

На правах рукописи

БАРСУКОВА Татьяна Юрьевна

**ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ СТАЛИ 10ХЗГЗМФС ХОЛОДНОЙ РАДИАЛЬНОЙ
КОВКОЙ И НЕПОЛНОЙ ЗАКАЛКОЙ**

2.6.1. Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Пермь – 2022

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет»

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор
Симонов Юрий Николаевич

Официальные оппоненты:

Салищев Геннадий Алексеевич
доктор технических наук, профессор,
ФГАОУ ВО «Белгородский государственный национальный исследовательский университет», кафедра «Материаловедение и нанотехнологии», профессор

Копцева Наталья Васильевна
доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», кафедра «Литейные процессы и материаловедение», профессор

Ведущая организация:

ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева» (г. Нижний Новгород)

Защита состоится «23» декабря 2022 года в 12:00 часов на заседании диссертационного совета Д ПНИПУ.05.13 федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет» по адресу: 614990, г. Пермь, Комсомольский проспект, 29, ауд. 345.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГАОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет» (<http://pstu.ru>).

Автореферат разослан «22» ноября 2022 года.

Ученый секретарь диссертационного совета,
кандидат технических наук, доцент

Е.М. Федосеева

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Проблема повышения комплекса механических свойств конструкционных сталей остается актуальной и сегодня. Перспективным направлением в современном материаловедении является разработка технологий, направленных на управляемое измельчение характерного элемента структуры стали и позволяющих достичь более высокого уровня конструкционной прочности существующих материалов. Диспергирование структуры сталей является единственным механизмом упрочнения, благоприятно влияющим на характеристики прочности, пластичности и надежности. Создание ультрамелкозернистого состояния стали может достигаться путем циклического термического и деформационного воздействия, а также их комбинации.

Необходимость создания промышленных технологий интенсивной пластической деформации обнаруживает перспективу изучения современных методов обработки. Так, холодная радиальная ковка (ХРК) обеспечивает высокую скорость и дробность деформации, что, в сочетании с увеличением площади контакта инструмента с заготовкой за счет схемы нагружения и конструкции бойков, позволяет достигать высоких степеней деформации без разрушения материала заготовки. Возможности повышения комплекса механических свойств за счет ХРК (холодной радиальнойковки) и последующего отжига показаны в работах: на примере широко применяемых среднеуглеродистых низколегированных сталей в нормализованном и термически улучшенном состояниях получена ультрамелкозернистая структура, обеспечившая рост характеристик хладостойкости и прочности при сохранении пластичности; исследование закаливаемых на воздухе низкоуглеродистых сталей 10ХЗГЗМФ(Т) показало повышение условного предела текучести и ударной вязкости в результате реализации ультрамелкозернистого состояния после ХРК и среднего отпуска, а так же наноструктурного состояния после ХРК и скоростной аустенитизации.

Однако мартенситная структура обладает пониженной пластичностью, что ограничивает степень возможной деформации. Для закаливаемых на воздухе сталей повышение пластичности перед холодной пластической деформацией (ХПД) возможно предварительным высоким отпуском или закалкой из межкритического интервала температур (МКИТ). Первый вариант обработки ограничен повышенной отпускостойчивостью сталей данного класса и может проводиться в узком температурном интервале, который обеспечивает отсутствие отпускной хрупкости. Второй вариант позволяет избежать охрупчивания и управляемо изменять сочетание характеристик прочности и пластичности в широких пределах. Кроме того, закалка из МКИТ (межкритического интервала температур) в некоторых случаях позволяет повысить комплекс механических свойств, что является недостаточно изученным явлением, тесно связанным с протеканием альфа-гамма превращения.

Стоит отметить, что остается не изученным вопрос влияния исходного мартенситно-ферритного состояния закаливаемой на воздухе стали на процессы эволюции структуры и формирования свойств при ХРК с высокими степенями деформации. Необходимость применения последеформационной обработки для повышения обрабатываемости резанием и сохранения высокой дисперсности структуры закаливаемых на воздухе сталей может решаться с использованием закалки из МКИТ.

Таким образом, объектом диссертационного исследования являются фазовые и структурные превращения в сталях мартенситного класса с низким содержанием углерода. Предметом исследования являются процессы формирования структуры и свойств стали 10X3Г3МФС при холодной радиальной ковке и неполной закалке.

Тематика диссертации соответствует Приоритетным направлениям развития науки, технологий и техники РФ и Перечню критических технологий РФ. Работа выполнена в соответствии с основными направлениями научной деятельности кафедры «Металловедение, термическая и лазерная обработка металлов» ФГАОУ ВО «ПНИПУ», г. Пермь, в рамках государственного задания в сфере научной деятельности при финансировании Минобрнауки России по проектам 11.8213.2017/8.9, FSNM-02020-0027 и в рамках реализации программы деятельности научно-образовательного центра мирового уровня «Рациональное недропользование».

Степень разработанности темы исследования. Изучением холодной пластической деформации (ХПД) занимались авторы: Валиев Р.З., Сегал В.М., Рааб Г.И., Глезер А.М., Васильева А.Г. и другие. Изучению процессов неполной закалки стали посвящены работы отечественных и зарубежных исследователей: Степанов А.И. с соавторами, Маковецкий А.Н., Табатчикова Т.И. с соавторами, Ткач Т.В., Торцан А.И. с соавторами, С. Сюн (X. Xiong) с соавторами, Д. Идальго (J. Hidalgo) с соавторами. Процессы аустенитизации сталей с мартенситной структурой рассмотрены в работах Садовского В.Д., Дьяченко С.С., Зельдович В.И., Липчина Н.Н. с соавторами, Курдюмова Г.В., Энтина Р.И., Клейнера Л.М. с соавторами. Направление исследования низкоуглеродистых сталей с мартенситной структурой развито в работах кафедры «Металловедение, термическая и лазерная обработка металлов» ФГАОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет». Выполненное диссертационное исследование является продолжением работы в данном направлении.

Цель диссертационной работы. Установление закономерностей структурообразования и формирования механических свойств стали 10X3Г3МФС холодной радиальной ковкой и неполной закалкой для получения высокого уровня характеристик прочности и надежности.

Для достижения цели были поставлены и решены следующие задачи:

1. Исследовать процессы аустенитизации стали 10X3Г3МФС для оценки перспективности проведения промежуточного высокого отпуска и выбора режима неполной закалки, направленного на повышение обрабатываемости ХПД (холодной пластической деформацией) за счет получения мартенситно-ферритной структуры благоприятной морфологии.
2. Изучить процессы эволюции структуры и свойств стали 10X3Г3МФС в мартенситно-ферритном состоянии под влиянием ХРК.
3. Выявить закономерности аустенитизации и влияния параметров режима неполной закалки на формирование структуры и механических свойств холоднодеформированной стали 10X3Г3МФС.

Научная новизна работы:

1. Установлено, что исходное структурное состояние стали 10X3Г3МФС оказывает решающее влияние на морфологию аустенита, образующегося в МКИТ: аустенит lamellarной

формы образуется в стали с исходной мартенситной структурой; глобулярной формы – в стали со структурой высоко отпущенного мартенсита; глобулярной и пластинчатой формы – в холоднодеформированной стали с мартенситно-ферритной структурой.

2. Впервые изучена эволюция структуры низкоуглеродистой безникелевой стали 10X3Г3МФС в мартенситно-ферритном состоянии в процессе холодной радиальной ковки, которая заключается в одновременном протекании процессов фрагментации, приводящей к уменьшению размеров ячеек деформации в 7 раз: с 496 ± 178 нм до 67 ± 8 нм, и деформационного мартенситного превращения остаточного аустенита.

3. Установлено, что получение высокого комплекса механических свойств холоднодеформированной стали 10X3Г3МФС неполной закалкой из верхней части МКИТ связано с формированием дисперсной мартенситно-ферритной структуры полиэдрической морфологии вследствие рекристаллизации зерен матричной альфа-фазы и высокой скорости протекания альфа-гамма превращения.

Теоретическая и практическая значимость работы:

1. В условиях акционерного общества «Пермский научно-исследовательский технологический институт» (г. Пермь) опробована технология деформационно-термической обработки полнотелых цилиндрических заготовок из конструкционной стали 10X3Г3МФС, включающей холодную радиальную ковку со степенью деформации 60 % и неполную закалку, что обеспечивает получение дисперсной мартенситно-ферритной структуры (размер зерна 2,5-3,7 мкм) с повышенной ударной вязкостью КСТ (выше в 1,9 - 2,4 раза) и пластичностью материала (выше на 36 - 43 %) при небольшом снижении прочностных свойств (на 7 – 16 %) относительно исходного закаленного состояния.

2. Построены изотермические диаграммы образования аустенита для трех состояний стали 10X3Г3МФС, позволяющие прогнозировать фазовый состав и формировать нужный комплекс механических свойств стали путем варьирования режимов неполной закалки.

Методология и методы диссертационного исследования

Изучение проблемы диссертационного исследования проведено в контексте развития представлений об эволюции структуры и свойств низкоуглеродистых сталей при аустенитизации и больших степенях холодной пластической деформации, рассматриваемых в работах отечественных и зарубежных исследователей.

В работе использованы следующие методы исследования: дилатометрический, световой и электронной микроскопии и фрактографии, дюротрии, испытаний на одноосное растяжение и ударный изгиб, оптико-эмиссионного спектрального анализа.

Положения, выносимые на защиту:

1. Форма участков аустенита, образующегося в условиях непрерывного нагрева стали 10X3Г3МФС со скоростью 1,5 °C/c в МКИТ и последующей выдержки, определяется морфологией матричной альфа-фазы и в случае закаленной стали близка к ламельной, а в случае высоко отпущенной к полиэдрической.

2. При увеличении степени холодной пластической деформации до 60 % в стали 10X3Г3МФС, закаленной из МКИТ, протекают процессы фрагментации и образования мартенсита деформации на месте тонких пластин-пленок остаточного аустенита.

3. При нагреве и выдержке в МКИТ холоднодеформированной стали происходит образование нового комплекса зерен матричной альфа-фазы и при температурах второй стадии аустенитизации появление двух морфологических форм гамма-фазы: глобулярной и пластинчатой.

4. Близость температуры закалки из МКИТ холоднодеформированной стали 10Х3Г3МФС к температуре наблюдаемого при непрерывном нагреве максимума скорости альфа-гамма превращения обеспечивает сохранение высокодисперсного состояния структуры в процессе выдержки, что положительно влияет как на изменение характеристик прочности, так и ударной вязкости КСТ.

Степень достоверности диссертационного исследования определяется использованием современных сертифицированных комплексов проведения и анализа результатов исследований, включающих высокоточное оборудование и программное обеспечение с широкими возможностями анализа данных. Использование взаимодополняющих методов исследований и отсутствие противоречий экспериментальных данных способствует формулированию научных положений, которые согласуются с результатами других авторов.

Апробация результатов диссертационного исследования. Основные результаты работы представлены и обсуждены на XVIII Международной научно-технической Уральской школе металловедов-молодых ученых, г. Екатеринбург, 2017 г., XXIV, XXV Уральской школе металловедов-термистов «Актуальные проблемы физического металловедения сталей и сплавов», г. Магнитогорск, 2018 г. и г. Екатеринбург, 2020 г., XI Международной школе «Физическое металловедение» с элементами научной школы для молодежи, г. Тольятти, 2019 г., IV и V научно-практической конференции с международным участием «Инновационные технологии в материаловедении и машиностроении», г. Пермь, 2019 и 2021 гг.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 10 печатных работ, в том числе 4 статьи в журналах, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией при Министерстве науки и высшего образования Российской Федерации, из них 3 статьи в переводной версии журналов, которые входят в международные базы данных и системы цитирования Scopus, Springer, WoS.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

Введение раскрывает актуальность проведенного исследования, практическое значение и научную новизну диссертационной работы. Содержит формулировки выносимых на защиту положений.

Первая глава раскрывает цель и задачи исследования, которые сформулированы на основании представленного обзора публикаций авторов по теме исследования. Рассмотрены подходы системного легирования низкоуглеродистой стали и возможности повышения ее надежности при холодной пластической деформации и термической обработке с нагревом выше критических температур, роль внешних и внутренних факторов на процессы эволюции структуры и формирование механических свойств.

Вторая глава раскрывает методическую основу работы. Исследуемая сталь 10Х3Г3МФС выплавлена в условиях ПАО «Мотовилихинские заводы», г. Пермь. С помощью свободнойковки стальных слитков при температурах (1150 – 950) °С получен прутки Ø 19 ± 0,5 мм, который после

охлаждения на воздухе имеет структуру низкоуглеродистого мартенсита. С использованием закалочного dilatометра Linseis RITA L78 проводили полную аустенитизацию закаленной стали с варьированием скорости нагрева в интервале (0,15 – 90) °C/c и неполную аустенитизацию с длительными выдержками в МКИТ при температурах 715, 750, 800 и 860 °C уже для двух состояний: закаленного и высоко отпущенного (680 °C, 2 часа, воздух).

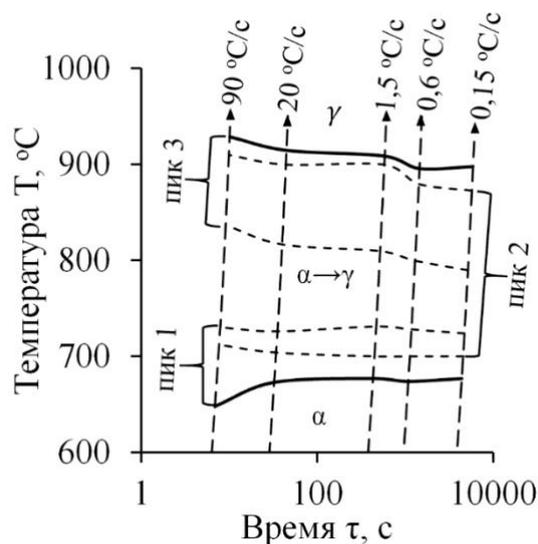


Рисунок 1 – Диаграмма образования аустенита закаленной стали 10X3Г3МФС при непрерывном нагреве

В работе применены следующие методы исследований: дюротрический с использованием твердомера ИТ5010 и микротвердомера DuraScan 70; световой микроскопии с использованием микроскопа Olympus GX-51 и программ анализа изображений: OlympusStreamMotion V. 1.8, SIAMS 700; электронной микроскопии при помощи сканирующих электронных микроскопов Hitachi S-3400N и Phenom 750 и просвечивающего электронного микроскопа FEI Tecnai 20 G2 TWIN. Испытания на одноосное растяжение в соответствии с ГОСТ 1497–84 проведены на INSTRON-SATEC 300 LX. Ударную вязкость КСТ определяли по ГОСТ 9454–78 при помощи маятникова копра TE JB-300B.

В третьей главе изучены особенности эволюции структуры и формирование механических свойств стали 10X3Г3МФС в предварительно закаленном и предварительно высоко отпущенном состояниях при непрерывном нагреве и изотермических выдержках в МКИТ. Построена диаграмма образования аустенита в условиях непрерывного нагрева предварительно закаленной стали (рисунок 1). В интервале скоростей нагрева (0,15 – 20) °C/c первые участки аустенита образуются при (674 – 677) °C. С увеличением скорости нагрева температура начала образования аустенита снижается, так как в процессе нагрева сохраняется дислокационная субструктура матричной альфа-фазы. Недостаток времени на развитие диффузионных процессов аустенитизации, вызванный повышением скорости нагрева, приводит к смещению завершающей стадии альфа-гамма превращения в область более высоких температур.

Температурный интервал протекания фазового превращения разделен на температурные области, соответствующие трем стадиям образования аустенита, которые могут быть выделены

Исследовали кинетику аустенитизации; изменение структуры и механических свойств при неполной закалке. Повторно закаленную от 800 °C сталь деформировали методом холодной радиальнойковки до $\varnothing 12,0 \pm 0,5$ мм ($\epsilon = 60$ %). Исследовали эволюцию структуры и формирование механических свойств, в том числе в состояниях с промежуточными степенями деформации 20 и 40 %. Проведено исследование полной аустенитизации холоднодеформированной стали с варьированием скорости нагрева в интервале (0,15 – 90) °C/c и образования аустенита при неполных закалках от 715, 750, 775, 800, 860 °C. Режимы окончательной термической обработки проведены с варьированием температуры нагрева (775, 800, 825 °C) и времени изотермической выдержки (15, 70, 125 минут).

путем анализа первой производной кинетической кривой (рисунок 2) и характеризуются структурными особенностями протекания альфа-гамма превращения.

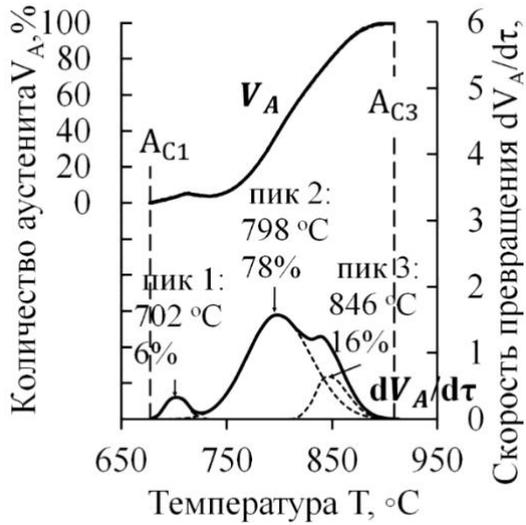


Рисунок 2 – Кинетическая кривая образования аустенита (V_A) при непрерывном нагреве стали 10X3Г3МФС со скоростью 1,5 °C/c и ее производная (dV_A/dt), разложенная на пики

вправо по температурной шкале, при этом доля аустенита, образующегося по второй стадии превращения, увеличивается с 68 % до (83 – 84) %, а по третьей стадии - уменьшается с 27 % до 11 %. Увеличение скорости нагрева от 20 °C/c до 90 °C/c практически не влияет на соотношения долей аустенита.

По результатам дилатометрического исследования изотермического образования аустенита при нагреве в МКИТ (выдержка 9 часов) на температуры вблизи пиков линейной скорости образования аустенита для предварительно закаленной и предварительно высоко отпущенной стали построены диаграммы (рисунок 3).

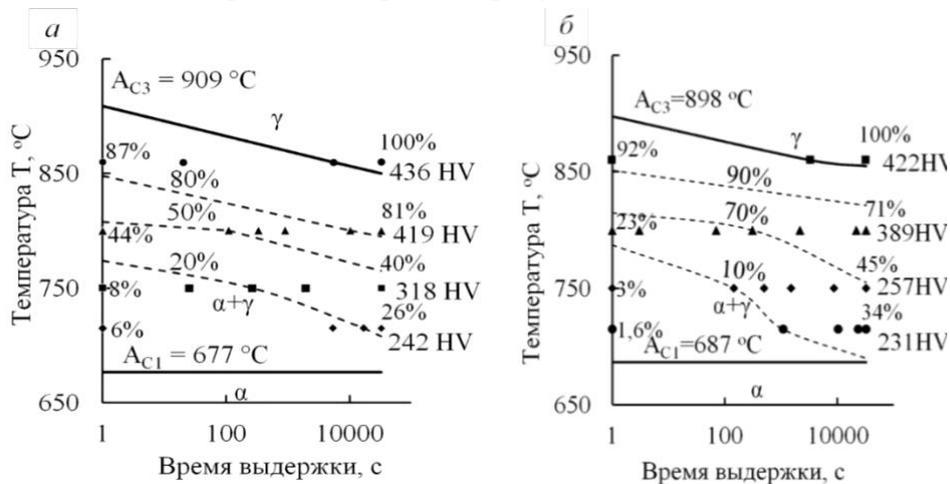


Рисунок 3 – Диаграммы изотермического образования аустенита в стали 10X3Г3МФС в предварительно закаленном (а) и предварительно высоко отпущенном состоянии (б)

Металлографический анализ структуры дилатометрических образцов показал наличие пакетно-речного строения матричной альфа-фазы в МКИТ, что определяет морфологические особенности формирования гамма-фазы. При температурах первой стадии альфа-гамма превращения в изотермических условиях гамма-фаза образуется на границах бывшего зерна аустенита и границах пакетов матричной альфа-фазы (рисунок 4, б, ж). При температурах второй стадии превращения аустенит образуется по границам рек (рисунок 4, в, з, з, и), а процесс его роста определяется развитием процессов полигонизации в матричной альфа-фазе. В закаленной стали наблюдали сохранение и рост пластинчатой формы аустенита (рисунок 4, в, з), а в предварительно высоко отпущенной стали рост аустенита происходит с образованием цепочек полиэдрической формы зерен (рисунок 4, з, и). При температурах третьей стадии аустенитизации происходит поглощение оставшихся участков матричной альфа-фазы аустенитом.

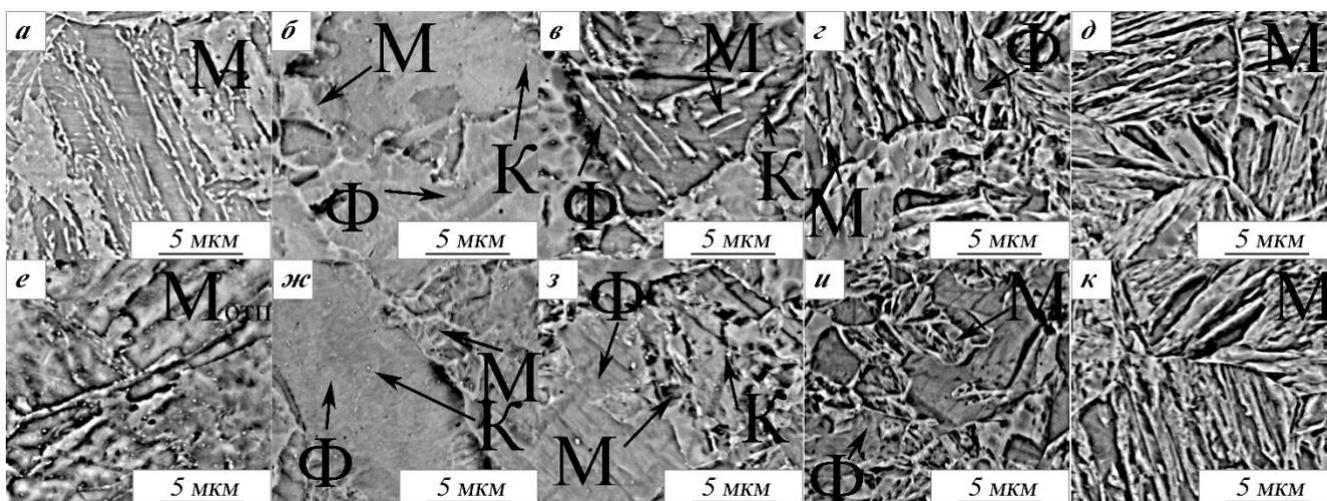


Рисунок 4 – Микроструктура (СМ) стали 10X3Г3МФС в закаленном (а) и высоко отпущенном состоянии (е) и после неполных закалок от температур 715 °С (б, ж), 750 °С (в, з), 800 °С (г, и), 860 °С (д, к)

По данным электронно-микроскопических исследований структура повторно закаленной от 800 °С стали представлена участками мартенсита пластинчатой формы, расположенными внутри матричного зерна стали (рисунок 5) и немногочисленными полиэдрической формы участками.

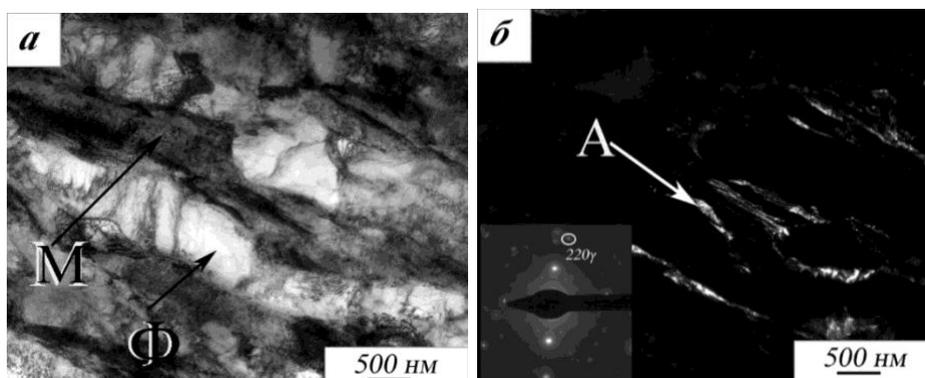


Рисунок 5 – Микроструктура в поперечном сечении (ПЭМ) прутка закаленной стали 10X3Г3МФС после неполной закалки от температуры 800 °С: а – светлопольное изображение, б – темнопольное изображение в рефлексе аустенита 220γ

Внутри мартенситных участков в небольшом количестве содержится остаточный аустенит. Участки непревращенной альфа-фазы имеют пластинчатую форму и окружены мартенситом.

По результатам механических испытаний установлено, что неполная закалка стали 10Х3Г3МФС из верхней части МКИТ (800 °С) обеспечивает сочетание высокой прочности и ударной вязкости: для предварительно закаленного состояния достигнут уровень временного сопротивления при полной закалке $\sigma_{\text{в}} = 1350$ МПа, при этом ударная вязкость КСТ = 0,76 МДж/м², что выше исходной на 73 %; для предварительно высоко отпущенного состояния $\sigma_{\text{в}} = 1120$ МПа и КСТ = 0,64 МДж/м². Стоит отметить, что повышение температуры неполной закалки до 860 °С приводит к снижению показателя ударной вязкости КСТ за счет увеличения размера зерна, образования двойникового мартенсита вследствие неоднородного распределения углерода в аустените. Сформированное неполной закалкой от 800 °С предварительно закаленной стали

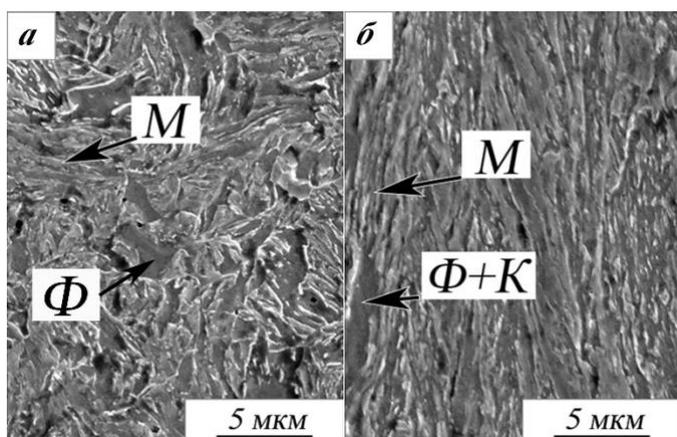


Рисунок 6 – Микроструктура (СМ) стали 10Х3Г3МФС после ХРК со степенью 60 %:

a - поперечное сечение, *б* – продольное сечение

10Х3Г3МФС состояние выбрано в качестве исходного для дальнейшей обработки холодной пластической деформацией.

В четвертой главе исследовано влияние холодной радиальнойковки на формирование структуры и свойств стали 10Х3Г3МФС с мартенситно-ферритной структурой. Показано, что в поперечном сечении прутка формируется неоднородная структура с участками деформированной матричной альфа-фазы (Φ), мартенситом и карбидами (рисунок 6). В продольном сечении прослеживается постепенная

ориентация структурных элементов вдоль направления деформации. В результате электронно-микроскопического исследования структуры деформированной стали (рисунок 7) установлено:

- после деформации с $\varepsilon = 20$ % структура характеризуется высокой плотностью дефектов кристаллического строения, появлением локальных скоплений дислокаций в виде полос; темнопольный анализ показал наличие остаточного аустенита в виде тонких пластин в местах с повышенной плотностью дислокаций.

- деформация со степенью 40 % приводит к появлению областей с внутренней однородной фрагментированной структурой в форме пластин (рисунок 7, *в*, *г*), что является началом формирования полосовой структуры. На картинах микродифракции присутствуют рефлексы аустенита.

- деформацией $\varepsilon = 60$ % формируется полосовая структура (рисунок 7, *д*, *е*). Полосы разбиты на фрагменты, появляются микрообласти с более низкой плотностью дислокаций, имеющие высокоугловые границы, что свидетельствует о протекании динамической полигонизации. Рефлексы аустенита на картинах микродифракции не обнаружены.

Повышение степени ХРК сопровождается ростом плотности дислокаций в структуре стали и уменьшением характерного элемента субструктуры – ячеек деформации. До проведения ХРК в субструктуре закаленной из МКИТ стали участки непревращенной матричной альфа-фазы были разбиты дислокационными границами на области размером 496 ± 178 нм. В

деформированной стали характерным элементом структуры являются ячейки деформации, размер которых составляет при $\varepsilon = 20\%$ 245 ± 105 нм, а в состояниях с $\varepsilon = 40$ и 60% 125 ± 54 нм и 67 ± 28 нм, соответственно.

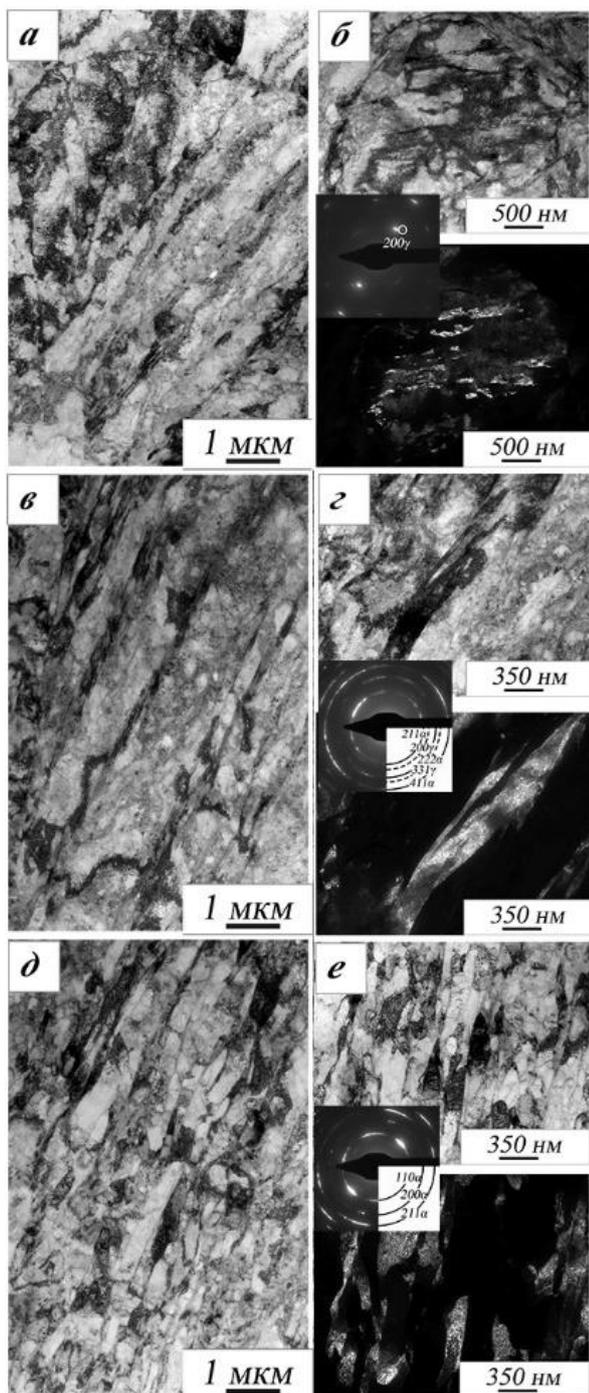


Рисунок 7 – Микроструктура (ПЭМ) стали 10X3Г3МФС после ХРК со степенями 20 % (а, б), 40 % (в, г), 60 % (д, е): б – в рефлексе 200γ , г - в рефлексе $(211)\alpha$, е - в рефлексе $(110)\alpha$

Холодная пластическая деформация приводит к повышению характеристик прочности: временное сопротивление σ_B увеличивается на 38 % до 1860 МПа. Наблюдается снижение характеристик пластичности: относительное удлинение δ уменьшается на 43 %, относительное сужение ψ снижается на 27 %. Представляет интерес влияние степени пластической деформации на надежность материала. Удельная работа разрушения КСТ стали снижается в три раза относительно исходного состояния. Интенсивное снижение КСТ (в пять раз) происходит на первом этапе деформирования, когда ε увеличивается от 0 % до 20 %, в то время как на втором этапе ХРК уровень ударной вязкости не изменяется, а увеличение степени деформации от 40 до 60 % приводит к росту характеристики КСТ на 50 %, что сопровождается изменением рельефа поверхности разрушения: появлением макро-расщеплений и увеличением доли вязкой составляющей в изломе с 30 до 47 %. Изменение ударной вязкости связано с протеканием фазового гамма-альфа превращения и образованием мартенсита с повышенным содержанием углерода на месте тонких пластин остаточного аустенита.

Полученные состояния отличаются неоднородным распределением твердости в материале в связи с особенностями наложения полей деформации при ХРК, приводящими к ее локализации в центральной части прутка.

В пятой главе рассмотрены закономерности аустенитизации холоднодеформированной стали 10X3Г3МФ при непрерывном нагреве и в изотермических условиях, изменение структуры и механических свойств холоднодеформированной стали 10X3Г3МФС под влиянием параметров режима неполной закалки.

Проведен анализ изменения конструкционной прочности в процессе цикла деформационно-термической обработки. Показано, что фазовое превращение в стали 10X3Г3МФС, подвергнутой холодной радиальной ковке в мартенситно-ферритном состоянии, в

широком интервале скоростей нагрева $0,15 - 90 \text{ }^\circ\text{C}/\text{с}$ протекает в три стадии, соответствующие трем пикам на производной кинетической кривой. Для скорости нагрева $1,5 \text{ }^\circ\text{C}/\text{с}$ наблюдается уменьшение ширины температурного интервала образования аустенита, так как повышается критическая точка A_{c1} и снижается критическая точка A_{c3} .

В результате дилатометрических исследований холоднодеформированной стали 10X3ГЗМФС методом неполных закалок (температура нагрева 715, 750, 775, 800, 860 $^\circ\text{C}$; выдержка 6 часов) построена диаграмма образования аустенита в изотермических условиях (рисунок 8) и установлены закономерности изменения структуры. Установлено, что аустенит в основном образуется на границах равноосной формы зерен альфа-фазы (рисунок 9). В нижней части МКИТ, (715 – 750) $^\circ\text{C}$, матричная альфа-фаза содержит карбидную фазу, а количество аустенита не превышает 34 %. Выдержками при 775 и 800 $^\circ\text{C}$ в структуре стали получено 61 и 81 % аустенита, соответственно. В структуре стали 10X3ГЗМФС при кратковременных выдержках в верхней части МКИТ наряду с глобулярной формой аустенита присутствуют участки пластинчатой морфологии, расположенные в объеме зерен матричной альфа-фазы (рисунок 9). Повышение температуры неполной закалки до 860 $^\circ\text{C}$ обеспечивает образование полностью аустенитной структуры.

Влияние параметров неполной закалки на структуру (объемную долю превращенного аустенита) и характеристики механических свойств (таблица 1) после неполных закалок изучено с применением подходов факторного планирования эксперимента. В рамках эксперимента варьировали температуру нагрева $800 \pm 25 \text{ }^\circ\text{C}$ и время выдержки 70 ± 55 минут. Получены эмпирические зависимости изменения механических свойств и содержания мартенсита в рамках граничных условий:

$$\begin{aligned} \sigma_B &= -37311 + 45,438 \cdot \tau + 86,103 \cdot T - 0,04909 \cdot \tau \cdot T - 0,0298 \cdot \tau^2 - 0,048 \cdot T^2, \text{ МПа} \\ \sigma_{0,2} &= -41610 + 50,4 \cdot \tau + 97,48 \cdot T - 0,0564 \cdot \tau \cdot T - 0,0231 \cdot \tau^2 - 0,056 \cdot T^2, \text{ МПа} \\ \delta &= 704,6 - 1,89 \cdot \tau - 1,357 \cdot T + 0,002182 \cdot \tau \cdot T + 0,000826 \cdot \tau^2 + 0,004 \cdot T^2, \% \\ \psi &= 2868,97 - 2,767 \cdot \tau - 6,7024 \cdot T + 0,00327 \cdot \tau \cdot T + 0,000826 \cdot \tau^2 + 0,004 \cdot T^2, \% \\ HV5 &= -7334 + 15,99 \cdot \tau + 15,9 \cdot T - 0,01782 \cdot \tau \cdot T - 0,00826 \cdot \tau^2 - 0,008 \cdot T^2, \text{ кгс}/\text{мм}^2 \\ V_M &= -13520,9 + 1,2974 \cdot \tau + 33,2 \cdot T - 0,001333 \cdot \tau \cdot T - 0,000967 \cdot \tau^2 - 0,020267 \cdot T^2, \% \end{aligned}$$

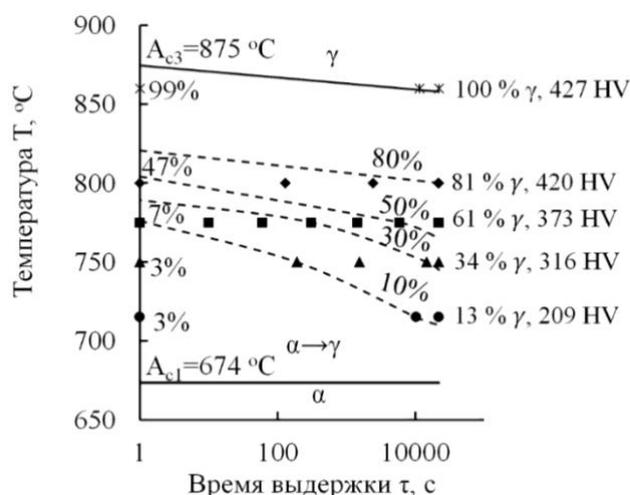


Рисунок 8 – Изотермическая диаграмма образования аустенита деформированной стали 10X3ГЗМФС

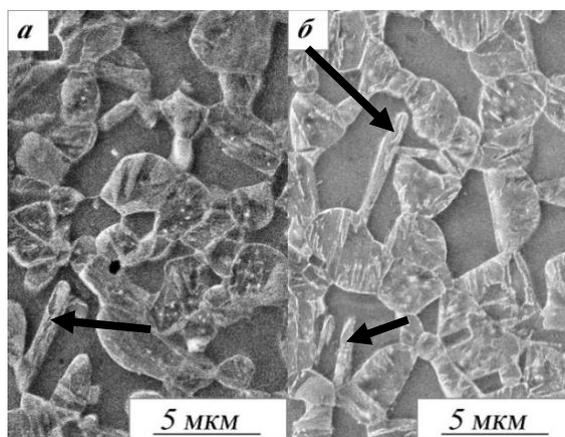


Рисунок 9 – Микроструктура (СМ) деформированной стали 10X3ГЗМФС после неполных закалок: 800 $^\circ\text{C}$, 15 минут (а), 800 $^\circ\text{C}$, 125 минут (б)

Таблица 1 – Характеристики структуры и механических свойств стали 10X3Г3МФС

№ точки	Режим ТО °С, мин	V _m , %	Размер зерна d, мкм	КСТ, МДж/м ²	σ _{0,2} , МПа	σ _в , МПа	δ, %	ψ, %	HV5, кгс/мм ²
	-	100		0,23	1860	1860	6,8	45	447-509
1	775, 15	41	1,72±0,04	1,23	380	650	36	77	244
7	775, 70	50	3,10±0,12	0,92	690	1000	24,0	61	322
2	775, 125	54	2,89±0,09	0,93	760	1050	22,5	62	332
5	800, 15	68	2,28±0,09	0,93	600	990	26	61	352
9	800, 70	77	2,47±0,09	0,96	800	1120	22,5	64	392
6	800, 125	79	2,46±0,07	1,02	830	1120	20,0	62	388
4	825, 15	82	2,31±0,07	0,88	770	1110	19,0	62	394
8	825, 70	87	3,70±0,19	0,83	810	1230	19,0	62	416
4	825, 125	88	3,48±0,16	0,72	840	1240	18,0	65	416

Установлено сложное влияние параметров режима неполной закалки на средний размер зерна. Наиболее дисперсная структура с зерном ~2,5 мкм формируется при неполной закалке от 800 °С и слабо зависит от времени выдержки, в то время как при закалках от 775 °С и 825 °С происходит существенное увеличение среднего размера зерна с образованием локального максимума при выдержке 70 минут.

Установлено закономерное изменение характеристик твердости, относительного удлинения, временного сопротивления и содержания мартенсита, контролируемое в большей степени температурой термической обработки. Изменение предела текучести обусловлено влиянием времени термической обработки. На величину относительного сужения определяющее влияние оказывает фактор взаимодействия температуры и времени.

Формирование механических свойств стали 10X3Г3МФС с помощью режимов неполной закалки может осуществляться в широких пределах изменения характеристик прочности, обусловленных содержанием превращенного аустенита в структуре стали. Установлено взаимосвязанное (противоположное по характеру) изменение ударной вязкости КСТ и среднего размера зерна стали. Хорошее сочетание временного сопротивления и ударной вязкости КСТ получено после проведения следующих режимов: закалка 800 °С, выдержка 125 минут и закалка 825 °С, выдержка 70 минут (таблица 1).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенное диссертационное исследование направлено на изучение возможностей управляемого диспергирования структуры низкоуглеродистой конструкционной безникелевой стали 10X3Г3МФС с использованием фазового альфа-гамма превращения, протекающего в межкритическом интервале температур, последующей холодной деформации с высокими степенями и неполной закалки. Впервые рассмотрено формирование структуры и механических свойств при холодной пластической деформации сталей данного класса в многофазном состоянии. Разработаны оптимальные режимы окончательной неполной закалки,

обеспечивающие одновременное повышение характеристик прочности и надежности исследуемой стали. Проведенный комплекс металлографических и структурных исследований позволил показать сложный характер эволюции зеренной структуры под влиянием температуры и времени термической обработки в МКИТ. Показана взаимосвязь изменения характеристик структуры и механических свойств: среднего размера зерна и ударной вязкости КСТ, характеристик прочности и доли сформировавшегося при закалке мартенсита. Построены экспериментальные факторные модели изменения характеристик механических свойств для неполных закалок в интервале температур (775 – 825) °С и времени выдержки (15 – 125) минут. Проведен комплексный анализ процесса аустенитизации стали 10Х3Г3МФС в разных исходных состояниях. Установлено влияние предварительной обработки стали на кинетику образования аустенита и морфологические особенности аустенитно-ферритной структуры, формирующейся в МКИТ.

На основании представленных результатов исследования сделаны следующие общие выводы:

1. Неполная закалка стали 10Х3Г3МФС из верхней части МКИТ обеспечивает получение высокого комплекса механических свойств, обусловленных диспергированием структуры за счет особенностей аустенитизации: высокой скорости образования гамма-фазы в температурном интервале второй стадии превращения; сохранения среднего размера участков гамма-фазы на одном уровне в широком интервале температур; характера распределения и формы вновь образованного аустенита, определяемого исходным состоянием стали.

2. Морфологические особенности структуры на второй стадии альфа-гамма превращения в стали 10Х3Г3МФС обусловлены эволюцией исходной структуры при нагреве со скоростью 1,5 °С/с и выдержке в МКИТ. В предварительно закаленной стали сохраняется субструктура речного мартенсита и аустенит образуется внутри бывших зерен, по границам рек, растет ориентированно, повторяя форму рек. В предварительно высоко отпущенной стали зарождение аустенита также происходит на сохранившихся рейках матричной альфа-фазы, однако зерна имеют преимущественно полиэдрическую форму. При нагреве холоднодеформированной в мартенситно-ферритном состоянии стали в МКИТ аустенитные участки имеют полиэдрическую форму и образуются на границах рекристаллизованной альфа-фазы, однако при малом времени выдержки внутри зерен матричной альфа-фазы обнаружены отдельные пластинки превращенного аустенита.

3. Уменьшение среднего размера ячеек деформации стали 10Х3Г3МФС до 67 ± 28 нм при холодной радиальной ковке с $\varepsilon = 60$ % и протекание деформационного превращения остаточного аустенита в мартенсит обеспечивают переход стали в высокопрочное состояние с уровнем временного сопротивления $\sigma_b = 1860$ МПа и ударной вязкостью КСТ = 0,24 МДж/м².

4. Неполная закалка холоднодеформированной стали 10Х3Г3МФС из верхней части МКИТ позволяет регулировать комплекс механических свойств в широких пределах; обеспечивает получение дисперсной структуры со средним размером зерна 2,5 мкм и хорошим сочетанием характеристик прочности и надежности. Определяющим фактором, влияющим на прочность и содержание мартенсита в структуре, является температура нагрева. Изменение ударной вязкости КСТ в исследованной области режимов неполной закалки имеет сложный характер и происходит взаимосвязано с изменением среднего размера зерна.

В качестве перспектив разработки темы диссертационного исследования можно предложить следующие направления исследования низкоуглеродистых сталей:

- изучение деформационного мартенситного превращения;
- исследование кинетики и морфологических особенностей альфа-гамма превращения при медленном нагреве холоднодеформированной стали;
- разработка режима обработки, включающего холодную радиальную ковку предварительно закаленных из МКИТ сталей и последующий отпуск.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ
Статьи, опубликованные в рецензируемых научных изданиях, определенных Высшей аттестационной комиссией при Министерстве науки и высшего образования Российской Федерации:

1. Межкритическая закалка низкоуглеродистой стали с получением дисперсной многофазной структуры / Д.О. Панов, Т.Ю. Барсукова, А.И. Смирнов, Е.Н. Орлова, Ю.Н. Симонов // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2017. – № 4 (77). – С. 6–18 [ВАК].

Переводная версия: Intercritical quenching of low-carbon steel with the formation of a disperse multiphase structure // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты) = Metal Working and Material Science, 2017. – Vol. 4 (77). – P. 6–18. DOI: 10.17212/1994-6309-2017-4-6-18. (In Russ.) [Scopus, WoS(ESCI)].

2. Эволюция структуры и свойств многофазной низкоуглеродистой стали в процессе холодной радиальной ковки / Т.Ю. Барсукова, Д.О. Панов, А.С. Перцев, А.И. Смирнов, Ю.Н. Симонов // Металловедение и термическая обработка металлов. – 2019. – № 10. – С. 25–32 [ВАК].

Переводная версия: Evolution of Structure and Properties of Multiphase Low-Carbon Steel During Cold Radial Forging // Metal Science and Heat Treatment. – 2020. – Vol. 61 – P. 610–616. DOI: 10.1007/s11041-020-00468-6 [Scopus, Springer, WoS].

3. Барсукова, Т.Ю. Получение дисперсной феррито-мартенситной структуры в низкоуглеродистой конструкционной стали при закалке из межкритического интервала температур / Т.Ю. Барсукова, Д.О. Панов, М.Ю. Симонов // Технология металлов. – 2019. – № 11. – С. 2–12. DOI: 10.31044/1684-2499-2019-11-0-2-12 [ВАК].

4. Барсукова, Т.Ю. Закономерности формирования структуры и свойств холоднодеформированной низкоуглеродистой конструкционной стали при неполной закалке / Т.Ю. Барсукова, Д.О. Панов, Ю.Н. Симонов // Металловедение и термическая обработка металлов. – 2021. – № 7. – С. 3–9 [ВАК].

Переводная версия: Laws of formation of structure and properties in cold-deformed low-carbon structural steel under incomplete quenching // Metal Science and Heat Treatment. – 2021. – Vol. 63. – P. 347–353. DOI: 10.1007/s11041-021-00694-6 [Scopus, Springer, WoS].

Публикации в прочих изданиях:

5. Барсукова, Т.Ю. Особенности формирования структуры и механические свойства стали 10Х3ГЗМФС после закалки из межкритического интервала температур / Т.Ю. Барсукова, Д.О. Панов, Симонов Ю.Н. // Уральская шк. молодых металлургов: материалы XVIII междунар. науч.-технолог. уральская шк.-семинара металлургов-молодых учен. (Екатеринбург, 21–23 нояб.

2017 г.) / Минобрнауки России, Урал. федер. ун-т им. Первого Президента России Б.Н. Ельцина. – г. Екатеринбург: УрФУ, 2017. – С. 208–210.

6. Барсукова, Т.Ю. Закалка низкоуглеродистой стали из межкритического интервала температур с получением дисперсной многофазной структуры / Т.Ю. Барсукова, Д.О. Панов, А.И. Смирнов // Актуальные проблемы физического металловедения сталей и сплавов : материалы XXIV Уральской шк. металловедов-термистов, 19–23 марта 2018 г., Магнитогорск. / Минобрнауки России, Магнитогор. гос. техн. ун-т им. Г.И. Носова. – Магнитогорск : Издат. центр МГТУ им. Г.И. Носова, 2018. – С. 114–116.

7. Барсукова, Т.Ю. Закономерности формирования структуры и свойств исходно многофазной стали 10X3Г3МФС в условиях холодной деформации методом радиальнойковки / Т.Ю. Барсукова, Д.О. Панов // Физическое металловедение : материалы IX Междунар. шк. с элементами науч. шк. для молодежи, 09–13 сент. 2019, Тольятти / Минобрнауки России, науч. совет РАН по физике конден. сред, Межгос. координ. совет по физике прочности и пластичности, Тольяттинск. гос. ун-т, НИИ прогресс. технологический – Тольятти, 2019. – С. 143–144.

8. Барсукова, Т.Ю. Влияние исходного состояния на формирование структуры и свойств стали 10X3Г3МФС при межкритической закалке / Т.Ю. Барсукова, Д.О. Панов, Ю. Н. Симонов // Инновационные технологии в материаловедении и машиностроении : материалы 4-й науч.-практической конференции с междунар. участием, 23–27 сент. 2019, Пермь. / Минобрнауки России, ФГБОУ ВО Перм. нац. исследоват. политех. ун-т. – Пермь: Изд-во ПНИПУ, 2019. – С. 34–37.

9. Барсукова, Т.Ю. Диспергирование структуры низкоуглеродистой конструкционной стали в процессе неполной закалки / Т.Ю. Барсукова, Д.О. Панов // Актуальные проблемы физического металловедения сталей и сплавов : материалы XXV Уральской шк. металловедов-термистов, 3–7 февр. 2020, Екатеринбург. / Минобрнауки России – Екатеринбург, 2020. – С. 105–107.

10. Барсукова, Т.Ю. Повышение надежности холоднодеформированной в мартенсито-ферритном состоянии стали 10X3Г3МФС неполной закалкой / Т.Ю. Барсукова, Д.О. Панов. Ю.Н. Симонов // Инновационные технологии в материаловедении и машиностроении : материалы 5-й Всероссийской науч.-практической конференции с междунар. участием, 27 сент. – 1 окт. 2021, г. Пермь. / Минобрнауки России, ФГАОУ ВО Перм. нац. исследоват. политех. ун-т. – Пермь: Изд-во ПНИПУ, 2021. – С. 33–36.