

На правах рукописи



Пожидаева Евгения Борисовна

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА
ВЫСОКОПРОЧНОГО ТОЛСТОЛИСТОВОГО ПРОКАТА
ДЛЯ ТРУБОПРОВОДОВ, РАБОТАЮЩИХ В УСЛОВИЯХ
ПОВЫШЕННОЙ СЕЙСМИЧНОСТИ**

Специальность 05.16.05 – Обработка металлов давлением

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Магнитогорск– 2021

Работа выполнена в ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова».

Научный руководитель – кандидат технических наук, доцент
Чикишев Денис Николаевич

Официальные оппоненты: Мазур Игорь Петрович,
доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВО «Липецкий государственный
технический университет»,
заведующий кафедрой
обработки металлов давлением (г. Липецк)

Радионова Людмила Владимировна,
кандидат технических наук, доцент,
ФГАОУ ВО «Южно-Уральский
государственный университет
(национальный исследовательский
университет)»,
заведующий кафедрой процессы и машины
обработки металлов давлением (г. Челябинск)

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Череповецкий
государственный университет»

Защита состоится «21» июня 2021 г. в 16:00 ч на заседании диссертационного совета Д 212.111.01 на базе ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова» по адресу: 455000, г. Магнитогорск, пр. Ленина, 38, малый актовй зал.

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 «__» _____ 2021 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Мезин Игорь Юрьевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Одной из наиболее важных задач при транспортировке углеводородов является обеспечение надёжной и безопасной эксплуатации трубопроводов путём сокращения риска возникновения аварийных ситуаций.

Как показывает анализ результатов диагностики трубопроводов, количество дефектов производства листа, а именно расслоений составляет более 20 % от общего числа выявленных опасных дефектов. Существенным фактором трещиностойкости толстолистового проката является полосчатость структуры, которая образуется в результате деформации ликвационной неоднородности. Установлено, что ликвационная полоса (ЛП) снижает трещиностойкость и способствует развитию лавинообразного разрушения. Вместе с тем, указанные показатели являются наиболее значимыми в разработке сталей для трубопроводов, эксплуатирующихся в сейсмоактивных регионах. В литературе широко представлены результаты исследований о влиянии различных химических элементов на ликвационную неоднородность, но недостаточно данных о влиянии тех же элементов на количественную характеристику полосчатости (балл полосчатости).

Совмещение перспективных концепций разработки сталей для труб большого диаметра (ТБД) включающих в себя: «предупреждения разрушения», «расчёт трубопровода на основе деформации» и «интегрированной инженерии вычислительных материалов» (ICME) позволит получить необходимые и достаточные результаты в разработке современных материалов. Необходимо решить задачи обоснованной коррекции химического состава и выбора режимов на основе адекватной оценки трещиностойкости материала.

Степень разработанности темы исследования.

Большой вклад в развитие научных основ разрушения трубных сталей внесли Арабей А.Б., Пышминцев И.Ю., Фарбер В.М., Форсюз П., Сузуки Н., Ишикава Н. и др. Развитием научных основ разработки новых марок сталей, изучением влияния отдельных химических элементов и технологических воздействий на качество толстолистовой стали занимались Морозов Ю.Д., Матросов Ю.И., Эфрон Л.И., Мазур И.П., Чикишев Д.Н., Салганик В.М., Румянцев М.И., Мунтин А.В., Колесникова А.Г., Ли Л., Нафиси С. и др. Влияние ликвационной полосы, структурную неоднородность, и полосчатость изучали Радионова И.Г., Настич С.Ю., Казаков А.А., Муфтахов М.Х., Худяков М.А., Бердин В.К., Дуб А.В., Морозова Т.В., Завалищин А.Н. и др. Исследовали механические свойства сталей и разрабатывали новые методы испытаний Струин А.О., Пышминцев И.Ю. Бирдегулов Л.Р., Антонов М.И., Ань Т., Чжан Ш., Филин В.Ю., Артемьев Д.М. и др.

Объектом исследования является технология производства толстолистового проката (ТЛП) для труб большого диаметра (ТБД), эксплуатируемых в регионах с повышенной сейсмичностью. **Предмет исследования** – режимы термомеханической обработки ТЛП из трубных сталей с усовершенствованными композициями химического состава по микролегирующим элементам.

Цель работы – получение толстолистового проката из микролегированной стали с комплексом свойств, обеспечивающих соответствие эксплуатационных характеристик магистральных трубопроводов особенностям работы в зонах повышенной сейсмичности.

Для достижения поставленной цели были решены следующие научно-технологические **задачи**:

1. Изучить причинно-следственные связи факторов и характеристик разрушения труб большого диаметра, которые эксплуатируют в качестве нефтегазопроводов в сейсмоактивных регионах.

2. Выбрать химические композиции микролегированных сталей по критериям трещиностойкости, прочности, пластичности и выносливости при циклических нагрузках, близких по спектру к нагрузкам в сейсмоактивных регионах.

3. Разработать математические модели эволюции структуры и напряженно-деформированного состояния металла в процессе горячей толстолистовой прокатки при наличии ликвационной неоднородности, использованные для определения рациональных режимов термомеханической обработки.

4. Определить критерии соответствия ТЛП условиям эксплуатации ТБД в сейсмоактивных районах, в частности требуемый уровень трещиностойкости при действии циклических нагрузок.

5. Разработать режимы термомеханической прокатки толстых листов для труб большого диаметра, свойства которых удовлетворяют условиям эксплуатации магистрального нефтегазопроводов в сейсмоактивных регионах.

Научная новизна и теоретическая значимость диссертационной работы

1. Разработана математическая конечно-элементная модель процесса горячей прокатки толстого листа, которая позволяет анализировать напряженно-деформированное состояние металла с учётом наличия осевой ликвационной неоднородности толщиной менее 1% толщины сляба.

2. Алгоритм совершенствования технологии производства толстолистового проката для труб большого диаметра с применением совокупности интегрированных критериев дополнен определением балла полосчатости, а также оценением трещиностойкости по полнотолщинным образцам и методом поперечного изгиба с вращением, что позволяет уточнить режимы термомеханической прокатки листов из микролегированной стали с учётом фактического содержания микролегировующих элементов.

3. Определены температурно-деформационные и скоростные режимы термомеханической прокатки толстых листов, обеспечивающие их пригодность для изготовления трубопроводов, эксплуатируемых в регионах с сейсмической активностью.

4. Усовершенствованы способы оценки механических свойств толстых листов из высокопрочной стали по критерию трещиностойкости, позволившие разработать технологию производства толстого листа для труб большого диаметра, эксплуатируемых в сейсмоактивных регионах.

Практическая значимость

1. Внедрён метод трёхточечного изгиба полнотолщинных образцов для оценивания статической трещиностойкости толстых листов, который в отличие от стандартизованного метода позволяет учесть влияние полосчатости на трещиностойкость проката.

2. Метод испытаний поперечного изгиба с вращением для оценивания динамической трещиностойкости толстолистового проката позволяет повысить точность оценки его соответствия требованиям к ТБД, работающим в условиях повышенной сейсмичности.

3. Уточнены требования к химической композиции стали для изготовления толстолистового проката класса прочности К60, применяемого при производстве ТБД, эксплуатируемых в условиях повышенной сейсмичности.

4. Разработана технология производства ТЛП класса прочности К60 с уточнённым содержанием микролегирующих элементов, которая обеспечила минимизацию балла полосчатости, улучшение механических свойств, а также статической и динамической трещиностойкости листов для ТБД, предназначенных для магистралей нефтегазопроводов, эксплуатируемых в сейсмоактивных регионах.

5. Результаты диссертационной работы были получены по итогам успешного выполнения НИОКР «Разработка и внедрение в ПАО «ММК» методики оценки ликвационных полос в листовом прокате и выработка рекомендаций по совершенствованию сквозной технологии производства с целью минимизации ликвационных полос в готовом прокате» по договору № 229991, а также государственного задания «Создание научных основ получения современных хладостойких и коррозионно-стойких сталей, их деформационно-термической обработки для достижения уникальных механических и специальных эксплуатационных свойств (на базе центра обработки металлов давлением)» на выполнение НИР в сфере научной деятельности. Материалы работы поддержаны грантом по программе УМНИК Фонда содействия инновациям (договор №15821ГУ/2020, «Разработка марок сталей на основе моделирования сложных динамических процессов их производства и эксплуатации»). Экономический эффект от внедрения новых технологических решений, полученных по результатам настоящей работы, в условиях действующего промышленного производства составил 5,3 млн руб., что подтверждено актом внедрения на ПАО «ММК».

Методология и методы исследования

Методологический подход обоснован требованиями к магистральным нефтегазопроводам из ТБД, эксплуатируемым в сейсмоактивных регионах. В таком случае значимыми требованиями к прокату являются не только прочность, пластичность, но также трещиностойкость и выносливость в условиях действия циклических нагрузок. Поэтому экспериментальные исследования направлены на повышение точности определения трещиностойкости, в том числе при циклических нагрузках, а теоретические – на поиск рациональных режимов производства ТЛП, обеспечивающих дробление ликвационной неоднородности и тем самым снижения балла полосчатости как существенного фактора трещиностойкости.

Теоретическая часть работы выполнена с применением метода конечных элементов в широко апробированном специализированном инженерном программном комплексе *DEFORM 3D*, а также общепринятых методов статистического анализа с использованием программного комплекса *Statistica*. Лабораторные исследования проводили с применением специализированного оборудования в ресурсном центре (ЦКП) НИИ «Наносталей» на образцах ТЛП классов прочности К52, К56 и К60. Лабораторные испытания проводили в ООО «Инжиниринговый центр Термодеформ-МГТУ». Промышленные эксперименты были проведены в условиях ТЛС 5000 ПАО «ММК».

Положения, выносимые автором на защиту:

1. Математическая конечно-элементная модель процесса горячей прокатки толстого листа, которая, отображая НДС металла с учётом наличия осевой ликвационной неоднородности толщиной менее 1% толщины сляба, позволяет определять режимы деформации, интенсифицирующие дробление ликвационной неоднородности и тем самым минимизацию балла полосчатости как существенного фактора трещиностойкости.

2. Алгоритм совершенствования технологии производства толстолистового проката для труб большого диаметра с применением совокупности интегрированных критериев, обеспечивающий повышение эксплуатационных характеристики магистральных трубопроводов в сейсмоактивных регионах путём улучшения механических свойств по критерию трещиностойкости в условиях действия циклических нагрузок.

3. Технология производства ТЛП класса прочности К60, которая обеспечила минимизацию балла полосчатости, улучшение механических свойств, а также статической и динамической трещиностойкости листов для ТБД, предназначенных для магистралей нефтегазопроводов, эксплуатируемых в сейсмоактивных регионах.

Степень достоверности и апробация результатов. Достоверность результатов исследования подтверждается корректностью постановки математической задачи, базирующейся на основе современных достижений теории ОМД, физики металлов и теории трещиностойкости, а также применением компьютерного моделирования в сочетании с лабораторными и промышленными экспериментами, применением общепринятых методов статистической обработки большого объёма данных, полученных в промышленных условиях.

Основные результаты работы прошли апробацию в виде выступлений автора с научными докладами по теме диссертации на конференциях и конкурсах различного уровня: межрегиональная научная конференция студентов, аспирантов и молодых учёных «Наука и производство Урала-2014» (г. Новотроицк, 2014 г.), всероссийская молодёжная научная конференция «Новые материалы и технологии: состояние вопроса перспективы развития» (г. Саратов, 2014 г.), XI Всероссийская научно-практическая конференция «Современные проблемы горно-металлургического комплекса. Наука и производство» с международным участием в рамках проведения «международного горно-металлургического конгресса» НИТУ «МИСиС» (г. Москва,

Старый Оскол 2014), VI Всероссийская научно-практическая конференция Современные наукоёмкие инновационные технологии (г. Самара, 2014 г), III международная научно-практическая конференция «Актуальные вопросы науки, технологии и производства» (г. Санкт-Петербург, 2014 г.), международная научно-техническая конференция «Металлообработывающие комплексы и робототехнические системы – перспективные направления научно-исследовательской деятельности молодых учёных и специалистов» (г. Курск, 2015), XIX международная научно-практическая конференция «Металлургия: технологии, инновации, качество» «Металлургия - 2015» (г. Новокузнецк, 2015 г.), международная научно-техническая конференция «Пром-Инжиниринг» International Conference on Industrial Engineering (Челябинск, 2016), XVI Научно-техническая конференция молодых работников (международный этап) (г. Магнитогорск, 2016), VIII конгресс молодых учёных (г. Санкт-Петербург, 2019 г.), международная научная конференция «Наука будущего» и Всероссийский молодёжный научный форум «Наука будущего – наука молодых» (г. Сочи, 2019 г, г. Москва, 2020 г.), международная научно-техническая конференция МГТУ им. Г.И. Носова (2014-2019 гг.), международная молодёжная научно-техническая конференция Mag-nitogorsk Rolling Practice (2019, 2020 гг.).

Автор является победителем конкурса «Славим человека труда!» в Уральском федеральном округе, в номинации лучший инженер-металлург (II место, 2016 г.), лауреатом конкурса молодёжных проектов «Челябинская область – это мы!» в номинации «Лучший научно-исследовательский проект»; финалистом конкурса научно-исследовательских проектов форума «Наука будущего – наука молодых» в 2019 и 2020 гг. (г. Сочи, г. Москва), победителем конкурса УМНИК (Фонд содействия инновациям) в г. Санкт-Петербург, в 2019 г.

Личный вклад соискателя заключается в постановке цели и задач исследования; в разработке и применении математической модели напряженно-деформированного состояния металла с ЛП для изучения факторов трансформации ликвационной неоднородности анализом результатов численного моделирования; в изучении формирования механических свойств и трещиностойкости ТЛП проведением лабораторных и производственных экспериментов; в обосновании химических композиций микролегированных сталей, предпочтительных для минимизации балла полосчатости толстолистового проката; в формулировке основных положений и выводов диссертации.

Публикации. Основные результаты диссертационной работы опубликованы в 19 научных трудах, в том числе 3 статьи в рецензируемых изданиях из перечня ВАК РФ, 2 статьи в изданиях, входящих в наукометрические базы данных Web of Science и Scopus и 2 монографиях.

Структура и объём работы. Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка литературы и трёх приложений. Текст диссертации изложен на 188 страницах машинописного текста, иллюстрирован 59 рисунками, содержит 16 таблиц. Библиографический список включает 178 источников.

Внедрение результатов диссертационных исследований. Результаты диссертационной работы в виде новых технологических решений внедрены в промышленных условиях ПАО «ММК», используются при проведении научно-исследовательской работы обучающихся и чтении специальных дисциплин по направлению «Металлургия» в ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова».

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационного исследования, обусловленная ужесточением требований к ТЛП для ТБД, что связано с освоением новых регионов добычи и транспортировки углеводородных полезных ископаемых, в том числе с повышенной сейсмичностью. Приведены цель и задачи исследования, а также научные положения, выносимые на защиту. Указаны новизна результатов исследования, теоретическая и практическая значимость работы.

В первой главе диссертации выполнен анализ современного состояния производства ТЛП для ТБД. Рассмотрены механизмы формирования механических свойств проката и факторы трансформации ликвационной неоднородности. Проанализированы способы предотвращения распространения лавинообразного разрушения в ТБД. Выполнен анализ современных способов испытаний материалов для ТБД, в том числе способов оценки трещиностойкости. Рассмотрены современные концепции разработки технологии производства ТЛП для ТБД, эксплуатируемых в тяжёлых климатических условиях.

На основании проведённого анализа сформулированы цель и задачи диссертационного исследования.

Во второй главе диссертации разработана математическая конечно-элементная модель процесса горячей прокатки толстого листа, которая позволяет анализировать напряженно-деформированное состояние (НДС) металла с учётом наличия осевой ликвационной неоднородности толщиной менее 1% толщины сляба и с ее помощью, в среде программного комплекса DEFORM 3D, получены данные, которые позволили отобразить влияние деформационных, скоростных и температурных режимов прокатки на эволюцию ЛП.

Модель отображает ЛП как область с особыми реологическими характеристиками в осевой части раската. (рисунок 1).

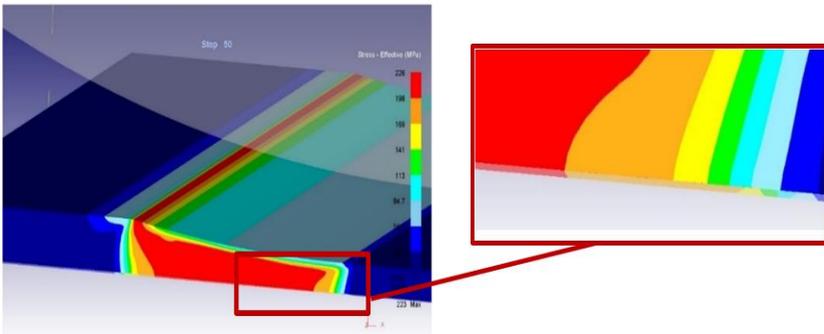


Рисунок 1 – Объемное моделирование процесса прокатки с ЛП

Прокатку моделировали для листов из стали класса прочности К60, задавая деформационные, скоростные и температурные условия, а также условия контактного трения по плану Хартли для уровней варьирования, указанных в таблице 1.

Таблица 1– Уровни варьирования факторов при вычислительном эксперименте

Варьируемый фактор	Границы варьирования	
	min	max
Температура t , °С	930	1220
Окружная скорость рабочих валков при макс. диаметре рабочего валка v , м/с	1	3,17
Величина обжатия за проход ε , %	6	25
Показатель трения в зоне контакта валок – заготовка m	0,5	0,85

Результаты вычислительного эксперимента позволили установить зависимость максимального напряжения, возникающего в ЛП $\sigma_1(t, v, \varepsilon, m)$, а также степени деформации ЛП по толщине в результате прохода $\delta(t, v, \varepsilon, m)$ от деформационного, скоростного и температурного режима прокатки

$$\begin{aligned} \sigma_1 = & 100,4 - 23,6 \frac{t - 1075}{145} + 7,7 \frac{v - 2,085}{1,085} + +11,45 \frac{\varepsilon - 15,5}{9,5} \\ & - 5,4 \frac{(t - 1075)(v - 2,085)}{145 \cdot 1,085} - 9,9 \frac{(t - 1075)(\varepsilon - 15,5)}{145 \cdot 9,5} \\ & - 6 \frac{(t - 1075)(m - 0,675)}{145 \cdot 0,175} - 2,2 \frac{(v - 2,085)(\varepsilon - 15,5)}{1,085 \cdot 9,5} \\ & - 2,9 \frac{(v - 2,085)(m - 0,675)}{1,085 \cdot 0,175} - 5,1 \frac{(\varepsilon - 15,5)(m - 0,675)}{9,5 \cdot 0,175} \quad (1) \\ & - 2,8 \frac{(v - 2,085)^2}{1,085^2} - 2,5 \frac{(\varepsilon - 15,5)^2}{9,5^2}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \delta = & 15,9 - 2 \frac{t - 1075}{145} + 9,4 \frac{\varepsilon - 15,5}{9,5} + 1,8 \frac{(v - 2,085)(\varepsilon - 15,5)}{1,085 \cdot 9,5} - \\ & 1,3 \frac{(t - 1075)^2}{145^2} + 0,5 \frac{(v - 2,085)^2}{1,085^2} + 0,7 \frac{(m - 0,675)^2}{0,175^2}. \quad (2) \end{aligned}$$

Так как именно течение металла в очаге деформации способствует дроблению ЛП, наиболее эффективным режимом деформации считаем такой режим, при котором величина $\sigma_1(t, v, \varepsilon, m)$ обеспечивает наибольшую степень деформации ЛП. Таким образом, именно изменение толщины ЛП является параметром, характеризующим эффективность процесса прокатки, и задача поиска эффективного режима была сформулирована следующим образом

$$\begin{cases} \delta \rightarrow \max \\ \sigma_1 \in \sigma(t, v, \varepsilon, m); \\ P \leq [P]_{\max} \\ M_{\text{пр}} \leq [M]_{\max} \\ t \in \{t\} \\ \varepsilon \in \{\varepsilon\} \end{cases} \quad (3)$$

Изучение поверхностей откликов, аналогичных представленным на рисунке 2, показало, что условия контактного трения практически не влияют на степень деформации ЛП. Наиболее эффективной является прокатка при степенях деформации 15-20 % со скоростью 2,5-3,0 м/с в интервале температур 1010-1080 °С.

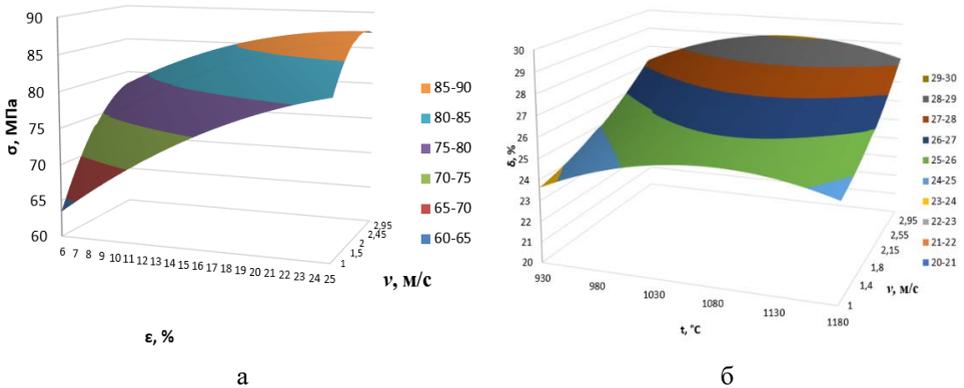


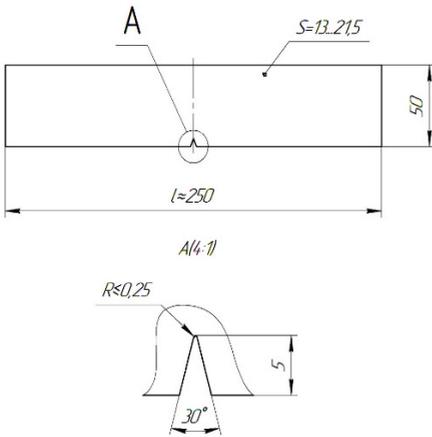
Рисунок 2 – Поверхности отклика регрессионных моделей: а – зависимость напряжений в очаге деформаций ЛП в координатах ε - v при $t=1220^\circ\text{C}$, $m=0,5$; б – изменение толщины ЛП после прохода в координатах t - v при $\varepsilon=25\%$, $m=0,5$

Третья глава диссертации посвящена исследованию механических свойств и трещиностойкости ТЛП. Исследование проводили на образцах из стали классов прочности К52, К56, К60, отобранных от промышленных партий проката, произведённых по различным технологиям с использованием различных концепций легирования (таблица 2).

Оценку статической трещиностойкости проводили на основании методики ГОСТ 25.506-85. При этом, чтобы учесть влияние полосчатости на трещиностойкость, применяли метод трёхточечного изгиба полнотолщинного образца (рисунок 3). Исходя из результатов анализа величины раскрытия в вершине трещины δ_c сталь класса прочности К56 ($4,134 \cdot 10^{-3}$ м) показала результаты ниже, чем сталь К52 ($5,249 \cdot 10^{-3}$ м). Наилучшие значения у стали класса прочности К60 ($27 \cdot 10^{-3}$ м).

Таблица 2 – Химический состав исследуемых образцов

Класс прочности стали	Химический состав																
	C	Si	Mn	S	P	Cr	Ni	Cu	Al	N ₂	V	Ti	Nb	As	Mo	B	Sn
К60	0,07	0,30	1,66	0,003	0,006	0,03	0,17	0,12	0,04	0,005	0,003	0,024	0,052	0,003	0,006	0,0007	0,002
К56	0,07	0,35	1,74	0,002	0,01	0,13	0,05	0,04	0,031	0,005	0,006	0,017	0,047	0,002	0,003	0,0006	0,003
К52	0,12	0,45	1,46	0,003	0,011	0,05	0,03	0,04	0,031	0,005	0,005	0,024	0,028	0,004	0,007	0,0005	0,003



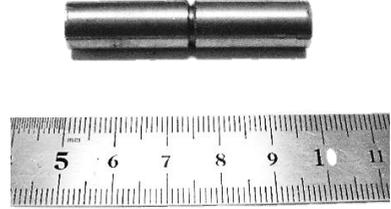
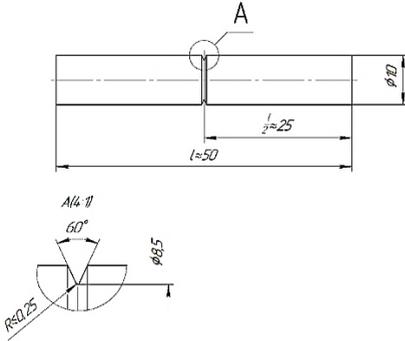
а

б

Рисунок 3 – Эскиз образца (а) и установка (б) для испытания на трещиностойкость при трехточечном изгибе

Чтобы оценить трещиностойкость с учётом действия циклических нагрузок, применили метод поперечного изгиба при вращении, который позволяет производить исследование при концентраторах напряжения различной формы. В нашей работе применили цилиндрический образец с V-образным концентратором напряжений (рисунок 4).

Было подготовлено по три образца из стали класса прочности К52, К56 и К60. Подготовка образцов производилась в соответствии с ГОСТ 25.502-79, а обработку результатов выполнили по методу Робертсона. Сначала построили диаграмму выносливости Веллера (рисунок 5). Для более удобного сравнения результатов, характеризующих выносливость сталей разных марок, шкала напряжений представлена в процентах от σ_B .



а

б

Рисунок 4 – Эскиз (а) и образец (б) для проведения экспериментов на поперечный изгиб при вращении

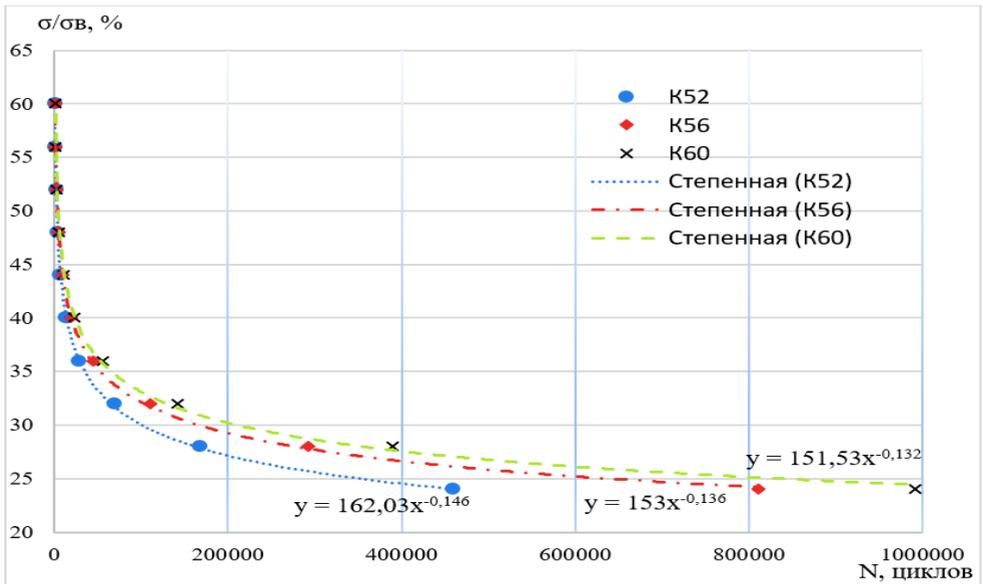


Рисунок 5 – Экспериментальные диаграммы Веллера для сталей марок K52, K56 и K60

По экспериментальным значениям построены аппроксимации кривых на диаграмме Веллера и определена выносливость сталей (таблице 3).

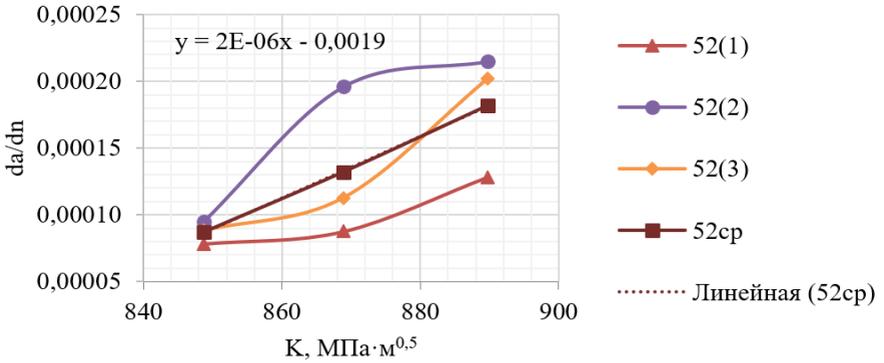
Таблица 3 – Характеристики пределов выносливости трубных марок сталей

Класс прочности	σ_B , МПа	Функция	σ_{-1} , МПа	
			при $N_q = 10^7$	при $N_q = 10^8$
K52	560	$\sigma_{-1} = \frac{\sigma_B \cdot 162,03}{100N^{0,146}}$	86,3	61,6
K56	580	$\sigma_{-1} = \frac{\sigma_B \cdot 153}{100N^{0,136}}$	99,1	72,5
K60	640	$\sigma_{-1} = \frac{\sigma_B \cdot 151,53}{100N^{0,132}}$	115,5	85,2

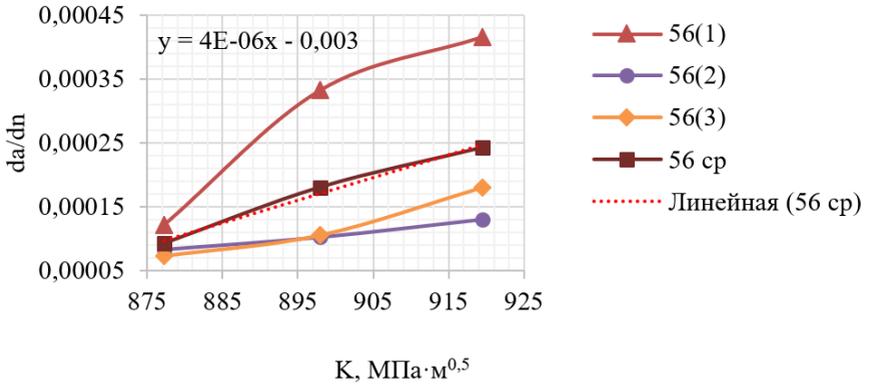
Полученные данные подтвердили известный факт, что увеличение временного сопротивления способствует повышению многоциклового выносливости стали. Однако, для анализа возможности использования ТЛП в сейсмоактивных регионах в первую очередь интерес представляет характеристика трещиностойкости ТЛП при малоциклового усталости. Опираясь на известные исследования сейсмологов, число циклов ограничили величиной 2000. В указанной области также испытывали по три образца стали классов прочности K52, K56, K60.

По результатам испытаний построили кинетические диаграммы усталостного разрушения (КДУР), отражающие зависимость между скоростью распространения трещины v и коэффициентом интенсивности напряжений в вершине трещины. При этом, на основании методики определения трещиностойкости, предложенной профессором В.С. Ивановой, критическую интенсивность напряжений определяли по формуле $K_{1c} = \sigma \sqrt{\pi a_k}$, где σ – действующее максимальное брутто-напряжение цикла, МПа; a_k – критическая длина трещины, мм. Скорость распространения трещины оценивалась производной da_k/dn , где n – число циклов. На рисунке 6 приведены КДУР для каждого образца, а также проведена прямая по усредненным значениям. В соответствии с методикой скорость распространения трещины оценивается величиной коэффициента при аргументе в уравнении данной прямой. Анализ линейных зависимостей показал, что коэффициенты аргументов для сталей K52 и K60 одинаковые, а для стали класса прочности K56 коэффициент выше, что говорит о более низкой трещиностойкости стали K56.

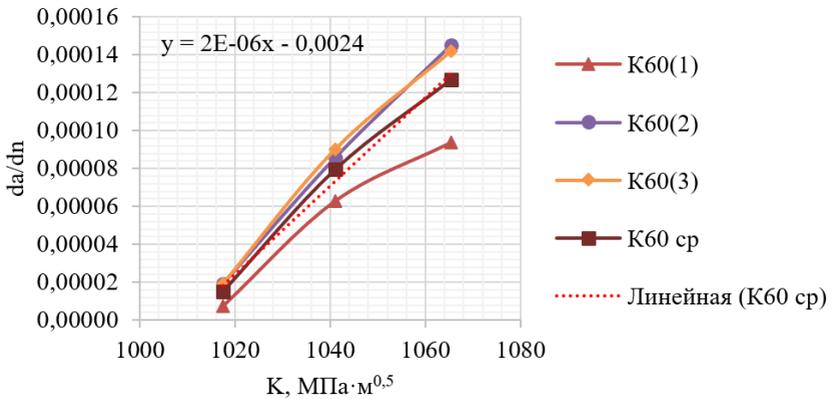
Также изучили изломы образцов (рисунки 7-9). Установили, что в образце стали класса прочности K52 присутствует ЛП, а в образце стали K60 – точечный дефект. Усталостная и переходная зона в стали класса прочности K52 больше, чем в стали класса прочности K56. Представленные данные позволяют утверждать, что оценка трещиностойкости только по излому образца может оказаться недостаточно информативной.



а



б



в

Рисунок б – КДУР для сталей класса прочности K52 (а), K 56 (б) и K60 (в)

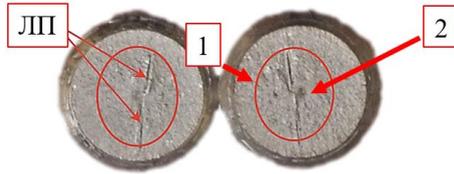


Рисунок 7 – Образец стали класса прочности K52 после испытаний
ЛП – ликвационная полоса; 1 – усталостная и переходная зона;
2 – зона хрупкого излома

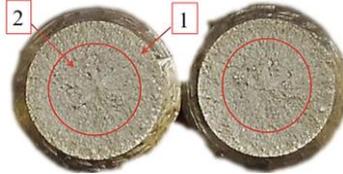


Рисунок 8 – Образец стали класса прочности K56 после испытаний
1 – усталостная и переходная зона; 2 – зона хрупкого излома

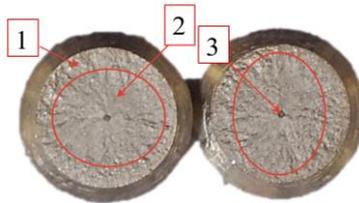


Рисунок 9 – Образец стали класса прочности K60 после испытаний
1 – усталостная и переходная зона; 2 – зона хрупкого излома 3 – дефект

Так как выполненные исследования показали преимущества стали класса прочности K60 для обеспечения высокой трещиностойкости толстых листов (в том числе и при знакопеременных нагрузках), исследовали изменчивость химического состава, структуры и механических свойств такого проката в промышленных условиях. Выполнен сплошной и выборочный анализ выборки (2391 строковое значение) результатов приемно-сдаточных испытаний, по результатам которого рекомендовали химический состав стали для ТБД, применяемых в зонах повышенной сейсмичности (таблица 4)

Таблица 4 – Химический состав стали класса прочности K60 (%)

C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	V	Nb	Ti	Al	Cu	B
0,06-0,08	0,25-0,35	1,6-1,7	до 0,08	0,2-0,3	0,006	0,020-0,035	0,045-0,055	0,015-0,030	0,035-0,045	0,10-0,20	0,006

В четвертой главе диссертации с применением корреляционного анализа дополнены сведения о влиянии на полосчатость, механические свойства и трещино-

стойкость толстолистового проката таких элементов, как сера, фосфор, углерод, марганец, ванадий, кремний, бор, алюминий, ниобий и титан. Разработан алгоритм совершенствования технологии производства толстолистового проката для ТБД с применением совокупности интегрированных критериев, дополненный определением балла полосчатости, а также оцениванием трещиностойкости по полнотолщинным образцам и методом поперечного изгиба с вращением (рисунок 10). Отражены вопросы практического применения разработанных рекомендаций.

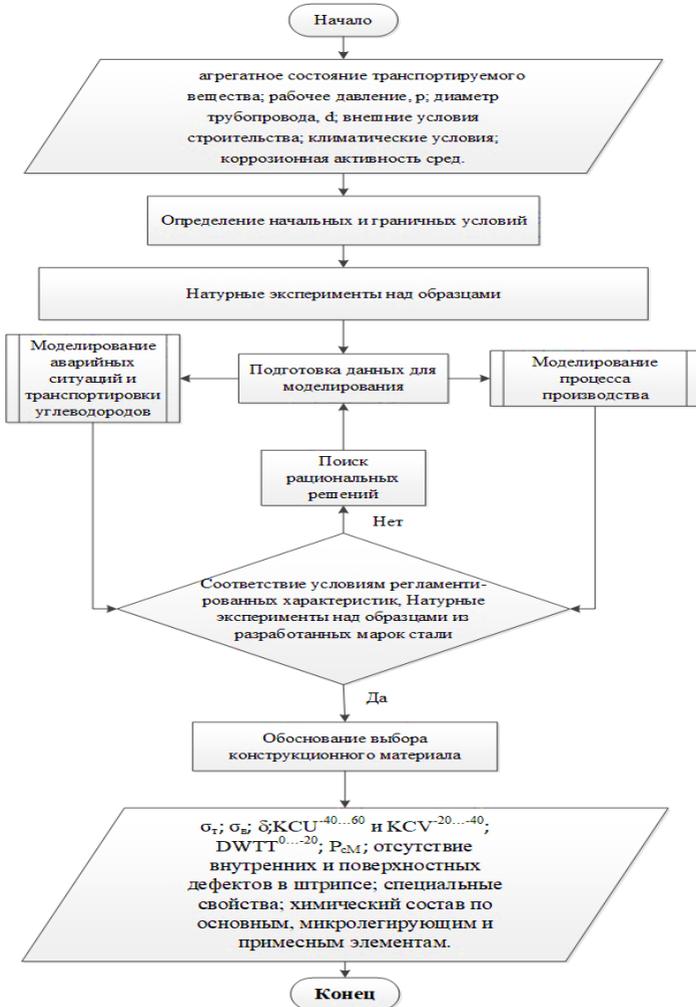


Рисунок 10 – Алгоритм поиска решения разработки технологии производства высокопрочного толстолистового проката для трубопроводов, работающих в условиях повышенной сейсмичности

С применением алгоритма была усовершенствована технологии производства ТЛП класса прочности К60 для ТБД с пониженным баллом полосчатости и повышенным комплексом механических свойств. Установлено, что предпочтительной схемой прокатки является продольная с протяжкой и разбивкой ширины. Дробление ЛП целесообразно осуществлять на черновой стадии прокатки и при рекомендованном химическом составе стали (см. таблица 4.) необходимо применять следующие деформационно-скоростные и температурные режимы: $t = 1010-1080$ °С, $v = 2,5-3,0$ м/с, $\varepsilon = 15-20\%$.

Реализация предлагаемых рекомендаций позволила получать на толстолистовом реверсивном стане ТЛП для ТБД со стабильным уровнем механических свойств, соответствующем классу прочности К60, а также с низким баллом полосчатости, что создаёт предпосылки для минимизации аварийности при эксплуатации ТБД в районах с повышенной сейсмической активностью.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе на основании выполненных взаимосвязанных исследований решена актуальная научно-техническая задача – расширение применимости трубного толстолистого проката путём совершенствования термомеханической обработки и уточнения композиции микролегирующих элементов на основе комплексного подхода оценки механических свойств, численного моделирования и статистической обработки большого объёма промышленных данных.

1. Изучены причинно-следственные связи механики разрушения труб большого диаметра, которые эксплуатируют в качестве нефтегазопровода в сейсмоактивных регионах. Установлено, что существенным фактором трещиностойкости толстолистого проката является полосчатость структуры, которая образуется в результате деформации ликвационной неоднородности. Показано, что проблема ликвационной неоднородности и полосчатости наиболее остро проявляется при производстве ТЛП из микролегированных сталей. Впервые получены количественные оценки влияния балла полосчатости на механические свойства готового проката. По результатам корреляционного анализа взаимосвязи между баллом полосчатости и результатами механических испытаний (*KCV*, *KCU*, ИПГ), а также между баллом полосчатости и содержанием химических элементов в стали сформулированы рекомендации по химическому составу стали для ТБД, предназначенных к эксплуатации в зонах повышенной сейсмичности.

2. Разработаны математическая модель НДС при прокатке толстого листа с учётом наличия ликвационной неоднородности и методом планирования вычислительного эксперимента получены зависимости, отображающие сопротивление деформации $\sigma(t, v, \varepsilon, m)$ и степень деформации толщины ЛП $\delta(t, v, \varepsilon, m)$. Установлено, что наибольшая степень деформации ЛП обеспечивается прокаткой при температуре 1010-1080 С, со скоростью $v = 2,5-3,0$ м/с и с обжатиями 15-20%.

3. Определены критерии соответствия толстолистого проката условиям эксплуатации труб большого диаметра в условиях повышенной сейсмичности. Исследованием трещиностойкости по схеме трёхточечного изгиба полнотолщинных образ-

цов с оценкой по критическим коэффициентам интенсивности напряжений K , раскрытию в вершине трещины δ_c и критическим значениям J -интеграла установлено, что наилучшими характеристиками трещиностойкости обладает сталь с химическим составом класса прочности К60 (раскрытие в вершине трещины δ_c стали класса прочности К60: $27 \cdot 10^{-3}$ м).

Такой же вывод получен при исследованиях на малоцикловую усталость цилиндрических образцов с V-образным надрезом методом поперечного изгиба с вращением. С учётом сказанного для производства ТБД, предназначенных к эксплуатации в районах повышенной сейсмичности, рекомендовано применять ТЛП из стали класса прочности К60. Пороговые коэффициенты интенсивности напряжений для сталей категорий прочности К52, К56, К60, которые составили 845; 875 и 1015 МПа·м^{1/2} соответственно. При этом выявлена склонность стали класса прочности К56 к более быстрому росту трещины в сравнении с К52 и К60 на основании величины коэффициента при аргументе в уравнении скорости распространения трещины.

4. Разработан алгоритм совершенствования технологии производства толстолистового проката для труб большого диаметра с применением совокупности интегрированных критериев, дополненный определением балла полосчатости, а также оцениванием трещиностойкости по полнотолщинным образцам и методом поперечного изгиба с вращением. С использованием указанного алгоритма разработаны научно обоснованные рекомендации (предпочтительный химический состав стали класса прочности К60, схема прокатки, а также деформационный, температурный и скоростной режим прокатки), обеспечившие пригодность ТЛП для ТБД, удовлетворяющих условиям эксплуатации магистральных нефтегазопроводов в сейсмоактивных регионах.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ ИЗЛОЖЕНО В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ:

Публикации в журналах из Перечня ВАК РФ:

1. Чикишев, Д.Н. Математическое моделирование изменения прочностных характеристик микролегированных сталей в процессе термомеханической обработки / Д.Н. Чикишев, Е.Б. Пожидаева // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2014. – Т. 16. – № 4(3). – С. 664-668.
2. Салганик, В.М. Анализ структурно-фазовых превращений в низколегированных сталях на основе дилатометрических исследований / В.М. Салганик, Д.Н. Чикишев, Е.Б. Пожидаева и др. // Металлург. – 2015. – № 9. – С. 32-37. (Salganik V. M. Analysis of Structural and Phase Transformations in Low-Alloy Steels Based on Dilatometric Studies / V. M. Salganik, D. N. Chikishev, E. B. Pozhidaeva, D. G. Nabatchikov // Metallurgist. – 2016. – Vol. 59. – No 9-10. – P. 766-773.) (Web of Science).

3. Чикишев, Д.Н. Анализ причин вертикального изгиба переднего конца полосы при горячей прокатке на основе математического моделирования / Д.Н. Чикишев, Е.Б. Пожидаева // Известия высших учебных заведений. Чёрная металлургия. – 2016. – Т. 59. – № 3. – С. 204-208.

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

4. Salganik, V.M. Influence of Steel Chemical Composition and Modes of the Thermomechanical Treatment on Mechanical Properties of a Hot Rolled Plate // V.M. Salganik, D.N. Chikishev, E.B. Pozhidaeva // Solid State Phenomena (Materials Science Forum). – 2016. – Vol. 870. – P. 584-592.

5. Chikishev, D.N. Mathematical modeling of steel chemical composition and modes of thermomechanical treatment influence on hot-rolled plate mechanical properties / D.N. Chikishev, E.B. Pozhidaeva // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2017. – Vol. 92. – Issue 9-12. – P. 3725-3738.

Монографии:

6. Чикишев, Д.Н. Разработка экономнолегированных марок сталей со специальными свойствами / Д.Н. Чикишев, Д.О. Пустовойтов, Е.Б. Пожидаева (монография; электронное издание) // М.: ФГУП НТЦ «Информрегистр». – 2015. – № гос. рег. 01201460204.

7. Разработка режимов контролируемой прокатки трубной заготовки повышенных классов прочности: монография / В.М. Салганик, Д.Н. Чикишев, Л.О. Пустовойтов, Д.Г. Набатчиков, Е.Б. Пожидаева. —Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2016.— 87 с.

Публикации в иных изданиях:

8. Салганик, В.М. Современное состояние производства заготовок для труб большого диаметра / В.М. Салганик, Д.Н. Чикишев, Е.Б. Блондинская и др. // Наука и производство Урала: межрегион. сборник научных трудов. —Новотроицк: НФ НИТУ «МИСиС». – 2014. – Вып.10. – С 89-91.

9. Чикишев, Д.Н. Современные концепции разработки низколегированных сталей для топливно-энергетического комплекса России / Д.Н. Чикишев, Е.Б. Блондинская, П.С. Тарасов и др. // Наука и производство Урала: межрегиональный сборник научных трудов.— Новотроицк: НФ НИТУ «МИСиС». – 2014. – Вып.10. – С. 92-94.

10. Чикишев, Д.Н. Актуальные направления развития производства заготовок для труб большого диаметра / Д.Н. Чикишев, Е.Б. Пожидаева // Международный союз учёных «Наука. Технологии. Производство». – 2014. – № 3. – С. 125-128.

11. Чикишев Д.Н. Анализ особенностей производства высокопрочного толстолистового проката со специальными эксплуатационными свойствами/ Д.Н. Чикишев, Е.Б. Пожидаева// Металлообрабатывающие комплексы и робототехнические системы - перспективные направления научно-исследовательской деятельности молодых учёных и специалистов: сборник научных трудов международной научно-технической конференции, 2015. —С. 212-216.

Публикации в сборниках трудов конференций:

12. Чикишев, Д. Н. Анализ причин вертикального изгиба переднего конца полосы при горячей прокатке на основе математического моделирования / Д. Н. Чикишев, Е. Б. Пожидаева // Современные проблемы горно-металлургического комплекса. Наука и производство: Материалы Одиннадцатой Всероссийской научно-практической конференции, с международным участием, Старый Оскол, 03–05 декабря 2014 года. – Старый Оскол: Старооскольский технологический институт (филиал) ФГАОУ ВПО "Национальный исследовательский технологический университет "МИСиС", 2014. – С. 111-118.
13. Губанов, С.А. Контролируемая прокатка трубных сталей/ С.А. Губанов, Д.Н. Чикишев, Е.Б. Блондинская // Наука и производство Урала. —2014.— № 10.— С. 82-85.
14. Чикишев, Д. Н. Дилатометрические исследования в определении фактических температур структурно-фазовых превращений / Д. Н. Чикишев, Е. Б. Блондинская // Новые материалы и технологии: состояние вопроса и перспективы развития : сборник материалов Всероссийской молодежной научной конференции, Саратов, 24–26 июня 2014 года. – Саратов: ИЦ "Наука", 2014. – С. 112-115.
15. Пожидаева, Е.Б. Модельное представление участка трубы большого диаметра, испытывающего сложное динамическое нагружение/ Е.Б. Пожидаева, Д.Н. Чикишев, В.М. Салганик // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования. —2015.— Т. 1.— С. 140-143.
16. Пожидаева, Е. Б. Оценка современных методов контроля распространения разрушения в трубах большого диаметра / Е. Б. Пожидаева, Д. Н. Чикишев // Металлургия: технологии, инновации, качество, Новокузнецк, 15–16 декабря 2015 года / Под общей редакцией Е.В. Протопопова. – Новокузнецк: Сибирский государственный индустриальный университет, 2015. – С. 229-233.
17. Пожидаева, Е. Б. Исследование механизмов деформации и разрушения тонкого стержня / Е. Б. Пожидаева, Д. Н. Чикишев, Ю. А. Пожидаев // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования : Тезисы докладов 77-й международной научно-технической конференции, Магнитогорск, 22–26 апреля 2019 года. – Магнитогорск: Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, 2019. – С. 133.
18. Пожидаева, Е. Б. Совершенствование технологии прокатки заготовок с внутренними дефектами / Е. Б. Пожидаева, Д. Н. Чикишев // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования : Тезисы докладов 77-й международной научно-технической конференции, Магнитогорск, 22–26 апреля 2019 года. – Магнитогорск: Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, 2019. – С. 134.
19. Pozhidaeva, E. B. Improving the rolling process of workpieces with internal defects / E. B. Pozhidaeva, D. N. Chikishev // Magnitogorsk rolling practice 2019 : Материалы IV международной молодежной научно-практической конференции, Магнитогорск, 04–07 июня 2019 года / Под редакцией А.Г. Корчунова. – Магнитогорск: Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, 2019. – Р. 22-23.