

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по науке ФГАОУ ВО

«Пермский национальный исследовательский  
политехнический университет»,

доктор физ.-мат. наук

Швейкин А. И.

« 20 » июля 2022 г.

м.п.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

федерального государственного автономного образовательного учреждения  
высшего образования

«Пермский национальный исследовательский политехнический университет»  
Министерства науки и высшего образования Российской Федерации

Диссертация Барсуковой Татьяны Юрьевны «Повышение надежности стали 10ХЗГЗМФС холодной радиальной ковкой и неполной закалкой» выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет» на кафедре «Металловедение, термическая и лазерная обработка металлов».

В период подготовки диссертации соискатель Барсукова Татьяна Юрьевна работала в центральной исследовательской лаборатории АО «Пермский научно-исследовательский технологический институт» на должности инженера-металловеда, с 01.03.2020 г. переведена в технологический отдел металлургического производства АО «Пермский научно-исследовательский технологический институт» на должность инженера-технолога, с 09.01.2020 года работала на кафедре «Металловедение, термическая и лазерная обработка металлов» федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования (до 17.04.2021 года ФГБОУ ВО) «Пермский национальный исследовательский политехнический университет» в должности старшего преподавателя.

В 2009 году окончила магистратуру в государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Пермский государственный технический университет» по направлению «Металлургия» с присуждением степени магистр техники и технологии.

В 2020 году окончила аспирантуру по очной форме обучения в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего

образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет» по специальности 05.16.01 - Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов (период обучения 01.10.2016 - 30.09.2020 г.).

Научный руководитель – доктор технических наук, профессор Симонов Юрий Николаевич, работает заведующим кафедрой «Металловедение, термическая и лазерная обработка металлов» федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет».

По итогам обсуждения представленной работы принято следующее заключение:

Представленная Барсуковой Татьяной Юрьевной диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук является завершённой научно-квалификационной работой и посвящена проблеме повышения комплекса механических свойств низкоуглеродистых сталей.

1. Личное участие автора в получении результатов, изложенных в диссертации, заключается в следующем:

- проведен аналитический обзор по влиянию предварительной закалки и холодной деформационной обработки на структуру и свойства низкоуглеродистых сталей; выявлена актуальность применения неполной закалки и холодной радиальнойковки для повышения комплекса механических свойств низкоуглеродистых сталей;
- поставлены цель и задачи исследования;
- при выполнении задач исследования спланированы экспериментальные работы; результаты исследования получены лично автором и при участии в творческих коллективах;
- проведен анализ экспериментальных данных; определены критические точки стали 10Х3ГЗМФС при ее нагреве для закаленного, высокоотпущенного и холоднодеформированного состояний; построены термокинетические и изотермические диаграммы образования аустенита, отвечающие, соответственно, условиям непрерывного нагрева и изотермической выдержки в межкритическом интервале температур;
- проведен анализ структурных превращений в стали 10Х3ГЗМФС в процессе холодной радиальнойковки с высокими степенями деформации с использованием световой и электронной микроскопии, дифракционного анализа;
- проведена количественная оценка параметров структуры и субструктуры;
- определены механические свойства стали после различных режимов обработки;
- получены эмпирические зависимости изменения механических свойств холоднодеформированной стали при последующей закалке из межкритического интервала температур. Зависимости отражают влияние параметров неполной закалки – температуры нагрева и времени изотермической

выдержки и получены с использованием подходов факторного планирования эксперимента;

– обобщены полученные результаты и сформулированы положения, выносимые на защиту.

## 2. Научная новизна диссертационного исследования:

– Установлено, что исходное структурное состояние стали 10X3Г3МФС оказывает решающее влияние на морфологию аустенита, образующегося в МКИТ: аустенит lamellarной формы образуется в стали с исходной мартенситной структурой; глобулярной формы – в стали со структурой высоко отпущенного мартенсита; глобулярной и пластинчатой формы – в холоднодеформированной стали с мартенситно-ферритной структурой.

– Впервые изучена эволюция структуры низкоуглеродистой безникелевой стали 10X3Г3МФС в мартенситно-ферритном состоянии в процессе холодной радиальнойковки, которая заключается в одновременном протекании процессов фрагментации, 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.

– Установлено, 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 альфа-фазы и высокой скорости протекания альфа-гамма превращения.

## 3. Степень достоверности результатов проведенных исследований

подтверждается использованием современных сертифицированных комплексов проведения и анализа исследований, включающих высокоточное оборудование и программное обеспечение с богатыми возможностями анализа данных. Использование взаимодополняющих методов исследований и отсутствие противоречий экспериментальных данных способствует выстраиванию законченной научной гипотезы, которая согласуется с результатами других авторов.

#### 4. Теоретическая и практическая значимость исследования:

– В условиях акционерного общества «Пермский научно-исследовательский технологический институт» (г. Пермь) опробована технология деформационно-термической обработки полнотелых цилиндрических заготовок из конструкционной стали 10Х3Г3МФС, включающей холодную радиальную ковку со степенью деформации 60 % и неполную закалку, что обеспечивает получение дисперсной мартенситно-ферритной структуры (размер зерна 2,5-3,7 мкм) с повышенной ударной вязкостью КСТ (выше в 1,9 - 2,4 раза) и пластичностью материала (выше на 36 - 43 %) при небольшом снижении прочностных свойств (на 7 - 16 %) относительно исходного закаленного состояния.

– Построены изотермические диаграммы образования аустенита для трех состояний стали 10Х3Г3МФС, позволяющие прогнозировать фазовый состав и формировать нужный комплекс механических свойств стали путем варьирования режимов неполной закалки.

#### 5. Полнота изложения материалов диссертации в работах, опубликованных соискателем:

Содержание диссертационной работы Барсуковой Т.Ю. достаточно полно отражено в 10 работах, из них 4 работы в журналах, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией при Министерстве науки и высшего образования Российской Федерации для публикации основных результатов диссертационных исследований.

#### **Наиболее значимые работы:**

1. Межкритическая закалка низкоуглеродистой стали с получением дисперсной многофазной структуры / Д.О. Панов, **Т.Ю. Барсукова**, А.И. Смирнов, Е.Н. Орлова, Ю.Н. Симонов // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2017. – № 4 (77). – С. 6–18.

Intercerical quenching of low-carbon steel with the formation of a disperse multiphase structure / D.O. Panov, T.Y. Barsukova, A.I. Smirnov, E.N. Orlova, Yu.N. Simonov // Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science, 2017. – V. 4 (77). – P. 6–18. – DOI: 10.17212/1994-6309-2017-4-6-18. (In Russian). (1,5 п.л., авт. 0,23 п.л., **из перечня ВАК, Web of Science**).

*В данной работе показаны закономерности превращения, изменение структуры и свойств безникелевой конструкционной стали 10Х3Г3МФС со структурой низкоуглеродистого мартенсита при последующей неполной закалке из межкритического интервала температур. В работе построены термокинетическая и изотермическая диаграммы образования аустенита стали 10Х3Г3МФС. Показано, что аустенитизация в МКИТ исходно закаленной стали протекает с последовательной реализацией трех стадий: образование аустенита на границах бывших аустенитных зерен; образование и рост*

аустенита на границах реек мартенсита; растворение участков исходной  $\alpha$ -фазы. Установлено, что при закалке стали с температуры 800 °С формируется структура, состоящая из фрагментированной исходной  $\alpha$ -фазы, дисперсных реек свежезакаленного мартенсита и тонких прослоек стабилизированного аустенита, что вызывает существенное увеличение уровня ударной вязкости после обработки по такому режиму при сохранении прочностных характеристик.

2. Эволюция структуры и свойств многофазной низкоуглеродистой стали в процессе холодной радиальнойковки / **Т.Ю. Барсукова**, Д.О. Панов, А.С. Перцев, А.И. Смирнов, Ю.Н. Симонов // *Металловедение и термическая обработка металлов.* – 2019. – № 10. – С. 25–32.

Evolution of Structure and Properties of Multiphase Low-Carbon Steel During Cold Radial Forging / T.Y. Barsukova, D.O. Panov, A.S. Pertsev, et al. // *Met Sci Heat Treat.* – 2020. – V. 61 – P. 610–616. – DOI: 10.1007/s11041-020-00468-6. (0,81 п.л., авт. 0,58 п.л., **из перечня ВАК, Scopus**)

В данной статье показаны особенности эволюции микроструктуры низкоуглеродистой стали 10ХЗГЗМФС в процессе холодной пластической деформации методом холодной радиальнойковки со степенями 20 %, 40 % и 60 % после предварительной неполной закалки от 800 °С. Установлено, что в поперечном сечении прутка деформация протекает неоднородно; комплекс механических свойств имеет уровень временного сопротивления порядка 1860 МПа; показано снижение ударной вязкости, обусловленное переходом остаточного аустенита в мартенсит деформации не благоприятной морфологии; показана динамика уменьшения размеров ячеек деформации.

3. **Барсукова, Т.Ю.** Получение дисперсной феррито-мартенситной структуры в низкоуглеродистой конструкционной стали при закалке из межкритического интервала температур / Т.Ю. Барсукова, Д.О. Панов, М.Ю. Симонов // *Технология металлов.* – 2019. – № 11. – С. 2 – 12. – DOI: 10.31044/1684-2499-2019-11-0-2-12. (1,16 п.л., авт. 0,81 п.л., **из перечня ВАК**).

Статья посвящена исследованию влияния технологических параметров закалки из межкритического интервала температур на структурное состояние и механические свойства предварительно высоко отпущенной конструкционной стали 10ХЗГЗМФС. С использованием подходов факторного планирования эксперимента и дилатометрических данных кинетики альфа-гамма превращения в изотермических условиях математически описано изменение содержания аустенита при температурах межкритического интервала в зависимости от параметров термической обработки в заданных граничных условиях. Показано формирование дисперсной феррито-мартенситной структуры смешанной морфологии.

4. **Барсукова, Т.Ю.** Закономерности формирования структуры и свойств холоднодеформированной низкоуглеродистой конструкционной стали при неполной закалке / Т.Ю. Барсукова, Д.О. Панов, Ю.Н. Симонов // *Металловедение и термическая обработка металлов.* – 2021. – № 7. – С. 3 –9.

Laws of formation of structure and properties in cold-deformed low-carbon structural steel under incomplete quenching / T.Yu. Barsukova, D.O. Panov, Yu.N.

Simonov // Met. Sci. and Heat Treat. – 2021. – V. 63. – P. 347-353. – DOI: 10.1007/s11041-021-00694-6 (0,75 п.л., авт. 0,55 п.л., из перечня ВАК, Scopus).

*В статье рассмотрено влияние режимов неполной закалки стали 10Х3Г3МФС, предварительно подвергнутой холодной деформации методом радиальной ковки, на ее структуру и механические свойства. Количественный анализ сформированной мелкозернистой мартенситно-ферритной структуры материала показал аномалию изменения среднего размера зерна в зависимости от температуры нагрева в верхнюю часть МКИТ (при выдержках 70, 125 минут минимальные размеры зерна соответствуют температуре нагрева 800 °С) и времени выдержки (при увеличении времени выдержки от 15 до 125 минут средний размер зерна остается практически постоянным при закалке от 800 °С). Установленное экспериментально изменение ударной вязкости стали имеет сложный характер, противоположный изменению средней величины зерна.*

Прочие работы по теме диссертационного исследования:

5. **Барсукова, Т.Ю.** Особенности формирования структуры и механические свойства стали 10Х3Г3МФС после закалки из межкритического интервала температур / Т.Ю. Барсукова, Д.О. Панов, Симонов Ю.Н. // Уральская шк. молодых металлургов: материалы XVIII междунар. науч.-технолог. урал. шк.-семинара металлургов-молодых учен. (Екатеринбург, 21-23 нояб. 2017 г.) / М-во образования и науки Российской Федерации, Урал. федер. Ун-т им. Первого Президента России Б.Н. Ельцина. – г. Екатеринбург: УрФУ, 2017. – С. 208-210. (0,19 п.л., авт. 0,1 п.л.)

6. **Барсукова, Т.Ю.** Закалка низкоуглеродистой стали из межкритического интервала температур с получением дисперсной многофазной структуры / Т.Ю. Барсукова, Д.О. Панов, А.И. Смирнов // Актуальные проблемы физического металловедения сталей и сплавов : материалы XXIV Уральской шк. металлургов-термистов, 19-23 марта 2018 г., Магнитогорск. / М-во образования и науки Рос. Федерации, Магнитогор. гос. техн. ун-т им. Г.И. Носова. – Магнитогорск : Издат. центр МГТУ им. Г.И. Носова, 2018. – С. 114- 116. (0,13 п.л., авт. 0,04 п.л.)

7. **Барсукова, Т.Ю.** Закономерности формирования структуры и свойств исходно многофазной стали 10Х3Г3МФС в условиях холодной деформации методом радиальной ковки / Т.Ю. Барсукова, Д.О. Панов // Физическое металловедение : материалы IX Междунар. шк. с элементами науч. шк. для молодежи, 09-13 сент. 2019, Тольятти / М-во образования и науки Российской Федерации, науч. совет РАН по физике конден. сред., Межгос. координ. совет по физике прочности и пластичности, Тольяттинск. гос. ун-т, НИИ прогресс. тех. – Тольятти, 2019. – С. 143-144. (0,12 п.л., авт. 0,6 п.л.)

8. **Барсукова, Т.Ю.** Влияние исходного состояния на формирование структуры и свойств стали 10Х3Г3МФС при межкритической закалке / Т.Ю. Барсукова, Д.О. Панов, Ю. Н. Симонов // Инновационные технологии в металловедении и машиностроении : материалы 4-й науч.-практической конференции с междунар. участием, 23-27 сент. 2019, Пермь. / М-во. науки и высш. образования Российской Федерации, ФГБОУ ВО Перм. нац. исследоват. политех. ун-т. – Пермь: Изд-во ПНИПУ, 2019 - С. 34-37. (0,25 п.л., авт. 0,12 п.л.)

9. **Барсукова, Т.Ю.** Диспергирование структуры низкоуглеродистой конструкционной стали в процессе неполной закалки / Т.Ю. Барсукова, Д.О. Панов // Актуальные проблемы физического металловедения сталей и сплавов : материалы XXV Уральской shk. металлосведов-термистов, 3-7 февр. 2020, Екатеринбург. / М-во науки и высш. образования Российской Федерации – Екатеринбург, 2020. – С. 105-107. (0,24 п.л., авт. 0,12 п.л.)

10. **Барсукова, Т.Ю.** Повышение надежности холоднодеформированной в мартенсито-ферритном состоянии стали 10X3ГЗМФС неполной закалкой / Т.Ю. Барсукова, Д.О. Панов. Ю.Н. Симонов // Инновационные технологии в материаловедении и машиностроении : материалы 5-й Всероссийской науч.-практической конференции с междунар. участием, 27 сент. - 1 окт. 2021, г. Пермь. / М-во. науки и высш. образования Российской Федерации, ФГБОУ ВО Перм. нац. исследоват. политех. ун-т. – Пермь: Изд-во. ПНИПУ, 2021. – С. 33-36. (0,25 п.л., авт. 0,12 п.л.)

6. Соответствие содержания диссертации специальности, по которой она рекомендуется к защите.

Представленная Барсуковой Татьяной Юрьевной диссертационная работа является прикладным научным исследованием, направленным на изучение процессов формирования структуры и комплекса механических свойств стали 10X3ГЗМФС при холодной радиальной ковке и неполной закалке в области науки и техники, занимающейся изучением связи между химическим составом, кристаллической структурой, структурным состоянием и свойствами металлов и сплавов; разработкой физико-химических основ создания новых металлических материалов с заданными свойствами и новых технологических процессов термической, химикотермической и термомеханической обработки, имеет важное научное, фундаментальное и прикладное значение для развития данного направления науки.

Указанная область исследования соответствует формуле 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».

7. Диссертационная работа Барсуковой Татьяны Юрьевны отвечает требованиям, установленным п. 14 Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного Постановлением Правительства РФ №842 от 24 сентября 2013 г.: автор, Барсукова Татьяна Юрьевна корректно ссылается в тексте диссертации на авторов и (или) источники заимствования материалов, в том числе при использовании результатов научных работ, опубликованных лично или в соавторстве.

Диссертация «Повышение надежности стали 10Х3Г3МФС холодной радиальной ковкой и неполной закалкой» Барсуковой Татьяны Юрьевны рекомендуется к защите на соискание ученой степени кандидата технических наук по научной специальности 2.6.1 – Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов.

Заключение принято на заседании кафедры «Металловедение, термическая и лазерная обработка металлов» федерального автономного образовательного учреждения высшего образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет» «08» июня 2022 г. (протокол № 26).

Присутствовало на заседании 15 чел. Результаты голосования: «за» - 15 чел., «против» - 0 чел., «воздержалось» - нет.

Д.т.н., профессор кафедры «Металловедение,  
термическая и лазерная обработка металлов»

\_\_ / Шацов А.А. /

К.т.н., доцент, секретарь кафедры  
«Металловедение, термическая  
и лазерная обработка металлов»

\_\_ / Некрасова Т.В. /