

На правах рукописи



ПИСЬМЕННЫЙ ЕВГЕНИЙ АЛЕКСАНДРОВИЧ

**ПОВЫШЕНИЕ РЕСУРСА РАБОТЫ ФРИКЦИОННЫХ КЛИНЬЕВ
ГРУЗОВЫХ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ ВАГОНОВ НА ОСНОВЕ
СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИИ
ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ**

2.6.1. Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов

**АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Москва – 2025

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Алтайский государственный технический университет имени И.И. Ползунова»

Научный руководитель: **МАРКОВ Андрей Михайлович**, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Технология машиностроения» ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет имени И.И. Ползунова»

Официальные оппоненты: **ФЕДИН Владимир Михайлович**, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Технология транспортного машиностроения и ремонта подвижного состава» ФГАОУ ВО «Российский университет транспорта»

ИШКОВ Алексей Владимирович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Технология конструкционных материалов и ремонта машин» ФГБОУ ВО «Алтайский государственный аграрный университет»

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет»

Защита диссертации состоится 30 сентября 2025 г. в 11 часов на заседании диссертационного совета 31.1.007.01 на базе ФГУП «ЦНИИчермет им. И.П. Бардина» по адресу: 105005, Москва, ул. Радио, д. 23/9, стр. 2.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах с указанием даты составления, заверенные печатью, просьба направлять на имя ученого секретаря диссертационного совета.

С диссертацией можно ознакомиться в технической библиотеке ФГУП «ЦНИИчермет им. И.П. Бардина» и на сайте <http://www.chermet.net>.

Автореферат разослан «___» _____ 2025 г.

Ученый секретарь диссертационного совета 31.1.007.01,
кандидат технических наук



Алексей Андреевич Холодный

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Повышение эффективности грузовых перевозок на железнодорожном транспорте в Российской Федерации влечет необходимость модернизации узлов и агрегатов вагонов. Увеличение ресурса и эффективности работы деталей тележки грузового вагона, может быть достигнуто ограниченным изменением конструктивных параметров и свойств материала поверхностей трения фрикционного клина. Фрикционный клин представляет собой multifunctional узел. Он входит в состав рессорного подвешивания, обеспечивая гашение горизонтальных и вертикальных колебаний грузовых вагонов. Усилие прижатия фрикционного клина к фрикционной планке и боковой раме тележки зависит от загрузки вагона, а сила трения прямо пропорциональна прогибу пружин и возрастает с его увеличением. От стабильной работы фрикционных клиньев зависят динамические качества грузовых вагонов.

От стабильной работы фрикционного гасителя колебаний напрямую зависят динамические качества грузовых вагонов и безопасность грузоперевозок. При этом работоспособность клиньев определяется такими характеристиками, как прочность и износостойкость.

В настоящее время на промышленных предприятиях Российской Федерации серийно изготавливаются фрикционные клинья, в основном, из стали марки 20Л либо чугуна СЧ35. Основными проблемами при эксплуатации вагонов, оборудованных такими фрикционными клиньями, является недостаточная износостойкость и, как следствие, сокращение межремонтного пробега вагона в целом. В процессе эксплуатации чаще всего наблюдается преждевременный износ наклонной и рабочей поверхностей, обусловленные низкими показателями прочности, что, в свою очередь, может послужить причиной отцепок вагонов в ремонт. Все вышеперечисленные недостатки материалов, применяемых в настоящее время для изготовления фрикционных клиньев, вызывают необходимость повышения прочностных характеристик наряду со снижением материалоемкости фрикционных клиньев узла гашения колебаний за счет применения сталей, обладающих повышенными показателями прочности и износостойкости.

Степень разработанности темы исследования

Проведенные как отечественными, так и зарубежными учеными исследования показали, что для повышения нагрузочной способности и износостойкости фрикционного клина необходимо повышать степень легирования используемого материала – то есть переходить от используемой в настоящее время стали типа 20Л к сталям типа 35ГСА и т.п. При этом использование чугунов для изготовления фрикционного клина практически единогласно при-

знается менее предпочтительным вариантом по сравнению со сталью в силу специфики работы чугунного фрикционного клина в условиях ударно-абразивного изнашивания.

Наибольший вклад в исследования по повышению износостойкости деталей энергопоглощающих аппаратов и деталей подвески железнодорожного транспорта внесли такие ученые, как Б.В. Борщ, В.П. Ефимов, Н.А. Костина, Д.П. Марков, А.Н. Носов, В.М. Федин, А.А. Шаду, F. Barbaro, D. Kumar, P. Langenberg, F. Peimao, R. Song, X. Zhang, H. Zhao и др. По результатам исследований, проведенных вышеперечисленными авторами, повышение степени легирования деталей подвески железнодорожного транспорта в комплексе с термической обработкой позволяет повысить надежность и межремонтный период железнодорожных вагонов при одновременном снижении материалоемкости этих деталей. Кроме того, наибольшее предпочтение в литературе отдается легированным конструкционным сталям, термообработанным на структуру бейнита либо отпущенного мартенсита. Фрикционные клинья со структурой бейнита или отпущенного мартенсита имеют высокие показатели прочности, износостойкости и удовлетворительные показатели ударной вязкости. Повышение прочностных характеристик фрикционных клиньев позволяет снизить их материалоемкость и, как следствие, облегчить конструкцию фрикционного клина. В литературе сведения о влиянии технологических параметров термической обработки литых сталей, содержащих порядка 0,5 масс. % углерода и около 1,5 масс. % кремния, на их структурно-фазовое состояние, механические свойства и стойкость при ударно-абразивном износе противоречивы и недостаточны.

Цель диссертационной работы заключается в разработке технологии термической обработки литых фрикционных клиньев из стали 50СЛ, обеспечивающей повышенные показатели ресурса работы при одновременном снижении материалоемкости их производства.

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

1. Определить температуры критических точек, построить диаграммы изотермического распада переохлажденного аустенита, термокинетическую диаграмму распада аустенита при непрерывном охлаждении, определить прокаливаемость стали 50СЛ.
2. Исследовать влияние режимов термообработки на структурно-фазовое состояние стали 50СЛ.
3. Установить и научно обосновать влияние режимов термической обработки на трибологическое поведение и износостойкость стали 50СЛ.
4. Разработать режим термической обработки стали 50СЛ, обеспечивающий наилучший комплекс эксплуатационных свойств, определяемый высокими показателями прочности и износостойкости.

5. Провести испытания фрикционных клиньев из стали 50СЛ, термообработанных по разработанному режиму, в приближенных к реальным условиям эксплуатации для подтверждения показателей прочности и износостойкости.

Научная новизна

1. Впервые методом физического и математического моделирования установлены закономерности структурно-фазовых превращений распада аустенита стали марки 50СЛ в условиях различных температурно-скоростных параметров охлаждения с определением глубины прокаливаемости.

2. Экспериментально обоснована целевая мартенсито-бейнитная структура стали марки 50СЛ (93–95 % мартенсита + 5–7 % бейнита), обеспечивающая требуемый комплекс механических свойств и ударной вязкости, превышающей на 30% требования НТД ОАО «РЖД» к материалу фрикционных клиньев.

3. Научно обоснован температурно-скоростной режим термической обработки отливок из стали марки 50СЛ, обеспечивающий однородность химического состава по содержанию углерода в объеме отливки, повышающий ударную вязкость при гарантированной твердости за счет формирования целевой мартенсито-бейнитной структуры стали, упрочненной дисперсными выделениями наноразмерных карбидных фаз размером 70-100 нм.

4. На основе сравнительных трибологических испытаний при идентичных нагрузочно-скоростных режимах показано, что в паре трения для изделия из стали марки 50СЛ в качестве контртела наиболее перспективными являются детали из сталей марок 50СЛ и 20Л, позволяющие существенно (на 56 % и 28 % соответственно) уменьшить интенсивность износа относительно применяемой в настоящее время базовой пары 20Л-30ХГСА.

Теоретическая и практическая значимость работы

1. Впервые предложено использовать для изготовления детали железнодорожного транспорта «фрикционный клин» среднеуглеродистую кремнистую сталь 50СЛ, что позволило на 32,5 % снизить его массу при сохранении эксплуатационных характеристик.

2. Установлены пределы скоростей охлаждения для формирования мартенсито-бейнитной структуры в стали марки 50СЛ, обеспечивающей получение ударной вязкости более 350 кДж/м² при твердости 260...340 НВ.

3. В результате стендовых испытаний подтверждено, что предлагаемая конструкция фрикционных клиньев из стали 50СЛ позволяет на 50 % увеличить межремонтный период тележек грузовых вагонов железнодорожного транспорта. Микроструктура трущихся поверхностей стали 50СЛ в результате испытаний на трение, значимых изменений не претерпевает, что свидетельствует об относительно слабом разогреве трущихся поверхностей из стали 50СЛ и, соответственно, высокой стабильности фрикционного сопряжения.

4. По результатам диссертационной работы зарегистрированы технические условия (далее – ТУ) на марку стали 50СЛ и технологию изготовления из стали 50СЛ фрикционных клиньев узла гашения колебаний.

5. По результатам стендовых испытаний, имитирующих реальные условия эксплуатации, а затем и испытаний в условиях реальной эксплуатации, получен сертификат соответствия требованиям ОАО «РЖД», а фрикционные клинья рекомендованы к внедрению на грузовом подвижном составе в Российской Федерации.

Методология и методы исследования

Объектами исследований являлись используемые в грузовых вагонах фрикционные клинья и материалы, из которых они изготавливаются: стали 30ХГСЛ, 38ХСЛ, 20Л, 20ГЛ, а также разработанная при выполнении диссертационной работы конструкция фрикционного клина, защищенная патентом на полезную модель № 194823 (Приложение А), которую в целях обеспечения требуемых показателей прочности и износостойкости предложено изготавливать из стали 50СЛ.

Исследование структурно-фазовых состояний материалов и пробоподготовка, а также механические испытания проводились на оборудовании центра коллективного пользования АлтГТУ, а также с использованием лабораторно-исследовательской инфраструктуры инжинирингового центра «ХимБио-Маш». Натурные испытания клиньев в условиях статического, динамического и циклического нагружений проводились с использованием средств измерений и испытательного оборудования АО «ИЦ ТСЖТ». Основными методами структурных исследований являлись оптическая микроскопия (Carl Zeiss Axio Observer Z1m и программно-аппаратный комплекс Thixomet PRO), растровая (Hitachi SU3800) электронная микроскопия. Фазовый состав материалов оценивали методами рентгеновской дифракции (дифрактометр ДРОН-6). Характер распределения химических элементов в анализируемых материалах изучали с применением метода микрорентгеноспектрального анализа (EDS QUANTAX Brucker). Для оценки микротвердости исследуемых материалов использовали полуавтоматический микротвердомер МН-6. Испытания материалов в условиях одноосного растяжения проводили на установке Instron 3369. Испытания на ударный изгиб по Шарпи были реализованы с применением маятникового копра КМ-300. В качестве испытательного оборудования для оценки трибологических свойств выступала машина трения УМТ 2168. Исследования проводились с использованием специально изготовленных образцов, представляющих собой пару «вал – колодка» в соответствии с методикой проведения испытаний.

Определение износостойкости фрикционных клиньев, изготовленных из стали 50СЛ, при приложении в вертикальном направлении 2×10^6 циклов ди-

намической нагрузки, проводилось путем оценки состояния и износа рабочих поверхностей фрикционных клиньев и фрикционных планок, завышения (занижения) клиньев, коэффициента относительного трения перед началом испытаний и в процессе испытаний. Первые измерения проводились через 250 000 циклов, а затем не реже одного раза каждые 500 000 циклов динамической нагрузки.

Положения, выносимые на защиту

1. Совокупность результатов исследования структурно-фазового состояния стали 50СЛ, термообработанной по различным режимам.

2. Технология термической обработки фрикционного клина из стали марки 50СЛ, заключающаяся в нагреве отливок деталей до 950 °С и выдержкой при этой температуре в течение 2 ч, охлаждение с печью до 850 °С и выдержкой при этой температуре в течение 0,3 ч и последующим охлаждением со скоростью 4–5 °С/с, и последующим отпуском при температуре 350 °С в течение 2 ч.

3. Результаты трибологических испытаний деталей пары трения 50СЛ–50СЛ, термообработанной по разработанному режиму, показавшие уменьшение износа на 56% по сравнению с используемой в настоящее время парой трения 20Л–20Л.

Степень достоверности результатов исследования

Достоверность полученных результатов обеспечивается применением комплекса актуальных методов исследований, а также использованием современного аналитического и испытательного оборудования.

Апробация результатов

Результаты работы были представлены и обсуждены на XIV Международной научно-практической конференции «Инновационные технологии в машиностроении» (ЮТИ ТПУ, г. Юрга, 2023 г.); IX Международной Российско-Казахстанской научно-практической конференции «Химические технологии функциональных материалов» (НГТУ, КазНУ им. Аль-Фараби, Алматы, Казахстан, Институт химии твердого тела и механохимии СО РАН, Новосибирск, 2023); XV Всероссийской конференции молодых ученых и специалистов «Будущее машиностроения России (БМР 2022)» (Москва, 2022 г.); тринадцатой Международной научно-практической конференции «Транспортная инфраструктура Сибирского региона» (Иркутск, 2022); IV Международной научно-практической конференции «Инновации в информационных технологиях, машиностроении и автотранспорте» (г. Кемерово, 2020 г.), международном молодежном форуме «Ломоносов-2020» (г. Москва, 2020 г.); международной конференции «Фундаментальные основы механохимических технологий» (г. Новосибирск, 2018 г.); международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы в машиностроении» (г. Новосибирск, 2017–2018 г.).

Публикации

По результатам диссертационного исследования опубликовано 19 печатных работ, 6 из которых входят в журналы, рекомендованные ВАК, 2 публикации представлены в издании, индексируемом в базах Web of Science и Scopus, 9 – в сборниках трудов докладов международных научно-технических конференций, 2 патента РФ на полезную модель.

Личный вклад автора диссертации:

определение цели и постановку задач исследования, изготовление образцов для комплексных испытаний, непосредственное проведение экспериментов и разработку режимов термообработки, анализ микроструктуры методами световой микроскопии, исследование фазового состава с помощью рентгенофазового анализа (РФА), выполнение механических испытаний, интерпретацию, систематизацию и сопоставление экспериментальных данных с литературными источниками, представление и обоснование выводов на основе полученных результатов.

Соответствие паспорту заявленной специальности

Тема и содержание диссертационной работы соответствуют научной специальности 2.6.1. Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов в части пунктов:

- Теоретические и экспериментальные исследования фазовых и структурных превращений в металлах и сплавах, происходящих при различных внешних воздействиях, включая технологические воздействия, и влияние сварочного цикла на металл зоны термического влияния, их моделирование и прогнозирование (п. 2);

- Разработка новых и совершенствование существующих технологических процессов объемной и поверхностной термической, химикотермической, термомеханической и других видов обработок, связанных с термическим или термомодеформационным воздействием, цифровизация и автоматизация процессов, а также разработка информационных технологий систем сквозного управления технологическим циклом, специализированного оборудования (п.б);

- Исследование работоспособности металлов и сплавов в различных условиях, выбор и рекомендация наиболее экономичных и надежных металлических материалов для конкретных технических назначений с целью сокращения металлоемкости, увеличения ресурса работы, повышения уровня заданных физических и химических характеристик деталей машин, механизмов, приборов и конструкций (п.8).

Структура и объем диссертационной работы

Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения и 5 приложений. Полный объем диссертации составляет 150 страниц, включая 58 рисунков и 27 таблиц. Список литературы содержит 133 наименования.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы исследования и показана степень ее разработанности, определены цель и задачи исследований, сформулирована научная новизна работы, представлена практическая значимость, описаны методология и методы исследования, сформулированы положения, выносимые на защиту, указаны сведения об апробации, публикациях и структуре диссертации.

В первой главе рассмотрены материаловедческие аспекты применения различных сталей и чугунов для изготовления фрикционных клиньев, влияние состава материалов и способов их термической обработки на механические и эксплуатационные свойства фрикционных клиньев, представлен обзор применяемых в настоящее время материалов, дан критический обзор трендов развития материалов и технологий для изготовления клиньев фрикционных.

Во второй главе приведено описание методик экспериментальных исследований и применяемого оборудования. Материалами для исследования являлись образцы из сталей, применяемых в современных конструкциях фрикционных клиньев: стали 30ХГСА, 20Л, 20ГЛ, 38ХСА, а также разработанная в рамках настоящей работы сталь 50СА. Элементный состав исследуемых плавок сталей определяли при помощи оптико-эмиссионного анализатора химического состава «G.N.R. Solaris CCD Plus». Отливки клина фрикционного из стали 50 СА, а также образцов-свидетелей для проведения исследований осуществляли литьем в песчано-глинистые составы (ПГС). В качестве ПГС использовали стандартную песчано-глинистую смесь, состоящую из смеси кварцевого песка, бентонитовой глины и воды. Для получения стержней использовали их формование по «Альфасет-процессу».

Структурное состояние исследуемых образцов выявляли путем химического травления:

- в травителе «Ниталь», представляющем собой 2–5 % раствор азотной кислоты в этиловом спирте;
- в травителе «Пикраль», представляющем собой 2–5 % раствор пикриновой кислоты в этиловом спирте;
- травителем Клемма I, представляющим насыщенный водный раствор тиосульфата натрия с добавлением 2–3 г пиросульфата калия – данный реактив окрашивает феррит, позволяет выявлять сегрегацию фосфора и перегрев;
- водным 8–15 % раствором пиросульфата натрия – данный реактив окрашивает в темный цвет мартенсит закалки, отпущенный мартенсит остается светлым;
- 800 мл бутилгликоля, 60 мл перхлорной кислоты и 140 мл дистиллированной воды – травили образцы электролитически при напряжении 4–9 В в

течение 15-25 с – данный способ травления использовался как альтернатива травлению реактивом «Ниталь», дающий более контрастные изображения микроструктуры, что особенно важно для съемок при больших увеличениях (x500 и более) как на оптическом, так и на электронном микроскопах.

Растровая электронная микроскопия проводилась на сканирующем электронном микроскопе Hitachi SU3800 с применением метода микрорентгено-спектрального анализа EDS QUANTAX Brucker. Исследования на электронном микроскопе проводили в режимах вторичных (SE) и обратно-рассеянных (BSE) электронов.

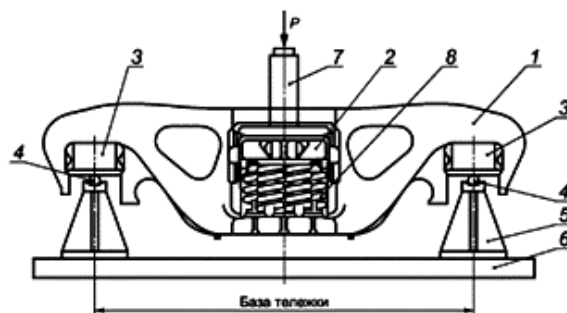
Наличие различных фаз подтверждали при помощи метода рентгеновской дифрактометрии при помощи прибора ДРОН-6.0 с источником рентгеновского излучения Cu K_α . Величину шага 2Θ выбирали равной 0,05 град. Время накопления – 10 с на точку. Пробоподготовку для рентгенодифракционных исследований производили аналогично пробоподготовке для металлографических исследований. Образцы для дифрактографических исследований травлению не подвергали.

Измерение твердости производили по методу Виккерса на полуавтоматическом микротвердомере МН-6 при нагрузках 0,98 и 9,8 Н согласно ГОСТ Р ИСО 6507-1-2007. Помимо измерения твердости по Виккерсу, использовали также методы определения твердости по Роквеллу и Бринеллю, испытания проводили согласно требованиям соответствующих стандартов.

Испытания на ударный изгиб проводили на маятниковом копре МК-300 с максимальной энергией удара 300 Дж на образцах с U-образным надрезом в качестве концентратора напряжений.

При подтверждении климатического исполнения клинья выдерживали в климатической камере при температуре от минус 60 °С до минус 58 °С в течение не менее 3 ч, затем подвергали испытаниям на статическую прочность. Время между извлечением объектов испытаний из климатической камеры и приложением силы сжатия не превышало 5 мин.

Отсутствие предельного состояния при приложении динамической нагрузки в вертикальном направлении контролировали на образцах, устанавливая их в оснастку, имитирующую работу рессорного подвешивания тележки грузового вагона. Схемы установки и приложения силы к оснастке для испытаний клиньев приведены на рисунке 1. Конструкция упругих элементов, расположенных под клиньями, карманов надрессорной балки, фрикционных планок и рессорного проема боковой рамы соответствовали конструкторской документации на тележку грузового вагона. Частота приложения динамической силы в ходе испытаний составляла 1,5 Гц. В процессе испытаний контролировали температуру нагрева, состояния и износ рабочих поверхностей клиньев, фрикционных планок, завывшение (занижение) клиньев, коэффициент относительного



- 1 – боковая рама; 2 – концевая часть наддрессорной балки; 3 – переходник;
 4 – цилиндрическая опора; 5 – опорная тумба; 6 – опорная поверхность;
 7 – нагружающее приспособление; 8 – рессорное подвешивание

**Рисунок 1. Схема установки и приложения силы к оснастке
 для испытаний клиньев**

трения перед началом испытаний и в процессе испытаний. Первые измерения проводили через 250 000 циклов, а затем не реже одного раза каждые 500 000 циклов динамической нагрузки.

Термическую обработку сталей проводили в лабораторной камерной печи SNOL, оснащенной ПИД-контроллером «ТЕРМОДАТ 16ЕЗ». Методы термической обработки выбирали в соответствии с маркой стали и требуемыми структурно-фазовым состоянием и механическими свойствами. Режимы термической обработки образцов отливок из стали 50СЛ, представлены в таблице 1.

Таблица 1. Режимы термической обработки образцов отливок из стали 50СЛ

Номер	Расшифровка режима
1	Нагрев до 850 °С, выдержка при этой температуре 2,5 ч, охлаждение с печью до 250 °С, далее – на воздухе.
2	Нагрев до 950 °С, выдержка 2 ч, остывание с печью до 850 °С, выдержка 0,3 ч, охлаждение в воде.
3	Нагрев до 950 °С, выдержка 2 ч, остывание с печью до 850 °С, выдержка 0,3 ч, охлаждение в масле.
4	Нагрев до 850 °С, выдержка 2,5 ч, охлаждение в воде.
5	Нагрев до 850 °С, выдержка 2,5 ч, охлаждение в масле.
6	Нагрев до 950 °С, выдержка 2,5 ч, охлаждение на спокойном воздухе.
7	Нагрев до 950 °С, выдержка 2 ч, остывание с печью до 850 °С, выдержка 0,3 ч, охлаждение в воде. Отпуск при 350 °С, 2 ч.
8	Нагрев до 950 °С, выдержка 2 ч, остывание с печью до 850 °С, выдержка 0,3 ч, охлаждение в масле. Отпуск при 350 °С, 2 ч.

В третьей главе исследована взаимосвязь режимов термической обработки со структурно-фазовым состоянием и механическими свойствами при помощи программных пакетов OpenCalphad, STATISTICA.

В целях повышения прочности и износостойкости предложено изготавливать разработанный фрикционный клин из стали 50СЛ, химический состав которой представлен в таблице 2.

Таблица 2. Химический состав стали 50СЛ

Марка стали	Массовая доля элементов, %								
	C	Si	Mn	Ni	S	P	Cr	Cu	Al
50СЛ	0,46–0,57	1,2–1,6	0,4–0,7	до 0,25	до 0,03	до 0,025	до 0,35	до 0,2	до 0,02

По результатам компьютерного моделирования в программном комплексе OpenCalphad определяли расчетные температуры критических точек для данной стали соответственно: $A_3 - 813 \pm 7^\circ\text{C}$, $A_1 - 746 \pm 4^\circ\text{C}$, при этом в случае medianного состава стали 50СЛ по основным легирующим элементам (углерод – 0,52 масс. %, кремний – 1,4 масс. %, марганец – 0,55 масс. %), температура критических точек составляет соответственно $A_3 - 811,1^\circ\text{C}$, $A_1 - 743,2^\circ\text{C}$ (рисунок 2).

Экспериментальная проверка рассчитанных в программном комплексе OpenCalphad критических точек производилась методом пробных закалок при соответствующих изотермических выдержках. Проведенные эксперименты позволили уточнить расчетные значения температурных интервалов: определенная эмпирическим путем методом пробных закалок температура точки A_{c3} составила $815 \pm 8^\circ\text{C}$, температура точки A_{c1} – соответственно $742 \pm 6^\circ\text{C}$. Максимальная температура начала бейнитного превращения – $506 \pm 14^\circ\text{C}$, а температура начала мартенситного превращения согласно экспериментальным данным – $312 \pm 3^\circ\text{C}$.

Определение глубины прокаливаемости стали производили на образцах Джомини методом торцевой закалки по ГОСТ 5557–69. Помимо прокаливаемости также определяли влияние температуры аустенитизации на ширину зоны прокаливаемости (рисунок 3).

Определение величины зерна в исходных образцах производили на продольных и поперечных (соответственно вдоль и поперек направления кристаллизации отливок) шлифах, отобранных из отливок до прохождения термической обработки (рисунки 4 и 5). Отливки производились методом литья в холоднотвердеющие смеси (ХТС), выбивка отливок осуществлялась после их охлаждения с формой до температуры $250\text{--}300^\circ\text{C}$. Анализ величины зерна производили при помощи программного комплекса «Тиксомет ПРО» по ГОСТ 5639–82 в автоматизированном режиме.

Моделирование структурно-фазового состояния после закалки, а также определение оптимальной скорости охлаждения при проведении операции закалки и

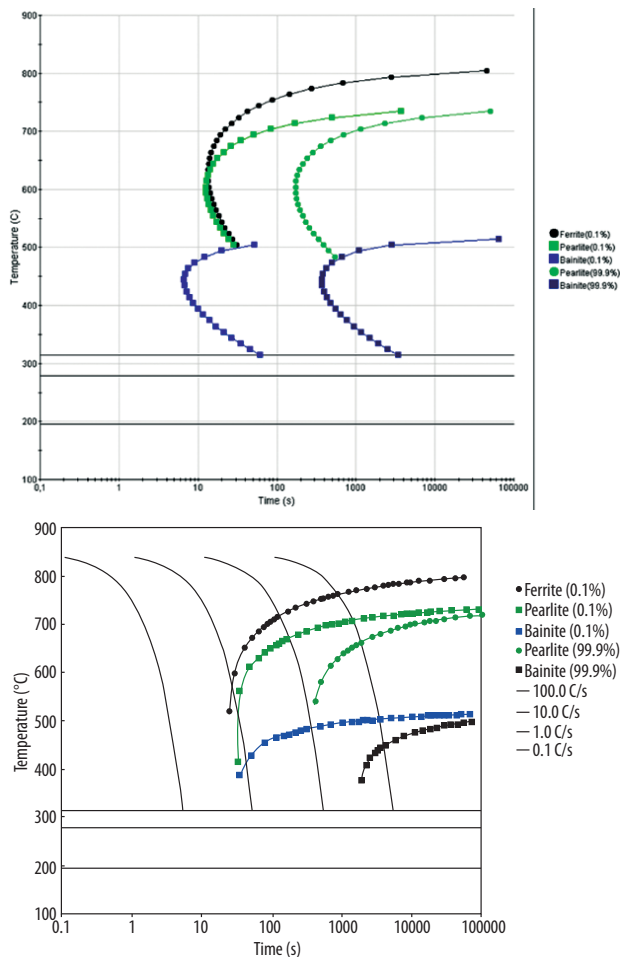


Рисунок 2. Диаграмма изотермического распада переохлажденного аустенита стали 50СЛ (а) и диаграмма распада аустенита при непрерывном охлаждении стали 50СЛ (б), построенные по результатам расчетов в программном комплексе OpenCalphad

температуры отпуска после закалки с целью получения твердости 260...340 НВ при максимально возможной пластичности производили также в программном комплексе OpenCalphad. Для проведения моделирования использовали идеализированный средневзвешенный химический состав стали 50СЛ, который соответствовал среднеарифметическому содержанию основных легирующих элементов в стали. Также использовались и граничные значения химического состава для проверки предположения, что граничные содержания углерода и легирующих элементов также будут давать требуемые свойства при разработанном режиме термической обработки отливок.

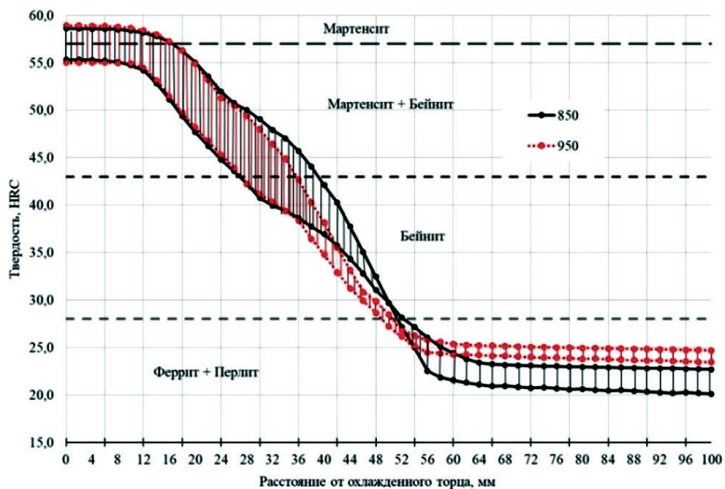


Рисунок 3. Полосы прокаливаемости стали 50СЛ при температуре аустенизации 850 °С (штриховые линии) и 950 °С (сплошные линии)

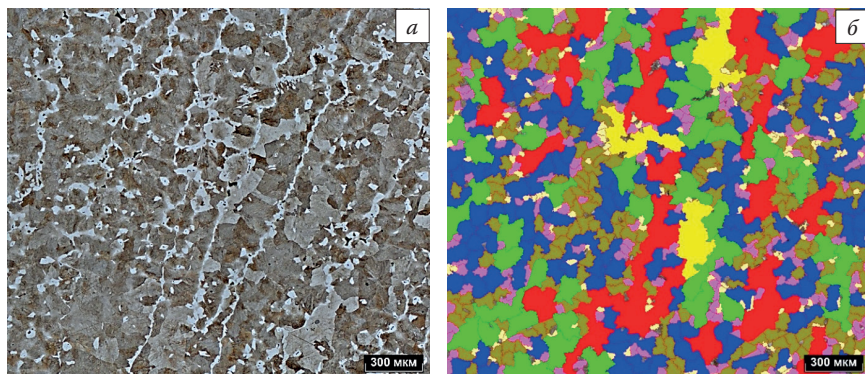


Рисунок 4. Микроструктура литого образца стали 50СЛ вдоль направления кристаллизации (а) и схема разбивки на отдельные зерна (б)

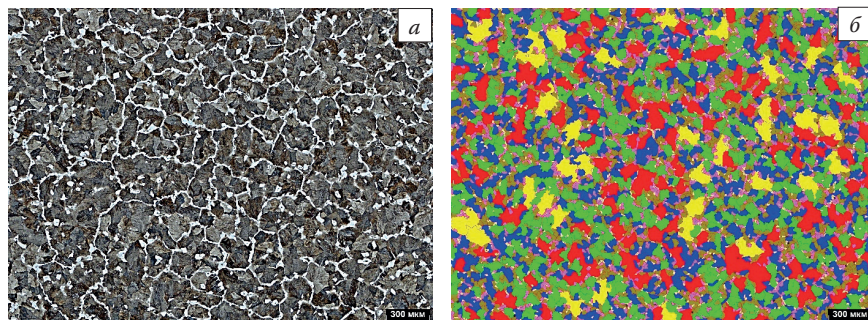


Рисунок 5. Микроструктура литого образца стали 50СЛ поперек направления кристаллизации (а) и схема разбивки на отдельные зерна (б)

Основным требованием, предъявляемым к материалу фрикционного клина, является высокая стойкость при абразивно-фрикционном износе, а также максимально высокие показатели ударной вязкости (минимальное значение, регламентируемое нормативно-технической документацией и внутренними стандартами РЖД, должно превышать 245 кДж/м^2) при твердости в диапазоне 260...340 НВ. Немаловажным условием, предъявляемым в настоящее время к продукции, является ее стоимость, а также себестоимость.

Для оптимизации процесса термической обработки проводили модельные эксперименты, для которых из тела отливки фрикционного клина вырезались образцы размерами $15 \times 15 \times 70 \text{ мм}$, которые подвергали термической обработке по различным режимам. Число образцов, подвергавшихся термической обработке по каждому из режимов, составляло не менее 6 шт. Из термообработанных по всем режимам заготовок вырезали образцы для определения ударной вязкости, на которых также измеряли твердость и после определения ударной вязкости проводили фрактографические, дифрактометрические и металлографические исследования.

Структура образца, термообработанного по режиму №1 (таблица 1) – феррито-перлитная смесь (рисунок 6). Термообработка по режиму №1 соответствует операции отжига отливок для получения гомогенной равновесной по всему объему отливок структуры. Полученное в результате отжига зерно имеет средний балл, равный 6, тогда как определенный балл бывшего аустенитного зерна соответствует значению 3. Такая структура обладает пониженными значениями ударной вязкости.

Определенный фазовый состав подтверждается также методом рентгеновской дифрактометрии (рисунок 7). Как видно из представленной на рисунке 7 дифрактограммы, структура образца представлена α -фазой и цементитом. Все рефлексы α -фазы (110), (200) и (211) соответствуют фазе феррита.

Структура образца, термообработанного по режиму №2, – закаленный мартенсит (рисунок 8). Балл бывшего аустенитного зерна определить невоз-

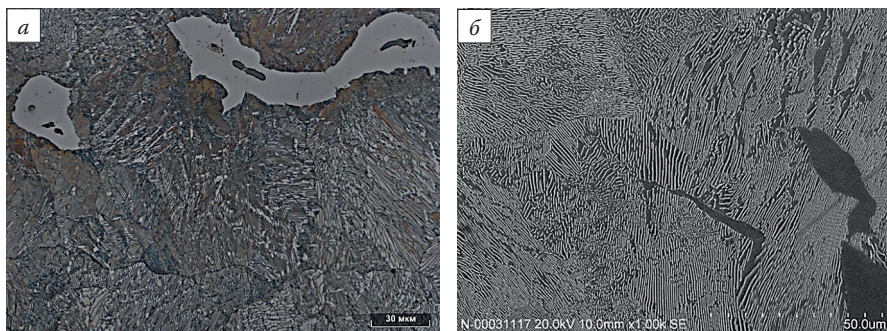


Рисунок 6. Морфология фаз отливки после отжига из стали 50СЛ после термообработки по режиму №1: а – метод оптической микроскопии, б – метод РЭМ

можно. Такая структура обладает пониженными значениями ударной вязкости. При этом в данной микроструктуре очень контрастно проявились неметаллические включения, представляющие собой шлак, состоящий из оксида железа FeO . Фазовый состав данного образца представлен закаленным мартенситом, но присутствует также порядка 4–7 об. % остаточного аустенита (включения белого цвета на рисунке 8, *а*). Исследования методами РЭМ подтверждают заключения, сделанные по результатам оптической микроскопии (рисунок 8, *б*).

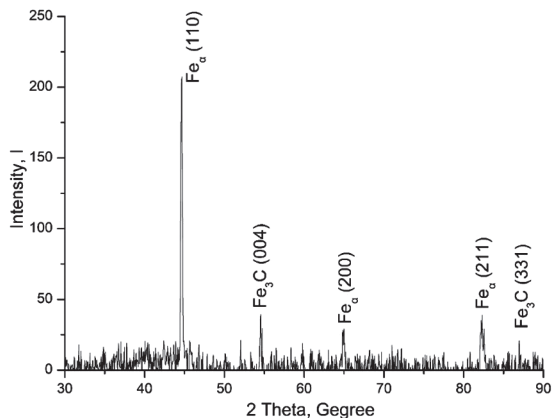
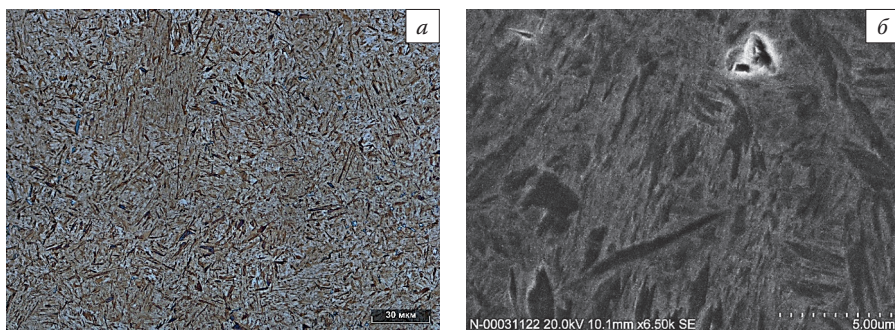


Рисунок 7. Дифрактограмма образца литой стали 50Cr после отжига (режим №1)

Наличие остаточного аустенита очень хорошо отслеживается методом рентгеновской дифрактометрии (рисунок 9).

Структура образца, термообработанного по режиму №3, – закаленный и частично отпущенный мартенсит (рисунок 10). Как видно на изображениях микроструктур, в случае закалки в масле с температуры 850 °C фазовый состав образца представлен остаточным аустенитом, тонкопластинчатым перлитом (трооститом) и мартенситом. Содержание фаз при этом составляет: аустенит – на уровне 5 об. %, мартенсит – порядка 70 об. %, троостит – остальное (около 25 об. %). Указанный фазовый состав подтверждается также результатами дюрOMETрических испытаний: при максимальной твердости образца после закалки на уровне 57–61 HRC в образце присутствуют области с твердостью 32–35 HRC.



**Рисунок 8. Микроструктура образца, термообработанного по режиму №2:
а – метод оптической микроскопии, б – метод РЭМ**

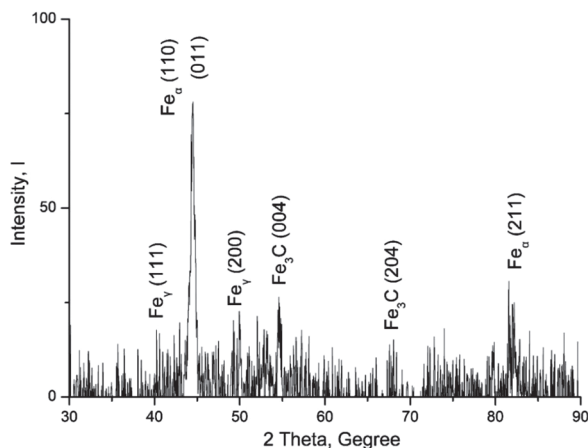


Рисунок 9. Дифрактограмма образца литой стали 50СЛ, термообработанного по режиму №2

фона (шумов) – наоборот, выросла. Кроме того, в данном случае α -фаза представлена преимущественно в виде мартенсита. Микроструктура и рентгенограмма образца, термообработанного по режиму №3, свидетельствуют о большей степени равновесности структурно-фазового состояния по сравнению с термообработкой по режиму №2.

Структура образца, термообработанного по режиму №7, – отпущенный мартенсит. На фотографиях микроструктуры, выполненных при высоком разрешении (рисунок 12), просматривается незначительное количество остаточного аустенита (порядка 0,7 об. %), можно различить выделения цементита, имеющих форму, близкую к глобулярной и располагающихся по границам мартенситных игл. Средний размер цементитных выделений составляет порядка 70–90 нм, отдельные частицы достигают размеров 400 нм, однако, их количество составляет 0,3 % от общего количества частиц цементита, в то время как

Наличие остаточного аустенита очень хорошо отслеживается и подтверждается методом рентгеновской дифрактометрии (рисунок 11).

Как видно из дифрактограммы, приведенной на рисунке 11, общая интенсивность рефлексов по сравнению с дифрактограммой равновесного состояния, снизилась примерно в 1,5 раза, а интенсивность диффузного

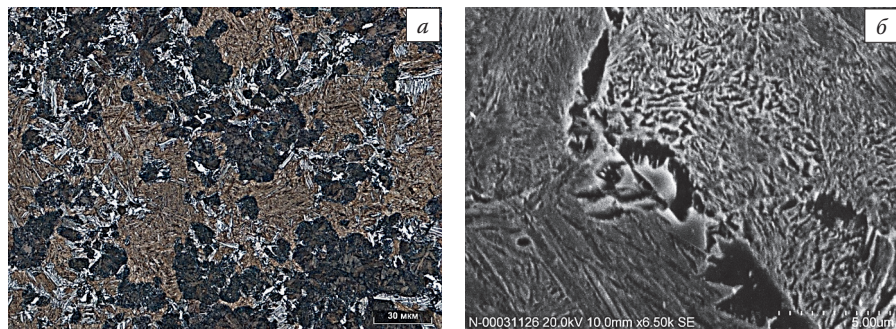


Рисунок 10. Структурное состояние образца из стали 50СЛ, термообработанного по режиму №3: а – метод оптической микроскопии, б – метод РЭМ

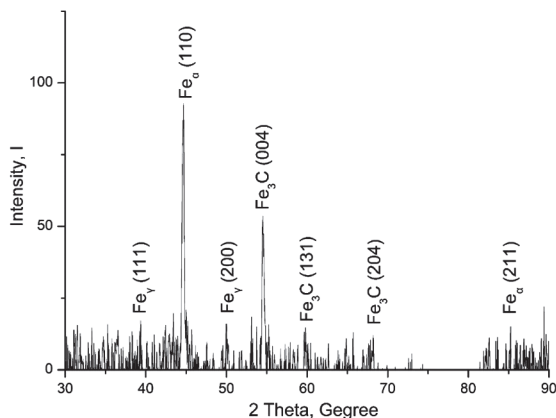


Рисунок 11. Дифрактограмма образца литой стали 50СЛ, термообработанного по режиму №3

ны и уширены, что свидетельствует о деформации его кристаллической решетки по сравнению с «чистым» ферритом. Деформация кристаллической решетки наблюдается в результате растворенных атомов углерода. Рефлексы цементита характерны для бездефектного цементита, что свидетельствует о формировании цементитных включений в результате диффузионных процессов, произошедших в ходе отпуска и равновесном формировании цементитных включений.

Структура образца, термообработанного по режиму №8 (рисунок 14), – смесь феррита в количестве 4–6 об. % и отпущенного мартенсита (остальное).

Как видно из представленной микроструктуры, предложенный режим термообработки не позволил провести полную гомогенизацию химического состава стали по сравнению с режимом №7. Фото микроструктуры демонстрирует, что структурное состояние образца – преимущественно отпущенный мартенсит, средняя длина мартенситных игл составляет 18–20 мкм. Кроме мартенсита

количество цементитных включений с размерами от 70 до 90 нм составляет 92 % от общего количества цементитных.

Как видно из представленной на рисунке 13 дифрактограммы, структурно-фазовое состояние образца – равновесное, представлено фазами феррита и цементита. Рефлексы остаточного аустенита отсутствуют. Рефлексы феррита несколько смещены

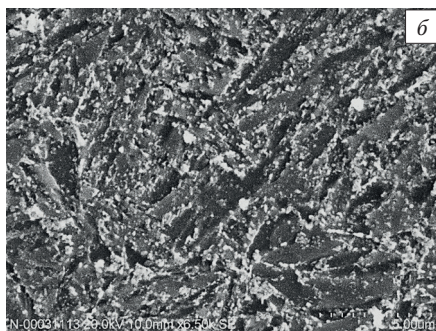


Рисунок 12. Микроструктура образца из стали 50СЛ, термообработанного по режиму №7: а – метод оптической микроскопии, б – метод РЭМ

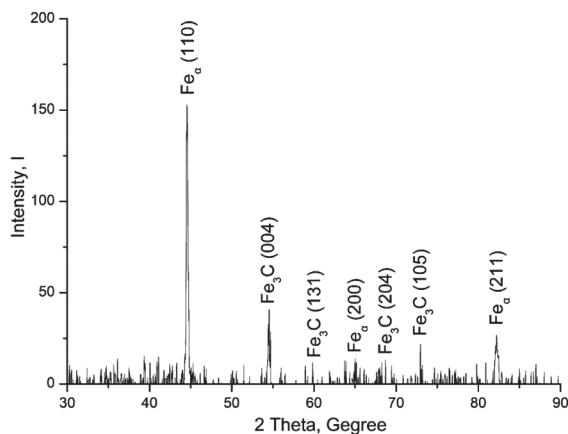


Рисунок 13. Дифрактограмма образца из стали 50СЛ, термообработанного по режиму №7

но различить выделения цементита, располагающихся по границам мартенситных игл. При этом общее количество таких частиц меньше, чем в случае охлаждения образца в воде. Наиболее вероятная причина этого – более низкие скорости охлаждения образца в масле, в результате чего имеется больше времени для диффузионного перераспределения углерода в мартенсите и получения менее дефектного и напряженного мартенсита в результате закалки образца в масле. При последующем отпуске закаленного в масле образца перераспределение углерода происходит менее интенсивно, и количество выделений цементита уменьшается наряду с увеличением дисперсности этих выделений.

Отдельно стоит рассмотреть выделения ферритной фазы – данные выделения полностью свободны от цементитных выделений, что свидетельствует об их образовании в верхнем температурном интервале еще до начала мартенситного превращения и, как следствие – диффузионному вытеснению углерода наряду с формированием максимально совершенной кристаллической решетки α -фазы. Данное

та, в образцах имеется также фаза феррита, локализованная в виде отдельных островковых скоплений ферритных зерен размерами до 15 мкм. Среднее содержание феррита составляет порядка 5 об.%. Изображения микроструктуры, полученные при помощи РЭМ, также подтверждают данные оптической микроскопии (рисунок 14, б).

На фотографии микроструктуры, выполненной РЭМ при высоком разрешении, мож-

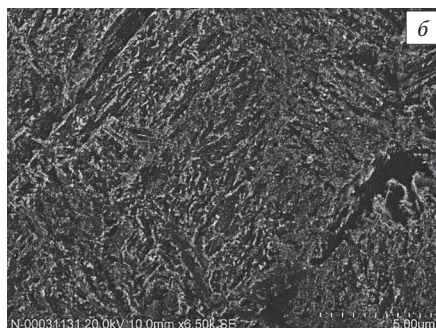


Рисунок 14. Микроструктура образца из стали 50 СЛ, термообработанного по режиму №8: а – метод оптической микроскопии, б – метод РЭМ

утверждение подтверждается данными дифрактографических исследований (рисунок 15) – рефлексы α -фазы и цементита на данной дифрактограмме соответствуют максимально равновесным структурно-фазовым состояниям исследованных фаз.

Таким образом, по совокупности проведенных исследований, оптимальным режимом следует признать режим №7: нагрев до 950 °С, выдержка 2 ч, остывание с печью до 850 °С, выдержка 0,3 ч, охлаждение в воде. Отпуск при 350 °С, 2 ч. При термической обработке по данному режиму исключается необходимость в предварительном отжиге отливок фрикционного клина, так как в процессе нагрева и последующей выдержки при температуре 950 °С происходят процессы гомогенизации химического состава отливок, а дополнительная выдержка в процессе остывания отливок с печью до 850 °С и выдержка при этой температуре гарантирует выравнивание температурных полей и градиентов химического состава по сечению отливок. Традиционный режим термической обработки включает гомогенизационный отжиг отливок при температуре 920–950 °С с выдержкой в течение не менее 2 ч и последующее охлаждение с печью до температуры ниже 400 °С. Дальнейшее охлаждение до нормальной температуры можно проводить на воздухе. Закалку в этом случае проводят с повторного нагрева до температуры 850 °С с выдержкой при этой температуре 0,8–1 ч, охлаждая отливки в воде. Далее проводят отпуск отливок при температуре 350 °С в течение не менее 2 ч.

По сравнению с традиционной технологией термообработки фрикционного клина из стали 50СЛ, разработанная технология термической обработки позволяет сократить производственный цикл путем исключения операции предварительного отжига и совмещения операции предварительного отжига и нагрева под закалку в одном цикле. Таким образом, цикл термической обработки отливок фрикционного клина сокращается в 2,5 раза на каждую 1 т изделий: по разработанной технологии весь процесс термической обработки 1 т отливок фрикционного клина в условиях двух предприятий: ООО «Композит-инжиниринг» и ООО «СибТрансМаш» занимает 6–7 ч, в то время как процесс термической обработки 1 т отливок фрикционного клина по традиционной технологии занимает не менее 15–17 ч. Помимо сокращения времени операции термообработки сокращаются также трудо- и

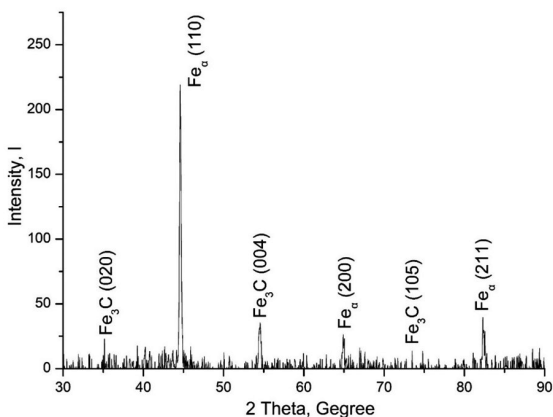


Рисунок 15. Дифрактограмма образца из стали 50СЛ, термообработанного по режиму №8

энергозатраты на операцию термической обработки, а также операционное время работы термических печей. Кроме того, практически непрерывный режим работы термических печей при минимальных колебаниях температурного режима печи путем исключения периодических охлаждений печи до 400 °С, значительно повышает ресурс работы футеровки печи.

Четвертая глава посвящена сравнению механических и эксплуатационных свойств фрикционных клиньев, термообработанных по режимам, представленным в таблице 1 как в лабораторных условиях, так и в условиях, близких к натурным испытаниям. В результате определения износостойкости в лабораторных условиях на установке УМТ материалов, применяемых для изготовления клиньев фрикционных, можно сделать следующие выводы: Наиболее перспективными материалами в качестве контртел деталей из стали 50СЛ, по совокупным данным проведенных испытаний на износостойкость, являются детали из сталей 50СЛ и 20Л – потеря массы в результате износа в этом случае на 30–50 % меньше в сравнении со сталью 30ХГСЛ, а суммарный износ деталей пары трения 50СЛ–50СЛ на 56 % меньше по сравнению с используемой в настоящее время парой трения 20Л–20Л, что подтверждает высокую перспективность использования, стали 50СЛ для изготовления фрикционного клина. По совокупности проведенных комплексных сертификационных и стендовых испытаний опытных образцов фрикционных клиньев, изготовленных из стали 50СЛ на соответствие технических требований согласно ГОСТ 34503 в условиях, приближенных к условиям эксплуатации, результаты признаны успешными, рекомендована выдача сертификата соответствия, что позволило рекомендовать фрикционные клинья из стали 50СЛ к внедрению на грузовом подвижном составе в Российской Федерации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенный комплекс металлографических, рентгеноструктурных и фрикционных исследований позволил разработать технологию термической обработки клина фрикционного, изготовленного из стали 50СЛ. Проведенные в заключение работы сертификационные испытания позволили подтвердить запланированные характеристики как материала, так и изделия «клин фрикционный» в целом. На основе проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

1. Методами компьютерного моделирования, подтвержденными натурными экспериментами, установлены температуры критических точек для стали 50СЛ: $A_3 - 813 \pm 7$ °С, $A_1 - 746 \pm 4$ °С и построены диаграммы изотермического и термокинетического распада аустенита.

2. Методом торцевой закалки определена прокаливаемость стали 50СЛ – она составила 44–48 мм при твердости 320–260 НВ соответственно. Структурно-фазовое состояние при этом меняется в следующей последовательности в направлении от поверхности закаленного торца: мартенсит–смесь мартенсита и бейнита–бейнит–смесь бейнита, феррита и перлита–смесь перлита и феррита.

3. На основе сравнительных трибологических испытаний при идентичных нагрузочно-скоростных режимах показано, что в паре трения для изделия из стали марки 50СЛ в качестве контртела наиболее перспективными являются детали из сталей марок 50СЛ и 20Л, позволяющие существенно (на 56% и 28% соответственно) уменьшить интенсивность износа относительно применяемой в настоящее время базовой пары 20Л-30ХГСА.

4. Разработан режим термической обработки стали 50СЛ, обеспечивающий наилучший комплекс эксплуатационных свойств, определяемый высокими показателями прочности, пластичности и износостойкости за счет формирования бейнитной и отпущенной мартенситной структур и заключающийся в нагреве отливок клина фрикционного до 930–950 °С с выдержкой в течение 2 ч для устранения ликвации углерода по объему отливки; охлаждение с печью до 830–850 °С с выдержкой в течение 0,3 ч и охлаждением с интенсивностью 4–5 °С/с при закалке для формирования оптимальной мартенсито-бейнитной структуры стали; последующий отпуск при температуре 340–350 °С в течение 2 ч с целью формирования структуры мартенсита отпуска, выделения дисперсных карбидных фаз диаметром 70–100 нм и снятия закалочных напряжений. Термообработанный по разработанному режиму клин фрикционный имеет твердость на уровне 320 ± 8 НВ и показатели ударной вязкости КСЧ 382,8 кДж/м², что на 30–40 % превышает минимальное значение, регламентируемое нормативно-технической документацией и внутренними стандартами РЖД – 245 кДж/м².

5. Время полного цикла термической обработки отливок фрикционного клина по разработанному режиму сокращается в 2,5 раза на каждую тонну изделий: по разработанной технологии весь процесс термической обработки 1 тонны отливок фрикционного клина в условиях ООО «АСЛЗ» занимает 6–7 ч, в то время как процесс термической обработки 1 т отливок фрикционного клина по традиционной технологии занимает не менее 15–17 ч. Помимо сокращения времени операции термообработки, сокращаются трудо- и энергозатраты на операцию термической обработки, а также операционное время работы термических печей.

6. Проведенные комплексные сертификационные испытания фрикционного клина из стали 50СЛ, термообработанного по разработанному в настоящей работе технологии термической обработки, подтвердили высокие эксплуатационные свойства. Согласно результатам сертификационных испытаний, подтвержден ресурс работы клина фрикционного из стали 50СЛ на уровне пробега не менее 250 тыс. км, что в 1,56 раза превышает показатели ресурса пробега применяемых в настоящее время клиньев фрикционных (160 тыс. км).

7. Начаты поставки разработанных клиньев фрикционных из стали 50СЛ на предприятия, занимающиеся производством и ремонтом грузовых железнодорожных вагонов. По состоянию на март 2025 года ежемесячный объем поставок составил 4 тыс. шт.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в рецензируемых изданиях, рекомендуемых ВАК:

1. **Письменный Е.А.** Оптимизация материала узла гашения колебаний тележки грузового вагона / **Е.А. Письменный**, А.М. Марков // Ползуновский вестник. – 2021. – № 2. – С. 225–232. (1,0 п.л./0,5 п.л.)

2. **Письменный Е.А.** Особенности термической обработки литой стали 38хсн для деталей фрикционного узла поглощающего аппарата / **Е.А. Письменный**, А.М. Марков, Д.А. Габец, А.В. Габец // Ползуновский вестник. – 2020. – № 1. – С. 145–149. (0,63 п.л./0,2 п.л.)

3. **Письменный Е.А.** Исследование влияния химического состава и структуры на ударную вязкость среднеуглеродистых низколегированных сталей, предназначенных для деталей, работающих в условиях ударно-фрикционного износа / **Е.А. Письменный**, А.М. Марков, Д.А. Габец, А.В. Габец // Ползуновский вестник. 2020. – № 2. – С. 152–159. (1,0 п.л./0,25 п.л.)

4. **Письменный Е.А.** Исследование влияния химического состава кремнистой стали на её механические свойства / **Е.А. Письменный**, А.М. Марков, Д.А. Габец // Ползуновский вестник. – 2020. – № 3. – С. 83–87. (0,63 п.л./0,2 п.л.)

5. Габец Д.А. Влияние комплексного модифицирования на структуру и свойства серого чугуна триботехнического назначения / Д.А. Габец, А.М. Марков, М.А. Гурьев, **Е.А. Письменный**, А.К. Насырова // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2022. – Т. 24. – № 4. – С. 165–180. (2,0 п.л./0,8 п.л.)

Публикации в изданиях, индексируемых базами данных Scopus и Web of Science:

1. Исследование динамических характеристик вагонов хопперов на перспективных тележках / **Письменный Е.А.** Восточно-Европейский журнал передовых технологий. 2014. Т. 2. № 3 (68). С. 45–50. (0,75 п.л./0,75 п.л.)

2. Optimization of heat treatment process for cast steel 50SL // **Pismennyi E.A.**, Markov A.M., Augstkaln A.I., Deev V.B. CIS Iron and Steel Review. Vol. 27. (2024). P. 9–14. DOI:10.17580/cisisr.2024.02.08 (0,75 п.л./0,25 п.л.)

Патенты на изобретения:

1. Патент на полезную модель RU 194823 U1, МПК B61F 5/12. Фрикционный клин тележки железнодорожного вагона / Габец Д.А., Марков А.М., **Письменный Е.А.**, Чертовских Е.О.; Общество с ограниченной ответственностью «Композит-Инжиниринг» // № 2019133574, Заявл. 22.10.2019, Оpubл. 24.12.2019.

2. Патент на полезную модель RU 183582 U1, МПК B61G 5/02, B61F 5/16, B61F 3/12 (2006.01), B61D 3/10. Узел сочленения грузового вагона / **Письменный Е.А.**, Скогарев И.Е., Дзичковский Е.М., Буханцов С.В.; АО «Алтайвагон» // № 2018123336, Заявл. 27.06.2018, Оpubл. 26.09.2018.

Научные статьи, опубликованные в периодических изданиях и трудах научно-практических конференциях:

1. **Письменный Е.А.** Инженерное проектирование фрикционного клина узла гашения колебаний тележки грузового вагона / **Е.А. Письменный**, А.М. Марков, Д.А. Габец, И.В. Левкин // сб. материалов IV Международной научно-практической конференции с онлайн-участием. Кемерово. – 2020. – С. 416–418. (0,38 п.л./0,1 п.л.)

2. **Письменный Е.А.** Исследование режимов термической обработки литых деталей поглощающего аппарата АПФК-110 / **Е.А. Письменный**, А.М. Марков, Д.А. Габец,

А.В. Габец // Сб. трудов X Международной научно-практической конференция. Под редакцией В.Ю. Блюменштейна. – 2019. – С. 470–479. (1,25 п.л./0,4 п.л.)

3. Myamlin S.V. Investigation of dynamic characteristics of gondola cars on perspective bogies / S.V. Myamlin, V.M. Bubnov, **Ye.Pysmennyi** // Наука та прогрес транспорту. – 2014. – № 5 (53). – С. 126–137. (1,5 п.л./0,5 п.л.)

4. **Письменный Е.А.** Анализ факторов верхнего строения пути не учтенных в современных программах и методиках сертификационных испытаний железнодорожной техники / **Е.А. Письменный**, А.Я. Кобозев, Н.А. Гергель, Е.А. Викторова // Сборник научных трудов Донецкого института железнодорожного транспорта. – 2013. – № 36. – С. 174–180. (0,88 п.л./0,4 п.л.)

5. Бондарев А.М. Определение остаточных напряжений в полуобработанных осях для железнодорожного подвижного состава / А.М. Бондарев, В.А. Горобец, С.В. Мямлин, **Е.А. Письменный**, И.Е. Скогарев, Д.В. Горобец // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту ім. академіка В. Лазаряна. – 2010. – № 34. – С. 16–21. (0,63 п.л./0,12 п.л.)

6. **Письменный Е.А.** Определение динамической нагруженности грузовых вагонов на опытных тележках / **Е.А. Письменный** // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту ім. академіка В. Лазаряна. – 2007. – № 17. – С. 182–187. (0,75 п.л./0,75 п.л.)

7. Мямлин С.В. Объектно-ориентированная математическая модель пространственных колебаний рельсовых экипажей / С.В. Мямлин, А.Н. Пшинько, **Е.А. Письменный**, В.И. Приходько // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту ім. академіка В. Лазаряна. – 2005. – № 7. – С. 87–90. (0,5 п.л./0,1 п.л.)

8. Мямлин С.В. Математическое моделирование амортизаторов удара / С.В. Мямлин, **Е.А. Письменный**, А.И. Яловой, Л.А. Манашкин. // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту ім. академіка В. Лазаряна. – 2004. – № 4. – С. 119–121. (0,38 п.л./0,1 п.л.)

9. Манашкин Л.А. Об измерении вертикальных сил в тележках грузовых вагонов / Л.А. Манашкин, С.В. Мямлин, **Е.А. Письменный** // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту ім. академіка В. Лазаряна. – 2004. – № 5. – С. 132–135. (0,5 п.л./0,15 п.л.)

10. **Письменный Е.А.** Разработка и расчет на прочность новой конструкции фрикционного клина узла гашения колебания тележки грузового вагона / **Е.А. Письменный**, А.В. Габец, А.М. Марков, Д.А. Габец // Инженерный вестник Дона. – 2020. – № 5 (65). – С. 22. (0,13 п.л./0,07 п.л.)