

На правах рукописи



Алексеев Даниил Юрьевич

**РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ШИРОКОПОЛОСНОЙ
ГОРЯЧЕЙ ПРОКАТКИ ВЫСОКОПРОЧНОЙ СТАЛИ
ДЛЯ ГИБКИХ НАСОСНО-КОМПРЕССОРНЫХ ТРУБ**

Специальность 2.6.4. Обработка металлов давлением

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Магнитогорск – 2024

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

Научный руководит

доктор технических наук, доцент
Полецков Павел Петрович

Официальные оппоненты:

Сидельников Сергей Борисович
доктор технических наук,
ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет», профессор
кафедры «Обработка металлов давлением»

Корсаков Андрей Александрович
кандидат технических наук,
начальник отдела бесшовных труб
ООО «ИЦ ТМК»

Ведущая организация:

ФГАОУ ВО «Южно-Уральский
государственный университет»
(национальный исследовательский
университет)

Защита состоится 26 ноября 2024 г. в 15:00 на заседании диссертационного совета Д 24.2.324.01 на базе ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова» по адресу: 455000, г. Магнитогорск, проспект Ленина 38, малый актовый зал.

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

Автореферат разослан «__» _____ 2024 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

Мезин Игорь Юрьевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Наиболее перспективным способом разработки, освоения и текущего ремонта скважины является метод, основанный на применении длинномерных гибких насосно-компрессорных труб (ГНКТ), намотанных на барабан диаметром от 1500 мм. При этом ГНКТ может иметь длину до 8000 м при диаметре от 25,4 до 127,0 мм.

В процессе эксплуатации такая труба подвергается многократной пластической деформации при разматывании-наматывании на барабан и подаче в инжекторную головку, растяжению под собственным весом, а также высокому внутреннему давлению. Поэтому сталь, используемая при производстве ГНКТ, должна сочетать высокие прочностные и пластические свойства, обеспечивающие надежность трубы при многократных циклах нагружения. В соответствии с условиями эксплуатации ГНКТ могут производиться 5-ти групп прочности (по API 5ST), наиболее востребованной из которых является группа ST80 с диаметром трубы 38,1 и 44,5 мм ($\sigma_{0,2} = 550-620 \text{ Н/мм}^2$, $\sigma_b \geq 610 \text{ Н/мм}^2$, $A_{50} \geq 20\%$, $\text{HRC} < 22$). В качестве исходного сырья при производстве ГНКТ используют горячекатаный рулонный прокат из низколегированной высокопрочной стали. Поставщиками такого металлопроката для предприятий России являлись США и страны ЕС, импорт металлопродукции из которых в настоящее время невозможен.

Получение требуемого комплекса свойств для такого проката в условиях широкополосных станов является достаточно сложной задачей и возможно за счет применения регламентированного химического состава и формирования предпочтительной структуры стали путем деформации по технологии контролируемой прокатки с ускоренным охлаждением. При этом в процессе деформации и последующего охлаждения неизбежным является образование градиента температур по толщине металла, приводящего к неоднородности свойств. Данная особенность может ухудшать эксплуатационные характеристики ГНКТ и требует учета при разработке технологии производства проката. Кроме того, немаловажно иметь информацию о закономерности изменения механических свойств горячекатаного высокопрочного проката группы прочности ST80 в зависимости от основных параметров контролируемой прокатки и ускоренного охлаждения. Подобные данные для материала гибких насосно-компрессорных труб в литературных источниках отсутствуют. Все это делает вопрос разработки технологии производства горячекатаного рулонного проката для ГНКТ актуальным.

Степень разработанности темы исследования. Диссертационная работа представляет собой самостоятельное и логически завершенное научное исследование, являющееся обобщением научных и практических результатов исследований по вопросу разработки технологии термомеханической обработки (ТМО) рулонного проката, предназначенного для производства ГНКТ. Развитию научных основ ТМО посвящены работы Морозова Ю.Д., Настич С.Ю., Эфрона Л.И., Чикишева Д.Н., Салганика В.М., Мунтина А.В., Голи-Оглу Е.А., Соя С.В., Холодного А.А., Матросова Ю.И. и др. Исследованием теплового состояния и математическим описанием теплофизических процессов при прокатке занимались Татару А.С., Румянцев М.И., Зинягин А.Г., Шамаков А.В. и др.

Целью работы является разработка технологии получения импортозамещающего рулонного проката для производства гибких насосно-компрессорных труб группы прочности СТ80 на основе математического и физического моделирования температурных условий термомеханической обработки.

Для достижения поставленной цели были сформулированы следующие **задачи**:

1. Разработать математическую модель расчета температурного состояния по толщине металла в чистовой группе клетей и на отводящем роликотоме широкополосного стана горячей прокатки (ШСПП).

2. Путем физического моделирования процесса контролируемой прокатки и ускоренного охлаждения изучить влияние температурно-деформационных режимов на механические свойства проката.

3. Разработать рекомендации по режимам контролируемой прокатки и ускоренного охлаждения для промышленного освоения технологии производства высокопрочного рулонного проката группы прочности СТ80 для гибких насосно-компрессорных труб и внедрить их в условиях ШСПП 2000 ПАО «ММК».

Научная новизна и теоретическая значимость:

1. Разработана цифровая конечно-элементная модель расчета температурного состояния полосы по толщине, отличающаяся от известных блочной структурой и учетом технологических особенностей оборудования в части системы взаимодействия поверхность-воздух/вода.

2. Проведено комплексное исследование по определению реологических свойств, на основании которого впервые для стали группы прочности СТ80 получено уравнение зависимости сопротивления деформации от скорости и степени деформации в интервале температур горячей прокатки с разработкой методики расчета коэффициента теплоотдачи для системы взаимодействия поверхность-воздух/вода.

3. Получены новые научные знания о закономерности влияния режимов контролируемой прокатки и ускоренного охлаждения на микроструктуру и механические свойства высокопрочной горячекатаной низколегированной стали, предназначенной для производства ГНКТ группы прочности СТ80. Тип основной структурной составляющей и пластические свойства стали определяются температурой окончания чистовой стадии прокатки в соотношении с температурой начала аустенитного превраще-

ния. Установлено, что наилучшее сочетание прочностных и пластических свойств достигается при формировании феррито-бейнитной структуры путем термомеханической обработки стали с завершением деформации при температуре 890 °С с последующим ускоренным охлаждением до 520-550 °С.

Практическая значимость исследования заключается в разработке теоретически и экспериментально обоснованной стратегии производства рулонного проката, предназначенного для изготовления гибких насосно-компрессорных труб группы прочности СТ80:

1. Разработан алгоритм корректировки параметров чистовой прокатки и ускоренного охлаждения с использованием модели расчета температурного состояния для минимизации неоднородности структуры и механических свойств по толщине;

2. На основе разработанной стратегии предложена и опробована в условиях ШСГП 2000 ПАО «ММК» технология производства высокопрочного рулонного проката, обеспечившая соответствующий установленным требованиям для гибких насосно-компрессорных труб группы прочности СТ80 комплекс механических свойств: $\sigma_{0,2} = 580-600 \text{ Н/мм}^2$, $\sigma_b = 690-750 \text{ Н/мм}^2$, $A_{50} = 23-32\%$, $HRC < 22$).

Методы исследования. Исследование представляет комплекс работ с использованием методов математического и физического моделирования, а также промышленных экспериментов.

В качестве материалов для проведения исследования использовались опытные образцы из высокопрочной низколегированной стали группы прочности СТ80, выплавленной и подвергнутой термомеханической обработке в лабораторных условиях.

Исследование формируемого в процессе чистовой стадии деформации и на отводящем рольганге градиента температур по толщине проката осуществлялось методом конечно-элементного математического моделирования в программном комплексе DEFORM 3D.

Эксперименты по опытной прокатке в промышленных условиях осуществлялись на ШСГП 2000 во время проведения научно-исследовательских и технологических работ по заказу ПАО «ММК» (договор №238760 от 09.04.2019 г.).

Положения, выносимые на защиту:

1. Конечно-элементная модель расчета температурного состояния полосы по толщине на этапах прокатки в чистовой группе клетей и ускоренного охлаждения на отводящем рольганге ШСГП 2000 ПАО «ММК».

2. Реологическое уравнение для описания сопротивления стали группы прочности СТ80 в зависимости от скорости и степени деформации в интервале температур горячей прокатки.

3. Установленные закономерности влияния температурных режимов пластической деформации и последеформационного ускоренного охлаждения на микроструктуру и механические свойства высокопрочной стали для ГНКТ группы прочности СТ80.

4. Разработанная технология контролируемой прокатки и ускоренного охлаждения на ШСГП 2000 ПАО «ММК» проката, предназначенного для производства ГНКТ группы прочности СТ80.

5. Результаты освоения производства в условиях ШСГП 2000 ПАО «ММК» высокопрочного рулонного проката из стали группы прочности СТ80.

Достоверность результатов исследований подтверждена согласованностью результатов конечно-элементного и физического моделирования с результатами производства опытных партий рулонного проката в условиях стана 2000 широкополосной горячей прокатки ПАО «ММК». Работа выполнена с применением современных методов обработки данных и исследований на уникальном лабораторном оборудовании. Достоверность результатов механических испытаний обеспечивалась проведением работ в аккредитованной испытательной лаборатории ПАО «ММК» на поверенном оборудовании.

Личный вклад соискателя заключается в проведении комплекса теоретических и экспериментальных исследований, нацеленных на:

1. Создание конечно-элементной модели расчета температурного состояния полосы по толщине в процессе ТМО.

2. Разработку алгоритма корректировки параметров ТМО, позволяющего минимизировать неравномерность температурного состояния по толщине полосы.

3. Получение уравнения зависимости, характеризующего сопротивление стали деформации при горячей прокатке.

4. Изучение закономерностей изменения микроструктуры и механических свойств высокопрочной горячекатаной низколегированной стали для производства ГНКТ от параметров ТМО.

Апробация результатов работы. Основные результаты доложены и обсуждены на ряде конференций: международная молодежная научно-техническая конференция Magnitogorsk Rolling Practice (г. Магнитогорск, 2018, 2020 гг.), 78 и 79 Международные научно-технические конференции «Актуальные проблемы современной науки, техники и образования» (г. Магнитогорск, 2020, 2021 гг.), International Russian Conference on Materials Science and Metallurgical Technology (RusMetalCon 2022) (г. Сочи, 2022 г.), Международная научно-техническая конференция «ПромИнжиниринг-2022» (ICIE-2022) (г. Сочи, 2022 г.).

Публикации. Основные положения и результаты диссертационной работы представлены в 16 печатных работах, из них 7 – в рецензируемых изданиях из перечня ВАК РФ, 2 статьи – в изданиях, входящих в наукометрические базы данных Web of Science и Scopus.

Структура и объем диссертации. Общий объем диссертационной работы составляет 133 страницы. В её состав входит введение, четыре главы, список литературы и четыре приложения на 21 листе. В основной части диссертационная работа содержит 32 иллюстрации, 15 таблиц, 123 источника литературы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обозначена актуальность работы, определены цель и задачи исследований, сформулированы научная новизна и практическая значимость.

В первой главе на основании анализа литературных источников, а также требований отечественных и зарубежных производителей проанализированы и определены основные требования к высокопрочному рулонному прокату для гибких насосно-компрессорных труб группы прочности СТ80. Установлены способы производства проката и ключевые технологические факторы, способствующие формированию нормируемых свойств. На основе изложенного сформулированы цель и задачи диссертационной работы.

Во второй главе в программной среде DEFORM-3D разработана конечно-элементная модель расчета теплового состояния металла в процессе прокатки в чистовой группе клетей и охлаждении на отводящем рольганге стана 2000 широкополосной горячей прокатки ПАО «ММК».

Для учета формируемого в процессе пластической деформации градиента температур по толщине полосы учитывались потери тепла за счет излучения и конвективного теплообмена на воздухе и с водой (на участках межклетевого охлаждения), контакта с рабочими валками, а также разогрев полосы за счет энергии деформации.

Участки принудительного водяного охлаждения были поделены на зоны, характеризующиеся разными условиями теплообмена: зону интенсивного охлаждения с высоким коэффициентом теплоотдачи в области действия водяной струи и окружающую ее зону пленочного кипения, для которой характерно образование парового слоя, отделяющего поверхность металла от слоя воды.

При расчете изменения теплового состояния полосы в процессе ускоренного охлаждения на отводящем рольганге аналогично расчету для чистовой группы клетей учитывались участки естественного и принудительного охлаждения, определенные схемой включения секций. Интенсивность теплообмена на участках принудительного охлаждения рассчитывалась исходя из коэффициента теплоотдачи, уравнение которого имеет следующий вид:

$$\alpha_{y0} = k * l^{0.719} * \lambda_{в} * [v_{в} * (1 + 0,0337t_{в} + 0,000221t_{в}^2)]^{1,719} \theta^{0,964}$$

где k – эмпирический параметр; $\lambda_{в}$ – коэффициент теплопроводности воды; $v_{в}$ – скорость течения жидкости; l – характерный размер охлаждающего оборудования; $t_{в}$ – температура воды; θ – интенсивность теплоотдачи.

Реологические свойства исследуемой высокопрочной низколегированной стали группы прочности СТ80 при моделировании были заданы в виде кривых упрочнения в зависимости от температуры, скорости и степени деформации, полученных путем дилатометрических исследований с использованием комплекса Gleeble 3500. Результаты исследований были

обработаны с использованием методов математической статистики и представлены в виде регрессионного уравнения сопротивления стали пластической деформации:

$$\sigma_s = 51,88 u^{0,043} 10\varepsilon^{0,159} \left(\frac{T}{1000} \right)^{-3,875}$$

$$R^2=0,961; F_p=768; F_{0,95}=2,7$$

На примере прокатки полосы толщиной 4,4 мм получены характерные кривые изменения теплового профиля по толщине (рисунок 1).

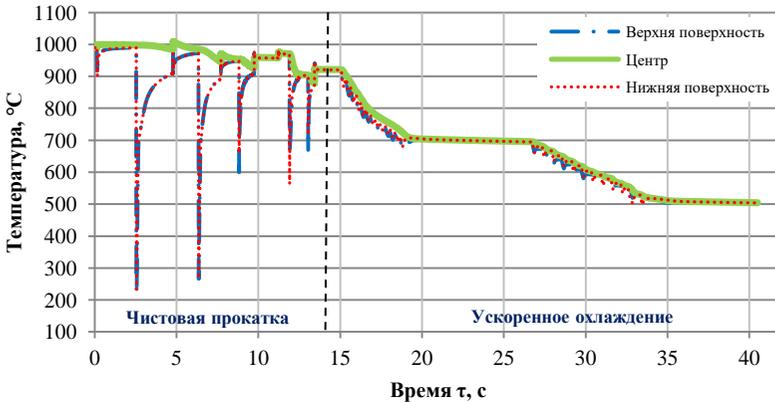
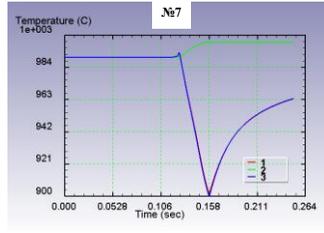
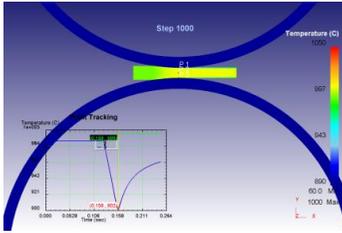


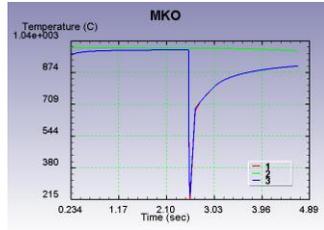
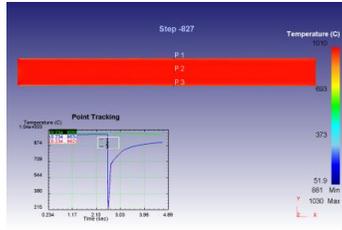
Рисунок 1 – Расчетные кривые изменения температуры по трем точкам сечения полосы на стадиях чистой прокатки и ускоренного охлаждения

Определено, что в процессе деформации происходит увеличение температуры центральных слоев металла (например в клети №7 на 6,3 °C, в клети №13 – на 48,0 °C.). При этом с каждым последующим проходом рост температуры становится более значительным за счет увеличения скорости деформации от 8,0 до 87,1 с⁻¹.

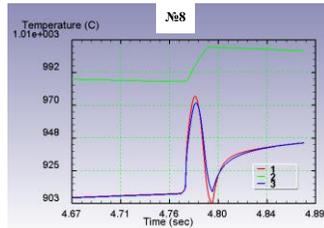
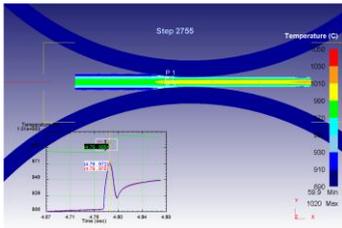
При обжатии в клети №7 в момент контакта металла с валком температура поверхности полосы снижается на 90 °C за 0,032 сек. Далее за счет температуры внутренних слоев, после выхода металла из очага деформации поверхностные слои разогреваются, и к моменту начала межклетевого охлаждения разность температур составляет 40 °C (рисунок 2, а). Последующее использование межклетевого охлаждения приводит к формированию значительного градиента температур между охлажденной поверхностью и центром заготовки – $\Delta T_{\max} \approx 890$ °C (рисунок 2, б), который частично сохраняется вплоть до входа металла в следующую клеть. Однако из-за достаточно малого времени взаимодействия воды с поверхностью металла (0,028 сек) глубина охлажденного слоя составила 0,12 мм.



a



б



в

Рисунок 2 – Кривые изменения температуры верхней (1), нижней (3) поверхностей и центра (2) заготовки в процессе: а – деформации в клети №7; б – охлаждения в МКО №7-№8; в – деформации в клети №8

При обжатии заготовки в следующей клети в рассматриваемом сечении одновременно с ростом температуры центра увеличивается и температура поверхностных слоев на $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ (рисунок 2, в). Максимуму на кривой изменения температуры соответствует максимальное значение скорости деформации (около 26 c^{-1}). Далее, с уменьшением скорости деформации и за счет теплоотдачи рабочему валку температура поверхности снижается. На выходе из очага деформации клети №8 разность температур между поверхностью и центром составляет около $96\text{ }^{\circ}\text{C}$. Изменение температурного профиля в последующих проходах имеет аналогичный характер.

После выхода полосы из последней катающей клети до входа в первую секцию УУО теплоотдача с поверхности металла осуществляется только за счет теплообмена на воздухе, что способствует выравниваю градиента температур по сечению. При моделировании прокатки полосы толщиной 20 мм получено, что к моменту входа в УУО $\Delta T=7\text{ }^{\circ}\text{C}$, а при прокатке полосы толщиной $4,4\text{ мм}$ $\Delta T=0,6\text{ }^{\circ}\text{C}$.

При последующем охлаждении полосы в задействованных секциях участков ускоренного охлаждения №1 и №2 происходит быстрое охлаждение поверхности металла относительно его центра, вследствие чего возникает температурный градиент по толщине. В зависимости от схемы включения секций установи ускоренного охлаждения разность температур между поверхностью и центром полосы перед смоткой составляла при толщине полосы 4,4 мм – 20-45 °С, а при толщине 20 мм – 107 °С.

Путем обобщения результатов конечно-элементного моделирования был сформирован алгоритм (рисунок 3) для определения рациональной стратегии чистовой прокатки и ускоренного охлаждения с целью минимизации градиента температур по толщине металла.

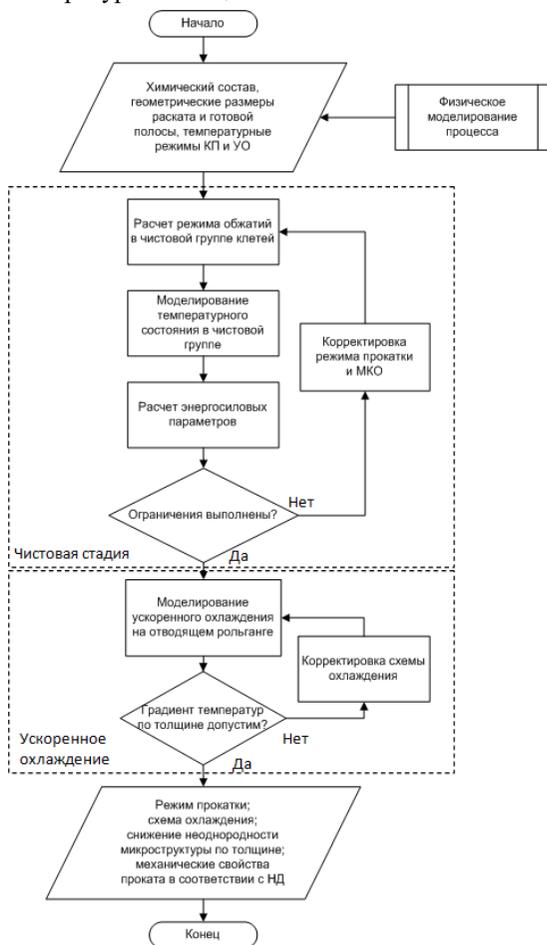


Рисунок 3 - Блок схема алгоритма определения рациональной стратегии чистовой прокатки и ускоренного охлаждения на ШСГП

С использованием алгоритма формируются режим прокатки (скорости, обжата, межклетевое охлаждение) и режим охлаждения в УУО (количество и последовательность включения секций), обеспечивающие допустимый температурный градиент по толщине (в границах нормируемых по технологии температурных режимов) и, как следствие, соответствие механических свойств проката нормативному документу.

В третьей главе при помощи физического моделирования изучено влияние температурных режимов термомеханической обработки ($T_{кп}$, $T_{но}$, $T_{ко}$) на механические свойства и микроструктуру стали исследуемой химической композиции.

В качестве исследуемой была выбрана высокопрочная низколегированная сталь, химический состав которой характеризуется повышенным содержанием углерода (0,15%) и марганца (0,78%), чистотой по вредным примесям (суммарно S и P $\leq 0,013\%$), добавками элементов, обеспечивающих необходимую атмосферную коррозионную стойкость (0,61% Cr; 0,15% Ni; 0,27% Cu) и комплексным микролегированием $Ti+Nb < 0,05\%$.

Выплавка и последующая обработка по режимам ТМО осуществлялась на оборудовании лабораторного комплекса «Инжиниринговый центр Термодеформ-МГТУ».

Экспериментальным (метод дифференциально сканирующей калориметрии с использованием установки STA Jupiter 449 F3 (NETSCH)) и расчетными методами определены критические точки фазовых переходов ($A_{r3}=857\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $A_{r1}=742\text{ }^{\circ}\text{C}$), ставшие основанием для выбора стратегий термомеханической обработки. Деформация заготовок при моделировании осуществлялась на толщину 4,4 мм в две стадии с последующим ускоренным охлаждением в специальной лабораторной установке. Черновую стадию прокатки осуществляли путем пошаговой деформации в радиальных сегментах. Чистовая стадия прокатки осуществлялась в двухвалковом лабораторном прокатном стане за три прохода. Суммарная степень деформации составляла 80-85% при частной не менее 25% за проход.

Первоначально была выбрана схема обработки с завершением деформации и началом охлаждения в однофазной γ -области ($A_{r3}+(50-60)\text{ }^{\circ}\text{C}$) с последующим ускоренным охлаждением до температур 650-500 $^{\circ}\text{C}$.

При снижении температуры окончания ускоренного охлаждения ($T_{ко}$) от 650 до 500 $^{\circ}\text{C}$ наблюдается одновременный рост временного сопротивления и предела текучести на 120 Н/мм² (рисунок 4, а) Вместе с этим увеличивается твердость стали с 92 до 101 HRB (рисунок 4, в), а относительное удлинение понижается с 23 до 17% (рисунок 4, б), и при температуре ниже 550 $^{\circ}\text{C}$ находится за пределами нормируемого диапазона.

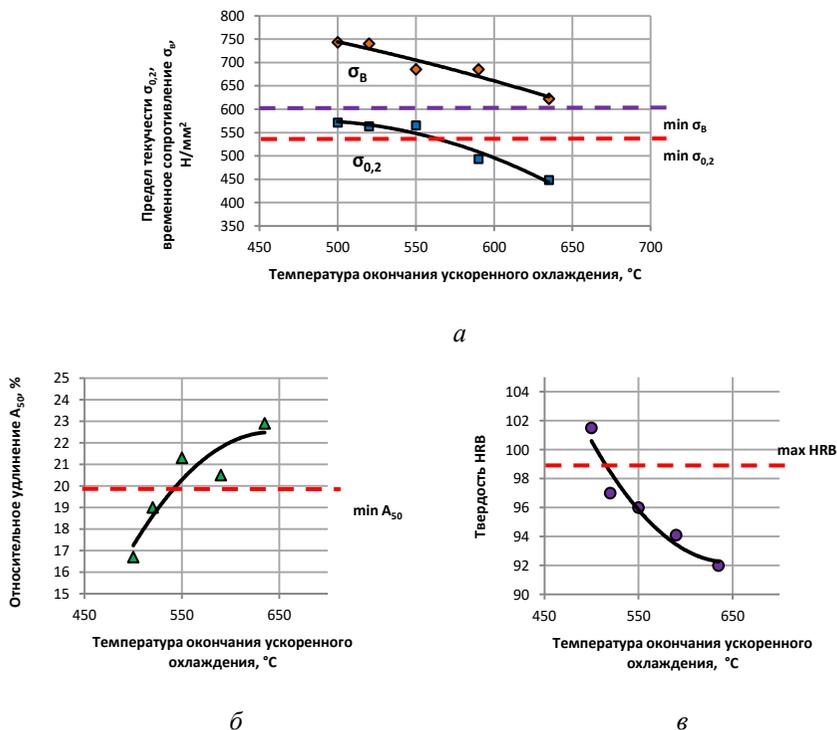


Рисунок 4 - Влияние температуры окончания ускоренного охлаждения на прочностные свойства (а), относительное удлинение (б) и твердость (в) исследуемой стали

Микроструктура образцов, подвергнутых ускоренному охлаждению до различных температур (500-590 °C) состояла из бейнита различной морфологии. Окончание охлаждения в верхней части температурного интервала промежуточного превращения ($T_{ко} = 590$ °C) привело к формированию глобулярного бейнита. При завершении охлаждения с $T_{ко} = 500$ °C формировалась более твердая структура нижнего бейнита, что отразилось на повышении прочностных свойств стали ($\sigma_{0,2} = 571$ Н/мм², $\sigma_B = 743$ Н/мм²) и привело к снижению относительного удлинения до 16,7%. В диапазоне температур 520-550 °C структура раскатов состоит из смеси верхнего и нижнего бейнита в различном процентном соотношении.

Исследовались различные сочетания температур окончания прокатки ($T_{кп}$) и начала ускоренного охлаждения ($T_{но}$): завершение деформации и начало ускоренного охлаждения в однофазной аустенитной γ -области ($A_{r3} + (30-50)$ °C); завершение деформации вблизи температуры начала фазовых превращений ($A_{r3} + (0-20)$ °C) и начало ускоренного охлаждения в

двухфазной ($\gamma+\alpha$)-области; завершение деформации и начало ускоренного охлаждения в двухфазной ($\gamma+\alpha$)-области (рисунок 5).

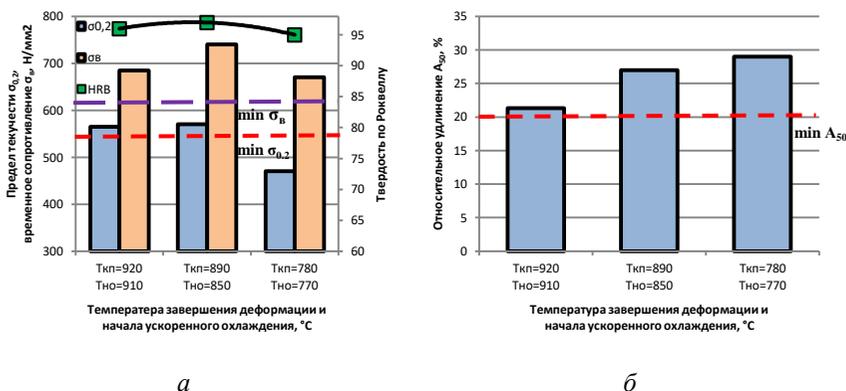


Рисунок 5 – Влияние температуры конца прокатки и начала ускоренного охлаждения на механические свойства исследуемой стали

Начало ускоренного охлаждения ниже температуры A_{r3} в сочетании с $T_{кп} = A_{r3} + 20$ °C привело к росту временного сопротивления на 55 Н/мм² и относительного удлинения на 5% с незначительным увеличением предела текучести относительно раската с $T_{кп}$ и $T_{но} > A_{r3}$. Микроструктура раскатов представляет смесь глобулярного и игольчатого бейнита с небольшой долей квазиполигонального феррита (при $T_{но} < A_{r3}$). При обработке стали по режиму с $T_{кп}$ и $T_{но} < A_{r3}$ формировалась ферритно-бейнитная микроструктура, состоящая преимущественно из квазиполигонального феррита ($\approx 55\%$), что привело к снижению предела текучести на 100 Н/мм² при одновременном росте относительного удлинения до 29%.

Таким образом, по результатам физического моделирования были определены температурные режимы контролируемой прокатки ($T_{кп} = 870-910$ °C) и ускоренного охлаждения ($T_{см} = 510-550$ °C), обеспечивающие получение механических свойств проката в соответствии с требованиями стандарта API-5ST для группы прочности ST80.

В четвертой главе представлены результаты освоения производства в условиях стана 2000 широкополосной горячей прокатки ПАО «ММК» рулонного проката группы прочности ST80 для гибких насосно-компрессорных труб.

На основе проведенных исследований с использованием разработанной конечно-элементной модели теплового состояния металла была сформирована стратегия производства опытной партии проката размерами 4,4x1180 мм, предусматривающая нагрев слябов до температуры 1230 °C, конец черновой стадии прокатки при 1030±20 °C, чистовой стадии – при 890±20 °C и смотку на вторую группу моталок при температуре 530±20°C.

Толщина промежуточного раската с учетом ограничений по энергосиловым характеристикам прокатных клетей составляла 30-35 мм. Расчет стратегии охлаждения полосы основывался на обеспечении требуемой скорости охлаждения и температуры скотки. При этом определялось необходимое количество и последовательность включения секций УУО №1 и №2. В соответствии с разработанной стратегией был произведен расчет допустимого по энергосиловым параметрам режима обжатий и сформирована технология производства опытной партии рулонного проката в условиях ШСПП 2000 ПАО «ММК».

Сопоставление расчетных значений с фактическими температурными режимами прокатки опытной партии (таблица 1) показало их высокую сходимость. Максимальная средняя погрешность расчета с использованием разработанной конечно-элементной модели теплового состояния металла по толщине составила 1,76%.

Таблица 1 - Погрешность расчета температурных режимов

Параметр	Расчетное значение	Опытная прокатка, ср. зн.	Δ , %
Температура конца прокатки, °С	890	897	0,77
Температура скотки на 1-ой группе моталок, °С	680	668	1,76
Температура скотки на 2-ой группе моталок, °С	530	526	0,75

Комплекс рекомендуемых технологических решений обеспечил получение механических свойств рулонного проката, удовлетворяющих заданным требованиям (таблица 2). По результатам металлографического анализа прокат имел однородную дисперсную бейнитную микроструктуру с небольшой долей квазиполигонального феррита (~10%).

Таблица 2 - Механические свойства проката, $\frac{\text{мин-макс}}{\text{ср. знач.}}$

№ п/п	Механические свойства			
	$\sigma_{0,2}$, Н/мм ²	σ_b , Н/мм ²	A_{50} , %	HRB
1	$\frac{570-610}{580}$	$\frac{730-740}{733}$	$\frac{23-28}{26}$	96,2
2	$\frac{550-610}{573}$	$\frac{710-730}{720}$	$\frac{26-32}{28}$	96,0
3	$\frac{570-620}{600}$	$\frac{690-750}{730}$	$\frac{25-26}{26}$	95,0
Результаты физического моделирования	570	740	27	97,0
Технические требования	550-620	≥610	≥20	≤100

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

1. С использованием программного комплекса DEFORM-3D проведено моделирование двух стадий технологического процесса: прокатки в чистовой группе клетей и ускоренного охлаждения, как наиболее значимых с точки зрения формирования требуемого комплекса механических свойств. Установлено, что для наиболее точного описания процесса необходим учет деформационного разогрева, теплоотдачи рабочим валкам, теплоотдачи на участках межклетевого охлаждения и в УУО, а также теплоотдачи излучением и конвекцией на участках свободных от деформирующего инструмента или охлаждающей воды.

2. В лабораторных условиях изучено влияние параметров ТМО на механические свойства и микроструктуру проката из низколегированной высокопрочной стали группы прочности СТ80, применяемой для изготовления гибких насосно-компрессорных труб. Выявлено, что завершение деформации в однофазной γ -области (выше критической точки $A_{r3} + (10-20)^\circ\text{C}$) и ускоренное охлаждение из двухфазной (γ - α)-области ($A_{r3} - (10-20)^\circ\text{C}$) способствует повышению относительного удлинения стали ($A_{50} = 27\%$) по сравнению с раскатом, ускоренно охлажденным из однофазной γ -области от $A_{r3} + (30-40)^\circ\text{C}$ ($A_{50} = 21,3\%$). Деформационная обработка вблизи точки распада аустенита способствовала повышению дисперсности микроструктуры и тем самым увеличению временного сопротивления стали.

3. Установлено, что в температурном интервале окончания ускоренного охлаждения от 450 до 650°C при $T_{\text{кп}} = A_{r3} + (10-20)^\circ\text{C}$ и $T_{\text{но}} = A_{r3} - (30-50)^\circ\text{C}$ изменение механических свойств и микроструктуры раскатов имеет следующий характер:

– завершение ускоренного охлаждения при высоких температурах (650°C) ведет к формированию феррито-бейнитной микроструктуры (ПФ+Бг) с наиболее низкими прочностными свойствами ($\sigma_{0,2} = 434 \text{ Н/мм}^2$, $\sigma_{\text{в}} = 642 \text{ Н/мм}^2$);

– при понижении температуры до 550°C прочностные свойства стали увеличиваются до $\sigma_{0,2} = 570 \text{ Н/мм}^2$, $\sigma_{\text{в}} = 740 \text{ Н/мм}^2$ с одновременным увеличением и относительного удлинения стали до $A_{50} = 27\%$. Микроструктура стали состоит из зерен игольчатого и глобулярного бейнита с небольшой долей квазиполигонального феррита;

– дальнейшее снижение температуры завершения ускоренного охлаждения до 450°C ведет к дальнейшему росту прочностных свойств. Однако относительное удлинение стали резко снижается по причине формирования мартенситных участков с повышенной твердостью.

4. На основании проведенных лабораторных исследований, а также с использованием конечно-элементной модели теплового состояния разработана стратегия производства рулонного проката обеспечившая со-

ответствующий установленным требованиям для гибких насосно-компрессорных труб группы прочности СТ80 комплекс механических свойств. Проведен расчетный анализ процесса производства полосы 4,4x1180 мм, на основе которого сформирована технология применительно к условиям ШСГП 2000 ПАО «ММК»: обжатие раската толщиной 32,4 мм в семи клетях чистовой группы с частной степенью деформации от 36% до 13%; завершение прокатки при температуре 890 °С и последующее охлаждением на отводящем ролянге с использованием 14 секций УУО №1 и 11 секций УУО №2 до температуры 530 °С.

5. По разработанной технологии в условиях ШСГП 2000 ПАО «ММК» произведена партия рулонного проката массой 300 тонн из высокопрочной низколегированной стали, свойства которой соответствуют требованиям стандарта API 5ST для группы прочности СТ80 и отличаются от полученных по результатам физического моделирования не более чем на 6%. На основании положительных результатов механических испытаний технология внедрена в производственный процесс.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ ИЗЛОЖЕНО В ПУБЛИКАЦИЯХ

Публикации в журналах из Перечня ВАК РФ:

1. Анализ технических требований, предъявляемых к подкату для гибких насосно-компрессорных труб / П.П. Полецков, **Д.Ю. Алексеев**, А.С. Кузнецова, О.А. Никитенко // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. – 2020. –Т.18, №1. – С. 49-54.

2. Анализ актуальных направлений исследований в области производства многофункциональных материалов для экстремальных условий эксплуатации / П.П. Полецков, А.Е. Гулин, Д.Г. Емалеева, А.С. Кузнецова, **Д.Ю. Алексеев**, Ю.Б. Кухта // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. – 2021. –Т.19, №3. – с. 109-114.

3. Перспективы производства атмосферостойкого стального проката с повышенной хладостойкостью / А.С. Кузнецова, **Д.Ю. Алексеев**, Ю.Б. Кухта, Д.Г. Емалеева // Черные металлы. – 2022. - №3 (1083). – С. 60-64.

4. Исследование влияния режимов ускоренного охлаждения на структурообразование и свойства рулонного проката / П.П. Полецков, **Д.Ю. Алексеев**, А.С. Кузнецова, А.Е. Гулин, Д.Г. Емалеева // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. – 2022. – Т.20, №2. – С. 91-97.

5. Анализ схем охлаждения листового проката на основе компьютерного моделирования / П.П. Полецков, **Д.Ю. Алексеев**, А.С. Кузнецова,

А.Е. Гулин, Д.Г. Емалеева, П.Г. Адищев // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. – 2022. – Т.20, №4. – С. 102-109.

6. Разработка конечно-элементной модели расчета теплового поля рулонного проката в процессе термомеханической обработки / **Д.Ю. Алексеев**, А.Е. Гулин, Д.Г. Емалеева, А.С. Кузнецова // Черные металлы. – 2022. – №5. – С. 55-60.

7. Выбор схемы ускоренного охлаждения рулонного проката из низколегированной стали на основе конечно-элементного моделирования / **Д.Ю. Алексеев**, Д.Г. Емалеева, А.С. Кузнецова, А.Е. Гулин, П.Г. Адищев, К.П. Тетюшин // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. – 2023. –Т.21, №4. – С. 63-69.

Публикации в изданиях, входящих в наукометрические базы данных Scopus и Web of Science:

8. Development of Alloyed Pipe Steel Composition for Oil and Gas Production in the Arctic Region / P.P. Poletskov, M.S. Gushchina, M.A. Polyakova, **D.Yu. Alekseev**, O.A. Nikitenko, D.M. Chukin // Resources. – 2019. – Vol. 8, №2. – P. 67.

9. Perspective high-strength pipe steel with increased corrosion cold resistance / P.P. Poletskov, N.V. Koptseva, A.S. Kuznetsova, **D.Yu. Alekseev** // CIS Iron and Steel Review. – 2023. – №26. – P.76-80.

Публикации в иных изданиях:

10. Моделирование процесса чистовой прокатки для производства гибких насосно-компрессорных труб / **Д.Ю. Алексеев**, П.П. Полецков, А.С. Кузнецова, П.Г. Адищев, Д.Г. Емалеева // Сборник Magnitogorsk Rolling Practice 2020: Proceedings of the 5th International Youth Scientific and Technical Conference. – Магнитогорск: Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, 2020. – С. 35-36.

11. Перспективы применения колтюбинговых технологий / П. П. Полецков, О. А. Никитенко, **Д. Ю. Алексеев**, А. С. Кузнецова // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования : тезисы докладов 78-й международной научно-технической конференции, Магнитогорск, 20–24 апреля 2020 года. Том 1. – Магнитогорск: Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, 2020. – С. 164.

12. Исследование влияния режимов термомеханической обработки на микроструктуру и механические свойства проката для ГНКТ / П. П. Полецков, **Д. Ю. Алексеев**, А. С. Кузнецова, Д. Г. Емалеева // 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. 120.

13. Analysis of the current state and promising developments in the field of ferrous metallurgy / P. Poletskov, D. Emaleeva, A. Gulin, A. Kuznetsova, **D. Alekseev** // Norwegian Journal of Development of the International Science. – 2021. – № 71. – P. 68-73.

14. Current state of innovative activities in Russia in the field of perspective materials creation / P. Poletskov, A. Gulin, D. Emaleeva, A. Kuznetsova, **D. Alekseev** // Polish Journal of Science. – 2021. – № 44-1 (44). – P. 38-40.

15. Анализ особенностей атмосферостойких сталей / П.П. Полецков, А.С. Кузнецова, А.Е. Гулин, Д.Г. Емалеева, **Д.Ю. Алексеев** // Polish Journal of Science. – 2022. – № 56 (56). – P. 67-70.

16. Исследование влияния температурных режимов термомеханической обработки на структуру и свойства рулонной стали / П.П. Полецков, **Д.Ю. Алексеев**, А.С. Кузнецова, А.Е. Гулин, Д.Г. Емалеева // Deutsche Internationale Zeitschrift für Zeitgenössische Wissenschaft. – 2022. – № 44. – P. 44-48.