

На правах рукописи



МОРДОВСКОЙ ПЕТР ГРИГОРЬЕВИЧ

**ПОВЫШЕНИЕ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ И ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ  
СВОЙСТВ ФЕРРИТНО-ПЕРЛИТНОЙ СТАЛИ ПРИ  
МЕГАПЛАСТИЧЕСКОМ ДЕФОРМИРОВАНИИ И  
НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОМ ОТЖИГЕ**

Специальность

05.16.09. – Материаловедение (машиностроение)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Комсомольск-на-Амуре – 2014

Работа выполнена в ФГБУН «Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова» СО РАН (ИФТПС СО РАН), г. Якутск

Научный руководитель: **Яковлева Софья Петровна**, доктор технических наук, профессор, заведующая отделом материаловедения ФГБУН «Институт физико-технических проблем Севера» СО РАН (г. Якутск)

Официальные оппоненты: **Николенко Сергей Викторович**, доктор технических наук, старший научный сотрудник лаборатории функциональных материалов и покрытий ФГБУН «Институт материаловедения» Хабаровского научного центра ДВО РАН

**Тютин Марат Равилевич**, кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории конструкционных сталей и сплавов им. академика Н.Т. Гудцова ФГБУН Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН (г. Москва)

Ведущая организация: ФГАОУ ВПО «Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова» (г. Якутск)

Защита состоится «19» декабря 2014 г. в 10:00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.092.01 в ФГБОУ ВПО «Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет» по адресу: 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27, ауд. 201, корпус 3. Факс: 8(4217)53-61-50; e-mail: [mdsov@knastu.ru](mailto:mdsov@knastu.ru)

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВПО «Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет» и на официальном сайте организации по адресу: [www.knastu.ru](http://www.knastu.ru)

Автореферат разослан «18» ноября 2014 г.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, подписанные и заверенные гербовой печатью организации, просим направлять по указанному адресу на имя ученого секретаря диссертационного совета.

Ученый секретарь  
диссертационного совета



Пронин Александр  
Иннокентьевич

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы:** Актуальной задачей материаловедения в машиностроении является улучшение комплекса физико-механических свойств материалов. В последнее десятилетие большое внимание специалистов, занимающихся созданием и исследованием новых материалов, вызывают материалы с субмикроструктурной (СМК) и наносубмикроструктурной (НСМК) структурой. Такие материалы обладают уникальной структурой и свойствами, многие из которых имеют практическую значимость. К настоящему времени разработано несколько методов получения СМК и НСМК материалов: компактирование ультрадисперсных порошков, контролируемая кристаллизация аморфных материалов и мегапластическая или интенсивная пластическая деформация (ИПД). Существуют проблемы в развитии первых двух методов, связанные с сохранением некоторой остаточной пористости при компактировании, загрязнением образцов при подготовке порошков или их консолидации, невозможностью получения достаточно массивных и объемных СМКМ и НСМК. Одним из основных вариантов решения данной проблемы является применение мегапластической деформации методом равноканального углового прессования (РКУП).

Обычно РКУП проводят при повышенных (сотни градусов Цельсия) температурах («теплое» РКУП); с практической точки зрения интересно изучение процессов диспергирования структуры металлов при понижении температур прессования. Кроме того, для формирования ультрадисперсных структур может оказаться перспективной комбинация «холодного» (при комнатной температуре) РКУП и относительно низкотемпературного кратковременного нагрева. В большинстве же зарубежных и отечественных работ, исследующих влияние термообработки на структуры пониженной размерности, полученные при РКУП, нагрев чаще всего проводится при весьма высоких температурах (~500°C и выше) в течение продолжительного времени (более 1 часа). Также следует отметить, что основное внимание из-за сложности проведения РКУ деформирования уделяется пластичным металлам (Cu, Al, Ni) и их сплавам. Для машиностроения, а также строительства, актуально изучение перспектив применения РКУП железоуглеродистых сплавов, в частности широко используемых в промышленности сталей с ферритно-перлитной структурой. В связи с этим необходимо исследование механических и трибологических свойств сталей, структурированных методом РКУП. С другой стороны, в современном материаловедении важнейшим фундаментальным направлением является исследование факторов, обеспечивающих достижение того или иного уровня свойств. Соответственно, актуально изучение процессов разрушения сталей с НСМК структурой при воздействии однократных или трибонагрузок.

### **Связь работы с научными программами:**

Работа выполнена в соответствии с планами научных работ Института физико-технических проблем Севера им. В.П.Ларионова СО РАН по следующим программам:

Программа фундаментальных исследований Президиума РАН №7 «Разработка методов получения химических веществ и создание новых материалов», проект 7.3 «Деформационно-термические условия объемного наноструктурирования и повышение физико-механических свойств ферритно-

перлитной стали при низкотемпературной релаксации после равноканального углового прессования» (№ гос. рег. 01201153007).

Программа фундаментальных исследований Президиума РАН № 8, проект 8.22. «Формирование нано-, субмикронной структуры при объемных и поверхностных термосиловых воздействиях после мегапластической деформации как основа для разработки конструкционных сталей с высоким уровнем свойств и адаптивным поведением при эксплуатации» (№ гос. рег. 01201257844).

Проект РФФИ №12-08-98503 «Процессы самоорганизации в наноструктурированных сталях как фактор повышения их эксплуатационных свойств в условиях Арктики».

**Объект исследования:** Структура, комплекс физико-механических свойств и трибологических характеристик низкоуглеродистой стали после РКУП и последующей термической обработки (ТО).

**Цель работы:** развитие научно-прикладных основ решения задачи улучшения комплекса физико-механических свойств ферритно-перлитных сталей с применением равноканального углового прессования при комнатной температуре и последующего кратковременного низкотемпературного отжига; выявление роли нано-, субмикроструктурных состояний в формировании прочностных и трибологических свойств ферритно-перлитной стали.

**Задачи:**

1. Исследование изменений микроструктуры конструкционной стали 09Г2С после РКУП при 20° С и последующего низкотемпературного отжига.
2. Исследование влияния феррита и карбидов пониженной размерности на механические свойства и микромеханизмы разрушения стали 09Г2С.
3. Исследование физических свойств стали 09Г2С после РКУП и ТО.
4. Определение трибологических характеристик, механизмов повреждения и эволюции фрикционных поверхностей стали 09Г2С после РКУП и ТО.

**Научная новизна полученных результатов:**

Впервые показан эффект формирования наноразмерных и субмикронных структурных элементов в конструкционной стали 09Г2С при комбинировании метода «холодного» РКУП и низкотемпературного отжига. Установлено, что образующиеся в стали нано-, субмикроструктурные структуры обеспечивают технически значимое улучшение комплекса механических свойств, приближая ее к классу высокопрочных.

Выявлены особенности влияния дисперсных структур, образующихся в ферритно-перлитной стали после холодного РКУ прессования, на процессы разрушения и уровень механических характеристик. Исследование строения макро- и мезорельефов изломов, механизмов разрушения позволило показать роль нано-, субмикроструктурных структур как факторов высокопрочного состояния стали.

Установлено, что создание гетерогенной структуры системы «субмикронная ферритная матрица – наноразмерная карбидная фаза», позволяет в несколько раз повысить износостойкость стали. Исследована эволюция строения и микрогеометрия фрикционных поверхностей, основные механизмы повреждения и особенности кинетики изнашивания, указывающие на существенные различия в формировании трибологической прочности в зависимости от уровня дисперсности структуры.

**Практическая значимость полученных результатов:** Практическая значимость предлагаемого подхода к формированию наносубмикронных структур в конструкционных сталях определяется снижением температуры предварительного нагрева заготовки перед РКУП и температурно-временных параметров последующей термообработки. Как показали проведенные исследования, механические характеристики стали 09Г2С после РКУП и ТО достигают значений, характерных для высокопрочных сталей. Поэтому перспективы выбранной обработки массовых ферритно-перлитных сталей обуславливаются, во-первых, возможностью создания из них ответственных деталей с высоким комплексом механических свойств, в том числе по износостойкости; во-вторых, обеспечением существенного ресурсо- и энергосбережения. Возможная номенклатура изделий ограничивается только особенностями технологии обработки заготовок РКУ прессованием и температурой эксплуатации готовой детали или сборочной единицы.

**Достоверность полученных результатов** в диссертационной работе обеспечивается системным подходом к исследованиям, привлечением современных, преимущественно стандартных и взаимно дополняющих друг друга экспериментально-аналитических методов и испытаний на современном и поверенном оборудовании. Основные результаты и выводы диссертационной работы опубликованы и докладывались на научных семинарах и конференциях.

**Основные положения, выносимые на защиту:**

1. Получение в стали 09Г2С наносубмикронных структур при мегапластическом деформировании равноканальным угловым прессованием и последующем низкотемпературном отжиге.
2. Повышение предела прочности и текучести стали 09Г2С после РКУП и ТО в три раза по сравнению с исходным крупнозернистым состоянием;
3. Увеличение коэрцитивной силы, удельного электросопротивления, среднего значения и количества магнитных шумов Баркгаузена стали 09Г2С после РКУП и ТО;
4. Рост износостойкости и изменение процесса изнашивания стали 09Г2С со структурой системы «субмикронная ферритная матрица – наноразмерная карбидная фаза» по сравнению с исходной крупнозернистой ферритно-перлитной структурой.

**Апробация работы.** Основные положения работы представлены на следующих семинарах, конференциях, симпозиумах: Междисциплинарный международный научно-технический семинар с элементами молодежной школы «Нанотехнологии в материаловедении» (Якутск, 2012), Международная конференция по физической мезомеханике, компьютерному конструированию и разработке новых материалов (Томск, 2011 г.), IV Международная конференция «Деформация и разрушение материалов и наноматериалов DFMN-2011» (Москва, 2011), XV Лаврентьевские чтения (Якутск, 2011 г.), Международная научно-техническая конференция «Современное материаловедение и нанотехнологии» (Комсомольск-на-Амуре, 2010 г.), Международная научно-техническая конференция «Нанотехнологии функциональных материалов» (Санкт-Петербург, 2010 г.), V Евразийский симпозиум по проблемам прочности машин и материалов для регионов холодного климата EURASTRENCOLD–2010 (Якутск, 2010 г.), VI Евразийский симпозиум по проблемам прочности машин и материалов для регионов холодного климата EURASTRENCOLD–2013 (Якутск, 2013г.), XXXII

международная научно-практическая конференция «Технические науки – от теории к практике» (Новосибирск, 2014).

**Публикации.** Материалы диссертации опубликованы в 23 трудах, в том числе в 4 журналах, включенных в перечень ВАК, и 10 публикациях в сборниках трудов международных конференций.

**Личный вклад автора в работу.** Соискатель участвовал в планировании и постановке целей и задач работы, интерпретации результатов и формулировке основных положений, определяющих ее новизну и практическую значимость. Им проведены исследования структуры, физических, механических и трибологических свойств. Сканирующая электронная микроскопия, измерения физических свойств и фрикционная обработка по схеме «палец-плоскость» были проведены в ИМАШ УрО РАН (г. Екатеринбург) в период прохождения соискателем научной стажировки под руководством д.т.н. А.В. Макарова и к.ф.-м.н. С.М. Задворкина. В ряде экспериментов, связанных с проведением механических и трибологических испытаний, участвовали сотрудники отделов ИФТИС СО РАН, которым автор выражает глубокую благодарность. Особая благодарность – члену-корреспонденту РАН М.П. Лебедеву и д.т.н. С.П. Яковлевой за постоянную поддержку и внимание.

#### **Структура и объем диссертации.**

Работа изложена на 136 страницах и состоит из введения, 5 глав с выводами, общих выводов, библиографического списка из 153 наименований, содержит 56 рисунков и 16 таблиц.

### **КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертационной работы, определена цель исследований, показаны научная новизна и практическая значимость работы, приведены основные положения, выносимые на защиту и методология исследования.

**Первая глава** посвящена литературному обзору по теме диссертации и обоснованию задач исследований. Показано, что РКУП является эффективным способом получения СМК и НСМК структуры в металлах и сплавах. РКУП разработано В.М.Сегалом в 1970-х годах и развито Р.З. Валиевым в 1990-х годах. Современные теоретические работы зарубежных и российских авторов раскрывают механизмы пластического деформирования в процессе РКУП и основные закономерности зависимости деформации от напряжения. Выявлено, что происходит существенное повышение механических характеристик материала. Большинство работ по исследованию материалов после РКУП посвящено изучению изменений механических свойств пластичных цветных металлов и их сплавов. Литературный обзор показал, что малоизученным является влияние РКУП на такие материалы, как железоуглеродистые сплавы. Недостаточно исследованы хладостойкость, ударная вязкость и трибологические свойства металлов и сплавов после РКУП. Практически не исследован вопрос влияния кратковременного низкотемпературного отжига на структуру и свойства конструкционной стали, подвергнутой мегапластической деформации.

**Во второй главе** описаны объекты и методики экспериментальных исследований.

Материал исследования: конструкционная низкоуглеродистая малолегированная сталь 09Г2С (0,09 % С; 0,64 % Si; 1,26 % Mn; 0,007 % P; 0,08 % Cr; 0,1 % Ni; 0,02 % Al; 0,14 % Cu; меньше 0,002 % V; 0,01% Nb; 0,013 % Ti).

РКУП проводили при 20° С, угол пересечения каналов матрицы  $\Phi$  равен 90°, маршрут прессования Вс, при котором образец поворачивают на 90° после каждого прохода в одном направлении, количество циклов прессования равно двум. Последующий низкотемпературный отжиг проводили при 250, 350, 450 и 550° С в течение 1 часа с охлаждением на воздухе.

Исследования микроструктуры проведены с помощью электронных микроскопов JEOL JSM-6480LV и Mira3 Tescan и металлографических микроскопов Observer D1m и Неофот-32; для фазового анализа использовали программу AxioVision Multiphase.

Фрактографический анализ изломов ударных образцов выполнен на стереомикроскопе «Stemi 2000С» (макростроение) и растровых электронных микроскопах JXA-50А и JEOL JSM-6480LV (микростроение).

Значения микротвердости замерены на приборе ПМТ-3М. Микротвердость и модуль Юнга также были измерены на приборе Fisherscope H100С Хур.

Испытания на статическое растяжение проводились на испытательной машине «UTS TestSysteme GmbH» (Lammerweg 29.D-89079 Ulm) модели UTS 20 при скорости деформирования 1 мм/мин и величине предельной нагрузки 1 т. Механические характеристики определяли в соответствии с ГОСТ 1497-84 и 11150-84. Испытания на ударный изгиб образцов с V-образным надрезом проведены на маятниковом копре «МК-30» при комнатной температуре и при минус 40° С.

Коэрцитивную силу измеряли на коэрцитиметре КИФМ-1. Основные магнитные характеристики определяли на магнитоизмерительном комплексе REMAGRAPH. Удельное электросопротивление образцов определяли на стенде с четырехпроводной схемой.

Для трибологических испытаний при трении скольжения со смазкой образцов с размером поперечного сечения 5x10 мм была выбрана схема трения «диск-колодка»; испытания выполнены на серийной машине трения СМЦ-2. Массовый износ определялся весовым методом. Профилометрия поверхности трения образцов проводилась на 5 маркированных участках образца с помощью профилометра SJ-201Р фирмы «Mitutoyo».

Трибологические испытания при сухом трении скольжения по схеме «палец-плоскость» выполнены на машине трения модели 73.03, площадь контакта 5,4x5,4 мм; также по данной схеме проведены испытания в безокислительной среде аргона и испытания на абразивный износ по закрепленному абразиву корунду.

**В третьей главе** рассмотрены фазовые, структурные превращения, происходящие при холодном РКУП и последующем отжиге.

Структура стали 09Г2С в исходном состоянии ферритно-перлитная (рисунок 1а); средний размер зерен феррита составляет 10-20 мкм. После РКУП структура состоит из распределенных в деформированной ферритной матрице обособленных карбидов диаметром ~300..500 нм и карбидных конгломератов; средний размер ферритных областей, свободных от перлита, равен ~5 мкм (рисунок 1б).

В ходе последующего нагрева наблюдаются превращения, не характерные для материала в обычном крупнозернистом состоянии. Уже при 250° С можно наблюдать значительное изменение структуры (рисунок 1в). Видно, что размер ферритных зерен уменьшается, продолжается процесс диспергирования карбидов, сопровождающийся их сфероидизацией и рассредоточением.

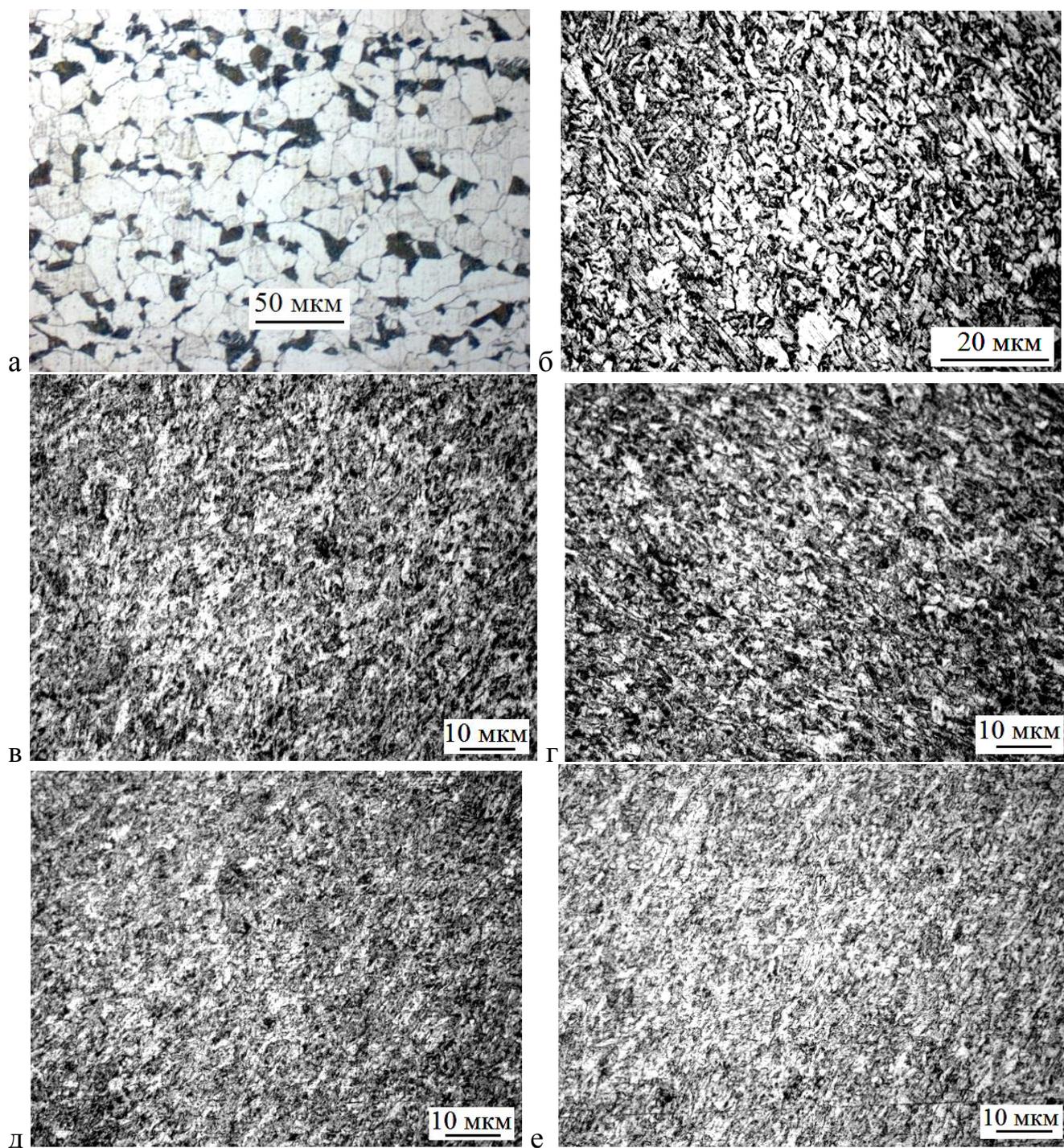


Рисунок 1 – Микроструктура стали 09Г2С в исходном состоянии (а), после холодного РКУП (б) и нагрева при 250°С (в), 350° С (г), 450° С (д) и 550° С (е)

При нагреве до температур 350°...450° С (рисунки 1г, д, 2) происходит дальнейшее растворение углерода в феррите; минимальный радиус карбидных частиц составил 30 нм, размер ферритных промежутков  $\approx 1,7..2$  мкм. Внутренняя структура феррита содержит вытянутые элементы субмикронного размера в поперечнике, образуется сильноразориентированная ячеистая субструктура. В колониях пластинчатого перлита при деформировании первоначально меняются межпластиночные расстояния, идет формирование развитой ячеистой структуры, пластины цементита постепенно истончаются и фрагментируются.

Изменение распределений значений микротвердости стали 09Г2С после РКУП и ТО показано на рисунке 3. Более растянутый спектр значений микротвердости стали сразу после РКУП (рисунок 3а) обусловлен большей неоднородностью по сравнению с термообработанными состояниями (рисунок 3 б-д). Термообработка при 250° и 350° С не только смещает максимум гистограмм микротвердости в сторону ее увеличения, но и сужает их практически до двух центральных пиков (рисунки 3б, в). Очевидно, такое резкое изменение микросвойств стали – следствие процесса первичной рекристаллизации, то есть можно полагать, что при 250°С уже достигнута температура ее начала. Как видно по некоторому снижению средней микротвердости, при 450° С инициируется механизм рекристаллизации, и уже при 550° С это приводит к ее существенному падению (рисунки 3 г, д).

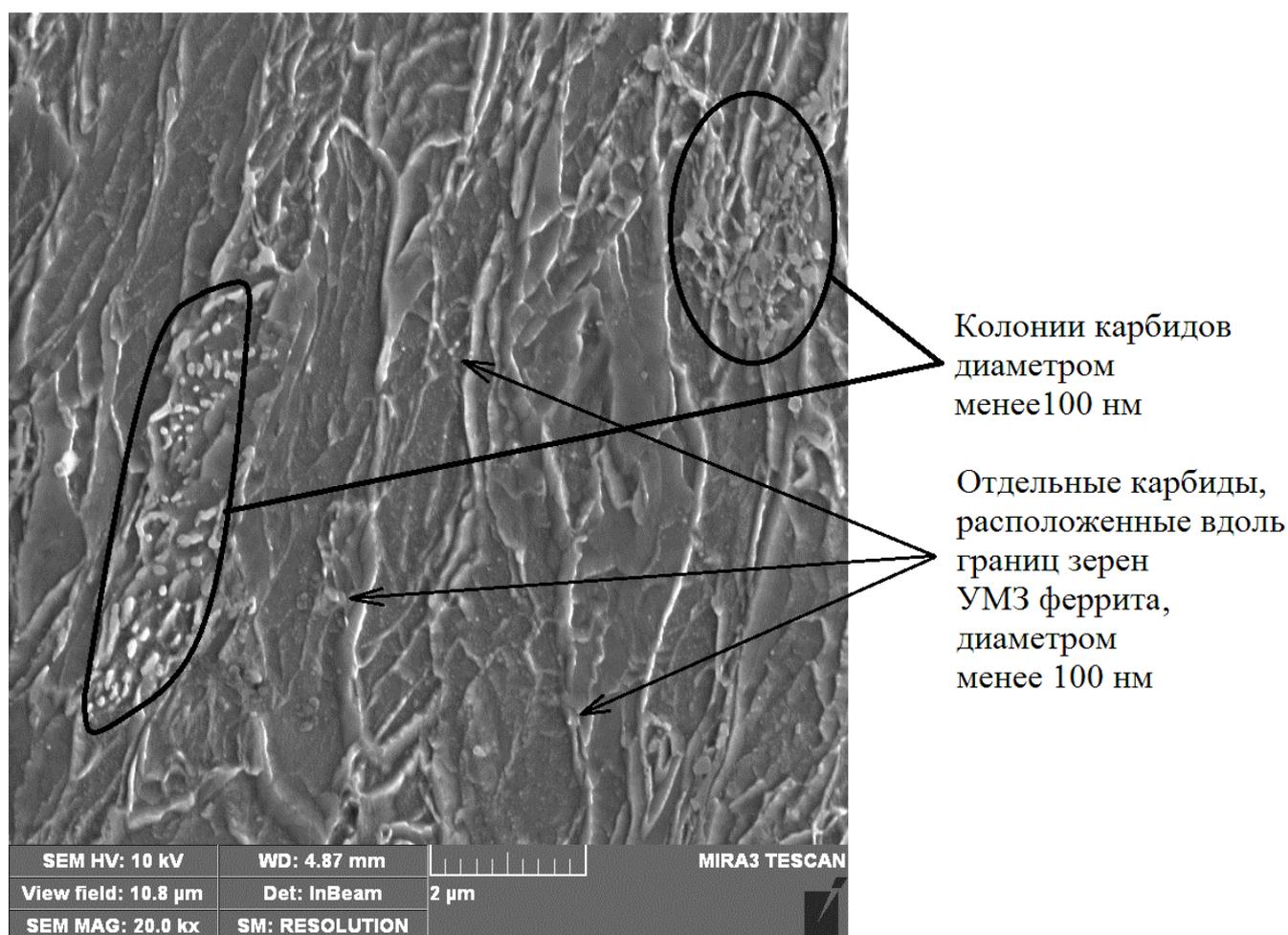


Рисунок 2 – Микроструктура стали 09Г2С после РКУП и ТО при 350° С. РЭМ

Таким образом, анализ микроструктуры и микротвердости стали 09Г2С в состоянии, достигнутом холодным РКУП с последующей ТО в диапазоне температур 250...550° С, указывает на дальнейшее диспергирование элементов структуры при нагреве после РКУП с образованием весьма однородной субмикроструктурной ферритной матрицы, упрочненной карбидами пониженной размерности (вплоть до наноразмерных).

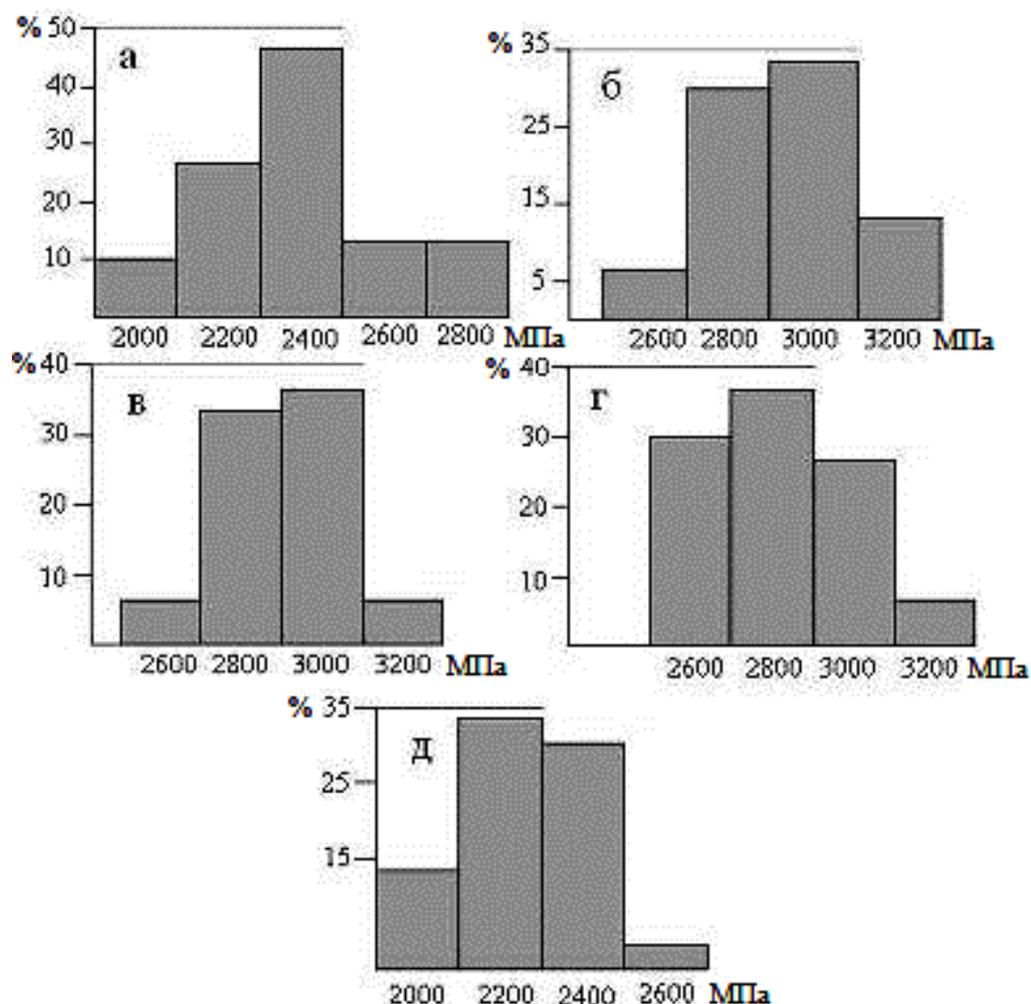


Рисунок 3 - Изменение распределения значений микротвердости стали 09Г2С после комбинированного воздействия холодного РКУП а) без отжига и с отжигом при б) 250° С, в) 350° С, г) 450° С и д) 550° С

**В четвертой главе** исследованы физико-механические свойства стали 09Г2С, упрочненной РКУП и ТО. Для механических испытаний были выбраны образцы после РКУП с последующим отжигом при 350 и 450° С. Результаты экспериментов по растяжению приведены в таблице 1. РКУП обусловило трехкратное повышение предела текучести  $\sigma_T$  и предела прочности  $\sigma_B$  по сравнению с исходным состоянием. Резкое увеличение прочности считается следствием перехода структуры в субмикро-, нанокристаллическое состояние.

Одним из основных показателей механических свойств металлов наряду с параметрами прочности и пластичности является ударная вязкость, характеризующая, прежде всего, склонность материала к хрупкому разрушению и эксплуатационные свойства при низких температурах; значения ударной вязкости КСЧ при комнатной температуре и при минус 40° С показаны в таблице 2.

Для выявления роли наносубмикрокристаллической структуры как фактора повышения сопротивления ферритно-перлитной стали хрупкому разрушению проведен макро- и микрофрактографический анализ поверхностей изломов (рисунок 4) образцов, испытанных на ударный изгиб. Общим для макроизломов ударных образцов обработанной стали 09Г2С, разрушенных при 20° С и минус 40° С, является образование не обычных ортогональных изломов, а наклонных.

Микростроение изломов – смешанное, с участками вязкого ямочного разрушения и разрушения по механизмам мелкодисперсного скола и квазискола.

Таблица 1 - Прочностные свойства стали 09Г2С после различных видов обработки

Режимы обработки	Температура испытаний					
	при 20° С			при минус 40° С		
	$\sigma_T$ , МПа	$\sigma_B$ , МПа	$\delta$ , %	$\sigma_T$ , МПа	$\sigma_B$ , МПа	$\delta$ , %
Исходное состояние	325	470	21			
РКУП при 20°С	930	1300	4	990	990	2
РКУП при 20°С, отжиг при 350° С	985	1400	3	1000	1000	3
РКУП при 20°С, отжиг при 450°С	850	1195	4	890	890	3

Таблица 2 - Ударная вязкость стали 09Г2С после РКУП при 20° С и отжига

Режимы Обработки	KCV МДж · м <sup>-2</sup>	
	при 20° С	при минус 40° С
Исходное состояние	0,22	0,13
РКУП	0,63	0,14
РКУП, отжиг при 350° С	0,45	0,11
РКУП, отжиг при 450° С	0,58	0,13

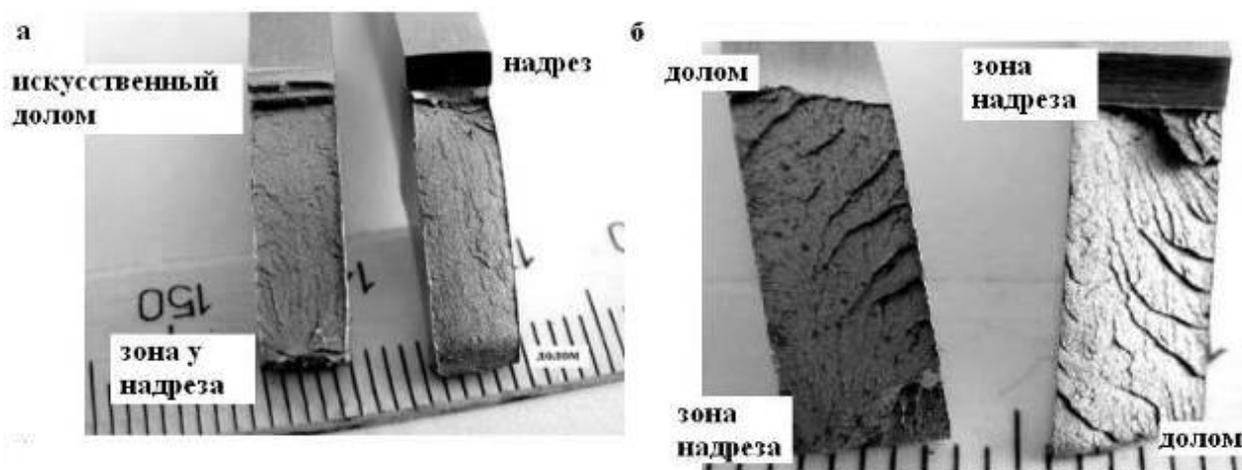


Рисунок 4 - Вид макроизломов образцов: а)РКУП, испытание при 20° С; б) РКУП и отжиг при 350° С, испытание при минус 40° С

На рисунке 5 представлены характерные изображения скола и квазискола в центральных областях изломов образцов, испытанных при 20° С и минус 40° С. При низкой температуре испытания, как и при комнатной, объединение микротрещин, зародившихся на разных уровнях по механизму квазискола, часто происходит с образованием множественных вертикальных утяжек сложной формы, вершины которых имеют мелкоямочное тонкое строение (рисунки 5д, е). Образование такого развитого рельефа определяет повышенную энергоёмкость разрушения.

Следует отметить, что при низкотемпературных испытаниях процесс развития трещин в стали после РКУП и РКУП и ТО при 450° С, очевидно,

более чувствителен к присутствию диспергированной карбидной фазы: после этих режимов обработки поверхности изломов образцов содержат участки с карбидными частицами (Рисунок 6).

Таким образом, измельчение структурных составляющих повысило энергоёмкость разрушения и, соответственно, значения ударной вязкости за счет реализации процесса множественного разрушения с образованием многочисленных сепаратных трещин, отвлекающих часть энергии на их развитие и тем самым тормозящих разрушение.

С целью выбора параметров оценки механических свойств и диагностики текущего состояния стальных изделий, упрочненных методом РКУП, существует необходимость применения неразрушающего контроля. Выявлено увеличение коэрцитивной силы в 2,2 раза, удельного электросопротивления в 1,3 раза, среднего значения магнитных шумов Баркгаузена в 4 раза стали 09Г2С после РКУП по сравнению со сталью с исходной крупнозернистой структурой. Дальнейшая термическая обработка по различным маршрутам также влияет на данные показатели, что позволяет оценивать степень упрочнения материала (величины  $\sigma_b$  и  $\sigma_{0,2}$ ) путем неразрушающего контроля.

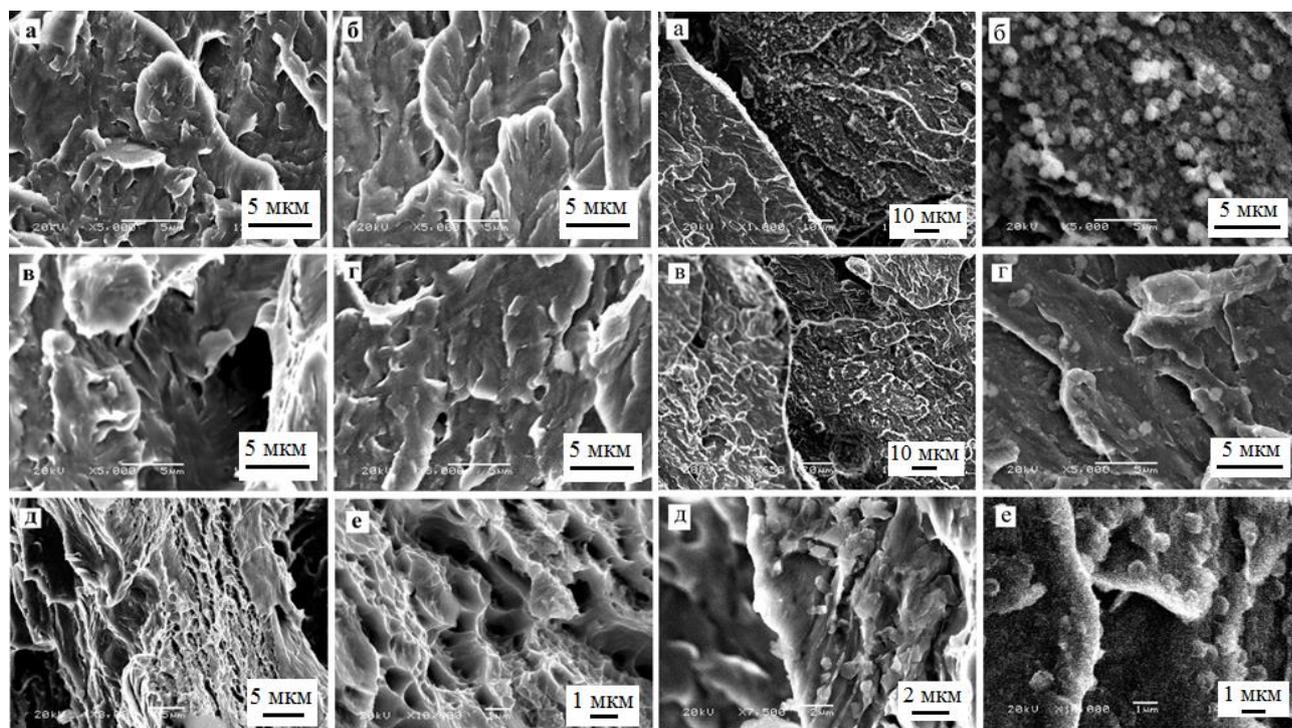


Рисунок 5 - Тонкое строение центральных областей изломов: а) РКУП, испытание при 20° С; б) РКУП и ТО при 350° С, испытание при 20° С; в) РКУП и ТО при 450° С, испытание при 20° С; г) РКУП, испытание при минус 40° С; д) РКУП и ТО при 350° С, испытание при минус 40° С; е) РКУП и ТО при 450° С, испытание при минус 40° С

Рисунок 6 - Участки излома стали 09Г2С, содержащие частицы карбидной фазы: а-г – сталь после РКУП, температура испытаний минус 40° С; е – сталь после РКУП и ТО при 450° С, испытание при минус 40° С

**В пятой главе** исследованы трибологические свойства: износ, износостойкость и эволюция поверхности трения.

Износостойкость ферритно-перлитных сталей определяется комплексом их физико-механических характеристик, зависящих от количества и дисперсности структурно-свободного феррита, размера и формы карбидных частиц, деформационного поведения, сопротивления возникновению микротрещин. Повышению износостойкости способствуют рост твердости феррита, оптимальное распределение дисперсных частиц карбидной фазы и т.д.

Появление элементов наносубмикронной размерности в структуре стали значительно улучшило износостойкость: по массовому износу – в 2,5...2,7 раза; по интенсивности изнашивания – более чем в 2 раза по сравнению с СМК структурой, полученной РКУП без ТО. На рисунке 7 показаны массовый износ образцов, обработанных РКУП и ТО. Лучшую износостойкость продемонстрировала сталь, обработанная по режиму РКУП и ТО при 350° С, для которой на стадии приработки происходит снижение интенсивности изнашивания в 3,4 раза.

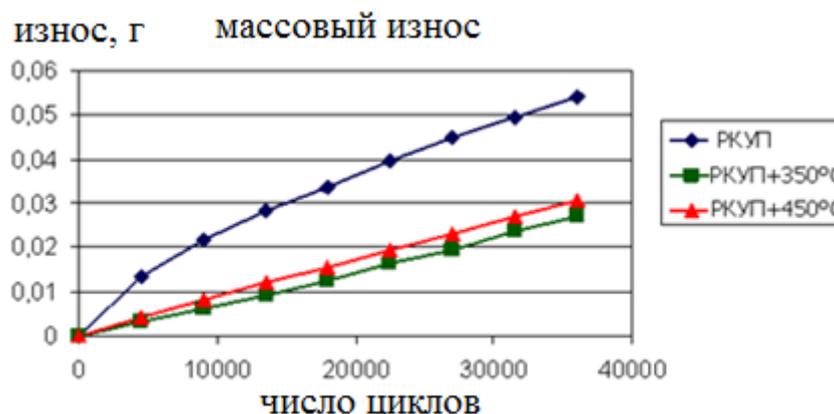


Рисунок 7 - Износ образцов стали 09Г2С при трении по схеме «диск-колодка»

В таблице 3 представлены результаты трибологических испытаний при сухом трении скольжения по схеме «палец-плоскость» с различными значениями нормальной нагрузки. Рост нагрузки до 300 Н приводит к значительному увеличению износа исходного материала вследствие перехода к адгезионному схватыванию, износ составил 360 мг; после РКУП без ТО 140мг; после РКУП с отжигом при 350 и 450° С 6 и 5 мг соответственно, что также было подтверждено при испытаниях в безокислительной среде аргона. При нагрузке 375 Н массовый износ на воздухе образцов снижается, что является следствием изменения режима трения, при котором возрастает способность материала сопротивляться трещинообразованию и формированию частиц износа.

Таблица 3 - Массовый износ при сухом трении скольжения по схеме «палец-плоскость»

Испытательная нагрузка, Н	Потери массы, Δm, мг			
	150	225	300	375
Исходное состояние	7	8	360	260
РКУП при 20°С, без ТО	7	5	140	3
РКУП при 20° С, отжиг при 350° С	10	6	40	20
РКУП при 20° С, отжиг при 450° С	5	5	3	2

Бóльшая износостойкость обработанных РКУП образцов является следствием роста твердости и прочности, а также структурных изменений (измельчение зерна, рост количества большеугловых границ зерен и др.). После РКУП и последующего отжига происходит дополнительное упрочнение субмикронной ферритной матрицы, обусловленное появлением и более равномерным распределением наночастиц цементита и снижением деформационных напряжений в образцах.

Поскольку трибологические характеристики машин и механизмов в значительной степени определяются контактным взаимодействием деталей, проведено исследование изменения шероховатости фрикционных поверхностей образцов стали 09Г2С в процессе трения скольжения по схеме «диск-колодка».

В работе также исследована шероховатость поверхности трения по параметрам Ra, Rq и Rz. Следует отметить колебательный характер изменения параметров Ra, Rq, Rz образцов по всему пути трения, включая стадию стационарного износа, что объясняется цикличностью процесса трения: упрочнения (наклеп) и разупрочнения (разрушение и удаление) поверхности трения. Инструментом для описания шероховатости в горизонтальном и вертикальном направлениях является построение опорных кривых (рисунок 8), которые представляют собой интегральную кривую распределения материала по высоте шероховатого слоя.

Наиболее оптимальный вид опорной кривой должен иметь широкую опорную поверхность, малую величину площади и высот вершин, достаточный размер впадин (для маслоудержания). С увеличением опорной поверхности понижается средняя нагрузка на вершины при трении, что снижает вероятность появления очагов контактного разрушения, образования надиров и т. д.

Образцы после РКУП имеют бóльшую опорную поверхность по сравнению с исходным материалом (таблица 4). Исходный крупнозернистый образец имеет наименьшее значение опорной поверхности, что является следствием особенностей рельефа поверхности с большим количеством вершин и впадин.

РКУП и ТО при 350° С дают наибольшее относительное значение опорной поверхности (85%) изнашиваемого образца, малое значение площади вершин 0,1 мкм<sup>2</sup> и достаточное значение площади впадин 0,12 мкм<sup>2</sup>. Рельеф фрикционной поверхности – менее выраженный, с относительно ровными дорожками трения и более тонкими следами микрорезания. Также после обработки по этому режиму сталь имеет наибольшие прочностные характеристики и наименьшее значение массового износа при различных нормальных нагрузках.

Таблица 4 - Параметры шероховатости образцов

Режимы обработки образцов	Ra, мкм	Rz, мкм	Относительная длина опорной поверхности, %	Площадь вершин, мкм <sup>2</sup>	Площадь впадин, мкм <sup>2</sup>
Исходное состояние	0,96±0,31	4,05±1,46	72±6	0,18±0,11	0,20±0,04
РКУП при 20°С, без ТО	0,70±0,10	5,21±0,71	82±2	0,10±0,03	0,17±0,04
РКУП при 20°С, ТО при 350°С	0,85±0,28	5,44±1,39	85±4	0,10±0,06	0,12±0,05
РКУП при 20°С, ТО при 450°С	0,49±0,19	3,24±0,91	84±6	0,09±0,05	0,07±0,02

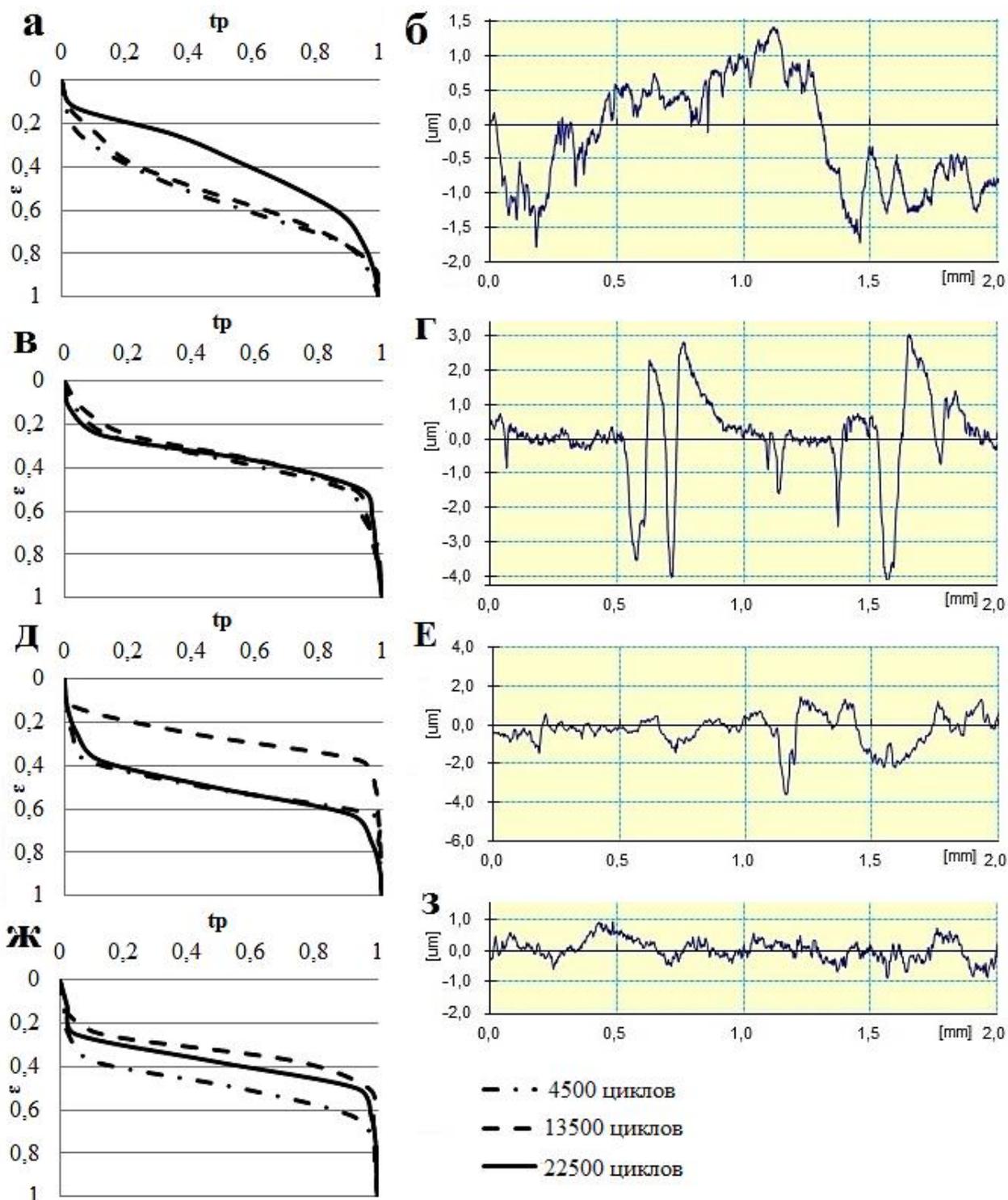


Рисунок 8 – Графики опорных кривых шероховатости после 4500, 13500 и 22500 циклов трибоиспытаний (а-исходное состояние; в-РКУП; д-РКУП и ТО 350° С; ж-РКУП и ТО 450° С) и профиль поверхности износа после 45 мин трибоиспытаний (б-исходное состояние; г-РКУП; е-РКУП и ТО 350° С; з-РКУП и ТО 450° С)

В целом, анализ макро- и микроизображений поверхностей износа образцов показывает, что наблюдаются все основные механизмы повреждения контактных зон: упругое и пластическое отеснение, микрорезание, выкрашивание, отслоение, вырывы. Преимущественным является механизм повреждения микрорезанием, обуславливаемый внедрением абразивных частиц

контртела в сталь и последующим их перемещением по ее поверхности с образованием борозд, канавок и рисок различной ширины.

### **Выводы:**

1. Интенсивная пластическая деформация стали 09Г2С методом холодного РКУП при 20° С привела к диспергированию ее структуры: минимальный размер карбидов ~300 нм, средний диаметр ферритного зерна 5 мкм, что в 2 раза ниже исходного. Специфика микростроения, распределения элементов второй фазы и субструктуры стали 09Г2С, внесенная холодным РКУП, обусловила при последующем нагреве в течение 1 часа в диапазоне умеренно высоких температур (250, 350, 450 и 550° С) снижение температуры начала рекристаллизации и сокращение времени, необходимого для ее завершения, то есть реализацию механизма низкотемпературной рекристаллизации, что также подтверждено изменением уровня и характера распределения микротвердости.
2. Анализ микроструктуры стали 09Г2С при рекристаллизационном отжиге до 450° С после РКУП показал, что продолжается уменьшение среднего размера ферритной фазы: минимальное среднее значение диаметра ферритных областей составило 1700 нм. Диспергирование карбидной фазы (до размеров менее 100 нм) наблюдается вплоть до температуры 550° С.
3. Проведенная мегапластическая деформация стали 09Г2С по режиму «РКУП и ТО при 350° С» обусловила переход ее в высокопрочное состояние: предел текучести  $\sigma_T$  и предел прочности  $\sigma_B$  при комнатной температуре увеличились втрое и составили соответственно 985 и 1400 МПа против 325 и 470 МПа для исходного состояния. При минус 40° С  $\sigma_T = \sigma_B = 990$  МПа. Отмечается сохранение характеристик пластичности при снижении температуры испытания: как при положительной, так и при отрицательной температурах испытания  $\delta = 3$  %. Для всех субмикронных состояний стали 09Г2С получено многократное увеличение ударной вязкости: КСВ при 20° С повысилась до 0,45–0,63 МДж·м<sup>-2</sup> по сравнению с 0,22 МДж·м<sup>-2</sup> в исходном крупнозернистом состоянии; при минус 40° С ударная вязкость сохранилась неизменной (в среднем, как и для исходного состояния, КСВ = 0,13 МДж·м<sup>-2</sup>).
4. Упрочнение субмикрокристаллической ферритной матрицы субмикронными и наноразмерными частицами цементита влияет на зарождение первичных микрокразрушений и на характер их объединения в односвязную поверхность. Высокие значения ударной вязкости структурированной стали 09Г2С обусловлены реализацией процесса разрушения с множественным зарождением начальных несплошностей, сопровождающегося интенсивным ветвлением микро- и макротрещин, увеличивающим рельефность излома, и энергоемкими микромеханизмами разрушения – вязким ямочным отрывом и дисперсным квазисколом.
5. Однозначность взаимосвязей электромагнитных и прочностных характеристик стали 09Г2С, упрочненной методом РКУП и ТО по различным режимам, позволяет оценивать величины прочности, качество заготовок и изделий из обрабатываемого материала с использованием параметров коэрцитивной силы, электросопротивления, характеристик магнитных шумов Баркгаузена и параметров вихретокового контроля.
6. Трибологические испытания в условиях трения скольжения показали, что РКУП стали 09Г2С при 20° С с последующим низкотемпературным отжигом, обуславливающее появление структур в виде субмикрокристаллической ферритной матрицы, армированной ультрадисперсными частицами карбида,

обеспечило снижение величины массового износа более чем в 10 раз по сравнению с исходным крупнозернистым состоянием материала при заданных условиях трибонагружения. Последующий низкотемпературный отжиг обеспечил дополнительное снижение массового износа в 2,2 раза.

7. Исследование высотных параметров шероховатости и опорных кривых поверхностей трения показало, что рост износостойкости стали 09Г2С с нано-, субмикронной структурой, сформированной при РКУП и последующей термической обработке, связан с образованием рельефа с меньшими колебаниями параметров Ra и Rz; график опорных кривых имеет бóльшую длину опорной поверхности, происходит оптимизация площадей вершин и впадин для заданных условий трения.

### **Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:**

1. Яковлева, С.П. Износостойкость и поверхность трения низколегированной стали с разным размером зерна / С.П. Яковлева, С.Н. Махарова, П.Г. Мордовской, М.З. Борисова, Г.Г. Винокуров // *Металлургия машиностроения.*–2011.– № 4. – С.26-29.
2. Яковлева, С.П. Влияние режимов объемного наноструктурирования мегапластической деформацией на свойства конструкционной стали / С.П. Яковлева, С.Н. Махарова, П.Г. Мордовской, М.З. Борисова // *Перспективные материалы.* – 2011. – №13. – С. 961-967.
3. Горкунов, Э.С. Влияние режимов равноканального углового прессования на механические и магнитные свойства стали 09Г2С / Э.С. Горкунов, С.М. Задворкин, Л.С. Горулева, Е.А. Путилова, И.Н. Веселов, С.П. Яковлева, С.Н. Махарова, П.Г. Мордовской// *Дефектоскопия.* – 2012. – №10.– С.18-27
4. Яковлева, С.П. Повышение износостойкости и рельеф поверхности трения ферритно-перлитной стали, наноструктурированной мегапластической деформацией / С.П. Яковлева, С.Н. Махарова, Г.Г. Винокуров, П.Г. Мордовской, Н.Ф. Стручков // *Фундаментальные исследования.* 2013. - № 10. - Ч.15. - С. 3451-3455.
5. Gorkunov E. S., Zadvorkin S. M., Goruleva L. S., Tueva E. A., Veselov I. N., Yakovleva S. P., Makharova S. N., Mordovskoi P. G. The effect of equal channel angular pressing on the mechanical and magnetic properties of 09 Gamma 2C steel *RUSSIAN JOURNAL OF NONDESTRUCTIVE TESTING*, 2012, V.48, P. 568 – 575
6. Яковлева, С.П. Комплексное повышение эксплуатационных свойств низколегированной стали путем объемного наноструктурирования / С.П. Яковлева, С.Н. Махарова, П.Г. Мордовской // *Успехи современного естествознания.* – 2011. – № 6. – С. 47-48.
7. Яковлева, С.П. Параметры фрикционной поверхности и износостойкость низколегированной стали с различным размером зерна / С.П. Яковлева, М.З. Борисова, П.Г. Мордовской//*Тр. V Евразийского симп. по проблемам прочности машин и материалов для регионов холодного климата «Eurastrencold–2010».*–Якутск,2010. – Ч. 1. – С. 285-292.
8. Яковлева, С.П. Механические свойства низколегированной стали после объемного наноструктурирования с применением холодной мегапластической деформации / С.П. Яковлева, С.Н. Махарова, М.З. Борисова, П.Г. Мордовской // *Тр. междунар. научно-техн. конф. «Нанотехнологии функциональных материалов».* –Санкт-Петербург, 2010. – С. 294-295.

9. Мордовской, П.Г. Повышение износостойкости при наноструктурировании низколегированной стали / П.Г. Мордовской, С.П. Яковлева, С.Н. Махарова // Сб. ст. науч. Конф. студентов, аспирантов и молодых ученых XV Лаврентьевские чтения посвященные 300 - летию со дня рождения М.В. Ломоносова. – Якутск, 2011. – С.93-96
10. Яковлева, С.П. Износостойкость и поверхность трения низколегированной стали с различным размером зерна / С.П. Яковлева, С.Н. Махарова, П.Г. Мордовской, М.З. Борисова, Г.Г. Винокуров // Матер. Междунар. научно-технич. конф. «Современное материаловедение и нанотехнологии». – Комсомольск-на-Амуре, 2010. – С. 497-501.
11. Яковлева, С.П. Формирование поверхностей износа образцов стали 09Г2С с различным уровнем дисперсности структурных составляющих / С.П. Яковлева, С.Н. Махарова, П.Г. Мордовской // Тез. докл. Междунар. конф. по физической мезомеханике, компьютерному конструированию и разработке новых материалов. –Томск, 2011. – С. 91.
12. Мордовской, П.Г. Повышение износостойкости ферритно-перлитной стали после холодного равноканального углового прессования / П.Г. Мордовской, С.П. Яковлева, С.Н. Махарова, А.В. Макаров //Тез. докл. Междунар. конф. по физической мезомеханике, компьютерному конструированию и разработке новых материалов. –Томск, 2011. – С. 224.
13. Горулева, Л.С. Оценка механических свойств стали 09Г2С, упрочненным равноканальным угловым прессованием, по магнитным параметрам // Л.С. Горулева, Э.С. Горкунов, С.М. Задворкин, Е.А. Туева, И.Н. Веселов, С.П. Яковлева, С.Н. Махарова, П.Г. Мордовской // Тез. докл. XIX всероссийской научно-техн. конф. по неразрушающему контролю и технической диагностике. – Самара, 2011. – С.90-93.
14. Яковлева С.П. Износостойкость и эволюция мезорельефа фрикционной поверхности наноструктурированной стали при трении скольжения / С.П. Яковлева, С.Н. Махарова, П.Г. Мордовской, М.З. Борисова, Н.Ф. Стручков // Сб. тр. VI Евразийской научно-практ. конф. «Прочность неоднородных структур». – Москва, 2012. – С. 61.
15. Мордовской, П.Г. Взаимосвязь физических и прочностных свойств низкоуглеродистой стали после объемного наноструктурирования / П.Г. Мордовской// Физико-химия и технология неорганических материалов: IX Российская ежегодная конф. молодых научных сотрудников и аспирантов. ИММ А.А. Байкова РАН. (23-26 октября 2012 года, Москва). – Москва. – С.66-68.
16. Mordovskoi P.G., Borisiva M.Z., Yakovleva S.P., Maharova S.N. Application of the submicron- abd nanostructured cold-resistant steel for production of hardware for the far north vetal designs// Сб. мат. IV Межд. конф. с элементами научной школы для молодежи «Функциональные материалы и высокочистые вещества. – Суздаль, 2012. – С. 25-26
17. Мордовской, П.Г. Влияние объемного наноструктурирования на трибологические характеристики низкоуглеродистой стали / П.Г. Мордовской, С.П. Яковлева, С.Н. Махарова, А.В. Макаров // Тр. межд. научно-технической конф. Нанотехнологии функциональных материалов. – Санкт-Петербург, 2012. – С.259-262.
18. Мордовской, П.Г. Обоснование повышения износостойкости наноматериалов на основе энергетической теории трения / П.Г. Мордовской // Сб.

мат. Всероссийская молодежная научная школа «Химия и технология полимерных и композиционных материалов». – Москва, 2012 г. – С.215

19. Яковлева, С.П. Изменение микростроения наноструктурированной стали при имитации термического цикла сварки / С.П. Яковлева, С.Н. Махарова, М.З. Борисова, П.Г. Мордовской // Мат. Всесоюзной научно-практической конференции «Сварка и безопасность». – г. Якутск, 2012 – Т.1. – С.225-231.

20. Мордовской, П.Г. Влияние равноканального углового прессования на трибологические характеристики низкоуглеродистой стали 09Г2С / П.Г. Мордовской, С.П. Яковлева, С.Н. Махарова, Г.Г. Винокуров // Тр. VI Евразийского симпоз. по проблемам прочности машин и материалов для регионов холодного климата «Eurastrencold-2013». – Якутск, 2013. – Т.2. – С. 277-284.

21. Борисова, М.З. Устойчивость субмикронных и наноструктур в стали 09Г2С при деформационно-термических условиях, создаваемых различными видами металлообработки / М.З. Борисова, С.П. Яковлева, С.Н. Махарова, П.Г. Мордовской // Тр. VI Евразийского симпоз. по проблемам прочности машин и материалов для регионов холодного «Eurastrencold-2013». – Якутск, 2013. – Т.2. – С. 285-289.

22. Мордовской, П.Г. Исследование опорных кривых профиля шероховатости поверхности трения стали наноструктурированной методом равноканального углового прессования и термической обработки / П.Г. Мордовской, С.П. Яковлева, С.Н. Махарова // Тр. межд. научн.-техн. конф. Современные металлические материалы и технологии (СММТ2013). – Санкт-Петербург, 2013. – С. 465-467.

23. Мордовской, П.Г. Микроструктура и распределение углерода после объемного наноструктурирования конструкционной стали 09Г2С / П.Г. Мордовской, С.П. Яковлева, С.Н. Махарова // Сб. ст. по материалам XXXII межд. научн.-практ. конф. «Технические науки – от теории к практике». – Новосибирск, 2014. – С.56-61.

Отпечатано ООО «ПринтСервис»  
Заказ №10, Тираж 100 экз.  
677027, г. Якутск, ул. Горького 100, тел.:36-20-72