011110000000000	2
1111	11111111	101011001100000	111111111111111111111000000000	2
1010	11001100	110110110110000	111111111111111111111110000000	2
0000	00000000	111111111110000	111111111111111111111100000000	1
1111	11111111	110110010000000	111111111111111110000000000000	1
0000	00000000	101010101010000	111111111111111111111111000000	1
0000	00000000	101010000010100	1111111111111111111111111110000	1
0101	00110011	110110110110110	1111111111111111111111111111111	1
1111	11111111	110110011110000	111111111111111111111110000000	1
1111	11111111	111111110000000	111111111111111110000000000000	1
0000	00000000	111111111100000	111111111111111111111100000000	1
0111	00111111	110110110110000	1111111111111111111111100000011	1

Таблица А.3 – Химические композиции проката, масс. %.

Химический элемент	Минимум	Максимум	Среднее значение
C	0.0492	0.17	0.0709
Si	0.02	0.64	0.2225
Mn	0.63	1.8	1.6601
S	0.001	0.007	0.0021
P	0.004	0.0134	0.0088
Cr	0.0194	0.2	0.0388
Ni	0.01	0.27	0.1604
Cu	0.02	0.29	0.1219
Al	0.02	0.056	0.0367
Ti	0.0045	0.029	0.0209
V	0.001	0.02	0.0038

## Продолжение таблицы А3

Химический элемент	Минимум	Максимум	Среднее значение
Nb	0.0162	0.085	0.0505
Mo	0.001	0.238	0.0201
B	0.0001	0.0008	0.0004
Ca	0	0.005	0.0017
Zn	0	0.0208	0.0044
Sn	0.0013	0.0308	0.0033
Pb	0	0.0001	0.0000
Fe	97.0976	99.3568	97.5310
N	0.003	0.008	0.0050
Sb	0.0005	0.001	0.0008
Bi	0.002	0.0024	0.0022
H <sub>2</sub>	0.0002	0.0003	0.0003



**ПРИЛОЖЕНИЕ Б – КОЭФФИЦИЕНТЫ ПРИ НЕЗАВИСИМЫХ  
ПЕРЕМЕННЫХ УРАВНЕНИЙ РЕГРЕССИЙ**

Таблица Б.1 – Коэффициенты при независимых переменных уравнений регрессий для расчета  $Pr_{\tau}/BC_{\tau}$ ,  $Pr_{\tau}/BC_L$ , ИПГ<sub>-20\_ср</sub>, HV10

Параметр	Физико-механическое свойство			
	$Pr_{\tau}/BC_{\tau}$	$Pr_{\tau}/BC_L$	ИПГ <sub>-20_ср</sub>	HV10
Intercept	1.2012	1.1582	65.93	216.80
TH	9.5358	6.8300	387.04	819.59
T01	0.0000	0.0000	0.02	0.03
SPEED_PLATE	-0.0037	0.0042	0.59	-2.18
WF_SPR_TOP1	-0.0001	-0.0001	0.00	-0.07
WF_SPR_TOP2	-0.0001	0.0000	-0.01	-0.06
WF_SPR_TOP3	0.0000	0.0000	-0.01	0.04
WF_SPR_TOP4	0.0001	0.0000	0.01	0.07
WF_SPR_BOT1	0.0001	0.0001	0.00	0.04
WF_SPR_BOT2	0.0001	0.0000	0.00	0.04
WF_SPR_BOT3	0.0000	0.0000	0.00	-0.01
WF_SPR_BOT4	-0.0001	0.0000	-0.01	-0.05
WF_LAM_TOP1	0.0000	0.0001	0.00	-0.01
WF_LAM_TOP2	0.0000	0.0000	0.00	0.03
WF_LAM_TOP3	0.0000	0.0000	0.00	0.03
WF_LAM_TOP4	0.0000	0.0001	0.00	-0.02
WF_LAM_TOP5	0.0000	0.0000	0.00	-0.01
WF_LAM_TOP6	0.0000	0.0000	0.00	-0.02
WF_LAM_TOP7	0.0000	0.0000	0.00	0.00
WF_LAM_TOP8	0.0000	-0.0001	0.00	0.01
WF_LAM_TOP9	0.0000	-0.0001	0.00	0.00
WF_LAM_TOP10	0.0000	-0.0001	-0.01	0.01
WF_LAM_TOP11	0.0000	0.0000	-0.01	0.02
WF_LAM_TOP12	0.0000	0.0000	0.00	0.04
WF_LAM_TOP13	0.0000	0.0000	0.00	-0.02
WF_LAM_TOP14	0.0000	0.0000	0.00	-0.01
WF_LAM_TOP15	0.0001	-0.0005	0.01	-0.02
WF_LAM_BOT1	0.0000	0.0000	0.00	0.01
WF_LAM_BOT2	0.0000	0.0000	0.00	-0.02
WF_LAM_BOT3	0.0000	0.0000	0.00	-0.01
WF_LAM_BOT4	0.0000	-0.0001	0.00	0.02

## Продолжение таблицы Б1

Параметр	Физико-механическое свойство			
	Пр_т/BC_T	Пр_т/BC_L	ИПГ_-20_ср	HV10
WF_LAM_BOT5	0.0000	0.0000	0.00	0.01
WF_LAM_BOT6	0.0000	0.0000	0.00	0.01
WF_LAM_BOT7	0.0000	0.0000	0.00	0.00
WF_LAM_BOT8	0.0000	0.0000	0.00	0.00
WF_LAM_BOT9	0.0000	0.0000	0.00	0.00
WF_LAM_BOT10	0.0000	0.0000	0.00	-0.01
WF_LAM_BOT11	0.0000	0.0000	0.00	-0.01
WF_LAM_BOT12	0.0000	0.0000	0.00	-0.01
WF_LAM_BOT13	0.0000	0.0000	0.00	0.02
WF_LAM_BOT14	0.0000	0.0000	0.00	0.00
WF_LAM_BOT15	0.0000	0.0003	-0.01	0.02
C	-0.5526	-0.5398	-5.98	2.77
SI	-0.1452	-0.1405	-4.22	47.84
MN	-0.1521	-0.1567	2.20	-5.86
S	1.0028	0.7648	-45.94	1147.69
P	-1.0285	-0.3820	52.98	599.67
CR	-0.1622	-0.2449	-4.66	48.17
NI	-0.0325	-0.0559	-7.38	-21.27
CU	-0.0743	-0.0696	9.93	-44.35
AL	-0.0191	-0.1258	-8.61	-138.17
TI	0.0120	-0.0665	-32.28	33.89
V	-0.7167	-1.2965	-5.82	250.48
NB	0.5197	0.4154	2.47	190.96
MO	-0.2570	-0.2930	2.11	30.91
B	-56.2589	-59.1750	-3614.30	-9367.23
CA	-1.4119	0.1075	-77.29	-617.96
SN	0.4455	0.2779	-24.05	126.84
N	-1.0529	-0.5143	191.33	-634.22
T1	0.8969	1.3468	-151.13	317.28
T2	1.2504	-0.2204	150.82	523.88
T3	-1.8867	-0.9604	78.11	-257.61
T4	-0.4018	0.0743	40.65	-584.24
T5	-0.7790	-0.5276	-88.15	-434.30
T6	0.1311	0.1040	-45.15	-65.60
T7	0.6210	0.0865	-110.70	482.56
T8	0.8263	0.6482	30.24	-89.60
T9	-0.2978	-0.0890	68.30	114.15

## Продолжение таблицы Б1

Параметр	Физико-механическое свойство			
	Пр_т/ВС_Т	Пр_т/ВС_L	ИПГ_-20_ср	HV10
T10	-0.5540	-0.6762	132.11	470.39
T11	0.2040	-0.2976	-23.85	-122.75
T12	0.1576	0.5949	-97.00	-470.25
T13	-0.2787	-0.4267	55.72	-13.40
T14	0.1410	-0.6619	-53.60	-184.76
T15	-0.4603	1.0060	-40.11	296.16
T16	-1.1822	1.1309	99.65	23.11
T17	2.4536	-0.5662	-74.32	-13.70
T18	0.6087	-1.1036	73.00	-122.81
T19	-1.2701	-0.0199	3.68	240.67
T20	-0.3416	-0.1287	-42.61	-131.08
T21	-0.2288	0.7068	-14.15	-119.94
T22	-0.1928	-0.3035	-115.72	45.87
T23	0.1410	1.0322	36.48	198.08
T24	0.2038	-1.7470	63.69	331.68
T25	0.7045	0.9823	117.58	-571.31
T26	-0.7114	-0.5259	-15.55	-108.47
T27	1.0289	0.8126	-129.87	86.29
T28	0.3017	0.7884	9.59	239.62
T29	-1.3720	-1.2423	-19.11	101.84
T30	0.1373	0.4844	27.60	328.16
T31	0.6235	-0.1657	102.88	-244.86
T32	-0.3661	0.1283	-3.10	-194.60
T33	-1.6494	-0.5300	-78.15	-296.84
T34	1.6237	1.4237	95.97	-525.21
T35	-0.0709	0.0335	-106.95	186.62
T36	-0.4156	-1.1060	93.14	373.39
T37	0.5750	0.9026	-25.77	190.60
T38	0.7200	-0.8819	-118.75	671.39
T39	0.0669	-0.6103	28.15	214.47
T40	-2.0297	-1.8571	23.77	-150.61
T41	0.4540	1.4977	49.85	-514.25
T42	0.7770	0.6876	-78.71	-985.49
T43	-1.2850	-0.7428	-1.86	-586.48
T44	0.8856	-0.3986	30.58	653.97
T45	-0.9912	1.3195	48.49	289.01
T46	1.6453	0.7940	-9.16	857.78

## Продолжение таблицы Б1

Параметр	Физико-механическое свойство			
	Пр_т/ВС_Т	Пр_т/ВС_Л	ИПГ_-20_ср	HV10
T47	1.0785	1.5282	-79.37	423.42
T48	-1.0828	-0.7766	134.08	-30.95
T49	0.4640	-0.2481	26.15	-143.22
T50	-0.2306	-1.2509	-72.18	-240.33
T51	1.6577	0.2791	42.05	-416.52
T52	-1.8152	-0.9563	7.57	-367.81
T53	0.7403	0.1991	-187.76	-331.46
T54	-1.8634	-0.4510	-15.03	-144.73
T55	-0.8562	-0.0098	25.60	-58.29
T56	0.2403	0.9708	-31.34	300.32
T57	-0.4080	-0.4813	126.78	302.70
T58	-0.2323	-1.5896	120.67	432.75
T59	-0.0559	0.1433	28.67	580.04
T60	1.7560	1.7690	-54.19	108.45
T61	0.7967	-0.3165	-48.53	-311.63
T62	1.9099	2.6595	0.05	-123.02
T63	-1.5447	0.0357	-136.70	-387.08
T64	0.5768	-0.8147	-92.22	35.69
T65	-1.5450	-1.4864	189.16	-77.24

Таблица Б.2 – Коэффициенты при независимых переменных уравнений регрессий для расчета НЗФ\_min, НЗФ\_max, Пр\_т\_Л, KCV-20\_ср

Параметр	Физико-механическое свойство			
	НЗФ_min	НЗФ_max	Пр_т_Л	KCV-20_ср
Intercept	11.0156	9.3375	430.87	285.09
TH	-60.3137	-50.1443	138.42	-114.25
T01	-0.0036	-0.0033	-0.07	-0.02
SPEED_PLATE	-0.0040	-0.0464	-17.76	6.76
WF_SPR_TOP1	0.0026	0.0015	-0.04	-0.01
WF_SPR_TOP2	0.0007	0.0007	-0.03	0.04
WF_SPR_TOP3	-0.0021	-0.0008	0.05	-0.02
WF_SPR_TOP4	-0.0004	-0.0007	0.03	0.00
WF_SPR_BOT1	-0.0015	-0.0009	0.02	0.01
WF_SPR_BOT2	-0.0005	-0.0004	0.02	-0.03
WF_SPR_BOT3	0.0010	0.0003	-0.03	0.02

## Продолжение таблицы Б2

Параметр	Физико-механическое свойство			
	НЗФ_min	НЗФ_max	Пр_т_L	KCV-20_ср
WF_SPR_BOT4	0.0005	0.0006	-0.01	0.00
WF_LAM_TOP1	-0.0001	-0.0002	0.04	0.00
WF_LAM_TOP2	-0.0008	-0.0007	-0.01	-0.01
WF_LAM_TOP3	0.0000	0.0002	0.00	-0.03
WF_LAM_TOP4	0.0004	0.0004	-0.01	0.01
WF_LAM_TOP5	0.0007	0.0007	0.01	0.01
WF_LAM_TOP6	0.0003	0.0003	0.00	0.00
WF_LAM_TOP7	0.0005	0.0005	0.01	-0.03
WF_LAM_TOP8	0.0001	0.0001	-0.01	0.00
WF_LAM_TOP9	0.0000	0.0000	-0.01	0.00
WF_LAM_TOP10	-0.0005	-0.0005	-0.01	0.01
WF_LAM_TOP11	-0.0008	-0.0009	0.01	0.05
WF_LAM_TOP12	-0.0002	-0.0002	0.01	0.00
WF_LAM_TOP13	0.0004	0.0004	-0.11	-0.05
WF_LAM_TOP14	-0.0005	-0.0005	0.12	-0.01
WF_LAM_TOP15	-0.0001	-0.0001	-0.69	-0.08
WF_LAM_BOT1	0.0001	0.0001	-0.03	-0.01
WF_LAM_BOT2	0.0006	0.0005	0.02	0.00
WF_LAM_BOT3	0.0000	-0.0001	0.01	0.02
WF_LAM_BOT4	-0.0004	-0.0004	-0.01	0.00
WF_LAM_BOT5	-0.0006	-0.0006	0.00	0.00
WF_LAM_BOT6	-0.0002	-0.0001	0.01	0.00
WF_LAM_BOT7	-0.0002	-0.0002	0.00	0.02
WF_LAM_BOT8	0.0000	0.0000	0.00	0.00
WF_LAM_BOT9	0.0000	0.0000	0.01	0.00
WF_LAM_BOT10	0.0004	0.0004	0.00	0.00
WF_LAM_BOT11	0.0004	0.0004	0.00	-0.03
WF_LAM_BOT12	-0.0001	0.0000	0.00	0.00
WF_LAM_BOT13	-0.0002	-0.0002	0.07	0.03
WF_LAM_BOT14	0.0003	0.0003	-0.06	0.00
WF_LAM_BOT15	0.0000	0.0000	0.35	0.04
C	-0.1148	-0.3184	-7.12	-114.79
SI	-0.2467	-0.2904	17.65	-48.71
MN	1.2156	1.3149	14.58	17.78
S	-16.6685	-17.6326	1650.36	-1507.96
P	-11.0387	-13.5140	384.94	-134.90
CR	-1.7089	-1.0590	-115.95	293.54

## Продолжение таблицы Б2

Параметр	Физико-механическое свойство			
	НЗФ_min	НЗФ_max	Пр_т_L	KCV-20_cp
NI	1.1621	1.0204	32.77	-12.03
CU	1.5907	1.5604	20.30	-141.30
AL	3.6614	3.4417	53.56	-17.37
TI	-0.3673	-0.3656	1090.27	-105.71
V	-1.1286	-0.1554	-307.99	-616.93
NB	-2.3559	-3.4719	146.13	590.59
MO	0.6864	0.9723	72.49	-143.20
B	-22.3668	-11.9171	-4776.04	8973.18
CA	-7.2175	-4.4459	1371.57	229.46
SN	-0.9866	-1.8525	-10.32	67.70
N	16.9113	16.4143	-2918.71	101.77
T1	-2.8140	-4.0787	-679.75	529.41
T2	-10.5673	-9.3791	220.83	-156.37
T3	10.8007	10.8847	693.77	-191.08
T4	5.4448	8.0709	301.87	-867.03
T5	4.3530	-2.0738	-176.34	1049.10
T6	-0.8219	2.9961	-328.19	-357.22
T7	-2.7246	-2.5098	766.16	12.37
T8	1.4267	1.3788	-712.50	-449.34
T9	-9.0502	-8.7270	323.04	-109.83
T10	-13.7093	-9.2193	-1021.62	1235.06
T11	13.5155	7.2788	-207.86	-727.80
T12	2.2786	1.2224	1165.77	-74.05
T13	2.0682	2.8889	-611.26	367.34
T14	6.3526	10.2199	-643.27	-96.23
T15	-5.0896	-7.1178	1033.46	-427.36
T16	-1.6506	-0.4512	759.52	2.83
T17	-1.2036	-1.2041	-400.52	262.64
T18	4.9054	0.8206	-979.47	413.13
T19	0.3767	0.6440	-1197.59	308.04
T20	-0.7581	-2.4054	1426.86	-1138.96
T21	6.2208	14.2168	195.51	-454.24
T22	-21.5194	-24.5804	-53.92	252.95
T23	-0.2295	-4.5277	1228.75	1602.42
T24	7.9233	12.4452	-1315.36	-206.15
T25	17.7062	14.9435	-573.55	-981.80
T26	0.5900	1.9599	757.37	554.98

## Продолжение таблицы Б2

Параметр	Физико-механическое свойство			
	НЗФ_min	НЗФ_max	Пр_т_L	KCV-20_cp
T27	-7.2983	-5.5462	693.64	-454.68
T28	-6.9670	-7.3998	1008.76	-1245.21
T29	0.7999	2.5901	-1802.38	1632.72
T30	-11.5926	-18.7378	-287.74	-455.31
T31	-1.6972	0.9040	-537.25	542.88
T32	-4.1299	0.0915	-133.90	708.95
T33	8.0226	5.0326	599.56	-1379.54
T34	11.2435	14.4743	1557.23	-434.91
T35	16.0684	12.0312	199.16	18.48
T36	3.2690	0.4785	11.52	822.43
T37	-2.6326	-0.9979	1477.37	-430.42
T38	-26.3187	-20.0092	-2325.50	1358.75
T39	-11.9564	-11.5826	-1233.14	-949.37
T40	1.4914	-2.7290	-79.31	72.38
T41	14.1313	13.4088	448.24	187.37
T42	10.5786	6.0980	446.69	68.63
T43	6.0576	6.5412	-1766.28	-1627.59
T44	-0.7291	6.3909	345.55	1197.90
T45	-8.6226	-11.2376	1191.76	-1190.83
T46	-2.0431	-4.8155	209.65	886.54
T47	-18.5773	-11.9574	193.79	619.91
T48	3.9110	5.9203	168.46	834.64
T49	3.2485	2.1139	-439.81	-380.88
T50	16.2221	14.3266	274.73	-621.90
T51	4.4489	-0.6303	-480.55	305.91
T52	4.0081	2.6245	-40.30	838.10
T53	-15.4756	-18.1510	926.24	-1447.70
T54	-3.2407	-0.4694	-178.39	332.13
T55	-0.5236	1.5384	329.67	-1469.96
T56	-0.3671	-1.8846	-362.57	-503.21
T57	8.5536	11.2359	-75.56	-53.43
T58	3.2541	8.9452	-1950.95	875.81
T59	-11.8221	-12.1984	196.26	1144.63
T60	2.2191	2.3542	2061.05	2421.88
T61	3.7515	2.3609	-867.52	-725.13
T62	-6.3193	-15.5120	785.61	-468.13
T63	14.0719	16.1998	-448.39	-1912.84

Продолжение таблицы Б2

Параметр	Физико-механическое свойство			
	НЗФ_min	НЗФ_max	Пр_т_L	KCV-20_cp
T64	-20.3921	-18.0562	84.53	-721.37
T65	11.5315	12.5602	-171.41	1249.60

Таблица Б.3 – Коэффициенты при независимых переменных уравнений регрессий для расчета Пр\_т\_Т, Пр\_тП0.5/BC\_L, Пр\_тП0.5/BC\_T, BC\_T

Параметр	Физико-механическое свойство			
	Пр_т_Т	Пр_т_п_0.5/BC_L	Пр_т_п_0.5/BC_T	BC_T
Intercept	585.96	0.9738	0.9869	413.89
TH	-371.24	2.6867	4.0591	-4974.82
T01	-0.21	-0.0001	-0.0001	-0.11
SPEED_PLATE	-23.10	0.0036	0.0107	-2.41
WF_SPR_TOP1	-0.10	0.0000	0.0000	0.03
WF_SPR_TOP2	-0.09	0.0000	0.0000	0.02
WF_SPR_TOP3	0.03	0.0000	0.0000	0.04
WF_SPR_TOP4	0.08	0.0000	0.0000	-0.03
WF_SPR_BOT1	0.06	0.0000	0.0000	-0.02
WF_SPR_BOT2	0.05	0.0000	0.0000	-0.01
WF_SPR_BOT3	-0.02	0.0000	0.0000	-0.01
WF_SPR_BOT4	-0.05	0.0000	0.0000	0.01
WF_LAM_TOP1	0.01	0.0000	0.0000	-0.05
WF_LAM_TOP2	-0.03	0.0000	0.0000	0.03
WF_LAM_TOP3	0.00	0.0000	0.0000	0.03
WF_LAM_TOP4	-0.07	0.0000	0.0000	-0.01
WF_LAM_TOP5	-0.01	0.0000	0.0000	0.02
WF_LAM_TOP6	0.00	0.0000	0.0000	-0.01
WF_LAM_TOP7	0.07	0.0000	0.0000	0.00
WF_LAM_TOP8	0.03	0.0000	-0.0001	-0.01
WF_LAM_TOP9	0.02	0.0000	0.0000	0.01
WF_LAM_TOP10	0.01	0.0000	0.0000	0.03
WF_LAM_TOP11	0.03	0.0000	0.0000	0.04
WF_LAM_TOP12	-0.01	0.0000	0.0000	-0.02
WF_LAM_TOP13	-0.10	-0.0001	-0.0001	-0.01
WF_LAM_TOP14	0.08	0.0000	0.0001	0.00
WF_LAM_TOP15	-0.37	0.0000	0.0003	0.19
WF_LAM_BOT1	0.00	0.0000	0.0000	0.03



## Продолжение таблицы Б3

Параметр	Физико-механическое свойство			
	Пр_т_Т	Пр_т_п_0.5/BC_L	Пр_т_п_0.5/BC_T	BC_T
WF_LAM_BOT2	0.03	0.0000	0.0000	-0.01
WF_LAM_BOT3	0.00	0.0000	0.0000	-0.01
WF_LAM_BOT4	0.03	0.0000	0.0000	0.01
WF_LAM_BOT5	0.01	0.0000	0.0000	-0.01
WF_LAM_BOT6	0.01	0.0000	0.0000	0.01
WF_LAM_BOT7	-0.03	0.0000	0.0000	0.00
WF_LAM_BOT8	-0.01	0.0000	0.0000	0.01
WF_LAM_BOT9	0.00	0.0000	0.0000	0.00
WF_LAM_BOT10	-0.01	0.0000	0.0000	-0.01
WF_LAM_BOT11	-0.02	0.0000	0.0000	-0.02
WF_LAM_BOT12	0.02	0.0000	0.0000	0.02
WF_LAM_BOT13	0.05	0.0000	0.0000	0.00
WF_LAM_BOT14	-0.04	0.0000	-0.0001	0.00
WF_LAM_BOT15	0.18	0.0000	-0.0001	-0.11
C	-134.33	-0.3290	-0.3870	219.13
SI	36.65	-0.1061	-0.0856	122.41
MN	35.18	-0.0503	-0.0640	143.52
S	2744.06	1.5794	1.2768	22.94
P	-208.82	-0.4269	-0.7706	582.15
CR	-46.34	-0.1899	-0.1964	120.57
NI	47.49	-0.0674	-0.0686	51.01
CU	-8.42	-0.0891	-0.0387	42.19
AL	124.22	0.0875	-0.2472	125.54
TI	1252.65	0.5677	0.8512	1374.48
V	-34.26	-0.1987	-0.4930	304.19
NB	233.03	0.0839	-0.0581	-33.01
MO	151.94	-0.0434	-0.1312	276.42
B	-1808.19	-52.6145	-49.4746	44289.27
CA	319.95	0.6037	-0.2103	1237.87
SN	151.14	0.0320	-0.1153	-64.35
N	-4039.01	0.1429	-0.3493	-3585.31
T1	7.26	0.7270	-0.0178	-640.24
T2	384.01	-0.8027	0.1788	-166.17
T3	-262.73	0.2861	0.1416	228.36
T4	19.20	0.2162	0.1727	623.08
T5	-369.58	0.0177	-0.3663	317.42
T6	-995.01	-0.7404	0.0548	-323.00

## Продолжение таблицы Б3

Параметр	Физико-механическое свойство			
	Пр_т_Т	Пр_т_п_0.5/BC_L	Пр_т_п_0.5/BC_T	BC_T
T7	2073.95	0.0494	-0.5679	804.83
T8	263.37	0.3270	-0.5806	-873.77
T9	-594.32	0.6574	1.7902	-127.03
T10	-1121.76	-1.2839	-0.9012	-73.26
T11	-196.31	-0.4943	-0.3117	-298.90
T12	1113.54	0.5746	0.4379	885.27
T13	-806.68	0.9745	0.0000	-398.12
T14	508.95	-0.1975	-0.1786	145.04
T15	313.38	-0.1453	0.5734	96.88
T16	-2145.35	0.3972	-0.1637	-436.69
T17	2592.26	-0.9746	-0.0560	590.53
T18	766.39	-0.0666	-0.9386	-188.51
T19	-1865.79	0.2625	0.7973	-723.40
T20	-490.05	0.3847	0.1349	217.40
T21	491.70	0.0832	-0.3404	338.08
T22	-298.22	-0.1653	0.4590	250.50
T23	1000.11	0.3592	-0.3455	265.76
T24	-485.21	-0.6626	0.1895	-681.66
T25	160.73	-0.0173	0.0408	632.95
T26	201.94	0.3605	-0.0818	-465.47
T27	1129.93	0.4038	-0.6162	520.98
T28	-544.11	-0.1420	0.5836	-811.19
T29	-1512.83	-0.3525	-0.0508	-51.74
T30	-309.01	-1.0413	-0.8054	-225.84
T31	998.04	0.7424	0.5602	450.22
T32	-723.92	0.8010	0.6850	-396.50
T33	-502.96	-0.3882	0.0029	594.76
T34	1559.07	-0.5826	-0.6274	-252.01
T35	-72.76	-0.2334	0.2741	4.70
T36	806.47	0.6837	-0.3112	456.10
T37	821.24	-0.5082	-0.1080	459.57
T38	-1190.70	0.5083	-0.0006	-817.52
T39	-939.56	0.9033	0.0602	-290.81
T40	-207.32	-0.4929	0.4977	589.28
T41	-113.17	-0.1165	0.1614	-822.12
T42	1010.34	-0.4056	0.3758	1060.54
T43	-2067.08	-0.2804	-0.3606	-239.92

## Продолжение таблицы Б3

Параметр	Физико-механическое свойство			
	Пр_т_Т	Пр_т_п_0.5/BC_L	Пр_т_п_0.5/BC_T	BC_T
T44	858.49	0.9602	-0.4034	215.02
T45	-83.54	-0.4737	-0.5252	15.73
T46	844.40	-0.2272	0.1873	-553.92
T47	294.26	0.0041	-0.5340	-393.28
T48	-536.42	-0.1040	-0.3095	376.11
T49	-150.14	-0.9242	0.7606	-80.14
T50	774.58	1.5126	1.1952	144.51
T51	828.30	-0.3653	0.3247	591.52
T52	-1351.23	-0.1120	0.0436	-774.51
T53	1254.86	0.3790	-0.4459	202.83
T54	-356.12	0.4010	-1.1713	950.07
T55	-645.35	-1.0012	-1.3147	-760.53
T56	-1105.84	0.4308	1.3444	-654.56
T57	-78.84	-0.5770	-0.1198	122.33
T58	215.66	0.2512	0.9559	124.02
T59	-572.68	1.2392	0.9757	-915.40
T60	2020.12	-1.4633	-1.5427	1169.81
T61	684.01	0.2870	-0.2428	432.60
T62	-286.50	0.3418	0.3999	-591.32
T63	-1608.69	-0.0777	-0.0938	-145.43
T64	720.30	0.4091	0.0705	202.45
T65	-126.91	-0.5161	0.0040	93.74

## ПРИЛОЖЕНИЕ В – АКТЫ ВНЕДРЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ РАБОТЫ

УТВЕРЖДАЮ  
 Генеральный директор  
 ООО «ИТЦ «Аусферр»



(подпись, дата) М.П. В.Н. Урцев

### АКТ ВНЕДРЕНИЯ

результатов научно-исследовательских разработок аспиранта ФГБОУ ВО «Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова» («МГТУ им. Г.И. Носова») Масленникова К.Б. в практическую деятельность

#### Описание научно-технической продукции

Результаты диссертационного исследования Масленникова К.Б. были использованы при выполнении научно-исследовательской и технологической работы (НИРиТР) по теме «Разработка информационной системы прослеживаемости и идентификации комплекса потребительских свойств горячекатаного листа для электросварных прямошовных труб» по заказу ПАО «ММК» (договор № 239148 от 23 мая 2019 г.), реализуемой в рамках совместной программы научно-технического сотрудничества «ММК–ТМК–ЧТПЗ–Газпром».

Модель изменения термического состояния заготовки на линии толстолистового прокатного стана применена в качестве одной из составляющих модели прогнозирования фазового и структурного состояния проката. Проведена процедура верификации, показавшая, что расчетные значения термического состояния заготовки по сравнению с фактическими не выходят за пределы погрешности измерительных приборов.

Научный руководитель НИРиТР

  
 Воронков С.Н.  
 (подпись, дата)

УТВЕРЖДАЮ

Начальник научно-технологического  
центра ПАО «ММК»

А.Д. Картунов  
(подпись, дата) И.П.

### АКТ ВНЕДРЕНИЯ


результатов научно-исследовательских разработок аспиранта ФГБОУ ВО  
«Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова»  
(«МГТУ им. Г.И. Носова») Масленникова К.Б. в технологический процесс

#### Описание научно-технической продукции

Результаты диссертационного исследования Масленникова К.Б. были использованы при выполнении научно – исследовательской и технологической работы (НИРиТР) по теме «Разработка информационной системы прослеживаемости и идентификации комплекса потребительских свойств горячекатаного листа для электросварных прямошовных труб» по заказу ПАО «ММК» (договор № 239148 от 23 мая 2019 г.), реализуемой в рамках совместной программы научно-технического сотрудничества «ММК–ТМК–ЧТПЗ–Газпром».

Модель изменения термического состояния заготовки на линии толстолистового стана применена в качестве одной из составляющих модели прогнозирования фазового и структурного состояния проката. Проведена процедура верификации, показавшая, что расчётные значения термического состояния не выходят за пределы погрешности измерительных приборов.

Научный руководитель НИРиТР



Воронков С.Н.  
(подпись, дата)

## ПРИЛОЖЕНИЕ Г – АКТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ РАБОТЫ В УЧЕБНОМ ПРОЦЕССЕ



УТВЕРЖДАЮ

Проректор по образовательной деятельности

ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова»

И.Р. Абдулвелеев

«24» мая 2023 г.

АКТ

использования в учебном процессе

ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова» результатов диссертационной работы

Масленникова Константина Борисовича

на соискание ученой степени кандидата технических наук, выполненной на тему  
«Совершенствование термомеханической обработки трубного проката на основе  
теплофизического моделирования ускоренного охлаждения»

Материалы диссертационного исследования внедрены в образовательный процесс на кафедре «Машины и технологии обработки давлением и машиностроения» и используются при подготовке:

- бакалавров направления подготовки 15.03.01 «Машиностроение» при преподавании учебных дисциплин «Основы моделирования процессов обработки металлов давлением», «Технология и оборудование процессов производства листового и сортового проката»;
- магистрантов направления подготовки 15.04.01 «Машиностроение» при преподавании учебных дисциплин «Теория и основы проектирования машин обработки металлов давлением», «Эффективные способы выявления и анализа структуры и свойств металлов и сплавов».

Зав. кафедрой МиТОДиМ,  
д.т.н., профессор

С.И. Платов