

## ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу  
Барсуковой Татьяны Юрьевны «Повышение надежности стали 10Х3Г3МФС  
холодной радиальной ковкой и неполной закалкой», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности  
2.6.1. Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов

### Актуальность темы

Диспергирование структуры стали является наиболее перспективным механизмом, благоприятно влияющим на ее конструкционную прочность. В настоящее время известно много случаев реализации технологий, использующих измельчение структурных элементов материалов, что позволяет обеспечить комплекс механических свойств, недостижимый при традиционных режимах пластической деформации и термической обработки. В течение нескольких последних десятилетий для деформационного измельчения структуры металлических материалов широко применяются методы интенсивной пластической деформации (ИПД), которые, однако, характеризуются рядом конструктивно-технологических недостатков, ограничивающих возможности их широкого промышленного применения. В связи с этим обоснованность темы диссертационной работы Барсуковой Т.Ю. определяется необходимостью создания и использования промышленных технологий, позволяющих достигать высоких степеней деформации без разрушения металлических заготовок. В исследовании соискателя в качестве технологии для повышения надежности низкоуглеродистой стали мартенситного класса рассматривается современный перспективный метод комбинированной обработки, заключающийся в холодной радиальной ковке и неполной закалке, что позволяет получить высокий комплекс механических свойств за счет формирования дисперсной мартенситно-ферритной структуры. Диссертационное исследование Барсуковой Т.Ю. направлено на изучение возможностей управляемого диспергирования структуры низкоуглеродистой конструкционной безникелевой стали 10Х3Г3МФС с использованием фазового альфа-гамма превращения, протекающего в межкритическом интервале температур, последующей холодной деформации с высокими степенями и неполной закалки.

Актуальность диссертации подтверждается ее соответствием тематике Приоритетных направлений развития науки, технологий и техники РФ и Перечню критических технологий РФ, а также базовой части государственного задания вузам в сфере научной деятельности при финансировании Минобрнауки России по проекту 711.8213.2017/8.9 и программы деятельности научно-образовательного центра мирового уровня «Рациональное недропользование».

В этой совокупности актуальность темы диссертационной работы Барсуковой Т.Ю., посвященной разработке технологии холодной радиальнойковки и неполной закалки для повышения надежности низкоуглеродистой стали, безусловно, не вызывает сомнений.



## **Анализ содержания диссертации**

Диссертация Барсуковой Т.Ю. состоит из введения, пяти глав, заключения с выводами по работе, списка использованных источников литературы, включающего 123 наименования, одного приложения. Работа изложена на 158 страницах, содержит 52 рисунка и 16 таблиц.

**Во введении** дано обоснование актуальности решаемой проблемы; проанализирован уровень разработанности темы; указаны цель и задачи исследования; сформулированы научная новизна и практическая значимость работы; изложены основные положения, выносимые на защиту; отмечены личный вклад автора, степень достоверности и апробация полученных результатов.

**В первой главе** сделан обстоятельный аналитический обзор литературных источников, касающихся современных представлений о закономерностях структурообразования и возможности повышения характеристик надежности при деформационной и термической обработке низкоуглеродистой стали с мартенситной структурой. Описана система легирования низкоуглеродистых безникелевых сталей, формирование структуры при разных способах термической обработки: термоциклировании, в том числе в межкритический интервал температур (МКИТ), неполной закалке, изотермической закалке, рассмотрено влияние термической обработки на свойства низкоуглеродистых сталей. Детально проанализированы особенности формирования структуры и свойств низкоуглеродистых сталей в процессе холодной пластической деформации, а также эволюция структуры и формирование свойств при термической обработке низкоуглеродистой стали, подвергнутой закалке и холодной пластической деформации. Рассмотрены возможности повышения ее надежности при холодной пластической деформации и термической обработке с нагревом выше критических температур, роль внешних и внутренних факторов на процессы эволюции структуры и формирование механических свойств. Это позволило соискателю обосновать постановку цели и задач диссертационного исследования.

**Во второй главе** представлена информация о химическом составе и условиях получения материала, использованного в работе, приведены параметры режимов пластической деформации и термической обработки опытных образцов, рассмотрены методики исследования структуры и испытания механических свойств.

**В третьей главе** проанализированы процессы аустенитизации стали 10ХЗГЗМФС для оценки перспективности проведения промежуточного высокого отпуска и выбора режима неполной закалки, направленного на повышение обрабатываемости холодной пластической деформацией (ХПД) за счет получения мартенситно-ферритной структуры благоприятной морфологии. Приведены результаты исследования особенностей эволюции структуры и формирование механических свойств стали 10ХЗГЗМФС при непрерывном нагреве и изотермических выдержках в МКИТ, которые в исходном состоянии были предварительно подвергнуты закалке и высокому отпуску. Автором работы построена диаграмма образования аустенита в условиях непрерывного нагрева предварительно закаленной стали и предварительно высоко отпущен-



ной стали, выполнено дилатометрическое исследование изотермического образования аустенита при нагреве в МКИТ, проведен металлографический анализ образующихся структур, а также испытания механических свойств. На основе анализа полученных результатов сделан вывод, что неполная закалка стали 10ХЗГЗМФС из верхней части МКИТ (800 °С) обеспечивает сочетание высокой прочности и ударной вязкости, на основании чего сформированное неполной закалкой от 800 °С состояние стали выбрано в качестве исходного для дальнейшей обработки холодной пластической деформацией методом холодной радиальнойковки (ХРК).

**В четвертой главе** обсуждается влияние ХРК на формирование структуры и свойств закаленной из МКИТ стали 10ХЗГЗМФС с мартенситно-ферритной структурой. Приведены результаты подробного исследования фазового состава, морфологии и дислокационной структуры формирующихся структурных составляющих при разной степени деформации. Выявлено влияние степени пластической деформации на прочностные характеристики и надежность стали 10ХЗГЗМФС. Показано, что полученные состояния отличаются неоднородным распределением твердости в материале в связи с особенностями наложения полей деформации при ХРК, приводящими к ее локализации в центральной части прутка.

**В пятой главе** рассматриваются закономерности аустенитизации холоднодеформированной стали 10ХЗГЗМФС при непрерывном нагреве и в изотермических условиях, а также влияние параметров режима неполной закалки на формирование структуры и механических свойств холоднодеформированной стали. Проведен анализ изменения конструкционной прочности стали 10ХЗГЗМФС в процессе цикла деформационно-термической обработки. Выявлено сложное влияние параметров режима неполной закалки на средний размер зерна. Установлены закономерности изменения твердости, относительного удлинения, временного сопротивления и содержания мартенсита, контролируемые в большей степени температурой термической обработки. Показано, что изменение предела текучести обусловлено влиянием времени термической обработки, а на величину относительного сужения определяющее влияние оказывает фактор взаимодействия температуры и времени. Определены режимы неполной закалки, обеспечивающие получение высокого уровня характеристик прочности и надежности стали 10ХЗГЗМФС, подвергнутой холодной радиальнойковке в мартенситно-ферритном состоянии.

Технологические процессы производства заготовок круглого сечения повышенной надежности из низкоуглеродистой конструкционной стали опробованы в промышленных условиях. Это подтверждается актами промышленного опробования результатов научно-исследовательских работ и технологических разработок, которые показали, что полученные в промышленных условиях полнотелые цилиндрические заготовки из стали 10ХЗГЗМФС способны успешно конкурировать с аналогами, получаемыми при интенсивной пластической деформации в современных лабораторных условиях.

**В заключении** подведены главные итоги диссертационного исследования и сформулированы основные выводы по работе.



Объем диссертации является вполне достаточным для необходимого изложения основных результатов исследования. Содержание диссертации охватывает основные вопросы поставленной научной проблемы и обладает внутренним единством. В целом работа выполнена на хорошем методическом и теоретико-экспериментальном уровне. Анализ содержания позволяет заключить, что все поставленные задачи решены, и цель исследования достигнута. Оформление диссертации и автореферата диссертации качественное в соответствии с нормативными требованиями, изложение материала четкое, лаконичное и корректное. Автореферат полностью отражает содержание диссертационной работы и раскрывает ее сущность.

Основное содержание диссертации Барсуковой Т.Ю. в достаточном объеме опубликовано в 10 научных работах, в числе которых 4 – в рецензируемых изданиях, рекомендованных перечнем Высшей аттестационной комиссией при Министерстве науки и высшего образования Российской Федерации, в том числе 3 статьи – в изданиях, входящих в международные реферативные базы данных и системы цитирования Scopus, WoS. Результаты работы докладывались на международных и российских научно-технических конференциях, что свидетельствует о новизне результатов исследования и об ознакомлении с работой широкого круга научной и инженерно-технической общественности.

### **Научная новизна диссертационной работы**

1. Установлено, что решающее влияние на морфологию аустенита, образующегося при нагреве стали 10X3Г3МФС в межкритический интервал температур, оказывает исходное структурное состояние стали: аустенит lamellarной формы образуется в стали с исходной мартенситной структурой; глобулярной формы – в стали с исходным высоко отпущенным состоянием; глобулярной и пластинчатой формы – в холоднодеформированной стали с исходной мартенситно-ферритной структурой.

2. Впервые выявлена эволюция структуры при увеличении степени деформации в процессе холодной радиальнойковки низкоуглеродистой безникелевой стали 10X3Г3МФС с исходной мартенситно-ферритной структурой, которая заключается в одновременном протекании процессов фрагментации  $\alpha$ -фазы, приводящей к уменьшению размеров ячеек деформации в 7 раз: с  $496 \pm 178$  нм до  $67 \pm 8$  нм, и деформационного мартенситного превращения остаточного аустенита.

3. Показано, что получение высокого комплекса механических свойств холоднодеформированной стали 10X3Г3МФС неполной закалкой из верхней части МКИТ связано с формированием дисперсной мартенситно-ферритной структуры полиэдрической морфологии вследствие рекристаллизации зерен матричной  $\alpha$ -фазы и высокой скорости протекания  $\alpha \rightarrow \gamma$  превращения.

### **Практическая и теоретическая значимость результатов работы**

Значимость результатов диссертационного исследования для науки и практики заключается в следующем.



1. Показана возможность управляемого диспергирования структуры низкоуглеродистой конструкционной безникелевой стали 10ХЗГЗМФС с использованием фазового  $\alpha \rightarrow \gamma$  превращения, протекающего в межкритическом интервале температур, последующей холодной деформации с высокими степенями и неполной закалки, что вносит существенный вклад в развитие положений металловедения и термической обработки, касающихся вопросов деформационно-термической обработки низкоуглеродистых сталей, обеспечивающей повышение прочности и надежности.

2. Построены изотермические диаграммы образования аустенита для трех исходных состояний стали 10ХЗГЗМФС (закаленного, высоко отпущенного и закаленного из МКИТ и холоднодеформированного), позволяющие прогнозировать фазовый состав и формировать нужный комплекс механических свойств стали в широких пределах путем варьирования режимов неполной закалки с получением дисперсной структуры со средним размером зерна 2,5 мкм и хорошим сочетанием характеристик прочности и надежности.

3. Найдены качественные и количественные закономерности изменения структуры и механических свойств под влиянием различных режимов деформационного и термического воздействия, свидетельствующие о возможности регулировать комплекс механических свойств в широких пределах и позволившие определить рациональные режимы деформационно-термической обработки, обеспечивающие одновременное повышение характеристик прочности и надежности исследуемой стали 10ХЗГЗМФС.

4. Опробована в условиях акционерного общества «Пермский научно-исследовательский технологический институт» (г. Пермь) деформационно-термической обработка заготовок из низкоуглеродистой стали 10ХЗГЗМФС, включающей холодную радиальную ковку со степенью деформации 60 % и неполную закалку, которая обеспечила получение дисперсной мартенситно-ферритной структуры (размер зерна 2,5-3,7 мкм) с временным сопротивлением  $\sigma_b$  более 1100 МПа, значительным резервом прочности ( $\sigma_{0,2}/\sigma_b = 0.6-0.7$ ) и с повышенной ударной вязкостью КСТ (выше в 1,9-2,4 раза) и пластичностью материала (выше на 36-43 %) относительно исходного закаленного состояния, что существенно расширяет области применения этого материала.

### **Достоверность научных результатов и обоснованность выводов**

Обоснованность научных положений, выводов, рекомендаций и достоверность полученных результатов подтверждаются:

– использованием современных сертифицированных методов проведения и анализа результатов исследований, включающих высокоточное оборудование и программное обеспечение с широкими возможностями анализа данных;

– использование взаимодополняющих методов исследований и отсутствие противоречивых экспериментальных данных, обуславливающих формулирование научных положений;

– сопоставление результатов исследования с данными зарубежного и отечественного опыта и их непротиворечивостью результатам других исследова-



телей, а также известным теоретическим представлениям современного металловедения и термической обработки;

- опытом промышленного опробования результатов исследования;
- подтверждением результатов их обсуждением на международных и все-российских научных конференциях;
- публикациями основных результатов исследования в рецензируемых научных изданиях, входящих в перечень ВАК РФ и международные реферативные базы данных и системы цитирования.

### **Замечания**

1. В аналитическом обзоре при описании процесса рекристаллизации, в т.ч. и в статьях с ультрамелкозернистой структурой, сделаны ссылки на учебники и только 1 ссылка на результаты научных исследований в этой области.

2. Недостаточно обоснован выбор стали 10ХЗГЗМФС в качестве материала для диссертационного исследования.

3. В разделе 3.2 приведены результаты исследования влияния скорости нагрева на положение критических точек и стадии аустенитизации только для исходного закаленного состояния и не приведены результаты для исходного высоко отпущенного. Не объяснено, почему для исследования влияния исходного состояния на кинетику аустенитизации выбрана промежуточная скорость нагрева именно 1,5 °С/с (которая почему-то названа средней, учитывая, что высокие скорости составляют 90 и 20 °С/с, а низкие – 0,6 и 0,15 °С/с) (стр. 71).

4. Было бы полезно дополнить фотографии на рис. 3.11, 3.14 графическими схемами, поясняющими морфологию и расположение элементов структуры.

5. На стр. 90 отмечается, что в микроструктуре наблюдаются «микробласти с высокоугловыми границами, практически свободные от дислокаций, (рисунок 4.4, б), что свидетельствует о протекании динамической полигонизации». Однако высокоугловые границы должны быть более тонкими и прямолинейными в отличие от тех достаточно широких границ из хаотичного скопления дислокаций, которые наблюдаются на приведенных фотографиях и, скорее всего, являются малоугловыми.

6. На стр. 102 сначала делается вывод о высокой деформационной устойчивости остаточного аустенита, а затем – о его постепенном превращении в мартенсит деформации при ХРК предварительно закаленной из МКИТ стали, но отсутствует обоснование причин такого поведения остаточного аустенита.

7. В тексте есть неточности и опечатки:

– непонятно использование термина «сохраняются» в предложении «Карбидные частицы сохраняются не только в матричной альфа-фазе (плоские участки), но и внутри мартенситных участков...», поскольку автором не указано, что они наблюдались в микроструктуре реэчного мартенсита закаленной стали (стр. 73);



- в названии главы 3 и разделов 3.3.1 и 3.3.2 корректнее было бы написать вместо «Формирование структуры... в МКИТ» «Формирование структуры... после закалки из МКИТ»;

- «...прутки стали 10Х3ГЗМФС...подвергали закалке в печи СШЦМ...» (нагреву под закалку) (стр.43);

- перепутаны ссылки: 75 вместо 74 (стр.28), 83 вместо 82 (стр. 36); дважды дана ссылка на русско- и англоязычную версию одной и той же статьи (ссылки 112 и 84);

- есть несколько грамматических ошибок.

Отмеченные замечания не изменяют общей положительной оценки диссертационной работы и не снижают ее научной и практической значимости.

### **Соответствие диссертационной работы указанной специальности**

Диссертационная работа Барсуковой Татьяны Юрьевны Барсуковой Татьяны Юрьевны на тему «Повышение надежности стали 10Х3ГЗМФС холодной радиальной ковкой и неполной закалкой» по содержанию и полноте изложенного материала соответствует паспорту специальности 2.6.1. Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов: пункту 2 – «Теоретические и экспериментальные исследования фазовых и структурных превращений в металлах и сплавах, происходящих при различных внешних воздействиях, включая технологические воздействия и влияние сварочного цикла на металл зоны термического влияния, их моделирование и прогнозирование», пункту 3 – «Теоретические и экспериментальные исследования влияния разнородных структур, в том числе кооперативного, на физические, химические, механические, технологические и эксплуатационные свойства металлов и сплавов, их моделирование и прогнозирование», пункту 4 – «Теоретические и экспериментальные исследования термических, термоупругих, термопластических, термохимических, термомагнитных, радиационных, акустических и других воздействий на изменение структуры и свойств металлов и сплавов, их моделирование и прогнозирование», пункту 6 – «Разработка новых и совершенствование существующих технологических процессов объемной и поверхностной термической, химико-термической, термомеханической и других видов обработок, связанных с термическим или термомеханическим воздействием, цифровизация и автоматизация процессов, а также разработка информационных технологий систем сквозного управления технологическим циклом, специализированного оборудования».

### **Заключение**

Результаты, полученные в работе Барсуковой Т.Ю., соответствуют поставленной цели и задачам диссертационного исследования. Диссертационная работа базируется на достаточном количестве экспериментальных данных. Полученные автором результаты достоверны, выводы и заключения обоснованы и оценены по сравнению с другими известными решениями. Диссертация написана автором самостоятельно, обладает внутренним единством, содержит новые научные результаты и положения, выдвигаемые для публичной



защиты, что свидетельствует о личном вкладе автора диссертации в науку. Диссертация имеет прикладной характер и в ней приводятся сведения о практическом использовании полученных автором диссертации научных результатов.

Изложенное выше позволяет сделать заключение, что оппонируемая работа соответствует требованиям п.9 – 14 «Положения о присуждении ученых степеней» постановления Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842 (в редакциях от 21.04.2016 № 335 и 12.10.18 № 1168), а ее автор Барсукова Татьяна Юрьевна достойна присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.6.1. Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов.

На включение в аттестационное дело и дальнейшую обработку моих персональных данных, необходимых для процедуры защиты диссертации Барсуковой Т.Ю., согласна.

Официальный оппонент,

профессор кафедры «Литейные процессы и материаловедение» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», доктор технических наук (05.16.01 – Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов),  
профессор

Копцева Наталья Васильевна

01.12.2022

Почтовый адрес ФГБОУ ВО МГТУ им. Г.И. Носова:  
455000, г. Магнитогорск, пр. Ленина, 38  
+7 (3519) 298-402; mgtu@magtu.ru

