

На правах рукописи



Алмаева Ксения Викторовна

**ЗАКОНОМЕРНОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ МИКРОСТРУКТУРЫ
И МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ЖАРОПРОЧНЫХ
ФЕРРИТНО-МАРТЕНСИТНЫХ СТАЛЕЙ
В ЗАВИСИМОСТИ ОТ РЕЖИМОВ ОБРАБОТОК**

1.3.8. Физика конденсированного состояния

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени

кандидата физико-математических наук

Томск – 2022

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет» и Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте физики прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук.

Научный руководитель: доктор физико-математических наук, доцент
Литовченко Игорь Юрьевич

Официальные оппоненты:

Клопотов Анатолий Анатольевич, доктор физико-математических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Томский государственный архитектурно-строительный университет», кафедра прикладной механики и материаловедения, профессор

Старостенков Михаил Дмитриевич, доктор физико-математических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Алтайский государственный университет им. И.И. Ползунова», кафедра физики, профессор

Еникеев Нариман Айратович, доктор физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный авиационный технический университет», научно-исследовательская лаборатория «Металлы и сплавы при экстремальных воздействиях» Евразийского научно-образовательного центра, старший научный сотрудник

Защита состоится 03 ноября 2022 г. в 16 час. 30 мин. на заседании диссертационного совета «НИ ТГУ.1.3.01», созданного на базе физического факультета и Сибирского физико-технического института имени академика В.Д. Кузнецова федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет» по адресу: 634050, г. Томск, пр. Ленина, 36 (учебный корпус СФТИ ТГУ, аудитория 211).

С диссертацией можно ознакомиться в Научной библиотеке и на официальном сайте федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет» www.tsu.ru.

Материалы по защите диссертации размещены на официальном сайте ТГУ: <http://dissertations.tsu.ru/PublicApplications/Details/8527e0c1-4070-4940-af16-409eb352f6d7>

Автореферат разослан « ____ » сентября 2022 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Панченко Елена Юрьевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. В настоящее время 9-12%-ные хромистые ферритно-мартенситные стали являются перспективными конструкционными материалами для оболочек тепловыделяющих элементов ядерных реакторов благодаря их высокой теплопроводности, относительно низкому тепловому расширению и стойкости к радиационному распуханию по сравнению с аустенитными сталями [1*-5*].

В связи с разработкой ядерных реакторов нового (IV) поколения, предполагаемые рабочие температуры для которых 650-700 °С, требуется повышение механических свойств существующих, либо разработка новых конструкционных материалов. Верхний интервал рабочих температур этих сталей в ядерном реакторе ограничен уровнем длительной высокотемпературной прочности (жаропрочности) и в настоящее время составляет 620 °С. Ферритно-мартенситные стали как материалы с ОЦК решеткой имеют склонность к низкотемпературному охрупчиванию, при этом в условиях облучения температура вязко-хрупкого перехода может сдвигаться в сторону положительных температур. В связи с этим, большое внимание при изучении ферритно-мартенситных сталей уделяется повышению уровня их высокотемпературной прочности и снижению тенденции к низкотемпературному охрупчиванию.

Значительное [1*-5*] повышение верхних рабочих температур может быть достигнуто за счет сочетания модификации состава и контроля параметров микроструктуры с помощью высокотемпературных термомеханических обработок (ВТМО).

Степень разработанности темы исследования. В последние десятилетия активно ведутся исследования особенностей микроструктуры и механических свойств 9-12% хромистых ферритно-мартенситных сталей в структурных состояниях после различных обработок [1*-5*]. Наибольшее внимание уделяется состоянию после традиционной термической обработки (ТТО) [4*, 5*], влияние термомеханических (ТМО) или высокотемпературных термомеханических (ВТМО) обработок на микроструктуру и механические свойства исследовано в работах [1*-3*] на зарубежных реакторных преимущественно 9% Cr ферритно-мартенситных сталях. Отмечается перспективность ВТМО для повышения кратковременных и длительных высокотемпературных свойств сталей за счет повышения плотности дислокаций и объемной доли наноразмерных частиц. К настоящему времени имеются отдельные работы [5*] по изучению влияния ВТМО на микроструктуру и механические свойства российских 12 % Cr ферритно-мартенситных сталей, выполненные на малоактивируемой стали ЭК-181. Исследования влияния ВТМО на закономерности формирования микроструктуры и механические свойства в температурном интервале от -70 до 720 °С на перспективной ферритно-мартенситной стали ЭП-823 в настоящее время отсутствуют.

Цель и задачи исследования. Целью диссертационной работы является выявление закономерностей структурно-фазовых превращений и установление механизмов изменения прочностных и пластических свойств 12% Cr ферритно-мартенситных сталей после высокотемпературной термомеханической обработки в температурном интервале от -70 до 720 °С, включающем области вязко-хрупкого перехода (от -70 до 20 °С) и предполагаемых рабочих температур ядерного реактора (650-700 °С).

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

1. Выявить особенности и определить параметры гетерофазной микроструктуры и дислокационной субструктуры 12% Cr ферритно-мартенситной стали ЭП-823 после высокотемпературной термомеханической и традиционной термической обработок.

2. Установить влияние особенностей гетерофазной микроструктуры и дислокационной субструктуры на механические свойства и механизмы разрушения ферритно-мартенситной стали ЭП-823 в температурном интервале от -70 до 720 °С.

3. Выявить особенности деформированной микроструктуры ферритно-мартенситной стали ЭП-823 после высокотемпературной термомеханической обработки в условиях растяжения в температурном интервале от -70 до 20 °С и от 650 до 720 °С.

4. Установить механизмы упрочнения и физические причины изменения пластических свойств ферритно-мартенситной стали ЭП-823 после высокотемпературной термомеханической и традиционной термической обработок.

5. Выявить влияние элементного состава 12% Cr ферритно-мартенситных сталей ЭП-823 и ЭК-181 на параметры микроструктуры, прочностные и пластические свойства.

Новизна исследования. В диссертации получены следующие новые научные результаты:

1. Выявлены закономерности изменения микроструктуры после высокотемпературной термомеханической обработки 12 % Cr ферритно-мартенситной стали ЭП-823 по сравнению с традиционной термической обработкой – уменьшение в 1,5-2 раза средних размеров мартенситных блоков и ферритных зерен, и в 3 раза средних размеров мартенситных ламелей, повышение плотности дислокаций и увеличение объемной доли наноразмерных частиц типа MX (M = Nb, Mo, X = C, N) в 1,5 раза.

2. Установлено влияние параметров микроструктуры на кратковременные механические свойства ферритно-мартенситной стали ЭП-823 в интервале температур от -70 до 720 °С. Показано повышение значений предела текучести в температурном интервале от -70 до 650 °С и снижение относительного удлинения до разрушения вблизи интервала температур динамического деформационного старения (400-450 °С).

3. Определены механизмы упрочнения ферритно-мартенситной стали ЭП-823 в условиях высокотемпературной термомеханической и традиционной термической обработок. Увеличение прочности стали в условиях высокотемпературной термомеханической обработки определяется повышенной эффективностью совместного действия зернограничного, дисперсного и субструктурного механизмов упрочнения относительно состояния после традиционной термической обработки.

4. Впервые проанализированы особенности деформированной микроструктуры стали ЭП-823 после высокотемпературной термомеханической обработки вблизи области шейки образцов, растянутых в температурных интервалах вблизи вязко-хрупкого перехода (-70–20 °С) и области предполагаемых рабочих температур (650-700 °С). В температурном интервале от -70 до 20 °С обнаружено искривление и фрагментация мартенситных ламелей, формирование новых малоугловых границ разориентации, значительное повышение плотности дислокаций внутри мартенситных ламелей и ферритных зерен. При температурах 650-720 °С наблюдается полигонизованная структура, уменьшается плотность дислокаций при сохранении отдельных зерен и субзерен с повышенной плотностью дислокаций, увеличиваются средние размеры дисперсных частиц $M_{23}C_6$.

5. Выявлено влияние высокотемпературной термомеханической обработки на особенности разрушения ферритно-мартенситной стали ЭП-823 в температурном интервале от -70 до 720 °С. Показан вязкий ямочный характер разрушения во всем изученном температурном интервале. Высокотемпературная термомеханическая обработка приводит к увеличению количества, длины и размеров микротрещин в низкотемпературной области деформации и к их преимущественной ориентации в плоскости прокатки относительно традиционной термической обработки.

б. Установлено влияние элементного состава 12 % Cr ферритно-мартенситных сталей на прочностные и пластические свойства в структурном состоянии после высокотемпературной термомеханической и традиционной термической обработок. Наличие сильных карбидообразующих элементов (Nb, Mo) в составе стали ЭП-823 приводит к формированию грубодисперсных частиц типа MX ($M = Nb, Mo, X = C, N$), в результате объемная доля мелкодисперсных частиц в этой стали ниже, чем в стали ЭК-181, что способствует уменьшению эффективности совместного дисперсного и субструктурного механизмов упрочнения. Наличие сильных карбидообразующих элементов (Nb, Mo) способствует эффективному закреплению дислокаций и, как следствие, более интенсивному проявлению эффектов динамического деформационного старения и снижению пластичности в стали ЭП-823 по сравнению со сталью ЭК-181 в температурном интервале 400-450 °С.

Теоретическая и практическая значимость работы. Выявленные закономерности формирования микроструктуры и изменения механических свойств, а также механизмы упрочнения и особенности разрушения 12 %-ной хромистой ферритно-мартенситной стали ЭП-823 в условиях высокотемпературной термомеханической обработки расширяют современные представления в физике прочности и пластичности сталей ферритно-мартенситного класса.

Практическая значимость состоит в возможности использования полученных результатов структурных исследований и механических свойств ферритно-мартенситных сталей после высокотемпературной термомеханической обработки для разработки технологий производства деталей с целью их использования в качестве конструкционных материалов для оболочек тепловыделяющих элементов в активных зонах ядерных реакторов нового поколения.

Методология и методы исследования. В работе использованы следующие методы исследования: просвечивающая и растровая электронная микроскопия, с применением дифракции обратно-рассеянных электронов и энергодисперсионного рентгеновского микроанализа; рентгеноструктурный анализ, механические испытания методом активного растяжения в широком температурном интервале, включающем область вязко-хрупкого перехода и область предполагаемых рабочих температур ядерного реактора.

Положения, выносимые на защиту:

1. Повышение эффективности основных механизмов упрочнения 12% хромистой ферритно-мартенситной стали ЭП-823 в результате высокотемпературной термомеханической обработки относительно традиционной термической обработки: зернограничного упрочнения – за счет уменьшения в 1,5-2 раза средних размеров мартенситных блоков и зерен феррита; дисперсного – за счет увеличения объемной доли наноразмерных частиц типа MX ($M = Nb, Mo, X = C, N$) в 1,5 раза и субструктурного – за счет уменьшения в 3 раза средних размеров мартенситных ламелей и повышения плотности дислокаций.

2. Закономерности повышения предела текучести стали ЭП-823 после высокотемпературной термомеханической обработки относительно традиционной термической обработки: увеличение до 180 МПа в низкотемпературной области деформации (-70–20 °С) и до 120 МПа вблизи области динамического деформационного старения (300-500 °С), обусловленные высокой эффективностью основных механизмов упрочнения. Снижение эффективности этих механизмов в результате уменьшения плотности дислокаций и активизации термически активируемых процессов преодоления скользящими дислокациями дисперсных частиц при температурах выше 500 °С.

3. Закономерности пластической деформации и механизмы разрушения ферритно-мартенситной стали ЭП-823 в структурном состоянии после высокотемпературной термомеханической обработки в условиях растяжения при различных температурах: искривление и фрагментация мартенситных ламелей, образование новых малоугловых границ разориентации, локализация деформации и значительное увеличение плотности дислокаций в низкотемпературной (от -70 до 20 °С) области деформации; возврат и динамическая полигонизация вблизи области рабочих температур ядерного реактора (650-700 °С); вязкий механизм разрушения в температурном интервале от -70 до 720 °С.

4. Влияние легирующих элементов на параметры микроструктуры, прочностные и пластические свойства 12% хромистых ферритно-мартенситных сталей: более высокие (до 15%) значения предела текучести в стали ЭК-181 относительно стали ЭП-823 за счет увеличенной в 1,4-1,7 раза объемной доли мелкодисперсных частиц и повышенной плотности дислокаций. Снижение пластичности после высокотемпературной термомеханической обработки в стали ЭП-823 относительно стали ЭК-181 вблизи области динамического деформационного старения (300-500 °С) за счет более эффективного закрепления дислокаций в условиях сегрегации на них сильных карбидообразующих элементов (Nb, Mo).

Степень достоверности полученных результатов. Достоверность полученных результатов обеспечивается использованием современного оборудования для структурных исследований и механических испытаний, всесторонним анализом и сопоставлением экспериментальных результатов, полученных разными методами; сравнением полученных результатов с данными других авторов в выбранной области исследования.

Апробация результатов исследования. Результаты научной работы представлены на следующих научных конференциях: IV Международная научная конференция студентов и молодых ученых «Молодежь, наука, технологии: новые идеи и перспективы» (Томск, 2017); 24-ая Всероссийская научная конференция студентов-физиков и молодых ученых (Томск, 2018); XVI Российская научная студенческая конференция по физике твердого тела (Томск, 2018); Международная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Перспективы развития фундаментальных наук» (Томск, 2018); Международные научные чтения им. И.А. Одингга «Механические свойства конструкционных материалов» (Москва, 2018); Международная конференция «Перспективные материалы с иерархической структурой для новых технологий и надежных конструкций» (Томск, 2018); IX Международная школа с элементами научной школы для молодежи «Физическое материаловедение» (Тольятти, 2019); Международная конференция «Перспективные материалы с иерархической структурой для новых технологий и надежных конструкций» (Томск, 2019); Международная конференция «Физическая мезомеханика. Материалы с многоуровневой иерархически организованной структурой и интеллектуальные производственные технологии» (Томск, 2020); XVIII Международная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Перспективы развития фундаментальных наук» (Томск, 2021), международная конференция «Физическая мезомеханика. Материалы с многоуровневой иерархически организованной структурой и интеллектуальные производственные технологии» (Томск, 2021).

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 33 работы, в том числе 6 статей включенных в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание учёной степени доктора наук (из них 1 статья в зарубежном научном журнале, входящем в Scopus, 3 статьи в российском научном журнале, переводная

версия которого входит в Scopus, 2 статьи в российском научном журнале, входящем в Scopus), 7 статей в сборниках материалов конференций, представленных в изданиях, входящих в Scopus, 1 статья в прочем научном журнале, 19 публикаций в сборниках материалов международных и всероссийских научных и научно-практических конференций.

Личный вклад автора. Анализ и обобщение научной литературы в выбранной области исследования, основной объем экспериментальных исследований и их обработку автор выполнил лично. Постановка цели и задач диссертационной работы, обсуждение результатов, подготовка и написание статей, формулировка основных положений и выводов осуществлялись совместно с научным руководителем.

Объем и структура и диссертационной работы. Диссертация изложена на 133 страницах, состоит из введения, пяти глав, заключения, списка сокращений и условных обозначений, списка литературы из 210 наименований; содержит 48 рисунков и 9 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

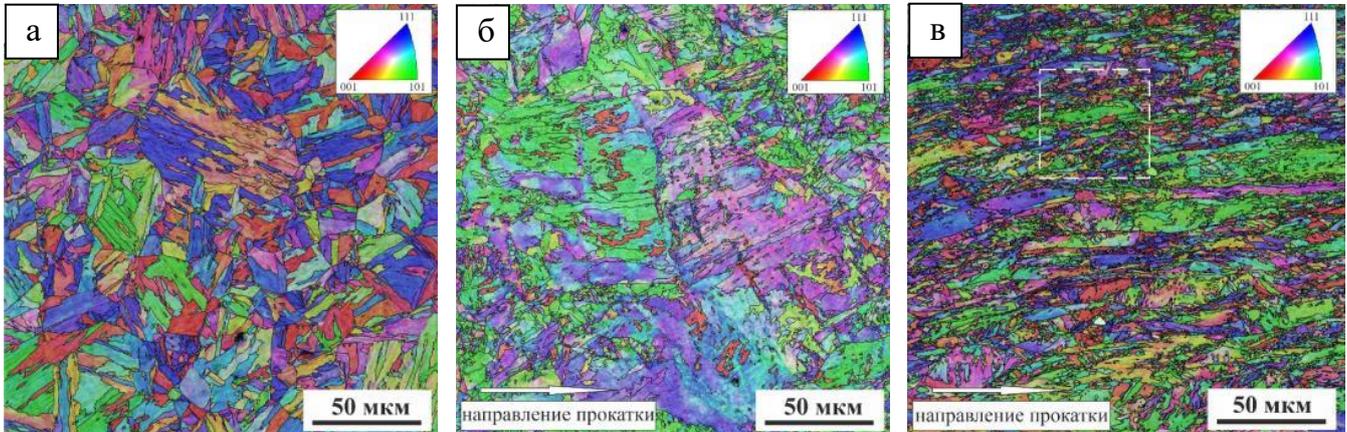
Во **введении** обсуждена актуальность и степень разработанности темы диссертационного исследования, сформулированы цели и задачи работы, отражены полученные в работы новые результаты, описана их теоретическая, практическая значимость и достоверность, представлены положения, выносимые на защиту.

В **первой главе** приведен литературный обзор по теме диссертации. Показано, что влияние высокотемпературной термомеханической обработки (ВТМО) на микроструктуру и механические свойства изучено преимущественно на зарубежных 9% хромистых ферритно-мартенситных сталях. Такая обработка способствует уменьшению размеров мартенситных ламелей, повышению плотности дислокаций и объемной доли мелкодисперсных частиц относительно традиционной термической обработки (ТТО). Указанные изменения микроструктуры способствуют повышению кратковременной высокотемпературной прочности и сопротивлению ползучести.

Во **второй главе** описаны методики микроструктурных исследований: просвечивающая и растровая электронная микроскопия, включая методы дифракции обратно-рассеянных электронов и энергодисперсионного анализа, рентгеноструктурный анализ. Механические испытания проводили методом активного растяжения в температурном интервале от -70 до 720 °С. Объектом исследования выбраны российские 12% хромистые ферритно-мартенситные стали ЭП-823 (Fe-12Cr-Mo-Nb-W-V-B) и ЭК-181 (Fe-12Cr-W-V-Ta-B-C-N). Данные стали исследовались после ВТМО и ТТО. ТТО включала нагрев до $T=1100$ °С, выдержку 1 ч, закалку на воздух и отпуск при $T=720$ °С, 3 ч. ВТМО состояла из аустенизации с нагревом до $T=1100$ °С, 1 ч, горячей пластической деформации прокаткой в аустенитной области до величины $\varepsilon \approx 50$ % за один проход (прокатный стан находился при $T=20$ °С; температура образца на выходе из стана была не ниже 700 °С) и последующей закалки в воду. После деформации проводили отпуск при $T=720$ °С, 1 ч.

Третья глава состоит из трех разделов. В **разделе 3.1** представлены результаты структурных исследований 12% хромистой ферритно-мартенситной стали ЭП-823 после ВТМО и ТТО, полученные методами растровой и просвечивающей электронной микроскопии. Изучены особенности зеренной структуры и субструктуры ферритно-мартенситной стали ЭП-823 после ВТМО с пластической деформацией в аустенитной области в сравнении с аналогичными особенностями после ТТО. Результаты исследований методами РЭМ с дифракцией обратно-рассеянных электронов представлены на рисунке 1. Показано, что ВТМО приводит к формированию структуры с зернами, вытянутыми в

направлении (рисунок 1 б) и сплюснутыми в плоскости прокатки (рисунок 1 в), уменьшению средних размеров мартенситных блоков и ферритных зерен в 1.5–2 раза (относительно значений после ТТО (рисунок 1 а)). При этом после ВТМО возрастают разориентировки на субграницах мартенситных ламелей, формируются новые дислокационные субструктуры и увеличивается плотность дислокаций.



а – после ТТО, б – после ВТМО в сечении, параллельном плоскости прокатки, в – после ВТМО в сечении, перпендикулярном плоскости прокатки

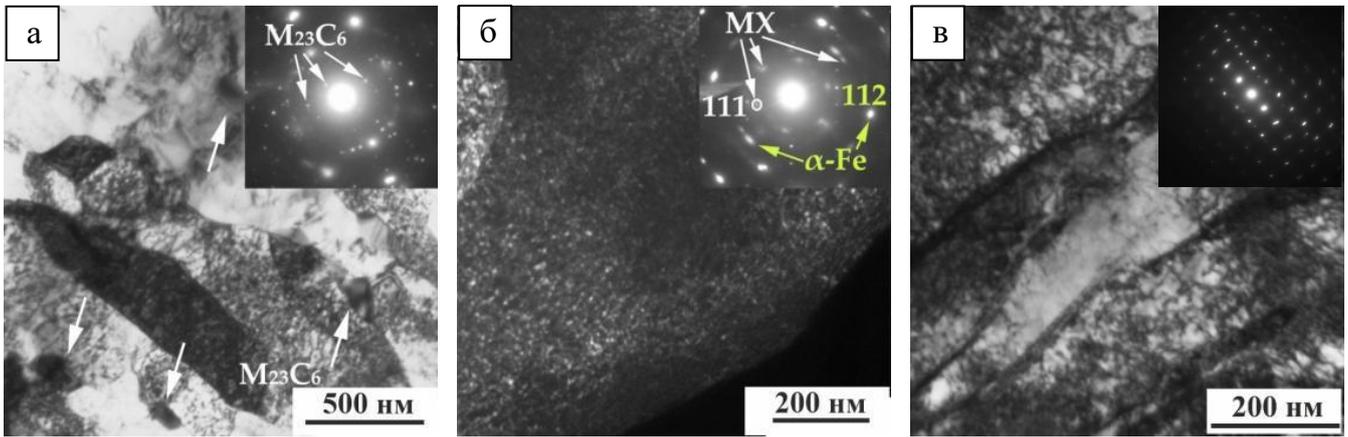
Рисунок 1 – Изображения микроструктуры стали, полученные методом РЭМ с дифракцией обратно-рассеянных электронов

Исследования особенностей микроструктуры протравленных образцов стали после ТТО и ВТМО методами РЭМ показали наличие на поверхности большого количества грубодисперсных карбидных частиц $M_{23}C_6$ ($(Fe, Cr)_{23}C_6$), которые выделяются по границам зерен и субзерен, а также карбонитридов типа МХ ($M = Nb, Mo, X = C, N$) – внутри зерна.

ПЭМ исследования показали, что после ВТМО и ТТО структура представлена ламелями отпущенного мартенсита, ферритными зернами, грубодисперсными (50 – 250 нм) частицами типа $M_{23}C_6$ и мелкодисперсными частицами типа МХ (2 – 20 нм) (рисунок 2). Внутри мартенситных ламелей обнаруживается развитая дислокационная субструктура (рисунок 2 в). Наноразмерные частицы типа МХ расположены на дислокациях, закрепляя их (рисунок 2 б).

Отличия микроструктуры после двух обработок заключаются главным образом в различной морфологии структурных элементов и уменьшении их размеров после ВТМО, в расположении и морфологии грубодисперсных карбидов типа $M_{23}C_6$, различной плотности дислокаций и различии в объемных долях наноразмерных частиц типа МХ. После ВТМО ширина мартенситных ламелей составляет 150 – 400 нм при среднем значении ≈ 230 нм (рисунок 2 а). После ТТО ширина мартенситных ламелей составляет 200 – 800 нм при среднем значении ≈ 600 нм.

Оценки объемных долей мелкодисперсных частиц типа МХ после ТТО и ВТМО по ПЭМ изображениям дают значения $\approx 0,6$ и $\approx 0,9$ %, соответственно. Точность указанных оценок $\pm 0,3$ %, в связи с этим следует говорить скорее о тенденции в увеличении объемной доли таких частиц в результате ВТМО. Методом секущих по характерным ПЭМ (рисунок 2 в) изображениям дислокационной субструктуры были проведены оценки плотности дислокаций. Согласно этим оценкам, после ТТО в областях феррита она составляет $\approx (1-2) \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$, в областях мартенсита $\approx (1-3) \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$, после ВТМО плотность дислокаций возрастает до $\approx (3-6) \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$ в областях феррита и $\approx (6-9) \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$ в областях мартенсита.



а – ламели мартенсита, частицы $M_{23}C_6$, б – частицы типа MX, в – дислокационная субструктура

Рисунок 2 – ПЭМ изображения стали после VTMO

В разделе 3.2 проведен анализ основных механизмов упрочнения стали ЭП-823 после двух режимов обработки. Основные механизмы упрочнения [6*, 7*] суммарно описывают вклад в значение предела текучести ($\Delta\sigma_{0,2}$):

$$\Delta\sigma_{0,2} = \sigma_0 + \Delta\sigma_{ss} + \Delta\sigma_{disp} + \Delta\sigma_{disl} + \Delta\sigma_{GB} + \Delta\sigma_{SubStr} \quad (1),$$

где σ_0 – напряжение трения решетки (силы Пайерлса-Набарро), $\Delta\sigma_{ss}$ – твердорастворное упрочнение, $\Delta\sigma_{disp}$ – дисперсное упрочнение, $\Delta\sigma_{disl}$ – дислокационное (деформационное), $\Delta\sigma_{GB}$ – зернограничное упрочнение, $\Delta\sigma_{SubStr}$ – субструктурное упрочнение.

Указанные механизмы основываются на торможении и блокировке дислокаций границами зёрен, атомами легирующих элементов, дисперсными частицами, а также другими дислокациями.

Упрочнение за счет сил Пайерлса-Набарро рассчитывается по формуле [6*, 7*]:

$$\sigma_0 = 2G \cdot 10^{-4} \quad (2),$$

где G – модуль сдвига и для 12% хромистой ферритно-мартенситной стали ЭК-181, по составу близкой к стали ЭП-823, составляет 86,5 ГПа. Подставляя значение модуля сдвига, получаем вклад в упрочнение ≈ 17 МПа.

Основными легирующими элементами стали ЭП-823, которые вносят вклад в твердорастворное упрочнение являются Cr, Mo, W, Si, Mn, а также C. При легировании α -железа твердорастворное упрочнение отражается следующей зависимостью [6*, 7*]:

$$\Delta\sigma_{ss} = k_i C_i \quad (3),$$

где k_i – коэффициент упрочнения i -ым легирующим элементом, $k_i(\text{Cr})=31$ МПа/%, $k_i(\text{Mn})=33$ МПа/%, $k_i(\text{Mo})=11$ МПа/%, $k_i(\text{Si})=86$ МПа/%, $k_i(\text{C+N})=4670$ МПа/% [6*, 7*]; C_i – концентрация, % (по массе), i -го легирующего элемента, растворенного в феррите.

Оценки по формуле (3) вклада от твердорастворного упрочнения для стали ЭП-823 дают достаточно высокие значения – более 1200 МПа, что превышает наблюдаемые экспериментально (раздел 3.3) значения предела текучести. Это связано с неучтенным обеднением твердого раствора при выделении дисперсных частиц после ТТО и VTMO и соответствующим уменьшением содержания в твердом растворе таких элементов как C, Cr, Nb и Mo в твердом растворе.

Вклад от твердорастворного упрочнения и упрочнения за счет сил Пайерлса-Набарро изменяется незначительно для двух обработок (ТТО, VTMO).

Поскольку параметр решетки частиц NbC ($a=0,4454$ нм) в 1,5 раз больше параметра решетки матрицы ($a=0,2888$ нм), предполагается, что частицы в значительной степени теряют когерентность с матрицей. Поэтому, дисперсионное упрочнение в стали ЭП-823 реализуется

за счет огибания частиц (некогерентных) дислокациями по механизму Орована [7*], которое рассчитывалось по формуле [6*, 7*]:

$$\Delta \sigma_{\text{disp}} = G \cdot b / \lambda \quad (4),$$

где $G \approx 86,5$ ГПа, b – вектор Бюргерса дислокаций – $\approx 0,25$ нм [6*, 7*], $\lambda \approx R(2\pi/3f)^{1/2}$ – среднее расстояние между частицами (R – радиус частиц; f – их объемная доля).

Результаты оценки при характерных размерах (диаметрах) дисперсных частиц 5, 10 и 20 нм, при их объемных долях 0,9% ($f \approx 0,009$) для ВТМО и 0,6% ($f \approx 0,006$) для ТТО представлены в таблице 1. Из таблицы видно, что после ВТМО значения теоретически рассчитанного упрочнения в 1,2 раза выше соответствующих значений после ТТО.

Таблица 1 – Теоретически рассчитанные значения напряжений Орована для стали ЭП-823 в зависимости от размеров частиц карбонитридной фазы после ВТМО и ТТО

Размеры частиц (d), нм	$\Delta \sigma_{\text{disp}}$, МПа, $f \approx 0,009$ ВТМО	$\Delta \sigma_{\text{disp}}$, МПа, $f \approx 0,006$ ТТО
5	576	480
10	288	240
20	144	120

Дислокационное упрочнение рассчитывалось по формуле [7*]:

$$\Delta \sigma_{\text{disl}} = \alpha \cdot m \cdot G \cdot b \cdot \rho^{1/2} \quad (5),$$

где α – коэффициент, зависящий от характера распределения и взаимодействия дислокаций $\approx (0,1-0,3)$, m – ориентационный множитель $\approx 2,75$ (указанные значения для ферритно-мартенситных сталей), произведение αm принимается равным $\approx 0,5$ [6*, 7*].

Плотность дислокаций после ВТМО, согласно данным рентгеноструктурного анализа, составляет $8,4 \cdot 10^{10}$ см⁻², после ТТО $7,4 \cdot 10^{10}$ см⁻². При этой плотности дислокаций, деформационное упрочнение стали ЭП-823 после ВТМО составляет 313 МПа, после ТТО – 292 МПа. При учете плотности дислокаций в мартенсите согласно данным ПЭМ, дислокационный вклад в упрочнение может достигать ≈ 900 МПа после ВТМО и ≈ 700 МПа после ТТО. Такие оценки дислокационного вклада в упрочнение вероятнее всего завышены.

Зернограничное упрочнение оценивалось по соотношению Холла–Петча [6*, 7*]:

$$\Delta \sigma_{\text{GB}} = K_y d^{1/2} \quad (6),$$

где d – размер зерна, а K_y – экспериментально полученная константа, которая для низкоуглеродистых сталей составляет $\approx 0,62$ МПа·м^{1/2} [199]. Для малоугловых границ разориентировки используется следующая формула для оценки вклада субструктурного упрочнения [6*, 7*]:

$$\Delta \sigma_{\text{substr}} = K_y d^{-1} \quad (7),$$

где $K_{y\text{sub}} \approx 1,5 \cdot 10^{-4}$ МПа·м.

В стали ЭП-823 границы зерен феррита и блоков мартенсита являются высокоугловыми границами, в то время как границы мартенситных ламелей – малоугловыми границами. При среднем размере мартенситных блоков и зерен феррита 3,1 мкм (после ТТО) и 2,1 мкм (после ВТМО), вклад от зернограничного упрочнения составляет 370 МПа после ТТО и 912 МПа после ВТМО. Средняя ширина мартенситных ламелей после ТТО – 600 нм, после ВТМО – 230 нм, исходя из этого, субструктурное упрочнение малоугловыми границами дает вклад после ТТО – 250 МПа, после ВТМО – 650 МПа.

После ВТМО вклад от дисперсного упрочнения в 1,2 раза, от дислокационного упрочнения – в 1,1-1,3 раза, от зернограничного – в 2,4 раз и от субструктурного в 2,6 раз выше, по сравнению с ТТО. Поскольку малоугловые границы представляют собой дислокационные стенки, а в деформационном (дислокационном) упрочнении учитываются дислокации внутри зерен и субзерен, указанные элементы дают общий вклад в субструктурное упрочнение. Таким образом, основными механизмами упрочнения 12%

хромистой ферритно-мартенситной стали ЭП-823 после ВТМО являются: дисперсное упрочнения наноразмерными карбонитридами типа МХ по механизму Орована; зернограничное упрочнение высокоугловыми границами (за счет мартенситных блоков и зерен феррита) и субструктурное упрочнение малоугловыми границами мартенситных ламелей и за счет повышенной плотности дислокаций. Основные механизмы упрочнения взаимосвязаны и их суммирование может приводить к завышенным оценкам. Исходя из этого, представленные оценки могут только указывать на тенденцию к увеличению вкладов конкретных механизмов, обусловленную изменением параметров микроструктуры в результате ВТМО.

В разделе 3.3 представлены результаты исследований кратковременных механических свойств стали ЭП-823 после ВТМО и ТТО в условиях испытаний на растяжение в интервале температур от -70 до 720 °С (рисунок 3). Из сравнения представленных данных, следует, что в значительной части изученного интервала температур наблюдается повышение прочностных свойств стали после ВТМО относительно ТТО.

На зависимостях механических свойств (пределы текучести и прочности, относительное удлинение до разрушения) от температуры растяжения для стали ЭП-823 можно выделить несколько характерных температурных интервалов:

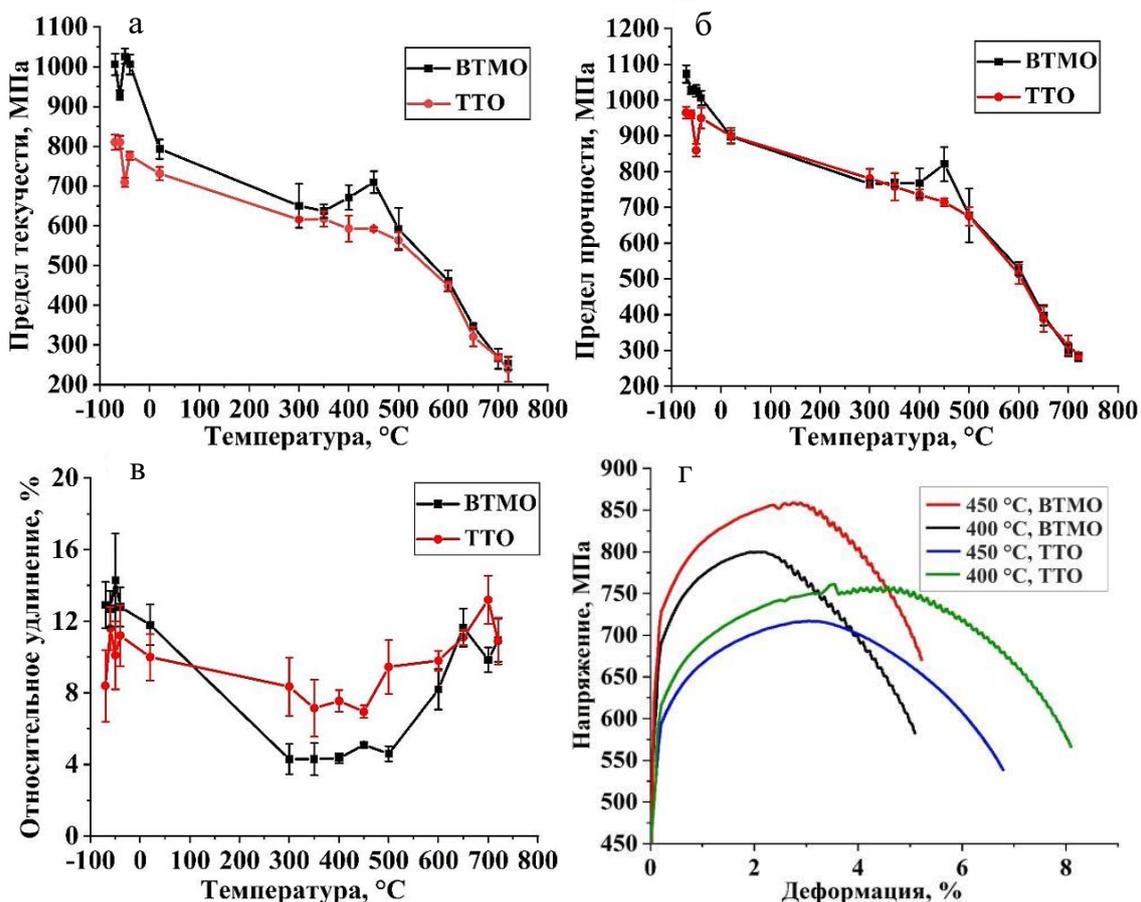
- от -70 до 20 °С – интервал резкого снижения предела текучести после ВТМО с повышением температуры, для ТТО наблюдается менее резкий спад. Сильная температурная зависимость предела текучести и повышенные его значения в данном интервале определяются возрастанием сопротивления движению дислокаций с понижением температуры (барьеры Пайерлса, твёрдорастворное упрочнение);

- от 20 до 300 °С – интервал, в котором сохраняется практически неизменный уровень прочностных свойств и удлинения до разрушения. Это связано с высокой эффективностью дисперсного упрочнения наноразмерными частицами типа МХ;

- от 300 до 500 °С – интервал, в котором предел текучести незначительно снижается с повышением температуры для ТТО и наблюдается повышение пределов текучести и прочности при $400 - 450$ °С для ВТМО. Удлинение до разрушения в этом температурном интервале минимально (около 4-5%) после ВТМО;

- от 500 до 720 °С – интервал значительного снижения предела текучести и увеличения удлинения до разрушения с ростом температуры испытаний для обеих обработок, связанный с уменьшением эффективности дисперсного и субструктурного упрочнений в условиях активизации термически активируемых процессов преодоления скользящими дислокациями дисперсных частиц.

На рисунке 3 г представлены кривые растяжения стали ЭП-823 в области температур $400 - 450$ °С после двух обработок (ТТО и ВТМО). После ВТМО наблюдается прерывистое течение при $400-450$ °С, после ТТО только при 450 °С. ВТМО оказывает значительное влияние на поведение стали ЭП-823 в области динамического деформационного старения, которое отражается в увеличении предела текучести до 120 МПа при $400 - 450$ °С. При этом удлинение стали после ВТМО при указанных температурах имеет минимальные значения.



а – предел текучести, б – предел прочности, в – относительное удлинение до разрушения, г – инженерные кривые течения

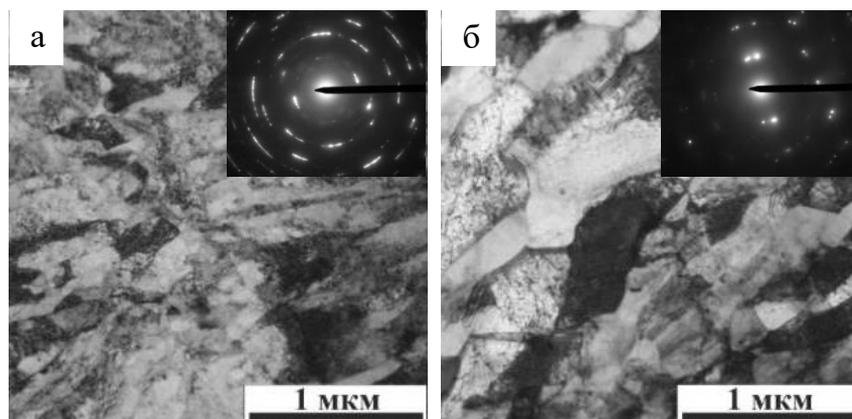
Рисунок 3 – Изменение механических свойств стали ЭП-823 в зависимости от температуры при ТТО и VTMO

Проявление эффекта динамического деформационного старения зависит от скорости деформации, которая в данной работе составляла $2 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}$. Значительное влияние VTMO на пластическое течение в этой области обусловлено особенностями структурно-фазового состояния стали. Повышенная плотность дислокаций и субграниц, сформированная в результате горячей деформации, способствует образованию сегрегаций и/или атмосфер Коттрелла на дислокациях и диффузии атомов углерода и сильных карбидообразователей (Nb, Mo) к границам зерен. Отрыв дислокаций от атмосфер в условиях пластической деформации вызывает появление характерных «зубцов» на кривой течения.

В главе 4 проанализированы особенности деформированной микроструктуры в области шейки (раздел 4.1) и механизмы разрушения (раздел 4.2) стали ЭП-823 в температурном интервале от -70 до 720 °C после VTMO и ТТО.

Исследования особенностей микроструктуры стали вблизи области шейки после испытаний на растяжение при $T = 20, -40, -70$ °C показали, что пластическая деформации приводит к изменению мартенситной структуры: искривлению субграниц мартенситных ламелей, их фрагментации и образованию новых малоугловых границ (рисунок 4 а). Ширина мартенситных ламелей не изменяется относительно недеформированной структуры, в то время как плотность дислокаций вблизи области шейки значительно возрастает и в отдельных участках дислокации не разрешаются и их плотность может достигать 10^{12} см^{-2} .

В отдельных участках (рисунок 4 а) наблюдаются области локализованной деформации с сильно фрагментированной мелкозернистой структурой, которая характеризуется квазиколевыми дифракционными картинами. Это свидетельствует о



а – -40 °С; б – 650 °С

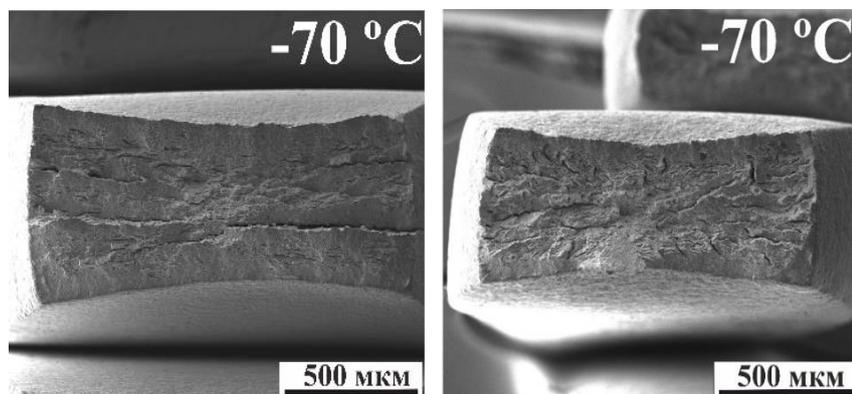
Рисунок 4 – Микроструктура стали ЭП-823 после ВТМО в области шейки: СП изображения и соответствующие им МД картины

формировании в процессе деформации новых субмикронных зерен и субзерен. Наблюдаются грубодисперсные частицы $M_{23}C_6$ преимущественно округлой формы с размерами менее 100 нм.

При повышении температуры деформации до 650-720 °С (рисунок 4 б) наблюдаются следующие особенности в микроструктуре: реализуются процессы возврата и динамической полигонизации,

увеличиваются размеры грубодисперсных карбидов $M_{23}C_6$. Исходные вытянутые мартенситные ламели трансформируются в более равноосные фрагменты с мало- и высокоугловыми границами разориентации. В некоторых фрагментах наблюдается повышенная плотность дислокаций $\sim 10^{11} \text{ см}^{-2}$, в других фрагментах, наоборот, плотность дислокаций ниже.

Сравнительные фратографические исследования (раздел 4.2), показали, что основные закономерности в изменении характера разрушения стали ЭП-823 после ТТО и ВТМО качественно аналогичны и определяются главным образом температурой испытаний. Разрушение во всем температурном интервале от -70 до 720 °С сопровождается макролокализацией деформации с образованием шейки. После ВТМО наблюдаются микротрещины (рисунок 5 а), преимущественно параллельные плоскости прокатки и проходящие через значительную часть сечения образца, как при отрицательных температурах, так и при 20 °С. Микротрещины после ВТМО могут образовываться



а – после ВТМО, б – после ТТО

Рисунок 5 – Фратографические изображения изломов образцов стали

преимущественно по высокоугловым границам разориентации, которые формируются в результате горячей деформации. В случае ТТО (рисунок 5 б) при отрицательной и комнатной температуре направления микротрещин хаотичны, их длина значительно меньше, чем после ВТМО. При повышении температуры деформации после двух обработок микротрещины

постепенно исчезают и полностью отсутствуют при высоких температурах.

Во всем исследованном температурном интервале от -70 до 720 °С разрушение происходит с образованием шейки, наблюдается вязкий ямочный излом (рисунок 6). Средние размеры ямок составляют 1-5 мкм, ближе к температуре испытаний 720 °С размеры некоторых ямок достигают 15-18 мкм. Зарождение таких ямок происходит в основном на частицах.

Снижение значений относительного удлинения до разрушения в температурном интервале от 300 до 500 °С в стали ЭП-823 после ВТМО (рисунок 3 в) не отражается на особенностях разрушения. При этом размер ямок при повышении температуры практически не меняется.

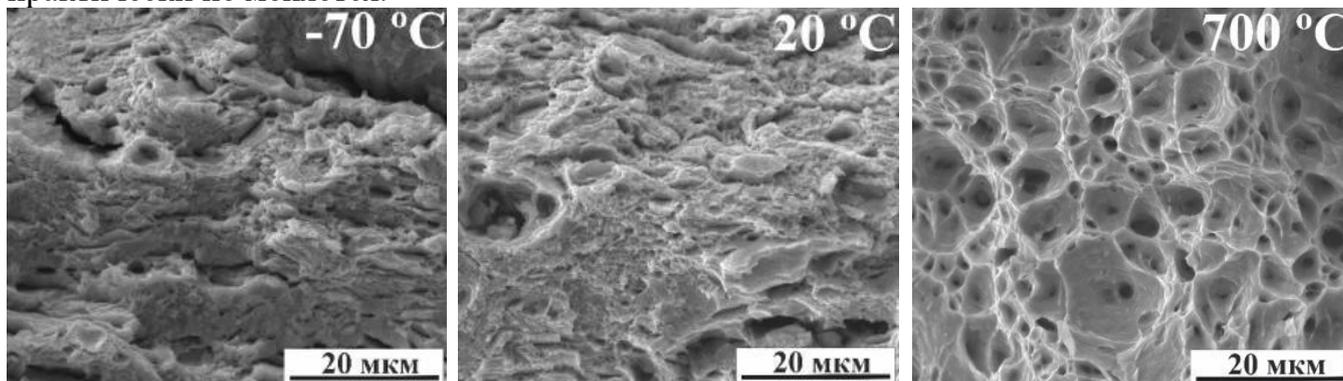


Рисунок 6 – Фрактография изломов образцов стали после ВТМО

Пониженные значения относительного удлинения после ВТМО связаны с активизацией процессов динамического деформационного старения. При разработке технологий изготовления изделий из стали ЭП-823 с использованием ВТМО необходимо учитывать возможность нежелательного снижения пластичности в результате горячей пластической деформации и активизацию этих процессов.

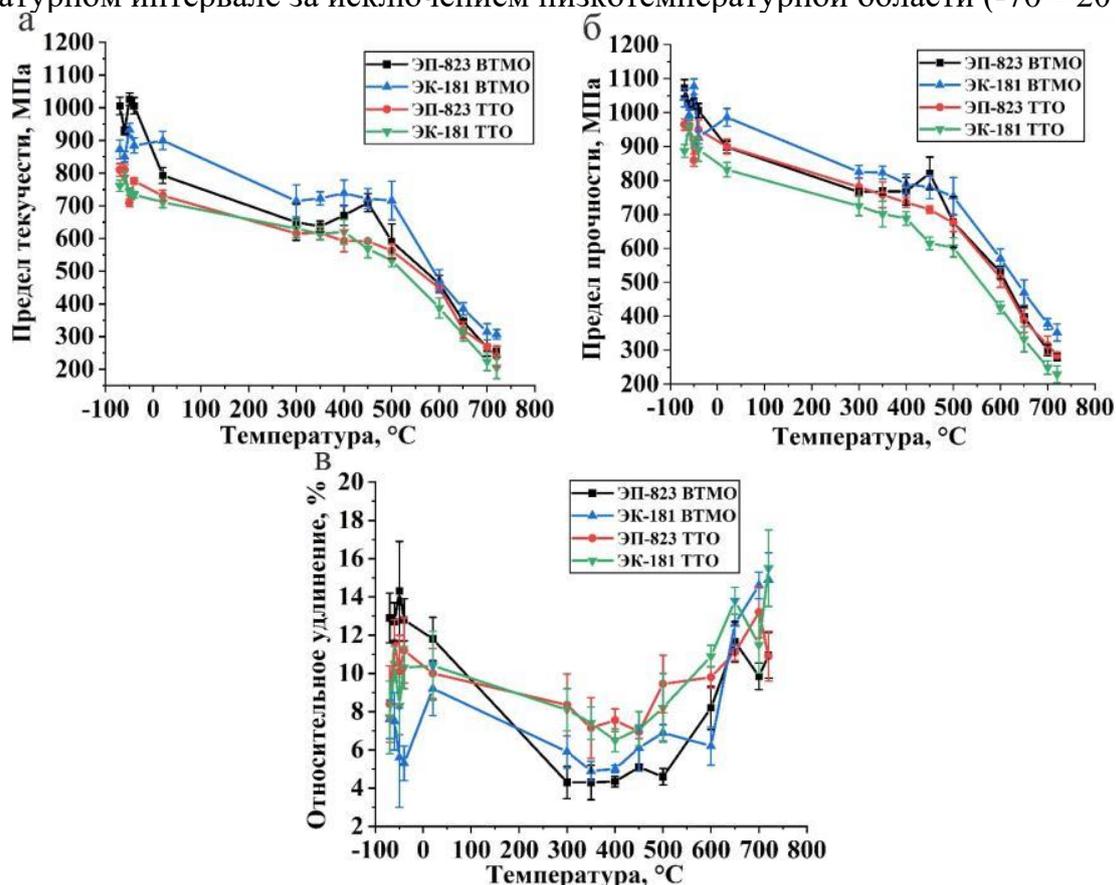
В пятой главе проанализировано влияние элементного состава на особенности гетерофазной микроструктуры, кратковременные механические свойства, особенности пластической деформации и разрушения 12% Cr ферритно-мартенситных сталей ЭП-823 и ЭК-181 после ВТМО и ТТО. Показано, что стали ЭК-181 и ЭП-823 после двух обработок имеют качественно подобную микроструктуру, представленную ламелями отпущенного мартенсита и ферритными зёрнами. Отличия этих сталей заключаются главным образом в параметрах микроструктуры и карбидной подсистемы.

Методами РЭМ с дифракцией обратно-рассеянных электронов показано, что средние размеры бывших аустенитных зёрен после двух обработок в стали ЭК-181 примерно в 5-6 раз больше, чем в стали ЭП-823. Причем после ВТМО эти размеры в 1,2 – 1,3 раза меньше, чем после ТТО для обеих сталей. Значительное различие в размерах бывших аустенитных зёрен связано с системой легирования стали ЭП-823. Nb и Mo, входящие в состав частиц типа MX, выделяющихся по границам зёрен препятствуют укрупнению зёрна при высоких температурах.

В стали ЭП-823 наблюдаются грубодисперсные (микронные и субмикронные) частицы типа MX (с объемной долей 0,3%), в то время как в стали ЭК-181 такие частицы отсутствуют. Средние размеры мелкодисперсных частиц типа MX в обеих сталях уменьшаются в случае ВТМО (относительно ТТО), в то время как их объемная доля возрастает. Для стали ЭК-181 объемная доля мелкодисперсных частиц после ВТМО выше, чем в стали ЭП-823. Для стали ЭК-181 мелкодисперсные частицы представлены преимущественно карбонитридами ванадия ($V(C,N)$), в то время как в стали ЭП-823 это могут быть карбонитриды на основе ванадия, ниобия и молибдена.

Согласно данным РСА, после ТТО и ВТМО в сталях ЭК-181 и ЭП-823 объемное содержание α -фазы составляет 100 % после всех экспериментальных обработок. Следы карбидных фаз на рентгенограммах отсутствуют, это определяется их низкими объемными долями и малыми размерами. Плотность дислокаций в сталях ЭК-181 и ЭП-823 после ТТО различается незначительно и достигает $\approx (7,4-7,8) \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$, после ВТМО она увеличивается и достигает $\approx (8,4-9,4) \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$.

Результаты сравнительных исследований механических свойств сталей ЭК-181 и ЭП-823 в структурных состояниях после ТТО и ВТМО в широком (-70 до 720 °С) температурном интервале испытаний на растяжение представлены на рисунке 7. Из рисунка следует, что вид температурных зависимостей для двух сталей и двух обработок качественно аналогичен и на нем можно выделить температурные интервалы, подробно рассмотренные на стали ЭП-823 (раздел 3.3). ВТМО на стали ЭК-181 оказывает значительный эффект в повышении прочности относительно ТТО. При этом из рисунка б следует, что значения предела текучести и прочности стали ЭК-181 после ВТМО выше (до 15 %) соответствующих значений для стали ЭП-823 практически во всем исследуемом интервале температур деформации за исключением низкотемпературной области. Также следует отметить более высокие значения относительного удлинения для стали ЭК-181 по сравнению с соответствующими значениями для ЭП-823 практически во всем температурном интервале за исключением низкотемпературной области (-70 – 20 °С).



а – предел текучести, б – предел прочности, в – относительное удлинение до разрушения
Рисунок 7 – Механические свойства ферритно-мартенситных сталей ЭП-823 и ЭК-181 после ТТО и ВТМО

Для стали ЭК-181 в температурном интервале 300 – 500 °С кривые течения не обнаруживают каких-либо особенностей типа прерывистого течения. После ВТМО в этой стали динамическое деформационное старение менее ярко выражено, чем в стали ЭП-823

и проявляется в виде плато на температурной зависимости предела текучести и некотором снижении относительного удлинения. Это связано с особенностями элементного состава сталей. Наличие в составе стали ЭП-823 сильных карбидообразующих элементов (Nb, Mo) способствует более эффективному закреплению дислокаций, снижению пластичности и более выраженным проявлениям эффекта динамического деформационного старения в условиях высокотемпературного растяжения образцов после ВТМО. Повышенная плотность дислокаций, а также наличие сильных карбидообразующих элементов в стали ЭП-823 активизируют процессы образования сегрегаций и/или атмосфер Коттрелла.

Повышенные значения относительного удлинения стали ЭП-823 при низких температурах связаны с увеличенным содержанием в ней таких легирующих элементов, как Ni, Si, Nb и Mo. Ni повышает ударную вязкость (снижает температуру вязко-хрупкого перехода) хромистых сталей, Si, Nb и Mo увеличивают количество структурно-свободного феррита и способствуют повышению пластичности стали.

Деформированная микроструктура сталей ЭП-823 и ЭК-181 в области шейки растянутых образцов качественно подобна. Характер разрушения в широком интервале температур в сталях ЭП-823 и ЭК-181 аналогичен и определяется температурой деформации в условиях растяжения. Различие наблюдается в достаточно узком интервале температур, от 500 до 650 °С, и характеризуется большими размерами ямок вязкого разрушения в стали ЭК-181 относительно ЭП-823.

В **заключении** диссертационной работы приведены основные выводы:

1. Показано, что высокотемпературная термомеханическая обработка ферритно-мартенситной стали ЭП-823 приводит к уменьшению средних размеров мартенситных блоков и ферритных зерен в 1,5-2 раза, уменьшению в 3 раза средних размеров мартенситных ламелей, увеличению плотности дислокаций, повышению объемной доли наноразмерных частиц в 1,5 раза, а также к увеличению средних размеров бывших аустенитных зерен в плоскости прокатки и их вытягиванию в направлении прокатки, по сравнению со структурным состоянием после традиционной термической обработки.

2. Микроструктурные особенности, сформированные в результате высокотемпературной термомеханической обработки, определяют повышение пределов текучести в стали ЭП-823 относительно традиционной термической обработки до 180 МПа в низкотемпературной области деформации (-70–20 °С) и до 120 МПа вблизи области динамического деформационного старения (300-500 °С) за счет повышенной плотности дислокаций и их эффективного закрепления в результате формирования сегрегаций сильными карбидообразующими элементами (Nb, Mo) и (или) атмосфер Коттрелла.

3. Основными механизмами упрочнения ферритно-мартенситной стали ЭП-823 в структурном состоянии после высокотемпературной термомеханической обработки относительно традиционной термической обработки являются: дисперсное упрочнение наноразмерными карбонитридами типа MX (M = Nb, Mo, X = C, N) по механизму Орована; зернограничное упрочнение за счет мартенситных блоков и зерен феррита; субструктурное упрочнение за счет малоугловых границ мартенситных ламелей и повышенной плотности дислокаций.

4. В температурном интервале от -70 до +20 °С пластическая деформация растяжением стали ЭП-823 приводит к искривлению и фрагментации мартенситных ламелей, образованию новых малоугловых границ разориентации и значительному увеличению плотности дислокаций внутри мартенситных ламелей и ферритных зерен. Пластическая деформация растяжением вблизи диапазона рабочих температур ядерного реактора (T= 650-720 °С) развивается с участием процессов возврата и динамической полигонизации при сохранении отдельных зерен и субзерен с высокой плотностью дислокаций.

5. Во всем изученном интервале температур деформации (от -70 до 720 °С) в стали ЭП-823 наблюдается вязкий ямочный излом. Различия в изломах после высокотемпературной термомеханической и традиционной термической обработок в низкотемпературной области состоят в увеличении количества, длины, плотности вторичных микротрещин и их преимущественной ориентации в плоскости прокатки.

6. Элементный состав сталей ЭП-823 и ЭК-181 определяет их количественные различия в параметрах микроструктуры после ВТМО. Для стали ЭК-181, по сравнению со сталью ЭП-823, характерны большие (в 5-6 раз) размеры бывших аустенитных зерен, повышенная (в 1,4-1,7 раза) объемная доля наноразмерных частиц и более высокая плотность дислокаций. В стали ЭК-181 мелкодисперсные частицы представлены преимущественно карбонитридами ванадия V(C, N), в то время как в стали ЭП-823 это карбонитриды на основе ванадия, ниобия и молибдена. В стали ЭП-823 наблюдаются грубодисперсные частицы типа MX, при этом объемная доля наноразмерных частиц этой фазы ниже по сравнению с объемной долей мелкодисперсных частиц V(C, N) в стали ЭК-181.

7. Для стали ЭК-181 во всем изученном интервале температур (от -70 до 720 °С) характерны более высокие значения предела текучести, по сравнению со сталью ЭП-823, что обусловлено повышенной эффективностью совместного дисперсного и субструктурного механизмов упрочнения. Более высокие значения пластичности в стали ЭП-823 (по сравнению со сталью ЭК-181) в условиях низкотемпературных испытаний на растяжение обусловлены наличием в ее составе Ni и более высоким содержанием стабилизаторов феррита (Nb и Mo). Значительное снижение пластичности в стали ЭП-823 в интервале температур динамического деформационного старения связано с увеличенным содержанием Nb и Mo, которые способствуют более эффективному закреплению дислокаций при образовании сегрегаций и/или атмосфер Котрелла.

Дальнейшие исследования могут быть посвящены изучению влияния высокотемпературной термомеханической обработки на температурный интервал вязко-хрупкого перехода, длительные высокотемпературные свойства и сопротивление ползучести 12% хромистой ферритно-мартенситной стали ЭП-823.

Список литературы

1*. Klueh R.L. High-chromium ferritic and martensitic steels for nuclear applications / R.L. Klueh, D.R. Harries. – ASTM Stock Number MONO3, 2001. – 221 p.

2*. Ferritic-martensitic steels for fission and fusion applications / C. Cabet [et al.] // Journal of Nuclear Materials. – 2019. – Vol. 523. – P. 510–537.

3*. Characterization of a boron alloyed 9Cr3W3CoVNbBN steel and further improvement of its high-temperature mechanical properties by thermomechanical treatments / Hollner S. [et al.] // Journal Nuclear of Materials. – 2013. – № 441. – P. 15–23.

4*. Особенности микроструктуры ферритно-мартенситной (12 %Cr) стали ЭК-181 после термообработок по разным режимам / А.Н. Тюменцев, В.М. Чернов, М.В. Леонтьева-Смирнова, Е.Г. Астафурова, Н.А. Шевяко (Полехина), И.Ю. Литовченко // Журнал технической физики. – 2012. – Т. 82, вып. 1. – С. 52–58.

5*. Влияние высокотемпературной термомеханической обработки в аустенитной области на микроструктуру и механические свойства малоактивируемой 12%-ной хромистой ферритно-мартенситной стали ЭК-181 / Н.А. Полехина [и др.] // Журнал технической физики. – 2017. – Т. 87, вып. 5. – С. 716–721.

6*. Гольдштейн М.И., Фарбер В.М. Дисперсионное упрочнение стали. М.: Metallurgia, 1979. – 208 с.

7*. Деформационное упрочнение и разрушение поликристаллических металлов / В.И. Трефилов [и др.]. – К.: Наукова Думка, 1989. – 289 с.

Благодарности. Автор выражает благодарности научному руководителю, доктору физико-математических наук, доценту Литовченко И.Ю. и кандидату физико-математических наук Полехиной Н.А – за внимание к работе, обсуждение результатов на всех этапах написания диссертации, советы и критический взгляд, которые помогли улучшить работу; Чернову В.М. и Леонтьевой-Смирновой М.В. – за предоставленные материалы для исследований; лаборатории физики структурных превращений СФТИ ТГУ и ИФПМ СО РАН, Томскому региональному центру коллективного пользования (ТРЦКП) ТГУ и ЦКП «Нанотех» ИФПМ СО РАН за предоставленное оборудование для исследований.

СПИСОК РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в журналах, включенных в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук:

1. Полехина Н. А. Сравнительное исследование микроструктуры, механических свойств и особенностей разрушения жаропрочных ферритно-мартенситных сталей ЭК-181, ЧС-139 и ЭП-823 в интервале температур от $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $720\text{ }^{\circ}\text{C}$ / Н. А. Полехина, И. Ю. Литовченко, **К. В. Алмаева**, А. Н. Тюменцев, Ю. П. Пинжин, В. М. Чернов, М. В. Леонтьева-Смирнова // Вопросы атомной науки и техники. Серия Термоядерный синтез. – 2018. – Т. 41, вып. 4. – С. 38–47. – DOI: 10.21517/0202-3822-2018-41-4-38-47. – 0,62 / 0,09 а.л.

Scopus: Polekhina N. A. Comparative investigation of microstructure, mechanical properties and fracture features of heat-resistant ferritic-martensitic steels EK-181, CHS-139 and EP-823 in the temperature range from -196 to $720\text{ }^{\circ}\text{C}$ / N. A. Polekhina, I. Y. Litovchenko, **K. V. Almaeva**, A. N. Tyumentsev, Y. P. Pinzhin, V. M. Chernov, M. V. Leontyeva-Smirnova // Problems of Atomic Science and Technology, Series Thermonuclear Fusion. – 2018. – Vol. 41, is. 4. – P. 38–47.

2. Полехина Н. А. Влияние высокотемпературной термомеханической обработки на микроструктуру, механические свойства и разрушение малоактивируемой 12%-ной хромистой ферритно-мартенситной стали ЭК-181 в интервале температуры от -196 до $700\text{ }^{\circ}\text{C}$ / Н. А. Полехина, **К. В. Алмаева**, И. Ю. Литовченко, А. Н. Тюменцев, Ю. П. Пинжин, В. М. Чернов, М. В. Леонтьева-Смирнова // Вопросы Атомной Науки и Техники. Серия Термоядерный синтез. – 2019. – Т. 42, вып. 4. – С. 31–38. – DOI: 10.21517/0202-3822-2019-42-4-31-38. – 0,5 / 0,07 а.л.

Scopus: Polekhina N. A. Effect of high-temperature thermomechanical treatment on microstructure, mechanical properties and fracture of the reduced activation 12% chrome ferritic-martensitic steel EK-181 in the temperature range from $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$ to $700\text{ }^{\circ}\text{C}$ / N. A. Polekhina, **K. V. Almaeva**, I. Y. Litovchenko, A. N. Tyumentsev, Y. P. Pinzhin, V. M. Chernov, M. V. Leontyeva-Smirnova // Problems of Atomic Science and Technology, Series Thermonuclear Fusion. – 2019. – Vol. 42, is. 4. – P. 31–38.

3. **Алмаева К. В.** Термическая стабильность микроструктуры и механических свойств ферритно-мартенситной стали ЭК-181 / К. В. Алмаева, Н. А. Полехина, И. Ю. Литовченко, А. Н. Тюменцев, В. М. Чернов, М. В. Леонтьева-Смирнова // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2018. – Т. 61, № 8. – С. 152–156. – 0,3 / 0,05 а.л.

в переводной версии журнала, входящей в Scopus:

Almaeva K. V. Thermal Stability of the Microstructure and Mechanical Properties of the Ferritic-Martensitic Steel EK-181 / K. V. Almaeva, N. A. Polekhina, I. Yu. Litovchenko, A. N. Tyumentsev, V. M. Chernov, M. V. Leont'eva-Smirnova // Russian Physics Journal. – 2018. – Vol. 61, № 8. – P. 1536–1540. – DOI: 10.1007/s11182-018-1567-3.

4. **Алмаева К. В.** Влияние высокотемпературной термомеханической обработки на микроструктуру, механические свойства и особенности разрушения ферритно-мартенситной стали ЭП-823 / К. В. Алмаева, И. Ю. Литовченко, Н. А. Полехина // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2020. – Т. 63, № 5. – С. 85–89. – DOI: 10.17223/00213411/63/5/85. – 0,3 / 0,1 а.л.

в переводной версии журнала, входящей в Scopus:

Almaeva K. V. Microstructure, Mechanical Properties and Fracture of EP-823 Ferritic/Martensitic Steel After High-Temperature Thermomechanical Treatment / **K. V. Almaeva**, I. Yu. Litovchenko, N. A. Polekhina // Russian Physics Journal. – 2020. – Vol. 63, № 5. – P. 803–808. – DOI: 10.1007/s11182-020-02101-8.

5. Полехина Н. А. Механизмы разрушения малоактивируемой 12%-й хромистой ферритно-мартенситной стали ЭК-181 в интервале температур от -196 до 800 °С / Н. А. Полехина, И. Ю. Литовченко, **К. В. Алмаева**, А. Н. Тюменцев, Ю. П. Пинжин, В. М. Чернов, М. В. Леонтьева-Смирнова // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2021. – Т. 64, № 8. – С. 82–87. – DOI: 10.17223/00213411/64/8/82. – 0,37 / 0,05 а.л.

в переводной версии журнала, входящей в Scopus:

Polekhina N. A. Fracture Mechanisms of Low Activation 12% Chromium Ferritic-Martensitic Steel EK-181 in the Temperature Range from -196 to 800°C / N. A. Polekhina, I. Yu. Litovchenko, **K. V. Almaeva**, A. N. Tyumentsev, Yu. P. Pinzhin, V. M. Chernov, M. V. Leontyeva-Smirnova // Russian Physics Journal. – 2021. – Vol. 64, № 8. – P. 1468–1473. – DOI: 10.1007/s11182-022-02520-9.

6. Litovchenko I. Yu. The Microstructure and Mechanical Properties of Ferritic-Martensitic Steel EP-823 after High-Temperature Thermomechanical Treatment / I Yu. Litovchenko, **K. V. Almaeva**, N. A. Polekhina, S. A. Akkuzin, V. V. Linnik, E. N. Moskvichev, V. M. Chernov, M. V. Leontyeva-Smirnova // Metals. – 2022. – Vol. 12, is. 1. – Article number 79. – URL: <https://www.mdpi.com/2075-4701/12/1/79/html> (access date: 04.07.2022). – DOI: 10.3390/met12010079. – 0,81 / 0,1 а.л.

Статьи в сборниках материалов конференций, представленных в изданиях, входящих в Scopus:

7. Polekhina N.A. Mechanical properties and fracture features of heat-resistant ferritic-martensitic steels EK-181, ChS-139 and EP-823 at temperatures from -196 to 720°C [Electronic resource] / N. A. Polekhina, **K. V. Almaeva**, I. Yu. Litovchenko // AIP Conference Proceedings. – 2018. – Vol. 2051 : International Symposium on Hierarchical Materials: Development and Applications for New Technologies and Reliable Structures 2018. Tomsk, Russia, October 01–05, 2018. – Article number 020242. – 4 p. – URL: <https://aip.scitation.org/doi/abs/10.1063/1.5083485> (access date: 04.07.2022). – DOI: 10.1063/1.5083485. – 0,25 / 0,08 а.л.

8. **Almaeva K. V.** A comparative investigation of mechanical properties of the ferritic-martensitic steel EK-181 in the temperature range 700-800 °C after high-temperature thermomechanical and traditional heat treatments [Electronic resource] / K. V. Almaeva, N. A. Polekhina, I. Yu. Litovchenko // AIP Conference Proceedings. – 2018. – Vol. 2051 : : International Symposium on Hierarchical Materials: Development and Applications for New Technologies and Reliable Structures 2018. Tomsk, Russia, October 01–05, 2018. – Article number 020009. – 4 p. – URL: <https://aip.scitation.org/doi/abs/10.1063/1.5083252> (access date: 04.07.2022). – DOI: 10.1063/1.5083252. – 0,25 / 0,08 а.л.

9. **Almaeva K. V.** Deformed microstructure of ferritic-martensitic steel EK-181 / K. V. Almaeva, N. A. Polekhina, I. Yu. Litovchenko // AIP Conference Proceedings. – 2019. – Vol. 2167 : International Conference on Advanced Materials with Hierarchical Structure for New Technologies and Reliable Structures 2019. Tomsk, Russia, October 01–05, 2019. – Article number

020014. – 4 p. – URL: <https://aip.scitation.org/doi/abs/10.1063/1.5131881> (access date: 04.07.2022). – DOI: 10.1063/1.5131881. – 0,25 / 0,08 а.л.

10. **Almaeva K. V.** Microstructure and mechanical properties of ferritic-martensitic steel EP-823 after high-temperature thermomechanical treatment / K. V. Almaeva, N. A. Polekhina, V. V. Linnik, I. Yu. Litovchenko // AIP Conference Proceedings. – 2019. – Vol. 2167 : International Conference on Advanced Materials with Hierarchical Structure for New Technologies and Reliable Structures 2019. Tomsk, Russia, October 01–05, 2019. – Article number 020013. – 4 p. – URL: <https://aip.scitation.org/doi/abs/10.1063/1.5131880> (access date: 04.07.2022). – DOI: 10.1063/1.5131880. – 0,25 / 0,06 а.л.

11. **Almaeva K. V.** Mechanical properties and fracture features of ferritic- martensitic steel EP-823 in the temperature range of 300-600 °C / K. V. Almaeva, I. Yu. Litovchenko, N. A. Polekhina, Yu. P. Pinzhin, V. V. Linnik // AIP Conference Proceedings. – 2020. – Vol. 2310 : International Conference on Physical Mesomechanics. Materials with Multilevel Hierarchical Structure and Intelligent Manufacturing Technology 2020. Tomsk, Russia, October 05–10, 2020. – Article number 020015 – 4 p. – URL: <https://aip.scitation.org/doi/abs/10.1063/5.0034283> (access date: 04.07.2022). – DOI: 10.1063/5.0034283. – 0,25 / 0,06 а.л.

12. **Almaeva K. V.** Regularities of the deformed microstructure of ferritic-martensitic steel EP-823 after high-temperature thermomechanical treatment / K. V. Almaeva, I. Yu. Litovchenko, N. A. Polekhina, S. A. Akkuzin // Journal of Physics: Conference Series. – 2021. – Vol. 1989 : 18th International Conference of Students and Young Scientists on Prospects of Fundamental Sciences Development, PFSD 2021. Tomsk, Russia, April 27–30, 2021. – Article number 012016. – 5 p. – URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1989/1/012016/pdf> (access date: 04.07.2022). – DOI: 10.1088/1742-6596/1989/1/012016. – 0,3 / 0,08 а.л.

13. **Almaeva K. V.** Effect of treatment modes on the microstructure parameters of heat-resistant 12% chromium ferritic-martensitic steels EK-181 and EP-823 / K. V. Almaeva, N. A. Polekhina, I. Yu. Litovchenko, M. A. Khimich, V. V. Linnik // AIP Conference Proceedings. – 2022 – Vol. 2509 : International Conference on Physical Mesomechanics. Materials with Multilevel Hierarchical Structure and Intelligent Manufacturing Technology 2021. Tomsk, Russia, October 06–10, 2021. – Article number 020013. – URL: <https://aip.scitation.org/doi/abs/10.1063/5.0084733> (access date: 04.07.2022). – DOI: 10.1063/5.0084733. – 0,25 / 0,06 а.л.

Публикации в прочих научных изданиях:

14. **Алмаева К.** Повышение прочности ферритно-мартенситной стали ЭК-181 в процессе аусформинга / К. Алмаева, Н. А. Полехина, С. А. Аккузин // Молодежь, наука, технологии: новые идеи и перспективы : избранные доклады IV Международной научной конференции студентов и молодых ученых. Томск, 25–27 октября 2017 г. – Томск, 2017. – С. 14–17. – 0,25 / 0,08 а.л.

15. **Алмаева К. В.** Сравнительное исследование кратковременной высокотемпературной прочности ферритно-мартенситной стали ЭК-181 после традиционной термической обработки и высокотемпературной термомеханической обработки / К. В. Алмаева, Н. А. Полехина // Сборник материалов докладов 24-ой Всероссийской научной конференции студентов-физиков и молодых ученых (ВНКСФ-24). Томск, 31 марта – 07 апреля 2018 г. – Томск, 2018. – С. 484–485. – 0,06 / 0,03 а.л.

16. Полехина Н. А. Механические свойства и фрактография разрушения жаропрочной ферритно-мартенситной стали ЭП-823 в интервале температур от -196 °C до 720 °C / Н. А. Полехина, С. А. Аккузин, И. Ю. Литовченко, **К. В. Алмаева**, А. Н. Тюменцев, В. М. Чернов, М. В. Леонтьева-Смирнова // Сборник материалов XXIII Петербургских чтений по проблемам прочности, посвященных 100-летию ФТИ им. А. Ф. Иоффе и 110-летию со дня

рождения чл.-корр. АН СССР А. В. Степанова. Санкт-Петербург, 10–12 апреля 2018 г. – Санкт-Петербург, 2018. – С. 341. – 0,06 / 0,01 а.л.

17. **Алмаева К. В.** Влияние высокотемпературной термомеханической обработки на кратковременную высокотемпературную прочность ферритно-мартенситной стали ЭК-181 / К. В. Алмаева // Физика твердого тела : сборник материалов XVI Российской научной студенческой конференции. Томск, 17–20 апреля 2018 г. – Томск, 2018. – С. 12–13. – 0,13 а.л.

18. **Алмаева К. В.** Исследование возможностей повышения рабочих температур ферритно-мартенситной стали ЭК-181 с помощью высокотемпературной термомеханической обработки / К. В. Алмаева, Н. А. Полехина // Перспективы развития фундаментальных наук : сборник научных трудов международной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. Томск, 24–27 апреля 2018 г. – Томск, 2018. – С. 39–41. – 0,18 / 0,06 а.л.

19. **Алмаева К. В.** Исследование термической стабильности микроструктуры и механических свойств 12%-ной хромистой ферритно-мартенситной стали ЭК-181 / К. В. Алмаева, Н. А. Полехина, И. Ю. Литовченко, А. Н. Тюменцев, В. М. Чернов, М. В. Леонтьева-Смирнова // Механические свойства конструкционных материалов : сборник материалов Международных научных чтений им. И. А. Одингга. Москва, 06–07 сентября 2018 г. – Москва, 2018. – С. 30. – 0,06 / 0,01 а.л.

20. Полехина Н. А. Особенности температурной зависимости кратковременных механических свойств и разрушения жаропрочной 12 % Cr ферритно-мартенситной стали ЭП-823-Ш / Н. А. Полехина, **К. В. Алмаева**, И. Ю. Литовченко, А. Н. Тюменцев, В. М. Чернов, М. В. Леонтьева-Смирнова // Механические свойства конструкционных материалов : сборник материалов Международных научных чтений им. И. А. Одингга. Москва, 06–07 сентября 2018 г. – Москва, 2018. – С. 116. – 0,06 / 0,01 а.л.

21. **Алмаева К. В.** Особенности микроструктуры и механические свойства ферритно-мартенситной стали ЭК-181 в температурном интервале 650 – 800 °С после высокотемпературной термомеханической обработки / К. В. Алмаева, Н. А. Полехина, И. Ю. Литовченко // Перспективные материалы с иерархической структурой для новых технологий и надежных конструкций : сборник тезисов докладов международной конференции; Химия нефти и газа : сборник тезисов X Международной конференции. Томск, 01–05 октября 2018 г. – Томск, 2018. – С. 326–327. – 0,13 / 0,04 а.л.

22. Полехина Н. А. Термическая стабильность микроструктуры и механических свойств жаропрочной малоактивируемой 12 %-Cr ферритно-мартенситной стали ЭК-181 / Н. А. Полехина, **К. В. Алмаева**, И. Ю. Литовченко, А. Н. Тюменцев, В. М. Чернов, М. В. Леонтьева-Смирнова // Multiscale Biomechanics and Tribology of Inorganic and Organic Systems : тезисы докладов International Workshop, Перспективные материалы с иерархической структурой для новых технологий и надежных конструкций : тезисы докладов международной конференции; Добыча, подготовка, транспорт нефти и газа : тезисы докладов VIII Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, посвященной 50-летию основания института химии нефти. Томск, 01–05 октября 2019 г. – Томск, 2019. – С. 340–341. – DOI: 10.17223/9785946218412/226. – 0,13 / 0,02 а.л.

23. **Алмаева К. В.** Особенности деформированной микроструктуры ферритно-мартенситной стали ЭК-181 после высокотемпературной термомеханической обработки / К. В. Алмаева, Н. А. Полехина, И. Ю. Литовченко, А. Н. Тюменцев, В. М. Чернов, М. В. Леонтьева-Смирнова // Multiscale Biomechanics and Tribology of Inorganic and Organic Systems : тезисы докладов International Workshop; Перспективные материалы с иерархической структурой для новых технологий и надежных конструкций : тезисы докладов международной конференции; Добыча, подготовка, транспорт нефти и газа : тезисы докладов VIII Всероссийской научно-практической конференции с международным участием,

посвященной 50-летию основания института химии нефти. Томск, 01–05 октября 2019 г. – Томск, 2019. – С. 360–361. – DOI: 10.17223/9785946218412/240. – 0,13 / 0,02 а.л.

24. **Алмаева К. В.** Особенности микроструктуры и механических свойств ферритно-мартенситной стали ЭП-823 после высокотемпературной термомеханической обработки / К. В. Алмаева, В. В. Линник, И. Ю. Литовченко, Н. А. Полехина, А. Н. Тюменцев, В. М. Чернов, М. В. Леонтьева-Смирнова // Multiscale Biomechanics and Tribology of Inorganic and Organic Systems : тезисы докладов International Workshop, Перспективные материалы с иерархической структурой для новых технологий и надежных конструкций : тезисы докладов международной конференции и Добыча, подготовка, транспорт нефти и газа : тезисы докладов VIII Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, посвященной 50-летию основания института химии нефти. Томск, 01–05 октября 2019 г. – Томск, 2019. – С. 362. – DOI: 10.17223/9785946218412/241. – 0,06 / 0,01 а.л.

25. **Алмаева К. В.** Влияние термомеханической обработки на особенности деформированной микроструктуры ферритно-мартенситной стали ЭК-181 / К. В. Алмаева, И. Ю. Литовченко, Н. А. Полехина // Вектор науки Тольяттинского государственного университета. – 2020. – № 2. – С. 15–22. – DOI: 10.18323/2073-5073-2020-2-15-22. – 0,5 / 0,16 а.л.

26. **Алмаева К. В.** Особенности разрушения ферритно-мартенситной стали ЭП-823 после высокотемпературной термомеханической обработки / К. В. Алмаева // Физика твердого тела : сборник материалов XVII Российской научной студенческой конференции. Томск, 18 мая 2020 г. – Томск, 2020. – С. 8–10. – 0,18 а.л.

27. Линник В. В. Закономерности изменения механических свойств и особенности микроструктуры ферритно-мартенситной стали ЭП-823 в условиях высокотемпературной термомеханической обработки / В. В. Линник, **К. В. Алмаева** // Физика твердого тела : сборник материалов XVII Российской научной студенческой конференции. Томск, 18 мая 2020 г. – Томск, 2020. – С. 42–44. – 0,18 / 0,09 а.л.

28. Полехина Н. А. Особенности разрушения жаропрочных 12 %-ных хромистых ферритно-мартенситных сталей ЭК-181, ЧС-139 и ЭП-823 в температурной области их вязко-хрупкого перехода / Н. А. Полехина, **К. В. Алмаева**, И. Ю. Литовченко, А. Н. Тюменцев, В. М. Чернов, М. В. Леонтьева-Смирнова // Физическая мезомеханика. Материалы с многоуровневой иерархически организованной структурой и интеллектуальные производственные технологии : сборник тезисов докладов международной конференции. Томск, 05–09 октября 2020 г. – Томск, 2020. – С. 264–265. – DOI: 10.17223/9785946219242/171. – 0,13 / 0,02 а.л.

29. **Алмаева К. В.** Механические свойства и особенности разрушения ферритно-мартенситной стали ЭП-823 после высокотемпературной термомеханической обработки / К. В. Алмаева, И. Ю. Литовченко, Н. А. Полехина, Ю. П. Пинжин // Физическая мезомеханика. Материалы с многоуровневой иерархически организованной структурой и интеллектуальные производственные технологии : сборник тезисов докладов международной конференции. Томск, 05–09 октября 2020 г. – Томск, 2020. – С. 240. – DOI: 10.17223/9785946219242/158. – 0,06 / 0,02 а.л.

30. **Алмаева К. В.** Особенности деформированной микроструктуры ферритно-мартенситной стали ЭП-823 после высокотемпературной термомеханической обработки / К. В. Алмаева // Перспективы развития фундаментальных наук : сборник научных трудов XVIII Международной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. Томск, 27–30 апреля 2021 г. – Томск, 2021. – Т. 1. – С. 46–48. – 0,18 а.л.

31. Линник В. В. Влияние высокотемпературной термомеханической обработки на микроструктуру и механические свойства ферритно-мартенситной стали ЭП-823 /

В. В. Линник, **К. В. Алмаева** // Перспективы развития фундаментальных наук : сборник научных трудов XVIII Международной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. Томск, 27–30 апреля 2021 г. – Томск, 2021. – Т. 1. – С. 208–210. – 0,18 / 0,13 а.л.

32. **Алмаева К. В.** Влияние режимов обработки на параметры микроструктуры жаропрочных ферритно-мартенситных сталей ЭК-181 и ЭП-823 / К. В. Алмаева, Н. А. Полехина, И. Ю. Литовченко, М. А. Химич, В. В. Линник, В. М. Чернов, М. В. Леонтьева-Смирнова // Физическая мезомеханика. Материалы с многоуровневой иерархически организованной структурой и интеллектуальные производственные технологии : сборник тезисов докладов международной конференции. Томск, 06–10 сентября 2021 г. – Томск, 2021. – С. 406–407. – DOI: 10.17223/978-5-907442-03-0-2021-257. – 0,13 / 0,02 а.л.

33. Polekhina N. A. Mechanical properties and fracture features of 12 % Cr ferritic-martensitic steels EK-181, ChS-139 and EP-823 in the temperature range of 20–720 °C / N. A. Polekhina, I. Yu. Litovchenko, A. N. Tyumentsev, **K. V. Almaeva**, V. M. Chernov, M. V. Leontyeva-Smirnova // Book of abstracts of the 13th International Conference on Superplasticity in Advanced Materials. St. Petersburg, Russia, August 19–22, 2018. – St. Petersburg, 2018. – P. 78. – 0,03 / 0,01 а.л.

Издание подготовлено в авторской редакции.
Отпечатано на участке цифровой печати
Издательства Томского государственного университета
Заказ № 7422 от «22» сентября 2022 г. Тираж 100 экз.
г. Томск, Московский тр.8, тел. (3822) 53-15-28
publish.tsu.ru