

На правах рукописи



**Балахнин Александр Николаевич**

**ФОРМИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ ЗАКАЛЕННЫХ  
КОНСТРУКЦИОННЫХ НИЗКОУГЛЕРОДИСТЫХ СТАЛЕЙ ПРИ  
ХОЛОДНОЙ РАДИАЛЬНОЙ КОВКЕ И ПОСЛЕДУЮЩЕМ  
ТЕРМИЧЕСКОМ ВОЗДЕЙСТВИИ**

05.16.09 – Материаловедение (металлургия)

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Пермь – 2015

Работа выполнена в ФГБОУ ВПО "Пермский национальный исследовательский политехнический университет"

**Научный руководитель:** доктор технических наук, доцент  
**Симонов Юрий Николаевич**

**Официальные оппоненты:** доктор технических наук, профессор  
**Копцева Наталья Васильевна,**  
профессор кафедры "Литейное производство и материаловедение" ФГБОУ ВПО "Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова" (г. Магнитогорск)

доктор технических наук, доцент  
**Швейкин Владимир Павлович**  
Заместитель директора по научной работе  
ФГБУН "Институт машиноведения Уральского отделения Российской академии наук"  
(г. Екатеринбург)

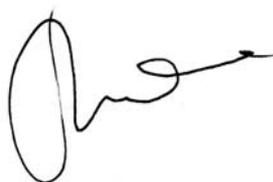
**Ведущее предприятие:** ФГБОУ ВПО "Новосибирский государственный технический университет" (г. Новосибирск)

Защита диссертации состоится 25 декабря 2015 г. в 12.00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.188.10 на базе ФГБОУ ВПО "Пермский национальный исследовательский политехнический университет" по адресу: 614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29., ауд. 423

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Пермского национального исследовательского политехнического университета (<http://pstu.ru/>).

Автореферат разослан " \_\_\_\_ " ноября 2015 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета Д 212.188.10,  
доктор технических наук, доцент



Е.В. Матыгулина

### **Актуальность.**

Актуальной задачей материаловедения является повышение уровня прочности и надежности используемых материалов. В условиях непрерывно увеличивающегося спроса на конструкционные материалы с высокой удельной прочностью и одновременно – высокой надежностью, в первую очередь в области для изготовления тяжело нагруженных и высоко ответственных деталей, особую актуальность приобретает проблема повышения уровня прочности и надежности используемых материалов.

Единственным способом одновременного повышения прочности и сопротивления хрупкому разрушению материала является измельчение структуры, то есть реализация зерногранично-субструктурного механизма упрочнения. Следует отметить, что чем более неравновесное структурное состояние с высокой плотностью дефектов кристаллического строения будет получено в материале при механической или термической обработке, тем больше механизмов релаксации и, следовательно, возможностей воздействия на процесс структурообразования будет доступно.

Эффективным промышленным способом диспергирования структуры является холодная пластическая деформация (ХПД) методом радиальнойковки (РК). ХПД приводит к увеличению плотности дислокаций и образованию дополнительных субгранц при эволюции и самоорганизации дислокационной подсистемы в стали, а метод РК, благодаря мягкой схеме нагружения и деформирования, позволяет реализовать высокие степени деформации без разрушения материала. ХПД методом РК целесообразно подвергать стали со структурой пакетного мартенсита, отличающиеся после закалки высокой плотностью дислокаций и большим количеством границ и субгранц, а также характеризующихся высоким уровнем прочности и надежности.

Проведение термической обработки, реализующей процессы первичной рекристаллизации (рекристаллизационный отжиг) или фазового и термического наклепа (термоциклическая обработка), позволит добиться дальнейшего измельчения структуры холоднодеформированных сталей. Для сохранения в ходе нагрева при термической обработке неравновесного высокодефектного состояния необходимо использовать материалы, в которых процессы диффузии, контролирующей механизмы приближения системы к равновесному состоянию, максимально затруднены. К таким материалам относятся конструкционные низкоуглеродистые системно-легированные стали, в которых реализован принцип легирования, приводящий к более эффективному, по сравнению с другими системами легирования, сдерживанию диффузионных процессов.

Таким образом, для получения в конструкционных системно-легированных низкоуглеродистых сталях со структурой пакетного мартенсита состояния с высоким уровнем прочности и надежности, необходимо подвергать их ХПД методом РК с большими степенями обжатия и последующей термической обработке для реализации первичной рекристаллизации или фазового и термического наклепа.

Для эффективной разработки промышленных технологий повышения уровня конструкционной прочности и надежности необходимо изучить закономерности формирования структуры и свойств закаленных конструкционных низкоуглеродистых сталей при холодной радиальной ковке и последующем термическом воздействии.

Работа выполнена в соответствии с основными направлениями научной деятельности кафедры "Металловедение, термическая и лазерная обработка металлов" ПНИПУ в рамках госбюджетных научно-исследовательских работ: федеральная целевая программа "Научные и научно-педагогические кадры инновационной России" на 2009 – 2013 годы по теме "Разработка технологии получения высокопрочных наноструктурных конструкционных низкоуглеродистых сталей с износостойкими наноструктурированными покрытиями" (согл. № 14.В37.21.1638); государственное задание по теме "Исследование процессов формирования ультрамелкозернистого и нанозернистого состояния в сплавах на основе железа различных систем легирования в условиях термического и механо-термического воздействия" (номер госрегистрации 01201164046); государственное задание по теме "Наноструктурирование системно-легированных сплавов железа в условиях скоростного циклического термического воздействия" (номер госрегистрации 01200850515).

**Цель и задачи исследования.** Цель работы заключается в установлении закономерностей эволюции структуры и свойств закаленных конструкционных низкоуглеродистых сталей 10X3Г3МФ и 10X3Г3МФТ при холодной радиальной ковке и последующей термической обработке.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Изучить эволюцию структуры и механических свойств низкоуглеродистых сталей 10X3Г3МФ и 10X3Г3МФТ со структурой пакетного мартенсита при различных режимах холодной пластической деформации методом радиальнойковки.

2. Исследовать процессы формирования структуры и свойств при последеформационных отжигах при температурах 350 – 600 °С холоднодеформированных конструкционных низкоуглеродистых сталей 10X3Г3МФ и 10X3Г3МФТ.

3. Установить закономерности структурообразования и эволюции механических свойств при термоциклической обработке холоднокованой стали 10X3Г3МФТ.

#### **Научная новизна.**

1. Установлено, что после холодной пластической деформации со степенью 60%, реализованной методом радиальнойковки, в прутках из конструкционных низкоуглеродистых сталей с исходной структурой пакетного мартенсита наблюдаются признаки протекания холодной динамической рекристаллизации, что позволяет сделать вывод о реализации в локальных объемах материала интенсивной пластической (мегапластической) деформации при данном режиме обработки.

2. Расширено представление о тормозящем влиянии титана на процессы рекристаллизации в низкоуглеродистых сталях: установлено, что наличие титана в количестве 0,02% в сталях системы легирования 10X3Г3МФ(Т), подвергнутых холодной радиальной ковке с расчетной степенью деформации 60%, приводит к замедлению рекристаллизационных процессов в ходе последеформационных нагревов в интервале температур 350–600 °С.

3. Расширено представление о развитии процессов деформационного старения мартенсита: показана возможность протекания процессов деформационного старения в низкоуглеродистых системно легированных сталях типа 10X3Г3МФ(Т) с исходной структурой пакетного мартенсита, подвергнутых холодной радиальной ковке с расчетной степенью деформации 60% и последующей термической обработке.

4. Установлено, что технологии комплексной деформационно-термической обработки, заключающиеся в последовательном сочетании холодной радиальнойковки с расчетной степенью деформации 60% и термической обработки, являются эффективным способом формирования ультрамелкозернистого и наноструктурного состояния в низкоуглеродистых сталях типа 10X3Г3МФ(Т) с исходной структурой пакетного мартенсита. Реализация УМЗ состояния в сталях 10X3Г3МФ и 10X3Г3МФТ после обработки по оптимальному режиму "ХПД 60%РК + отжиг 550°С" позволяет повысить предел текучести  $\sigma_{0,2}$  исходно закаленных сталей 10X3Г3МФ и 10X3Г3МФТ на 25–37%, уровень ударной вязкости *KCU* на 25–30%, а ударную вязкость *KCT* – в 3 раза при сохранении высоко уровня прочности и пластичности исходно закаленного состояния. Проведение обработки по режиму "ХПД 60% + интенсивная термическая обработка 900 °С" позволяет в результате реализации наноструктурного состояния повысить ударную вязкость *KCT* исходно закаленной стали 10X3Г3МФТ в 2,7 раза, ударную вязкость *KCU* – на 12%, предел текучести  $\sigma_{0,2}$  – на 30% при сохранении высоких значений предела прочности.

#### **Практическая значимость.**

1. Разработана промышленная технология комплексной деформационно-термической обработки, заключающаяся в последовательном сочетании холодной пластической деформации методом радиальнойковки и рекристаллизационного отжига конструкционных низкоуглеродистых сталей со структурой пакетного мартенсита, позволяющая существенно диспергировать их структуру и тем самым значительно повысить уровень прочности и надежности.

2. Разработана и опробована технология комплексной обработки, заключающаяся в ускоренном печном нагреве, короткой выдержке и последующем быстром охлаждении конструкционных низкоуглеродистых сталей, предварительно подвергнутых холодной пластической деформации методом радиальнойковки в исходно закаленном состоянии. Данная технология позволяет получить ультрамелкозернистое состояние в стали 10X3Г3МФТ со средним размером зерна аустенита 3 мкм с последующим получением наноструктурного состояния пакетного мартенсита со средним поперечным размером рейки  $80 \pm 10$  нм,

что приводит к повышению удельной работы распространения трещины КСТ в стали 10Х3Г3МФТ в 2,7 раза при увеличении прочностных характеристик в пределах 20% и сохранении высокого уровня пластичности исходно закаленного состояния.

3. Разработана методика для усредненной оценки распределения микротвердости по сечению прутков конструкционных сталей, подвергнутых радиальной ковке. Предлагаемая методика позволяет получать усредненные кривые распределения микротвердости, что существенно повышает точность и надежность анализа тенденций изменения твердости на различных этапах обработки, а также позволяет сопоставлять распределение микротвердости по сечению на образцах различного диаметра.

**На защиту выносятся следующие основные положения и результаты работы.**

1. Закономерности и особенности изменения структуры и свойств исходно закаленных конструкционных низкоуглеродистых сталей 10Х3Г3МФ и 10Х3Г3МФТ при различных режимах холодной пластической деформации методом радиальнойковки.

2. Эволюция структуры и механических свойств конструкционных сталей 10Х3Г3МФ и 10Х3Г3МФТ при различных режимах комплексной деформационно-термической обработки, включающей в себя холодную пластическую деформацию методом радиальнойковки исходно закаленных сталей и последующий рекристаллизационный отжиг.

3. Развитие структуры и механических свойств исходно закаленной и холоднодеформированной стали 10Х3Г3МФТ в ходе многократной интенсивной термической обработки.

#### **Апробация работы.**

Основные результаты диссертационной работы были представлены и обсуждались на VIII Конференции молодых ученых "КоМУ-2010" (Ижевск, 2010), на Международной научно-практической конференции "Инновационные технологии в машиностроении" (Пермь, 2012), на XXI Уральской школе металлургов-термистов "Актуальные проблемы физического металловедения сталей и сплавов" (Магнитогорск, 2012), на XIII Международной научно-технической Уральской школе-семинаре молодых ученых-металловедов (Екатеринбурга, 2012), на Четвертой международной конференции "От наноструктур, наноматериалов и нанотехнологий к nanoиндустрии" (Ижевск, 2013), на XXII Уральской школе металлургов-термистов "Актуальные проблемы физического металловедения сталей и сплавов" (Оренбург, 2014), на II научно-практической конференции с международным участием "Инновационные технологии в машиностроении и материаловедении" (Пермь, 2014).

#### **Личный вклад автора**

Представленные в работе результаты получены лично автором или при его непосредственном участии.

Анализ литературных источников, термическая обработка образцов, экспериментальные исследования, а также обработка и анализ результатов экспе-

риментов выполнены лично автором. Электронно-микроскопические исследования проведены при участии автора. Методики количественного микроструктурного и электронно-микроскопического анализа разработаны непосредственно автором. Постановка задач исследований и обсуждение результатов проведено при непосредственном участии автора совместно с научным руководителем и соавторами публикаций.

**Достоверность** полученных и представленных в диссертации результатов подтверждается использованием современных независимых, взаимодополняющих физических методов исследования, большим объемом непротиворечивых экспериментальных данных, согласованностью с данными теоретических исследований. Анализ экспериментальных данных проведен с соблюдением критериев достоверности измерений.

**Публикации.** По материалам диссертации опубликовано 23 печатных работ, основное содержание диссертации представлено в 20 работах, в том числе 9 – в изданиях, рекомендованных ВАК РФ. Получен патент № 2532600 на изобретение "Способ упрочнения крепежных изделий из низкоуглеродистой стали".

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, 5 глав, списка литературы; изложена на 158 страницах, включает 54 рисунка, 12 таблиц и 2 приложения. Список литературы содержит 158 наименований.

Автор выражает благодарность ст. преподавателю Панову Д.О., к.т.н., доценту Смирнову А.И., к.т.н., доценту Никулиной А.А., Перцеву А.С., сотрудникам кафедры "Металловедение, термическая и лазерная обработка" Пермского национального исследовательского политехнического университета за помощь и поддержку, оказанные при выполнении работы.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность работы и определены основные направления исследований, представлена научная новизна и практическая значимость.

В **первой главе** приведен аналитический обзор литературных источников по проблеме диспергирования структуры сталей с исходной структурой пакетного мартенсита при холодной пластической деформации и последующей термической обработке.

Описаны особенности структуры, свойств и процессов пластической деформации пакетного мартенсита. Рассмотрены различные этапы эволюции дислокационной структуры металлов и сплавов при их пластической и мегапластической (интенсивной пластической) деформации и последующем нагреве. Приведены свидетельства протекания динамической рекристаллизации в ходе пластической деформации при комнатной температуре. Показано, что холодная пластическая деформация (ХПД) методом радиальнойковки (РК) в сочетании с последующей термической обработкой является эффективным и технологичным промышленным методом обработки промышленных заготовок. Представлен новый перспективный класс сталей – системно-легированные низкоуглеро-

дистые мартенситные стали, раскрыт принцип сбалансированного легирования, обоснован выбор материалов исследования.

Во **второй главе** приведено описание материалов и методик исследования. В качестве материалов исследования выбраны конструкционные системно-легированные стали с различным содержанием титана (табл.1):

Таблица 1. Химический состав материалов исследования

№	Марка стали	Содержание химических элемента, % (масс.)										
		C	Si	Mn	Cr	Ni	V	Mo	Cu	S	P	Ti
1	10X3Г3МФ	0,09	0,38	2,78	2,79	0,17	0,13	0,43	0,19	0,012	0,023	0,002
2	10X3Г3МФТ <sup>1</sup>	0,09	0,40	2,65	2,81	0,17	0,13	0,43	0,18	0,011	0,018	0,02

После выплавки и кристаллизации, слитки подвергали горячей прокатке на диаметр 65 мм и последующей свободной ковке (температура ковки в интервале 950 – 1100 °С) с получением прутка диаметром Ø 18,5 ± 0,5 мм (19 мм). При охлаждении на воздухе с температур горячей ковки исследуемые стали претерпевали мартенситное превращение вследствие высокой устойчивости переохлажденного аустенита. Данное состояние в работе рассматривается как исходное и обозначается "исходно закаленное" или "исходно горячекованое".

ХПД исходно закаленных сталей осуществляли на радиально-ковочной машине по режиму: скорость подачи заготовки 180 мм/мин, скорость вращения заготовки 25 об/мин, скорость ударов бойков 1000 уд/мин, в процессе ковки заготовка непрерывно охлаждалась водой. Ковку производили в 3 последовательных перехода с круга Ø 18,5±0,5 мм на круг Ø 16±0,2 мм, с круга Ø 16 мм на круг Ø 14±0,2 мм, с круга Ø 14 мм на круг Ø 12±0,2 мм – что позволило реализовать расчетную степень деформации 20, 40 и 60% относительно исходного состояния. Заготовки длиной 11±0,5 мм под образцы для изучения структуры стали и заготовки длиной 100±1 мм под образцы для испытаний механических свойств изготавливали холодной резкой в плоскости перпендикулярной оси прутка исследуемой стали на ленточной пиле с охлаждением заготовки.

При изучении эволюции структуры холоднодеформированных сталей 10X3Г3МФ и 10X3Г3МФТ в ходе рекристаллизационных отжигов термическую обработку образцов производили по следующему режиму: посадка образцов в горячую печь; время выдержки – 1 час для стали 10X3Г3МФ, 2 часа – для стали 10X3Г3МФТ; температуру нагрева варьировали от 350 до 600 °С с шагом 50 °С; охлаждение производили на воздухе.

Интенсивная термическая обработка (ИТО) холоднокованой стали заключалась в ускоренном печном нагреве ( $v_{\text{нагрева}}=4$  °С/с, посадка образцов в печь, прогрев до температуры выдержки), короткой аустенитизации (5 минут), охлаждение в воде.

Температура нагрева составляла 900 и 1000 °С. Термоциклическая обработка (ТЦО) заключалась в последовательной реализации  $n$  циклов ИТО. Число циклов  $n$  варьировали от 1 до 7. Для оценки склонности конструкционных низ-

<sup>1</sup> Низкоуглеродистая легированная сталь: пат. 2477333 Рос. Федерации: МПК: С22 С38/38 / Симонов Ю.Н., Панов Д.О., Симонов М.Ю., Касаткин А.В., Подузов Д.П.; заявитель и патентообладатель Перм. нац. исслед. политехн. ун-т. – 2011135998/02; заявл. 29.08.2011; опублик. 10.03.2013 Бюль. №7. 10 с.

коуглеродистых сталей 10Х3Г3МФ и 10Х3Г3МФТ к росту аустенитного зерна, образцы из исследуемых сталей подвергали печному нагреву до температур в интервале от 930 до 1200 °С с выдержкой в течение 30 минут и последующем охлаждением в воде.

Металлографические исследования проводили на травленых микрошлифах с помощью световых микроскопов МИМ-8 и Olympus GX 51 при увеличении до 2500 крат. Границы аустенитных зерен выявляли по методике модифицированного метода окисления. Размер зерен определяли по ГОСТ 5639–82. Тонкую структуру исследовали на просвечивающем электронном микроскопе Technai G2 FEI при ускоряющем напряжении 200 кВ.

Испытания твердости проводили по методу Роквелла в соответствии с ГОСТ 9013-59 в единицах HRA, HRB и HRC. Доверительный интервал составил  $\pm 1$  единица. Результаты измерения твердости получены как среднее арифметическое 3 – 4 измерений. Для сопоставления результатов измерений по разным шкалам осуществляли перевод единиц твердости HRC, HRB и HRA в единицы HB. Измерение микротвердости проводили согласно ГОСТ 9450-76 на микротвердомере DuraScan70 по методу восстановленного отпечатка вдавливанием четырехгранной алмазной пирамиды с квадратным основанием при нагрузке 2 Н. Для оценки однородности распределения микротвердости по сечению исследуемых образцов различного диаметра использовали специально разработанную авторскую методику.

Дилатометрические исследования проводили на закалочном дилатометре Linseis RITA L78 с индукционным датчиком продольного перемещения Schaevitz HR100MC. Нагрев проводили в атмосфере гелия, со скоростью 4 °С/с, соответствующей скорости печного нагрева при посадке образцов в горячую печь. ТЦО дилатометрических образцов проводили на 900 и 1000 °С, с выдержкой 5 с и последующим охлаждением со скоростью 100 °С/с.

Исследование плотности дислокаций проводили методом рентгеноструктурного анализа на рентгеновском дифрактометре ДРОН-3М.

Испытания на одноосное растяжение проводили на стандартных пятикратных цилиндрических образцах типа III № 7 согласно ГОСТ 1497-84 с использованием универсальной гидравлической системы для статических испытаний "INSTRON-SATEC 300 LX".

Испытания на ударный изгиб проводили при комнатной температуре на маятниковом копре МК-30 в соответствии с ГОСТ 9454-78 на стандартных образцах с концентратором типа U (образец 5x10x55 мм тип 3 ГОСТ 9454-78) и образцах с усталостной трещиной (образец 5x11x55 мм тип 17 ГОСТ 9454-78).

Микромеханизмы разрушения исследовали с использованием растрового электронного микроскопа Carl Zeiss EVO50 при увеличениях до 15000 крат и ускоряющем напряжении 30 кВ.

**В третьей главе** представлены результаты исследования влияния ХПД со степенью 20, 40 и 60% методом РК на микроструктуру, тонкую структуру, механические свойства и однородность распределения микротвердости по сечению исходно закаленных прутков сталей 10Х3Г3МФ и 10Х3Г3МФТ. Проведение

ние ХПД методом РК приводит к фрагментации мартенситных реек сталей 10X3Г3МФ и 10X3Г3МФТ в результате самоорганизации дислокационной структуры, направленной на диссипацию энергии деформации: движение дислокаций приводит к образованию стенок (субграниц) деформационных ячеек, объемы которых очищены от дислокаций. Проведение ХПД 60% РК приводит к существенному диспергированию структуры исследуемых сталей: средний поперечный размер рейки мартенсита в плоскости фольги стали 10X3Г3МФ уменьшился на 46% (с  $355 \pm 30$  до  $190 \pm 15$  нм), а в стали 10X3Г3МФТ – на 52% (с  $335 \pm 20$  до  $150 \pm 10$  нм), по сравнению с исходно закаленным состоянием. При этом средний размер образовавшихся после РК ячеек деформации в сталях 10X3Г3МФ и 10X3Г3МФТ составил  $165 \pm 10$  и  $125 \pm 10$  нм, соответственно.

При анализе тонкой структуры исходно закаленных сталей, подвергнутых ХПД 60% методом РК, были обнаружены признаки протекания холодной динамической рекристаллизации – рекристаллизованные зерна с границей, близкой к равновесной, и отсутствием дислокаций внутри.

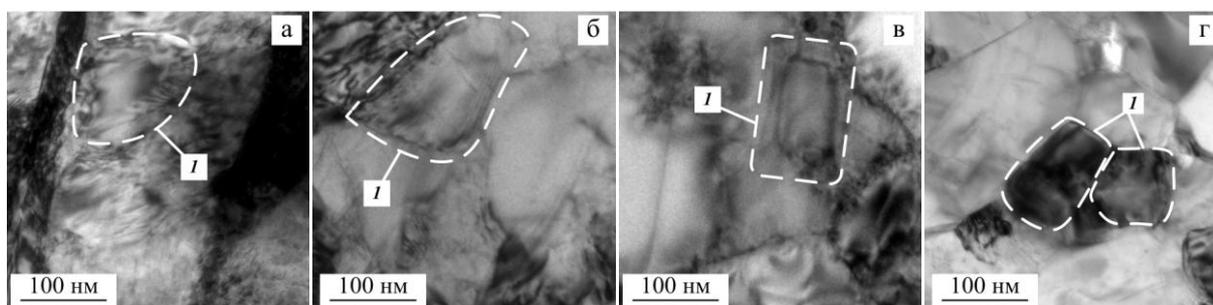


Рис. 1 Структура сталей 10X3Г3МФ (а, б) и 10X3Г3МФТ (в, г) после ХПД 60% методом РК, светлопольные изображения. I – зерна динамической рекристаллизации

Факт обнаружения признаков холодной динамической рекристаллизации свидетельствует о возможности реализации в локальных объемах обрабатываемого материала мегапластической (интенсивной пластической) деформации при холодной РК с расчетной степенью деформации  $\varepsilon = 60\%$ .

Таблица 2. Механические свойства сталей 10X3Г3МФ и 10X3Г3МФТ после различных режимов обработки

Режим обработки	$\sigma_{0,2}$	$\sigma_b$	$\delta$	$\psi$	КСУ	КСТ
	МПа		%		МДж/м <sup>2</sup>	
Сталь 10X3Г3МФ						
исходно закаленное состояние	940	1290	16	63	1,30	0,21
ХПД 60% методом РК	1790	1790	7	53	1,32	0,55
Сталь 10X3Г3МФТ						
исходно закаленное состояние	910	1250	16	59	1,32	0,35
ХПД 60% методом РК	1618	1620	7	53	1,39	0,82

МикродюрOMETрические исследования показали, что ХПД методом РК приводит к формированию двух областей по сечению исходно закаленных прутков сталей 10X3Г3МФ и 10X3Г3МФТ: сердцевины с максимальным уровнем твердости и периферии, где твердость плавно снижается по направлению от центра к краю. При этом увеличение степени деформации при РК приводит к повышению общего уровня твердости исследуемых сталей.

Установлено, что холодная РК является эффективным способом повышения прочности сталей с исходной структурой пакетного мартенсита (табл.2): после ХПД 60% РК предел прочности  $\sigma_b$  стали 10X3Г3МФ увеличивается на 39%, а стали 10X3Г3МФТ – на 30%; ударная вязкость  $KCT$  стали 10X3Г3МФ возрастает в 2,6 раза с 0,21 до 0,55 МДж/м<sup>2</sup>, а стали 10X3Г3МФТ – возрастает в 2,3 раза с 0,35 до 0,82 МДж/м<sup>2</sup>. Установлено, что диаграммы одноосного растяжения образцов исследуемых сталей после ХПД 60% методом РК характеризуются отсутствием участка равномерной пластической деформации и наличием ярко выраженного максимума ("зуба"), природа которого обусловлена процессами деформационного старения – формированием атмосфер Коттрелла и образованием ультрадисперсных карбидов, затрудняющих старт движения дислокаций.



Рис. 2 Макрорельеф, профиль изломов и распределение микротвердости по сечению образцов сталей 10X3Г3МФ (а) и 10X3Г3МФТ (б), подвергнутых ХПД 60% методом РК, после испытаний на ударный изгиб.

Значительный рост ударной вязкости  $KCT$  исследуемых сталей после ХПД 60% методом РК обусловлен сменной микромеханизма разрушения с квазискола на вязкое разрушение в результате диспергирования структуры и характером распределения микротвердости: при разрушении образца трещина меняет направление своего распространения на границах "периферия – упрочненная сердцевина", что приводит к увеличению пути и, соответственно, работы распространения трещины.

В четвертой главе приведены результаты исследования эволюции структуры и механических свойств исходно закаленных сталей 10X3Г3МФ и 10X3Г3МФТ после комплексной деформационно-термической обработки (ДТО), заключающейся в последовательной реализации ХПД 60% методом РК и рекристаллизационного отжига в интервале температур 350–600 °С. В качестве длительности отжига (1 час для стали 10X3Г3МФ и 2 часа для стали 10X3Г3МФТ) выбрано минимальное время, после которого прекращается снижение и наблюдается стабилизация твердости.

По результатам различных методов исследования показано, что комплексная ДТО по режимам "ХПД 60% + отжиг при 450 или 550 °С" является эффективным способом формирования в сталях системы легирования 10X3Г3МФ(Т) ультрамелкозернистой (УМЗ) структуры со средним размером элементов субструктуры в пределах 150–200 нм. Показано, что при ДТО в исследуемых сталях в интервале температур 350–450 °С протекают процессы полигонизации, в интервале 500–550 °С – первичная рекристаллизация, а при температуре 600 °С и выше – собирательная рекристаллизация. Установлено, что при аналогичных условиях обработки в стали 10X3Г3МФТ формируется более дисперсная и однородная структура, чем в стали 10X3Г3МФ, что обусловлено тормозящим действием титана на процессы рекристаллизации.

Обработка по оптимальному режиму "ХПД 60%+отжиг 550 °С" вызывает качественное изменение вида диаграмм одноосного растяжения исходно холоднокованных сталей 10Х3Г3МФ и 10Х3Г3МФТ (рис. 3): диаграмма приобретает вид, типичный для материалов с УМЗ структурой – протяженный участок равномерной пластической деформации, предел текучести  $\sigma_{0,2}$  по своему значению близок к временному сопротивлению разрыву  $\sigma_B$ .

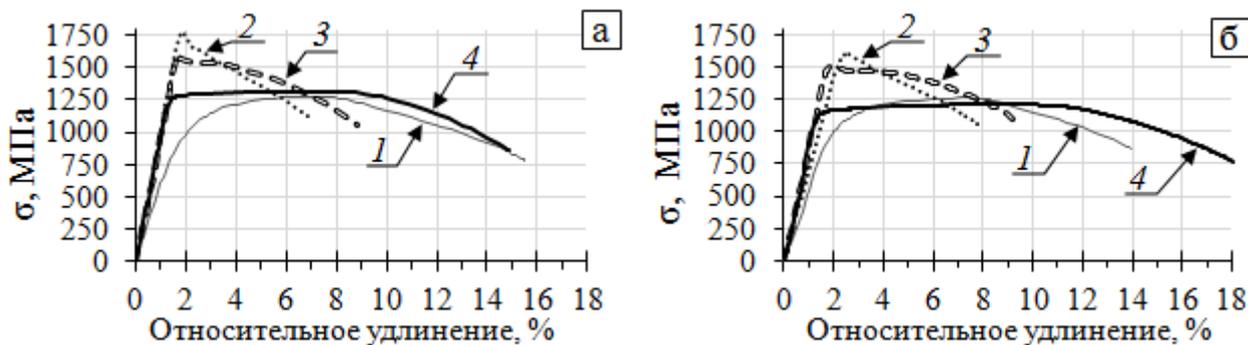


Рис. 3 Диаграммы одноосного растяжения образцов сталей 10Х3Г3МФ (а) и 10Х3Г3МФТ (б): 1 – исходно закаленное состояние; 2 – ХПД 60% РК; 3 – ХПД 60% РК + отжиг 450 °С; 4 – ХПД 60% РК + отжиг 550 °С

Выявлено, что проведение отжига в рамках комплексной ДТО исследуемых сталей вызывает уменьшение высоты и постепенное исчезновение "зуба" с диаграмм одноосного растяжения по мере увеличения температуры отжига. Причина данного явления заключается в совместном влиянии двух факторов: эволюции дислокационной структуры в результате процессов рекристаллизации и коагуляции карбидов.

Установлено, что технология комплексной ДТО, проведенная по оптимальному режиму "ХПД 60% РК + отжиг 550 °С" позволяет за счет реализации УМЗ состояния существенно повысить комплекс механических свойств исходно закаленных сталей 10Х3Г3МФ и 10Х3Г3МФТ при сохранении высокой прочности и пластичности (табл. 3): предел текучести  $\sigma_{0,2}$  возрастает на 25–37% (с 940 и 910 до 1290 и 1140 МПа, соответственно), уровень ударной вязкости  $KCU$  – на 25–30% (с 1,30 и 1,32 до 1,64 и 1,71 МДж/м<sup>2</sup>, соответственно), а ударная вязкость  $KCT$  – в 3 раза (с 0,21 и 0,35 до 0,63 и 1,09 МДж/м<sup>2</sup>, соответственно).

Таблица 3. Механические свойства сталей 10Х3Г3МФ и 10Х3Г3МФТ после различных режимов деформационно-термической обработки

Режим обработки	$\sigma_{0,2}$	$\sigma_B$	$\delta$	$\psi$	$KCU$	$KCT$
	МПа		%		МДж/м <sup>2</sup>	
Сталь 10Х3Г3МФ						
ХПД 60% РК + отжиг 450 °С	1609	1609	9	55	1,18	0,98
ХПД 60% РК + отжиг 550 °С	1290	1326	16	55	1,64	0,63
Сталь 10Х3Г3МФТ						
ХПД 60% РК + отжиг 450 °С	1493	1497	7	53	1,22	0,75
ХПД 60% РК + отжиг 550 °С	1138	1206	15	58	1,71	1,09

Фрактографический и микродюрOMETрический анализ образцов исследуемых сталей после комплексной ДТО выявили наследование характера рас-

пределения микротвердости, сформированного на стадии холодной РК: в сечении прутков присутствуют упрочненная сердцевина и периферия со снижающейся твердостью. Такое распределение микротвердости, как и в случае холоднокованого состояния, способствует повышению ударной вязкости *KCT*.

**В пятой главе** установлены закономерности структурообразования и эволюции механических свойств при интенсивной термической и термоциклической обработке холоднокованой стали 10X3Г3МФТ.

Экспериментально показано, что более перспективной для упрочнения методами ТЦО является сталь 10X3Г3МФТ с меньшей склонностью к росту зерна аустенита в интервале температур 930 – 1200 °С.

Металлографический анализ показал, что при ТЦО 900 и 1000 °С предварительно холоднокованой стали 10X3Г3МФТ наибольший эффект диспергирования структуры достигается на первом цикле обработки (средний размер зерна аустенита в исходном состоянии  $12,0 \pm 0,5$  мкм, после ИТО 900 °С  $3,0 \pm 0,1$  мкм, после ИТО 1000 °С  $6,2 \pm 0,3$  мкм), а последующие циклы приводят к росту и стабилизации размера зерна аустенита на уровне 4–5 мкм при многократной ТЦО 900 °С и на уровне 7–8 мкм при ТЦО 1000 °С. Таким образом, наиболее перспективной с точки зрения диспергирования структуры и повышения комплекса механических свойств стали 10X3Г3МФТ является однократная ИТО. Установлено, что ТЦО на 900 °С приводит к снижению в холоднокованой стали 10X3Г3МФТ положения мартенситных точек  $M_n$  и  $M_k$  на первом цикле обработки с последующей стабилизацией их положения, изменения положения критических точек  $A_{c1}$  и  $A_{c3}$  не обнаружено.

Установлено, что комплексная ИТО является эффективной технологией диспергирования структуры исходно закаленной и холоднокованой (рис.4, а, в) стали 10X3Г3МФТ. Обработка по режиму "ХПД 60% РК + ИТО 900°С" позволяет реализовать в стали 10X3Г3МФТ наноструктурное состояние со средним поперечным размером мартенситной рейки  $80 \pm 10$  нм (рис. 4, в). Повышение температуры ИТО до 1000 °С (рис. 4, з) приводит к увеличению среднего поперечного размера мартенситной рейки до  $290 \pm 20$  нм

При однократной ТЦО исходно холоднокованой (рис. 4, б) стали 10X3Г3МФТ формируется наноструктурное состояние мартенсита (рис. 4, в) со средним поперечным размером мартенситной рейки в плоскости фольги  $80 \pm 10$  нм. Повышение температуры ТЦО до 1000 °С (рис. 4, з) приводит к получению структуры мартенсита со средним поперечным размером рейки  $290 \pm 20$  нм.

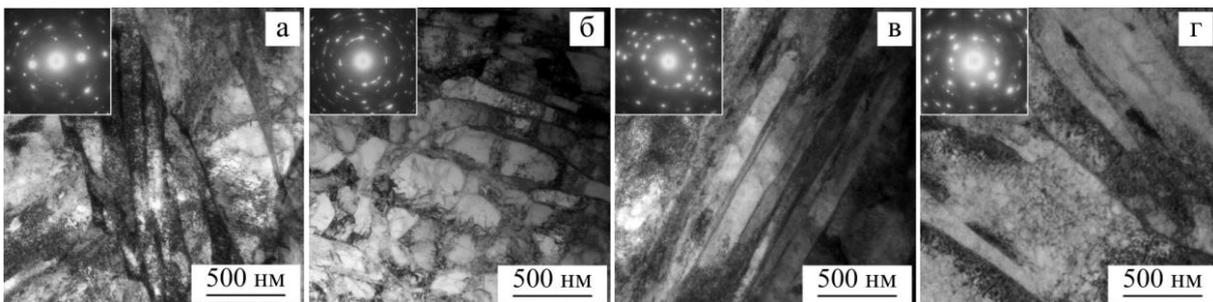


Рис. 4 Структура стали 10X3Г3МФТ после обработки по различным режимам:

а – исходно горячекованое состояние, б – ХПД 60% методом РК;  
в – ХПД 60% РК + ИТО 900 °С; з – ХПД 60% РК + ИТО 1000 °С

Перспективность технологии комплексной ИТО подтверждается результатами испытаний механических свойств стали 10ХЗГЗМФТ (табл. 4). По сравнению с исходно закаленным состоянием ударная вязкость  $KCT$  стали 10ХЗГЗМФТ выросла в 2,7 раза (до 0,96 МДж/м<sup>2</sup>) при обработке по режиму "ХПД 60% РК + ИТО 900 °С" и в 2,4 раза (до 0,85 МДж/м<sup>2</sup>) при "ХПД 60% РК + ИТО 1000 °С"; ударная вязкость  $KCU$  возрастает до уровня 1,5-1,9 МДж/м<sup>2</sup>. Показано, что увеличение ударной вязкости  $KCT$  и  $KCU$  при обработке по режимам "ХПД 60% РК + ИТО 900/1000 °С" происходит на фоне роста предела текучести  $\sigma_{0,2}$  на 17–30%, предела прочности  $\sigma_B$  – в среднем на 5% при сохранении высокой пластичности исходно закаленного состояния.

Таблица 4. Механические свойства стали 10ХЗГЗМФТ после ИТО по различным режимам

Режим обработки	$\sigma_{0,2}$	$\sigma_B$	$\delta$	$\psi$	KCU	KCT
	МПа		%		МДж/м <sup>2</sup>	
ХПД 60% РК + ИТО 900 °С	1183	1327	14,3	66,4	1,48	0,96
ХПД 60% РК + ИТО 1000 °С	1064	1283	14,4	66,1	1,90	0,85

Фрактографический анализ показал, что обработка стали 10ХЗГЗМФТ по режиму "ХПД 60% РК + ИТО 900 °С" приводит к изменению характера излома (рис. 5) по сравнению с холоднокованым состоянием.

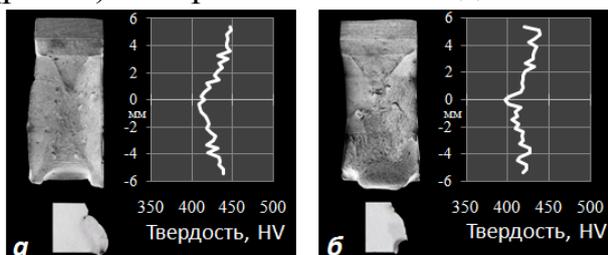


Рис. 5 Макрорельеф, профиль изломов и распределение микротвердости по сечению образцов холоднодеформированной стали 10ХЗГЗМФТ после однократной ТЦО на 900 (а) и 1000 (б) °С, после испытаний на ударную вязкость КСТ

Макрорельеф излома образца стали 10ХЗГЗМФТ после ИТО 900 °С отличается наличием развитых областей боковой утяжки, соединяющихся в центральной части сечения образца, и сложным профилем. Распространение трещины происходит в одной плоскости. Формирование в образце сердцевин с несколько меньшим, чем у периферийной части, уровнем твердости

практически не отразилось на макростроении излома. Повышение температуры ИТО стали 10ХЗГЗМФТ с 900 до 1000 °С, приводит к незначительному изменению характера излома и смене микромеханизма разрушения с вязкого на смешанный – в изломе наблюдается как ямочное строение, так и фасетки квазискола, что вызвано формированием более крупной структуры.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. По результатам электронно-микроскопического анализа установлено, что холодная пластическая деформация методом радиальнойковки является эффективным способом диспергирования структуры закаленных конструкционных низкоуглеродистых сталей типа 10ХЗГЗМФ(Т), как в качестве отдельной технологии, так и в сочетании с последующей термической обработкой. Проведение холодной радиальнойковки с расчетной степенью деформации 60% приводит к уменьшению среднего поперечного размера рейки мартенсита в стали 10ХЗГЗМФ с  $355 \pm 30$  до  $190 \pm 15$  нм, а в стали 10ХЗГЗМФТ – с  $335 \pm 20$  до  $150 \pm 10$  нм. Комплексная деформационно-

термическая обработка по режиму ХПД 60% РК с последующим отжигом в интервале температур 450-550 °С исходно закаленных сталей 10Х3Г3МФ и 10Х3Г3МФТ позволяет сформировать УМЗ состояние со средним размером элементов субструктуры в пределах 150–200 нм. Комплексная обработка, заключающаяся в сочетании ХПД 60% РК и последующей однократной ИТО на температуру 900 °С, позволяет реализовать в стали 10Х3Г3МФТ наноструктурное состояние со средним поперечным размером мартенситной рейки  $80 \pm 10$  нм.

2. Установлено, что холодная пластическая деформация с расчетной степенью деформации  $\varepsilon = 60\%$ , реализованная методом радиальной ковки, прутков из конструкционных низкоуглеродистых сталей 10Х3Г3МФ и 10Х3Г3МФТ со структурой пакетного мартенсита, приводит к появлению признаков холодной динамической рекристаллизации, что свидетельствует о реализации в локальных объемах материала мегапластической деформации при данном режиме обработки.

3. По результатам электронно-микроскопического анализа установлено, что в сталях 10Х3Г3МФ и 10Х3Г3МФТ в процессе деформационно-термической обработки при температуре отжига 350–450 °С протекают процессы полигонизации, в интервале температур 500–550 °С – первичная рекристаллизация, а при температуре 600 °С – собирательная рекристаллизация. Показано, что в стали 10Х3Г3МФТ затруднены процессы рекристаллизации по сравнению со сталью 10Х3Г3МФ. Установлено, что в низкоуглеродистых сталях, подвергнутых мегапластической (интенсивной пластической) деформации, титан оказывает тормозящее действие на развитие рекристаллизации при нагреве, аналогичное наблюдаемому при нагреве недеформированных сталей.

4. Установлено, что сталь 10Х3Г3МФТ, в полной мере соответствующая принципам сбалансированного легирования, отличается меньшей склонностью к собирательному росту зерна аустенита и является более перспективной для упрочнения методами термоциклической обработки по сравнению со сталью 10Х3Г3МФ, а наибольший эффект диспергирования структуры предварительно холоднокованой стали 10Х3Г3МФТ достигается после первого цикла интенсивной термической обработки на 900 и 1000 °С.

5. Показана эффективность применения холодной радиальной ковки, а также сочетания ее с последующей термической обработкой для повышения уровня механических свойств сталей 10Х3Г3МФ и 10Х3Г3МФТ с исходной структурой пакетного мартенсита.

Холодная радиальная ковка со степенью деформации 60% позволяет повысить предел прочности  $\sigma_b$  стали 10Х3Г3МФ на 39% до 1790 МПа, а предел прочности  $\sigma_b$  стали 10Х3Г3МФТ – на 30% до 1620 МПа, при этом ударная вязкость  $KCT$  сталей 10Х3Г3МФ и 10Х3Г3МФТ возрастает в 2,3 – 2,6 раза и достигает значений  $0,55 \text{ МДж/м}^2$  и  $0,82 \text{ МДж/м}^2$ , соответственно, при сохранении высокой ударной вязкости  $KCU$  порядка 1,3 – 1,4 МДж/м<sup>2</sup>.

Комплексная ДТО, проведенная по оптимальному режиму "ХПД 60% РК + отжиг 550 °С", позволяет, при сохранении пластичности, повысить предел текучести  $\sigma_{0,2}$  исходно закаленных сталей 10ХЗГЗМФ и 10ХЗГЗМФТ на 25–37% (до 1290 и 1140 МПа, соответственно), уровень ударной вязкости  $KCU$  на 25–30% (до 1,64 и 1,71 МДж/м<sup>2</sup>, соответственно), а ударную вязкость  $KCT$  – в 3 раза (до 0,63 и 1,09 МДж/м<sup>2</sup>, соответственно).

Обработка стали 10ХЗГЗМФТ по режиму "ХПД 60% РК + ИТО" позволяет при сохранении высокой пластичности повысить относительно уровня исходно закаленного состояния ударную вязкость  $KCT$  в 2,7 раза (до 0,96 МДж/м<sup>2</sup>) при ИТО 900°С и в 2,4 раза (до 0,85 МДж/м<sup>2</sup>) при ИТО 1000 °С, при это ударная вязкость  $KCU$  возрастает до уровня 1,5-1,9 МДж/м<sup>2</sup>, а предел текучести  $\sigma_{0,2}$  увеличивается на 17–30%.

6. Установлено, что холодная радиальная ковка исходно закаленных сталей 10ХЗГЗМФ и 10ХЗГЗМФТ способствует развитию процессов деформационного старения в исследуемых сталях, что проявляется в наличии ярко выраженного максимума ("зуба") на диаграммах одноосного растяжения холоднокованных образцов. Природа "зуба" обусловлена формированием атмосфер Коттрелла и образованием ультрадисперсных карбидов, затрудняющих старт движения дислокаций. Показано, что к уменьшению и последующему исчезновению "зуба" с диаграмм одноосного растяжения приводит повышение температуры последеформационного отжига, вызывающее развитие процессов рекристаллизации, коагуляции карбидов и эволюции дислокационной структуры.

7. По результатам микродюрOMETрического анализа установлено, что ХПД методом РК приводит к формированию двух областей по сечению исходно закаленных прутков сталей 10ХЗГЗМФ и 10ХЗГЗМФТ: сердцевины с максимальным уровнем твердости и периферии, где твердость плавно снижается по направлению от центра к краю. Такой характер распределения микротвердости по сечению холоднокованных прутков сталей 10ХЗГЗМФ и 10ХЗГЗМФТ сохраняется при последующих отжигах до температур 550 °С и обуславливает рост ударной вязкости  $KCT$  исследуемых сталей: при разрушении образца трещина меняет направление своего распространения на границах "периферия – упрочненная сердцевина", что приводит к увеличению пути и, соответственно, работы распространения трещины.

8. Предложенные технологии комплексной деформационно-термической обработки низкоуглеродистых системно-легированных сталей со структурой пакетного мартенсита, заключающиеся в последовательной реализации холодной пластической деформации степенью 60% методом радиальнойковки и рекристаллизационного отжига 450–550°С или интенсивной термической обработки 900–1000°С, являются эффективным способом формирования ультрамелкозернистого или наноструктурного состояния и повышения механических свойств прутковых заготовок.

Разработанные технологии обработки прутковых заготовок сталей 10ХЗГЗМФ и 10ХЗГЗМФТ были опробованы в рамках производственного

процесса ОАО "ПНИТИ" (акт № 1/0701 от 17.09.2013 г.) и продемонстрировали возможность повышения конкурентоспособности выпускаемой продукции. На основании полученных результатов промышленного опробования технологии рекомендованы для промышленного использования при изготовлении высоконагруженных длинномерных деталей и крепежных резьбовых изделий.

Разработанные технологии комплексной деформационно-термической обработки по режимам "ХПД 60% РК + отжиг 550°C" и "ХПД 60% + ИТО 900°C" гарантированно обеспечивают получение уровня свойств не ниже класса прочности 12.9 (ГОСТ Р 52627–2006) при производстве ответственных крепежных изделий.

**Основное содержание диссертации изложено в следующих публикациях:**

**Публикации в рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК РФ:**

1. Заяц, Л.Ц. Особенности процессов образования аустенита в межкритическом интервале температур в исходно закаленных низкоуглеродистых сталях разных систем легирования / Л.Ц. Заяц, Д.О. Панов, Ю.Н. Симонов, А.Н. Балахнин, А.И. Смирнов, И.Л. Яковлева // Физика металлов и металловедение. – 2011. – Т. 112, № 5. – С. 505-513.

2. Панов, Д.О. Эволюция структуры и свойств при интенсивной термоциклической обработке холоднодеформированной закаленной системно-легированной стали 10X3ГЗМФ / Д.О. Панов, А.Н. Балахнин, М.Г. Титова, Е.Н. Орлова, А.И. Смирнов, Ю.Н. Симонов // Металловедение и термическая обработка металлов. – 2012. – № 11. – С. 17-22.

3. Балахнин, А.Н. Влияние холодной пластической деформации методом радиальнойковки и последующей термической обработки на структуру и свойства стали 10X3ГЗМФ / А.Н. Балахнин, Д.О. Панов, М.Г. Титова, А.С. Перцев, А.И. Смирнов, Ю.Н. Симонов // Металловедение и термическая обработка металлов. – 2012. – № 11. – С. 22-27.

4. Балахнин, А.Н. Механические свойства конструкционной низкоуглеродистой стали 10X3ГЗМФ после холодной пластической деформации методом радиальнойковки / А.Н. Балахнин, Д.А. Костюк, Д.О. Панов, А.А. Никулина, Ю.Н. Ромашова // Обработка металлов: технология, оборудование, инструменты. – 2012. – № 3 (56). – С. 64-66.

5. Балахнин, А.Н. Структурообразование конструкционной низкоуглеродистой стали при комплексной механо-термической обработке на этапе холодной пластической деформации методом радиальнойковки / А.Н. Балахнин, Р.А. Вагин, Д.О. Панов, А.И. Смирнов, Н.А. Морева // Обработка металлов: технология, оборудование, инструменты. – 2012. – № 3 (56). – С. 92-94.

6. Балахнин, А.Н. Зависимость уровня ударной вязкости конструкционной низкоуглеродистой стали от характера распределения микротвердости по сечению / А.Н. Балахнин, Д.О. Панов, Ю.Н. Симонов, А.А.

Никулина // Обработка металлов: технология, оборудование, инструменты. – 2013. – № 1 (58). – С. 18-21.

7. Панов, Д.О. Диспергирование закаленной низкоуглеродистой стали при холодной пластической деформации и последующей интенсивной термической обработке / Д.О. Панов, А.Н. Балахнин, А.С. Перцев, А.И. Смирнов, М.Ю. Симонов // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 2013. – № 9. – С. 57-61.

8. Балахнин, А.Н. Отпускоустойчивость закаленных конструкционных низкоуглеродистых сталей, подвергнутых холодной радиальной ковке / А.Н. Балахнин // Современные проблемы науки и образования. – 2013. – № 6. – Режим доступа: [www.science-education.ru/113-11780](http://www.science-education.ru/113-11780)

9. Балахнин, А.Н. Эволюция структуры и механических свойств низкоуглеродистого мартенсита при холодной радиальной ковке и последующей термической обработке / А.Н. Балахнин, Д.О. Панов, А.С. Перцев, А.И. Смирнов, Ю.Н. Симонов // Материаловедение. – 2015. – № 2. – С. 19-26.

#### **Полученные патенты и авторские свидетельства:**

10. Способ упрочнения крепежных изделий из низкоуглеродистой стали: пат. 2532600 Рос. Федерации: МПК С21D 8/06, С21D 9/00, В21С 37/04 / Симонов Ю.Н., Панов Д.О., Балахнин А.Н., Перцев А.С.; заявитель и патентообладатель Перм. нац. исслед. политехн. ун-т. – 2013133580/02; заявл. 18.07.2013; опубл. 10.11.2014 Бюл. № 31. 12 с: ил.

#### **Учебно-методические работы, пособия, монографии:**

11. Наноструктурные стали: учеб. пособие / Д.О. Панов, Ю.Н. Симонов, А.Н. Балахнин, А.С. Перцев, Е.Н. Орлова. – Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2014. – 71 с.

#### **Публикации в прочих изданиях:**

12. Balakhnin, A. N. Nanostructuring Of Low-Carbon Steels By Heat Treatment Techniques / A. N. Balakhnin, Yu. N. Simonov, D. O. Panov, A. I. Smirnov // Journal of Materials Science and Technology. – 2013. – Vol. 21, No. 3. – pp. 139–148

---

Подписано в печать 23.10.2015 Формат 60×90/16.  
Усл. печ. л.1,05. Тираж 100 экз. Заказ № 1282/2015.

---

Отпечатано с готового оригинал-макета в типографии издательства  
Пермского национального исследовательского политехнического университета.  
Адрес: 614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, к. 113.  
Тел. (342) 219-80-33.