

На правах рукописи

ДЕЛЬГАДО РЕЙНА Светлана Юрьевна

Формирование субмикроструктурного состояния при термомеханической обработке низкоуглеродистых сталей и стальных КОМПОЗИТОВ

Специальность 05.16.01

Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Екатеринбург – 2014

Диссертационная работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Ордена Трудового красного Знамени Институте физики металлов Уральского отделения Российской академии наук (ИФМ УрО РАН)

Научный руководитель: Табатчикова Татьяна Иннокентьевна,
доктор технических наук.

Официальные оппоненты: Гладковский Сергей Викторович,
доктор технических наук,
заведующий лабораторией
деформирования и разрушения
ИМаш УрО РАН, г. Екатеринбург
Беликов Сергей Владимирович,
кандидат технических наук, доцент
кафедры «Термообработка и физика
металлов» УрФУ имени первого
президента России Б.Н. Ельцина,
г. Екатеринбург

Ведущая организация: ФГБОУ ВПО «Пермский национальный
исследовательский политехнический
университет», г. Пермь.

Защита состоится «30» января 2015 г. в 11.00 часов на заседании диссертационного совета Д 004.003.01 при ИФМ УрО РАН, расположенном по адресу:
620990, г. Екатеринбург, ул. С. Ковалевской, 18.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИФМ УрО РАН и на сайте www.imp.uran.ru.

Автореферат разослан « » ноября 2014 г.

Ученый секретарь
Диссертационного совета
доктор физико-математических наук

Лошкарева Н.Н.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования и степень ее разработанности. Обзор многочисленных исследований в области материаловедения современных конструкционных материалов показывает, что в последнее время значительно увеличилась потребность в материалах, в том числе сталях, которые должны обладать комплексом специфических, часто взаимоисключающих механических свойств: высокими прочностью, пластичностью, ударной вязкостью и сопротивлением хрупкому разрушению.

Одним из важнейших свойств сталей – наиболее распространенных конструкционных материалов – является свариваемость, способность к которой определяется, в первую очередь, содержанием углерода. В связи с этим были предложены и разработаны стали с низким содержанием углерода – 0,05-0,08 %. К ним, прежде всего, относятся стали для строительства газо- и нефтепроводов, а также для изготовления тяжело нагруженных сварных конструкций ответственного назначения, эксплуатация которых ведется в сложных климатических условиях при низких температурах. Естественно, что получение в таких сталях высокой прочности наряду с высокой ударной вязкостью и сопротивлением хрупкому разрушению является важной и актуальной задачей. В связи с этим для упрочнения таких сталей перспективно применение термомеханической обработки, сочетающей в себе горячую деформацию и фазовое превращение.

Анализ литературных данных показывает, что к настоящему времени накоплен большой экспериментальный материал о закономерностях фазовых и структурных превращений в сталях подобного класса. Вот уже на протяжении нескольких десятилетий научные и промышленные группы занимаются исследованием и разработкой низкоуглеродистых низколегированных высокопрочных сталей. К настоящему моменту с учётом современных достижений в области микролегирования разработаны их химические составы, а также предложены режимы термомеханической обработки, позволяющей получить высокий комплекс механических свойств.

Однако, несмотря на важные достижения в данной области, имеющихся данных, однозначно, недостаточно для научного обоснования выбора оптимальных температурно-деформационных параметров обработки сталей подобного класса. Анализ данных открытой печати показывает, что многие принципиально важные вопросы, такие как: влияние деформации на протекание фазовых и структурных превращений в этих сталях, а также установление

взаимосвязи между формирующейся структурой и уровнем механических свойств, по-прежнему являются предметом дискуссий. При этом ряд вопросов остается неизученным. Так, например, существующие классификации структур, формирующихся при распаде переохлажденного аустенита в низкоуглеродистых низколегированных сталях, чрезвычайно подробно и детализированы. В связи с этим сопоставить данные различных исследователей о том, какая структура в сталях подобного класса является оптимальной, практически невозможно, поскольку для ее обозначения используются разные термины (например, гранулярный бейнит, бескарбидный бейнит, зернистый бейнит и т.д.). Противоречия в трактовке результатов исследователей связаны не только с различной терминологией, но и с отсутствием данных о морфологии и тонкой структуре образующегося в этих сталях бейнита. Такие данные можно получить, применяя для исследования структурного состояния комплекс методов оптической, сканирующей и просвечивающей микроскопии. Кроме того, до сих пор открытым остается вопрос о влиянии размера зерна аустенита и степени пластической деформации на механизм бейнитного превращения и морфологию образующейся структуры, неопределёнными также являются условия формирования оптимальной структуры сталей подобного класса. Таким образом, необходимы подробные структурные исследования сталей после различных схем термомеханической обработки и сопоставление полученного структурного состояния с достигаемым уровнем механических свойств.

Хорошо известно, что одновременное повышение прочностных и вязко-пластических свойств материала возможно лишь за счет диспергирования структурных составляющих – то есть измельчения зеренной структуры или максимального развития субзеренного упрочнения.

В работах В.В. Рыбина показано, что при деформации прокаткой в материале происходит формирование субструктуры, состоящей из разориентированных друг относительно друга фрагментов (субзерен), что сопровождается образованием расслоений и создает особое напряженное состояние, характеризующееся пониженным напряжением скола $\sigma_z^{ск}$. К аналогичному результату приводит и термомеханическая обработка, в результате которой в листовом материале формируется «слоистая» структура. Наличие ослабленных поверхностей, параллельных плоскости прокатки, может быть связано с образованием определенной текстурной компоненты, возникновением и разворотом фрагментов и иными причинами, обусловленными неоднородностью структуры.

Образование таких поверхностей способствует повышению ударной вязкости за счет изменения характера напряженного состояния от плоскодеформированного к плосконапряженному. Таким образом, посредством термомеханической обработки в монолитном материале частично может быть достигнут эффект многослойного композита. В наибольшей степени этот эффект достигается в композиционных материалах с ламинарной структурой. Анализ литературных данных показывает, что такие композиты в настоящее время рассматриваются в качестве перспективных конструкционных материалов. Исследования в данном направлении активно развиваются, однако большая часть работ направлена на изучение способов синтезирования подобных композитов, определение зависимости их свойств от используемых материалов, количества и характера расположения слоев. При этом исследования, направленные на установление структурных особенностей многослойных композитов, практически полностью отсутствуют.

Цель диссертационной работы: исследовать закономерности формирования структуры низкоуглеродистых сталей и стальных композитов в результате термической и термомеханической обработки и установить связь структурного состояния с механическими свойствами.

В качестве материалов исследования в данной работе использованы перспективные низкоуглеродистые высокопрочные стали, состав и режимы термомеханической обработки которых разработаны в ФГУП ЦНИИ КМ «Прометей», а также стальные композиты, синтезированные методом горячей пакетной прокатки в МГТУ имени Н.Э. Баумана. Для выполнения поставленной цели, т.е. для научного обоснования выбора использованных параметров термомеханической обработки исследуемых материалов, необходимо было решить **следующие задачи.**

1. Определить фазовый состав и структурное состояние низкоуглеродистой стали типа 07Г2НМДБТ, обеспечивающие требуемый комплекс механических свойств в результате термомеханической обработки по различным схемам.

2. Изучить закономерности изменения морфологии продуктов бейнитного превращения переохлажденного аустенита стали типа 07Г2НМДБТ и выявить условия формирования наиболее дисперсной структуры.

3. Установить взаимосвязь между структурным состоянием и комплексом механических свойств стали типа 10ХН2МД, подвергнутой термомеханической обработке, закалке в установке контролируемого охлаждения и дополнительному отпуску.

4. Определить структурные факторы, приводящие к снижению уровня механических свойств термомеханически упрочненной стали типа 10ХН2МД после повторной термообработки.

5. Изучить закономерности развития фазовых и структурных превращений, обеспечивающих уникальный комплекс механических свойств многослойных металлических материалов, полученных методом горячей пакетной прокатки заготовок на основе сталей различных структурных групп.

Научная новизна работы. Установлено, что комплекс высоких значений механических свойств (временное сопротивление $\sigma_{\text{в}} = 840$ МПа, предел текучести $\sigma_{0,2} = 790$ МПа, ударная вязкость $KCV^{40} = 2,6$ МДж/м²) стали типа 07Г2НМДБТ, подвергнутой термомеханической обработке, обеспечивается за счет формирования бейнита с развитым субзерненным строением. Показано, что в изотермических условиях такая структура формируется в интервале температур (550-500)°С, а ее объемная доля увеличивается при распаде крупнозернистого (60-80 мкм) аустенита, подвергнутого предварительной горячей деформации.

Выявлено, что достижение высоких значений механических свойств стали типа 10ХН2МД после закалки в установке контролируемого охлаждения и последующего отпуска обусловлено формированием мартенситно-бейнитной субмикроструктурной структуры.

Показано, что уникальный комплекс механических свойств многослойных композитов, синтезированных при горячей пакетной прокатке заготовок (08Х18+У8), (08Х18+08Х18Н10) обусловлен их ламинарным строением, формирующимся вследствие развития фазовых превращений в условиях ограниченной диффузии легирующих элементов.

Практическая значимость. Полученные результаты вносят существенный вклад в определение оптимальных температурно-деформационных параметров обработки низкоуглеродистой низколегированной стали типа 07Г2НМДБТ для магистральных трубопроводов и низкоуглеродистой стали типа 10ХН2МД для судостроения.

Результаты работы использованы на ЧерМК ОАО «Северсталь» и ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат» при разработке технологии термомеханической обработки сталей с феррито-бейнитной и бейнитно-мартенситной структурой категорий прочности 500-690 МПа, предназначенных для строительства конструкций арктического назначения.

Результаты диссертационной работы, в том числе закономерности протекания фазовых и структурных превращений в

низкоуглеродистых сталях и многослойных стальных композитах при термомеханической обработке, используются в Институте материаловедения и металлургии Уральского федерального университета имени первого президента России Б.Н. Ельцина при подготовке аспирантов по специальностям 05.16.01.– материаловедение и термическая обработка металлов и сплавов, 06.16.09 - материаловедение в металлургии; при чтении лекций по специальным дисциплинам: «Материаловедение композиционных материалов», «Дифракционные и электронно-микроскопические методы анализа материалов», «Новые высокопрочные и функциональные материалы» по направлениям подготовки – 150100 – материаловедение и технологии новых материалов, 150400 – металлургия.

Методологические основы исследования. Структуру низкоуглеродистых сталей и стальных композитов исследовали методами оптической металлографии, просвечивающей и растровой электронной микроскопии.

Механические свойства исследуемых материалов были получены при проведении испытаний на одноосное растяжение, ударный изгиб. Доля вязкой составляющей в изломе была определена при испытаниях падающим грузом. Имитация режимов термической и термомеханической обработок для исследования фазовых и структурных превращений была осуществлена на высокоскоростном закалочно-деформационном dilatометре с возможностью деформирования сжатием и автоматизированным контролем основных температурно-деформационных параметров обработки.

Положения, выносимые на защиту:

1. Установленная причина высокого комплекса механических свойств (прежде всего, ударной вязкости) стали типа 07Г2НМДБТ после двухстадийной термомеханической обработки, заключающаяся в формировании структуры бейнита с развитым субзерненным строением.

2. Условия формирования дисперсной структуры бейнита с развитым субзерненным строением в стали типа 07Г2НМДБТ, включающие распад переохлажденного аустенита в интервале температур (550-500)°С при изотермическом превращении. Увеличение объемной доли бейнита такой морфологии в структуре сталей типа 07Г2НМДБТ и 06Г2ФБ достигается в результате предварительной деформации аустенита с исходным крупным зерном (60-80 мкм).

3. Причина повышенного комплекса механических свойств ($\sigma_b = 750$ МПа, $\sigma_{0,2} = 700$ МПа, $KCV^{60} = 2,9$ МДж/м², $T_x = -100^\circ\text{C}$) стали типа 10ХН2МД, после закалки в установке контролируемого охлаждения и последующего отпуска, заключающаяся в

формировании мартенситно-бейнитной субмикроструктурной структуры.

4. Факторы, приводящие к повышению температуры хрупко-вязкого перехода термомеханически упрочненной стали типа 10ХН2МД в результате повторной закалки и отпуска, включающие в себя развитие процессов распада аустенита при температурах, частично захватывающих перлитную область, а также изменение дисперсности и морфологии карбидной фазы.

5. Связь уникального комплекса механических свойств стальных композитов, полученных методом горячей пакетной прокатки заготовок (У8+08Х18Н10) и (08Х18+08Х18Н10), с ламинарной субмикроструктурной структурой, формирующейся в результате фазовых превращений, протекающих в условиях ограниченной диффузии легирующих элементов.

Степень достоверности результатов. Достоверность результатов обеспечена использованием современного исследовательского оборудования, программного обеспечения (в частности системы анализа изображений SIAMS 600) и комплекса взаимодополняющих методов структурных исследований (просвечивающей и сканирующей электронной микроскопии, оптической металлографии); применением математических способов обработки экспериментальных данных и определения погрешностей измерений, а также использованием результатов механических испытаний, проведенных в соответствии ГОСТ 1497-84, ГОСТ 9454-78, ГОСТ 30456-97.

Апробация результатов исследования. Основные результаты диссертационной работы были представлены и обсуждены на 8 международных и 5 всероссийских конференциях:

международная конференция «Вторые московские чтения по проблемам прочности материалов» (г. Черноголовка, 2011 г.); международная конференция «Бернштейновские чтения по термомеханической обработке металлических материалов» (Москва, 2011 г.); международная конференция «XXI Уральская школа металловедов-термистов. Актуальные проблемы физического металловедения сталей и сплавов» (Магнитогорск, 2012 г.); международная конференция «Фазовые превращения и прочность кристаллов» (г. Черноголовка, 2012 г.); The fifth international conference «Deformation & fracture of materials and nanomaterials» (Москва, 2013 г.); международная конференция «Актуальные проблемы прочности» (г. Екатеринбург, 2013 г.); международная школа с элементами научной школы для молодежи «Физическое материаловедение» (г. Тольятти, 2013 г.); XIII международная конференция «Дислокационная структура и механические свойства

металлов и сплавов – ДСМСМС -2014» (г. Екатеринбург, 2014 г.), всероссийские конференции «Молодежная школа-семинар по проблемам физики конденсированного состояния вещества» (г. Екатеринбург, 2011 - 2013 гг.); российской ежегодной конференции молодых научных сотрудников и аспирантов "Физико-химия и технология неорганических материалов" (Москва, 2013-2014 гг.).

Публикации. Основное содержание работы опубликовано в 6 статьях в журналах, входящих в перечень ВАК.

Личный вклад автора. Вошедшие в диссертацию результаты получены автором под научным руководством д.т.н. Татьяны Иннокентьевны Табатчиковой. Совместно с научным руководителем автор участвовал в постановке цели и задач исследования.

Автором лично выполнены металлографические исследования структуры многослойных материалов и сталей типа 07Г2НМДБТ, 06Г2ФБ, 10ХН2МД, подвергнутых термомеханической обработке по различным схемам упрочнения; обработаны и проанализированы результаты фрактографических исследований изломов и локального микрорентгеноспектрального анализа, проведенного в ЦКП ИФМ УрО РАН; сопоставлены результаты исследований структурных состояний низкоуглеродистых сталей с комплексом их механических свойств.

Электронно-микроскопические исследования методом просвечивающей микроскопии выполнены совместно с д.т.н. И.Л. Яковлевой в ЦКП ИФМ УрО РАН. Диссертантом самостоятельно проведена интерпретация структуры низкоуглеродистых сталей и многослойных композитов, а также микрофракционный анализ фазового состава, ориентировок фаз и структурных составляющих исследуемых материалов.

Полученные результаты обсуждены и подготовлены к публикации совместно с соавторами: В.М. Счастливым, Т.И. Табатчиковой, И.Л. Яковлевой, Е.И. Хлусовой, А.А. Кругловой, В.В. Орловым, А.И. Плохих.

Образцы сталей типа 06Г2ФБ, 07Г2НМДБТ и 10ХН2МД, подвергнутых термической и термомеханической обработке по различным схемам, в том числе закалке в установке контролируемого охлаждения, и результаты их механических испытаний предоставлены ФГУП ЦНИИ КМ «Прометей», г. Санкт-Петербург.

Многослойные композиционные материалы, полученные методом горячей пакетной прокатки, и результаты их механических испытаний предоставлены МГТУ имени Н.Э. Баумана.

Соответствие Паспорту специальности. Содержание диссертации соответствует пункту 2 «Теоретические и экспериментальные исследования фазовых и структурных

превращений в металлах и сплавах, происходящих при различных внешних воздействиях» и пункту 3 «Теоретические и экспериментальные исследования влияния структуры (типа, количества и характера распределения дефектов кристаллического строения) на физические, химические, механические, технологические и эксплуатационные свойства металлов и сплавов» паспорта специальности 05.16.01 – металловедение и термическая обработка металлов и сплавов.

Связь работы с научными программами, темами. Работа выполнялась в рамках государственного задания по теме «Структура» (№ гос. рег. 01201463331), при поддержке грантов ОФИ УрО РАН №11-2-08 ЧТЗ и № 12-2-020 ЧТЗ, РФФИ-Урал № 10-02-96010-р_урал_а, РФФИ №14-03-31455_мол_а, Проектов УрО РАН № 12-2-2-001 Арктика, Президиума РАН № 12-2-1030, хоз. договоров № 20/10, № 20/11 с ОАО «ЧТПЗ», № 49/12 с ФГУП ЦНИИ КМ «Прометей».

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения и списка литературы. Работа изложена на 168 страницах, содержит 11 таблиц и 66 рисунков. Список литературы включает 195 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы ее цели и задачи, приведены основные положения, выносимые на защиту, показана научная новизна и практическая значимость полученных результатов.

В первой главе представлен краткий обзор экспериментальных и теоретических исследований о закономерностях фазовых и структурных превращений, протекающих в низкоуглеродистых высокопрочных сталях. Рассмотрены основные закономерности влияния температурно-деформационных параметров обработки на превращения переохлажденного аустенита; подробно описан процесс эволюции структуры при термомеханической обработке; рассмотрены существующие классификации структурных составляющих и проанализированы основные принципы формирования структуры современных низкоуглеродистых высокопрочных сталей. Кратко изложены области применения, способы получения, особенности структурного состояния и разрушения многослойных стальных композитов. На основании проведенного анализа литературных данных сформулированы цель и задачи исследования.

Во второй главе описаны материалы исследования, технологические схемы их обработки и получения, методы механических испытаний и структурных исследований.

Материалами для исследования послужили низкоуглеродистые стали типа 07Г2НМДБТ, 06Г2ФБ и 10ХН2МД, а также многослойные материалы на основе композиций сталей (У8+08Х18Н10) и (08Х18+08Х18Н10). Исследуемые стали подвергали термической и термомеханической обработке по различным технологическим схемам в лабораторных и промышленных условиях. Многослойные композиты были получены методом горячей пакетной прокатки (АРВ).

Исследуемые материалы были подвергнуты механическим испытаниям на одноосное растяжение, ударный изгиб и испытаниям падающим грузом согласно соответствующим ГОСТам.

Металлографические исследования проводили на микроскопе Neophot-30, оснащенном анализатором изображений SIAMS 600. Электронно-микроскопические исследования тонкой структуры осуществляли на микроскопе JEM-200СХ методом тонких фольг на просвет. Морфологические особенности структуры материалов и поверхность их разрушения после механических испытаний изучали на сканирующем микроскопе QUANTA 200. Основным режимом при выполнении фрактографических исследований являлся режим, основанный на использовании вторичных электронов, а для исследования морфологических особенностей структуры и построения карт распределения фаз – режим обратно рассеянных электронов (ЕBSD).

В третьей главе представлены результаты исследований закономерностей формирования структуры и свойств низкоуглеродистых высокопрочных сталей.

Анализ результатов механических испытаний стали типа 07Г2НМДБТ, подвергнутой термомеханической обработке по различным схемам (рисунок 1), показал, что наиболее высокие значения прочности, пластичности и ударной вязкости достигаются в результате двухстадийной термомеханической обработки (ТМО). Использование технологии закалки с прокатного нагрева (ЗПН), как с дополнительным отпуском, так и без него не позволяет получить высокие значения механических свойств (таблица 1).

Для установления структурных факторов, определяющих уровень прочностных и вязкопластических характеристик данной стали, были проведены детальные исследования ее структурного состояния. Полученные результаты позволили установить, что достижение высокого комплекса механических свойств в результате двухстадийной термомеханической обработки обусловлено

формированием структуры бейнита с развитым субзерненным строением.

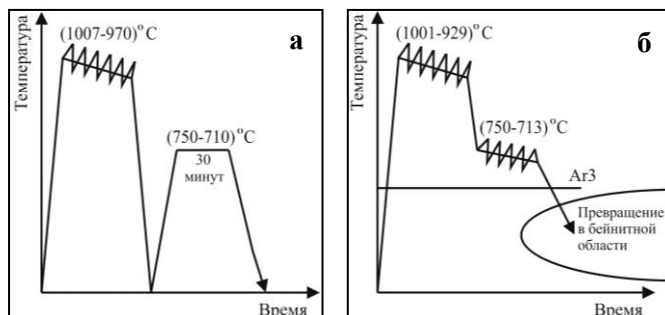


Рисунок 1. Схемы термомеханической обработки: а – закалка с прокатного нагрева с последующим отпуском; б – двухстадийная термомеханическая обработка.

Таблица 1. Механические свойства стали типа 07Г2НМДБТ, обработанной по различным схемам упрочнения

Режим	$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_{B} , МПа	δ , %	$\sigma_{0,2} / \sigma_{B}$	KCV ⁻⁴⁰ , МДж/м ²	ИПГ ^{-20°С} , %
Требования	≥ 625	695-915	≥ 18	$\leq 0,93$	$\geq 1,40$	≥ 90
ЗПН	885	970	13	0,92		5; 5
	900	970	11	0,93		
ЗПН+отп. 710°С, 30 мин	630	830	16	0,76	0,4; 0,35; 0,35	5; 5
	660	820	17	0,8		
ЗПН+отп. 750°С, 30 мин	580	810	17	0,72	1,75; 1,90; 1,95	100
	615	790	18	0,72		
ТМО	790	840	18	0,94	2,30; 2,70; 2,80	100
	790	850	18	0,93		

Из литературных данных известно, что морфология конечной структуры стали (даже имеющей один и тот же химический состав), может значительно изменяться в зависимости от условий протекания $\gamma \rightarrow \alpha$ -превращения. К таким условиям можно отнести температурный интервал превращения, а также состояние исходного аустенитного

зерна. Для определения температурного интервала формирования бейнита с развитым субзерненным строением был проведен сравнительный анализ структуры стали типа 07Г2НМДБТ, полученной в результате изотермического $\gamma \rightarrow \alpha$ -превращения при температурах 600, 550, 500 и 450°C (рисунок 2). Данные температуры были выбраны в соответствии с термокинетической диаграммой, согласно которой образование бейнитной структуры в такой стали происходит именно в этом температурном интервале.

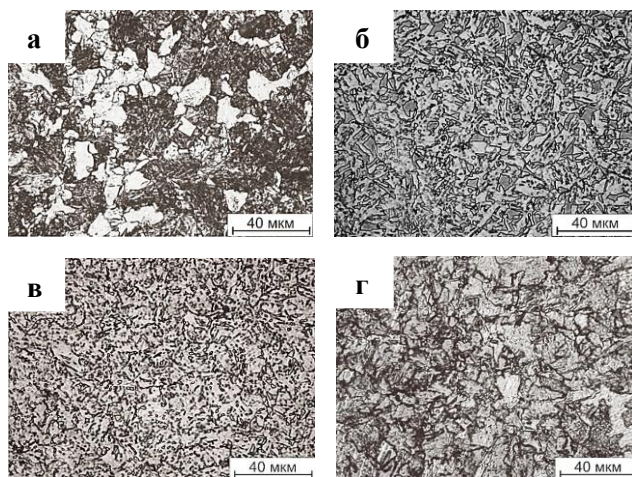


Рисунок 2. Микроструктура стали типа 07Г2НМДБТ, подвергнутой изотермическому распаду при различных температурах:
а - 600°C; б – 550°C; в – 500°C; г - 450°C.

Подробные исследования структур, полученных в результате распада аустенита при температурах 600°C и 450°C, показали, что ни в том, ни в другом случае бейнит с субзерненным строением не формируется. В случае распада при температуре 600°C основу структуры составляет феррит, также в структуре были обнаружены участки верхнего бейнита. Распад переохлажденного аустенита при температуре 450°C заканчивается формированием структуры, основу которой составляет бейнит с речным строением и бейнит, состоящий из крупных (1,0-1,5 мкм) кристаллов α -фазы и частиц цементита, расположенных по их границам.

Изотермическое превращение аустенита при температурах 550 и 500°С приводит к формированию структуры бейнита с развитым субзерненным строением. Методом просвечивающей электронной микроскопии было установлено, что бейнит такой морфологии состоит из мелких (0,3-0,5 мкм) разориентированных фрагментов α -фазы и мартенситно-аустенитной (МА) –составляющей (рисунок 3).

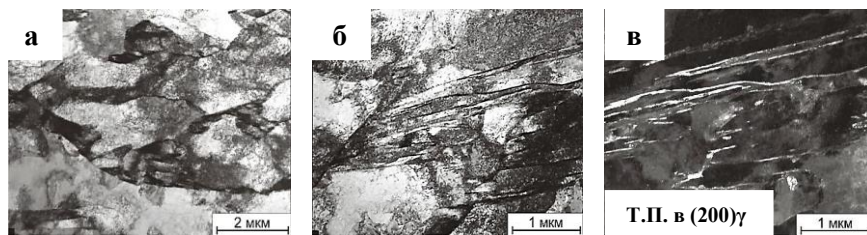


Рисунок 3. Микроструктура стали типа 07Г2НМДБТ, подвергнутой изотермическому распаду при температурах 550 °С и 500 °С:
а – фрагменты α -фазы; б, в – МА-составляющая.

Для определения влияния состояния исходного аустенитного зерна на конечную структуру сталь типа 06Г2ФБ подвергали обработкам в деформационном дилатометре с целью имитации термической и термомеханической обработок. В данном эксперименте $\gamma \rightarrow \alpha$ -превращение при охлаждении происходило в недеформированном и деформированном мелкозернистом (30-50 мкм), а также деформированном крупнозернистом (60-80 мкм) аустените. Металлографические исследования с проведением количественного анализа структурных составляющих показали, что наиболее полно бейнитное превращение протекает в случае распада деформированного аустенита с исходным крупным зерном (доля бейнита в структуре превышает 80%). Подробные исследования методом просвечивающей электронной микроскопии показали, что бейнит в этом случае представлен двумя морфологическими формами – с речным и субзерненным строением, при этом бейнит с субзерненным строением составляет основу структуры.

Деформация мелкозернистого аустенита приводит к увеличению объемной доли феррита (80%), а объемная доля бейнита не превышает 15%. Превращение недеформированного мелкозернистого аустенита заканчивается формированием структуры, состоящей из феррита (50%) и бейнита (50%). При этом бейнит в основном имеет речное строение, доля бейнита с субзерненным строением не превышает 5%.

Таким образом, деформация влияет не только на кинетику превращения, но и на морфологию формирующейся структуры и является обязательной для получения структуры бейнита с развитым субзерненным строением. Аналогичные закономерности были установлены и для стали типа 07Г2НМДБТ.

В четвертой главе приведены результаты исследования структуры и свойств трех плавок упрочненной низкоуглеродистой мартенситной стали типа 10ХН2МД с незначительно отличающимся содержанием легирующих элементов (для сталей 10ХН2МД-1 и 10ХН2МД-3 $\Sigma(\text{Cr}+\text{Ni}+\text{Cu}+\text{Mo})=3,5\%$); для стали 10ХН2МД-2 $\Sigma(\text{Cr}+\text{Ni}+\text{Cu}+\text{Mo})=3,0\%$). Результаты исследований показали, что установленные закономерности аналогичны для всех рассмотренных составов стали 10ХН2МД.

Листовой прокат из данной стали был получен в промышленных условиях по двум технологическим схемам (рисунок 4). Первая представляет собой деформацию в две стадии, закалку в установке контролируемого охлаждения и последующий отпуск (далее в тексте «УКО+отпуск»), вторая – полностью повторяет первую и дополнительно включает в себя повторную закалку с печного нагрева и последующий отпуск (далее в тексте «Повторная закалка+отпуск»).

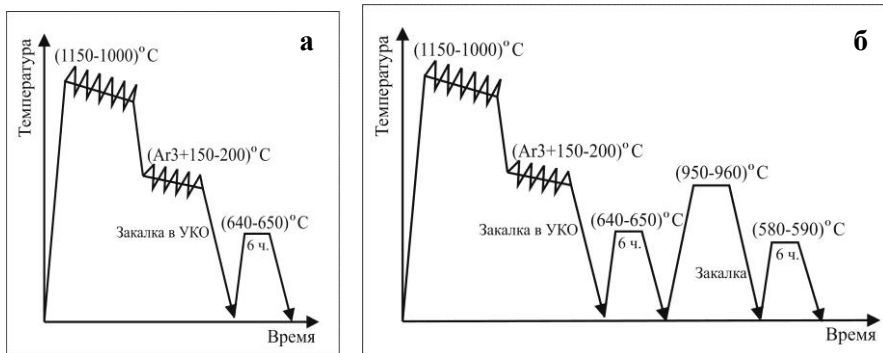


Рисунок 4. Схемы упрочняющей обработки для стали типа 10ХН2МД: а – УКО+отпуск; б – повторная закалка+отпуск.

Механические испытания показали, что прокат, полученный по схеме «УКО+отпуск», обладает повышенным комплексом механических свойств (временное сопротивление - 750 МПа, а температура хрупко-вязкого перехода $T_x = -75^\circ\text{C}$). Повторная закалка и отпуск не приводят к изменению механических свойств стали, полученных при испытании на растяжение, однако заметно

повышает температуру хрупко-вязкого перехода (T_x) и понижает значения ударной вязкости (таблица 2).

Для определения причин снижения показателей сопротивления хрупкому разрушению (повышение T_x) было проведено сравнение структуры стали, полученной по разным технологическим схемам.

Таблица 2. Механические свойства стали типа 10ХН2МД

σ_b , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ_5 , %	ψ , %	КСV ⁻⁶⁰ , МДж/м ²	T_x , °С
УКО + отпуск					
<u>1750</u> 750	<u>700</u> 710	<u>19</u> 20	<u>73</u> 73	<u>2,90</u> 2,80	-75
Повторная закалка+отпуск					
<u>730</u> 710	<u>640</u> 630	<u>21</u> 22	<u>73</u> 73	<u>2,20</u> 2,10	5

В результате обработки «УКО+отпуск» в стали 10ХН2МД сформировалась в основном структура реечного мартенсита (рисунок 5 а). Темнопольное изображение, полученное в рефлексе $(110)\alpha_m$, указывает, что соседние рейки имеют различную ориентацию, кроме того, каждая отдельная рейка поделена на фрагменты шириной 0,2-0,4 мкм (рисунок 5 б). На границах пакетов и реек при отпуске выделились карбидные частицы (Me_6C) размером от 50 до 200 нм (рисунок 5 в). Формирование при обработке «УКО+отпуск» дисперсной фрагментированной субмикроструктурной структуры обуславливает низкое значение температуры хрупко-вязкого перехода ($T_x = -75^\circ C$).

После повторной закалки и отпуска в этой же стали образовался бейнит, состоящий из широких α -кристаллов (0,6-1,0 мкм), на границах которых выделились крупные (размером более 400 нм) частицы карбидов, образующих скопления и даже сплошную сетку (рисунок 5 г). Кроме того, в структуре обнаружены участки феррита и вырожденного перлита, состоящего из прослоек α -фазы и пластин цементита (рисунок 5 д, е).

Таким образом, изменение структурного состояния, то есть формирование крупных кристаллов α -фазы, выделение по их

¹ В числителе указаны средние значения для верхней части слитка, в знаменателе средние значения для донной части слитка.

границам карбидов в виде сплошных цепочек и появление в структуре участков вырожденного перлита, привело к повышению температуры хрупко-вязкого перехода до 5°C. Такое изменение структуры обусловлено неполным растворением карбидов при нагреве под повторную закалку, изменением прокаливаемости стали и распадом аустенита в области диффузионного превращения.

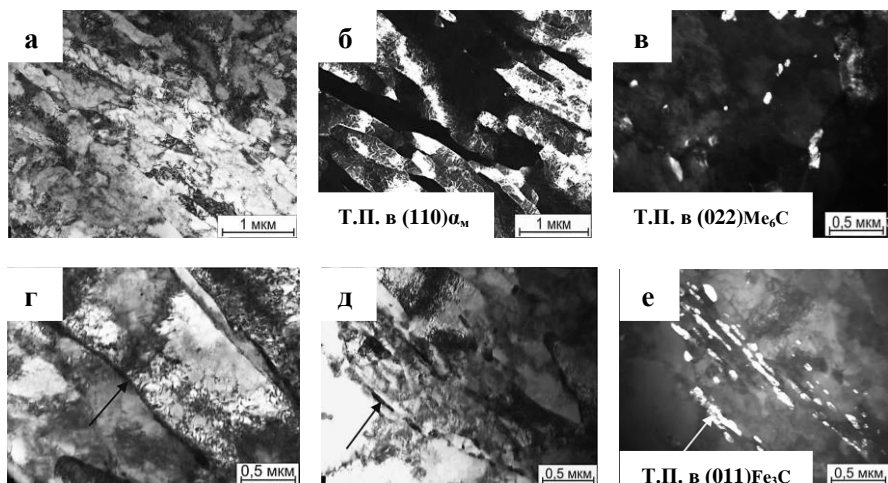


Рисунок 5. Микроструктура стали типа 10XN2MD, подвергнутой обработке по различным схемам: а, б, в – УКО+отпуск, г, д, е – повторная закалка+отпуск

Пятая глава посвящена исследованию закономерностей формирования структуры многослойных стальных композитов, полученных методом горячей пакетной прокатки заготовок (У8+08X18Н10) и (08X18+08X18Н10). Исследуемые композиты обладают уникальным комплексом механических свойств, характеризующимся необычным сочетанием высоких значений прочности и ударной вязкости (таблица 3).

Для определения факторов, обеспечивающих достижение такого комплекса свойств, было проведено подробное исследование структурного состояния полученных материалов.

На рисунке 6 представлена микроструктура многослойных композитов. Можно видеть, что горячая пакетная прокатка привела к формированию в них разнотолщинной ламинарной структуры, что обусловлено диффузионным перераспределением легирующих элементов (Cr и C для композиции (У8+08X18Н10) и Ni для

композиции (08X18+08X18H10)). Развитие процессов диффузии приводит к химической неоднородности аустенита, возникающего при температуре горячей пакетной прокатки, и, как следствие, к неоднородности формирующейся структуры.

Таблица 3. Механические свойства стальных композитов

Материал	E , ГПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_B , МПа	δ , %	ψ , %	НВ	KCV, МДж/м ²
У8+08X18H10, (1 цикл)	150	560	960	7	44	110	0,8
У8+08X18H10 (2 цикла)	180	880	1470	4	18	450	-
08X18+08X18H10 (1 цикл)	160	520	780	7	48	180	1,6
08X18+08X18H10 (2 цикла)	170	655	800	4	43	370	>2,8

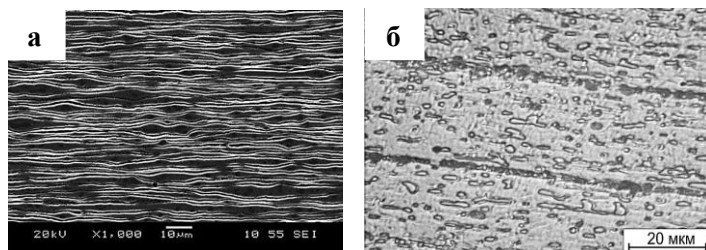


Рисунок 6. Микроструктура многослойных композитов: а – на основе (У8+08X18H10); б – на основе (08X18+08X18H10)

Так, исследование композита (У8+08X18H10) методом просвечивающей электронной микроскопии позволило обнаружить в структуре феррит и мартенсит различной морфологии (рисунок 7): пластинчатый с наличием микродвойников (характерный для высоколегированных высокоуглеродистых сталей) и речный (обычно образующийся в мало- и среднеуглеродистых сталях).

При электронно-микроскопическом исследовании композита (08X18+08X18H10) также было установлено, что структура, формирующаяся в результате горячей пакетной прокатки, отличается значительной неоднородностью. В слоях с повышенным содержанием

никеля образовался реечный мартенсит (ширина реек не превышает 0,2-0,3 мкм) с прослойками аустенита (рисунок 8 а, б). Количество аустенита, как видно по темнопольному изображению, снятому в рефлексе $(200)_{\gamma}$, в этих участках достигает 50%. Более сложная структура сформировалась в слоях с пониженным содержанием никеля.

Она представляет собой чередующиеся слои «серой матрицы» и «островки» (слои) ферритной фазы толщиной 1,5-2,0 мкм, которые вытянуты параллельно плоскости прокатки (рисунок 8 в). Каждый из «островков» состоит из нескольких ферритных зерен размером 0,5-1,5 мкм. «Серая матрица» является реечным мартенситом с типичной структурой, характерной для низкоуглеродистых сталей. Кроме того, в структуре были обнаружены участки бейнита, состоящие из разориентированных на угол $7-10^{\circ}$ фрагментов α -фазы размером 0,5-1 мкм.

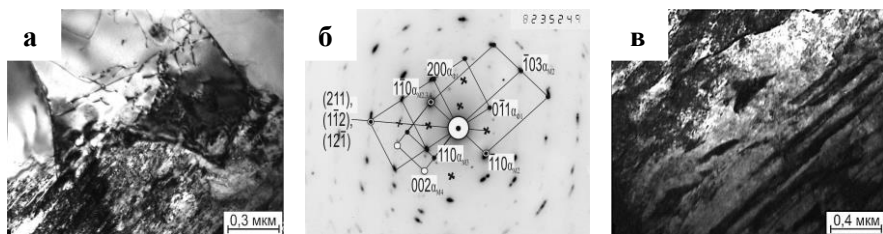


Рисунок 7. Микроструктура композита (У8+08Х18Н10): а – феррит, мартенсит с двойниками; б – электронограмма с участка «а» и схема ее расшифровки; в – реечный мартенсит.

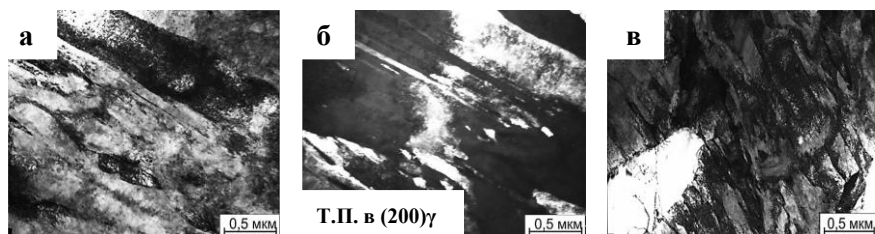


Рисунок 8. Микроструктура композита (08Х18+08Х18Н10): а – бейнит с субзерненным строением; б – остаточный аустенит; в – феррит и реечный мартенсит.

Таким образом, в результате горячей пакетной прокатки композитных заготовок на основе сталей различных структурных

групп синтезируется многослойный материал с ламинарной субмикроструктурной структурой. При этом важно отметить, что ламинарное строение стального композита является следствием протекания фазовых $\alpha \leftrightarrow \gamma$ -превращений в условиях ограниченной диффузии легирующих элементов.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. Анализ результатов структурных исследований и механических испытаний стали типа 07Г2НМДБТ, подвергнутой термомеханическому упрочнению по различным схемам, показал, что двухстадийная термомеханическая обработка по сравнению с закалкой с прокатного нагрева и отпуском обеспечивает повышение ударной вязкости при $T_{исп} = -40^\circ\text{C}$ в 6,5 раз (с 0,40 до 2,60 МДж/м²) при равном уровне прочности (840-850 МПа) вследствие формирования структуры бейнита, обладающего развитым субзерненным строением.

2. Установлено, что формирование бейнита с развитым субзерненным строением в изотермических условиях превращения переохлажденного аустенита стали типа 07Г2НМДБТ происходит при температурах (550-500)^oC. Показано, что увеличение объемной доли бейнита такой морфологии в структуре сталей типа 07Г2НМДБТ и 06Г2ФБ достигается в результате предварительной горячей деформации аустенита с исходным крупным зерном (60-80 мкм).

3. Выявлены структурные факторы, определяющие повышенный комплекс механических свойств стали типа 10ХН2МД, после закалки в установке контролируемого охлаждения и последующего отпуска. Установлено, что достижение высоких значений механических свойств (временное сопротивление $\sigma_B = 750$ МПа, предел текучести $\sigma_{0,2} = 700$ МПа, ударная вязкость $KCV^{-60} = 2,9$ МДж/м², $T_x = -100^\circ\text{C}$) обусловлено формированием мартенситно-бейнитной субмикроструктурной структуры.

4. Определены причины повышения температуры хрупко-вязкого перехода термомеханически упрочненной стали типа 10ХН2МД в результате проведения повторной закалки и отпуска. Показано, что такая термообработка приводит к развитию процессов распада аустенита при температурах, частично захватывающих перлитную область, а также изменению дисперсности и морфологии карбидной фазы.

5. Установлены закономерности развития фазовых и структурных превращений в процессе горячей пакетной прокатки многослойных композитов на основе сталей (У8+08Х18Н10) и (08Х18+08Х18Н10). Показано, что развитие фазовых превращений в условиях ограниченной диффузии легирующих элементов обеспечивает ламинарное субмикроструктурное строение синтезированных композитов, что позволяет получить уникальный комплекс механических свойств.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Основное содержание работы отражено в следующих публикациях:

Статьи в журналах, входящих в перечень ВАК:

1. Микроструктура и свойства низкоуглеродистой свариваемой стали после термомеханического упрочнения / В.М. Счастливцев, Т.И. Табатчикова, И.Л. Яковлева, С.Ю. Ключева², А.А. Круглова, Е.И. Хлусова, В.В. Орлов // Физика металлов и металловедение.- 2012.-Т. 113, № 5.-С. 507-516.

2. Влияние режимов термомеханической обработки на структуру и свойства низкоуглеродистой свариваемой стали / В.М. Счастливцев, Т.И. Табатчикова, И.Л. Яковлева, С.Ю. Ключева² // Деформация и разрушение материалов.-2012.-№ 4.-С. 33-39.

3. Влияние температуры распада аустенита на морфологию бейнита и свойства низкоуглеродистой стали после термомеханической обработки / В.М. Счастливцев, Т.И. Табатчикова, И.Л. Яковлева, С.Ю. Ключева², А.А. Круглова, Е.И. Хлусова, В.В. Орлов // Физика металлов и металловедение.- 2013.-Т. 114, № 5.- С. 457-467.

4. Структура и свойства многослойного материала на основе сталей, полученного методом горячей пакетной прокатки / Т.И. Табатчикова, А.И. Плохих, И.Л. Яковлева, С.Ю. Ключева² // Физика металлов и металловедение.- 2013.-Т. 114, № 7.- С. 633-646.

5. Исследование структуры многослойного материала на основе нержавеющей сталей, полученного методом горячей пакетной прокатки / С.Ю. Дельгадо Рейна, Т.И. Табатчикова, И.Л. Яковлева,

² Ключева – девичья фамилия С.Ю. Дельгадо Рейна.

А.И. Плохих // Вектор науки ТГУ.-2013.-№ 3(25).-С. 153-156.

6. Исследование многослойного материала на основе нержавеющей стали, полученного методом горячей пакетной прокатки / Т.И. Табатчикова, И.Л. Яковлева, А.И. Плохих, С.Ю. Дельгадо Рейна // Физика металлов и металловедение.- 2014.- Т. 115, № 4.-С. 431-441.

Сборники материалов конференций и тезисов докладов:

1. Влияние режимов термомеханической обработки на структуру и свойства низкоуглеродистой свариваемой стали / С.Ю. Ключева, В.М. Счастливцев, Т.И. Табатчикова, И.Л. Яковлева // Тезисы докладов между. конференции «Вторые московские чтения по проблемам прочности материалов». – 2011 (г. Черноголовка). – С. 150.

2. Влияние термомеханической обработки на структуру и хладостойкость трубной стали / И.Л. Яковлева, В.М. Счастливцев, Т.И. Табатчикова, С.Ю. Ключева // Тезисы докладов научно-технического семинара «Бернштейновские чтения по термомеханической обработке металлических материалов». - 2011 (г. Москва). – С. 7.

3. Влияние величины аустенитного зерна и деформации на формирование структуры стали класса прочности К60 / В.М. Счастливцев, Т.И. Табатчикова, И.Л. Яковлева, Л.Ю. Егорова, С.Ю. Ключева // Тезисы докладов всероссийской конференции «Молодежная школа-семинар по проблемам физики конденсированного состояния вещества СПФКС-12». - 2011 (г. Екатеринбург). – С. 110.

4. Ключева С.Ю. Влияние структуры и неметаллических включений на интеркристаллитное разрушение литой стали / С.Ю. Ключева, Т.И. Табатчикова, И.Л. Яковлева // Материалы международной конференции «XXI Уральская школа металловедов-термистов. Актуальные проблемы физического металловедения сталей и сплавов», 2012г. (г. Магнитогорск). – С. 61-62.

5. Влияние температуры распада аустенита на морфологию бейнита и свойства трубной стали класса прочности Х90 после термомеханической обработки / С.Ю. Ключева, В.М. Счастливцев, Т.И. Табатчикова, И.Л. Яковлева // Тезисы докладов всероссийской конференции «Молодежная школа-семинар по проблемам физики конденсированного состояния вещества СПФКС-13». - 2012г. (г. Екатеринбург). – С. 165.

6. Влияние морфологии бейнита на свойства свариваемой трубной стали после термомеханической обработки / В.М. Счастливцев, Т.И. Табатчикова, И.Л. Яковлева, С.Ю. Ключева, А.А. Круглова, Е.И. Хлусова, В.В. Орлов // Тезисы докладов международной конференции «Фазовые превращения и прочность кристаллов». – 2012 (г. Черноголовка). – С. 20.

7. Структура и свойства многослойного материала на основе сталей, полученного методом горячей пакетной прокатки / С.Ю. Дельгадо Рейна, Т.И. Табатчикова, И.Л. Яковлева, А.И. Плохих. // Сборник материалов The fifth international conference «Deformation&Fracture of materials and nanomaterials». – 2013 (г. Москва). - С. 186-188.

8. Структура современных трубных сталей / Т.И. Табатчикова, И.Л. Яковлева, В.М. Счастливцев, С.Ю. Дельгадо Рейна // Тезисы докладов 54 международная конференция «Актуальные проблемы прочности». – 2013 (г. Екатеринбург). - С. 7.

9. Структура и свойства многослойного материала на основе сталей, полученного методом горячей пакетной прокатки / С.Ю. Дельгадо Рейна, Т.И. Табатчикова, И.Л. Яковлева, А.И. Плохих // Тезисы докладов 54 международная конференция «Актуальные проблемы прочности». – 2013 (г. Екатеринбург). - С. 19-20.

10. Влияние температуры распада аустенита на структуру и свойства низкоуглеродистой низколегированной стали после термомеханической обработки / С.Ю. Дельгадо Рейна, Т.И. Табатчикова, И.Л. Яковлева, В.М. Счастливцев // Сборник материалов X Российской ежегодной конференции молодых научных сотрудников и аспирантов "Физико-химия и технология неорганических материалов". – 2013 (г. Москва). - С. 29-31.

11. Структура и свойства многослойного материала на основе нержавеющей сталей, полученного методом горячей пакетной прокатки / С.Ю. Дельгадо Рейна, Т.И. Табатчикова, И.Л. Яковлева, А.И. Плохих // Сборник материалов VI Международной школы с элементами научной школы для молодежи «Физическое материаловедение». - 2013 (г. Тольятти).- С. 81-82.

12. Структура и свойства МСМ на основе сталей 08X18H10 и 08X18, полученного методом аккумулирующей прокатки с соединением / С.Ю. Дельгадо Рейна, Т.И. Табатчикова, И.Л. Яковлева, А.И. Плохих // Тезисы докладов XIV Всероссийской школы-семинара

по проблемам физики конденсированного состояния вещества (СПФКС-14). - 2013 (г. Екатеринбург). - С. 141.

13. Дельгадо Рейна, С.Ю. / Структура и свойства низкоуглеродистой низколегированной стали после термомеханической обработки / С.Ю. Дельгадо Рейна // Сборник материалов X Российской ежегодной конференции молодых научных сотрудников и аспирантов "Физико-химия и технология неорганических материалов". – 2014 (г. Москва). - С. 44-45.

14. Сопротивление хрупкому разрушению низкоуглеродистой стали, подвергнутой термомеханической обработке / В.М. Счастливцев, Т.И. Табатчикова, И.Л. Яковлева, С.Ю. Дельгадо Рейна, С.А. Голосиенко, У.А. Пазилова, Е.И. Хлусова // Сборник тезисов докладов XIII международной конференции «Дислокационная структура и механические свойства металлов и сплавов – ДСМСМС - 2014» . – 2014 г. (Екатеринбург). – С. 120-121.