

На правах рукописи



ЕГОРОВА Лада Юрьевна

**ВЛИЯНИЕ СТРУКТУРНОГО СОСТОЯНИЯ ПЕРЛИТА НА
ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ И КОРРОЗИОННЫЕ СВОЙСТВА
ВЫСОКОУГЛЕРОДИСТЫХ СТАЛЕЙ**

**05.16.01-металловедение и термическая обработка металлов и
сплавов**

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

25 СЕН 2014

Екатеринбург - 2014



Работа выполнена в лаборатории физического металловедения Федерального государственного бюджетного учреждения науки Ордена Трудового Красного Знамени Института физики металлов Уральского отделения Российской академии наук

Научный руководитель: СЧАСТЛИВЦЕВ Вадим Михайлович, академик РАН, доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты: СИМОНОВ Юрий Николаевич, доктор технических наук, заведующий кафедрой «Металловедение и термическая обработка» механико-технологического факультета Пермского национального исследовательского политехнического университета, профессор

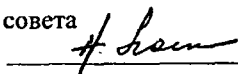
ОКИШЕВ Константин Юрьевич, доктор физико-математических наук, профессор кафедры «Физическое металловедение и физика твердого тела» физико-металлургического факультета ФГБОУ ВПО «Южно-уральский государственный университет» (национальный исследовательский университет)

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физико-технический институт Уральского отделения Российской академии наук, г. Ижевск

Защита состоится 28 ноября 2014 г. в 11.00 часов на заседании диссертационного совета Д 004.003.01 при Институте физики металлов УрО РАН по адресу: 620990, г. Екатеринбург, ул. С. Ковалевской, 18

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института физики металлов УрО РАН и на сайте www.imf.uran.ru.

Автореферат разослан 17.09. 2014 г.

Ученый секретарь диссертационного совета доктор физико-математических наук  Лошкарева Н.Н.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы.

Углеродистые стали со структурой перлита находят широкое применение в различных отраслях промышленности - машиностроении, строительстве, на железнодорожном транспорте, при производстве труб, в автомобилестроении. В работах М. Гензамера, С.С. Штейнберга, В.Д. Садовского, А.А. Попова, В.Н. Гриднева, В.М. Счастливецва, В.И. Изотова, А.А. Батаева и др. подробно исследованы закономерности фазовых и структурных превращений, происходящих в этих сталях при термической обработке, деформации и внешних воздействиях.

При этом необходимо отметить, что существующие представления о перлите как о наиболее стабильной и термически устойчивой структурной составляющей, по сравнению с мартенситом или бейнитом, являются неполными и устаревшими. Кроме того, существует несколько важных проблем, связанных с возможностью протекания структурных превращений в неравновесном тонкопластинчатом перлите, полученном при наименьших возможных температурах перлитного распада, которые так же требуют более детального исследования.

Представления о природе повышенной прочности неравновесного тонкопластинчатого перлита были существенно развиты в работах В.М. Счастливецва с соавторами¹. В них было выявлено, что дисперсный перлит высокоуглеродистых сталей, полученный при температурах распада вблизи нижней границы перлитного превращения, обладает повышенными уровнями прочности, твердости и износостойкости по сравнению с грубопластинчатым перлитом за счет возникающего при таких условиях твердорастворного упрочнения и значительной дефектности карбидной составляющей перлита. В работе² было показано, что в таком, находящемся в неравновесном состоянии, перлите межпластиночное расстояние не является определяющим параметром, влияющим на прочностные свойства углеродистых сталей. Т.е. в дисперсном перлите для прочностных характеристик не выполняются зависимости типа Холла-Петча, как это утверждалось до сих пор. Более

¹ Счастливецв, В.М. Перлит в углеродистых сталях / В.М. Счастливецв, Д.А. Мирзаев, И.Л. Яковлева, К.Ю. Окишев, Т.И. Табатчикова, Ю.В. Хлебникова. - Екатеринбург: УрО РАН, 2006. - 312 с.

² Макаров, А.В. Механические свойства и особенности разрушения при статическом растяжении высокоуглеродистой стали с перлитными структурами различного типа / А.В. Макаров, Р.А. Саврай, В.М. Счастливецв, Т.И. Табатчикова, Л.Ю. Егорова // ФММ. - 2007. - Т. 104. - № 5. - С. 542-555.

сложным образом зависят от межпластиночного расстояния вязкость и пластичность сталей со структурой тонкопластинчатого перлита, данные о таком влиянии на характер разрушения углеродистых сталей со структурой перлита противоречивы и требуют систематизации. Поэтому представляет значительный интерес проанализировать взаимосвязь механических свойств с особенностями структуры и характером разрушения стали с перлитными структурами, отличающимися дисперсностью, морфологией и степенью дефектности цементита, а также уровнями твердорастворного упрочнения и микроискажений решетки ферритной составляющей.

Рассматриваемое метастабильное состояние стали со структурой тонкопластинчатого перлита является термически неустойчивым и его повышенные физико-механические свойства устраняются уже кратковременным нагревом при 650-700 °С, при котором еще не происходят изменения морфологии цементитных и ферритных пластинок, образующих перлитные колонии. Нагрев изделий с такой структурой может происходить при проведении различных технологических операций и в процессе эксплуатации изделий. Следовательно, изучение влияния докритического отжига различной продолжительности на физико-механические свойства стали со структурой тонкопластинчатого перлита представляет как научный интерес, связанный с возможностью трансформации неравновесной перлитной структуры при нагреве, так и несомненную практическую значимость.

Выход из строя стальных изделий часто связан с различными видами усталостного разрушения, при анализе причин которого основное внимание, как правило, уделяют изменению дислокационной структуры металла^{3,4}. Однако при циклическом нагружении металлических сплавов могут протекать и другие структурные и фазовые превращения, которые сопровождаются изменением физико-механических характеристик. В изделиях из сталей со структурой перлита дополнительной движущей силой таких превращений может стать неравновесное состояние структуры тонкопластинчатого перлита. В связи с этим важно изучить происходящие при приложении циклических нагрузок

³ Изотов, В.И. Эволюция дислокационной структуры и образование микротрещин при усталости перлитно-ферритной стали / В.И. Изотов, В.А. Поздняков, Е.В. Лукьяненко, М.Е. Гетманова, Г.А. Филиппов // ФММ. – 2008. - Т. 105. - №5. - С. 549-559.

⁴ Соснин, О.В. Закономерности эволюции дислокационных субструктур в сталях при усталости / О.В. Соснин, А.В. Громова, Э.В. Козлов, Ю.Ф. Иванов, С.В. Коналов // Деформация и разрушение материалов. - 2005. - №2. - С. 14-19.

структурные изменения в перлите с различной дисперсностью и морфологией цементита, а также их влияние на характер разрушения при многоциклового усталости.

Кроме циклических нагрузок изделия из углеродистой стали со структурой перлита (различного вида трубопроводы, рельсы) часто подвергаются влиянию окружающей среды, что со временем приводит к коррозии таких изделий. Особо опасным видом является питтинговая коррозия, которая, возникая на небольших участках поверхности, быстро распространяется вглубь материала, что может привести к резкому снижению механических свойств стальных конструкций. Поэтому, изучая процессы, происходящие при различных воздействиях в сталях со структурой перлита разного типа, важно исследовать и коррозионное поведение таких сталей.

Особую научную и практическую значимость имеет задача повышения износостойкости сталей с перлитной структурой, эксплуатирующихся в условиях контактного нагружения. Ранее нами было показано^{5,6}, что повышенная износостойкость углеродистых сталей со структурой свежеполученного тонкопластинчатого перлита определяется как высокой исходной твердостью, так и значительной способностью к деформационному упрочнению при фрикционном нагружении, которое обусловлено не только дисперсным строением цементита и влиянием избыточного (по сравнению с равновесным) содержанием углерода в ферритной составляющей тонкопластинчатого перлита, но и, вероятно, более интенсивной диссоциацией дефектного цементита при пластической деформации трением. Но вопрос влияния легирующих элементов на процессы, происходящие при трении и изнашивании сталей со структурой тонкопластинчатого перлита, а также на возможности повышения износостойкости таких сталей, мало изучен и требует детального анализа.

Целью настоящей работы является выявление структурных факторов, способствующих повышению физико-механических и кор-

⁵ Счастливец, В.М. Влияние твердорастворного упрочнения феррита и сфероидизации цементита на износостойкость эвтектоидной углеродистой стали со структурой тонкопластинчатого перлита / В.М. Счастливец, Т.И. Табатчикова, А.В. Макаров, Л.Ю. Егорова, И.Л. Яковлева // ФММ. - 1999. - Т. 88, № 1. - С. 94-103.

⁶ Макаров, А.В Износостойкость заэвтектоидных углеродистых сталей со структурами изотермического распада аустенита / А.В. Макаров, В.М. Счастливец, Т.И. Табатчикова, И.Л. Яковлева, Ю.В. Хлебникова, Л.Ю. Егорова // ФММ. - 2004. - Т. 97, № 5. - С. 94-105.

розионных свойств высокоуглеродистых сталей со структурой тонкопластинчатого перлита, образующегося при неравновесных условиях.

Для достижения цели в работе поставлены следующие задачи:

1. Провести сравнительный анализ особенностей разрушения при испытаниях на статическое растяжение и механических свойств высокоуглеродистой стали У10 с перлитными структурами различного типа.

2. Исследовать структурные превращения и процессы, происходящие при циклическом растяжении в области многоциклового усталости стали У10 со структурой тонкопластинчатого, грубопластинчатого и частично сфероидизированного перлита.

3. Определить влияние особенностей структуры перлита заэвтектоидной стали У10 на питтинговую коррозию.

4. Изучить влияние дополнительного легирования кремнием (1,66 мас. %) и хромом (1,42 мас. %) на структуру, твердость и износостойкость высокоуглеродистых сталей.

Научная новизна работы:

1. Показано, что увеличение дисперсности пластинчатого перлита углеродистой стали У10, приводящее, за счет сверхравновесного содержания углерода и микроискажений в ферритной матрице, дефектности цементита, к росту прочности и снижению равномерного удлинения стали, не приводит к изменению таких характеристик пластичности, как поперечное сужение и сосредоточенная деформация при растяжении.

2. Установлено, что в стали У10 со структурой тонкопластинчатого перлита, подвергнутого кратковременному отжигу при 650°C, при циклическом растяжении в условиях многоциклового усталости происходит сфероидизация дисперсных цементитных пластин.

3. Выявлено, что неравновесная структура тонкопластинчатого перлита, полученная в результате изотермического распада при температуре 500 °С, обладает наилучшими показателями стойкости к питтинговой коррозии из исследованных структурных состояний в заэвтектоидной стали У10.

4. Показано, что легирование кремнием и хромом эффективно повышает абразивную износостойкость эвтектоидной стали со структурой тонкопластинчатого перлита. При этом легирование кремнием значительно снижает трибологические свойства верхнего бейнита, вследствие охрупчивающего влияния кремния на бейнитные кристаллы эвтектоидной стали, а легирование хромом не оказывает заметного влия-

ния на износостойкость данной структуры. Выявлено отрицательное влияние фрикционного окисления на сопротивление адгезионному изнашиванию кремнистой стали со структурами различного типа. Показано, что в легированной хромом углеродистой стали температурный интервал, соответствующий максимальной твердости, не совпадает с температурным интервалом максимальной износостойкости.

Теоретическая и практическая значимость работы:

Данная работа развивает структурные и физические представления о явлениях, сопровождающих фрикционное, статическое и циклическое нагружение высокоуглеродистых сталей со структурой перлита и неравновесного дисперсного перлита, в частности.

Предложен эффективный способ повышения циклической прочности углеродистой стали со структурой тонкопластинчатого перлита путем ее кратковременного докритического отжига (ниже температуры A_1), обеспечивающего сохранение тонкопластинчатого строения перлита и возможность его сфероидизации в процессе дальнейшего циклического нагружения.

Установлено подобие структурных изменений тонкопластинчатого перлита в лабораторных образцах при циклическом растяжении и в железнодорожном колесе в условиях эксплуатации. Это свидетельствует о целесообразности использования комплексного анализа, включающего взаимосвязь изменений морфологии цементита при многоциклового усталости с характером разрушения и величиной циклической прочности, для решения задач совершенствования технологий термической обработки и повышения эксплуатационной надежности изделий из перлитных сталей. По результатам исследования были даны рекомендации ОАО «РЖД» (Х/Д №47/05 «Поставка подсистемы диагностики цельнокатаного колеса для опытного образца системы диагностики колесной пары в сборе»).

Изученное в работе влияние докритического отжига различной продолжительности на механические свойства стали со структурой тонкопластинчатого перлита имеет практическую значимость для изделий, подвергаемых нагреву при проведении технологических операций (горячая оцинковка или латунирование проволоки, смягчающий отжиг, сварка, отпуск рельсов после объемной «закалки» и др.) и в процессе эксплуатации (фрикционный нагрев поверхностей канатов, железнодорожных рельсов и колес; нагрев канатов мостовых литейных кранов теплом от расплавленной ванны и др.).

Положения, выносимые на защиту:

1. Механические свойства и характер разрушения при статическом растяжении стали У10 с перлитными структурами взаимосвязаны и зависят от дисперсности, морфологии и дефектности цементита, а также от степени твердорастворного упрочнения и микроискажений решетки ферритной составляющей перлита.

2. Структурные изменения, происходящие в процессе накопления деформации при циклическом нагружении, оказывают влияние на характер разрушения и усталостную прочность высокоуглеродистой стали У10 со структурами грубопластинчатого перлита, свежеобразованного и отожженного тонкопластинчатого перлита.

3. Неравновесное состояние тонкопластинчатого перлита, полученного при минимальной температуре перлитного распада, повышает устойчивость к питтинговой коррозии углеродистой стали У10.

4. Дополнительное легирование кремнием и хромом эвтектоидных и заэвтектоидных сталей со структурами, полученными при изотермическом распаде аустенита при температурах 330-650 °С, приводит к структурным изменениям и оказывает влияние на твердость и износостойкость.

Достоверность полученных результатов обеспечена использованием проверенных и апробированных методов испытаний материалов, в соответствии с ГОСТ 9013-59, ГОСТ 9.912-89; применением математических способов обработки экспериментальных данных и определения погрешностей измерений, а также использованием современных методов структурного анализа (рентгеновского, металлографического, электронно-микроскопического). Результаты исследований, приведенные в настоящей работе, хорошо согласуются с полученными ранее другими исследователями расчетными данными и экспериментальными результатами.

Личный вклад

Вошедшие в диссертацию результаты получены Егоровой Л.Ю. под научным руководством академика Счастливецова В.М.. Выбор методик механических испытаний выполнен под руководством д.т.н. Макарова А.В., под руководством д.т.н. Табатчиковой Т.И. проведена оптимизация режимов термической обработки сталей для механических, коррозионных, трибологических испытаний. Автор принимал непосредственное участие в выполнении металлографических исследований, структурных исследований методами просвечивающей электронной микроскопии в Центре коллективного пользования ИФМ УрО РАН. Испытания механических свойств, структурные и фрактографи-

ческие исследования с использованием сканирующей электронной микроскопии проведены в ИМАШ УрО РАН совместно с к.т.н. Р.А. Савраем. Трибологические испытания выполнены в ИМАШ УрО РАН совместно с к.т.н. А.Л. Осинцевой.

Автор участвовал в постановке задач, в обработке и обсуждении полученных результатов, формулировке выводов диссертационной работы; написании статей и тезисов докладов совместно с соавторами публикаций Счастливым В.М., Макаровым А.В., Табатчиковой Т.И., Савраем Р.А., Яковлевой И.Л., Березовской В.В.

Испытания на питтинговую коррозию проведены В.В. Березовской в УрФУ имени первого Президента России Б.Н. Ельцина.

Апробация работы.

Основные результаты, изложенные в диссертационной работе, докладывались и обсуждались на следующих конференциях:

XIV Уральская школа металловедов-термистов "Фундаментальные проблемы физического металловедения перспективных материалов", Ижевск, 1998; VIII Международный семинар "Структура дислокаций и механические свойства металлов и сплавов", Екатеринбург, 1999; III Международный семинар "Современные проблемы прочности", Новгород-Старая Русса, 1999; Бернштейновские чтения по термомеханической обработке металлических материалов, Москва, 1999; II Международная школа «Физическое материаловедение» и XVIII Уральской школы металловедов-термистов «Актуальные проблемы физического металловедения сталей и сплавов», Тольятти, 2006; IV Российская научно-техническая конференция «Физические свойства металлов и сплавов», Екатеринбург, 2007; XIX Уральская школа металловедов-термистов «Актуальные проблемы физического металловедения сталей и сплавов», Екатеринбург, 2008; XLVII Международная конференция «Актуальные проблемы прочности», Нижний Новгород, 2008; XVII Международная конференция «Физика прочности и пластичности материалов», Самара, 2009; IV Российская научно-техническая конференция «Ресурс и диагностика материалов и конструкций», 2009, Екатеринбург; XXI Уральская школа металловедов-термистов «Актуальные проблемы физического металловедения сталей и сплавов», Магнитогорск, 2012; 54 Международная конференция «Актуальные проблемы прочности», Екатеринбург, 2013; XXII Уральская школа металловедов-термистов «Актуальные проблемы физического металловедения сталей и сплавов», Орск, 2014

Работа выполнялась при поддержке РФФИ (гранты №04-03-96140-р2004урал_a, №10-02-96010-р_урал_a); Президиума УрО РАН (№09-

М-12_2002, №12-У-21022, №12-2-2-001 АРКТИКА); грантов НШ-5965.2006.3, НШ-643.2008.3; Фонда ОАО "ММК", ИТЦ "Аусферр" и ФНиО "Интелс" (гранты №37-06-02, №60-08-02); хоз. договоров №47/05 с ОАО «РЖД», №59/06 с ОАО "Выксунский металлургический завод"

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.

Публикации

Основное содержание диссертации отражено в 15 печатных работах, включающих 5 статей в российских журналах, входящих в перечень ВАК (2 статьи в журналах системы цитирования WoS), 10 статей в сборниках научных трудов.

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, 6 глав, заключения и списка литературы, включающего 208 наименований. Объем диссертации – 129 страниц, 6 таблиц и 25 рисунков.

КРАТКОЕ 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 работ, посвященных проблеме влияния структурных параметров углеродистой стали на механические и химические свойства. В частности представлены работы по исследованию неравновесного состояния тонкопластинчатого перлита. Дан обзор работ, посвященных влиянию дисперсности перлита на механические свойства сталей, поведению при деформации грубо- и тонкопластинчатого перлита углеродистых сталей, воздействию циклических нагрузок на структуру сталей со структурой перлита, а также взаимосвязи структурных параметров и стойкости к питтинговой коррозии углеродистых сталей. Рас-

смотрены работы, посвященные влиянию легирующих элементов на перлитное превращение и механические свойства стали.

В конце главы сформулированы задачи исследования.

Во *второй главе* описаны материалы исследования, режимы термообработки, методы механических испытаний и структурных исследований.

В качестве материалов исследования были выбраны высокоуглеродистые стали У8, У10, легированные стали 80С2, ШХ15 и 65Г.

Исследуемые стали подвергались термообработке по различным режимам.

Механические испытания проводили на сервогидравлической испытательной установке Instron 8801. Испытания на питтинговую коррозию проводили с использованием электрохимической лаборатории VoltaLab 10-PGZ100. Испытания на износостойкость сталей проводили при абразивном воздействии (скольжение по закрепленному абразиву) и в условиях трения скольжения по стальной пластине на воздухе и в среде аргона.

Измерения микротвердости проводили на приборе ПМТ-3М при нагрузке 0,49 Н. Твердость стали по Роквеллу (HRC_3) определяли на приборе ТК-2М в соответствии с ГОСТ 9013-59.

Металлографические исследования проводили на микроскопе Neophot-2. Электронно-микроскопические исследования тонкой структуры стали осуществляли на микроскопе JEM-200CX методом тонких фольг на просвет. Структуру сталей и поверхности разрушения после механических испытаний изучали на электронном сканирующем микроскопе Tesla BS-350 и на Tescan Vega II XMU. Рентгенографическое исследование структуры образцов после усталостных испытаний проводили на дифрактометре Shimadzu XRD-7000. Поверхности образцов после коррозионных испытаний изучали на электронном сканирующем микроскопе Tescan Vega II XMU и оптическом профилометре Wyko NT-1100.

Третья глава посвящена исследованию взаимосвязи механических свойств с особенностями структуры и характером разрушения стали с перлитными структурами, отличающимися дисперсностью, морфологией и дефектностью цементита, а также уровнями твердорастворного упрочнения и микронскажений решетки ферритной составляющей.

Проведен сравнительный анализ прочностных и пластических характеристик заэвтектоидной стали У10 с перлитными структурами различного типа, сформированными в процессе изотермического распада

при температурах 500 и 650 °С. Образцы тонкопластинчатого перлита, полученного при превращении при 500 °С затем дополнительно отжи-гали при температуре 650 °С в течение 10 и 300 мин. Выполнены фрактографические исследования поверхностей разрушения стали У10 в различных структурных состояниях после испытаний на растяжение.

Фрактографический анализ полученных изломов показал, что ха-рактер разрушения при испытаниях на растяжение стали У10 со структурой грубо- и тонкопластинчатого перлита качественно подобен (ри-сунк 1). В центральной части образца (зона зарождения и медленного распространения трещины) наблюдается разрушение смешанного типа, в котором сочетаются внутризеренный скол со слиянием микропор (рисунок 1.а, в). В периферийной зоне (зона ускоренного развития трещины) также наблюдается смешанное разрушение, сочетающее от-рыв со слиянием микропор (рисунок 1.б, г).

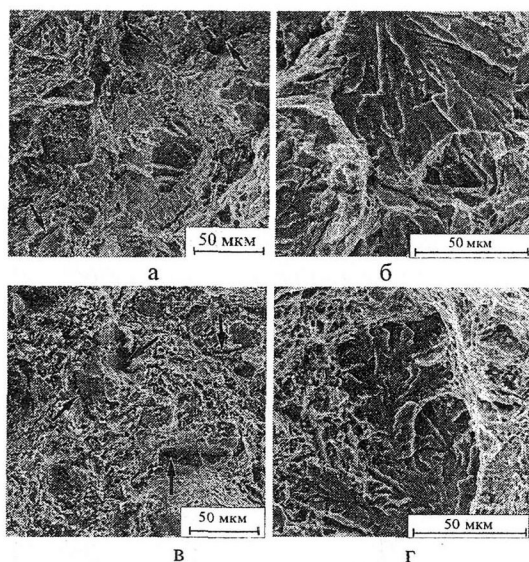


Рисунок 1 - Электронные микрофотографии изломов образцов стали У10 со структурой:

а, б - грубопластинчатого перлита (а - центральная зона; б - периферийная зона);
в, г - тонкопластинчатого перлита (в - центральная зона; г - периферийная зона)

Сопоставление механических свойств грубопластинчатого и тонкопластинчатого перлита (см. таблицу 1) выявило, что величины сосредоточенной деформации и поперечного сужения для тонко- и грубопластинчатого перлита имеют близкие значения. Так как эти величи-

ны определяются после формирования шейки, то зависеть они будут от особенностей распространения трещины в зоне долома. При фратографическом исследовании (рисунок 1) было установлено, что размер фасеток отрыва в этой зоне сопоставим с размером исходного аустенитного зерна, имеющего одинаковую величину для грубо- и тонкопластинчатого перлита, так как аустенитизация проходила в одинаковых условиях. Вероятно, это происходит вследствие того, что границы аустенитного зерна эффективно тормозят распространение трещины в зоне долома.

Таблица 1 - Влияние температуры изотермического распада и последующего кратковременного отжига на прочностные и пластические характеристики стали У10 (твердость HRC₃, условный предел текучести $\sigma_{0,2}$, временное сопротивление разрыву σ_B , напряжение разрушения σ_K , общее удлинение δ_K , равномерное удлинение δ_p , сосредоточенная деформация (деформация после образования шейки) $\delta_{\text{соср}}$, поперечное сужение ψ_K)

Термическая обработка	HRC ₃	$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_B , МПа	σ_K , МПа	δ_K , %	δ_p , %	$\delta_{\text{соср}}$, %	ψ_K , %
1050 °С → 650 °С, 15 мин	29,5	560-570	1030	970-980	11,2-13,5	8,5-9,2	2,7-4,3	26,3
1050 °С → 500 °С, 5 мин	41,0	990-1000	1390	1240-1260	9,8-9,9	6,1-6,3	3,7-3,6	25,0
1050 °С → 500 °С, 5 мин + 650 °С, 10 мин	34,0	760-770	1050-1060	890-910	13,1-13,8	7,6-7,7	5,5-6,1	40,2
1050 °С → 500 °С, 5 мин + 650 °С, 300 мин	27,5	640-660	900-910	730-750	16,5-18,2	8,4-9,2	8,1-9,0	47,0

Фратографический анализ изломов образцов исследуемой стали, подвергнутых кратковременному отжигу, после которого значительно понижаются прочностные и резко увеличиваются пластические свойства, показал, что в центральной зоне излома (рисунок 2.а) существенно возрастает доля вязкой (ямочной) составляющей, а в периферийной зоне значительно уменьшается размер фасеток хрупкого разрушения (рисунок 2.б), которое происходит преимущественно в пределах одной-двух колоний тонкопластинчатого перлита. Таким образом, в отожженном перлите границы перлитных колоний начинают эффективно препятствовать развитию трещины в периферийной зоне, вероятно, вследствие релаксации внутренних микронапряжений в ферритной составляющей тонкопластинчатого перлита. Это приводит к резкому увеличению сосредоточенной деформации и поперечного сужения отожженного образца (см. таблицу 1).

Увеличение длительности отжига при 650 °С до 300 минут, приво-

дящее к частичной сфероидизации карбидной фазы, а также к полигонизации и рекристаллизации в ферритной составляющей тонкопластинчатого перлита, приводит к более плавному увеличению пластичности и снижению прочности стали У10 (таблица 1).

Фрактографические исследования показали, что в зоне ускоренного развития трещины (в периферийной зоне) изломы образца (рисунок 2.г), подвергнутого длительному отжигу, характеризуются резким увеличением доли вязкого разрушения и уменьшением размеров фасеток хрупкого разрушения по сравнению с образцами, имеющими структуру пластинчатого перлита (рисунок 1.г). Вследствие этого величина сосредоточенной деформации сравнивается с величиной равномерного удлинения при растяжении.

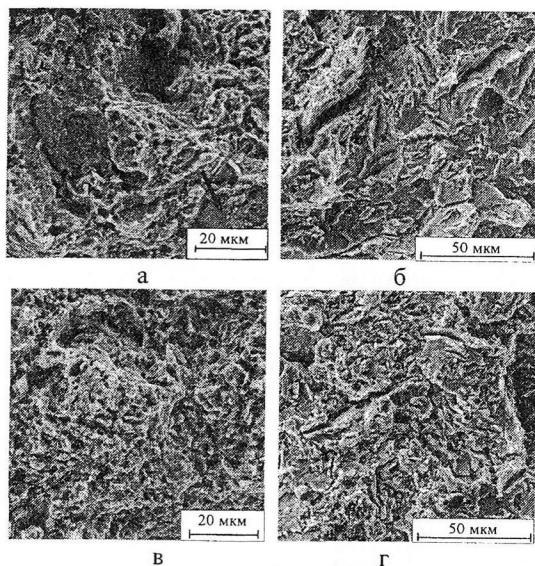


Рисунок 2 - Электронные микрофотографии изломов образцов стали У10 со структурой тонкопластинчатого перлита после отжига:
а, б – после кратковременного отжига (а - центральная; б – периферийная зона);
в, г – после длительного отжига (в - центральная; г – периферийная зона)

В *четвертой главе* выявлены закономерности разрушения высокоуглеродистой стали со структурами грубопластинчатого, а также свежееобразованного и отожженного тонкопластинчатого перлита, под влиянием циклических нагрузок.

Методами сканирующей и просвечивающей электронной микроскопии изучена эволюция структуры в рабочей части образцов на рас-

стоянии 10 мм от усталостного излома при нагружении в области многоциклового усталости. Это позволило исследовать микроструктуру стали У10, сформировавшуюся до момента локализации развития усталостных трещин (когда растет преимущественно одна трещина).

Впервые показано, что в стали У10 со структурой тонкопластинчатого перлита, подвергнутого кратковременному отжигу при 650 °С, при циклическом растяжении в условиях многоциклового усталости происходит сфероидизация дисперсных цементитных пластин (рисунок 3.в-г), которая может быть обусловлена совместным действием упругих растягивающих напряжений, микропластической деформации и эффектов локального нагрева, ускоряющих диффузию атомов железа и углерода, при этом долговечность такой структуры значительно возрастает (таблица 2).

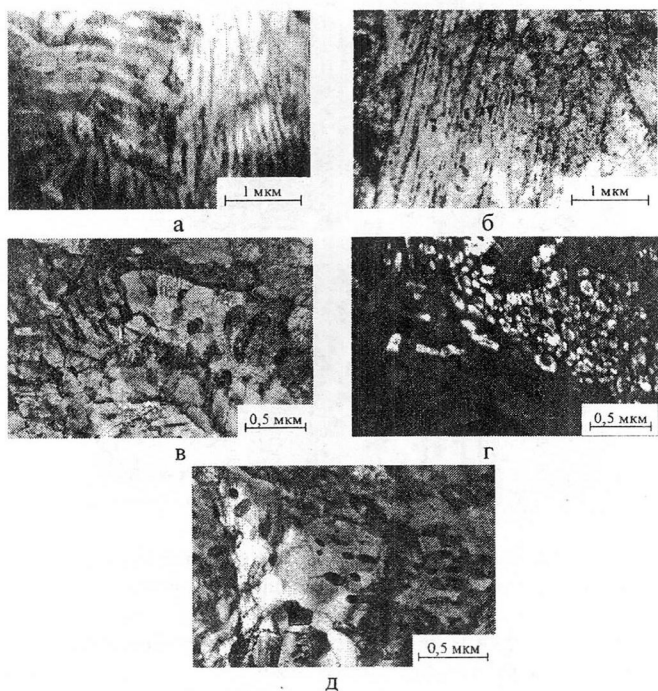


Рисунок 3 - Электронные микрофотографии тонкой структуры после циклического нагружения стали У10 с исходной структурой:

а - грубопластинчатого перлита; б - тонкопластинчатого перлита; в, г - тонкопластинчатого перлита после кратковременного отжига; д - частично сфероидизированного перлита; е - темнопольное изображение в рефлексе цементита

Таблица 2 - Предел текучести $\sigma_{0,2}$, величина напряжения в цикле $\Delta\sigma$, долговечность N стали У10 с различным типом перлитной структуры

Термическая обработка	Тип структуры	$\sigma_{0,2}$, МПа	$\Delta\sigma$, МПа	N
1050 °С → 650 °С, 15 мин	грубопластинчатый	565	396	400 тыс.
1050 °С → 500 °С, 5 мин	тонкопластинчатый	995	697	43 тыс.
1050 °С → 500 °С, 5 мин + 650 °С, 10 мин	отожженный тонкопластинчатый перлит	765	536	700 тыс.
1050 °С → 500 °С, 5 мин + 650 °С, 300 мин	частично сфероидизированный перлит	650	455	780 тыс.

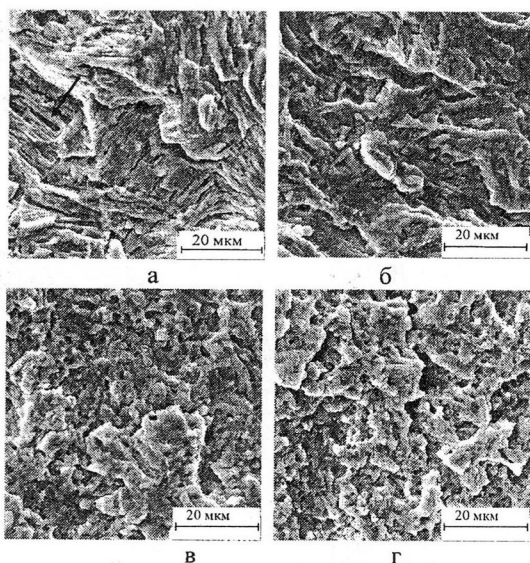


Рисунок 4 - Электронные микрофотографии изломов в зоне стабильного роста трещины после усталостного разрушения образцов стали У10 с исходной структурой:

а – грубопластинчатого перлита; б – тонкопластинчатого перлита; в – тонкопластинчатого перлита после кратковременного отжига; г – частично сфероидизированного перлита

Предлагаемая обработка может стать эффективным способом повышения циклической прочности стали со структурой тонкопластинчатого перлита, обеспечивающим сохранение тонкопластинчатого строе-

ния перлита и возможность его сфероидизации в процессе дальнейшего циклического нагружения.

На основе фрактографического анализа показано, что усталостный излом образца со структурой кратковременно (10 мин) отожженного перлита (см. рисунок 4.в) подобен излому отожженной в течение 300 мин стали (см. рисунок 4.г), в которой в результате длительного циклического нагружения практически завершается процесс сфероидизации цементита (рисунок 3.д). В обоих случаях изломы содержат многочисленные характерные поры, связанные, очевидно, с преобладанием сфероидизированных цементитных частиц в структурах, сформированных в отожженных образцах при усталостном растяжении до развития главной трещины. Подобные многочисленные поры не наблюдаются на поверхностях усталостного разрушения образцов с исходными структурами грубопластинчатого и неотожженного тонкопластинчатого перлита (рисунки 3.а-б, 4.а-б), в которых после испытаний сохраняется преимущественно пластинчатая морфология.

Приведенные результаты показывают, что характер усталостных изломов определяется не только исходной перлитной структурой, но и структурой, сформированной в стали в процессе усталостного нагружения. В тоже время, по виду усталостного излома можно судить об изменениях перлитной структуры при циклическом воздействии. Следовательно, при изучении усталости перлитных сталей может быть эффективно использован комплексный анализ, включающий взаимосвязь изменений морфологии цементита при многоциклового усталости с характером разрушения и величиной циклической прочности.

В работе проведен сравнительный анализ структурных изменений, протекающих в стали У10 при циклическом растяжении и в железнодорожном колесе из стали 65Г производства ОАО "Выксунский металлургический завод", разрушенном при эксплуатации. Исследование структуры фрагмента обода железнодорожного колеса после усталостного разрушения проводили на расстоянии 10-15 мм от поверхности катания.

Выявлено подобие структурных изменений тонкопластинчатого перлита в лабораторных образцах при отнулевом знакопостоянном циклическом растяжении и в железнодорожных колесах в условиях эксплуатации. Это свидетельствует о целесообразности использования предложенного выше комплексного анализа, для решения задач совершенствования технологий термической обработки и повышения эксплуатационной надежности изделий из перлитных сталей.

По результатам исследования были даны рекомендации ОАО «РЖД» (Х/Д №47/05 «Поставка подсистемы диагностики цельнокатаного колеса для опытного образца системы диагностики колесной пары в сборе»).

В *пятой главе* изучена стойкость к питтинговой коррозии заэвтектоидной стали У10 со структурой грубо- и тонкопластинчатого перлита, полученной в процессе изотермического распада при температурах 650 и 500 °С соответственно, а также при дополнительном отжиге тонкопластинчатого перлита при температуре 650 °С в течение 10 и 300 мин.

В результате поляризационных испытаний на питтинговую коррозию установлено (таблица 3, рисунок 5), что снижение температуры изотермического распада от 650 (грубопластинчатый перлит) до 500 °С (тонкопластинчатый перлит) приводит к повышению сопротивления образованию питтингов. ($E_{по} = -470$ мВ для грубопластинчатого перлита и -440 мВ для тонкопластинчатого перлита).

Таблица 3 - Влияние температуры изотермического распада и продолжительности последующего отжига на микротвердость и параметры поляризационных испытаний стали У10

Термическая обработка	Тип структуры	HV _{0.2}	$E_{по}$, мВ	E_p , мВ	ΔE , мВ
1050 °С → 650 °С, 15 мин	грубопластинчатый перлит	345	-470	-620	150
1050 °С → 500 °С, 5 мин	тонкопластинчатый перлит	540	-440	-570	130
1050 °С → 500 °С, 5 мин + 650 °С, 10 мин	отожженный тонкопластинчатый перлит	380	-490	-590	100
1050 °С → 500 °С, 5 мин + 650 °С, 300 мин	частично сфероидизированный перлит	290	-510	-600	90

Уже кратковременный отжиг при 650 °С значительно снижает потенциал $E_{по}$ тонкопластинчатого перлита (с -440 мВ до -490 мВ). При увеличении длительности отжига с 10 до 300 мин снижение $E_{по}$ замедляется ($E_{по} = -510$ мВ). Как у кратковременно (10 мин), так и у длительно (300 мин) отожженного тонкопластинчатого перлита наблюдалось бо-

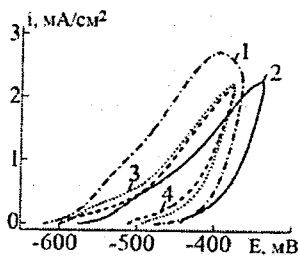


Рисунок 5 - Кривые питтинговой коррозии стали У10 с исходной структурой:

1 – грубопластинчатого перлита; 2 – тонкопластинчатого перлита; 3 – тонкопластинчатого перлита после кратковременного отжига; 4 – частично сфероидизированного перлита

лее раннее восстановление пассивной пленки ($\Delta E=100$ и 90 мВ), чем у исходной неравновесной структуры тонкопластинчатого перлита ($\Delta E=130$ мВ). У структуры грубопластинчатого перлита способность к репассивации после образования питтингов была наимудшей ($\Delta E=150$ мВ) по сравнению с другими структурными состояниями (таблица 3).

Таким образом, коррозионная стойкость исследуемой стали определяется разнонаправленным действием двух факторов: с одной стороны, возможностью образования питтингов, а с другой – их репассивацией. Исходя из данных таблицы 3, и анализируя кривые питтинговой коррозии (рисунок 5) можно предположить, что наилучшим из исследованных структурных состояний стали У10 следует считать неравновесную структуру тонкопластинчатого перлита, полученную в результате изотермического распада при температуре 500 °С.

В шестой главе изучено влияние дополнительного легирования как кремнием (1,66 мас. %), так и хромом (1,42 мас. %) на структуру, твердость и износостойкость при абразивном воздействии и трении скольжения углеродистых сталей, подвергнутых изотермическому распаду при температурах $330-650$ °С, а также дополнительному пятиминутному высокотемпературному (650 °С) отжигу.

Установлено, что для стали 80С2 существует оптимальная температура изотермического распада - 550 °С, при которой наблюдаются максимальные значения твердости и абразивной износостойкости (рисунок 6). Образовавшаяся при этой температуре структура тонкопластинчатого перлита превосходит в абразивной износостойкости структуры верхнего бейнита, образовавшегося при температуре 420 °С. Исследуемая сталь приобретает высокую износостойкость также после распада при температуре 330 °С. В этом случае, основываясь на структурных данных, предположили, что максимальные уровни износостойкости и твердости обусловлены наличием в структуре стали 80С2 нижнего бейнита и метастабильного остаточного аустенита.

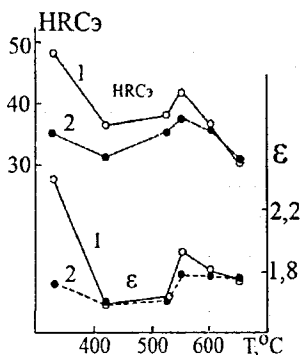


Рисунок 6 - Влияние температуры изотермического распада T °С (1) и дополнительного отжига (2) на твердость HRC_3 , и абразивную износостойкость ϵ стали 80С2

Пятиминутный отжиг при 650 °С вызывает снижение твердости исследуемой стали, вне зависимости от структурного состояния, изменение же износостойкости не так однозначно (рисунок 6). Отжиг вызывает снижение абразивной износостойкости тонкопластинчатого перлита стали 80С2 ($T_{\text{распада}}=550$ °С), при этом такой же отжиг стали со структурой бейнита ($T_{\text{распада}}=420$ °С) не приводит к ее изменению, несмотря на заметное снижение твердости. Следует отметить, что отожженный тонкопластинчатый перлит в стали 80С2 обладает большей абразивной износостойкостью, чем бейнит и более грубый перлит.

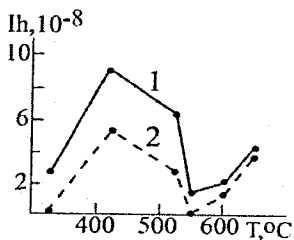


Рисунок 7 - Влияние температуры T°С изотермического распада на интенсивность изнашивания Ih стали 80С2 при испытании на воздухе (1) и в среде аргона (2)

Адгезионные испытания стали 80С2 показали, что интенсивность изнашивания при трении на воздухе заметно выше, чем при испытании в безокислительной среде аргона (рисунок 7). Это указывает на охрупчивающее влияние фрикционного окисления, которое приводит к ускоренному разрушению поверхностного слоя кремнистой стали в результате образования при трении пересыщенных твердых растворов кислорода в железе, а также формированию оксидов по границам микротрещин, способствующих их развитию.

Было определено, что бейнит, образовавшийся в кремнистой стали, обладает более высокой интенсивностью изнашивания при трении в различных средах по сравнению с нелегированным бейнитом стали У8, что свидетельствует об охрупчивающем влиянии кремния на бейнитные кристаллы эвтектоидной стали, то есть, в этом случае легирование стали не улучшает ее свойства.

Для хромсодержащей стали ШХ15 установлены оптимальные температуры распада 550 – 600 °С (рисунок 8), при которых формируется структура тонкопластинчатого перлита с обогащенным хромом цементитом. Выявлено, что легированный тонкопластинчатый перлит обладает повышенной абразивной износостойкостью по сравнению с менее дисперсным перлитом, верхним бейнитом, образующимся при температурах распада 525–420 °С, и даже более твердым нижним бейнитом, возникающим при температуре распада 330 °С.

Максимальный уровень твердости сталь ШХ15 приобретает после изотермического распада при температурах 550 °С (структура – тонкопластинчатый перлит) и 525 °С (структура – смесь тонкопластинчатого

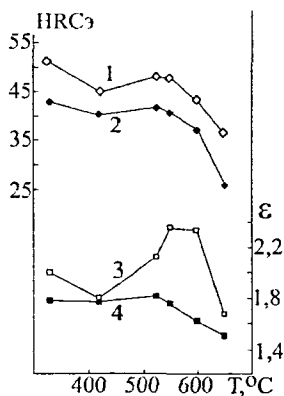


Рисунок 8 - Влияние температуры изотермического распада $T, ^\circ\text{C}$ на твердость HRC ϵ , (1, 2) и абразивную износостойкость ϵ (3, 4) сталей ШХ15 (1, 3) и У10 (2, 4)

перлита и верхнего бейнита). Максимальная абразивная износостойкость легированного перлита стали ШХ15 значительно выше, чем у перлита нелегированной стали У10 (рисунок 8, кривые 3,4), так как легирование стали хромом интенсифицирует распад цементита и выход свободного углерода в ферритную матрицу, где он способствует закреплению дислокаций, что приводит к повышенным значениям абразивной износостойкости. Важно отметить, что для стали ШХ15 температурный интервал, соответствующий максимальной твердости, не совпадает с температурным интервалом максимальной износостойкости. Не было выявлено заметного положительного влияния легирования хромом на сопротивление абразивному изнашиванию верхнего бейнита.

Определено, что отожженный тонкопластинчатый перлит ($T_{\text{распада}}=550-600\text{ }^\circ\text{C}$) в стали ШХ15 обладает большей абразивной износостойкостью, чем бейнит и более грубый перлит. Влияние отжига на износостойкость исследуемых сталей со структурой верхнего бейнита не наблюдалось.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Показано, что у образцов стали У10 со структурой перлита различной дисперсности, в зоне ускоренного роста трещины (зоне долома) размер фасеток отрыва сопоставим с размером исходного аустенитного зерна, имеющего одинаковую величину для грубо- и тонкопластинчатого перлита. Это отражается на величине таких характеристик пластичности, как поперечное сужение и сосредоточенная деформация при растяжении, имеющих близкие значения для грубопластинчатого и неравновесного тонкопластинчатого перлита.

2. Установлено, что при отжиге неравновесного тонкопластинчатого перлита стали У10, приводящего к релаксации внутренних микронапряжений, устранению сверхравновесного содержания углерода в ферритной составляющей и дефектности цементита, границы перлитных колоний начинают эффективно препятствовать развитию трещины в зоне долома. Это приводит к резкому увеличению пластичности стали,

что проявляется в росте поперечного сужения и сосредоточенной деформации отожженного образца.

3. Определено, что при циклическом растяжении с контролируемой величиной напряжения $\sigma=0,7\sigma_T$ в стали У10 со структурой перлита наиболее существенные изменения наблюдаются в стали со структурой тонкопластинчатого перлита, подвергнутой дополнительному кратковременному (10 мин) отжигу при 650 °С, когда наряду с полигонизацией в ферритной составляющей наблюдается фрагментация и растворение цементитных пластин, происходит их интенсивная сфероидизация, которая обусловлена совместным действием упругих растягивающих напряжений, микропластической деформации и эффектов локального нагрева, ускоряющих диффузию атомов железа и углерода.

4. Сформировавшаяся в процессе усталостных испытаний структура определяет вид изломов, а, следовательно, и особенности разрушения стали У10 со структурой перлита. Таким образом, при изучении усталости перлитных сталей может быть эффективно использован комплексный анализ, позволяющий установить взаимосвязь изменений морфологии цементита при многоциклового усталости с характером разрушения и величиной циклической прочности.

5. Определено, что неравновесная структура тонкопластинчатого перлита, полученная в заэвтектоидной стали У10 в результате изотермического распада при температуре 500°С, превосходит по стойкости к питтинговой коррозии структуры грубопластинчатого, отожженного тонкопластинчатого и сфероидизированного перлита.

6. Показано, что дополнительное легирование кремнием (1,66%) и в особенности хромом (1,42%) эффективно повышает абразивную износостойкость эвтектоидной стали со структурой тонкопластинчатого перлита до уровня, существенно превосходящего износостойкость структур верхнего бейнита, а в хромистой стали – даже более твердого нижнего бейнита.

7. Установлено, что в условиях трения скольжения дополнительное легирование кремнием резко уменьшает износостойкость верхнего бейнита вследствие охрупчивающего влияния кремния на бейнитные кристаллы, однако не снижает износостойкость тонкопластинчатого перлита. Выявлено отрицательное влияние фрикционного окисления на сопротивление адгезионному изнашиванию кремнистой стали со структурами тонкопластинчатого перлита и, в особенности, бейнита.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Механические свойства и особенности разрушения при статическом растяжении высокоуглеродистой стали с перлитными структурами различного типа / А.В. Макаров, Р.А. Саврай, В.М. Счастливцев, Т.И. Табатчикова, Л.Ю. Егорова // ФММ. - 2007. - Т. 104, № 5. - С. 542-555.

2. Влияние кремния на износостойкость при трении и абразивном воздействии высокоуглеродистой стали со структурами изотермического распада аустенита / А. В. Макаров, В. М. Счастливцев, Т. И. Табатчикова, А. Л. Осинцева, И. Л. Яковлева, Л. Ю. Егорова // Деформация и разрушение материалов. – 2010. - №6. - С. 1-7.

3. Структурные особенности поведения высокоуглеродистой перлитной стали при циклическом нагружении / А. В. Макаров, Р. А. Саврай, В. М. Счастливцев, Т. И. Табатчикова, И. Л. Яковлева, Л. Ю. Егорова // ФММ. – 2011. – Т. 111, № 1. - С. 97–111

4. Влияние легирования хромом на структуру и абразивную износостойкость высокоуглеродистых сталей после изотермического превращения аустенита / А. В. Макаров, Л. Ю. Егорова, Т. И. Табатчикова, В. М. Счастливцев, И. Л. Яковлева, А. Л. Осинцева // Деформация и разрушение материалов. – 2013. - №11. - С. 31-38.

5. Взаимосвязь структуры и стойкости к питтинговой коррозии заэвтектоидной стали У10 / Л.Ю. Егорова, Р.А. Саврай, В.В. Березовская, А.В. Макаров, В.М. Счастливцев, Т.И. Табатчикова, Е.А. Меркушкин // Металлы. – 2014. - №1. – С. 57-64.