

Шайманов Григорий Сергеевич

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ДЕФОРМАЦИОННО-ТЕРМИЧЕСКОЙ
ОБРАБОТКИ НА СТРУКТУРУ, МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И
ОСОБЕННОСТИ ИЗЛОМОВ УГЛЕРОДИСТЫХ И НИЗКОЛЕГИРОВАННЫХ
КОНСТРУКЦИОННЫХ СТАЛЕЙ

2.6.1. Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет».

Научный руководитель: **Симонов Михаил Юрьевич**
Кандидат технических наук

Официальные оппоненты: **Швейкин Владимир Павлович**
Доктор технических наук, профессор,
ФГБУН «Институт Машиноведения им.
Э. С. Горкунова» УрО РАН, директор

Куприянова Ольга Александровна
Кандидат технических наук,
ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный
технический университет им. Г. И. Носова», НИИ
Наносталей, научный сотрудник ресурсного центра
нанотехнологий и наноматериалов

Ведущее предприятие: Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Новосибирский государственный технический
университет»

Защита диссертации состоится «21» февраля 2023 года в 14.00 на заседании диссертационного совета Д ПНИПУ.05.13 Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования Пермский национальный исследовательский политехнический университет по адресу: 614990, г. Пермь, Комсомольский проспект 29, аудитория 345.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет» (<http://pstu.ru>)

Автореферат разослан «___» _____ 2023 года

Ученый секретарь диссертационного
совета Д ПНИПУ.05.13,
кандидат технических наук, доцент

Федосеева Е. М.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования и степень ее разработанности.

Несомненно, хрупкое разрушение является наиболее опасным и поэтому, совершенно справедливо, преобладающая часть работ последних десятилетий направлена на изучение именно этого вида разрушения. В то же время фрактография вязкого разрушения остается изученной в недостаточной степени, а ведь именно ямочный механизм роста трещины сопровождается высокоэнергоемкое разрушение. Изучением ямочного рельефа поверхности разрушения занимались Д. Броек, Ю. В. Зима, М. А. Штремель и другие, но не смотря на достаточно большое количество работ, посвященных изучению поверхности вязкого разрушения, на настоящий момент не существует единого представления о влиянии элементов поверхности разрушения и их параметров на уровень энергоемкости разрушения. Такие затруднения вызваны применением традиционных методов исследования поверхности разрушения и механизма роста трещины, которые в большей степени являются качественными. Результаты рентгеновской дефрактометрии изломов, как хрупких, так и вязких, с ямочным рельефом поверхности разрушения, показывают наличие на поверхности разрушения и в подповерхностных объемах существенной пластической деформации материала, доля работы которой дает преобладающий вклад в энергию, необходимую для образования этой поверхности. Исследованиям зон пластической деформации под поверхность разрушения посвящены работы Л. Трок, Г. В. и Н. А. Клевцовых и других ученых, однако большинство применяемых для исследований зон методов пригодны только для качественной ее оценки, не дают детального представления об изменении свойств металла в процессе разрушения, и не могут быть применены в качестве экспериментальной проверки теоретических попыток описания зон пластической деформации. Таким образом, количественные исследования рельефа поверхности разрушения, сопровождающего высокий уровень сопротивления развитию трещин, в частности – высокий уровень динамической трещиностойкости, а также- параметров зон пластической деформации под поверхностью разрушения, являются важными и актуальными задачами.

В условиях непрерывно растущих требований к конструкционным материалам важной задачей материаловедения является создание новых металлических материалов с высокими характеристиками не только прочности, но и сопротивления хрупкому разрушению, а также - повышение уровня прочности и надежности уже существующих традиционных конструкционных материалов. Одновременное повышение характеристик прочности и сопротивления хрупкому разрушению традиционных конструкционных сталей возможно за счет формирования в них однородной по всему сечению ультрамелкозернистой (УМЗ) структуры. С точки зрения промышленности перспективными способами получения УМЗ структур металлов в сечениях, достаточных для производства конечной продукции, являются сдвиговое волочение, сдвиговая прокатка и некоторые модификации равноканального углового прессования. Еще одним перспективным промышленным методом для получения УМЗ состояния в готовой продукции является холодная радиальная ковка. Радиальная ковка позволяет реализовывать большие степени деформации без нарушения целостности заготовки, а применение радиусных бойков в сочетании с правильной дробностью поворота заготовки в процессе обработки позволяет за счет высокой точности и качества поверхности применять ее в качестве окончательной обработки. Таким образом, как свидетельствуют литературные источники, традиционные и широко применяемые углеродистые и низколегированные конструкционные стали с УМЗ структурой, обеспечивающей сочетание повышенной прочности и сопротивления хрупкому разрушению, сформированной в процессе деформационной обработки с применением холодной радиальнойковки и последующей термической обработки, способны конкурировать с более дорогостоящими легированными сталями.

Перечисленные выше факторы определили цель и задачи исследования.

Работа выполнена в соответствии с основными направлениями научной деятельности кафедры «Металловедение, термическая и лазерная обработка металлов» ПНИПУ при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ по государственному заданию FSNM-2020-0028.

Цель исследования:

Выявить основные параметры строения изломов, в наибольшей степени влияющие на ударную вязкость и динамическую трещиностойкость сталей 09Г2С, 25 и 35Х, подвергнутых термической и деформационно-термической обработке.

Задачи исследования:

1. Исследовать влияние деформационно-термической обработки на микроструктуру и механические свойства сталей в состоянии после закалки и высокого отпуска.
2. Построить диаграммы динамической трещиностойкости исследуемых сталей, подвергнутых термической и деформационно-термическим обработкам, и определить основные параметры динамической трещиностойкости.
3. Исследовать механизм и особенности роста трещины, влияющие на уровень ударной вязкости и динамической трещиностойкости конструкционных сталей, подвергнутых термической и деформационно-термическим обработкам.
4. Провести комплексное исследование зон пластической деформации под поверхностью динамического разрушения сталей, подвергнутых термической и деформационно-термическим обработкам.
5. Установить взаимосвязь ударной вязкости и динамической трещиностойкости с параметрами строения изломов, характеристиками прочности и пластичности сталей 09Г2С, 25 и 35Х в различном структурном состоянии после термической и деформационно-термических обработок.

Научная новизна:

1. Впервые для сталей 09Г2С, 25 и 35Х, подвергнутых деформационно-термическим обработкам, построены диаграммы динамической трещиностойкости и определены параметры динамической трещиностойкости.
2. Определен иницирующий 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 гзпд с 1,15 мм до 2,95 мм и с 0,15 мм до 2,15 мм соответственно.

Теоретическая и практическая значимость работы:

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. В условиях акционерного общества «Экам-нефтемаш» прошла промышленную апробацию технология деформационно-термической обработки, которая установила повышение хладостойкости исходно высокоотпущенной стали 35 в интервале температур от -20 °С до -100 °С.

Методология и методы исследования.

Методологической основой исследования послужили труды ведущих отечественных и зарубежных ученых в области изучения сталей в высоковязком состоянии, зарубежные и государственные стандарты РФ.

Для достижения цели и решения поставленных задач в диссертационной работе были использованы следующие методы исследования: световая и сканирующая электронная микроскопия, количественный металлографический анализ, дюрометрический анализ, инструментальные испытания на одноосное растяжение, ударную вязкость и динамическую трещиностойкость (патент РФ № №2485476), качественный и количественный световой и электронный фрактографический анализ. Зону пластической деформации под поверхностью разрушения определяли на подготовленных микрошлифах методом систематических измерений микротвердости (патент РФ №2516391).

Положения, выносимые на защиту.

1. Закономерности формирования структуры, механических свойств и динамической трещиностойкости высокоотпущенных углеродистых и низколегированных конструкционных сталей в процессе холодной радиальнойковки и последующих отжигов.

2. Закономерности формирования зон пластической деформации под поверхностью разрушения конструкционных сталей.

3. Результаты проведения сравнительного анализа комплекса механических свойств и параметров строения изломов конструкционных сталей, полученных в результате термической и деформационно-термическим обработкам.

4. Влияние параметров зон пластической деформации, расщеплений и ямочного микрорельефа поверхности разрушения на ударную вязкость и динамическую трещиностойкость конструкционных сталей, подвергнутых термической и деформационно-термическим обработкам.

Апробация работы. Материалы диссертации были доложены и обсуждены на научно-практической конференции с международным участием «Инновационные

технологии в материаловедении и машиностроении» (ИТММ) 2012, 2014, 2016, 2019, 2021, Международной научно-технической конференции «Современные направления и перспективы развития технологий обработки и оборудования в машиностроении 2019» (ICMTMTE 2019).

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 12 работ, из них – 11 в изданиях, рекомендованных ВАК РФ, 11 работ - в международных научных изданиях, индексируемых в наукометрических базах данных Scopus и Web of Science. Получено 2 патента РФ на изобретение.

Степень достоверности результатов. Достоверность результатов исследования достигается применением современного исследовательского и испытательного оборудования и современных программных пакетов, воспроизводимостью и непротиворечивостью результатов.

Личный вклад. Экспериментальные исследования выполнены либо самим автором, либо при его непосредственном участии. Личный вклад заключается в обработке электронно-микроскопических изображений структуры и поверхности разрушения, результатов масштабных систематических измерений микротвердости под поверхностью разрушения сталей. Автору принадлежат идеи по постановке цели и задач исследования, формулировке выводов и основных положений.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 6 глав, заключения, списка сокращений и условных обозначений и списка литературы из 166 наименований; изложена на 183 страницах, включает 99 рисунков, 13 таблиц и 1 приложение.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении приведено обоснование актуальности темы диссертационной работы, определены ее цель и задачи. Сформулированы научная новизна, практическая значимость результатов исследования и положения, выносимые на защиту.

В первой главе проведен анализ современного состояния вопросов получения и формирования объемных металлических УМЗ материалов. Рассмотрены методы оценки трещиностойкости конструкционных сталей, перспективные методы изучения поверхности разрушения и зон пластической деформации под ней.

Во второй главе приведено описание материалов и методик исследования. Материалом исследования являются передельные трубы из конструкционных углеродистых и низколегированных сталей 09Г2С, 25 и 35Х, прошедших термическую и деформационно-термическую обработку. Обработку проводили на передельных трубах по 4 режимам, включающим получение высокоотпущенного состояния и последующие деформационные и термические воздействия:

Режим обработки №1 – закалка и высокий отпуск. Передельные трубы из стали 09Г2С нагревали под закалку на температуру 920 ± 10 °С, из стали 25 – на температуру 885 ± 10 °С, из стали 35Х – на температуру 860 ± 10 °С. Во всех случаях время выдержки при заданных температурных режимах составляло 40 минут. Для последующего охлаждения передельные трубы погружали вертикально в закалочный бак с водой. Отпуск осуществляли при температуре 570 ± 10 °С. Время выдержки при заданном температурном режиме составляло 60 минут. После выдержки передельные трубы охлаждались в воде.

Режим обработки №2 – холодная радиальная ковка передельных труб в высокоотпущенном состоянии. Холодную радиальную ковку передельных труб проводили за три последовательных прохода с суммарной степенью обжатия $\varepsilon \sim 55\%$.

Режимы обработки №3 и №4 – последеформационное термическое воздействие. Передельные трубы, прошедшие обработку по режиму №2, подвергали нагреву на температуру 300 °С и 600 °С для режима №3 и №4 соответственно, с выдержкой в течении 1 часа и последующим охлаждением в воде.

Уровень и параметры динамической трещиностойкости определяли по диаграммам динамической трещиностойкости, построенным по результатам испытаний серий образцов двух групп: 1 – стандартные образцы тип 17 по ГОСТ 9454-78, и 2 – образцы того же типа с двумя дополнительными V-образными надрезами глубиной 1 мм, нанесенными по бокам от основного концентратора и позволяющими перевести условие разрушения образцов из смешенного напряженно-деформированного состояния в условие, наиболее приближенное к плоско деформированному. Перед динамическими испытаниями в образцах обеих групп наводили усталостную трещину различной относительной длины.

Макроскопические расщепления на поверхности изломов образцов, разрушенных в ходе динамических испытаний, качественно и количественно исследовали с помощью светового стереомикроскопа Olympus SZX-16 и лазерного конфокального сканирующего микроскопа Olympus LEXT 4000 в диапазоне увеличений $\times 7 - \times 500$. Исследование поверхности разрушения изломов образцов проводили с помощью сканирующего электронного микроскопа FeI Phenom G2 ProX, увеличение $\times 500 - \times 15000$, ускоряющее напряжение 15 кВ. Количественные параметры расщеплений и микрорельефа поверхности разрушения определяли на электронно-фрактографических изображениях и 3D моделях участков поверхности в программном обеспечении Olympus Stream Motion, Siams и Surfer.

Исследование зон пластической деформации под поверхностью разрушения осуществляли с помощью автоматизированного микротвердомера DuraScan 70 фирмы EMCO-TEST, на образцах, подготовленных в соответствии со схемой на рисунке 1. Систематические измерения микротвердости под поверхностью разрушения проводили в направлении удаления от поверхности разрушения вглубь материала, выстраивая отпечатки микротвердости в дорожки по 60 – 200 отпечатков, и в направлении распространения динамической трещины. В направлении распространения динамической трещины шаг между дорожками отпечатков микротвердости составлял 100 мкм в области старта динамической трещины и постепенно возрастал по мере удаления от места старта до 300-400 мкм. Нагрузка при измерениях составляла 0,245 Н, шаг между отпечатками микротвердости в дорожках - 45 мкм, расстояние первых отпечатков в дорожках до поверхности разрушения - не менее 35 мкм. Построение карт распределения микротвердости в зонах пластической деформации исследуемых сталей и определение параметров зон производили в программном обеспечении Surfer, фирмы Golden Software.

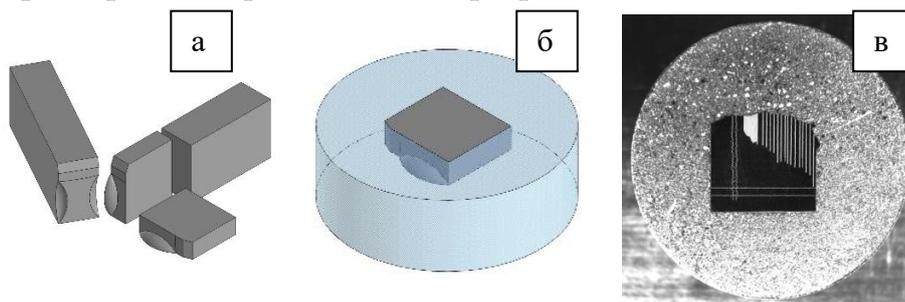


Рисунок 1 - Схема разрезки (а) и запрессовки (б) фрагмента разрушенного образца и его общий вид после проведения систематических измерений микротвердости (в).

В третьей главе представлены результаты исследования структуры, твердости, характеристик прочности, ударной вязкости и параметров динамической трещиностойкости конструкционных сталей.

Результаты исследования микроструктуры конструкционных сталей, после закалки и высокого отпуска, с помощью растровой электронной микроскопии (РЭМ) показали, что структура стали 09Г2С в поперечном сечении передельной трубы представлена дисперсным сорбитом отпуска, рисунок 2, а. В стали 25, рисунок 2, д, наряду с сорбитом отпуска, наблюдали микрообъемы структуры, образованной вследствие недостаточной устойчивости переохлажденного аустенита в процессе закалочного охлаждения. Закономерности структурообразования стали 35Х в поперечном сечении, рисунок 2, и подобны сталям 09Г2С и 25. Однако, наряду со структурой дисперсного сорбита отпуска, в стали 35Х наблюдали

объемы, в которых присутствовал дисперсный квазиэвтектоид – троостит, что, как и в стали 25, свидетельствует о недостаточной устойчивости переохлажденного аустенита в процессе закалочного охлаждения. Отличий в структуре сталей в поперечном и продольных сечениях передельных труб выявлено не было.

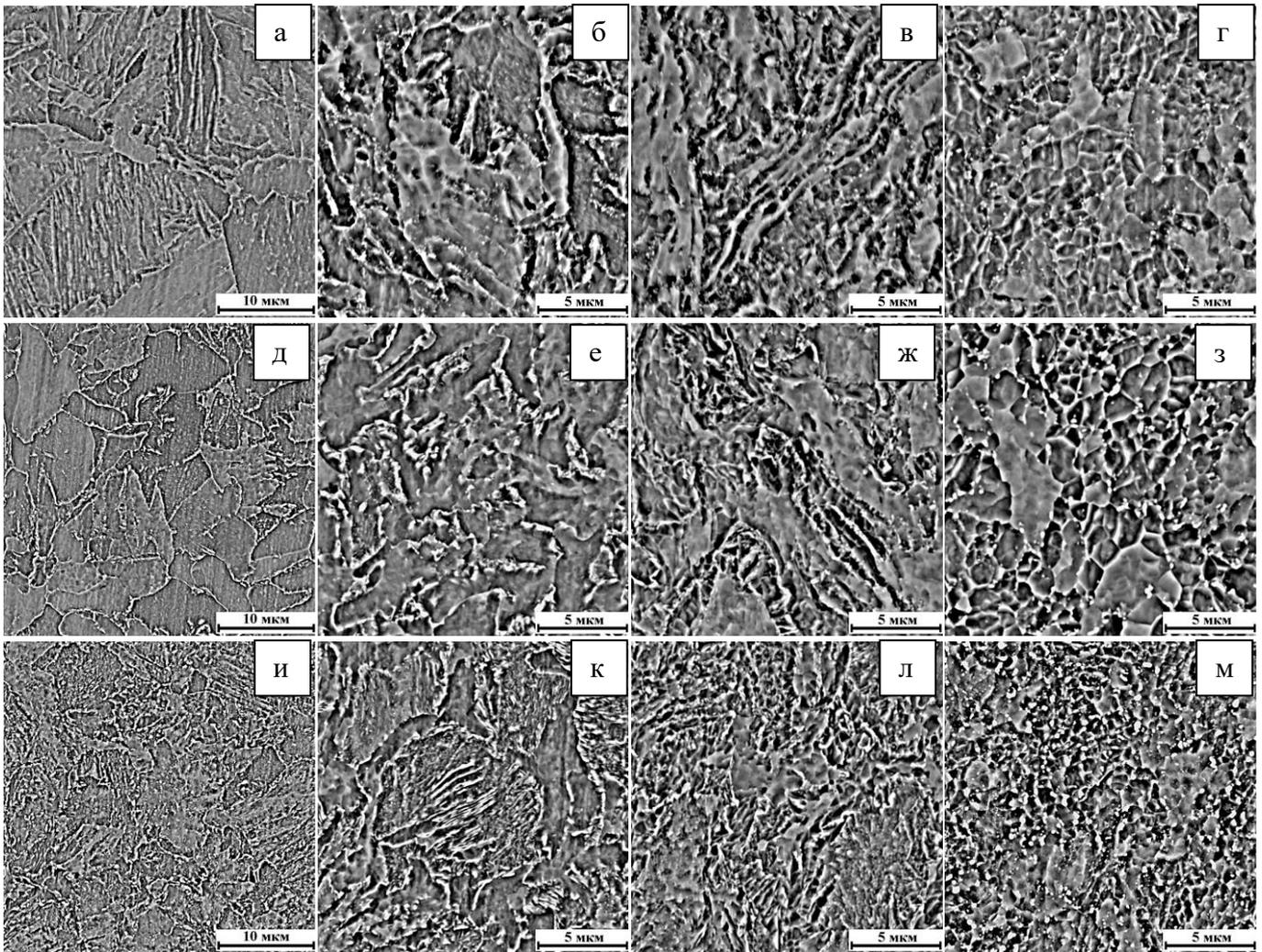


Рисунок 2 - Структура сталей 09Г2С (а-г), 25 (д-з) и 35Х (и-м) обработанных по режимам №1 (а, д, и), №2 (б, е, к), №3 (в, ж, л) и №4 (г, з, м) в поперечном сечении. РЭМ, а, д, и - $\times 8000$, б-г, е-з, к-м - $\times 15000$.

Проведение деформационно-термической обработки передельных труб по режиму №2 приводит к диспергированию структуры в поперечном сечении, рисунок 2, б, е, к, и вытягиванию ее элементов в продольном сечении. В стали 25 в поперечном и продольном сечении передельной трубы наблюдали дисперсные карбиды, в объемах структуры немартенситной морфологии, имеющей изогнутый характер. В отдельных микрообъемах структуры стали 35Х, рисунок 2, к, наблюдали изгиб пластинок цементита в тонкопластинчатом эвтектоиде – троостите.

Обработка исследуемых сталей по режиму №3 не привела к заметным изменениям структуры в поперечном сечении передельных труб, рисунок 2, в, ж, л. В поперечном сечении передельной трубы из стали 35Х наблюдали выравнивание цементитных пластинок троостита и начало их фрагментации. В осевом сечении общая вытянутость элементов структуры сохраняется, в стали 09Г2С наблюдали увеличение объемов структуры с изогнутыми рейками α -фазы.

Проведение деформационно-термической обработки по режиму №4 формирует в исследуемых сталях однородную УМЗ структуру в поперечном сечении, рисунок 2, г, з, м. В осевом сечении направленность структуры сохраняется. В сталях 25 и 35Х практически

полностью отсутствуют элементы структуры, образованные вследствие недостаточной устойчивости переохлажденного аустенита в процессе закалочного охлаждения. Средние размеры зерен/субзерен составляют 0,70 мкм, 0,90 мкм и 0,55 мкм для сталей 09Г2С, 25 и 35Х соответственно.

Результаты испытаний исследуемых сталей на одноосное растяжение, ударную вязкость и динамическую трещиностойкость приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Механические свойства исследуемых сталей после различных режимов обработки.

| Сталь, марка | Режим, № | $\sigma_{0,2}$ | σ_B | δ | ψ | КСТ | КСТ* | λ^* |
|--------------|----------|----------------|------------|----------|--------|--------------------|------|-------------|
| | | МПа | | % | | МДж/м ² | | |
| 09Г2С | 1 | 520 | 650 | 33,0 | 79,0 | 2,10 | 1,24 | 0,68 |
| | 2 | 770 | 825 | 17,5 | 69,5 | 1,75 | 0,82 | 0,68 |
| | 3 | 810 | 820 | 13,0 | 70,5 | 1,65 | 0,73 | 0,60 |
| | 4 | 560 | 595 | 23,0 | 74,0 | 2,20 | 1,17 | 0,78 |
| 25 | 1 | 400 | 570 | 31,0 | 76,5 | 2,00 | 1,09 | 0,67 |
| | 2 | 765 | 825 | 13,5 | 65,5 | 1,70 | 0,79 | 0,63 |
| | 3 | 815 | 820 | 9,8 | 66,0 | 1,57 | 0,73 | 0,62 |
| | 4 | 640 | 645 | 21,0 | 73,5 | 1,80 | 0,97 | 0,64 |
| 35Х | 1 | 580 | 780 | 24,0 | 70,0 | 1,27 | 0,78 | 0,64 |
| | 2 | 865 | 965 | 21,0 | 65,0 | 0,86 | 0,63 | 0,59 |
| | 3 | 1035 | 1035 | 17,0 | 60,0 | 0,85 | 0,58 | 0,57 |
| | 4 | 830 | 830 | 27,0 | 67,0 | 1,16 | 0,81 | 0,74 |

Проведение последеформационного отжига при 300 °С приводит к увеличению предела прочности и условного предела текучести исследуемых сталей до максимальных значений среди рассматриваемых режимов обработки. Последеформационный отжиг при 600 °С формирует в исследуемых сталях комплекс механических свойств с показателями ударной вязкости и динамической трещиностойкости близкими к высокоотпущенному состоянию, и повышенными, относительной высокоотпущенного состояния, показателями предела прочности и условного предела текучести.

В четвертой главе выявлены особенности строения изломов конструкционных сталей, подвергнутых деформационно-термической обработке по режимам №2-№4, заключающиеся в образовании расщеплений металла на поверхности разрушения, проведены количественные исследования ямочного рельефа поверхности разрушения, по результатам которого получила развитие классификация элементов поверхности разрушения по типам и размерам, предложен механизм образования расщеплений металла на поверхности разрушения.

Исследования поверхности разрушения с помощью РЭМ показали, что разрушение во всех случаях происходило по вязкому механизму. Элементы поверхности разрушения представлены ямками различной морфологии, соотношение которых на поверхности разрушения изменялось после проведения деформационно-термической обработки, рисунок 3.

Для подробного количественного анализа элементов поверхности разрушения была проведена их классификация. Все ямки в зависимости от соотношения средних поперечных размеров, определенных на плоских микрофрактографических снимках, к средней глубине, определенной на 3D моделях участков поверхности разрушения, были разделены на ямки-конусы, уплощенные ямки-конусы и ямки-тоннели, а по поперечному размеру на крупные ямки ($d \geq 5$ мкм), к которым относятся перечисленные выше, и микро-ямки с поперечным размером менее 5 мкм. Результаты количественного анализа элементов поверхности разрушения исследуемых сталей представлены в таблице 2.

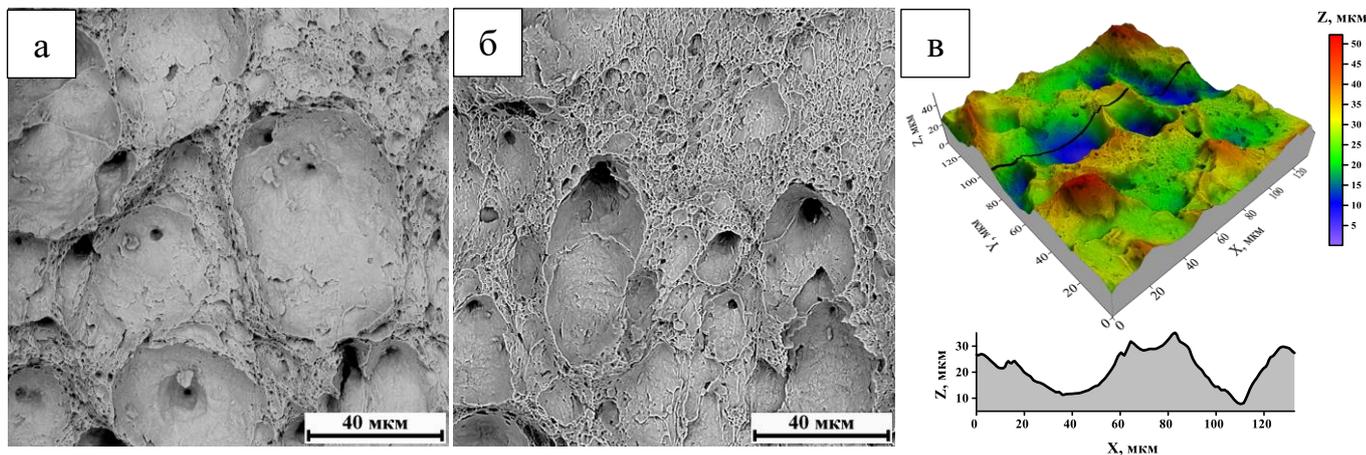


Рисунок 3 - Ямочный рельеф (а, б) и 3D модель (в) участка поверхности разрушения стали 09Г2С, обработанной по режимам №1 (а) и №3 (б, в). РЭМ, $\times 2000$.

Таблица 2 - Размеры ямок и их доля на поверхности разрушения исследуемых сталей.

| Сталь, марка | Режим, № | Доля ямок, % | | | | Размер ямок, мкм | | | |
|--------------|----------|--------------|----------|-----|------|--------------------------------------|----------------------------------|----------------------------|----------------------------|
| | | крупные ямки | | | МК | $D_{\text{ср}} \text{ крупных ямок}$ | $D_{\text{ср}} \text{ УЯК + ЯК}$ | $D_{\text{ср}} \text{ ЯТ}$ | $H_{\text{ср}} \text{ ЯТ}$ |
| | | всего | УЯК + ЯК | ЯТ | | | | | |
| 09Г2С | 1 | 68,8 | 66,6 | 2,2 | 31,2 | 16,3 | 16,5 | 10,8 | 16,6 |
| | 2 | 57,1 | 55,0 | 2,1 | 42,9 | 15,5 | 15,7 | 9,1 | 19,4 |
| | 3 | 55,5 | 52,6 | 2,9 | 44,5 | 13,8 | 14,0 | 9,4 | 22,0 |
| | 4 | 65,8 | 63,3 | 2,5 | 34,2 | 17,0 | 17,2 | 10,2 | 18,5 |
| 25 | 1 | 56,8 | 53,8 | 3,0 | 43,2 | 16,5 | 16,9 | 8,5 | 13,1 |
| | 2 | 43,1 | 40,0 | 3,1 | 56,9 | 13,7 | 14,2 | 7,0 | 12,5 |
| | 3 | 40,5 | 36,9 | 3,6 | 59,5 | 12,7 | 13,2 | 7,1 | 14,6 |
| | 4 | 52,5 | 49,3 | 3,2 | 47,5 | 15,0 | 15,5 | 7,5 | 10,5 |
| 35Х | 1 | 23,5 | 21,5 | 2,0 | 76,5 | 12,5 | 12,6 | 11,1 | 14,3 |
| | 2 | 19,7 | 16,5 | 3,2 | 80,3 | 11,9 | 12,6 | 8,0 | 17,5 |
| | 3 | 16,8 | 13,0 | 3,8 | 83,2 | 11,2 | 11,7 | 8,8 | 18,7 |
| | 4 | 25,0 | 19,8 | 5,2 | 75,0 | 13,8 | 14,7 | 10,5 | 19,7 |

ЯК - ямки-конусы; УЯК - уплощенные ямки-конусы; ЯТ - ямки-тоннели; МК - микро-ямки.

По результатам исследования изломов конструкционных сталей и их поверхности разрушения показано, что формирование макро- расщеплений, доля которых максимальна после обработки по режиму №3, происходит путем объединения близкорасположенных более мелких мезо- расщеплений, благоприятно ориентированных в полях напряжений, развивающихся в процессе разрушения. Иницирующий механизм образования мезо-расщеплений, в условиях вытянутости элементов структуры и неметаллических включений в осевом направлении передельных труб после проведения обработки по режиму №2, заключается в слиянии близкорасположенных глубоких ямок-тоннелей в микро-расщепления и дальнейшем объединении нескольких микро- расщеплений, в процессе динамического разрушения, в более крупные.

Пятая глава посвящена исследованию зон пластической деформации, формирующихся в процессе испытаний на ударную вязкость и динамическую трещиностойкость образцов высокоотпущенных конструкционных сталей, рисунок 4, влиянию деформационно-термической обработки на форму и размеры зон.

Анализ результатов систематических измерений микротвердости под поверхностью разрушения исследуемых сталей в высокоотпущенном состоянии показал, что в строении зон пластической деформации можно выделить 3 области, рисунок 4, а: 1 – область старта динамической трещины, 2 - центральную область, и 3 – область силового воздействия молота копра.

Холодная радиальная ковка, а также – последеформационный отжиг, не изменяют строения зон пластической деформации, но приводят к «заострению» формы в области старта динамической трещины, рисунок 4, б. Линейные размеры в зоны пластической деформации области старта трещины, как и площадь всей зоны, или отдельных областей уменьшается, достигая минимальных значений после обработки по режиму №2, таблица 3.

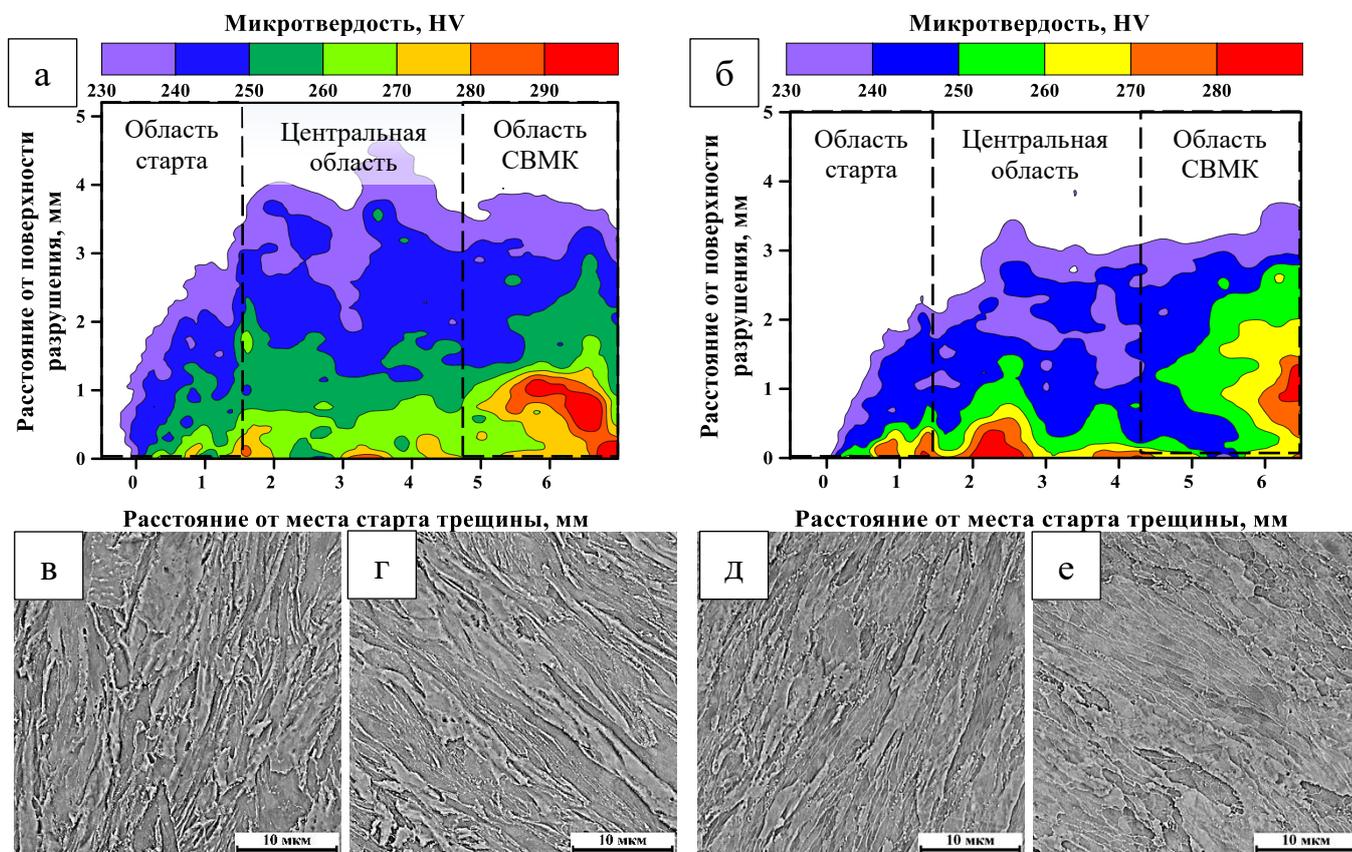


Рисунок 4 - Карты распределения микротвердости в зонах пластической деформации под поверхностью разрушения (а, б) и структура в локальных участках области старта динамической трещины (в, д, $\times 8000$) и области силового воздействия молота копра (г, е, $\times 8000$) стали 09Г2С, обработанной по режиму №1 (а, в, г) и №4 (б, д, е).

В процессе построения и анализа карт распределения микротвердости под поверхностью разрушения было установлено, что конечные размеры зон пластической деформации формируются двумя развивающимися навстречу друг другу областями – стартовой и областью силового воздействия молота копра. Исследования структуры с помощью РЭМ в локальных участках этих областей с максимальным уровнем микротвердости показали пластическое течение материала, рисунок 4, в-е. В области силового воздействия молота копра, наряду с признаками пластического течения материала непосредственно под поверхностью разрушения, наблюдали образование полосовой структуры адиабатического сдвига, рисунок 4, г, е.

Таблица 3 - Параметры зон пластической деформации исследуемых сталей.

| Режим обработки, № | Сталь 09Г2С | | | Сталь 25 | | | Сталь 35Х | | |
|--------------------|-------------|----------------------|------------------|----------|----------------------|------------------|-----------|----------------------|------------------|
| | гзпд | S _{ст. зпд} | S _{зпд} | гзпд | S _{ст. зпд} | S _{зпд} | гзпд | S _{ст. зпд} | S _{зпд} |
| | мм | мм ² | | мм | мм ² | | мм | мм ² | |
| 1 | 2,85 | 2,38 | 25,2 | 2,95 | 3,44 | 29,9 | 2,15 | 2,22 | 17,9 |
| 2 | 1,25 | 0,52 | 5,66 | 1,15 | 0,73 | 4,95 | 0,15 | 0,08 | 3,03 |
| 3 | 1,25 | 0,9 | 6,73 | 1,15 | 0,76 | 10,37 | 0,15 | 0,28 | 2,15 |
| 4 | 2,25 | 1,1 | 17,59 | 2,15 | 1,33 | 15,28 | 1,65 | 1,09 | 13,72 |

гзпд- линейный размер зоны пластической деформации, определенный на расстоянии 1 мм от места старта динамической трещины; S_{ст. зпд}- площадь ЗПД области старта динамической трещины; S_{зпд}- площадь ЗПД под поверхностью разрушения

В центральной области зон значительное упрочнение материала наблюдали в локальных участках непосредственно у поверхности разрушения, форма которых качественно соответствует изменению макрорельефа поверхности излома. Структура исследуемых сталей в этой области практически не отличается от структуры матричного материала, не затронутого пластической деформацией.

В **шестой главе** проведен сравнительный анализ результатов исследования характеристик механических свойств, параметров макро- и микрорельефа поверхности изломов и зон пластической деформации под поверхностью разрушения конструкционных сталей, подвергнутых деформационно-термической обработке. Выявлены основные факторы, определяющие высокий уровень ударной вязкости и динамической трещиностойкости сталей.

Сравнительный анализ механических свойств, таблица 1, и количественных исследований расщеплений на поверхности разрушения исследуемых сталей показал, что формирование расщеплений способствует поддержанию высокого уровня ударной вязкости и динамической трещиностойкости исследуемых сталей, в условиях значительного повышения $\sigma_{0,2}$ и σ_B после обработки по режиму №3 по сравнению со значениями, полученными после обработки по режиму №2. Подробные исследования макро- и мезо-расщеплений, показывают, что их формирование в изломах увеличивает общую площадь поверхности разрушения, рисунок 3, и сопровождается пластическим деформированием металла в подповерхностных областях, рисунок 3, б- г, что в совокупности приводит к большим энергозатратам при разрушении в условиях, затрудняющих пластическую деформацию.

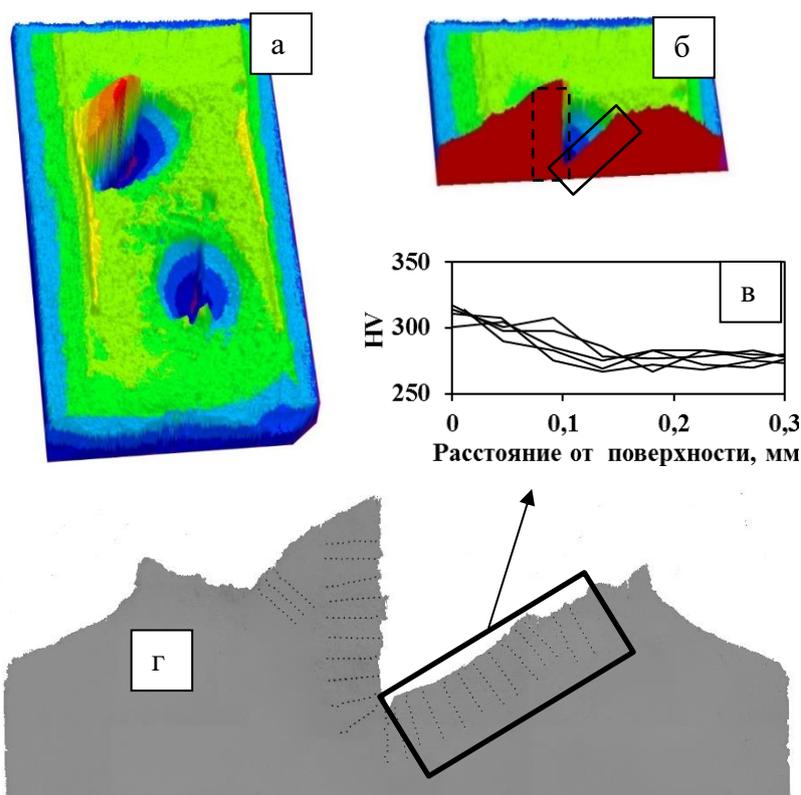


Рисунок 5 - 3D модель излома стали 35X, обработанной по режиму №3, с расщеплениями на поверхности разрушения (а), схема расположения исследуемых областей под наклонной (—) и вертикальной (- -) поверхностью расщепления (б) и результаты измерения микротвердости (в) под наклонной поверхностью расщепления в одном из поперечных сечений разрушенного образца (г).

Для подтверждения вывода о положительном влиянии расщеплений на поверхности изломов исследуемых сталей, подвергнутых деформационно-термической обработке, были проведены динамические испытания образцов стали 35, подвергнутой обработке по аналогичным режимам, при отрицательных температурах. Результаты испытаний показали, что снижение температуры динамических испытаний приводит к увеличению доли расщеплений в изломах образцов стали 35, обработанной по режимам №2 и №3, а снижение ударной вязкости КСТ происходит не так стремительно, как в высокоотпущенном

состоянии. Ударная вязкость КСТ⁻²⁰ стали 35, обработанной по режимам №2-№4 на 50-200% выше КСТ⁻²⁰ стали в высокоотпущенном состоянии. При температуре испытаний -100 °С наибольшие показатели ударной вязкости КСТ⁻¹⁰⁰, за счет сформированных расщеплений на поверхности изломов, демонстрируют образцы стали, прошедшей обработку по режимам №2 и №3, которые оказываются более чем на 100% выше КСТ⁻¹⁰⁰ стали, обработанной по режиму №4, и более чем на 300% выше КСТ⁻¹⁰⁰ стали 35 в высокоотпущенном состоянии.

Среди исследованных параметров ямочного микрорельефа поверхности разрушения наибольшее влияние на уровень ударной вязкости и ДТ, в данных условиях проведения эксперимента, оказывают средний размер крупных ямок и их доля на поверхности разрушения сталей, рисунок 6, а, б. Динамическая трещиностойкость и ударная вязкость, в большей степени, линейно повышаются с увеличением средних поперечных размеров и доли крупных ямок в изломах.

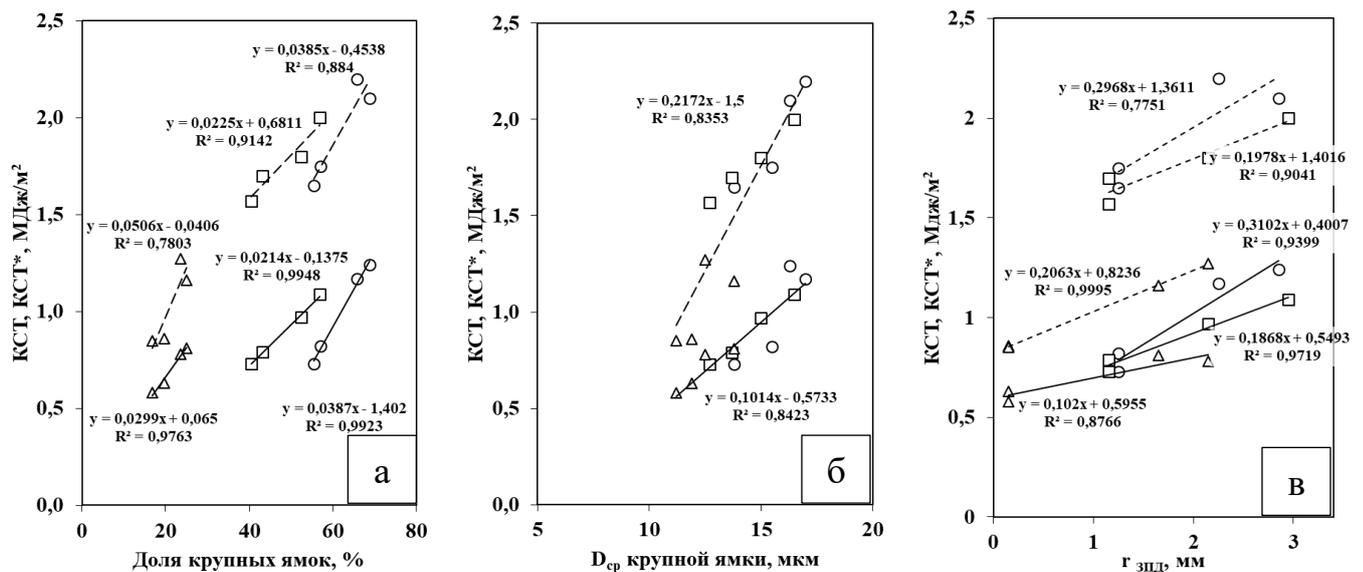


Рисунок 6 - Влияние доли (а) и средних поперечных размеров (б) крупных ямок на поверхности разрушения и величины r_{зпд} (в) на уровень ударной вязкости и динамической трещиностойкости сталей 09Г2С (○), 25 (□) и 35Х (△).

Важно отметить, что формирование исследованного ямочного рельефа поверхности разрушения происходит в материале, претерпевшем воздействия полей напряжений и деформаций, действующих в момент нагружения и дальнейшего движения динамической трещины. Увеличение размеров зон пластической деформации в стали 09Г2С и 25 сопровождается формированием ямочного рельефа с преимущественно (более 50%) крупными ямками и ростом поперечных размеров крупных ямок до 17 и 16,5 мкм. В стали 35Х с увлечением размеров зон пластической деформации микрорельеф поверхности разрушения после всех режимов обработки доминирующим типом ямок остаются микро-ямки, но, также, как и в сталях 09Г2С и 25 средний поперечный размер крупных ямок и их доля повышаются. Таким образом, размерные параметры зон пластической деформации, характеризующие способность металла сопротивляться старту и развитию динамической трещины, определяют как параметры макро- и микрорельефа поверхности разрушения, так и, в конечном счете – уровень ударной вязкости и динамической трещиностойкости.

Среди параметров зон пластической деформации под поверхностью исследуемых сталей, напрямую оказывающих влияние на уровень ударной вязкости и динамической трещиностойкости, необходимо выделить r_{зпд} – линейный размер зоны, определенный на расстоянии 1 мм от старта динамической трещины. Увеличение размера r_{зпд} в исследуемых сталях приводит к линейному росту ударной вязкости и динамической трещиностойкости, рисунок 6, в.

Основные результаты и выводы по работе

1. Установлено, что проведение холодной радиальнойковки с суммарной степенью обжатия 55% и последующих отжигов приводит к существенному диспергированию элементов структуры сталей и устранению несовершенств структуры, связанных с недостаточной устойчивостью переохлаждённого аустенита в процессе закалочного охлаждения. Показано, что после проведения отжига при температуре 600 °С однородная УМЗ структура сталей 09Г2С, 25 и 35Х со средним размером зерна/субзерна 0,7 мкм, 0,9 мкм и 0,55 мкм соответственно, формирует в них комплекс механических свойств с показателями ударной вязкости и динамической трещиностойкости близкими к высокоотпущенному состоянию и повышенными характеристиками прочности.

2. Показана возможность экспериментальной оценки динамической трещиностойкости конструкционных сталей, подвергнутых деформационно-термической обработке, по результатам ударных испытаний двух серий образцов на маятниковом копре, с последующим построением диаграмм динамической трещиностойкости.

3. Описан инициирующий механизм образования макро-расщеплений на поверхности изломов сталей 09Г2С, 25 и 35Х, подвергнутых деформационно-термической обработке, 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, прошедших деформационно-термическую обработку, способствует поддержанию высоких показателей динамической трещиностойкости и ударной вязкости, в том числе и при пониженных температурах.

4. Показано, что проведение холодной радиальнойковки, а также последующих отжигов, не изменяет механизма роста динамической трещины - в разрушенных образцах во всех случаях наблюдали ямочный характер разрушения. Для каждой из исследуемой стали установлено характерное ей сочетание ямок различной морфологии и размеров, сопровождающее соответствующие показатели ударной вязкости и динамической трещиностойкости после обработки по различным режимам. Показано, что увеличение средних поперечных размеров крупных ямок в диапазоне значений 11,2-16,9 мкм и их доли в изломе с 16,8 до 68,8% линейно увеличивает показатели ударной вязкости и динамической трещиностойкости.

5. Успешно апробирована методика исследования зон пластической деформации под поверхностью разрушения конструкционных сталей 09Г2С, 25 и 35Х, обработанных по различным режимам термической и деформационно-термической обработки. По результатам систематических измерений микротвердости под поверхностью разрушения образцов сталей построены и проанализированы карты распределения микротвердости в зонах пластической деформации. Установлена линейная зависимость уровня ударной вязкости и динамической трещиностойкости от размеров зон. С помощью РЭМ показано, что локальные участки зон пластической деформации с максимальным деформационным упрочнением соответствуют участкам образца с локализованным пластическим течением материала.

6. Установлено, что увеличение размеров зон пластической деформации, в первую очередь - гзпд, в диапазоне значений 0,15-2,95 мм для исследуемых сталей, приводит к формированию на поверхности разрушения ямочного рельефа с более крупными ямками и большей их долей, и линейному росту ударной вязкости и динамической трещиностойкости. При уменьшении размеров зон, в условиях повышения условного предела текучести и предела прочности, после проведения обработок по режиму №3, до значений σ_B 820, 820 и 1035 МПа, высокий уровень ударной вязкости и динамической трещиностойкости поддерживается за счет формирования на поверхности изломов сталей макро- и мезо-расщеплений с общей долей 59%, 10% и 22% для сталей 09Г2С, 25 и 35Х.

Основные публикации по теме диссертационной работы

Статьи, опубликованные в рецензируемых научных изданиях, определенных Высшей аттестационной комиссией при Министерстве науки и высшего образования Российской Федерации:

1. 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 // *Metal Science Heat Treatment*. -2013. - № 54. – pp. 600–604. <https://doi.org/10.1007/s11041-013-9556-1> [Scopus, WoS].

2. 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 [ВАК].

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 // *Metal Science Heat Treatment*. – 2013. - № 54. – pp. 595–599. <https://doi.org/10.1007/s11041-013-9555-2> [Scopus, WoS].

3. Симонов М. Ю., Шайманов Г. С., Симонов Ю. Н. Формирование зон пластической деформации в закаленной и отпущенной стали 09Г2С во время динамических испытаний // *Металловедение и термическая обработка металлов*. - 2015. - №12. - С. 44-50 [ВАК].

Переводная версия: Simonov M.Y., Shaimanov G.S. & Simonov Y.N. Formation of zones of plastic strain in quenched and tempered steel 09G2S during dynamic tests // *Metal Science Heat Treatment*. – 2016. - № 57. – pp. 746–751. <https://doi.org/10.1007/s11041-016-9952-4> [Scopus, WoS].

4. Симонов М. Ю., Шайманов Г. С., Симонов Ю. Н., Ханов А. М. Возможность прогнозирования свойств высоковязких материалов путем комплексного анализа размера зон пластической деформации и других параметров стали 09Г2С // *Металловедение и термическая обработка металлов*. - 2016. - №2. – С. 49-54 [ВАК].

Переводная версия: Simonov M.Y., Shaimanov G.S., Simonov Y.N. et al. Possibility of prediction of properties of high-toughness materials by complex analysis of the size of zones of plastic strain and other parameters of steel 09G2S // *Metal Science Heat Treatment*. – 2016. - № 58. – pp. 106–110. <https://doi.org/10.1007/s11041-016-9971-1> [Scopus, WoS].

5. Шайманов Г. С., Симонов М. Ю., Симонов Ю. Н., Перцев А. С. Особенности поверхности разрушения стали 09Г2С после холодной радиальнойковки // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение*. - 2016. - Т. 18. - № 3. - С. 119-134 [ВАК].

6. 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 [ВАК].

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 // *Metal Science Heat Treatment*. – 2016. – № 58. – pp. 82–90. <https://doi.org/10.1007/s11041-016-9968-9> [Scopus, WoS].

7. 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 // Metal Science Heat Treatment. – 2017. - № 59. – pp. 389–396. <https://doi.org/10.1007/s11041-017-0161-6> [Scopus, WoS].

8. 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 [ВАК].

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 // Physics of Metals and Metallography. -2018. – № 119. - pp. 52–59. <https://doi.org/10.1134/S0031918X18010155> [Scopus].

9. 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 [ВАК].

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. № 63. – pp. 496–510. <https://doi.org/10.1007/s11015-019-00850-7> [Scopus, WoS].

10. 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 // Metal Science Heat Treatment. – 2020. - № 61. – pp. 628–638. <https://doi.org/10.1007/s11041-020-00471-x> [Scopus, WoS].

11. Симонов М. Ю., Симонов Ю. Н., Шайманов Г. С. Структурные и фратографические особенности формирования расщеплений в низколегированной стали, подвергнутой деформационно-термической обработке // Металловедение и термическая обработка металлов. - 2019. - № 10 (772). - С. 5-15 [ВАК].

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 // Metal Science Heat Treatment. – 2020. - № 61. – pp. 591–600. <https://doi.org/10.1007/s11041-020-00466-8> [Scopus, WoS].

Полученные патенты:

12. 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.

13. 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.

Публикации в прочих изданиях:

14. Shaimanov G.S., Simonov M. Yu., Simonov Yu. N. Comparative analysis of machine steels structure parameters and dynamic crack resistance after deformation-and-heat treatment // Materials Today: Proceedings. - 2019. – V. 19. – P. 5. - pp. 2167-2173 [Scopus].