

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
НАУКИ ИНСТИТУТ МЕТАЛЛУРГИИ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЯ им. А.А.
БАЙКОВА РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

На правах рукописи

Судьин Владислав Витальевич

ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ РАЗРУШЕНИЯ
НИЗКОЛЕГИРОВАННЫХ СТАЛЕЙ И ИХ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ В
ИНТЕРВАЛЕ ВЯЗКО-ХРУПКОГО ПЕРЕХОДА

Специальность 01.04.07 –
«Физика конденсированного состояния»

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени кандидата
физико-математических наук

Москва – 2021

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова Российской академии наук (ИМЕТ РАН)

Научный руководитель: **Солнцев Константин Александрович**
академик РАН,
научный руководитель ИМЕТ РАН

Научный консультант: **Кантор Матвей Матвеевич**
кандидат технических наук,
ведущий научный сотрудник ИМЕТ РАН

Официальные оппоненты: **Кудря Александр Викторович**
доктор технических наук, профессор кафедры
металловедения и физики прочности «Национальный
исследовательский технологический университет
«МИСиС»

Колобов Юрий Романович
доктор физико-математических наук, профессор,
главный научный сотрудник лаборатории физико-
химической инженерии композиционных материалов
Федерального государственного бюджетного
учреждения науки «Институт проблем химической
физики» РАН,

Ведущая организация: Федеральное государственное унитарное предприятие
«Центральный научно-исследовательский институт
черной металлургии им. И.П. Бардина» (ФГУП
«ЦНИИчермет им. И.П. Бардина»)

Защита диссертации состоится «24» июня 2021 года в 14:00 на заседании диссертационного совета Д 002.060.01, созданного на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова Российской академии наук (ИМЕТ РАН), по адресу: 119334, г. Москва, Ленинский проспект, д. 49, БКЗ.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИМЕТ РАН, а также на официальном сайте ИМЕТ РАН <http://www.imet.ac.ru>

Автореферат разослан « » _____ 2021 года

Ученый секретарь диссертационного совета,
доктор технических наук



Костина М. В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

Актуальность работы определяется необходимостью учёта вязкости материалов для применения в условиях низких температур и опасностью их хрупкого разрушения. Хладноломкость низколегированных сталей является основной проблемой для их применения в условиях низких температур. Особую сложность имеет проведение процесса сварки этих сталей, обеспечивающее достаточный уровень вязкости сварных соединений.

Не решённой проблемой для применения низколегированных сталей в условиях низких температур является рассеяние значений ударной вязкости в интервале вязко-хрупкого перехода. Такое рассеяние зачастую приводит к недостоверной оценке надёжности материала. Одной из задач на решение которой направлена эта работа – изучение микроструктурных факторов, влияющих на надёжность низколегированных сталей и их сварных соединений. Решение этой масштабной задачи предлагается проводить путём анализа большого массива испытаний на ударный изгиб [1] и глубокого исследования процесса разрушения и структуры материала для выявления особенностей, определяющих уровень ударной вязкости металла и величину рассеяния значений ударной вязкости в испытаниях.

Цель и задачи исследования

Целью работы является: исследование особенностей разрушения сварных соединений низколегированных сталей и основного металла в интервале вязко-хрупкого перехода и влияния микроструктуры на процесс разрушения. Для достижения заявленной цели были решены следующие задачи, поставленные в ходе исследования:

- разработка метода автоматического анализа изломов образцов, испытанных на ударный изгиб;
- анализ взаимосвязи между параметрами динамической кривой и механизмом разрушения в интервале вязко-хрупкого перехода;

- анализ распределения энергии между стадиями разрушения в испытаниях на ударный изгиб;
- исследование путей диссипации энергии при росте трещины скола в интервале вязко-хрупкого перехода;
- исследование микроструктурных особенностей, приводящих к повышенному рассеянию значений ударной вязкости;
- исследование микроструктурных особенностей, определяющих распределение энергии между стадиями разрушения;
- исследование связи между микроструктурой и сопротивляемостью росту коррозионно-механических трещин.

Научная новизна работы

Научная новизна работы заключается в том, что с использованием современных методов анализа микроструктуры, данных фрактографического анализа и инструментированных испытаний на ударный изгиб изучены особенности разрушения сварных соединений и основного металла низколегированных сталей в интервале вязко-хрупкого перехода:

- установлено соотношение между параметрами динамической кривой и механизмом разрушения образца в испытаниях на ударный изгиб;
- показаны пути диссипации энергии при образовании трещины скола в ферритной микроструктуре;
- показано влияние микроструктурных факторов, становящихся точками зарождения скола, на распределение энергии между стадиями разрушения;
- исследовано влияние предварительной пластической деформации на способность к зарождению скола на хрупких неметаллических включениях в ферритной матрице и рассеяние значений ударной вязкости;
- изучены особенности перехода от межзёрненного к транскристаллитному пути роста трещины коррозионного растрескивания под напряжением (КРН) и показано влияние характера границ зёрен на этот процесс.

Практическая и научная значимость работы

Экспериментально показано различие в механизмах разрушения основного металла и металла сварных швов низколегированных сталей, влияющее на оценку надежности в испытаниях на ударный изгиб и предложены подходы к оценке надежности с учётом показанных различий. Полученные в работе результаты исследования влияния микроструктуры на механизм разрушения металла сварных швов могут быть использованы в разработке новых сварочных материалов для оптимизации состава электродов и строения неметаллических включений.

В ходе работы были разработаны автоматизированные методы анализа изображений изломов и динамических кривых разрушения, позволяющие использовать новые фрактографические подходы и критерии стадийности разрушения для определения надежности металла низколегированных сталей.

Основные положения, выносимые на защиту

В применении к низколегированным сталям и их сварным соединениям на защиту выносятся следующие положения:

- 1) экспериментальные данные, описывающие микроструктурные механизмы диссипации энергии при росте трещины скола в ферритной микроструктуре;
- 2) результаты исследования влияния предварительной пластической деформации на очаги скола в околошовной зоне и рассеяние значений ударной вязкости;
- 3) результаты исследования микроструктурных факторов, влияющих на распределение энергии между этапами разрушения;
- 4) алгоритм автоматического анализа изломов образцов на ударный изгиб с применением нейронных сетей, реализованный в виде программного обеспечения;

5) результаты исследования выявленных различий в распределении энергии между стадиями разрушения для сварных соединений и основного металла;

6) подходы к анализу механизма разрушения и строения излома по параметрам динамических кривых разрушения основанные на использовании нейронных сетей;

7) выявленные кристаллографические и геометрические параметры границ зёрен, определяющие сопротивляемость их к КРН в околонеutralной среде и описание перехода от межзёренного к транскристаллитному росту трещины.

Достоверность и надежность полученных результатов

Достоверность полученных результатов определяется использованием современных высокоточных методов анализа, воспроизводимостью результатов на большом количестве сталей с различной микроструктурой и подтверждается публикацией полученных результатов в рецензируемых научных журналах и апробацией на российских и международных конференциях.

Личный вклад автора

Автор принял непосредственное участие в постановке цели и определении задач работы. Автором самостоятельно написано программное обеспечение для автоматического анализа изломов и динамических кривых разрушения, проведена пробоподготовка, в том числе с применением новых подходов, исследована микроструктура образцов с применением всех описанных методов электронной микроскопии, статистически проанализированы результаты испытаний на ударный изгиб, сделаны выводы на основе полученных данных.

Публикации

Основные результаты работы опубликованы в виде 5 статей в рецензируемых научных журналах из списка ВАК и индексируемых в системах Scopus и Web Of Science

Апробация работы

Основные результаты работы были доложены на следующих конференциях.

XI, XII, XIII, XIV, XV, XVI Российская ежегодная конференция молодых научных сотрудников и аспирантов. "Физико-химия и технология неорганических материалов".

II научно-практический семинар ООО «Газпром ВНИИГАЗ» «Повышение Надежности Магистральных Газопроводов Коррозионному Растрескиванию под Напряжением» 24–26 мая 2016 г. Москва.

IX-ая Евразийская научно-практическая конференция Прочность неоднородных структур - ПРОСТ 2018. Москва, НИТУ «МИСиС» 24-26 апреля 2018 г.

«КОРРОЗИЯ В НЕФТЕГАЗОВОЙ ОТРАСЛИ» — CORROSION OIL&GAS 2019. 22-24 мая 2019 г., Санкт-Петербург.

First Virtual European Conference on Fracture (VECF1), on-line 29 Июня – 1 Июля 2020.

Materials Science and Engineering Congress (MSE), Darmstadt, Germany 2020, 22-25 сентября 2020.

Объем и структура диссертации

Диссертация состоит из введения и 9 глав. Изложена на 189 страницах машинописного текста, содержит 147 рисунков, 7 таблиц и 185 наименований в списке литературы.

Во введении

Изложены основные научные вопросы, решаемые в ходе работы; обоснована актуальность работы; формализована цель работы, поставлены задачи, решаемые в ходе работы; показана научная новизна результатов; показана практическая значимость результатов работы; приведены положения, выносимые на защиту.

В первой главе приведён обзор литературы по основным проблемам надежности материалов, связанных с хладноломкостью и коррозионным растрескиванием. Описано актуальное состояние теории хладноломкости, современные представления о механизме коррозионного растрескивания под напряжением, микроструктурным особенностям металла, определяющим

свойства материала в ходе хрупкого разрушения в испытаниях на ударный изгиб и роста коррозионно-механической трещины. Описаны современные методы исследования, направленные на решение этих проблем.

Во второй главе

Приводятся сведения о исследованных материалах и описания методик проведенных экспериментов.

В работе использовано несколько видов низколегированных сталей – стали 09Г2С в состоянии после горячей прокатки (09Г2С ГК), после нормализации (09Г2С Н) и после закалки с отпуском (09Г2С ТУ), сталь 17Г1С после горячей прокатки и пять видов сварных швов, выполненных на стали 09Г2С ТУ и 09Г2С Н, трубные стали класса прочности К-60 и металл нефтяного трубопровода из стали 17Г1С-У, содержащий трещины КРН. Основной упор в работе сделан на исследовании различий в разрушении металла сварного шва и основного металла и описании микроструктурных особенностей, приводящих к этим различиям.

Описаны методики пробоподготовки образцов для исследования микроструктуры, в том числе методами дифракции отраженных электронов и просвечивающей электронной микроскопии. Описаны подходы к изучению микроструктуры современными электронно-микроскопическими методами, методы испытаний образцов и фрактографического анализа.

В третьей главе описан процесс разработки метода автоматического анализа изображений изломов для выделения на них областей вязкого и хрупкого разрушения. Рост трещины по вязкому механизму объединения микроразрывов приводит к образованию развитой поверхности с ямочным строением. Рост трещины скола приводит к образованию плоских фасеток, ограниченных размерами подвергшегося сколу зерна. С макроскопической точки зрения, изображения получаемых поверхностей отличаются текстурой, т.е. статистическими параметрами расположения друг относительно друга точек разной яркости. Для построения модели, описывающей принадлежность той или иной точки к вязкой или хрупкой составляющей излома было опробовано два подхода, с использованием нейронных сетей различной архитектуры. Первый

подход заключался в использовании полносвязной нейронной сети прямого распространения, в качестве входного сигнала которой использовались текстурные параметры участка изображения, а в качестве выходного – вероятность принадлежности этого участка к классу вязкого излома, хрупкого излома или окружающих деталей изображения (фон, надрез, боковые части образца). Вторым подходом заключался в использовании свёрточной нейронной сети с архитектурой кодировки-декодировки (U-Net), в качестве входного сигнала которой использовался участок изображения, а на выходном слое получался трёхмерный тензор, отражающий вероятность принадлежности пикселя изображения к одному из классов – вязкому излому, хрупкому излому, окружающим деталям изображения.

Для обучения нейронной сети были получены изображения изломов сварных соединений и основного металла – стали 09Г2С ТУ, разрушенных в испытаниях на ударный изгиб в критическом интервале температур хладноломкости. На части изображений были вручную выделены участки вязкого и хрупкого излома. На размеченных данных были обучены модели на основе нейронной сети прямого распространения и свёрточной нейронной сети. На этом этапе свёрточная нейронная сеть показала существенное преимущество в точности обработки изображений и дальнейшая разработка проводилась с использованием этой архитектуры.

При помощи нейронной сети, обученной на 25 изображениях, были выделены участки вязкого и хрупкого изломов на ещё 25 изображениях. На полученных размеченных снимках изломов были вручную исправлены ошибки, и нейронная сеть была обучена повторно на выборке из 50 изображений. Путём итераций обработка – исправление ошибок – переобучение нейронная сеть была обучена на выборке из 464 размеченных изображений изломов сварных соединений, стали 09Г2С ТУ, 09Г2С Н, стали 17Г1С ГК и околошовных зон сварных соединений. Средняя точность полученной модели составила 97,98%

В четвёртой главе представлены результаты исследования взаимосвязи между параметрами динамической кривой и механизмом разрушения образца.

Показано, что динамические кривые разрушения, записанные в ходе испытаний на ударный изгиб, содержат информацию достаточную для того, чтобы сделать выводы о строении излома.

Динамические кривые разрушения в координатах усилие-перемещение были записаны при испытаниях на ударный изгиб образцов стали 09Г2С ТУ и образцов из кристаллизационной зоны сварных соединений, выполненных методами №1-5. На полученных динамических кривых были в автоматическом режиме найдены координаты точек, соответствующие переходным процессам (рис. 1).

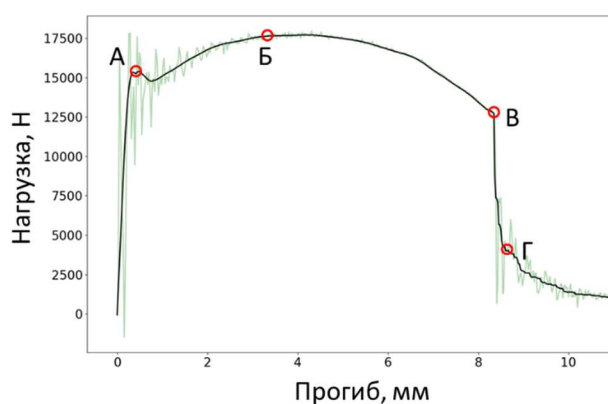


Рисунок 1 – динамическая кривая разрушения в координатах нагрузка на маятнике копра (Н) – прогиб образца (мм). Точки, соответствуют переходным процессам А – переход от упругой деформации к пластической, Б - максимум усилия, В - начало роста трещины скола, Г - остановка трещины скола.

На основе нейронной сети прямого распространения была построена модель, связывающая долю вязкого излома образцов с параметрами динамической кривой разрушения. Нейронная сеть была обучена на выборке из 220 образцов сварных швов и основного металла. В качестве входных параметров использовались значения прогибов и нагрузок в характерных точках динамической кривой. В качестве выходного параметра использовалась доля вязкого излома. Для получения обучающей выборки доля вязкого излома была рассчитана путём автоматического анализа изображений поверхности разрушения.

Модель на основе обученной нейронной сети показала коэффициент детерминированности $R^2 = 0,9891$ для обучающей выборки и $0,9877$ для тестовой выборки, состоящей из образцов с той же микроструктурой, но не участвовавших в обучении.

Применение модели к стали 17Г1С ГК, не участвовавшей в обучении даёт значительную ошибку, пропорциональную реальной доле вязкого излома образца. Тем не менее, добавление образцов стали 17Г1С ГК к обучающей выборке приводит к снижению ошибки для этой стали до уровня, характерного для стали 09Г2С ТУ и сварных швов.

Уменьшение размерности входных данных методом главных компонент показало, что существенное снижение точности модели происходит при уменьшении количества входных параметров до 8. Путём последовательного удаления параметров, наименьшим образом влияющих на точность было установлено, что для определения доли вязкого излома из параметров динамической кривой достаточно следующего ряда параметров: $W_{уд}$, X_B , T , $F_B - F_A$, X_A .

Проверка полученной модели на избыточную сложность путём сравнения с моделью на основе линейной регрессии показала, что модель на основе нейронной сети значительно точнее ($R^2 = 0,9322$ для линейной регрессии). При этом, набор параметров, полученный в исследовании, значительно лучше описывает долю вязкого излома, чем набор, предложенный в стандарте ISO 14556 ($R^2 = 0,7663$)

В пятой главе представлены результаты исследования особенностей разрушения металла сварных соединений, приводящих к недостоверной оценке их надёжности.

Показано, что в интервале вязко-хрупкого перехода рассеяние значений ударной вязкости является физическим свойством материала и не является погрешностью проведения эксперимента. На динамической кривой разрушения такое рассеяние проявляется в различиях между прогибами образцов, при которых возникает трещина скола. Значения усилия и прогиба в точках перехода

от упругой к пластической деформации и максимума усилия для образцов отличаются слабо (рис. 2).

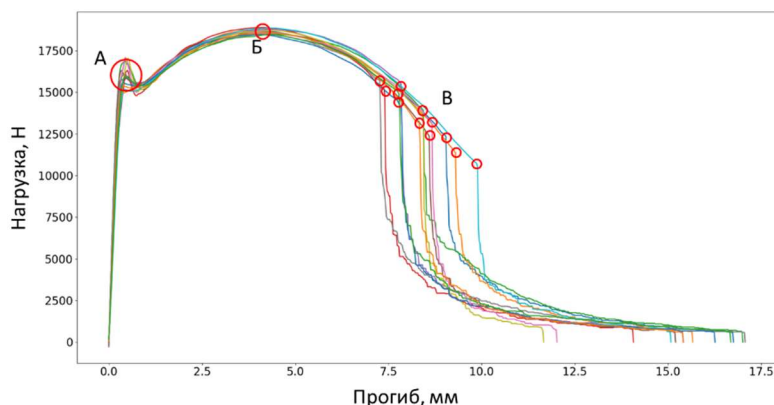


Рисунок 2 – динамические кривые разрушения образцов сварного шва 1, испытанных при температуре 0°C.

Исследование динамических кривых разрушения показало, что в сварных швах наблюдаются результаты испытаний, при которых работа, затраченная до образования скола и соответствующей потери большей части сечения значительно меньше общей работы разрушения. Такие результаты появляются за счёт возникновения скола на раннем этапе деформации образца, последующей остановки хрупкой трещины и больших затрат энергии на финальный вязкий долом образца. При этом, образцы, обладающей большой энергией долома могут иметь и большую долю вязкого излома, формирующуюся за счёт областей, лежащих ниже хрупкого участка на изломе и боковых губ среза (рис. 3).

Статистическая обработка результатов испытаний на ударный изгиб 1218 образцов основного металла, сварных швов и околошовной зоны показала, что наибольшей средней долей энергии долома в общей энергии разрушения обладает металл сварного шва, выполненного методом №4 - 39.6%. Для остальных методов сварки этот параметр находится в диапазоне от 13.8 до 32.2%. Для основного металла максимальной долей энергии долома- 29.3%, обладает сталь 17Г1С ГК. Для основного металла сталей 09Г2С и околошовных зон доля энергии долома составляет от 2.8 до 10.8%.

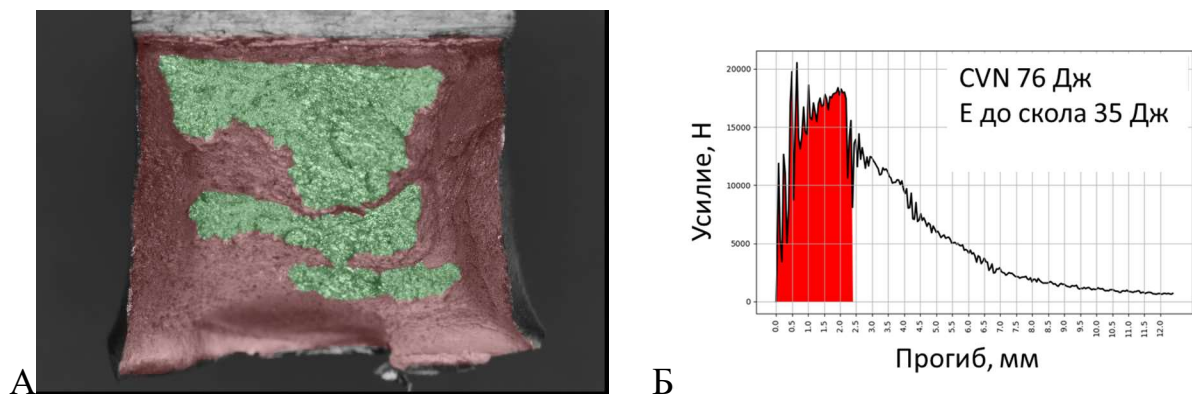


Рисунок 3 – А – изображение излома с выделенными участками хрупкого (зелёный) и вязкого (красный) разрушения. Б – динамическая кривая разрушения приведённого образца.

Высокая доля энергии долома может приводить к недостоверной оценке надёжности материала. При общем уровне ударной вязкости выше заданного предела, работа, затраченная до скола, может быть существенно ниже требуемого значения. Для нормативного уровня ударной вязкости в 50 Дж/см^2 (CVN = 40 Дж) была установлена частота, с которой испытания образцов показывают общий уровень ударной вязкости выше нормативного, при этом имея работу до образования скола ниже норматива. В сварных соединениях частота возникновения такого результата значительно выше, чем в основном металле. Наиболее часто такие результаты встречаются при испытании металла сварных швов №2 – 13.6%, №3 – 11.1%, №4 – 24.6%. При этом в основном металле и околошовной зоне такие результаты единичны. Исследование микроструктурных особенностей, приводящих к различиям в распределении энергии между стадиями разрушения описано в главе 8.

В шестой главе приведены результаты исследования деформационных особенностей распространения трещин скола в низколегированной ферритно-перлитной стали при испытаниях на ударный изгиб в критическом интервале температур хладноломкости.

Исследование деформационной структуры проводилось на шлифах, подготовленных перпендикулярно поверхности разрушения вдоль направления роста трещины. Исследование тонких деталей структуры разрушения

проводилось на фольгах, подготовленных на тонких пластинах вырезанных параллельно поверхности шлифа, утонённых при помощи фокусированного ионного пучка.

Приведены результаты экспериментального наблюдения деформационных особенностей, возникающих при росте трещины скола в пределах одного ферритного зерна. Показано, что рост трещины скола в пределах одной плоскости не сопровождается пластической деформацией. Пластическая деформация возникает при разрыве сочленений, остающихся между трещинами, растущими в параллельных плоскостях (рис. 4). На поверхности фасетки скола разрыв таких сочленений оставляет речной узор. Приведены результаты, показывающие что распространение трещин скола в колонии перлита и межзёренных трещин также не сопровождается деформацией. Наблюдаются 4 механизма перехода трещины скола через границу зерна, сопровождающиеся различной степенью деформации. При этом, наибольшая деформация возникает при переходе трещины через несколько зёрен с образованием гребней вязкого излома между макротеррасами фасеток и при разрыве сочленений между фасетками, образующимися в следствие разориентации плоскостей скола на границе зёрен с большой компонентой вращения решёток. Переход с образованием больших гребней происходит в следствие неомогенности локальной вязкости в микроструктуре. Трещина останавливается в локально вязком участке и новый скол возникает в локально хрупком участке на удалении от вершины остановившейся трещины (рис. 5). В случае низколегированной стали с феррито-перлитной микроструктурой локально вязкими участками становятся колонии перлита, а локально хрупкими – зёрна феррита, содержащие в себе включения нитрида титана.

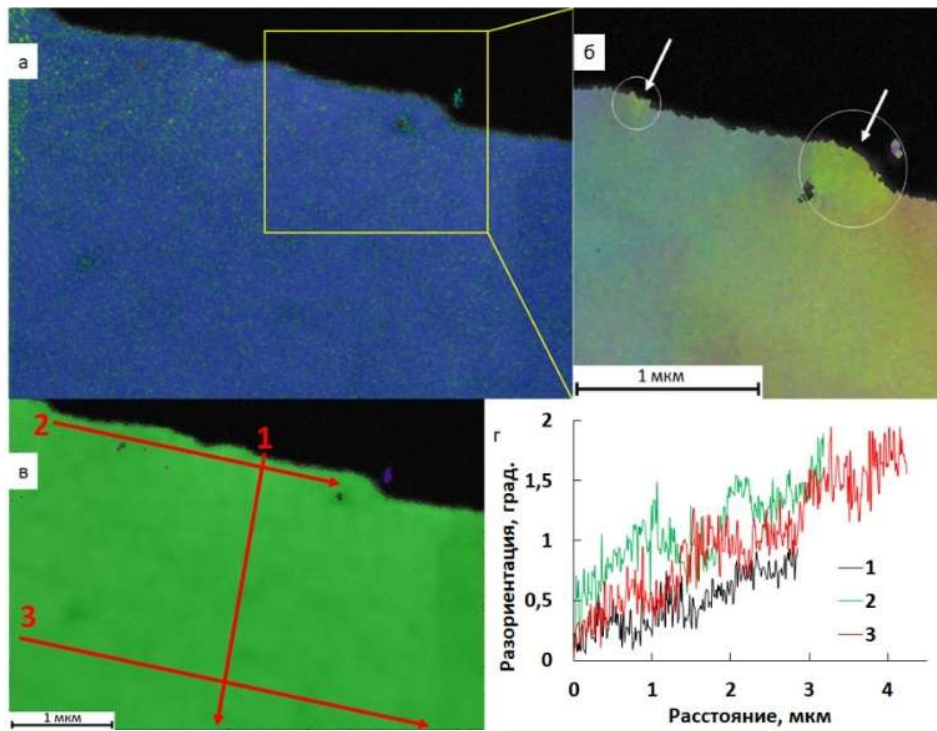


Рисунок 4 – а – ориентационная карта участка фольги (рисунок 3 б) в координатах ЛР. б – ориентационная карта в координатах РОС с отмеченными участками образования речного узора, для которых была измерена разориентация относительно средней ориентации зерна. в – ориентационная карта в координатах обратных полюсных фигур с отмеченными траекториями профилей разориентации. г – профили разориентации относительно начальной точки.

При переходе трещины между соседними зёрнами с образованием гребней вязкого излома размер и форма области пластической деформации зависит от степени перекрывания трещин в соседних плоскостях. При высоком перекрывании нагружение происходит по моде отрыва с образованием широких диффузных областей пластической деформации. Малое перекрывание приводит к нагружению по моде сдвига с образованием узких деформационных рек (рис. б)

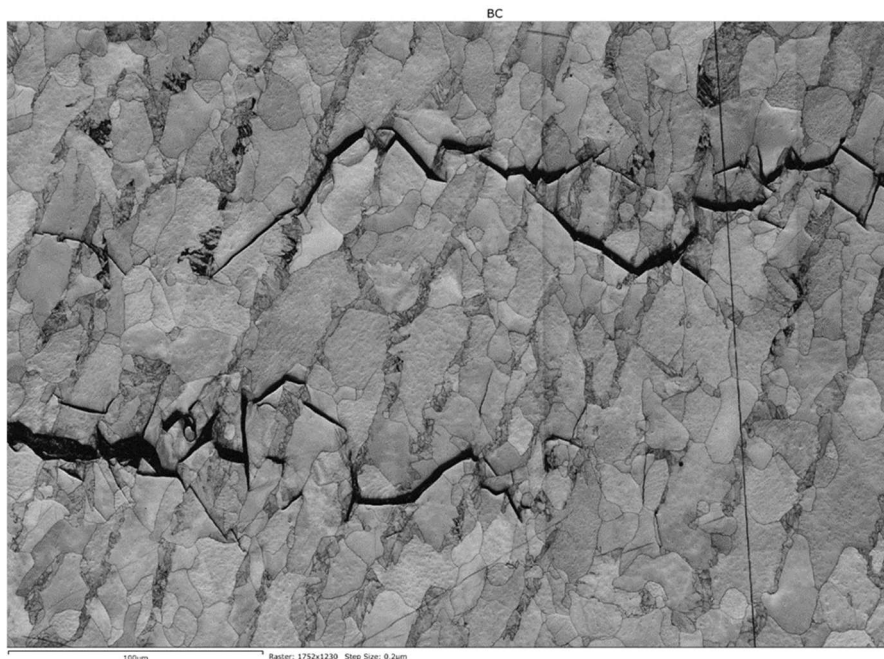


Рисунок 5 – трещины скола, распространяющиеся с образованием двух удалённых террас фасеток.

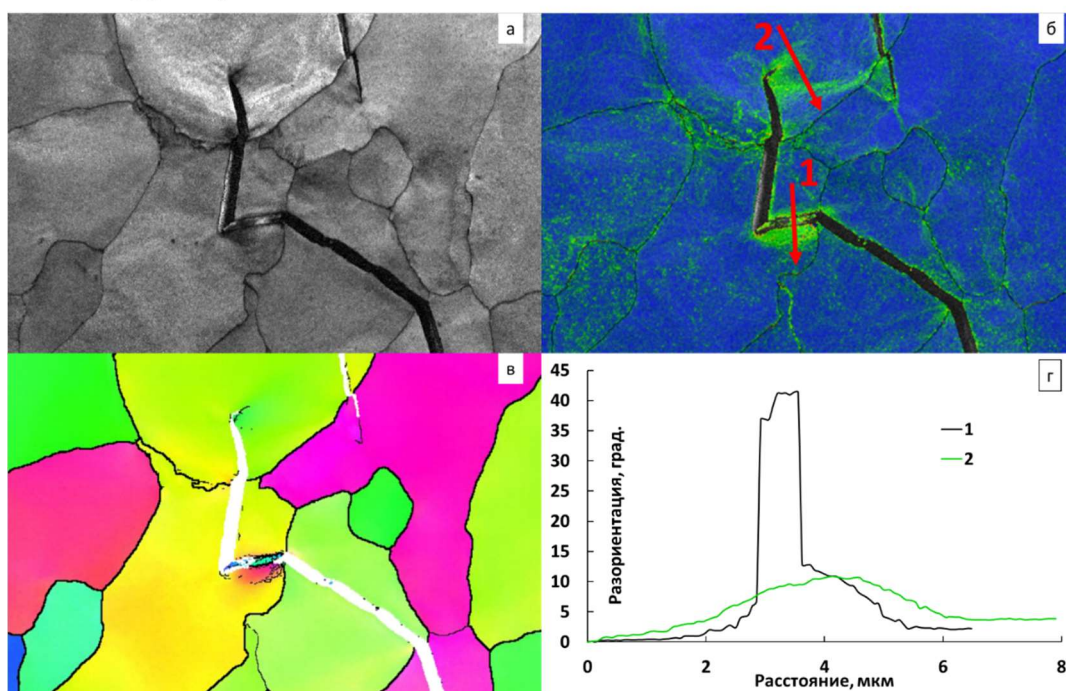


Рисунок 6 – Участки сочленения трещин скола с малым (1) и большим (2) перекрытием поверхностей трещин. а – карта в координатах качества картин Кикучи (BS), б – ориентационная карта того же участка в координатах ЛР с отмеченными траекториями ориентационных профилей. в - ориентационная карта того же участка в координатах ОПФ, г - профили разориентации относительно начальной точки.

Показано, что деформация, возникающая вблизи поверхности хрупкого излома, и макроскопическая деформация образца растёт с увеличением температуры. При этом, наблюдается корреляция макроскопической

деформации с прогибом образца до образования скола. Деформация вблизи поверхности хрупкого излома всегда выше макроскопической деформации и разница между ними растёт с увеличением температуры. При этом, деформация сопутствует хрупкому разрушению даже в случае испытания при температуре – 196°С, при которой макроскопическая деформация отсутствует.

В седьмой главе приведены результаты исследования влияния предварительной пластической деформации на зарождение трещин скола в околошовной зоне трубных сталей класса прочности К60.

Исследование проведено на образцах с имитированной микроструктурой околошовной зоны. Хрупкое разрушение таких образцов происходит с образованием очагов скола, содержащих включения нитрида титана. При этом наблюдается бимодальное распределение значений ударной вязкости [2]. Показано, что предварительная пластическая деформация образцов при комнатной температуре приводит к изменению типа триггера скола. В деформированных образцах скол зарождается либо от участка квазискола, либо на границе зёрен, либо на мелких неметаллических включениях (рис. 7).

Помимо изменения типа очага скола, предварительная пластическая деформация при комнатной температуре приводит к увеличению напряжения, при котором происходит скол при температуре -196°С.

Описанное поведение триггеров скола может приводить к бимодальности распределения значений ударной вязкости при испытаниях образцов в критическом интервале температур хладноломкости. В случае, когда на ранних этапах деформации образца в поле напряжений вершины растущей первоначальной вязкой трещины не попал триггер скола на основе включения нитрида титана в крупном бейнитном зерне, макроскопическая пластическая деформация в оставшейся части образца приводит к повышению напряжений скола таких триггеров и к продолжительному росту первоначальной вязкой трещины. Бимодальность распределения значений ударной вязкости возникает в следствии отсутствия промежуточных значений, из-за деактивации триггеров скола в середине образца.

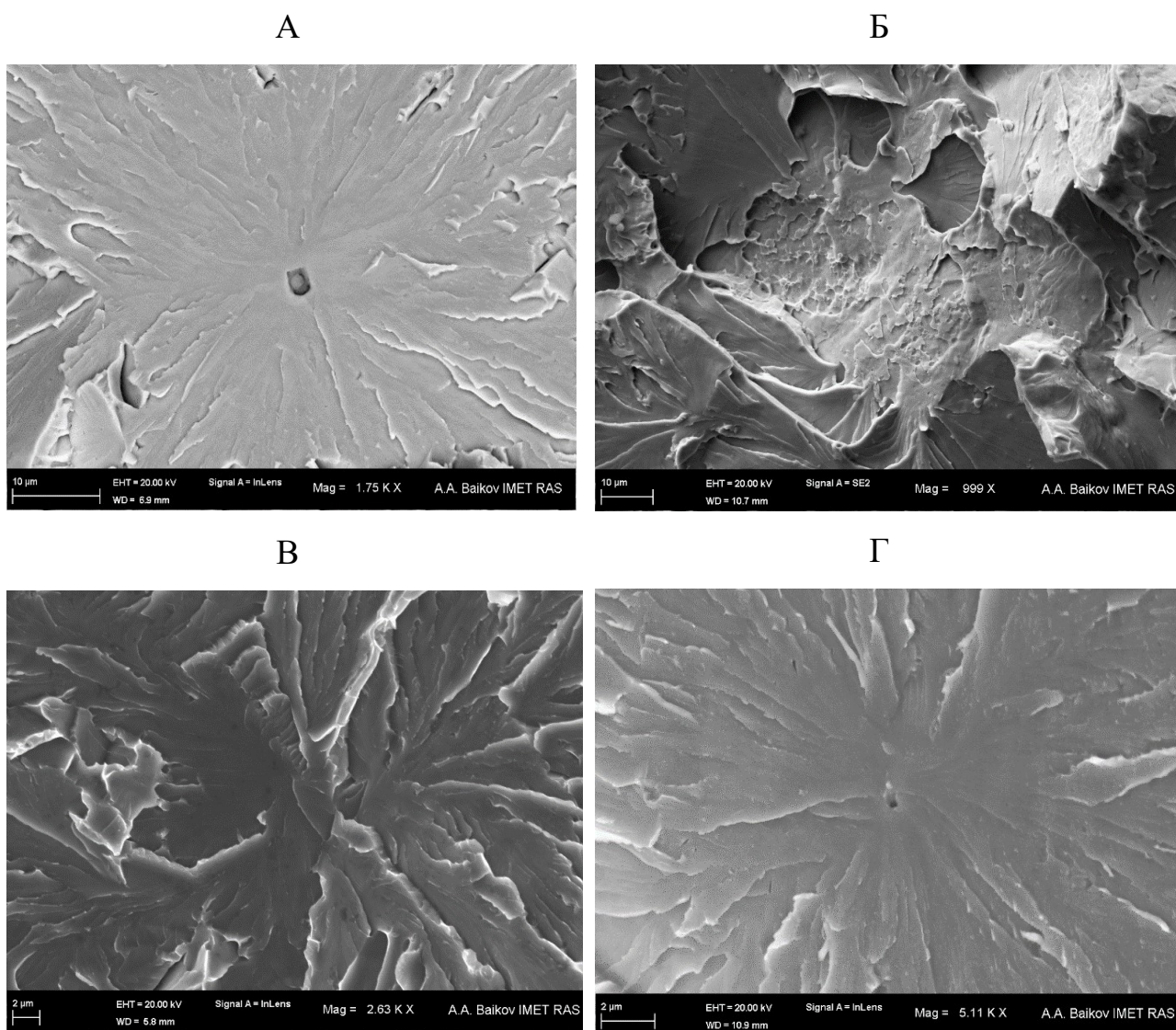
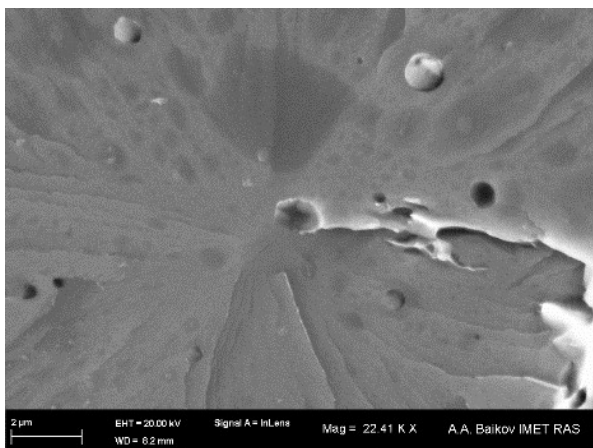


Рисунок 7 – очаги скола: А – без предварительной пластической деформации, Б - деформация 22%, В - 14,84%, Г - 10,25%

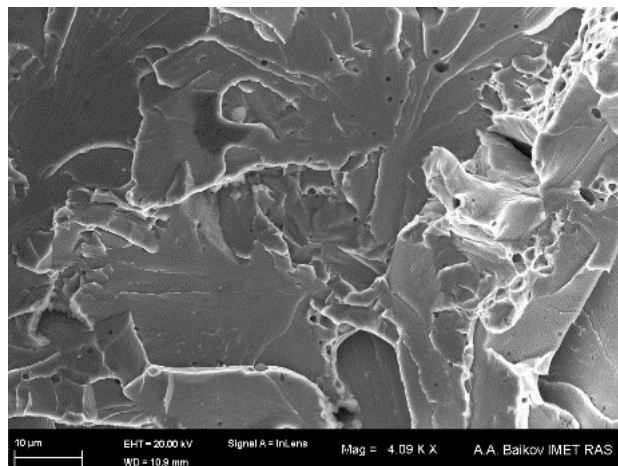
В восьмой главе описаны результаты исследования микроструктурных причин различия в распределении работы роста первоначальной вязкой трещины и долома образца между видами сварных соединений.

Показано, что различия в распределении энергии связаны с различным строением очагов скола. В случае металла сварного шва №4 наблюдается большое количество очагов скола – десятки на излом, образовавшихся вокруг титансодержащих неметаллических включений. В случае металла швов №1 и №3 наблюдаются единичные очаги скола, образующиеся или от межзёрненного разрушения или от скола на границах зёрен (рис. 8).

А



Б



В

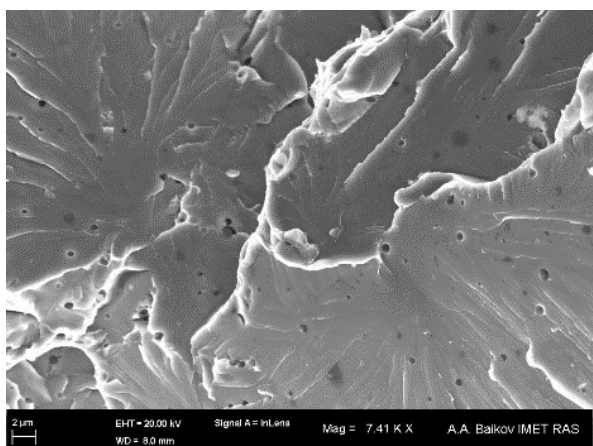


Рисунок 8 – вид очагов скола сварных соединений. А – очаг характерный для сварного шва №4, Б, В – для сварных швов №1 и №3.

Таким образом, раннее образование трещин скола в сварном шве №4 объясняется наличием большого числа хрупких неметаллических включений, легко передающих трещину скола в матрицу.

Большая работа долома образца по всей видимости связана с остановкой трещины скола в образце. В случае сварного соединения №4 такая остановка может быть вызвана двумя факторами. Первый – отсутствием крупных зёрен зернограничного феррита, непрерывная сетка которых в швах №1 и №3 позволяет трещине скола легко распространяться. Второй – наличие большого количества локально хрупких и локально вязких участков микроструктуры, приводящее к большому количеству переходов трещины скола с образованием высоких гребней вязкого излома, описанных в шестой главе.

Поскольку титансодержащие включения, имеющие низкую энергию границы с ферритной матрицей, вводятся в металл для формирования структуры

игольчатого феррита, можно заключить, что один и тот же микроструктурный фактор, а именно – такие включения, является и причиной скола на раннем этапе деформации образца и причиной остановки хрупкой трещины, приводящей к большой доле работы долома. Такие включения ответственны за перераспределение энергии, приводящее к недостоверной оценке надёжности в испытаниях на ударный изгиб в интервале вязко-хрупкого перехода.

В девятой главе приведены результаты исследования микроструктурных и кристаллографических особенности распространения трещин КРН в низколегированной стали. Показано, что в слабоокислой и нейтральной среде, характеризующейся обычно транскристаллитным распространением трещин КРН, зарождение трещин происходит межзёренно. При распространении трещин на глубину в несколько микрометров происходит переход к транскристаллитному росту (рис. 9).

Переход происходит в тройном стыке зёрен, обе возможные границы которого устойчивы к распространению трещин КРН. Исследование характера границ зёрен при помощи метода дифракции отраженных электронов с трёхмерной реконструкцией их профиля показало, что наибольшей устойчивостью к КРН обладают границы чистого наклона (с нулевым углом вращения решеток), границы с углом наклона менее 30° , специальные границы с высокой долей узлов совпадения решёток и границы, геометрически расположенные под большим углом к направлению роста трещины.

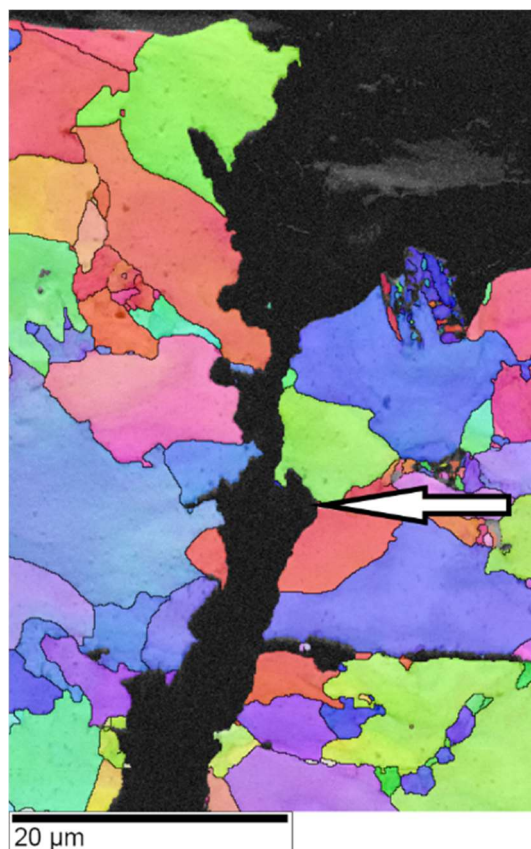


Рисунок 9 – трещина КРН. Стрелкой отмечен участок перехода от межзёрненного к транскристаллитному пути роста.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1) Разрушение металла сварных швов низколегированных сталей в интервале вязко-хрупкого перехода отличается от разрушения основного металла тем, что часто происходит с большими затратами энергии на вязкий долом образца после образования трещины скола. Разрушение с высокой энергией долома может приводить к недостоверной оценке надежности материала путём испытаний на ударный изгиб при использовании интегральных характеристик разрушения. Повышение достоверности такой оценки возможно с применением энергетических и фрактографических критериев анализа стадийности разрушения.

2) Рост трещины скола в пределах одной плоскости ферритного зерна в критическом интервале температур хладноломкости не сопровождается пластической деформацией материала. Пластическая деформация при распространении трещины скола связана с вязким разрывом перемычек, образующихся при переходе трещины между плоскостями распространения, выражающемся в виде образования линий

речного узора внутри фасетки скола и гребней вязкого ямочного излома между фасетками.

3) Локально хрупкие участки микроструктуры околошовной зоны исследованных трубных сталей класса прочности К60, содержащие нитриды титана, могут видоизменяться в ходе пластической деформации образца с повышением напряжения скола. Такое изменение обусловлено отслоением сульфидных и оксидных участков неметаллических включений от матрицы и может приводить к бимодальному частотному распределению значений ударной вязкости.

4) В сварных соединениях низколегированных сталей образование трещин скола на раннем этапе деформации образца в испытаниях на ударный изгиб обусловлено наличием большого количества хрупких титансодержащих неметаллических включений, легко передающих трещину скола в матрицу. Эти же включения ответственны за высокую сопротивляемость металла сварного шва распространению трещины скола за счёт зарождения на них мелких зёрен игольчатого феррита. Такая комбинация свойств приводит к перераспределению энергии разрушения в сторону большей энергии вязкого долома после образования трещины скола и может приводить к недостоверной оценке надёжности материала в испытаниях на ударный изгиб

5) Разработан метод автоматического анализа изломов образцов низколегированных сталей, испытанных на ударный изгиб в критическом интервале температур хладноломкости с использованием искусственных нейронных сетей и глубокого машинного обучения. Предложенный метод, обладает высокой точностью и применим для широкого диапазона микроструктур низколегированных сталей, включая сварные соединения

6) Показано, что динамические кривые разрушения образцов низколегированных сталей, записанные в ходе испытаний на ударный изгиб в критическом интервале температур хладноломкости, содержат исчерпывающую информацию о строении излома образца и могут быть использованы для определения доли вязкого и хрупкого излома образцов в широком диапазоне микроструктур.

7) В оклoneйтральной среде зарождение трещин КРН в низколегированных сталях происходит межзёренно с переходом к транскристаллитному росту на глубине порядка 50 мкм. Такой переход происходит при нахождении в тройном стыке зёрен устойчивых к КРН границ, представляющих собой границы с малым углом наклона

решеток, малым углом вращения решеток, границы с высоким количеством узлов совпадения решеток и границы, лежащие под высоким углом к направлению роста трещины.

Основные публикации по теме диссертации

1) Кантор М.М., **Судьин В.В.**, Боженков В.А. Применение метода дифракции отраженных электронов для изучения коррозионного растрескивания под напряжением магистральных трубопроводов // Научно-технический сборник «Вести газовой науки». 2016. № 3 (27). С. 30-36.

2) Kantor M.M., **Sudin V.V.**, Solntsev K.A. Effect of the type and morphology of grain boundaries on stress corrosion cracking in low-alloy, low-carbon steel // Inorganic Materials. 2019. Т. 55. № 4. С. 409-416

3) Kantor M. M., **Sudin V. V.**, Solntsev K. A. Analysis of the Relationship between the Load-Displacement Curve and Characteristics of Fracture of Low-Alloy Steel by Neural Networks //Inorganic Materials: Applied Research. – 2020. – Т. 11. – №. 4. – С. 893-902.

4) Kantor M.M., **Sudin V.V.**, Solntsev K.A. Materials science aspects of stress corrosion cracking of russian pipelines //E3S Web of Conferences 2019. С. 04014.

5) **Sudin V. V.**, Kantor M. M., Solntsev K. A. Features of weld metal brittle fracture in charpy tests //Procedia Structural Integrity. – 2020. – Т. 28. – С. 1637-1643.

Дополнительные публикации

Кантор М. М., **Судьин В. В.**, Солнцев К. А. Влияние типа и морфологии границ зерен на коррозионное растрескивание под напряжением в низколегированной малоуглеродистой стали //Неорганические материалы. – 2019. – Т. 55. – №. 4. – С. 442-450.

Кантор М. М., **Судьин В. В.**, Солнцев К. А. Анализ связи между динамической кривой разрушения и характеристиками излома низколегированной стали с помощью нейронных сетей //Материаловедение. – 2019. – №. 12. – С. 11-20.

М.М. Кантор, **В.В. Судьин**, К.А. Солнцев Деформационные особенности распространения трещин скола в ферритно-перлитной микроструктуре в интервале вязко-хрупкого перехода // Неорганические материалы. – 2021. – Т. 57. – №. 6. – В печати

Список литературы

1) Кантор М. М., Боженков В. А. Рассеяние значений ударной вязкости низколегированной стали в критическом интервале хладноломкости // Материаловедение. – 2013. – №. 11. – С. 03-14.

2) Микроструктурные особенности низколегированных трубных сталей, определяющие ударную вязкость околошовной зоны сварных соединений Судьин В.В. Степанов П.П. Кантор М.М. Эфрон Л.Э. Жарков С.В. Частухин А.В. Рингинен Д.А. // Металлург. – 2021. – В печати