

На правах рукописи



МАСЛЕННИКОВ КОНСТАНТИН БОРИСОВИЧ

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

Специальность 2.5.7. Технологии и машины обработки давлением

АВТОРЕФЕРАТ  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Магнитогорск – 2023

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Магнитогорский государственный технический университет им. Г. И. Носова»

Научный руководитель: **Платов Сергей Иосифович**,  
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты: **Хотинов Владислав Альфредович**,  
доктор технических наук, доцент, профессор  
кафедры Термообработки и физики металлов  
ФГАОУ ВО «Уральский федеральный  
университет имени первого Президента  
России Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург.

**Мунтин Александр Вадимович**,  
кандидат технических наук, директор  
инженерно-технологического центра АО  
«Выксунский металлургический завод»,  
г. Выкса.

Ведущая организация: ФГАОУ ВО «Московский политехнический университет», г. Москва

Защита состоится «21» декабря 2023 года в 15 часов 00 минут в ауд. 231 на заседании диссертационного совета 24.2.324.04 на базе ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова» по адресу: 455000, г. Магнитогорск, пр-т Ленина, 38.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова» и на сайте <http://www.magtu.ru>.

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2023 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета



Звягина Елена Юрьевна

**Актуальность работы.** Нефть и природный газ являются основными источниками энергии на текущий момент. Их залежи, как правило, расположены в отдалении от индустриальных регионов, являющихся основными потребителями энергоносителей. В следствие этого, актуальными для экономики РФ являются следующие, противоречащие друг другу, требования: повышение экономической эффективности транспортировки газа и обеспечение надежной и безопасной эксплуатации магистральных трубопроводов. В этой связи вопросы обеспечения высокой прочности труб при как можно более низкой себестоимости являются первостепенными.

Прочностные характеристики стального толстолистового трубного проката определяются его фазовым, структурным и тепловым состояниями в процессе и по завершению производства. Ключевой задачей в разработке новых технологий является выбор требуемых режимов контролируемой термомеханической обработки (КТМО), обеспечивающих достижение необходимого уровня физико-механических свойств. Одним из важнейших аспектов решения данных задач является применение различных методик прогнозирования прочностных свойств трубной заготовки на основе данных мониторинга и контроля технологического процесса производства проката.

**Степень разработанности проблемы.** 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., Горностырев Ю.Н., Кацнельсон М.И., Урцев В.Н., Лобанов М.Л., Мазур И.П., Шаталов Р.Л., Мунтин А.В., Яковлева И.Л., Шишов И.А., Хотинев В.А., Мирзаев Д.А., Разумов И.К., Дёма Р.Р., Чикишев Д.Н., Моллер А.Б., Лихтенштейн А.И.

Несмотря на высокий уровень науки и техники в данной области, многие аспекты моделирования формирования структурного состояния и изменения теплового поля проката продолжают быть актуальными и нуждаются в дальнейшем исследовании.

**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.

**Цель работы** – 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.

#### **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 послыоного теплового состояния раската 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.

#### **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  $A_3 \sim [880]^\circ\text{C} - A_1 \sim [700]^\circ\text{C}$ ;

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 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** 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 послыонного 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 раската и позволяющая настраивать подачу охладителя по ширине раската при УО.

**Апробация работы.** 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 сталях 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.).

**Реализация результатов работы.** Результаты работы использована при выполнении НИРиТР по теме «Разработка информационной системы прослеживаемости и идентификации комплекса потребительских свойств горячекатаного листа для электросварных прямошовных труб» по заказу ПАО «ММК».

**Методы исследований и достоверность результатов работы.** Исследование является комплексным, основывается на современных представлениях о физике технологического процесса и методах теплофизического и математического моделирования. Для решения поставленных задач использовано современное исследовательское и экспериментальное оборудование: световой инвертированный металлографический микроскоп Nikon EPIPHOT-TME, анализатор SIAMS 600, прибор синхронного термического анализа Netzsch STA 449C Jupiter и др. и др. Адекватность полученных экспериментальных данных подтверждена при помощи современной аттестованной аппаратуры. Достоверность работы основана на сопоставлении результатов теоретических исследований с данными протоколирования технологического процесса и аттестации физико-механических свойств готовой продукции ТЛС «5000» ПАО «ММК».

**Личный вклад автора** Личный вклад соискателя в работу заключается в проведении экспериментальных и теоретических исследований, направленных на:

1) разработку алгоритма расчёта распределения температуры по толщине горячекатаного трубного проката после реверсивной прокатки и ускоренного охлаждения;

2) получение новых зависимостей, описывающих изменение коэффициента теплоёмкости от температуры при горячей деформации и последующем охлаждении;

3) уточнение математической модели, позволяющей в определенном диапазоне температур прогнозировать значения механических свойств трубного проката.

**Публикации.** По материалам диссертации опубликовано 30 печатных работ в научно-технических изданиях, из них 6 работ - в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК, 6 статей - в журналах, индексируемых в международных наукометрических базах данных Scopus и Web of Science.

**Объем и структура работы.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и приложений. Объем работы составляет 158 страниц машинописного текста, содержит 49 иллюстраций, 28 таблиц, 4 приложения, объем библиографического списка составляет 136 наименования.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** раскрыта актуальность, цель, сформулированы задачи, научная новизна и практическая значимость диссертационной работы.

**В первой главе** приведен подробный обзор работ по технологическому процессу и оборудованию, задействованному при КТМО целевого проката. Кроме того, приведен обзор современных подходов к моделированию процессов КТМО и раскрыта степень проработанности вопроса.

**Во второй главе** описан анализ теплового состояния раската на технологической линии ТЛС, а также описаны принципы построения теплофизической модели распределения температур по толщине раската после реверсивной горячей прокатки и УО.

Рассматриваемый технологический процесс заключается в нагреве сляба до целевых температур (1150–1200 °С), двухфазной контролируемой реверсивной прокатке с выдержкой раската на рольганге между фазами и последующим ускоренным охлаждением в установках спрейерного и ламинарного охлаждения.

Для анализа теплового состояния, адаптации и верификации теплофизической модели были проведены предварительные промышленные эксперименты: опытные КТМО слябов с химическим составом (Таблица 1) по 5 режимам (Таблица 2).

Таблица 1 – Химический состав стали при опытных прокатках, 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

Режим деформации соответствовал целям исследования в части минимизации динамической рекристаллизации.

Таблица 2 – Технологические режимы опытных прокаток

№ режима	Обжатия в черновой фазе, %		Обжатия в чистой фазе, %		Температура конца прокатки, °С	Скорость раската при УО, м/с
	min	max	min	max		
1	5	20	7	15	922	1,9
2	5	20	7	15	844	1,9
3	5	20	7	15	838	1,0
4	5	20	7	15	760	1,9
5	5	20	7	15	770	1,0

*Анализ и моделирование тепловых процессов* на технологической линии ТЛС базировались на существующих представлениях о тепловом балансе заготовки (теплопотери, деформационный разогрев, тепловой эффект распада аустенита).

*Для определения радиационных теплопотерь* использовалось уравнение Стефана–Больцмана с граничными условиями 2-го рода.

*Конвективные теплопотери* определялись на основе числа Нуссельта и граничных условия 3-го рода.

Кондуктивные теплопотери определялись классической зависимостью на основе расчётного градиента температуры в заготовке. Для теплопотерь при контакте раската с роликми рольганга и валками были приняты граничные условия 2-го рода.

Основные потери тепла раската происходят при контакте с водой в струйных устройствах – прежде всего, установке ускоренного охлаждения.

В этом случае мощность теплоотвода выражается формулой:

$$W_1 = k \cdot g \cdot (c\Delta T_B + \delta) = \frac{G}{S(c\Delta T_E + \delta)}, \quad (1)$$

где  $W$  – удельная мощность теплоотвода, Вт/м<sup>2</sup>;  $g$  – удельный расход воды кг/м<sup>2</sup>;  $G$  – абсолютный расход воды в струе, кг/с;  $S$  – площадь пятна контакта, м<sup>2</sup>;  $k$  – доля испаренной воды от общего расхода;  $c$  – теплоемкость воды, Дж/(кг·°К);  $\Delta T_B$  – разность начальной температуры воды и температуры кипения, °К;  $\delta$  – удельная теплота испарения воды Дж/кг.

При этом возникает кондуктивный приток тепла из глубины металла:

$$W_2 = \lambda \frac{\Delta T_m}{\Delta x}, \quad (2)$$

где  $\Delta T_m$  – разность начальной и текущей температуры поверхности раската, °К;  $\Delta x$  – глубина проникновения тепловой волны, м;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·°К).

В том случае, когда попадающая на поверхность вода не успевает выкипать ( $W_1 > W_2$ ) полностью, температура поверхности стабилизируется на 100 °С и применимы граничные условия 1-го рода.

Если  $W_1 \leq W_2$ , то граничные условия первого рода становятся не применимыми. В этом случае с поверхности снимается пропорциональное расходу количество тепла, используются граничные условия второго рода.

Расчёты показали, что в установке УО происходят максимальные теплопотери, при этом  $W_1 > W_2$ . Вследствие чего, для этого участка были приняты граничные условия 1-го рода.

Деформационный разогрев является следствием работы сил внутреннего трения в системе полоса – валок, которые с точностью до КПД механизмов клетки равны механической мощности главного привода. Механическая мощность определяется либо по электрической мощности привода, либо по его моменту и угловой скорости.

При этом деформационный разогрев единичного участка длины раската (Рисунок 1) окажется сопоставим с зависимостью следующего вида:

$$\Delta T \sim \frac{\eta M}{Rwhc\rho}, \quad (3)$$

где  $\eta$  – КПД механизма клетки;  $M$  – момент на валу привода, Н·м.;  $R$  – радиус рабочего вала, м,  $w$  – ширина полосы,  $h$  – толщина заката после обжатия.

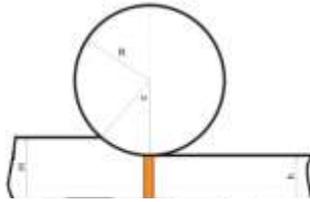


Рисунок 1 – Выделение единичного участка длины раската

Считая КПД привода равным 0,75, затраченная мощность составляет 33,5 МВт. Расход металла через клеть равен ~ 4700 кг/с. При теплоемкости металла равной 623 Дж/(кг·°К), получаем оценку величины разогрева, не превышающую 11,8 °С на проход.

Также для расчётов теплового состояния раската требуются значения *истинного коэффициента теплоёмкости исследуемой стали и величины теплового эффекта распада аустенита в диапазоне температур  $A_3$ – $A_1$* . Для определения данных параметров потребовался ряд дополнительных эмпирических исследований.

Образцы отбирались от раскатов, полученных при предварительных промышленных экспериментах (Таблицы 1, 2). Эмпирическое определение критических температур  $A_3$  и  $A_1$  осуществлялось dilatометрическим методом как места отрывов касательных, проведенных к прямолинейным участкам кривых (Рисунок 2).

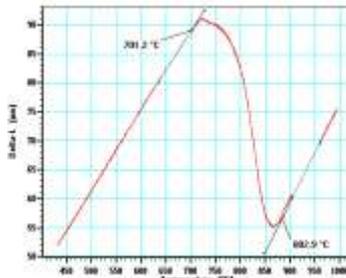


Рисунок 2 – Определение критических температур при нагреве исследуемой стали по dilatометрическим данным

Критические температуры составили:  $A_1 \sim 700$  °С,  $A_3 \sim 880$  °С. Данные температуры были применены при определении теплового эффекта распада аустенита в качестве опорных значений для анализа кривых теплоёмкости.

Определение теплоёмкости стали и теплового эффекта распада аустенита были произведены методом дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК). Оборудование и условия эксперимента соответствовали рекомендациям стандартов ASTM A1033-18 и ASTM E1269-11.

Реализовывались идентичные тепловые циклы с записью сигнала ДСК пустой системы, сапфира (эталоны) и исследуемого образца. Расчет теплоемкости выполнялся методом, рекомендованным производителем оборудования, по следующей формуле:

$$C_p^{\text{обр}} = \frac{m_{\text{эт}}}{m_{\text{обр}}} \cdot \frac{\text{ДСК}_{\text{обр}} - \text{ДСК}_{\text{баз}}}{\text{ДСК}_{\text{эт}} - \text{ДСК}_{\text{баз}}} \cdot C_p^{\text{эт}} \quad (4)$$

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;  $\text{ДСК}_{\text{обр}}$  – значение сигнала ДСК при данной температуре, зарегистрированное для образца, мкВ;  $\text{ДСК}_{\text{баз}}$  – значение сигнала ДСК (ДТА) при данной температуре, зарегистрированное для пустой системы, мкВ;  $\text{ДСК}_{\text{эт}}$  – значение сигнала ДСК (ДТА) при данной температуре, зарегистрированное для сапфира, мкВ;  $C_p^{\text{эт}}$  – теплоемкость сапфира, Дж/(г·К), значения предоставлены производителем оборудования, для промежуточных температур значения интерполировались.

Результаты расчётов теплоёмкости для первого цикла нагрева-охлаждения приведены на Рисунок 3(а).

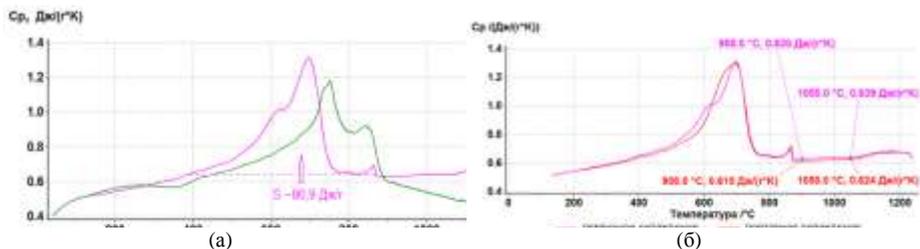


Рисунок 3 – Теплоемкость стали: а – при первом цикле нагрева и охлаждения; б – сравнение первого и второго цикла охлаждения

Первый асимметричный экстремум при нагреве (максимум при температуре  $\sim 750$  °С), по-видимому, связан с одновременным протеканием рекристаллизационных процессов и образованием аустенита. Следующий тепловой эффект в интервале температур 800–900 °С (максимум при температуре  $\sim 850$  °С), очевидно, связан с образованием аустенита.

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

При охлаждении образца на кривой изменения теплоемкости при температурах  $\sim 880$ –400 °С фиксируется тепловой эффект, характеризующийся интенсивным выделением тепла, который, по-видимому, является следствием фазового превращения. По площади отклонения кривой от горизонтали, взятой от точки  $A_1$  (Рисунок 3(а)) получена суммарная величина теплового эффекта  $\gamma \rightarrow \alpha$  превращения. Она составила  $\sim 87$  Дж/г.

На Рисунок 3(б) представлено сопоставление кривых изменения теплоёмкости после первичного и повторного нагрева. Поведения кривых схожи, разница между тепловыми эффектами оказалась не значительна.

На основе кривых теплоёмкости были построены аппроксимирующие уравнения. Наилучшие коэффициенты детерминации ( $R^2$ ) получены при разбиении кривой на 2 части по оси абсцисс:

$$C_p = 0,0007T^3 - 0,0129T^2 + 0,0897T + 0,3251, \quad (5)$$

$$C_p = -0,0003T^5 + 0,0088T^4 - 0,113T^3 + 0,6809T^2 - 1,9138T + 2,6381, \quad (6)$$

где  $C_p$  – теплоёмкость стали, Дж/(г·К),  $t$  – температура стали, °С; для  $t \leq 700$  °С (5) и  $t > 700$  °С (6).

Данные уравнения и значение теплового эффекта распада аустенита применены при создании теплофизической модели послойного теплового состояния раската на линии ТЛС.

*Базовый алгоритм работы модели* основан на решении уравнения теплового баланса, получаемого применением соотношения Остроградского к энтальпии некоторого объема исследуемого тела. Изменение энтальпии рассчитывается с учётом зависимости теплоемкости от температуры  $C_p(T)$  при постоянном давлении. Считая объем достаточно малым для того, чтобы условия внутри него были постоянными, получаем уравнение теплового баланса:

$$q(t - t_0) = C_p(T)m(T - T_0), \quad (7)$$

где  $q$  – мощность теплового потока на поверхности;  $t$  – время;  $m$  – масса;  $C_p(T)$  – удельная теплоемкость металла.

Применение интегральной формы обеспечивает формирование численной схемы решения. Для решения задачи теплопроводности выбран разностный метод, который заключается в разбиении тела на элементарные ячейки, размер которых позволяет считать внутри них однородными все теплофизические характеристики. Расчет температуры ячейки осуществляется с использованием уравнения теплового баланса:

$$T' = \frac{\sum_{i=0}^n q_i t}{c_v(T)m} + T, \quad (8)$$

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.

На Рисунках 4–5 приведены некоторые результаты расчётов послойных траекторий охлаждения раската на различных участках ТЛС.

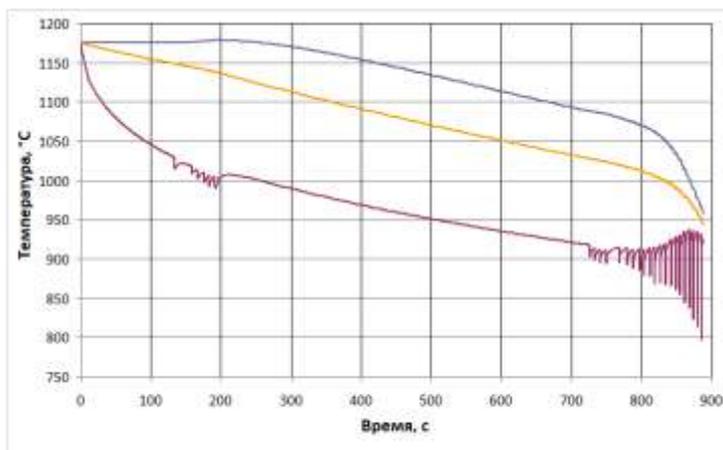


Рисунок 4 – Расчётные траектории охлаждения раската по режиму 1 от выгрузки из печи до чистовой прокатки

Рисунок 4 иллюстрирует динамику изменения температуры металла в процессе прокатки с учетом энерговыделения при пластической деформации, соответствующей режиму 1. Рисунок 3 иллюстрирует возможности модели с точки зрения расчёта траекторий ускоренного охлаждения.

Рисунок 5(а) демонстрирует то, что до начала ускоренного охлаждения перепад температуры по толщине металла невелик и составляет ~ 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 температур центральных слоёв.

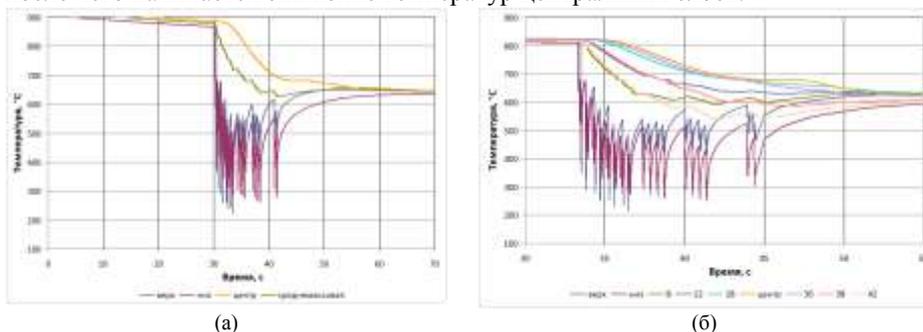


Рисунок 5 – Расчётные траектории ускоренного охлаждения раската:  
а – по режиму 1; б – по режиму 3

На Рисунке 5(б) приведены результаты расчёта по режиму 3, отличающемуся более низкой скоростью транспортировки раската в установке УО. Очевидно «размывание» тепловой волны по мере продвижения ее в глубину металла.

Результаты расчётов послойного теплового состояния используются для прогноза значений физико-механических свойств.

**В третьей главе** описана математическая модель прогнозирования физико-механических свойств. Для построения модели использовались данные как расчётные, так и фактические по ~ 26 000 раскатов. Наилучшее качество прогноза получено с помощью регрессионного моделирования. Всего использовано 123 независимые переменные, вариативность некоторых из них приведена в Таблице 3.

Таблица 3. Вариативность независимых переменных

Параметр	Минимум	Максимум	Среднее значение
Температура конца прокатки, °С	666	878	816.5
Толщина, мм	11	33.4	18.9
Скорость раската при УО, м/с	0.99	2.37	1.80
Температура на выходе из УО, °С	410	610	540.2
C, масс. %	0.0492	0.17	0.0709
Si, масс. %	0.02	0.64	0.2225
Mn, масс. %	0.63	1.8	1.6601
S, масс. %	0.001	0.007	0.0021
Cr, масс. %	0.0194	0.2	0.0388
Ni, масс. %	0.01	0.27	0.1604
Ti, масс. %	0.0045	0.029	0.0209
V, масс. %	0.001	0.02	0.0038

Nb, масс. %	0.0162	0.085	0.0505
-------------	--------	-------	--------

Особенности частных массивов данных позволили составить уравнения для 12 физико-механических свойств:

1) твёрдость по Виккерсу ( $\Delta_{abc}=\pm 0,23$ ,  $\Delta_{отн}=\pm 2,4$  %,  $R_m=0,64$ ,  $F = 29$  при  $F_{обр} = 1,12$ );

2) ударная вязкость при температуре  $-20$  °C с V-образным концентратором ( $\Delta_{abc}=\pm 19,01$  Дж/см<sup>2</sup>,  $\Delta_{отн}=\pm 5,8$  %,  $R_m=0,72$ ,  $F = 6,8$  при  $F_{обр} = 1,12$ );

3) доля вязкой составляющей при испытаниях падающим грузом при температуре  $-20$ °C ( $\Delta_{abc}=\pm 1,95$  %,  $\Delta_{отн}=\pm 2,05$  %,  $R_m=0,69$ ,  $F = 23$  при  $F_{обр} = 1,12$ );

4) временное сопротивление разрушению на поперечных образцах ( $\Delta_{abc}=\pm 10,61$  Н/мм<sup>2</sup>,  $\Delta_{отн}=\pm 1,7$  %,  $R_m=0,65$ ,  $F = 31$  при  $F_{обр} = 1,12$ );

5) предел текучести на поперечных образцах ( $\Delta_{abc}=\pm 11,8$  Н/мм<sup>2</sup>,  $\Delta_{отн}=\pm 2,1$  %,  $R_m=0,53$ ,  $F = 9,4$  при  $F_{обр} = 1,13$ );

6) предел текучести на продольных образцах ( $\Delta_{abc}=\pm 11,3$  Н/мм<sup>2</sup>,  $\Delta_{отн}=\pm 2,1$  %,  $R_m=0,49$ ,  $F = 9,7$  при  $F_{обр} = 1,13$ );

7) отношение предела текучести к временному сопротивлению на продольных образцах ( $\Delta_{abc}=\pm 0,012$ ,  $\Delta_{отн}=\pm 1,42$  %,  $R_m=0,75$ ,  $F = 23,3$  при  $F_{обр} = 1,13$ );

8) отношение предела текучести к временному сопротивлению на поперечных образцах ( $\Delta_{abc}=\pm 0,012$ ,  $\Delta_{отн}=\pm 1,4$  %,  $R_m=0,74$ ,  $F = 26,5$  при  $F_{обр} = 1,13$ );

9) отношение условного (0,5) предела текучести к временному сопротивлению на продольных образцах ( $\Delta_{abc}=\pm 0,01$ ,  $\Delta_{отн}=\pm 1,03$  %,  $R_m=0,62$ ,  $F = 21,6$  при  $F_{обр} = 1,12$ );

10) отношение условного (0,5) предела текучести к временному сопротивлению на поперечных образцах ( $\Delta_{abc}=\pm 0,01$ ,  $\Delta_{отн}=\pm 1,08$  %,  $R_m=0,64$ ,  $F = 20,8$  при  $F_{обр} = 1,12$ );

11) балл зерна феррита минимальный ( $\Delta_{abc}=\pm 0,22$ ,  $\Delta_{отн}=\pm 2,04$  %,  $R_m=0,65$ ,  $F = 17,9$  при  $F_{обр} = 1,12$ );

12) балл зерна феррита максимальный ( $\Delta_{abc}=\pm 0,23$ ,  $\Delta_{отн}=\pm 2,4$  %,  $R_m=0,64$ ,  $F = 17,9$  при  $F_{обр} = 1,12$ ).

Таким образом, средняя относительная погрешность составила 1,03–5,81 %, коэффициенты множественные корреляции составили 0,49–0,79. Распределения остатков для всех указанных уравнений близки к нормальным и имеют незначительную асимметричность.

Данная модель была реализована и внедрена в рамках программного комплекса прогнозирования физико-механических свойств трубного проката. Пользовательский интерфейс представлен на Рисунке 6.



Рисунок 6 – ПО прогнозирования физико-механических свойств (выделенная область – результаты расчета)

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

Базовые расчёты на фактических значениях параметров осуществляются автоматически в темпе с производством и поступлением данных в информационные системы ПАО «ММК».

**В четвёртой главе** описаны технологические и технические рекомендации по совершенствованию КТМО трубного проката на ТЛС «5000».

С использованием ПО прогнозирования физико-механических свойств проведен вычислительный эксперимент по варьированию ряда технологических параметров производства проката толщиной 26 мм. Наибольший прирост пределов текучести, доли вязкой составляющей при ИПГ и баллов зерна при минимальном приросте отношений пределов текучести к временному сопротивлению получен при параметрах, приведённых в Таблице 4.

Таблица 4 – Предлагаемые параметры технологического режима

Параметр	Значение
Температура под прокатку, °С	1180
Температура начала черновой прокатки, °С	1050
Температура конца черновой прокатки, °С	1010
Максимальное относительное обжатие в черновой фазе, %	20
Толщина раската после черновой фазы, мм	100
Температура раската в начале чистой фазы, °С	860
Температура конца прокатки, °С	840
Максимальное относительное обжатие в чистой фазе, %	15
Температура проката на входе в линию ускоренного охлаждения, °С	835
Скорость транспортировки раската 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 нижних ламинарных коллекторов №№ 1-7, л/м <sup>2</sup> ×мин.	1480

Соответствующие расчётные значения физико-механических свойств проката для данного режима в сравнении со свойствами, получаемыми при базовом используемом на ТЛС режиме приведены в Таблице 5.

Таблица 5 – Расчётные значения физико-механических свойств

Свойство	Тек. реж.	Реком. реж.	$\Delta_{отн}, \%$
Балл зерна феррита минимальный	8	9	12,50
Балл зерна феррита максимальный	7	8	14,29
Твёрдость по Виккерсу, ед.	208	231	11,06
Ударная вязкость при температуре $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ с V-образным концентратором, Дж/см <sup>2</sup>	318	321	0,94
Предел текучести на продольных образцах, Н/мм <sup>2</sup>	508	518	1,97
Предел текучести на поперечных образцах, Н/мм <sup>2</sup>	543	554	2,03
Временное сопротивление на поперечных образцах, Н/мм <sup>2</sup>	606	607	0,17
Отношение предела текучести к временному сопротивлению на поперечных образцах	0,9	0,9	0,00
Отношение предела текучести к временному сопротивлению на продольных образцах	0,88	0,9	2,27
Отношение условного (0,5) предела текучести к временному сопротивлению на продольных образцах	0,88	0,88	0,00
Отношение условного (0,5) предела текучести к временному сопротивлению на поперечных образцах	0,87	0,88	1,15
Доля вязкой составляющей при ИПГ при температуре $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ , %	91	98	7,69

На Рисунке 7 изображена схема расположения пирометров на рольганге участка УО ТЛС «5000» ПО «ММК». Следует отметить, что на входе в установку используется спаренный пирометр с рабочим диапазоном измерения температуры 600–1600 °С, установленный по центру рольганга.

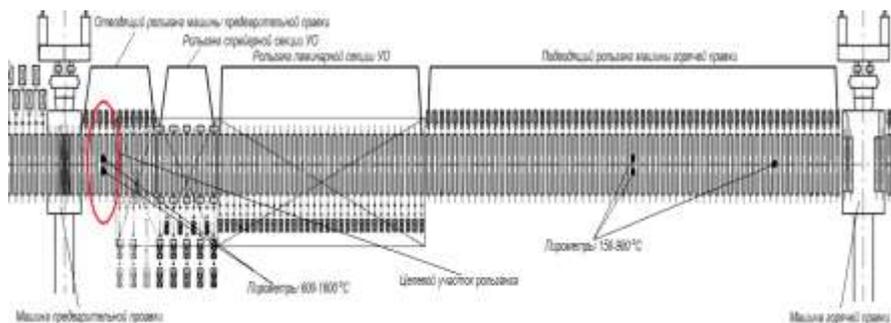


Рисунок 7 – Схема расположения пирометров на участке УО ТЛС «5000»

Данная схема пирометрии ограничивает возможности использования моделей расчётов теплового состояния и физико-механических свойств одной центральной «осью расчёта».

В случае возможности подачи на вход модели ряда значений температуры входа в УО по ширине (Рисунок 8), появляется возможность получения картины соответствующего распределения температуры и физико-механических свойств.

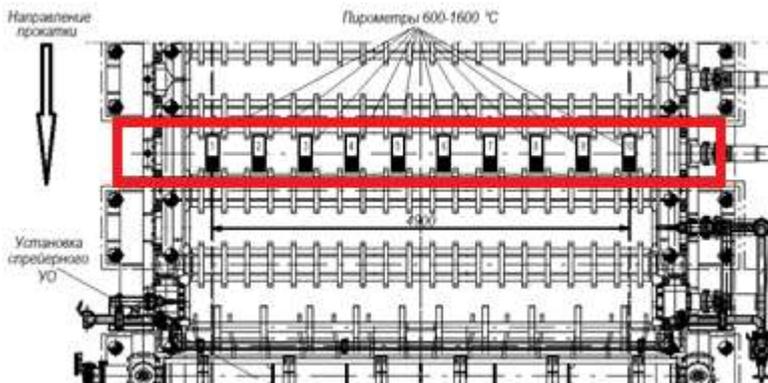


Рисунок 8 – Предлагаемая схема расположения расширенного набора пирометров на отводящем роллганге машины предварительной прокатки

Практика расчётов показывает правдоподобный отклик моделей на варьирование входной температуры проката.

С применением теплофизической модели были осуществлены расчёты распределения температуры проката по ширине на различных этапах производства. На Рисунке 9 приведён пример данного распределения для края раската шириной 600 мм, выдержанного на роллганге. Время остывания соответствует максимальной выдержке полосы во время опытных прокаток.

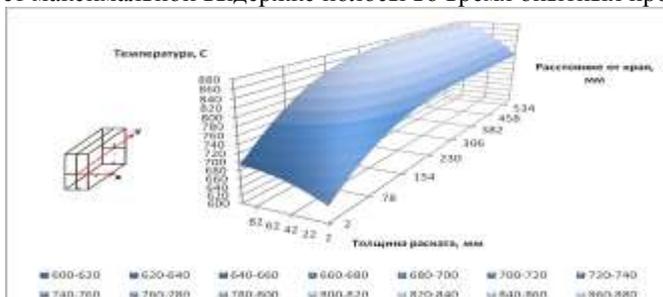


Рисунок 9 – Распределение температуры по толщине на краю проката через 1800 с «подсуживания» после черновой прокатки – режим № 1

Из рисунка виден заметный градиент температуры по ширине исследуемого участка заготовки. Тепловое состояние проката, включающее область критических температур  $A_3-A_1$ , свидетельствует о высокой вероятности формирования структурной неоднородности проката после УО, в особенности в области кромок, что может негативно влиять на рост внутренних напряжений раската. Рост внутренних напряжений, в свою очередь, способен влиять на конечную плоскостность трубной заготовки.

Минимизировать структурную неоднородность можно путём управления тепловым полем проката посредством регулирования подачи охладителя на линии ламинарного охлаждения по ширине согласно схеме, приведённой на Рисунке 10.

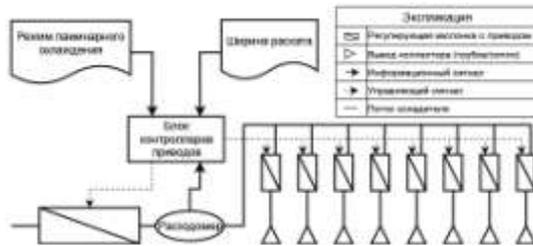


Рисунок 10 – Концептуальная схема рекомендованной системы контроля ламинарного охлаждения

Использование данной системы предоставляет возможность ограничить либо полностью перекрыть подачу охладителя на определённые участки проката, тем самым регулируя теплоотвод от соответствующих областей заготовки.

Схема конструкции выпускной трубки с регулирующей заслонкой приведена на Рисунке 11. При ограничении либо полном прекращении подачи охладителя через ряд трубок предлагается корректировать суммарный расход охладителя на коллектор в соответствии с законом Бернулли. Общее снижение давления в коллекторе позволит частично компенсировать снижение пропускной способности части выпускных трубок. 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.

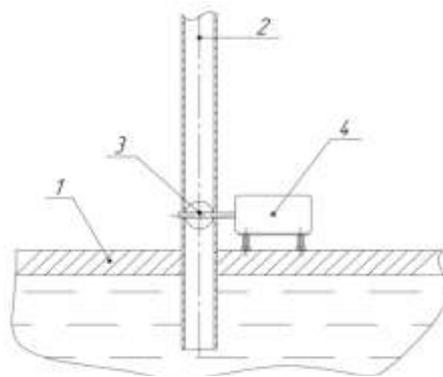


Рисунок 11 – Схема конструкции выпускной трубки с регулируемой дроссельной заслонкой: 1 – корпус коллектора; 2 – выпускная трубка; 3 – дроссельная заслонка; 4 – сервопривод

Трубки с заслонками целесообразно устанавливать по краям коллектора, покрывая ширину прикормочных областей производимых сортаментов.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ ПО РАБОТЕ

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.

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

2. Проведена ДСК образцов проката, полученного при промышленных экспериментах, с целью определения теплоёмкости стали требуемой химической композиции и теплового эффекта распада аустенита. Эмпирически определены характерные значения критических температур  $A_1$  и  $A_3$  для исследуемой химической композиции стали. Значение  $A_1$  определено  $\sim 700$  °С, значение  $A_3$  определено  $\sim 880$  °С. 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 послыонного теплового состояния  $\sim 30000$  единиц проката, произведенного на ТЛС «5000». На основании данных пирометрии АСУТП произведена проверка сходимости модели. Средняя погрешность расчёта составила 13,7 %.

3. На основании данных о распределении температуры по толщине раската 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 механических испытаний проката. Проверка сходимости модели путем сравнения прогнозных и фактических значений механических свойств показала, что средняя арифметическая относительная погрешность расчета составила от  $\pm 1,03$  до  $\pm 5,81$  %.

4. С целью обеспечения применимости указанных моделей в производственном процессе разработано ПО, реализующее расчет теплового состояния заготовки и прогнозирование механических свойств на основании распределения температуры по толщине проката после горячей прокатки и УО. ПО внедрено в промышленную эксплуатацию. На основании расчётов 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 механических свойств с применением ПО прогнозирования предложена схема совершенствования системы КИП ТЛС «5000», заключающаяся в расширении пирометрического контроля раската на входе в установку УО. С применением ПО прогнозирования механических свойств появляются перспективы повышения управляемости тепловым полем раската. 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 механических свойств горячекатаного листа для электросварных прямошовных труб» по заказу ПАО «ММК». Материалы данного исследования использованы в учебном процессе на кафедре «Машины и технологии обработки давлением и машиностроения» при преподавании ряда дисциплин.

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

### **Основные материалы диссертации опубликованы в следующих работах:**

*Статьи, опубликованные, в ведущих рецензируемых научных журналах изданиях, рекомендованных ВАК РФ*

1. Платов С.И., Особенности прогнозирования микроструктуры при производстве толстолистового трубного проката / С.И. Платов, **К.Б. Масленников**, В.Л. Корнилов, В.А. Некит, Н.В. Урцев // Производство проката. – 2019. – № 11. – С. 6–12.

2. 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.

3. Некит В.А., Изменение свойств трубной стали в зависимости от условий прокатки на толстолистовом стане / В.А. Некит, С.И. Платов, М.Л. Краснов, В.С. Славин, **К.Б. Масленников** // Сталь. – 2019. – № 4. – С. 36-38.

4. Платов С.И., Математическая модель процесса ускоренного охлаждения металла при толстолистовой горячей прокатке / С.И. Платов, С.М. Горбатюк, М.Л. Лобанов, **К.Б. Масленников**, Н.В. Урцев, Р.Р. Дема, Е.Ю. Звягина // Metallurg. – 2022. – № 4. – С. 89-93.

5. Лобанов М.Л., Влияние режимов контролируемой термомеханической обработки на структурно-текстурные состояния низкоуглеродистой низколегированной стали / М.Л. Лобанов, С.И. Платов, **К.Б. Масленников** [и др.] // Металловедение и термическая обработка металлов. – 2023. – № 8(818). – С. 27-35.

6. Platov, S.I., Mathematical model of the accelerated cooling of metal in thick-plate hot rolling / S.I. Platov, S.M. Gorbatyuk, **K.B. Maslennikov** [et al.] // Metallurgist. – 2022. – Vol. 66, No. 3-4. – P. 462-468.

7. 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.

8. Danilov, S.V., A study of steel grain structure after TMCP by orientation microscopy / S.V. Danilov, **K.B. Maslennikov**, N.V. Urtsev, N.N. Nikul'chenkov, M.L. Lobanov // AIP Conference Proceedings Mechanics, resource and diagnostics of materials and structures. – 2020. – Vol. 2315. – P. 050003.

9. Danilov, S.V., Influence of structural and textural states of low-carbon steels on the cracking resistance of tube products / S.V. Danilov, N.V. Urtsev, **K.B. Maslennikov**, V.N. Urtsev, M.L. Lobanov // AIP Conference Proceedings Mechanics, resource and diagnostics of materials and structures. – 2020. – Vol. 2315. – P. 030006.

10. Platov, S.I., Investigation of the structural state of pipe steel during thermo mechanical processing / S.I. Platov, V.A. Nekit, V.N. Urtsev, **K.B. Maslennikov** // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2020. – Vol. 971. – P. 022072.

11. 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

12. Platov, S.I., Forecasting the Microstructure of a Microalloyed Steel Plate Strip / S.I. Platov, **K.B. Maslennikov**, N.V. Urtsev // Solid State Phenomena. – 2021. – Vol. 316. – P. 306-312.

*Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ:*

13. 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; опубл. 24.09.2020. – 1 с.

*Публикации в других изданиях*

14. Платов, С. И. Технология прогнозирования прочностных характеристик при производстве толстолистового трубного проката / С. И. Платов, **К. Б. Масленников**, М. Л. Лобанов // Перспективные материалы и технологии : в 2 томах / под. ред. Рубаника В.В. Том 2. – Витебск : Витебский государственный технологический университет, 2019. – С. 67-86.

15. Платов, С.И., Влияние параметров термомеханической обработки на микроструктуру тостолистового трубного проката / С.И. Платов, **К.Б. Масленников**, М.Л. Лобанов // Перспективные материалы и технологии: Сборник материалов международного симпозиума, Брест, 27–31 мая 2019 года /

Под общей редакцией В.В. Рубаника. – Брест: Витебский государственный технологический университет, 2019. – С. 516-517.

16. Платов, С.И., Структурообразование в микролегированном трубном прокате на технологической линии современного толстолистового стана / С.И. Платов, **К.Б. Масленников**, Н.В. Урцев // Актуальные проблемы прочности; под ред. В.В. Рубаника. – Молодечно. – 2020. – С. 434-448.

17. Платов, С.И., Совершенствование технологии и оборудования толстолистового стана 5000 на основе автоматизированного прогнозирования микроструктуры / С.И. Платов, **К.Б. Масленников**, Е.Ю. Звягина, Д.В. Терентьев, Р.Р. Дёма, Р.Н. Амиров // Современные проблемы и перспективы развития науки, техники и образования: материалы I Нац. науч.-практ. конф. (Магнитогорск, 30 ноября 2020г). – 2020. – С. 796-799.

18. Платов, С.И., Исследование влияния температурно-скоростных режимов горячей прокатки на возникновение дефекта "вкатанная окалина" / С.И. Платов, Р.Р. Дема, О.Р. Латыпов, **К.Б. Масленников** [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. 941–944.

19. Структурообразование при термомеханической обработке микролегированного трубного проката / С.И. Платов, **К.Б. Масленников**, М.Л. Лобанов, Е.С. Шеметова // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования: тезисы докладов 78-й Междунар. науч.-техн. конф. (Магнитогорск, 20-24 апреля 2020 г). – Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова. – 2020. – С. 238.

20. Дегтярев, В.Н., Адаптация структурообразования для производства трубной марки стали К60 в потоке ТЛС / В.Н. Дегтярев, **К.Б. Масленников**, С.И. Платов, Н.В. Урцев, Е.Д. Мокшин // Прочность неоднородных структур - ПРОСТ 2020/2021: сб. тр. X-ой Евразийской научно-практической конференции (20-22 апреля 2021 г.). – Магнитогорск. – С. 60.

21. 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.

22. Платов, С.И., Математическая модель процесса ускоренного охлаждения металла при толстолистовой горячей прокатке / С.И. Платов, **К.Б. Масленников**, Р.Р. Дема [и др.] // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования: Тезисы докладов 79-й международной научно-технической конференции, Магнитогорск, 19–23 апреля 2021 года. Том 1. – Магнитогорск: Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, 2021. – С. 170.

23. 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. – Р. 105–106.

24. 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.

25. 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.

26. Дегтярев, В. Н., Исследование влияния структуры стали 06Г2МБ, формирующейся при контролируемой термомеханической прокатке, на трещиностойкость / В.Н. Дегтярев, Н.В. Урцев, А.В. Шмаков, **К.Б. Масленников**, Е.Д. Мокшин // 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.

27. **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. Bانشchikov; R.R. Dema // AIP Conference Proceedings Mechanics, resource and diagnostics of materials and structures. – 2022. – Vol. 2503. – P. 070012.