

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА 24.2.324.01,  
СОЗДАННОГО НА БАЗЕ ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО  
БЮДЖЕТНОГО ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ ВЫСШЕГО  
ОБРАЗОВАНИЯ «МАГНИТОГОРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМ. Г.И. НОСОВА»,  
МИНИСТЕРСТВА НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ  
ФЕДЕРАЦИИ, ПО ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ  
УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ КАНДИДАТА НАУК

аттестационное дело № \_\_\_\_\_

решение диссертационного совета от «26» ноября 2024 г. № 9

О присуждении Алексееву Даниилу Юрьевичу, гражданину Российской Федерации, ученой степени кандидата технических наук.

Диссертация «Разработка технологии широкополосной горячей прокатки высокопрочной стали для гибких насосно-компрессорных труб» по специальности 2.6.4. Обработка металлов давлением принята к защите 20.09.2024г. (протокол № 8) диссертационным советом 24.2.324.01, созданным на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, 455000, г. Магнитогорск, пр. Ленина, 38, приказ № 714/нк от 02.11.2012.

Соискатель Алексей Даниил Юрьевич, 24.06.1992 года рождения, в 2016 году соискатель с отличием окончил магистратуру по направлению подготовки 22.04.02 Metallургия федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова».

В 2020 г. окончил аспирантуру федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Магнитогорский

государственный технический университет им. Г.И. Носова» по направлению 22.06.01 Технологии материалов, профиль «Обработка металлов давлением».

Работает инженером инжинирингового центра научно-исследовательского сектора федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова».

Диссертация выполнена на кафедре технологий обработки материалов федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

Научный руководитель – доктор технических наук, Полецков Павел Петрович, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», кафедра «Технологий обработки материалов», профессор.

Официальные оппоненты:

Сидельников Сергей Борисович – доктор технических наук, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский федеральный университет», профессор кафедры «Обработка металлов давлением»;

Корсаков Андрей Александрович – кандидат технических наук, общество с ограниченной ответственностью «Исследовательский Центр ТМК», начальник отдела бесшовных труб;

дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Южно-Уральский государственный университет» (национальный исследовательский университет), г. Челябинск, в своем положительном отзыве, подписанным Чаплыгиным Борисом Александровичем, доктором технических наук, профессором кафедры

«Процессы и машины обработки металлов давлением», утвержденным Коржовым Антоном Вениаминовичем, доктором технических наук, доцентом, первым проректором – проректором по научной работе ФГАОУ ВО «ЮУрГУ (НИУ)» указала, что представленная к защите диссертация Алексева Даниила Юрьевича на тему «Разработка технологии широкополосной горячей прокатки высокопрочной стали для гибких насосно-компрессорных труб» является законченной научно-квалификационной работой, в которой изложены научно обоснованные технические и технологические результаты. Основываясь на проведенных исследованиях, автор решает актуальные научные задачи, связанные с разработкой технологии производства импортозамещающего рулонного высокопрочного проката для изготовления гибких насосно-компрессорных труб. Диссертация соответствует требованиям п.9-14 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства РФ №842 от 24.09.2013, ее автор Алексеев Даниил Юрьевич заслуживает присуждения учёной степени кандидата технических наук по специальности 2.6.4. Обработка металлов давлением.

Соискатель имеет 66 опубликованных работ, в том числе по теме диссертации опубликовано 16 работ, из них в рецензируемых научных изданиях из перечня ВАК РФ опубликовано 7 статей, 2 статьи – в журналах, индексируемых в международных базах Scopus и Web of Science.

Общий объем научных изданий 9,36 п.л. (из них личный вклад соискателя 3,37 п.л.). Сведения об опубликованных работах достоверны. Основные результаты, полученные в диссертационном исследовании, изложены в опубликованных работах достаточно полно. Авторский вклад в публикации заключается в постановке цели и задач исследования, в интерпретации данных, полученных по результатам конечно-элементного моделирования, в формулировании основных положений и выводов по результатам лабораторных исследований по физическому моделированию режимов контролируемой прокатки и ускоренного охлаждения, научном обосновании выявленных зависимостей микроструктуры и механических свойств исследуемой стали от

режимов термомеханической обработки, подготовке научных статей к опубликованию в открытой печати.

К наиболее значимым научным публикациям относятся:

1. 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.

2. 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.

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. 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.

На диссертацию и автореферат поступили отзывы, все отзывы положительные:

1. ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина» (г. Екатеринбург), подписанный д-ром техн. наук Шварц Д.Ю. Замечания: «1. На стр. 7 автореферата представлена формула для расчета коэффициента теплоотдачи, в которую входит эмпирический параметр  $k$ . Причем этот параметр пропорционален коэффициенту теплоотдачи. Однако из автореферата не ясно каков диапазон изменения этого коэффициента и каковы принципы его назначения. 2. При физическом моделировании чистовой прокатки на лабораторном стане прокатка осуществлялась за три прохода при

частной степени деформации не менее 25% за проход (стр. 11 автореферата). В реальных же условиях стана ШСГП чистовых проходов больше, а частные деформации меньше. Оказала ли влияние разность в дробности деформации при трансляции результатов лабораторных исследований в производственных условиях?».

2. АО «ЕВРАЗ НТМК» (г. Нижний Тагил), подписанный канд. техн. наук Галимьяновым И.К. Замечания: «1. В представленных материалах не приведено описание и конкретные результаты применения предложенного алгоритма определения рациональной стратегии чистовой прокатки и ускоренного охлаждения проката на ШСГП (рис. 3). В связи с этим неясно, какой градиент температур по толщине проката считается «допустимым». 2. В автореферате отсутствует обоснование выбора химического состава исследуемой стали. Неясно, проводились ли соответствующие теоретико-экспериментальные исследования».

3. ФГУП «Центральный научно-исследовательский институт черной металлургии им. И.П. Бардина», подписанный канд. техн. наук Матросовым М.Ю. Замечания: «1. В требованиях к прокату на стр.3 указано верхнее значение твердости в единицах HRC, в то время как по тексту автореферата (стр. 11, 14) приведены значения твердости в единицах HRB. 2. В автореферате не приведены изображения целевой микроструктуры образцов стали СТ-80».

4. ООО «Газпром ВНИИГАЗ», подписанный канд. техн. наук. Набатчиковым Д.Г. Замечания: «1. Исходя из технических условий на трубы ГНКТ и с целью дальнейшей сварки проката, возможно, следует рассчитать углеродный эквивалент исследуемой стали. Также необходимо добавить информацию об испытаниях на ударный изгиб при отрицательных температурах и определении размера зерна готового проката, а также неметаллических включений типов А, В, С, D, DS по ГОСТ Р ИСО 4967. 2. На стр.3 автореферата сказано, что гибкая насосно-компрессорная труба подвергается многократным циклам пластической деформации. Согласно ТУ 24.20.32-002-05094951 изготовитель трубы гарантирует способность ГНКТ выдерживать без потери газогерметичности и

целостности не менее 50 полных циклов знакопеременных изгибов при условии рабочего давления, при котором эквивалентное напряжение металла трубы не превышает 30% от номинального предела текучести при радиусе изгиба не менее 20 диаметров ГНКТ (методика расчета давления по ГОСТ Р 54918-2012). При этом вопрос усталостной прочности в работе не затрагивается. Было бы целесообразно провести полный комплекс приемочных испытаний ГНКТ, изготовленных из проката ПАО «ММК», в том числе стендовые испытания готовых труб на циклическую усталость под рабочим давлением».

5. ФГБОУ ВО «Сибирский государственный индустриальный университет» (г. Новокузнецк), подписанный д-ром техн. наук Арышенским Е.В. Замечания: «1. В формуле расчета интенсивности теплообмена допущена ошибка – не закрыта скобка. 2. В формуле расчета сопротивления стали пластической деформации, вероятно, допущена ошибка – пропущен знак «+». 3. Не указаны единицы измерения в обеих формулах, а также не расписаны компоненты, входящие в формулу на странице 9. 4. Не проводились исследования для верификации модели расчета температуры проката по высоте сечения. 5. На рисунке 5 (а) при подписи оси ординат допущена смысловая ошибка, так как предел текучести и условный предел  $\sigma_{0,2}$  текучести это разные понятия».

6. ООО «ММК-Информсервис», подписанный канд. техн. наук Ульяновым А.Г. Замечания: «1. В обосновании актуальности работы автор приводит требования к механическим свойствам стали по API-5ST, согласно которым оценка твердости осуществляется по показателю HRC. Не ясно, почему далее по тексту автореферата, при представлении результатов физического моделирования и опытной прокатки, автор оценивает твердость проката по показателю HRB».

7. ПАО «Новолипецкий металлургический комбинат», подписанный канд. техн. наук Ковалевым Д.А. Замечания: «1. С предоставленным в автореферате химическим составом с  $T_{см} 590 \text{ }^{\circ}\text{C}$  не всегда будет возможность получить структуру бейнита. 2. В третьей главе нет информации про скорость охлаждения, так же не уделено должного внимания времени последеформационной паузы».

8. ФГАОУ ВО «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева», подписанный д-ром техн. наук Ерисовым Я.А. Замечания: «1. В автореферате отсутствуют результаты металлографического анализа в виде изображений микроструктур, а также информация об экономической полезности предложенного технического решения. 2. Учитывая, что рулонный прокат в дальнейшем подвергается последующей пластической деформации с целью изготовления из него ГНКТ, было бы целесообразным дополнительно исследовать анизотропию его механических свойств».

9. ФГАОУ ВО «Московский политехнический университет», подписанный канд. техн. наук Петровым П.А. Замечания: «1. Из автореферата диссертационной работы остается не ясным диапазон температур и диапазон скоростей деформации, для которого определены реологические свойства высокопрочной низколегированной стали группы прочности СТ80. 2. Реологические свойства, как отмечается в автореферате, получены путем проведения соответствующих исследований с применением комплекса Gleeble 3500. Оценивалось ли в диссертации при обработке результатов этих исследований повышение температуры в деформируемом металле? Насколько повышение температуры в металле при определении реологических свойств сопоставимо с повышением температуры металла при его деформировании в клетки?».

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается их известными систематическими исследованиями и научными работами, опубликованными в высокорейтинговых рецензируемых журналах по проблемам диссертационного исследования в области теории и практики производства листового проката, в том числе методами термомеханической обработки трубных сталей, математического моделирования процессов пластического формоизменения обрабатываемого металла с разработкой конечно-элементных и математических моделей расчета энергосиловых и температурных условий, а также напряженно-деформированного состояния металла, физического моделирования деформационной обработки с использованием натуральных образцов на лабораторном оборудовании с последующим масштабированием результатов

на промышленное производство. Это подтверждает их способность квалифицированно определить и оценить научную и практическую новизну исследований.

**Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:**

**разработана** научная концепция определения граничных условий теплообмена в системе взаимодействия поверхность-воздух/вода, позволяющая повысить точность расчета температурного состояния полосы по толщине в процессах контролируемой прокатки и ускоренного охлаждения (отклонение расчетных значений от температурных режимов опытной прокатки в промышленных условиях составило от 0 до 3,1 %);

**предложен** подход к определению технологической стратегии производства нового вида продукции с учетом химического состава стали и возможностей промышленного оборудования;

**доказана** перспективность использования разработанной технологии производства высокопрочной стали для гибких насосно-компрессорных труб, что позволило освоить выпуск нового вида проката группы прочности СТ80 в условиях ПАО «ММК»;

**введено** в научную практику уравнение для расчета реологических свойств стали группы прочности СТ80 с высокой степенью точности ( $R^2=0,961$ ) описывающее зависимость сопротивления пластической деформации от степени и скорости деформации в интервале температур горячей прокатки ( $u=0,1\div 100\text{ с}^{-1}$ ;  $T=700\div 1250\text{ }^\circ\text{C}$ ).

**Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что:**

**доказано, что** формирование мелкодисперсной феррито-бейнитной структуры путем термомеханической обработки стали с завершением деформации при температуре  $890\text{ }^\circ\text{C}$  с последующим ускоренным охлаждением до  $520\text{-}550\text{ }^\circ\text{C}$  обеспечивает формирование требуемого комплекса механических свойств для проката группы прочности СТ80.

**применительно к проблематике диссертации результативно** (эффективно, то есть с получением обладающих новизной результатов) использованы современные методы компьютерного моделирования с применением специализированного программного комплекса DEFORM 2D/3D, статистический анализ, методы анализа структуры и проведения испытаний для определения механических свойств;

**изложены** данные об изменении температурного состояния полосы по толщине на каждом из технологических этапов чистовой стадии деформации и последующего ускоренного охлаждения при моделировании прокатки полосы на толщину 4,4 мм, установлена возможность управления градиентом температур на действующем оборудовании за счет корректировки режимов обработки полосы;

**раскрыты** особенности формирования комплекса механических свойств и микроструктуры высокопрочной стали для производства гибких насосно-компрессорных труб, на основании которых определена стратегия производства проката в промышленных условиях, обеспечивающая гарантированное достижение требуемого уровня прочностных и пластических характеристик – завершение деформации при температуре 890 °С с последующим ускоренным охлаждением до 520-550 °С и формированием феррито-бейнитной структуры.

**изучено** влияние основных технологических параметров процесса контролируемой прокатки и ускоренного охлаждения (температуры окончания чистовой стадии прокатки, температуры начала и окончания ускоренного охлаждения) на формирование микроструктуры и комплекса механических свойств высокопрочной стали группы прочности СТ80, где с понижением температуры окончания ускоренного охлаждения выявлено повышение прочностных свойств стали (временное сопротивление увеличивается на 150 Н/мм<sup>2</sup>, условный предел текучести – на 180 Н/мм<sup>2</sup>), обоснованное повышением в структуре стали доли бейнита;

**проведена модернизация** существующих компьютерных моделей расчета температурного состояния для определения режимов деформационной обработки

и ускоренного охлаждения с минимальным градиентом температур по толщине полосы.

**Значение полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается тем, что:**

**разработана и внедрена** технология производства рулонного проката из высокопрочной низколегированной стали группы прочности СТ80 в условиях ПАО «Магнитогорский металлургический комбинат»;

**определены** пределы и перспективы практического использования компьютерных моделей контролируемой прокатки и ускоренного охлаждения, которые позволяют разрабатывать новые или корректировать действующие режимы для повышения качества готовой продукции по показателю механических свойств с учетом технологических факторов промышленного производства;

**создан** алгоритм корректировки параметров контролируемой прокатки и ускоренного охлаждения, направленный на снижение неоднородности структуры и механических свойств по толщине проката, с использованием которого определена технологическая стратегия (режимы обжатиий по клетям и схема включения секций установки ускоренного охлаждения) производства рулонного проката в условиях широкополосного стана горячей прокатки 2000 ПАО «ММК»;

**представлены** технологические рекомендации применительно к условиям широкополосного стана горячей прокатки 2000 ПАО «ММК», включающие химический состав и режимы термомеханической обработки стали, с использованием которых произведена опытно-промышленная партия рулонного проката с регламентированным для группы прочности СТ80 комплексом механических свойств.

**Оценка достоверности результатов исследования выявила:**

**для экспериментальных работ** использовано современное высокоточное сертифицированное оборудование для определения микроструктуры металла, его механических свойств, технологических параметров термомеханической

обработки и показана воспроизводимость результатов исследования в условиях ООО «ИЦ Термодеформ-МГТУ», ЦКП НИИ «Наносталей» и ПАО «ММК»;

**теория** диссертационного исследования построена на базе накопленных фундаментальных знаний в области теории пластичности для описания деформированного состояния металла, теории обработки металлов давлением для расчетов температурных и деформационно-скоростных параметров прокатки и не противоречит им;

**идея базируется** на обобщении передового опыта производства высокопрочного рулонного проката для трубной продукции, анализе технических требований к готовому продукту, спецификаций зарубежных производителей, а также требований к технологии с учетом возможностей производственного оборудования ведущих металлургических предприятий России;

**использованы** сравнения полученных автором результатов физического и конечно-элементного моделирования с ранее полученными результатами экспериментальных исследований других авторов;

**установлен** высокий уровень сходимости теоретических и практических результатов, полученных автором на основе конечно-элементного и физического моделирования с результатами, полученными в производственных условиях ПАО «ММК» (максимальное среднее отклонение расчетных значений с фактическими температурными режимами опытной прокатки составило около 2% при максимальном частном отклонении 3,1%);

**использованы** современные методики сбора и обработки исходной информации, лабораторные и промышленные сертифицированные измерительные системы, высокопроизводительные компьютерные комплексы и лицензионное специализированное программное обеспечение.

**Личный вклад соискателя состоит** в постановке цели и задач исследования; создании конечно-элементной модели расчета температурного состояния полосы по толщине; в анализе и обобщении полученных результатов моделирования с созданием алгоритма выбора рациональных режимов обработки; планировании и проведении лабораторных экспериментов; изучение

закономерностей изменения микроструктуры и механических свойств высокопрочной низколегированной стали для гибких насосно-компрессорных труб; формулировании основных положений и выводов, разработке рекомендаций по промышленному освоению технологии; подготовке публикаций по результатам диссертационных исследований.

**В ходе защиты диссертации были высказаны следующие критические замечания. В отзыве ведущей организации:**

1. Не достаточно обоснован критерий выбора высокопрочной низколегированной стали при выполнении исследований.

2. Возможно ли применить разработанные в работе методы и модели для других сталей или оборудования?

3. Оценивалось ли влияние масштабного фактора на конечный результат при прокатке на промышленных станах, отличающихся параметрами от лабораторного оборудования?

**В отзыве официального оппонента С.Б. Сидельникова:**

1. В автореферате не указаны государственные программы, гранты, договора, в рамках которых выполнены исследования, и нет данных о внедрении результатов исследований в учебный процесс.

2. Вызывает сомнение, что в представленной работе поставлены только 3 задачи для исследований (стр. 6 диссертации, стр. 4 автореферата), так как в заключении по диссертации приведено 10 пунктов, каждый из которых раскрывает решение важной задачи. При этом задачи в диссертации приведены дважды на стр. 6 и на стр. 33.

Цель и название диссертационной работы сформулированы одинаково, что на наш взгляд не совсем правильно. А целью работы, на наш взгляд, является совершенствование технологии производства рулонного проката путем применения математического и физического моделирования температурных условий термомеханической обработки.

3. В данных для моделирования (стр. 37 диссертации) нет обоснование выбора значения показателя трения по Зибелю (только в скобках указано число

0,3) и кем были получены кривые упрочнения для исследуемой стали группы прочности СТ80 (нет ссылки).

4. На наш взгляд известные формулы для расчета параметров прокатки, например, А.И. Целикова, необходимо было вынести в первый раздел, так как они не являются результатом исследований автора. Кроме того, некоторые формулы не имеют размерности, например, формула (2.1) в диссертации, поэтому непонятно в каких единицах вводятся многочисленные параметры и какая размерность будет при этом у получаемой величины.

5. Неверно указаны термины для определения механических свойств, например, вместо временного сопротивления – предел прочности, вместо условного предела текучести – предел текучести, вместо относительного удлинения - удлинение (стр. 67 диссертации, табл. 3.5).

6. С точки зрения выбора рациональных режимов прокатки следует считать, что приведенные данные в табл. 4.1 (стр. 86 диссертации) показывают неполную загруженность прокатного стана, так как процент загрузки по усилию и моменту в среднем по черновой группе клетей не превышает 50 %, а в чистовой группе и того меньше.

**В отзыве официального оппонента А.А. Корсакова:**

1. В работе в явном виде не представлен пример практического применения предложенного автором алгоритма определения рациональной технологической схемы чистовой прокатки на ШСГП и ускоренного охлаждения с целью минимизации градиента температур по толщине металла (представленный на рисунке 2.12).

2. Как при расчете изменения температурного поля заготовки в процессе чистовой стадии прокатки учитывался деформационный разогрев материала?

3. Отсутствует информация о марке (или химическом составе) стали, которая использовалась для проведения опытно-промышленной прокатки на ШСГП 2000. Везде указана только группа прочности. Соответствует ли химический состав данной стали исследуемому в Главе 3?

4. Не понятно, как должен обеспечиваться и обеспечивался во время опытно-промышленной прокатки одинаковый диапазон рекомендуемых температур в конце черновой стадии прокатки –  $1030 \pm 20^\circ\text{C}$  (согласно рисунку 4.1) и на входе в чистовую группу клетей (согласно рисунку 4.3) с учетом потери температуры на промежуточном рольганге.

5. В работе отсутствует информация об опыте производства конечной продукции в виде гибких насосно-компрессорных труб из металлопроката, полученного по новой, предложенной автором технологии.

#### **От членов диссертационного совета:**

1. Что являлось целью физического моделирования: проверка адекватности компьютерных моделей или поиск режимов, которые потом будут внедрены в реальное производство?

2. Каким образом подтверждается подобие или адекватность полученных в работе результатов?

3. Какими технологическими мероприятиями обеспечивается скорость охлаждения, необходимая для формирования необходимой структуры в лабораторных и промышленных условиях?

4. Как определялась необходимая скорость охлаждения при отсутствии термокинетической диаграммы исследуемой стали?

5. Какая была толщина образцов при физическом моделировании?

6. Какая марка стали исследовалась в работе?

7. Почему химический состав отличается от регламентированного по API-5ST?

8. Для каких целей исследуемая в работе сталь имела добавки Nb и Ti, т.к. данные элементы не оговариваются API-5ST?

9. Как осуществлялась выплавка стали в лабораторных условиях?

10. Какая была последовательность технологических операций при физическом моделировании?

11. Подвергался ли прокат дополнительной термической обработке?

12. На стр. 11 автореферата говорится что снижение температуры окончания ускоренного охлаждения не допускается ниже 550 °С, т.к. снижаются пластические свойства стали. При этом в выводах по работе рекомендуется окончание ускоренного охлаждения ниже этой температуры. Чем обоснован выбор температур окончания ускоренного охлаждения в диапазоне 520-550 °С?

13. В работе рекомендуется феррито-бейнитная структура. Влияет ли на свойства исследуемой стали их количественно соотношение?

14. Какая морфология бейнитной фазы является более предпочтительной для формирования комплекса свойств исследуемой стали.

15. Как градиент температур по толщине влияет на распределение структур по сечению?

16. Какая максимальная разность скоростей охлаждения поверхности и центра полосы?

17. Чем отличается математическое и компьютерное моделирование и какая модель представлена в диссертационной работе?

18. В работе представлено уравнение отображающее реологические свойства исследуемой стали. Каким образом оно было получено?

19. Как были получены исходные данные для регрессионного анализа?

20. Что характеризует индекс «I» в требованиях к прокату для гибких насосно-компрессорных труб?

21. Предусмотрена ли технологией дрессировка рулонного проката?

**Соискатель Алексеев Д.Ю. ответил на задаваемые ему в ходе заседания вопросы и привел собственную аргументацию.**

Композиция легирования и граничные содержания химических элементов для исследуемой в работе стали в первом приближении были определены на основе анализа технических требований, предъявляемых зарубежными производителями к прокату для гибких насосно-компрессорных труб, литературных данных о влиянии химических элементов в стали, а также

имеющегося опыта исследований в области трубных сталей. Всего в рамках диссертационной работы было исследовано 5 химических композиций, из которых была выбрана одна, обладающая наилучшим сочетанием механических свойств. При этом химический состав высокопрочного рулонного проката из стали группы прочности СТ80, предназначенного для производства гибких насосно-компрессорных труб, является объектом интеллектуальной собственности ПАО «ММК», опытно-промышленная партия которого в объеме 300т была отгружена для последующей переработки потребителю.

Представленные в главе 3 диссертации исследования по физическому моделированию контролируемой прокатки и ускоренного охлаждения проводились в рамках научно-исследовательской работы с ПАО «ММК». Акт внедрения результатов исследования в учебный процесс представлен в Приложении Г диссертационной работы.

Разработанные в диссертации методы и модели являются универсальными и могут быть применены для других сталей или оборудования при внесении соответствующих изменений в начальные и граничные условия. При этом изменение температурного поля за счет деформации определялось коэффициентом выхода тепла, определяющего долю энергии, преобразуемую в тепло. Значение этого коэффициента было принято равным 0,9. Для операций горячей обработки металлов давлением, которые характеризуются большой величиной нормальных напряжений, предпочтительным является использование закона трения по Зибелю. Для рассматриваемого в работе диапазона температур горячей прокатки получено, что показатель трения находится в диапазоне от 0,29 до 0,31.

Представленный в работе алгоритм был применен впервые при разработке технологии производства исследуемой стали группы прочности СТ80 применительно к условиям ШСП 2000 ПАО «ММК». Опытная прокатка по рекомендованным технологическим режимам подтвердила высокую сходимость результатов моделирования с результатами промышленного производства.

Целью расчета режимов прокатки являлось формирование режима, при котором с одной стороны обеспечиваются требуемые температуры черновой и чистовой стадий прокатки и ускоренного охлаждения на отводящем рольганге, а с другой – минимальный температурный градиент по толщине полосы. При этом обязательным условием являлось соблюдение ограничений по энергосиловым параметрам оборудования.

Целью физического моделирования являлось изучение влияния режимов термомеханической обработки на микроструктуру и механические свойства исследуемой стали. При планировании экспериментов на лабораторном оборудовании первоначально ставилась задача максимально воспроизвести условия производства проката на промышленном оборудовании по таким параметрам как: суммарная степень деформации, температурный режим прокатки, температурно-скоростные параметры ускоренного охлаждения. Скорости ускоренного охлаждения проката в лабораторных и промышленных условиях подобны и обеспечивались техническими возможностями оборудования. Необходимая скорость охлаждения определялась на основании термокинетической диаграммы исследуемой стали, которая представлена в тексте диссертационной работы. Толщина образцов при физическом моделировании составляла 4,4 мм.

Буквенного обозначения исследуемый химический состав не имеет. По API-5ST он соответствует группе прочности ST80. Содержание химических элементов в исследуемой стали полностью соответствует предельно регламентируемому по API-5ST. При этом с целью формирования требуемого комплекса механических свойств в процессе термомеханической обработки сталь имела добавки Nb и Ti как основных карбидообразующих элементов.

Выплавка стали в лабораторных условиях осуществлялась в индукционной печи емкостью 60 кг. Последующая деформационная обработка осуществлялась с соблюдением температурных режимов на гидравлическом прессе и реверсивном лабораторном стане. Таким образом, проводилось моделирование

термомеханической обработки с получением механических свойств в прокате без дополнительных операций термической обработки.

По результатам физического моделирования наилучшее сочетание механических свойств получено в диапазоне температур окончания ускоренного охлаждения 520-550 °С при температуре завершения чистовой стадии деформации 890 °С вблизи границы начала аустенитного превращения. Снижение пластических свойств ниже нормируемого диапазона при окончании ускоренного охлаждения 550 °С получено при температуре окончания чистовой стадии деформации 920 °С.

С понижением температуры окончания ускоренного охлаждения в исследуемой стали наблюдается снижение доли ферритной фазы с увеличением доли бейнита. Прочностные свойства при этом увеличиваются, а пластические снижаются. С точки зрения достижения необходимого комплекса механических свойств предпочтительным является формирование ферритно-бейнитой структуры в равных процентных долях. При ускоренном охлаждении полосы по определенной в работе схеме включения секций с завершением ускоренного охлаждения в диапазоне от 520 до 550 °С будет наблюдаться однородная структура по толщине полосы, что подтверждено промышленной апробацией. При этом скорости охлаждения для поверхностных и центральных слоев полосы будут примерно равны.

В работе представлены результаты конечно-элементного моделирования с использованием специализированного программного комплекса. При этом в качестве начальных условий для моделирования используются математические выражения описывающие изменение теплового состояния металла в виде расчетного коэффициента теплоотдачи.

Для описания реологических свойств исследуемой стали в работе представлено регрессионное уравнение, которое получено путем статистической обработки экспериментальных данных с использованием программного комплекса Statistica и сведено к форме выражения Андреюка Л.В. Исходные данные для

