

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по науке

Пермского национального

исследовательского политехнического

университета,

Доктор физико-математических наук,

Швейкин А. И.

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 Шайманова Григория Сергеевича «Исследование влияния деформационно-термической обработки на структуру, механические свойства и особенности изломов углеродистых и низколегированных конструкционных сталей» выполнена на кафедре «Металловедение, термическая и лазерная обработка металлов» Пермского национального исследовательского политехнического университета.

В 2012 году соискатель, Шайманов Григорий Сергеевич, окончил магистратуру в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет» по направлению «Материаловедение и технология новых материалов» с присуждением степени магистр техники и технологии.

В период с 01.07.2012 г. по 30.06.2016 г. обучался в аспирантуре очной формы обучения ФГБОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет» по специальности 05.16.01 – Metallovedeniye i termicheskaya obrabotka metallov i splavov.

Во время обучения в магистратуре и аспирантуре Шайманов Григорий Сергеевич работал в должности инженера учебно-научной производственной лаборатории МТФ ПНИПУ, 01.09.2018 переведен на кафедру МТиКМ и затем 01.09.2019 на кафедру ИТМ в той же должности. По совместительству работает старшим преподавателем кафедры «Metallovedeniye, termicheskaya i lazernaya obrabotka metallov».

Научный руководитель – кандидат технических наук, Симонов Михаил Юрьевич, директор лаборатории «Объединенная лаборатория фундаментальных исследований в металловедении» ФГАОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет».

По итогам обсуждения представленной работы принято следующее заключение:

Представленная Шаймановым Григорием Сергеевичем диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук является научно-квалификационной работой и посвящена проблеме развития прогрессивных методик оценки параметров вязких изломов и их поверхности разрушения конструкционных низколегированных сталей, напрямую влияющих на уровень их надежности.

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

- соискатель провел аналитический обзор литературных источников, выявил перспективные промышленные методы получения ультрамелкозернистого состояния в металлопродукции, выявил недостатки ряда методик оценки динамической трещиностойкости металлов и сплавов, и недостатки традиционных методик исследования микрорельефа поверхности разрушения и деформированного материала под ней;
- сформулировал цель и задачи работы;
- спланировал и выполнил лично или в составе исследовательских групп все лабораторные исследования;
- в составе исследовательской группы исследовал микроструктуру сталей после различных режимов обработки методами световой и электронной микроскопии;
- обработал результаты механических испытаний, построил диаграммы динамической трещиностойкости конструкционных сталей 09Г2С, 25 и 35Х подвергнутых деформационно-термической обработке, провел сопоставительный анализ характеристик прочности и надежности исследуемых сталей;
- качественно и количественно исследовал особенности строения вязких изломов;
- исследовал микромеханизмы разрушения сталей;
- в составе исследовательской группы разработал классификацию элементов поверхности вязкого разрушения;
- провел количественный анализ элементов поверхности разрушения сталей, выполнил их классификацию по типам и размерам;
- разработал (в коллективе соавторов) способ определения зоны пластической деформации под изломом в образце (патент РФ № 2516391);
- разработал (в коллективе соавторов) способ оценки физико-механических свойств высоковязких листовых конструкционных сталей (патент РФ № 2516391);
- применил разработанные методики на образцах конструкционных углеродистых и низколегированных сталей, полученных из передельных труб, подвергнутых деформационно-термической обработке. Определил форму и размеры зон пластической деформации под поверхностью разрушения сталей;
- по результатам измерения микротвердости под поверхностью разрушения сталей построил карты распределения микротвердости в зонах пластической деформации с применением методов геостатистики, реализованных в специализированном программном обеспечении;
- подготовил публикации по результатам работы.

2. Достоверность результатов проведенных исследований подтверждена применением комплекса современного исследовательского и экспериментального сертифицированного оборудования (световой инвертированный микроскоп Olympus

GX-51, растровый электронный микроскоп FeI Phenom G2 ProX, световой стереомикроскоп Olympus SZX-16, автоматизированный микротвердомер DuraScan 70, универсальная гидравлическая система для статических испытаний «INSTRON–SATEC 300 LX» и др.) и современного программного обеспечения для обработки и анализа экспериментальных данных («Bluehill», «SIAMS 700», «Olympus Stream Motion», «Ecos workflow», «Mathcad», «3D Roughness Reconstruction», «Surfer» и др.).

Результаты, полученные в диссертации, непротиворечивы, воспроизводятся и подтверждаются при исследовании различными методами.

3. Научная новизна диссертационного исследования заключается в следующем:

1. Впервые для сталей 09Г2С, 25 и 35Х, подвергнутых деформационно-термическим обработкам, построены диаграммы динамической трещиностойкости и определены параметры динамической трещиностойкости.

2. Определен инициирующий механизм образования макро-расщеплений на поверхности изломов сталей 09Г2С, 25 и 35Х, подвергнутых деформационно-термическим обработкам, заключающийся в слиянии близкорасположенных глубоких ямок-тоннелей на поверхности разрушения в микро-расщепления и дальнейшем объединении микро-расщеплений в более крупные мезо- и макро-расщепления. Показано, что формирование расщеплений в изломах сталей способствует поддержанию высоких показателей динамической трещиностойкости и ударной вязкости, в том числе и при низких климатических температурах.

3. Показано, что после проведения термической и деформационно-термических обработок увеличение средних поперечных размеров ямок в диапазоне значений 13,8-17,0 мкм их доли с 55,5% до 68,8% в изломах стали 09Г2С сопровождается линейным ростом ударной вязкости и динамической трещиностойкости. В сталях 25 и 35Х линейный рост ударной вязкости и динамической трещиностойкости наблюдается при формировании крупных ямок со средними поперечными размерами в диапазоне 12,7-16,5 мкм и 11,2-13,8 мкм и их доли в изломах в интервале 40,5-56,8% и 16,8-25,0%.

4. Впервые для исследуемых сталей, подвергнутых деформационно-термическим обработкам, построены карты распределения микротвердости в зонах пластической деформации под поверхностью динамического разрушения, позволяющие определить форму и размеры зон. Установлено, что увеличение размера зон пластической деформации стали 09Г2С в области старта динамической трещины, $r_{зпд}$, с 1,25 мм до 2,85 мм приводит к линейному росту ударной вязкости КСТ и динамической трещиностойкости. В сталях 25 и 35Х прямо пропорциональный рост ударной вязкости и динамической трещиностойкости происходит вследствие увеличения $r_{зпд}$ с 1,15 мм до 2,95 мм и с 0,15 мм до 2,15 мм соответственно.

4. Практическая значимость результатов исследования состоит в следующем:

1. Экспериментально показана возможность построения диаграмм динамической трещиностойкости конструкционных сталей, подвергнутых деформационно-термическим обработкам, по результатам испытаний двух серий образцов на стандартном лабораторном оборудовании (патент РФ № 2485476).

2. Разработана и апробирована методика трехмерной количественной оценки параметров рельефа разрушения конструкционных сталей, позволяющая классифицировать элементы ямочного микрорельефа поверхности разрушения по типам и размерам.

3. Разработана и успешно апробирована на конструкционных сталях, подвергнутых деформационно-термическим обработкам, методика определения зон пластической деформации под поверхностью разрушения (патент РФ №2516391), позволяющая количественно исследовать размеры зон, форму, и использовать карты распределения микротвердости в зоне для поиска неравновесных структур под поверхностью разрушения, сформированных в процессе динамического разрушения.

4. Прошла промышленную апробацию технология деформационно-термической обработки, которая установила повышение хладостойкости исходно высокоотпущенной стали 35 в интервале температур от -20 °С до -100 °С.

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

Основное содержание диссертационной работы достаточно полно отражено в 12 работах, которые опубликованы в ведущих рецензируемых научных изданиях, рекомендованных для публикации результатов диссертационных исследований (из перечня ВАК), а также в изданиях, индексируемых в базах Web of Science и Scopus, получены 2 патента на изобретение.

Наиболее значимые работы:

1. Симонов М. Ю., Шайманов Г. С., Перцев А. С., Юрченко А. Н., Симонов Ю. Н. Динамическая трещиностойкость и структура трубной заготовки из стали 09Г2С после деформационно-термической обработки // *Металловедение и термическая обработка металлов.* – 2017. – № 6 (744). – С. 64-71. (ВАК). Переводная версия: Simonov, M.Y., Shaimanov, G.S., Pertsev, A.S. et al. Dynamic Crack Resistance and Steel 09G2S Tubular Billet Structure After Deformation and Heat Treatment. *Met Sci Heat Treat.* – 2017. - V.59. – P. 389–396. <https://doi.org/10.1007/s11041-017-0161-6>. (WoS, Scopus).
2. G.S. Shaimanov, M. Yu. Simonov, Yu. N. Simonov Comparative analysis of machine steels structure parameters and dynamic crack resistance after deformation-and-heat treatment // *Materials Today: Proceedings.* – 2019. – V.19. – Part 5 - P. 2167-2173. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.07.239>. (Scopus).

В работах соискателем проведено исследование влияния деформационно-термической обработки на структуру, характеристики прочности и надежности конструкционных сталей 09Г2С, 25 и 35Х.

3. Симонов М. Ю., Георгиев М. Н., Симонов Ю. Н., Ханов А. М., Шайманов Г. С. Оценка параметров рельефных составляющих изломов высоковязкой конструкционной стали 09Г2С после динамических испытаний // *Металловедение и термическая обработка металлов.* - 2012. - №11. - С.45-50. (ВАК). Переводная версия: Simonov, M.Y., Georgiev, M.N., Simonov, Y.N. et al. Evaluation of the parameters of

texture components of fractures of high-toughness structural steel 09G2S after dynamic tests // Met Sci Heat Treat. – 2013. – V.54 - P. 600–604. <https://doi.org/10.1007/s11041-013-9556-1>. (**WoS, Scopus**).

4. Симонов М. Ю., Шайманов Г. С., Перцев А. С., Симонов Ю. Н., Князева А. Н., Шибанова К. А., Смирнов А. И. Влияние структуры на динамическую трещиностойкость и особенности микромеханизма роста трещины стали 35Х после холодной радиальнойковки // *Металловедение и термическая обработка металлов*. - 2016. - № 2 (728). - С. 24-32. (**БАК**). Переводная версия: Simonov, M.Y., Shaimanov, G.S., Pertsev, A.S. et al. Effect of structure on the dynamic crack resistance and special features of the micromechanism of crack growth in steel 35Kh after cold radial forging // *Met Sci Heat Treat*. - 2016. – V.58. – P. 82–90. <https://doi.org/10.1007/s11041-016-9968-9>. (**WoS, Scopus**).

5. Симонов М. Ю., Симонов Ю. Н., Шайманов Г. С. Структура, динамическая трещиностойкость и микромеханизм роста трещин в трубных заготовках после деформационно-термической обработки // *Физика металлов и металловедение*. - 2018. - Т. 119. - № 1.- С. 54-62. (**БАК**). Переводная версия: Simonov, M.Y., Simonov, Y.N., Shaimanov, G.S. Structure, dynamic cracking resistance, and crack growth micromechanism in pipe billets after thermomechanical treatment // *Phys. Metals Metallogr*. – 2018. - V.119. - P. 52–59. <https://doi.org/10.1134/S0031918X18010155>. (**WoS, Scopus**).

6. Симонов М. Ю., Симонов Ю. Н., Шайманов Г. С. Структурные и фрактографические особенности формирования расщеплений в низколегированной стали, подвергнутой деформационно-термической обработке // *Металловедение и термическая обработка металлов*. - 2019. - № 10 (772). - С. 5-15. (**БАК**). Переводная версия: Simonov, M.Y., Simonov, Y.N., Shaimanov, G.S. Structural and fractographic features of formation of splits in low-alloy steel subjected to thermal deformation treatment // *Met Sci Heat Treat*. – 2020. – V.61 - P. 591–600. <https://doi.org/10.1007/s11041-020-00466-8>. (**WoS, Scopus**).

7. Шайманов Г. С., Симонов М. Ю., Перцев А. С., Симонов Ю. Н. Структура, механические свойства и особенности поверхности разрушения конструкционных сталей, подвергнутых деформационно-термической обработке // *Металлург*. - 2019. - № 5. - С. 62-74. (**БАК**). Переводная версия: Shaimanov, G.S., Simonov, M.Y., Pertsev, A.S. et al. Structure, mechanical properties and fracture surface features of structural steels subjected to deformation-heat treatment // *Metallurgist*. – 2019. – V.63. – P. 496–510. <https://doi.org/10.1007/s11015-019-00850-7>. (**WoS, Scopus**).

В работах выполнены исследования поверхности разрушения углеродистых и низколегированных конструкционных сталей. По результатам количественной оценки элементов поверхности разрушения, полученным соискателем, предложена классификация по соотношению средних поперечных размеров элементов поверхности разрушения к их средней глубине. Проведен сравнительный анализ структуры, характеристик прочности, надежности и параметров элементов поверхности разрушения сталей 09Г2С, 25 и 35Х, подвергнутых деформационно-термической обработке.

8. Симонов М. Ю., М Георгиев М. Н., Симонов Ю. Н., Шайманов Г. С. Оценка размеров зоны пластической деформации высоковязких материалов после динамических испытаний методом систематического измерения микротвердости // *Металловедение и термическая обработка металлов*. - 2012. - №11. - С.40-45. (**БАК**). Переводная версия: Simonov, M.Y., Georgiev, M.N., Simonov, Y.N. et al. Evaluation of

the sizes of the zone of plastic strain of high-toughness materials after dynamic tests by the method of systematic measurement of microhardness // Met Sci Heat Treat. 2013. - V.54. – P. 595–599. <https://doi.org/10.1007/s11041-013-9555-23>. (WoS, Scopus).

9. Симонов М. Ю., Наймарк О. Б., Симонов Ю. Н., Георгиев М. Н., Шайманов Г. С., Карпова Д. Д., Билалов Д. А. Структурные аспекты зон пластической деформации. Часть I. Эффект адиабатического сдвига // *Металловедение и термическая обработка металлов* - 2019. - № 10 (772). - С. 43-53. (ВАК). Переводная версия: Simonov, M.Y., Naimark, O.B., Simonov, Y.N. et al. Structural aspects of zones of plastic strain. Part I. Effect of adiabatic shear // *Met Sci Heat Treat.* – 2020. – V.61. – P. 628–638. <https://doi.org/10.1007/s11041-020-00471-x>. (WoS, Scopus).

Разработана методика оценки размеров и формы зоны пластической деформации высоковязких конструкционных сталей по результатам систематических измерений микротвердости, выполненных соискателем. Рассмотрены особенности структуры в зонах пластической деформации под поверхностью разрушения после однократных динамических испытаний.

Полученные патенты

10. Пат. 2516391. Российская федерация. МПК G 01 n 3/28. Способ определения зоны пластической деформации под изломом в образце / Ю. Н. Симонов, М. Ю. Симонов, Г. С. Шайманов, Л. Е. Макарова; заявитель и патентообладатель ФГОУ ВПО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет». – № 2012153101/28; заявл. 07.12.2012. опубл. 20.05.2014 // Бюл. №14. 2014. 15 с.

11. Пат. 2598972 РФ: МПК G 01 N 3/30. Способ оценки физико-механических свойств высоковязких листовых конструкционных сталей: Ю. Н. Симонов, М. Ю. Симонов, Г. С. Шайманов; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет». заявл. 18.06.2015. опубл. 10.10.2016 // Бюл. №28. 14 с.

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

Представленная Шаймановым Григорием Сергеевичем диссертационная работа является прикладным исследованием, направленным на изучение процессов динамического разрушения, определение параметров строения вязких изломов разрушенных конструкционных сталей, их влияния на комплекс механических свойств конструкционных сталей 09Г2С, 25, 35Х в различных структурных состояниях, сформированными в процессе деформационно-термической обработки. Область диссертационного исследования включает изучение связи между структурой, получаемыми характеристиками прочности и надежности при деформационно-термической обработке, особенностями механизма роста динамических трещин и параметрами зон пластической деформации под поверхностью разрушения конструкционных углеродистых и низколегированных сталей.

Указанная область исследования соответствует формуле специальности 2.6.1. *Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов:*

пункту 1 - «Изучение взаимосвязи химического и фазового составов (характеризуемых различными типами диаграмм, в том числе диаграммами состояния) с физическими, механическими, химическими и другими свойствами 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 5 – «Теоретические и экспериментальные исследования механизмов деформации, влияния фазового состава и структуры на зарождение и распространение трещин при различных видах внешних воздействий, их моделирование и прогнозирование»;

пункту 6 – «Разработка новых и совершенствование существующих технологических процессов объемной и поверхностной термической, химикотермической, 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. Диссертация удовлетворяет требованиям п. 14 Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного Постановлением Правительства РФ №842 от 24 сентября 2013г.: автор, Шайманов Григорий Сергеевич, 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 «Исследование влияния деформационно-термической обработки на структуру, механические свойства и особенности изломов углеродистых и низколегированных конструкционных сталей» Шайманова Григория Сергеевича 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 расширенном заседании кафедры «Металловедение, термическая и лазерная обработка металлов» федерального автономного образовательного учреждения высшего образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет» «22» июня 2022 г. (протокол № 28).

Присутствовало на заседании 6 чел. из состава ППС кафедры «Металловедение, термическая и лазерная обработка металлов». Результаты голосования: «за» - 6 чел., «против» - 0 чел., «воздержался» - 0 чел.

Заведующий кафедрой
«Металловедение,
термическая и лазерная
обработка металлов»,
д.т.н., профессор

Симонов Юрий Николаевич

Секретарь кафедры
«Металловедение,
термическая и лазерная
обработка металлов»

Жаркова Мария Владимировна