

На правах рукописи



РЫБАЛЬЧЕНКО Ольга Владиславовна

**ВЛИЯНИЕ ИНТЕНСИВНОЙ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ
НА СТРУКТУРУ, МЕХАНИЧЕСКИЕ И СЛУЖЕБНЫЕ СВОЙСТВА
СТАЛИ 08X18H10T**

Специальность 05.16.01 – Металловедение и термическая обработка
металлов и сплавов

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Москва - 2014.

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова Российской академии наук (ИМЕТ РАН)

Научный руководитель: **Добаткин Сергей Владимирович**
доктор технических наук, профессор,
заведующий лабораторией, ИМЕТ РАН

Официальные оппоненты: **Салищев Геннадий Алексеевич**
доктор технических наук, профессор,
руководитель лаборатории ФГАОУ ВПО
«Белгородский государственный
национальный исследовательский
университет» (НИУ «БелГУ»)

Столяров Владимир Владимирович
доктор технических наук, профессор,
главный научный сотрудник ФГБУН
Институт машиноведения
им. А.А. Благонравова Российской академии
наук (ИМАШ РАН)

Ведущая организация: Федеральное государственное унитарное предприятие «Центральный научно-исследовательский институт черной металлургии им. И.П.Бардина»

Защита диссертации состоится “18” декабря 2014 г. в 12:00 на заседании Диссертационного Совета Д 002.060.01 на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова Российской академии наук по адресу: 119991, Москва, Ленинский проспект, 49.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке института (ИМЕТ РАН) и на сайте ИМЕТ РАН <http://www.imet.ac.ru> . Автореферат диссертации размещен на сайте ИМЕТ РАН <http://www.imet.ac.ru> и на сайте ВАК <http://vak.ed.gov.ru/> .

Автореферат разослан “ ___ ” _____ 2014 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
доктор технических наук, профессор:



В.М. Блинов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. В настоящее время значительный научный интерес к конструкционным объемным ультрамелкозернистым (УМЗ) материалам обусловлен тем, что их механические, физические и функциональные свойства существенно отличаются от свойств крупнозернистых аналогов. Особенности структуры УМЗ материалов (размер зерен, доля большеугловых границ) определяются методами получения и оказывают существенное влияние на их свойства.

Эффективным путем получения УМЗ материалов является использование методов интенсивной пластической деформации (ИПД), в основе которых лежит сочетание больших степеней деформаций сдвига в условиях низких гомологических температур и высоких давлений. Наиболее развитые методы, обеспечивающие измельчение структуры до УМЗ состояния - кручение под гидростатическим давлением (КГД), а также равноканальное угловое прессование (РКУП). С новыми необычными свойствами, полученными благодаря ИПД, УМЗ материалы имеют потенциал для использования в разных отраслях производства.

В последнее десятилетие значительно возросло количество работ по изучению эволюции микроструктуры, механических свойств и термостабильности УМЗ структур, полученных методами ИПД. Большинство исследований было сфокусировано преимущественно на чистых металлах, что позволило проследить за изменениями структурного состояния при отсутствии других фаз, и на легких сплавах. На основе полученных результатов были построены модели формирования высокопрочного состояния.

Сталям уделялось меньше внимания, несмотря на то, что это один из важнейших конструкционных материалов, который обеспечивает широкий диапазон механических и физических свойств. Аустенитные коррозионностойкие стали используются во многих отраслях промышленности, в том числе в химическом и реакторном машиностроении. В медицине аустенитные коррозионностойкие стали используются в ортопедии, для изготовления сосудистых стентов, электродов, проводов и корпусов генераторов импульсов систем кардиостимуляции, для медицинского инструмента.

Повышенный интерес к аустенитным коррозионностойким сталям вызван еще и возможностью дополнительного регулирования структурного состояния за счет фазовых превращений в ходе интенсивной пластической деформации. Поскольку основным эффектом УМЗ материалов после ИПД является не только значительное повышение прочности при достаточной пластичности, но и, возможно, *одновременное* повышение эксплуатационных свойств, регулируя структурные и фазовые превращения в стали, можно добиться оптимального сочетания механических и служебных свойств данного материала.

В настоящее время развитие методов получения объемных УМЗ металлов выходит за рамки лабораторных исследований и вступает в область промышленного производства. Исследования, связанные с получением высоких служебных характеристик УМЗ металлов способны обеспечить разработчиков важной технологической информацией при внедрении перспективных продуктов в производство.

Цель работы заключается в выявлении возможных механизмов управления структурным (состояние границ зерен и их размер) и фазовым (аустенит, мартенсит, феррит, специальные карбиды) состоянием при интенсивной пластической деформации для одновременного повышения прочностных, усталостных свойств и радиационной стойкости аустенитных сталей типа 08X18H10T.

Для достижения поставленной цели ставились следующие задачи:

1. Изучить закономерности структурообразования аустенитной стали 08X18H10T в процессе КГД при комнатной температуре и последующем нагреве, с определением вклада типа кристаллической решетки, фазовых превращений и увеличения доли зернограничных поверхностей в упрочнение и термостабильность стали.

2. Изучить возможность получения в стали 08X18H10T нано- и субмикроструктурной структуры в полностью аустенитном состоянии в ходе КГД по различным режимам в интервале температур 20 - 450 °С.

3. Определить деформационные режимы формирования УМЗ структуры в ходе РКУП и исследовать структурно-фазовые превращения в процессе РКУП и последующего нагрева.

4. Определить влияние РКУП в интервале температур 20-400 °С и последующего нагрева на прочность стали 08X18H10T при статическом и циклическом нагружении.

5. Установить структурно-фазовые превращения в ходе циклического деформирования стали 08X18H10T после РКУП.

6. Исследовать влияние нейтронного облучения на микроструктуру, механические и коррозионные свойства УМЗ стали 08X18H10T полученной методом КГД.

Научная новизна

1. Установлено, что деформация по ступенчатому режиму с понижением температуры КГД 450→300→20 °С последовательно уменьшает размер зерна аустенитной стали 08X18H10T, тем самым понижая температуру появления мартенсита деформации, что позволяет получить наноструктурное состояние в полностью аустенитной матрице.

2. В ходе циклической деформации стали 08X18H10T при комплексном исследовании с применением методов рентгеноструктурного анализа, электронной просвечивающей и сканирующей микроскопии, а также метода обратно отраженных электронов (EBSD - анализ) установлены процессы интенсивного вторичного динамического двойникования, динамического возврата, увеличение доли большеугловых границ и частичное мартенситное превращение.

3. Установлено значительное повышение предела усталости стали 08X18H10T за счет созданной РКУП и нагревом на 550 °С с выдержкой 20 часов рекристаллизованной структуры с размером зерна 15 мкм и большой плотностью дисперсных двойников отжига.

4. Обнаружено, что нейтронное облучение УМЗ стали 08X18H10T вплоть до флюенса 2×10^{20} н/см² (~0.05 сна) не приводит к появлению дефектов радиационного происхождения с сохранением прочностных свойств материала после облучения.

Практическая значимость работы

1. В ходе исследований были разработаны режимы РКУП стали 08X18H10T для одновременного повышения статической и усталостной прочности, что стало возможным благодаря целенаправленному изменению структурного и фазового состояния за счет изменения параметров ИПД. РКУП значительно повышает механические свойства стали 08X18H10T: предел прочности повышается в 1,5-2 раза, предел текучести в 3,8-5,2 раза, предел усталости в 1,4-1,7 раза, но при этом уменьшается пластичность. В результате РКУП и последующего нагрева предел усталости стали 08X18H10T был повышен до 650 МПа, что в более чем в 2 раза превышает предел усталости этой стали в исходном состоянии.

2. Предложены режимы КГД для получения полностью аустенитного состояния стали 08X18H10T для повышения коррозионной стойкости с размером зерна 85-125 нм:

- деформация в интервале температур 300 - 450°С, то есть выше температуры появления мартенсита деформации;

- деформация по ступенчатому режиму 450→300→20°С, для понижения температуры появления мартенсита деформации в область субкритических температур. Используемые схемы КГД позволили получить высокий комплекс механических свойств (предел текучести 1640-1820 МПа при удлинении 6-10 %). В дальнейшем данная обработка может быть использована при изготовлении небольших изделий простой формы для применения в медицине, и в качестве деталей микромеханических систем.

Положения, выносимые на защиту

1. Закономерности структурообразования стали 08X18H10T в процессе интенсивной пластической деформации и последующего отжига.

2. Влияние легирования, типа кристаллической решетки, фазовых превращений, и УМЗ структуры сплавов на основе железа на упрочнение и термостабильность после КГД.

3. Особенности структурно-фазовых превращений в стали 08X18H10T в ходе циклической деформации при испытаниях на многоцикловую усталость после РКУП.

4. Влияние размеров структурных элементов, доли специальных границ, мартенситного превращения и изменения доли большеугловых границ на прочность стали при статическом и циклическом нагружении.

5. Влияние нейтронного облучения до флюенса 2×10^{20} н/см² (~0.05 сна) на механические свойства и коррозионную стойкость наноструктурной стали 08X18H10T.

Достоверность и надежность полученных результатов, а также аргументированность сформулированных заключений и выводов диссертации обусловлена большим количеством экспериментального материала и использованием современных методов исследования структуры. Интерпретация результатов механических испытаний, проведенных в соответствии с ГОСТ, основывалась на данных анализа структуры и фазового состава сплавов. Работа выполнена на высоком исследовательском уровне с использованием современных методов и методик обработки, испытания и исследования материалов.

Личный вклад соискателя

Соискатель принимал непосредственное участие в обсуждении и постановке задачи и анализе результатов. Все экспериментальные результаты, включенные в диссертацию, получены либо самим соискателем, либо при его непосредственном участии. Анализ полученных результатов и подготовка публикаций выполнена при участии соавторов.

Соответствие диссертации паспорту специальности

Диссертация соответствует пунктам 2,3,4,6,8 паспорта специальности 05.16.01 Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов.

Апробация работы

Основные положения и результаты диссертационной работы были доложены и обсуждены на 26 национальных и международных конференциях, в том числе Международной научно - технической конференции “High Technologies In Advanced Materials Science And Engineering” Санкт–Петербург, Россия, 1997; Международной конференции «International Conference on Growing and Physics of Crystals named by M.P. Shaskolskaya» Москва, Россия, 1998; Международной конференции «IV International Conference on Nanostructured Materials NANO’98» Стокгольм, Швеция, 1998; Международной конференции «NATO Advanced Research Workshop. Investigation and Application of Severe Plastic Deformation»

Москва, Россия, 1999; Международной конференции «IV International Conference on Recrystallization and Related Phenomena ReX'99» Цукуба, Япония, 1999; Международной конференции «Second International Congress Mechanical Engineering Technologies'99» София, Болгария, 1999; Всероссийской конференции по наноматериалам Москва, Россия, 2004, 2011, 2013; Международной конференции «International Symposium of Croatian Metallurgical Society “Materials and Metallurgy» Шибеник, Хорватия, 2008, 2010, 2012, 2014; Международной конференции «Second International Symposium Bulk Nanostructured Materials: from fundamentals to innovations» Уфа, Россия, 2009; Международной конференции «Деформация и разрушение материалов и наноматериалов» Москва, Россия, 2011, 2013; научно-техническом семинаре «Бернштейновские чтения по термомеханической обработке металлических материалов» Москва, Россия, 2011, 2014; Международной конференция «19th International Symposium on Metastable, Amorphous and Nanostructured Materials (ISMANAM 2012)», Москва, Россия, 2012; Международной конференции «9th European Symposium on Martensitic Transformations (ESOMAT 2012)» Санкт-Петербург, Россия, 2012; Международной конференции «Seventh International Symposium on Ultrafine Grained Materials. 141-st Annual TMS Meeting» Орландо, Флорида, США, 2012; Международной конференции, посвященной 110 – летию со дня рождения академика Г.В. Курдюмова «Фазовые превращения и прочность кристаллов» Черноголовка, Россия, 2012; Международной научно-технической конференции «Современные металлические материалы и технологии» (СММТ'13) Санкт-Петербург, Россия, 2013; Международной конференции «International Conference On Processing & Manufacturing Of Advanced Materials THERMEC'2013» Лас Вегас, США, 2013; Евразийской научно-практической конференции «Прочность неоднородных структур», Москва, Россия, 2014; научных чтениях им. чл.-корр. РАН И.А. Одингга «Механические свойства современных конструкционных материалов», Москва, Россия, 2014.

Публикации

По теме диссертации опубликовано 10 научных статей и 27 тезисов конференций. Семь статей опубликованы в изданиях, рекомендованных ВАК. Основные публикации по теме диссертации приведены в конце автореферата.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, шести глав, включающих обзор литературы, общих выводов, а также списка публикаций по теме диссертации и списка цитируемой литературы. Работа изложена на 167 страницах, содержит 72 рисунка и 18 таблиц. Список цитируемых источников включает 170 наименований.

Исследования проведены в Федеральном Государственном Бюджетном Учреждении Науки Институте металлургии и материаловедения им. А. А. Байкова РАН (ИМЕТ РАН) при финансовой поддержке РФФИ (Грант № 10-03-00996-а) и при финансовой поддержке Минобрнауки РФ (Госконтракт №14.А12.31.0001 от 24.06.2013).

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цели и содержание поставленных задач, научная новизна и практическая значимость результатов работы, а также отмечены положения, которые выносятся на защиту.

В первой главе дан обзор литературных данных, в котором представлены общие сведения об используемых в работе методах интенсивной пластической деформации, их особенностях, влиянии параметров деформации на структурообразование. Рассмотрены основные механизмы измельчения структуры в процессе деформации, особенности структурообразования при КГД и РКУП различных металлических материалов. Показано, что методы интенсивной пластической деформации являются эффективными способами получения УМЗ структуры зеренного типа, с преобладанием большеугловых границ зерен, которые оказывают значительное влияние на механические и служебные характеристики материала. Приведены имеющиеся сведения влияния структуры после ИПД на механические свойства, усталостную прочность и радиационную стойкость.

Особое внимание уделено структурообразованию аустенитных сталей. Отмечено, что в процессе ИПД в аустенитных сталях благодаря низкой энергии дефекта упаковки (ЭДУ) и большому количеству легирующих элементов может быть получена структура с размером структурных элементов до 100 нм, обладающая относительно высокой термической стабильностью. В случае стали типа 08X18H10T существует возможность дополнительного регулирования структурообразования благодаря фазовым превращениям.

На основе анализа литературных данных обосновывается актуальность исследований, связанных с выявлением возможных механизмов управления структурным и фазовым состоянием при интенсивной пластической деформации (ИПД) и получением научно обоснованных режимов обработки для одновременного повышения механических свойств и служебных характеристик аустенитных коррозионностойких сталей.

Во второй главе содержится описание использованных в работе материалов, методов и режимов ИПД, процессов последеформационной обработки, методик исследования и обработки данных.

Аустенитная коррозионностойкая сталь 08X18H10T использовалась как в исходно горячекатаном состоянии, так и после закалки с температуры 1050°C ($\tau=1$ ч). В структуре аустенитной стали содержалось до ~10 % δ – феррита.

Деформацию кручением под давлением 6 ГПа проводили на установке типа наковален Бриджмена. Образцы диаметром 10 мм и толщиной 1 мм предварительно деформировали сжатием на 50 % и далее - кручением до разных степеней деформации вплоть до $N = 9$ оборотов, что соответствует логарифмической степени деформации 6,4 на середине радиуса образца.

Образцы диаметром 20 мм и толщиной 1 мм подвергались КГД до $N=10$ оборотов по изотермическим режимам при температурах деформации (T_δ) 20°C, 300°C и 450°C и по ступенчатым режимам с повышением ($T_\delta=20^\circ\text{C}$, ($N=5$) $\rightarrow T_\delta=450^\circ\text{C}$, ($N=5$)) и понижением температуры деформации ($T_\delta=450^\circ\text{C}$ ($N=3$) $\rightarrow T_\delta=300^\circ\text{C}$ ($N=3$) $\rightarrow T_\delta=20^\circ\text{C}$ ($N=4$)).

Для исследования термостабильности структуры и упрочнения после КГД проводили отжиги стали в диапазоне температур от 250 до 900°C с шагом от 50 до 100 °C и выдержкой $\tau = 1$ ч.

РКУП проводили на образцах стали 08X18H10T диаметром 20 мм и длиной 80 мм по трем режимам по маршруту Вс: (1) - 4 прохода (1 проход с углом пересечения каналов 90° и 3 прохода – с углом 120°) при комнатной температуре; (2) - 4 прохода при комнатной температуре при угле пересечения каналов 120°; (3) - 6 проходов при температуре 400 °C при угле пересечения каналов 120°. После деформации методом РКУП образцы подвергали отжигу в интервалах температур 200-800°C с выдержкой $\tau = 0,5$ ч, и 400-600 °C с выдержками от 0,5 до 30 часов.

Микроструктуру образцов исследовали с помощью оптических микроскопов Olympus PME-3, НЕОРНОТ-2 и “Jenavert”(Carl Zeiss Yena) и просвечивающего электронного микроскопа «JEM-200CX». Для структурных исследований методами EBSD и РЭМ использовали растровый электронный микроскоп Carl Zeiss Ultra 55, снабженный CCD камерой. Для уменьшения размера области генерации электронов (увеличения разрешающей способности) использовалось низкое ускоряющее напряжение 11 кэВ, что позволило провести EBSD анализ с малым шагом 40 нм. Для анализа данных EBSD использовалось программное обеспечение Channel 5. Рентгеноструктурный анализ осуществлялся на дифрактометре ДРОН 4,07 с использованием монохроматизированного $\text{Co K}\alpha$ излучения.

Измерения микротвердости (ГОСТ 9450-76) были проведены с помощью автоматического твердомера для определения микротвердости по Виккерсу 402 MVD *Wolpert Wilson*[®] с нагрузкой 1Н.

Испытания на одноосное растяжение проводили по ГОСТ 1497-84 на разрывной машине «INSTRON 3382» при скорости растяжения 1 мм/мин.

Испытания на многоцикловую усталость (ГОСТ 25.502-79) проводили на серво-гидравлической машине Instron 8801 при комнатной температуре в условиях повторного растяжения, при частоте циклов 30 Гц с коэффициентом асимметрии цикла $R=0,1$. Суммарная погрешность измерений в процессе испытаний не превышала 1 % измеряемой величины.

Для исследования влияния нейтронного облучения на микроструктуру, механические и коррозионные свойства ультрамелкозернистой стали 08X18H10T образцы стали после КГД при гидростатическом давлении $P=6$ ГПа и деформации с $N=5$ оборотов облучались в экспериментальных водонаполненных каналах исследовательского реактора ВВР-К при температуре не выше 60 °С до флюенсов нейтронов 5×10^{19} и 2×10^{20} н/см² ($E > 0,1$ МэВ).

Механические испытания облученных образцов проводили на универсальной испытательной машине INSTRON 1195 по схеме Shear-Punch при 20°С и скорости перемещения пуансона 0.5 мм/мин.

Третья глава посвящена структурно-фазовым превращениям и свойствам коррозионностойкой стали 08X18H10T после интенсивной пластической деформации методом КГД. В первой части этой главы представлено изучение структуры, текстуры и микротвердости коррозионностойких сталей после КГД при комнатной температуре и последующего нагрева.

Материалами исследования для определения влияния легирования и типа кристаллической решетки на упрочнение и термостабильность после КГД были выбраны аустенитные стали с ГЦК решеткой: классическая хромоникелевая 08X18H10T с добавкой титана и 05X15H9Д2ТАМФ с добавками азота, ванадия и молибдена, а так же коррозионностойкая ферритная сталь 08X18Т1 и армко-железо с ОЦК решеткой. В ходе исследования было выявлено, что кручение под гидростатическим давлением 6 ГПа при комнатной температуре приводит к формированию нанокристаллической структуры с размером структурных элементов 30-60 нм в коррозионностойкой стали 05X15H9Д2ТАМФ и 50-80 нм в 08X18H10T (рисунок 1), а так же субмикрокристаллической структуры с размером структурных элементов 100-150 нм в коррозионностойкой ферритной стали 08X18Т1 и 150 -200 нм в армко-железе, что можно объяснить различиями в энергии дефекта упаковки (разный тип решетки) и легировании.

УМЗ структура исследованных сталей и армко-железа обеспечивает более чем трехкратное увеличение микротвердости по сравнению с исходным состоянием. Близкие значения микротвердости, полученные на аустенитных и ферритной сталях, свидетельствуют о большой роли границ структурных элементов, доля которых в материалах после ИПД велика.

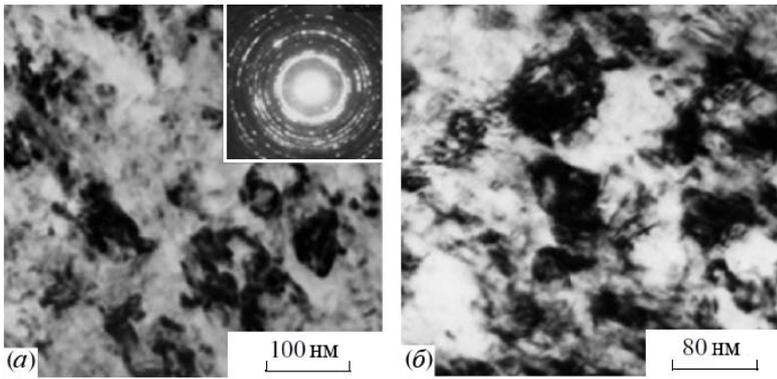


Рисунок 1 - Структура стали 05X15N9Д2ТАМФ (а) и 08X18N10Т (б) после КГД с $\varepsilon = 6,4$

Рентгеноструктурный анализ обеих аустенитных сталей выявил протекание мартенситных превращений $\gamma \rightarrow \alpha$ и $\gamma \rightarrow \varepsilon \rightarrow \alpha$ в ходе интенсивной пластической

деформации при комнатной температуре (рисунок 2). Превращения не идут до конца. Интенсивность превращений с увеличением деформации уменьшается.

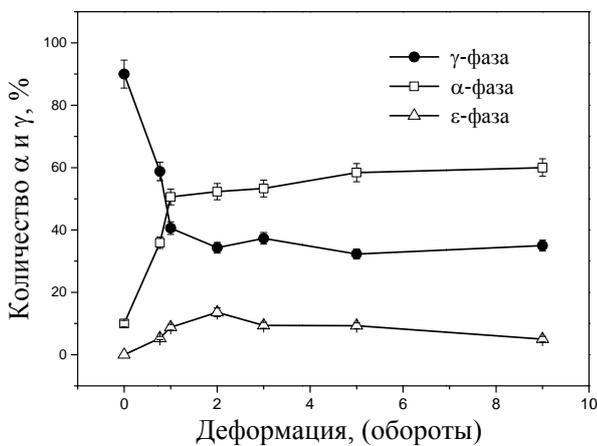


Рисунок 2 - Изменение фазового состава в стали 08X18N10Т от степени деформации при КГД

При нагреве в двухфазных сталях происходит обратное $\alpha \rightarrow \gamma$ превращение. Наличие второй фазы в структуре стали 08X18N10Т способствует торможению роста аустенитного зерна. Так, выше 400°C доля α фазы начинает

уменьшаться. При 550°C доли фазовых составляющих становятся равными, что еще сдерживает интенсивный рост зерна, который начинается при 600°C , когда

количество аустенита достигает 80%. Тем не менее, термическая стабильность упрочнения как аустенитных, так и ферритной сталей практически одинакова (рисунок 3).

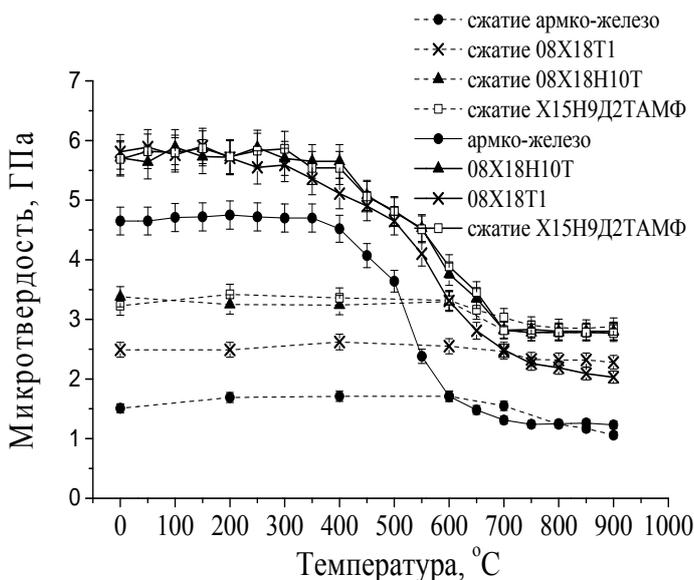


Рисунок 3 - Микротвердость сталей после КГД (N=9) и последующего нагрева.

Разупрочнение в результате нагрева происходило практически при одинаковых температурах около 400°C , несмотря на

некоторое различие в размерах зерен. В работе отмечено, что в УМЗ структурах после КГД преобладающий вклад в упрочнение вносят зернограницные поверхности по сравнению с вкладом легирования и фазового состава.

В результате текстурных исследований сталей 08X18H10T и 08X18T1 после КГД выявлена аксиальная текстура с преобладающими направлениями $\langle 211 \rangle_\gamma$ в аустените, $\langle 110 \rangle_\alpha$ и $\langle 311 \rangle_\alpha$ в мартенсите и феррите. Развитие текстуры в аустенитной стали 08X18H10T не связано с формированием нанокристаллической структуры. Аксиальная текстура сохраняется в обеих сталях вплоть до температуры нагрева 750 °С. Уменьшение преимущественной ориентировки $\langle 211 \rangle_\gamma$ в аустените стали 08X18H10T при нагреве до 750°С совпадает с началом интенсивного роста зерен. О появлении рекристаллизованной структуры можно судить по возникновению зерен с ориентировкой $\langle 001 \rangle$, которая проявляется лишь при 800°С.

Вторая часть третьей главы посвящена возможности получения наименьшего размера зерна в преимущественно аустенитной матрице в стали 08X18H10T при КГД. Образцы в исходно закаленном состоянии подвергались деформации кручением под давлением 6 ГПа при температурах 20 °С, 300 °С и 450 °С, а также с использованием ступенчатых режимов с повышением 20 °С → 450 °С и понижением 450 °С → 300 °С → 20 °С температуры. При деформации по всем режимам суммарное количество оборотов ($N=10$) соответствует истинной степени деформации на середине радиуса образцов равной около 6,4. КГД стали 08X18H10T при температурах 20-450°С приводит к формированию УМЗ структуры с размером зерна 60-125 нм. На рисунке 4 представлена микроструктура стали 08X18H10T после КГД при $T_d = 300$ °С ($N=10$).

Рентгеноструктурный количественный фазовый анализ выявил наличие полностью мартенситной фазы после КГД при 20 °С и только аустенитной фазы в стали, деформированной по остальным режимам.

Установлено, что последовательное уменьшение размера зерна в стали 08X18H10T при ступенчатом режиме деформации методом КГД ($T_d=450$ °С ($N = 3$) → $T_d= 300$ °С ($N =3$)→ $T_d= 20$ °С ($N =4$)) способствует понижению температуры появления мартенсита деформации в область более низких температур и ведет к образованию нанокристаллической структуры с размером зерна 60 нм в полностью аустенитной матрице.

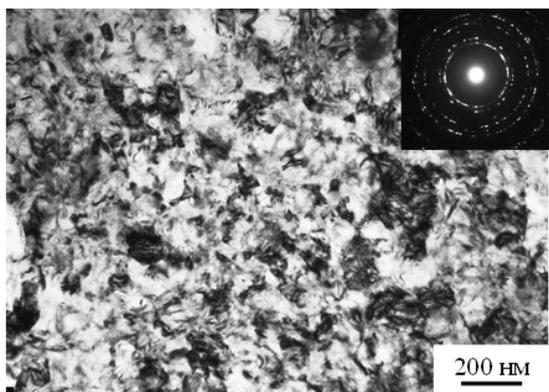


Рисунок 4 - Микроструктура стали 08X18H10T после КГД при $T_d = 300$ °С ($N=10$).

В работе определены параметры тонкой кристаллической структуры стали 08X18H10T после КГД: размеры областей когерентного рассеяния (ОКР) и величина среднеквадратичной микродеформации.

Выявлено, что значения микродеформаций в аустените уменьшаются при увеличении температуры деформации и при температуре 450°C практически не зависят от режима предыдущей деформации. Размеры зерен, выявленных ПЭМ, и размеры ОКР, определенные рентгеноструктурным анализом, отличаются в 1,5-2 раза, но имеют один порядок.

Полученная в результате исследования микроструктура определила высокий комплекс механических свойств аустенитной коррозионностойкой стали 08X18H10T с пределом текучести 1640-1820 МПа при удлинении 4-10%.

Таблица 1 - Механические свойства стали 08X18H10T после КГД

Режим	$\sigma_{в}$, МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %
$T_{\delta} = 300^{\circ}\text{C}$ (N = 10)	1760	1740	6
$T_{\delta} = 450^{\circ}\text{C}$ (N = 10)	1680	1640	10
$T_{\delta} = 20^{\circ}\text{C}$ (N = 5) \rightarrow $T_{\delta} = 450^{\circ}\text{C}$ (N = 5)	1720	1685	8
$T_{\delta} = 450^{\circ}\text{C}$ (N = 3) \rightarrow $T_{\delta} = 300^{\circ}\text{C}$ (N = 3) \rightarrow $T_{\delta} = 20^{\circ}\text{C}$ (N = 4)	1855	1820	4
Исходное состояние после закалки	600	280	45

В четвертой главе приведены результаты исследований структуры, фазового состояния и механических свойств после РКУП и последующего нагрева. В процессе РКУП при комнатной температуре по 1 режиму в стали 08X18H10T была получена частично субмикроструктурная ориентированная структура с размером структурных элементов 100-250 нм (рисунок 5).

Выявлено протекание мартенситного превращения в аустенитной стали 08X18H10T в ходе деформации. Максимальное количество мартенсита при N=4 ($\epsilon=3,2$) составило 45% (рисунок 6а).

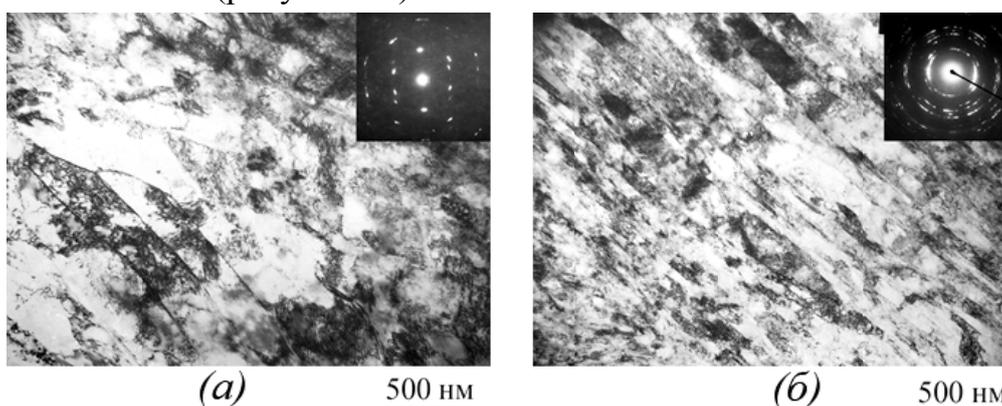


Рисунок 5 - Микроструктура стали 08X18H10T после РКУП при $T_{\delta}=20^{\circ}\text{C}$: (а) -N=3 прохода; (б) - N =4 прохода.

Механические испытания показали, что частично субмикроструктурная ориентированная структура после РКУП в стали 08X18H10T в аустенитном (55%) - мартенситном (45%) состоянии определяет сильное деформационное упрочнение ($\sigma_{0,2} = 1315$ МПа) по сравнению с исходным состоянием ($\sigma_{0,2} = 250$ МПа) и пластичность $\delta = 11\%$.

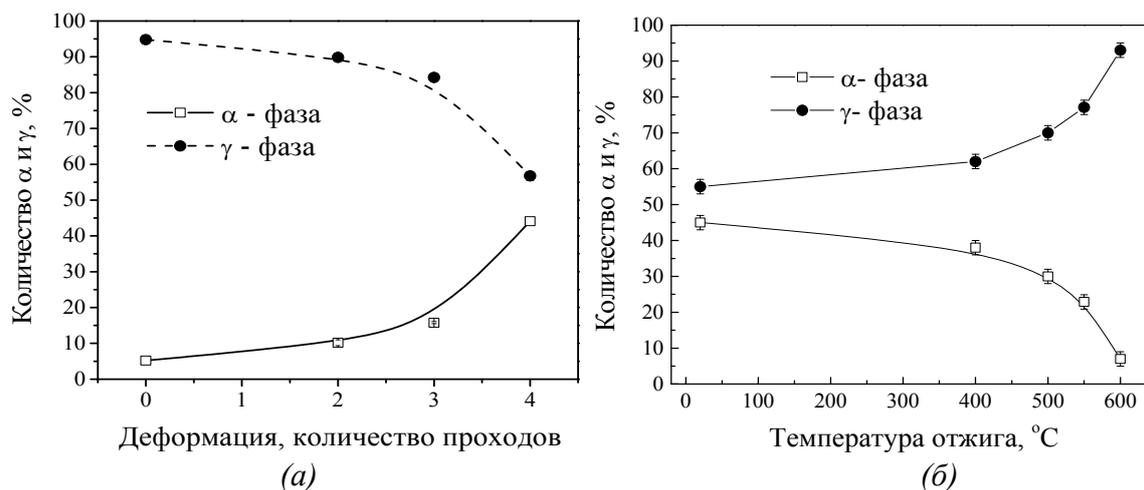


Рисунок 6 - Изменение фазового состава в стали 08X18N10T после РКУП в зависимости от количества проходов (а) и температуры отжига (б)

Обратное мартенситное превращение при нагреве наиболее интенсивно протекает в интервале температур 500-600 °C (рисунок 6б). Оптимальная структура с размером зерна 150-250 нм в преимущественно аустенитной (80%) матрице получена при нагреве на 550 °C с выдержкой 1 час. Наблюдали частично ориентированную субзеренную структуру с большим количеством двойников. В границах этих двойников формируются зерна с большеугловыми границами. Нагрев на 600 °C, $\tau=0,5$ ч приводит к более совершенной субмикроструктурной структуре с равноосными зернами, однако при данной температуре происходит выпадение карбидов, что отрицательно сказывается на свойствах стали.

Нагрев стали после РКУП на 550 °C с выдержками 1 и 20 ч не позволил получить более высокую пластичность высокопрочного состояния. После нагрева на 550 °C субмикроструктурная аустенитно (80%) - ферритная (20%) сталь имеет предел текучести $\sigma_{0,2} = 1090$ МПа при $\delta = 11\%$.

Пятая глава посвящена комплексному исследованию влияния процессов структурообразования в ходе РКУП и последующей циклической деформации методами электронной микроскопии, рентгеноструктурного и EBSD анализов на усталостную прочность стали 08X18N10T. Испытания аустенитной коррозионностойкой стали после РКУП на многоцикловую усталость показывают значительное повышение усталостных характеристик. Однако причины такого повышения в УМЗ аустенитных сталях недостаточно ясны, а структурные и фазовые изменения в процессе циклических испытаний после РКУП не исследованы.

В первой части главы приведены результаты изучения усталостной прочности и структурно – фазовых превращений в ходе циклической обработки стали 08X18N10T после РКУП при комнатной температуре по 2 режиму и при

температуре деформации 400 °С по 3 режиму, использованному для получения УМЗ структуры в полностью аустенитном состоянии.

Методом EBSD в исходной после закалки структуре определено 85% большеугловых границ, соответствующих углу разориентировки более 15°, причем 50% соответствуют специальным границам $\Sigma 3$, которые характерны для двойников с разориентировкой, близкой к 60°.

После РКУП при комнатной температуре методом EBSD выявлено формирование преимущественно зеренной структуры (доля большеугловых границ – 59%) со средним размером зерна 410 нм. С учетом субзеренной структуры средний размер структурных элементов составил 360 нм. Доля специальных границ $\Sigma 3$ составила примерно 3%. Доля двойников очень мала, так как метод EBSD из-за своих методических особенностей не определяет дисперсные вторичные двойники. По данным ПЭМ после РКУП при комнатной температуре в стали образуется 38 % мартенсита (рисунок 7а). Кроме того в зеренно-субзеренной структуре обнаружены дисперсные деформационные двойники толщиной 5-10 нм (рисунок 7б). После РКУП при 400°С структура полностью аустенитная. ПЭМ анализ выявляет зерна размером 200-400 нм, а также дисперсные двойники деформации (рисунок 7в, г). EBSD анализ определяет структуру как зеренно-субзеренную со средним размером структурных элементов 500 нм. Доля большеугловых границ составляет 54%, а средний размер зерен – 940 нм.

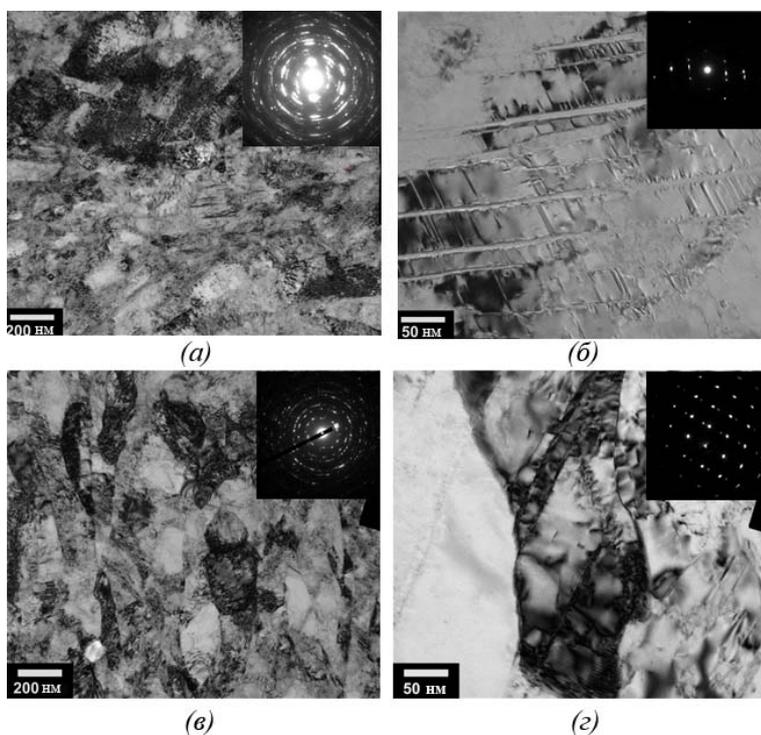


Рисунок 7 - Микроструктура стали 08X18H10T после РКУП при T=20°С и последующей циклической обработки ($\sigma_{\max}=600$ МПа; $N=7 \cdot 10^4$) (а,б) и после РКУП при T=400°С и последующей циклической обработки ($\sigma_{\max}=450$ МПа; $N=10^7$) (в,г). (а)– мартенсит деформации; (б,г)- деформационные двойники

РКУП значительно повышает механические свойства стали 08X18H10T, предел прочности повышается в 1,5-2 раза, предел текучести в 3,8-5,2 раза, предел усталости в 1,4-1,7 раза, но уменьшается

пластичность (рисунок 8).

Более высокие характеристики усталостного разрушения образцов после РКУП при 400 °С, могут быть объяснены тем, что структура стали практически аустенитная и в области многоциклового усталости дополнительное деформационное упрочнение может быть связано не только с перестройкой дислокационной структуры и дополнительным повышением плотности дислокаций, но и с возможностью образования мартенсита деформации в локальных зонах металла.

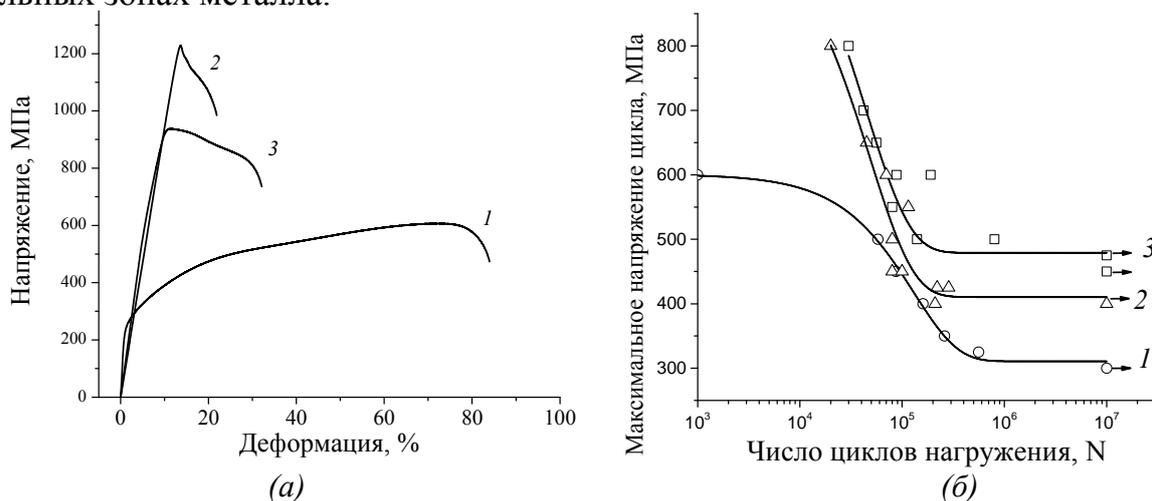


Рисунок 8 - Диаграммы растяжения (а) и кривые усталостной прочности (б) стали 08X18H10T в исходном состоянии (1), после РКУП (N=4 прохода) при T=20 °С (2) после РКУП (N=6 прохода) при T=400 °С (3)

В работе показано, что усталостная прочность повышается за счет измельчения структуры и двойникования в аустените в ходе РКУП, а также за счет интенсивного динамического двойникования, частичного мартенситного превращения и увеличения доли большеугловых границ в ходе циклической деформации. Основным фактором повышения предела усталости стали после РКУП при температуре 400 °С по сравнению с комнатной, является измельчение зеренной структуры, повышение доли высокоугловых границ и протекание частичного мартенситного превращения в преимущественно аустенитной УМЗ матрице в ходе циклических испытаний.

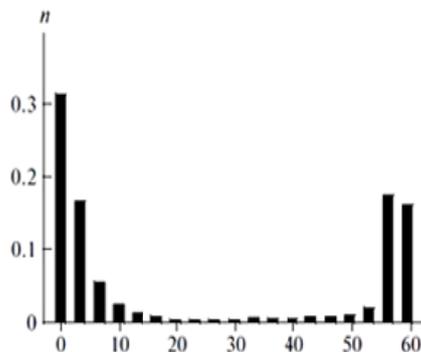
Во второй части главы рассматриваются причины повышения усталостной прочности и структурно-фазовые изменения в процессе циклических испытаний после РКУП при комнатной температуре и последующего нагрева.

Образцы стали 08X18H10T в исходно горячекатаном состоянии подвергали РКУП при комнатной температуре по 2 режиму с последующим нагревом на 550 °С и выдержкой 20 часов. По данным EBSD анализа в исходной структуре было выявлено 34% большеугловых границ, 11% границ – специальные границы $\Sigma 3$, характерные для двойников (рисунок 9). Это наглядно иллюстрирует распределение углов разориентировок структурных элементов (рисунок 9б).

После нагрева стали на 550 °С с выдержкой 20 ч после РКУП структура стали практически аустенитная с размером зерна 10 - 15 мкм и высокой плотностью двойников отжига (рисунок 10 а, б).



(а)



(б)

Рисунок 9 - Микроструктура стали 08X18N10Тв исходном состоянии (а) и распределение углов разориентировок структурных элементов (б)

Доля большеугловых границ структурных элементов увеличивается по сравнению с исходным состоянием за счет рекристаллизации, о чем свидетельствует появление углов разориентировок, соответствующих границам рекристаллизованных зерен.

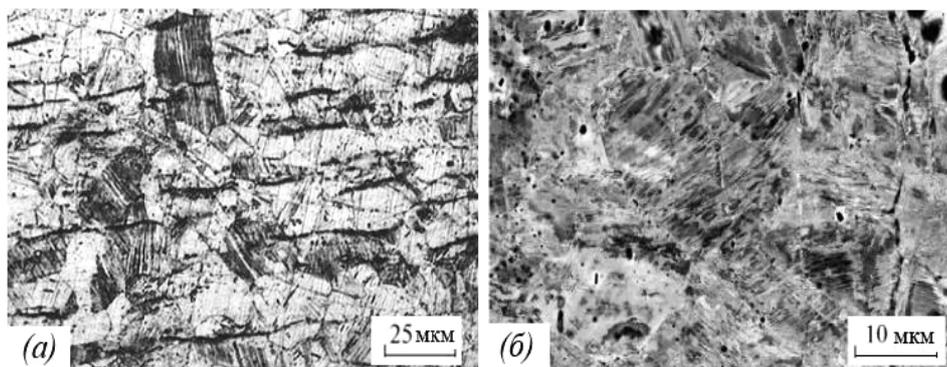


Рисунок 10 - Микроструктура стали 08X18N10Т после РКУП и последующего нагрева на 550°С (20ч) (а, б)

Полученная субмикроструктурная структура стали 08X18N10Т после РКУП и нагрева (рисунок 10) определила высокий уровень усталостных характеристик (рисунок 11).

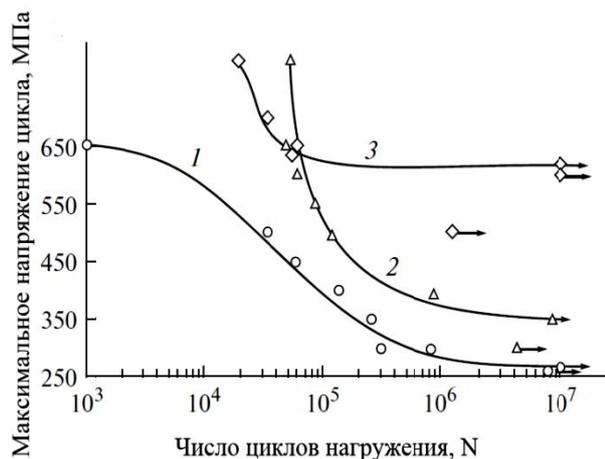


Рисунок 11 - Кривые усталостной прочности стали 08X18N10Т в исходном горячекатаном состоянии (1), после РКУП (2) и последующего отжига при 550°С (20ч) (3)

В работе проанализированы причины значительного повышения предела выносливости. Для циклически обработанных образцов стали

08X18H10T, после РКУП и нагрева, EBSD анализом выявлены преимущественно рекристаллизованные при нагреве зерна с повышенной плотностью двойников, что подтвердил и ПЭМ анализ (рисунок 12). Доля большеугловых границ в ходе циклической деформации увеличивается в результате интенсивных процессов двойникования в ходе циклической деформации, на что указывает увеличение доли специальных границ $\Sigma 3$.

Методами EBSD анализа, электронной микроскопии и рентгеноструктурного анализа в ходе циклической деформации стали 08X18H10T после проведенных обработок выявлены процессы интенсивного динамического двойникования, динамического возврата, начальных стадий динамической рекристаллизации и частичного мартенситного превращения.

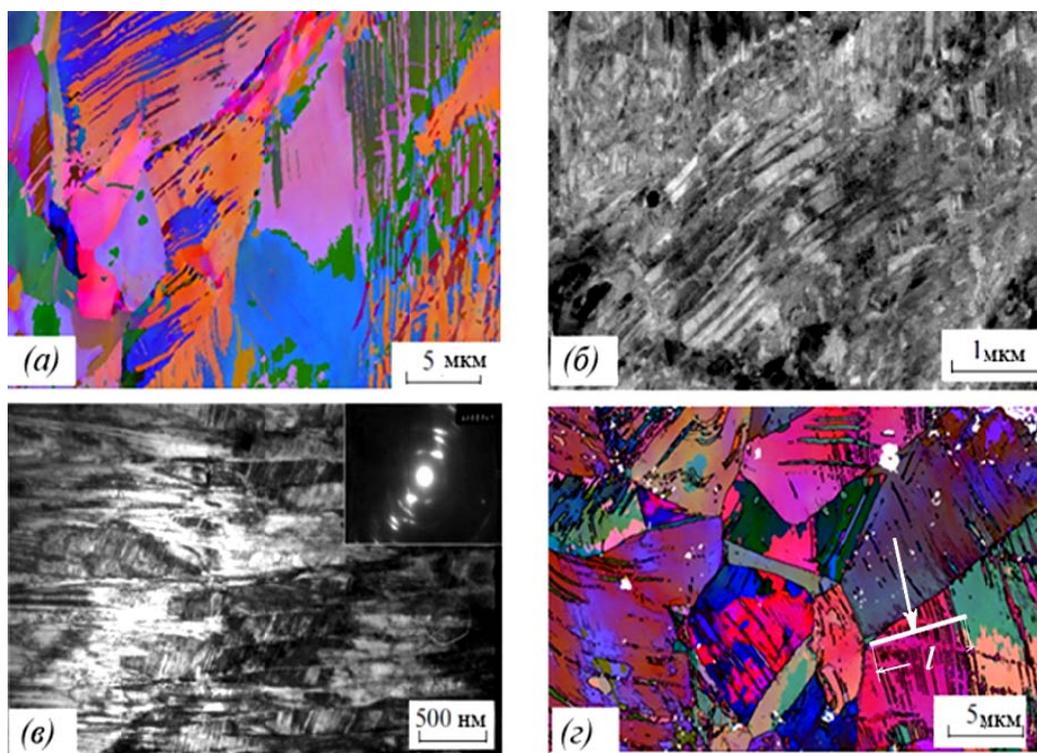


Рисунок 12 - Микроструктура стали 08X18H10T в исходном состоянии (а, б) и после РКУП и последующего нагрева на 550°C (20 ч) (в, г) после циклических испытаний

Установлено, что наибольшее значение предела выносливости 650 МПа, полученное после РКУП и нагрева на 550°C с выдержкой 20 ч обусловлено большой плотностью двойников отжига в рекристаллизованной преимущественно аустенитной матрице, а так же процессами интенсивного динамического двойникования и мартенситного превращения в ходе циклической деформации.

Шестая глава посвящена влиянию нейтронного облучения на микроструктуру, механические и коррозионные свойства стали 08X18H10T после интенсивной пластической деформации. Целью данной главы являлось выявление

изменений структурно-фазового состояния стали 08X18H10T в УМЗ состоянии после облучения нейтронами в реакторе ВВР-К.

Деформацию осуществляли методом КГД ($N=5$ оборотов) при комнатной температуре на образцах диаметром 10 мм и толщиной 1 мм. После КГД преобладающий размер зерен (субзерен) стали составляет 50 - 300 нм. После облучения нейтронами с максимальным флюенсом 2×10^{20} н/см² субмикронный размер структурных элементов стали 08X18H10T после КГД сохранился. Радиационных дефектов в кристаллитах не выявлено (рисунок 13а). В результате облучения образцов после КГД и последующего отжига при 550°С с выдержкой 1ч наблюдали рекристаллизованную структуру с равноосными зернами 0.5 – 1.6 мкм, наличием двойников отжига и выделениями карбидов типа $M_{23}C_6$. (рисунок 13б).

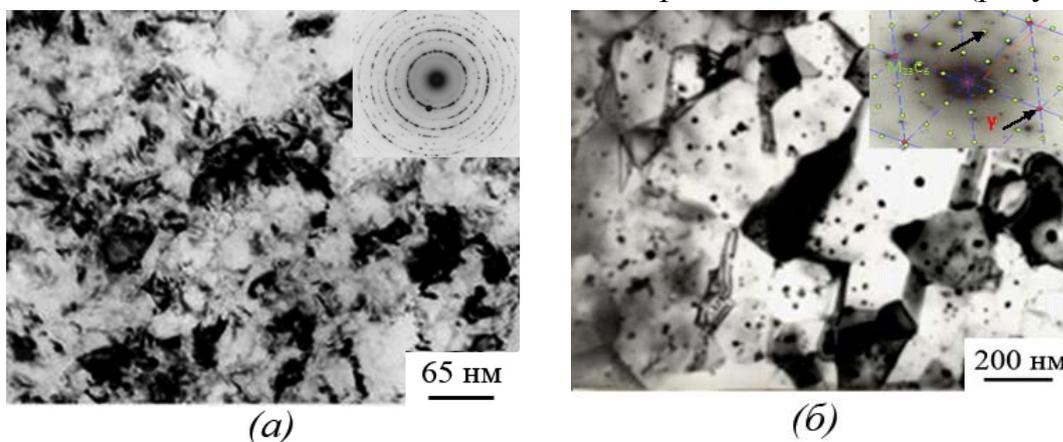
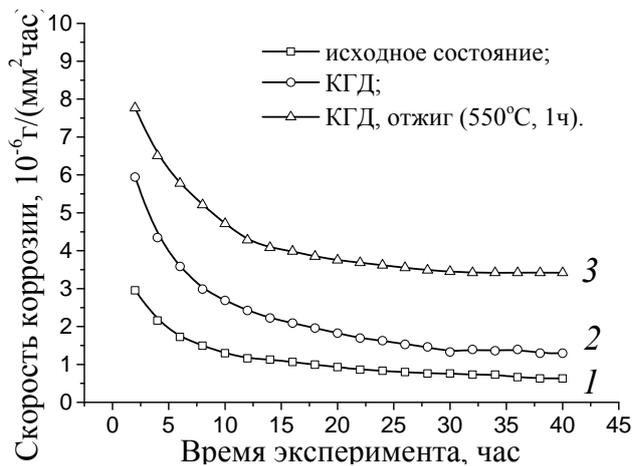


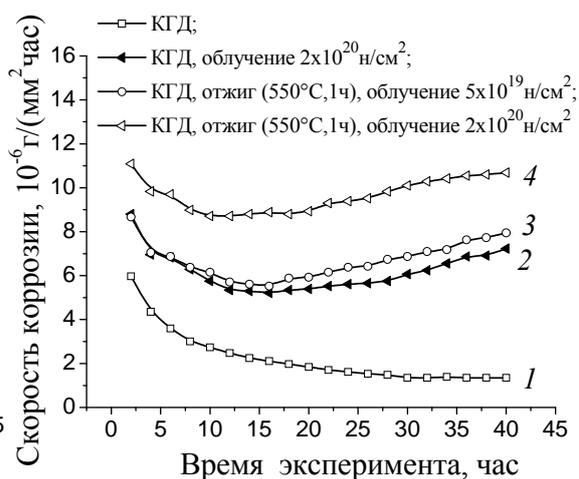
Рисунок 13 - Микроструктура стали 08X18H10T после КГД и облучения до 2×10^{20} н/см²(а), после КГД с последующим отжигом и облучением до 5×10^{19} н/см²(б)

Исследования коррозионной стойкости стали в растворе 5% $FeCl_3$ показали, что скорость коррозии образца после КГД выше скорости коррозии образца в крупнозернистом состоянии. Еще сильнее подвержены коррозии образцы УМЗ состоянии, отожженные при 550°С в течение 1 часа. Различие коррозионной стойкости образцов в ультрамелкозернистом состоянии можно объяснить влиянием границ зерен, как зон с повышенной дефектностью, наличием мартенсита, а также выделениями карбидов по границам (рисунок 14 а).

После облучения скорость коррозии образцов с ультрамелкозернистой структурой возрастает. Следует отметить особенность кривых скорости коррозии облученных образцов. Если для образцов без облучения скорость коррозии изменяется по зависимости, близкой к экспоненциальной, то в облученных образцах скорость коррозии сначала уменьшается, а после 15 часов начинает увеличиваться. Данный эффект, вероятно, связан с особенностями микроструктуры, которые определяются процессами укрупнения выделений внутри зерен, в том числе появлении и росте карбидной фазы, изменении и исчезновении субграниц, развитии процессов собирательной рекристаллизации (рисунок 14 б).



(a)



(б)

Рисунок 14 - Скорость коррозии стали 08X18N10Т до (а) и после (б) облучения

Механические свойства облученной стали исследовали по методу Shear-Punch. Полученные данные не выходят за пределы разброса, ожидаемого при Shear-Punch испытаниях (5-8%), что свидетельствует о высокой стойкости УМЗ стали под облучением вплоть до флюенса 2×10^{20} н/см² (~0.05 сна) (рисунок 15, таблица 2).

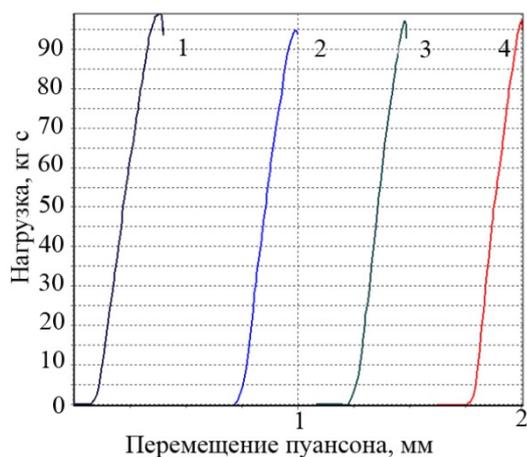


таблица 2).

Рисунок 15 - Механические испытания образцов по методу Shear-Punch

- 1- КГД + отжиг 550°C (1ч) облучение $2 \cdot 10^{20}$ н/см²;
- 2- КГД + отжиг 550°C (1ч) облучение $5 \cdot 10^{19}$ н/см²;
- 3- КГД при облучении $2 \cdot 10^{20}$ н/см²;
- 4- КГД при облучении $5 \cdot 10^{19}$ н/см².

Таблица 2 - Влияние нейтронного облучения на предел текучести наноструктурной стали 08X18N10Т

№ образца	Состояние	Флюенс, н/см ²	τ_r , кгс/мм ²	$\sigma_{0.2}$, МПа
Исх.	КГД без облучения	0	75	1400±140
1	КГД +отжиг 550°C ($\tau=1$ ч)	$2 \cdot 10^{20}$	78	1460±140
2	КГД +отжиг 550°C ($\tau=1$ ч)	$5 \cdot 10^{19}$	76	1400±140
3	КГД	$2 \cdot 10^{20}$	77	1440±140
4	КГД	$5 \cdot 10^{19}$	70	1280±140

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Изучены закономерности формирования структуры аустенитной стали 08X18H10T при кручении под гидростатическим давлением (КГД) 6 ГПа при комнатной температуре. При КГД с истинной степенью деформации 6,4 получена преимущественно равноосная структура со средним размером зерна 60 нм. Выявлено протекание в стали 08X18H10T мартенситных α - и ε -превращений в ходе КГД при комнатной температуре. Превращения не идут до конца. Количество мартенсита достигает 80%. Интенсивность превращений уменьшается с увеличением степени деформации.
2. Обосновано проведение КГД в интервале температур 300-500 °С, то есть выше температуры образования мартенсита деформации для получения полностью аустенитного состояния в УМЗ стали 08X18H10T. Впервые получен высокий комплекс механических свойств в аустенитной стали 08X18H10T с размером зерна 85-125 нм: предел текучести 1640- 1740 МПа при удлинении 6-10 %.
3. Получено полностью аустенитное состояние в наноструктурной стали 08X18H10T (размер зерна 60 нм) при ступенчатой деформации с понижением температуры КГД: 450 \rightarrow 300 \rightarrow 20°С. Выявлено, что уменьшение размера зерна приводит к понижению температуры появления мартенсита деформации и сдвигает ее в область отрицательных температур.
4. Определены особенности структурно-фазовых превращений в ходе равноканального углового прессования (РКУП) при комнатной температуре в аустенитной стали 08X18H10T. Выявлено частичное мартенситное превращение (45%), формирование субмикроструктурной ориентированной структуры с расстоянием между границами 100-250 нм и большим количеством двойников. Полученная структура определила сильное деформационное упрочнение: предел текучести = 1315 МПа при удлинении 11%. РКУП стали 08X18H10T при температуре деформации 400°С приводит к формированию субмикроструктурной структуры в полностью аустенитной матрице с размером структурных элементов 200-300 нм и пределом текучести 860 МПа при удлинении 27 %.
5. Проведены комплексные исследования эволюции структуры УМЗ стали 08X18H10T в ходе циклической деформации методами рентгеноструктурного анализа, электронной просвечивающей и сканирующей микроскопии и метода обратно отраженных электронов (EBSD -анализ). В ходе циклической деформации стали 08X18H10T после исследованных обработок выявлены процессы интенсивного вторичного динамического двойникового, динамического возврата, увеличение доли большеугловых границ и частичное мартенситное превращение.

6. Установлено, что усталостная прочность субмикроструктурной хромоникелевой стали 08X18H10T повышается за счет измельчения структуры и двойникования в аустените в ходе РКУП, а также за счет интенсивного динамического двойникования, измельчения зеренной структуры, частичного мартенситного превращения и увеличения доли большеугловых границ в ходе циклической деформации.
7. Выявлено значительное повышение предела усталости (650 МПа) стали 08X18H10T после РКУП и нагрева на 550°C с выдержкой 20 часов за счет большой плотности двойников отжига в рекристаллизованной преимущественно аустенитной матрице (размер зерна ~ 15 мкм).
8. Обнаружено, что нейтронное облучение УМЗ стали 08X18H10T вплоть до флюенса 2×10^{20} н/см² (~0.05 сна) не приводит к появлению дефектов радиационного происхождения с сохранением прочностных свойств материала после облучения. Вместе с тем, облучение ультрамелкозернистого материала нейтронами до флюенса 2×10^{20} н/см² понижает его коррозионную стойкость в хлорсодержащей среде, особенно, после нагрева на 550°C с выдержкой $\tau=1$ ч.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Список статей в рецензируемых журналах, рекомендуемых ВАК:

1. Rybal'chenko, O.V. Strength of Ultra-grained Corrosion-resistant Steels after Severe Plastic Deformation [Текст] / *Rybal'chenko O.V., Dobatkin S.V., Kaputkina L.M., Raab G.I., Krasilnikov N.A.* // Mat. Sci. Eng. A.-2004. -V.387-389. -P. 244-248.
2. Добаткин, С.В. Формирование субмикроструктурной структуры в аустенитной стали 08X18H10T при РКУ прессы и нагреве [Текст] /Добаткин С.В., Рыбальченко О.В., Рааб Г.И. // Металлы. -2006. -№ 1. -С. 48-54.
3. Dobatkin, S.V. Structure formation, phase transformations and properties in Cr–Ni austenitic steel after equal-channel angular pressing and heating [Текст]/ Dobatkin S.V., *Rybal'chenko O.V.*, Raab G.I. // Mat. Sci. Eng. A. -2007. -V. 463. -P. 41–45.
4. Терентьев, В.Ф. Усталостная прочность аустенитной стали X18H10T после равноканального углового прессы [Текст] /Терентьев В.Ф., Добаткин С.В., Просвирнин Д.В., Банных И.О., *Рыбальченко О.В.*, Рааб Г.И. //Деформация и разрушение материалов. -2008. -№ 10. -С. 30-38.
5. Добаткин, С.В. Фазовые и структурные превращения в коррозионно-стойких сталях после сдвига под давлением и нагрева [Текст] / Добаткин С.В., Капуткина Л.М., *Рыбальченко О.В.*, Комлев В.С.//Металлы. -2012. -№ 5. -С.28-37.
6. Добаткин, С.В. Структура и усталостная прочность стали 08X18H10T после равноканального углового прессы и нагрева [Текст] \ Добаткин С.В.,

Терентьев В.Ф., Скротцки В., Рыбальченко О.В., Панкова М.Н., Просвирнин Д.В., Золотарев Е.В. [Текст] //Металлы. -2012. -№6. -С. 45-55.

7. Dobatkin, S. Structure and Fatigue Properties of Cr-Ni-Ti Austenitic Steel after Equal Channel Angular Pressing [Текст] / Dobatkin S., Skrotzki W., Terent'ev V., Rybalchenko O., Belyakov A., Prosvirnin D., Zolotarev E.// Materials Science Forum. -2013. -P. 343-348.

Список статей в сборниках:

1. Dobatkin, S.V. Nanocrystalline Structure of Steels After Severe Plastic Deformation [Текст] / Valiev R.Z., Kaputkina L.M., Krasilnikov N.A., Sukhostavskaya O.V., V.S. Komlev.// Scientific proceedings Second International Congress Mechanical engineering technologies '99 , -Sofia, Bulgaria, 16-18. 09. 1999, -P. 85-87.
2. Dobatkin, S.V. Recrystallization of Steels with Submicrocrystalline Structure [Текст] /Dobatkin S.V., Valiev R Z., Kaputkina L.M., Krasilnikov N.A., Sukhostavskaya O.V., Komlev V.S.// Fourth International Conference on Recrystallization and Related Phenomena, JIM, -Tsukuba, Japan, 1999. -P. 907–912.
3. Добаткин, С.В. Повышение механических и эксплуатационных свойств ультрамелкозернистых металлических материалов, полученных интенсивной пластической деформацией [Текст] / Добаткин С.В., Рыбальченко О.В., Бочвар Н.Р., Шаньгина Д.В., Страумал П.Б. // Сб. научных трудов «Институт металлургии и материаловедения им. А.А.Байкова РАН — 75 лет», -М.: Интерконтакт Наука. -2013. -С. 589.

Список основных тезисов конференций:

1. Valiev, R.Z. Microhardness and Submicrocrystalline Structure of Stainless Steel Obtained by Severe Plastic Deformation [Текст] / Valiev R.Z., Dobatkin S.V., Kaputkina L.M., Krasilnikov N.A., Kazakov M.A., Sukhostavskaya O.V.// Fourth International Conference on Nanostructured Materials “NANO’98”, Book of Abstract. -Stockholm, Sweden, June 14-19, 1998.
2. Valiev, R.Z. Structure of Steels after Severe Plastic Deformation [Текст] / Valiev R.Z., Dobatkin S.V., Kaputkina L.M., Krasilnikov N.A., Sukhostavskaya O.V., Komlev V.S.// Abstracts of NATO Advanced Research Workshop. Investigation and Application of Severe Plastic Deformation -Moscow, Russia, August, 2-6, 1999.
3. Добаткин, С.В. Формирование субмикроструктурной структуры в аустенитной стали 08X18H10T при РКУ прессовании и нагреве [Текст] / Добаткин С.В., Рыбальченко О.В., Рааб Г.И.// Сборник материалов I-й Всероссийской конференции по наноматериалам. ИМЕТ РАН. -Москва, 16-17.12. 2004, -С.144.

4. Рыбальченко, О.В. Анализ текстуры коррозионностойких аустенитной и ферритной сталей после интенсивной пластической деформации кручением и последующего нагрева [Текст] / Рыбальченко О.В. //Сборник трудов ежегодной конференции молодых специалистов ИМЕТ им А.А. Байкова РАН. ИМЕТ РАН. -Москва, 6-8 декабря 2005, -М: Интерконтакт Наука. - 2005.-С. 70-72.
5. Rybalchenko, O.V. Texture Changes in Corrosion-Resistant Steels upon Severe Plastic Deformation by Torsion and Heating [Текст] / Rybalchenko O.V., Dobatkin S.V., Kaputkina L.M. // Summaries of lectures of the 8-th International Symposium of Croatian metallurgical society, -Shibenik, Croatia, 22-26.06.2008. Metalurgija (Metallurgy). -Vol.47. -№3. -P.248.
6. Terent'ev, V. Fatigue Strength of the 0.07%C-17.3%Cr-9.2%Ni Austenitic Steel after Equal Channel Angular Pressing [Текст] / Terent'ev V., Dobatkin S., Prosvirnin D., Pankova M.N., Bannykh I., Raab G., Rybalchenko O. // Summaries of lectures of 9th International Symposium of Croatia Metallurgical Society. -Sibenik, Croatia, June 20-24, 2010 Metalurgija, -2010. -Vol.49. -№3. - P.229.
7. Добаткин, С.В. Структурно-фазовое состояние и свойства стали 08X18H10T после сдвига под давлением в интервале $T = 20-500^{\circ}\text{C}$ [Текст] / Добаткин С.В., Валиев Р.З., Капуткина Л.М., Панкова М.Н., Рыбальченко О.В., Абрамова М.М. // Сборник материалов IV-й Всероссийской конференции по наноматериалам, ИМЕТ РАН, -Москва, 01-04.03. 2011. -С.384.
8. Терентьев, В.Ф. Усталостная прочность стали X18H10T после равноканального углового прессования и последующего нагрева [Текст] /Терентьев В.Ф., Добаткин С.В., Просвирнин Д.В., Рыбальченко О.В., Рааб Г.И. // Сборник материалов IV-й Всероссийской конференции по наноматериалам, ИМЕТ РАН, -Москва, 01-04.03. 2011. -С.383.
9. Добаткин, С.В. Влияние нагрева после равноканального углового прессования стали X18H10T на циклическую прочность [Текст] / Добаткин С.В., Терентьев В.Ф., Рыбальченко О.В., Просвирнин Д.В, Рааб Г.И. // Сборник материалов 4-ой Международной конференции «Деформация и разрушение материалов и наноматериалов», ИМЕТ РАН. -Москва, Россия, 25-28 октября 2011. - С. 177-179.
- 10.Добаткин, С.В. Структура и свойства аустенитных сталей 08X18H10T И ASTM F 138 после кручения под гидростатическим давлением в интервале температур $300-500^{\circ}\text{C}$ [Текст] / Добаткин С.В., Клиауга А., Рыбальченко О.В., Панкова М.Н., Шарипова К.А. // Тезисы научно-технического семинара «Бернштейновские чтения по термомеханической обработке

металлических материалов». НИТУ «МИСиС». –Москва, 26-28 октября 2011. -С.55.

11. Dobatkin, S.V. Structure and Phase States of 0.08%С-18%Cr-10%Ni-Ti Stainless Steel after High-Pressure Torsion at T=20-500°C [Текст] / Dobatkin S.V., Rybalchenko O.V., Pankova M.N., Sharipova K.A. // Summaries of Lectures of The 10th International Symposium of Croatian Metallurgical Society “Materials and Metallurgy” -Sibenik, Croatia, 17-21 June 2012./ Metallurgija. -2012. - Vol.51. -№3. -P.421.
12. Dobatkin, S.V. Structure of Austenitic Steels after High Pressure Torsion at the Temperatures 300-500 °C [Текст] / Dobatkin S.V., Valiev R.Z., Kliauga A., Rybalchenko O.V., Abramova M.M. // Book of abstracts of 19th International Symposium on Metastable, Amorphous and Nanostructured Materials (ISMAM 2012), 18-22 June 2012, Moscow, Russia.–Moscow: MISiS, 2012. - P. 134.
13. Dobatkin, S.V. Structure and Martensitic Transformations in Austenitic 0.08% C-18% Cr-10% Ni-0.7% Ti Steel During Severe Plastic Deformation [Текст] / Dobatkin S.V., Valiev R.Z., Rybalchenko O.V., Pankova M.N., Enikeev N., Abramova M.M. // Book of Abstracts of 9th European Symposium on Martensitic Transformations (ESOMAT 2012). -Saint-Petersburg, Russia, September 9-16, 2012. -P 102.
14. Dobatkin, S.V. Structure and Properties of the Stainless Cr-Ni-Ti Steel after High Pressure Torsion at T= 300-500°C [Текст] / Dobatkin S.V., Valiev R.Z., Rybalchenko O.V., Murashkin M.Yu. // Abstracts of the Seventh International Symposium on Ultrafine Grained Materials. 141-st Annual TMS Meeting. - Orlando, Florida, USA, March 11-15, 2012. -P. 291.
15. Добаткин, С.В. Структурно – фазовые состояния и механические свойства нержавеющей стали 08X18H10T после интенсивной пластической деформации [Текст] / Добаткин С.В., Рыбальченко О.В. // Тезисы VII Международной конференции, посвященной 110 – летию со дня рождения академика Г.В. Курдюмова «Фазовые превращения и прочность кристаллов», -Черноголовка, 30 октября -2 ноября 2012. -С.143.
16. Рыбальченко, О.В. Структура и усталостные свойства аустенитной стали после равноканального углового прессования и нагрева [Текст] / Рыбальченко О.В., Добаткин С.В., Скروتски В., Терентьев В.Ф., Беляков А.Н., Просвирнин Д.В., Золотарев Е.В. // Сборник трудов 10-ой Международной научно-технической конференции «Современные металлические материалы и технологии» (СММТ’13). -Санкт-Петербург, 25-29 июня 2013. -С. 477.

17. *Рыбальченко, О.В.* Структура и свойства аустенитной стали 08X18H10T после равноканального углового прессования и циклических испытаний [Текст] / *Рыбальченко О.В., Терентьев В.Ф., Беляков А.Н., Рааб Г.И., Просвирнин Д.В., Скروتцки В., Добаткин С.В.* // Сборник материалов V-ой Всероссийской конференции по наноматериалам «НАНО 2013», -М.: ИМЕТ РАН. -2013. -С. 273-274.
18. *Рыбальченко, О.В.* Особенности структуры и свойств аустенитной стали 08X18H10T после равноканального углового прессования и циклических испытаний [Текст] / *Рыбальченко О.В., Терентьев В.Ф., Беляков А.Н., Рааб Г.И., Просвирнин Д.В., Скروتцки В., Добаткин С.В.* // Тезисы V-ой Международной конференция «Деформация и разрушение материалов и наноматериалов». -ИМЕТ РАН. –Москва. -2013. -С. 200-202.
19. *Терентьев, В.Ф.* Влияние равноканального углового прессования на механические свойства аустенитной стали ASTM F138 [Текст] / *Терентьев В.Ф., Добаткин С.В., Клиауга А., Рыбальченко О.В., Просвирнин Д.В.* // Тезисы V-ой Международной конференция «Деформация и разрушение материалов и наноматериалов». ИМЕТ РАН. –Москва. -2013. -С. 209-212.
20. *Rybalchenko, O.V.* Structure and Properties in Austenitic 0.08% C-18% Cr-10% Ni-0.7% Ti Steel after High Pressure Torsion [Текст] / *Rybalchenko O.V., Dobatkin S.V., Enikeev N., Abramova M.* // Book of Abstract THERMEC-2013, -Las-Vegas, USA, 2-6.12.2013.
21. *Dobatkin, S.V.* Structure and Fatigue Properties of Cr-Ni-Ti Austenitic Steel after Equal Channel Angular Pressing and Heating [Текст] / *Dobatkin S.V., Skrotzki W., Terent'ev V.F., Rybalchenko O.V., Belyakov A.N., Prosvirnin D.V., Zolotarev E.V.,* // Book of Abstract THERMEC-2013, -Las-Vegas, USA, 2-6.12.2013.
22. *Рыбальченко, О.В.* Влияние структурообразования в ходе равноканального углового прессования и последующей циклической обработки на усталостные свойства стали 08X18H10T [Текст] / *Рыбальченко О.В., Терентьев В.Ф., Просвирнин Д.В., Беляков А.Н., Добаткин С.В.* // Тезисы Евразийской научно-практической конференции «Прочность неоднородных структур». НИТУ «МИСиС». -Москва, Россия, 22-24 апреля 2014.
23. *Рыбальченко, О.В.* Влияние структурообразования в ходе РКУП и циклических испытаний на усталостную прочность стали 08X18H10T [Текст] / *Рыбальченко О.В., Терентьев В.Ф., Просвирнин Д.В., Беляков А.Н., Скروتцки В., Добаткин С.В.* // Сборник материалов научных чтений им. чл.-корр. РАН И.А. Одингга «Механические свойства современных конструкционных материалов» ИМЕТ РАН. -Москва, Россия, 4-5 сентября 2014.