

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Федеральное государственное автономное образовательное  
учреждение высшего образования  
«Южно-Уральский государственный университет»  
(Национальный исследовательский университет)

Факультет «Материаловедение и металлургические технологии»  
Кафедра «Материаловедение и физико-химия материалов»

РАБОТА ПРОВЕРЕНА

Рецензент, ( )  
\_\_\_\_\_( )  
\_\_\_\_\_ 2020 г.

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ

Заведующий кафедрой  
\_\_\_\_\_(Винник Д.А.)  
\_\_\_\_\_ 2020 г.

МЕТАЛЛОГРАФИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ВОДОРОДНОГО  
РАСТРЕСКИВАНИЯ ТРУБНЫХ СТАЛЕЙ С ПОМОЩЬЮ  
МЕТОДОВ НЕЙРОСЕТЕВОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА  
К ВЫПУСКНОЙ КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЕ ЮУрГУ–  
22.04.02.2020.146.ПЗ ВКР

Руководитель работы, доцент., д.ф.-  
м.н.

\_\_\_\_\_(Окишев К.Ю.)  
\_\_\_\_\_ 2020 г.

Автор проекта  
студент группы П - 243

\_\_\_\_\_(Гафаров М.Ф.)  
\_\_\_\_\_ 2020г.

Нормоконтролер, доцент, д.ф.-м.н.

\_\_\_\_\_(Окишев К.Ю.)  
\_\_\_\_\_ 2020 г.

## АННОТАЦИЯ

**Гафаров М.Ф.** Металлографический анализ водородного растрескивания трубных сталей с помощью методов нейросетевого моделирования – Челябинск: ЮУрГУ, П-243, 2020. – 86 с., 44 ил., 11 табл., библиогр. список – 78 наим., 2 приложения.

*Ключевые слова: водородное растрескивание, трещиностойкость металла, трубные стали, нейросетевое моделирование.*

Работа посвящена разработке программного комплекса для определения показателей стойкости металла против водородного растрескивания по металлографическому изображению шлифа после испытаний на водородное растрескивание. Описаны этапы проведения коррозионных испытаний по NACE TM 0284, построения нейросетевых моделей, разработки программного комплекса. Результатом работы является программный продукт способный по металлографическому изображению шлифа определять показатели стойкости металла против водородного растрескивания.

Потенциальными потребителями разработанного программного комплекса являются лаборатории металловедения и коррозионных испытаний по всей России.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	9
1 СРАВНЕНИЕ ОТЕЧЕСТВЕННЫХ И ПЕРЕДОВЫХ ЗАРУБЕЖНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ И РЕШЕНИЙ .....	13
1.1 Основные аналоги и технологии металлографического анализа.....	13
1.2 Водородное растрескивание стали.....	15
1.2.1 Общие сведения о водородном растрескивании, механизмы растрескивания .....	15
1.2.2 Факторы, влияющие на скорость и величину коррозионного растрескивания .....	20
1.3 Определение показателей стойкости стали против водородного растрескивания .....	26
1.3.1 Основные стандарты, регламентирующие проведение испытаний на водородное растрескивание. ....	26
1.3.2 Технологическая схема проведения испытаний на водородное растрескивание .....	26
1.3.3. Проведения испытаний на водородное растрескивание .....	27
1.3.4. Проблемы, возникающие при определении показателей стойкости металла против ВР металлографическим методом .....	50
2 ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ .....	53
2.1 Понятие нейросетевой модели .....	53
2.2 Строение элементов нейросети – нейронов .....	54
2.3 Свёрточные нейронные сети.....	57
2.4 Нейросетевой алгоритм «U-net».....	61
2.5 Реализация нейросетевого алгоритма «U-net» для решения задачи определения показателей трещиностойкости .....	63
2.6 Анализ результатов работы программного комплекса.....	73
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	75
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	78

## ВВЕДЕНИЕ

Увеличение добычи нефти и газа является одним из важнейших направлений развития для России [1,2]. Большая часть российской нефти транспортируется по трубам российских производителей, таких как ОАО «Трубная Металлургическая Компания» (ТМК), ЗАО «Объединенная металлургическая компания» (ОМК) и ОАО «Челябинский трубопрокатный завод» (ЧТПЗ). Повышение надежности и долговечности трубопроводов имеет большое значение, как для развития других отраслей, так и для страны в целом [3].

Постоянно растущая потребность в энергоресурсах во всем мире требует строительства газопроводов высокого давления с большой пропускной способностью. Чтобы увеличить пропускную способность для построения трубопроводов используют трубы большого диаметра и/ или увеличивают рабочее давление газа по трубопроводам. Это приводит к необходимости использования новых марок стали с существенно лучшими комплексами свойств [4]. В случае несоблюдения требуемых свойств, повышается риск возникновения аварийных ситуаций. Аварии газопроводов высокого давления могут вызывать взрывы, пожары, нарушение жизнеобеспечения населения и устойчивой работы объектов экономики страны. Около 40 % таких аварий обусловлено разрушением металла труб, вызванного внешней коррозией: общей и локальной – коррозионным растрескиванием под напряжением [5].

Таким образом, рост объёмов транспортируемых нефти и газа требует увеличения физико-механических, коррозионных свойств металла труб, а значит и более совершенных технологий производства труб для нефте-газопроводов. Создание новых технологий производства высокопрочных труб позволило существенно снизить металлоемкость, а также повысить надёжность отечественных магистральных газо- и нефтепроводов, это внесло существенных вклад в развитие металлургии и нефтегазовой отрасли страны [4].

Поэтому к металлу труб предъявляются особые требования. Металл должен обладать высокой прочностью, пластичностью, ударной вязкостью, коррозионной стойкостью и т.д. Это связано с повышением риска разрушения трубы при

увеличении поставок нефти и газа, а также с разнообразными природными условиями, в которых эксплуатируются нефтегазопроводы [6].

Одним из важнейших свойств металла труб нефтегазопроводов является коррозионная стойкость [7]. Характеристики стойкости против коррозионного растрескивания определяются типом коррозионного растрескивания. Для контроля требуемых свойств металла трубопроводов, разработан ряд испытаний. Одним из распространённых испытаний для определения коррозионной стойкости является испытание на водородное растрескивание стали.

Водород содержится во всех веществах, которые транспортируются по трубопроводам: нефтепродукты и прочие углеводороды. В атмосфере он присутствует в виде влаги и молекулярного водорода. Кроме того сероводород, который содержится во многих месторождениях нефти и газа. На таких месторождениях, металлическое оборудование (в том числе трубопроводы) испытывают сероводородное растрескивание. Это явление хорошо известно при эксплуатации аппаратов нефтеперерабатывающих предприятий [8].

Водород способствует охрупчиванию металла, снижая трещиностойкость стали. Это явление называется водородное охрупчивание. Несмотря на большое количество работ [5-10], вопрос о влиянии водорода на трещиностойкость металла остаётся по-прежнему открытым. К сожалению, ни одна из известных теорий не может объяснить всего спектра явлений водородной хрупкости. Причем различные подходы и концепции к построению таких теорий часто весьма противоречивы. Единой общепризнанной теории водородной хрупкости металлов и сплавов не существует.

Несмотря на это, разработан целый ряд стандартов, определяющих стойкость металла против водородного растрескивания (НС) [11,12]. Наиболее известным является международный стандарт NACE TM0284-2011. предназначенный для оценки сталей для трубопроводов и сосудов высокого давления на сопротивляемость водородному растрескиванию. Этот стандарт широко используется в различных лабораториях коррозионных испытаний, таких как АО "ВМЗ" ЦЗЛ ЛКИ, АО

"ВТЗ" ЦЗЛ, ОАО "РосНИТИ" УКИ, ООО "ИТ-Сервис", ФГАОУ ВО "СПбПУ" НИОЦ, ООО "Самарский ИТЦ", ПАО "ЧТПЗ" ИЦ "Труботест, и т.д.

Суть метода [11] заключается в проведении испытаний на образцах металла в заданных стандартом условиях, а затем проводится контроль качества на испытанных образцах. В качестве основного метода контроля качества используется визуальный контроль с использованием металлографического метода. Металлографическим методом выявляются трещины водородного растрескивания из множества дефектов поверхности металла. Затем специалист определяет показатели стойкости против водородного растрескивания (ВР), которые являются одним из основных показателей коррозионной стойкости металла, по фотографиям металлографических шлифов. Таким образом, определяется стойкость металла против ВР.

Основная часть данной работы посвящена этапу металлографического анализа при определении стойкости металла к водородному растрескиванию.

**Гипотеза исследования состоит в предположении о возможности** создать программный комплекс для определения показателей стойкости металла против ВР, после проведения испытаний на водородное растрескивание, по металлографическому изображению шлифа.

**Цель работы:** разработка программного кода, который позволит сократить экономические издержки, связанные с определением показателей коррозионной стойкости металла, а также увеличить скорость анализа образцов, повысить точность металлографического анализа.

**Объект исследования:** коррозионные испытания металла по международному стандарту NACE TM0284.

**Предмет исследования:** измерение показателей стойкости металла против ВР.

**Задачи работы:**

1. Изготовление образцов для испытаний на водородное растрескивание из патрубков металла.
2. Проведение коррозионных испытаний согласно стандарту NACE TM0284.
3. Валидация результатов проведения коррозионных испытаний.

4. Разработка алгоритма определения показателей стойкости металла против ВР на основе нейросетевых моделей.
5. Создание обучающей выборки для нейросетевой модели.
6. Обучение нейросетевой модели определения трещин на металлографических изображениях.
7. Тестирование обученной нейросетевой модели.
8. Программирование алгоритма определения показателей стойкости металла против ВР.
9. Валидация результатов работы разработанного программного комплекса.

# 1 СРАВНЕНИЕ ОТЕЧЕСТВЕННЫХ И ПЕРЕДОВЫХ ЗАРУБЕЖНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ И РЕШЕНИЙ

## 1.1 Основные аналоги и технологии металлографического анализа

Основной трудностью последовательности определения показателей стойкости против ВР является этап контроля качества металла с помощью металлографического метода. Специалист, чаще всего инженер-металловед, должен обладать достаточным количеством знаний и опыта чтобы отличать различные дефекты поверхности металла после коррозионных испытаний (царапины на металлографическом шлифе, неметаллические включения, окислы поверхности и т.д) от трещин, возникших в результате коррозионного растрескивания. Кроме того, отсутствие специализированных программных продуктов, которые могут автоматически определять показатели коррозионной стойкости, усложняет процесс коррозионных испытаний. Существующее программное обеспечение, которое является лидером на российском рынке: “Thixomet Pro” [13] не имеет возможности автоматического анализа дефектов поверхности металла, вызванных водородным растрескиванием. В тоже время качественный и количественный анализ этих дефектов является трудоёмким процессом даже для специалиста. Это связано с рядом факторов, такими как: 1) некачественное изготовление микрошлифа 2) большое количество неметаллических включений 3) изображение трещин часто не помещается в объектив микроскопа при требуемом увеличении 4) усталость глаз. Кроме того, для неподготовленного сотрудника, требуется обучение. Таким образом, создание системы автоматического определения показателей стойкости металла против ВР позволит повысить производительность труда и снизить затраты на использования оборудования. Следовательно, разработка системы автоматического анализа дефектов металла после коррозионных испытаний является актуальной задачей.

Одним из современных методов распознавания образов на изображении является метод нейросетевого моделирования. В ряде работ связанных с анализом изображений с помощью методов нейросетевого моделирования показана эффективность данной методики [14-16]. Так в области обработки изображений важной задачей является задача сегментации, т.е. разделения изображения на полигоны,



которые принадлежат разным морфологическим объектам или их частям, с целью дальнейшего определения искомого объекта или вычисления характерных признаков заданного полигона. Множество существующих алгоритмов сегментации основывается на анализе локальных свойствах изображения. Задача сегментации в них ставится аналогично статистической задаче, целью которой является агрегирование между собой пикселей, которые семантически связаны [17]. Современные методы нейросетевого моделирования, в частности свёрточные нейронные сети, использованные в ряде работ [18-20], показали высокую точность и стабильность распознавания образов на заданных изображениях. В то же время наблюдается отсутствие работ, связанных с применением такого метода математического моделирования в задачах распознавания, классификации, морфологического анализа и т.д, применительно к металлографическому анализу.

Таким образом, в содержательном плане задача настоящей работы формулируется следующим образом: создать программное обеспечение, которое позволит сократить время идентификации дефектов и определения основных параметров стойкости металла против ВР по металлографическому изображению по средством использования нейросетевой модели распознавания трещин, возникающих при коррозионных испытаний. Преимуществом данного программного обеспечения является возможность по полученному изображению микрошлифа автоматического определения величины стойкости металла против ВР.

## 1.2 Водородное растрескивание стали

### 1.2.1 Общие сведения о водородном растрескивании, механизмы растрескивания

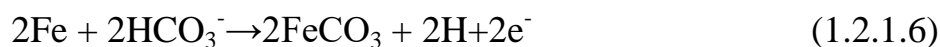
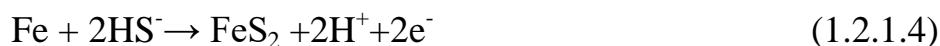
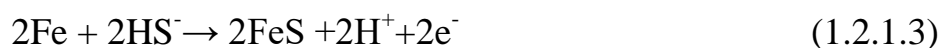
Сероводород и углекислый газ являются основными действующими агрессивными газами при эксплуатации металла труб для нефте-газопроводов. Они образуют коррозионную среду, которая вызывает анодное растворения металла по схеме [8]:



В то время как на катоде восстанавливается атомарный водород:



Кроме того, водород может образовываться в результате следующих химических реакций:



Таким образом, существует большое количество механизмов образования атомарного водорода на поверхности металла трубы (при условии, что поверхность труб не изолирована от коррозионной среды).

Образующийся водород накапливается на поверхности металла, а затем проникает вглубь металла. В объеме он перераспределяется внутри стальной матрицы с помощью диффузии [21-22]. В работе [23] показано, что проницаемость и концентрация водорода в объеме стали возрастает с ростом парциального давления сероводорода в коррозионной среде, а также с уменьшением рН.

Проникающий в металл водород накапливается в микро- и макро- дефектах кристаллической решетки металла, таких как дислокации, микротрещины и микропоры и т.д. Стоит также отметить, что водород может скапливаться также на межфазных поверхностях, образующихся между неметаллическими включениями и металлической матрицей. Атомарный водород может образовывать устойчивую молекулу водорода при объединении с другим атомом водорода. Такая молекула

становится устойчивой, сильно искажает кристаллическую решётку, становясь препятствием для движения дислокаций (так уменьшается пластичность металлов), т.к молекулярный водород имеет значительно больший объём чем атомарный. Кроме того, накапливающийся в объёме металла водород может приводить к ряду других вредных явлений [8]:

1. Обезуглероживание металлов по реакции образования метана:



которое приводит к уменьшению прочности и твёрдости стали, за счёт разрушения цементита.

2. Межкристаллитное растрескивание за счёт внутреннего давления накопленного газа, образующегося по реакции (1.2.1.7) по границам зерен.

3. Рост и слияние микротрещин в макротрещину и дальнейшее распространение в перпендикулярных направлениях растягивающим напряжениям. Образовавшиеся трещины будут расти вдоль направления твёрдых и хрупких компонентов микроструктуры металла [21-23].

В общем явления коррозионного растрескивания с участием водорода определяются по-разному [24]:

- 1) Непосредственно водородное растрескивание – НИС (Hydrogen Induced Cracking) коррозия вызванная водородом, иногда называемое как: растрескивание от давления водорода, блистеринг или ступенчатое растрескивание.

Данный тип растрескивания проявляется при отсутствии внешних напряжений в виде многочисленных параллельных трещин вдоль направления прокатки. В данной работе будет рассматриваться только этот вид растрескивания.

Механизм растрескивания НИС, иллюстрирующий процесс проникновения водорода вглубь металла и его накопление, представлен на рисунке 1.2.1.1 [25].

Стали, имеющие предел прочности, находящийся в интервале от 300 до 800 МПа, наиболее склонны к водородному растрескиванию [9]. В этот диапазон попадают практически все стальные трубопроводы, в том числе магистральные нефте- и газопроводы. Водородное растрескивание (НРС) сталей с невысокой прочностью обычно происходит в плоскости листа проката металла, который имеет повышенное содержание примесей, легирующих элементов и прочих аномальных структур.

В отличие от расслоений металлургического происхождения, водородное растрескивание обычно имеет развитую структуры трещин. В начальный период развития участки с трещиной имеют плоские расслоения, затем переходят в трёхмерные (Г- или Т-образными в поперечном сечении).

На рисунках 1.2.1.2 и 1.2.1.3 представлены металлографические изображения металла труб (при 100х увеличении) подвергнутому водородному растрескиванию.

## 2) Коррозионное растрескивание под напряжением – SSC (Stress Corrosion Cracking)

В свою очередь SSC подразделяют ещё на два типа коррозионного разрушения: а) Растрескивание, которое зарождается и распространяется перпендикулярно к оси приложения напряжения.

б) Растрескивание, образующееся за счет ступенчатого объединения ранее появившихся первичных трещин, направленных параллельно оси приложения напряжения.

Коррозионное растрескивание под напряжением часто наблюдается на сталях с высоким пределом текучести, до 600 МПа и выше. Напряжения приложенные извне приводят к объединению параллельных внутренних микротрещин в магистральные трещины, которые перпендикулярны растягивающей нагрузке. Также растрескиванию данного типа подвергаются сварные соединения, где сказывается роль остаточных от сварки напряжений. При избытке накопившегося водорода в объёме металла водородные расслоения переходят в водородные пузыри, которые уже можно наблюдать без оптического микроскопа. Исследования показали, что извлекаемый из пузырей газ состоит на 99,5 % из водорода, а давление в пузырях

достигает 20 МПа [26].

Коррозионное растрескивание под напряжением характерно для сталей аустенитного и аустенитно-мартенситного класса. Водород в этих сталях облегчает протекание мартенситного превращения и зарождение трещин. В нефтяной и газовой промышленности известны случаи растрескивания металла за время эксплуатации от 2-3 месяцев до 2-3 лет труб теплообменников, трубопроводов для перекачки продуктов, стенок сварных емкостей, резервуаров и колонн, змеевиков и греющих камер, выпарных аппаратов, деталей запорной арматуры и т.д.

3) Стресс-ориентированное растрескивание, индуцированное водородом – SOHIC (Stress Orientated Hydrogen Induced Cracking), смешанный тип разрушения возникновение которого связывают с наличием остаточных напряжений в стали [27].

1.2.2 Факторы, влияющие на скорость и величину коррозионного растрескивания

Скорость процессов растрескивания определяется внешними и внутренними факторами. Внешние факторы определяют скорость начального этапа, а именно: образование атомарного водорода на поверхности металла. К внешним факторам относятся состав и концентрация электролитов, контактирующих с поверхностью металла, pH среды, влажность, состояние изоляции на поверхности металла (механические повреждения, отслаивания).

Скорость проникновения атомарного водорода в металл и дальнейших процессов, происходящих в объёме металла, определяется внутренними факторами. К внутренним факторам относятся: химический состав и структура металла, напряжённое состояние. Как уже было сказано ранее, важны не только внешние напряжения, но также и внутренние остаточные напряжения на уровне микроструктуры. Некоторые факторы трудно однозначно отнести к внешним или внутренним, например, температура, поскольку она оказывает влияние на скорость всех процессов (образование водорода и его диффузию), которые происходят как внутри, так и вне металла.

Ранее было отмечено, что основными местами скопления атомарного водорода

его объединения в молекулярный, из-за чего происходит зарождение и распространение водородных трещин, в структуре металла служат дефекты строения, а именно [28-30]:

- границы раздела матрицы стали с неметаллическими включениями;
- грубые выделения частиц избыточных фаз карбонитридов;
- несплошности структуры, в том числе усадочные поры;
- полосчатость структуры и центральная сегрегационная неоднородность;
- структурные составляющие, имеющие высокую твердость.

Исследования показали [28,30], что молязация водорода происходит на неметаллических включениях, особенно если они имеют вытянутую форму с острыми краями, например MnS или строченные карбиды. Как известно, напряжения, возникающие в местах контакта матрицы металла с неметаллическими включениями, зависят от формы, их локальной концентрации и расстояния от поверхности металла [31].

Поэтому особое внимание при производстве сталей уделяется мероприятиям, направленным на снижение таких неоднородностей в металле [22]. Одним из таких мероприятий является снижение количества серы (ниже 10 ppm) в металле путём десульфурации стали [32], это приводит к уменьшению количества включений MnS и приводит к повышению стойкости металла к НИС. Так в работе [33] показано, что содержание серы при эксплуатации металла в средах с pH = 5 и с pH = 3 должно быть не более 0,002 % и 0,001 % соответственно. Также авторы указывают на необходимость обработки расплавленной стали кальцием и силикокальцием для глобулязации неметаллических включений и, соответственно, повышению стойкости к НИС. Однако, если содержание кальция намного превышает требуемый уровень, то его излишки могут образовывать оксид, который будет действовать как инициатор растрескивания. Кроме того, в исследовании [34] утверждается, что для увеличения трещиностойкости металла против НИС требуется одновременно контролировать содержание кальция, кислорода и серы. Для оценки количества сульфидов используется параметр

$$ESSP = [Ca] \times (1 - 124[O]) / 1,25[S] \text{ (Effective Sulfide Shape control Parameter-пара-}$$

метр эффективного контроля формы сульфидных включений).

В качестве порогового значения принята величина  $ESSP = 1,2$  выше которого форма сульфидов  $MnS$  является сферической и в стали будут отсутствовать вытянутые включения  $MnS$  [34].

Для уменьшения количества оксидных включений в металле используют ряд методов, изложенных в работе [35-38], среди них:

Использование мягкой продувки аргоном, использование погружных разливочных стаканов между разливочным и промежуточным ковшом машины непрерывной разливки металла (МНЛЗ) для препятствия контакта воздуха с расплавленным металлом, использование синтетических шлаков и т.д. Эти меры обеспечивают содержание кислорода в конечном продукте обычно ниже 20 ppm, со средним значением порядка 11 ppm [39].

Современные трубные стали производятся с применением комплексного микролегирования  $Nb, Ti, V$ . Выделение карбонитридов и нитридов в этих типах сталей в осевой зоне проката приводит к увеличению склонности к НИС, поэтому особое внимание уделяется методам уменьшения осевой ликвации в процессах разливки стали. Это подтверждается в ряде исследований [40-41] показано, что основной причиной низких показателей трещиностойкости против НИС является скопление в осевой зоне проката карбонитридов ниобия  $Nb(C, N)$ , карбидов ниобия и титана ( $NbC, TiC$ ), сульфидов марганца ( $MnS$ ), а также оксидно-сульфидных включений на основе алюминия, кальция и, в некоторых случаях, магния. В работе [42] отмечается, что при модификации расплавов сталей редкоземельными элементами (церий, лантан) металл очищается от кислорода и серы, уменьшается загрязнённость неметаллическими включениями. Это позволят увеличить стойкость против основных типов коррозии в сероводородосодержащих средах: НИС, SSC, общей коррозии. Однако не все неметаллические включения способствует НИС, так в работе [43] показано, что небольшие, но многочисленные недеформированные неметаллические включения не способствуют протеканию водородному растрескиванию.

Несмотря на то, что влияние химического состава металла на склонность к водородному растрескиванию до конца не изучено, существуют некоторые особен-

ности легирующих элементов при влиянии на склонность стали к НИС.

Так, авторы работ [44-45], утверждают, что некоторые легирующие элементы способны замедлять адсорбцию атомарного водорода в сероводородсодержащей среде. В при кислотности среды  $pH \approx 5,2$  медь может как существенно замедлять коррозионное растрескивание при содержании более 0,25%, так и практически останавливать коррозионный процесс при содержании выше 0,35%. Однако в средах с большей кислотностью влияние меди на адсорбцию водорода становится пренебрежимо малым вследствие растворения защитного слоя, возникающего при легировании медью. Улучшение сопротивляемости стали к водородному растрескиванию также может быть достигнуто дополнительными добавками хрома в медьсодержащую сталь.

Ранее говорилось, что сегрегация химических элементов в осевой зоне способствует водородному растрескиванию стали. При наличии центральной сегрегации в непрерывно литых слябах, полученных на МНЛЗ, этот дефект наследуется осевой зоной листового проката, это, в свою очередь, приводит к формированию более прочных и твёрдых структур в осевой зоне ( по сравнению с периферией). В свою очередь, наличие более прочных структур в стали приводит к увеличению склонности к водородному растрескиванию. Так в работах [46-47] утверждается, что при микротвёрдости сегрегационной полосы выше 330 HV [46], склонность к водородному растрескиванию значительно усиливается.

В работе [47] показано, что существует критическая величина микротвёрдости сегрегационной полосы, при которой водородное растрескивание протекает также как и в основной объёме металла, эта величина равна 250 HV. В связи с этим проводят дополнительные мероприятия по снижению дефектов на непрерывно-литых заготовках, таких как осевая ликвация, путём корректировки параметров разливки, контроля химического состава и т.д.

К наиболее важным технологическим факторам, которые влияют на дефект осевая ликвация относятся: значительный перегрев стали выше температуры ликвидуса, скорость разливки, настройка давления роликов на МНЛЗ, химический состав стали, скорости охлаждения кристаллизатора, скорости охлаждения заготовки,



мощность электромагнитного перемешивателя (ЭМП) в начальных зонах кристаллизации и т.д. [48].

Так перегрев стали, увеличение скорости разливки и скорости охлаждения приводит к формированию столбчатой, неравноосной структуры, которая способствует высокой склонностью металла к НС. Например, в работе [46] показано, что рост скорости разливки ( $V_p$ ) от 0,6-0,8 м/мин до 1,0-1,2 м/мин приводит к увеличению баллов осевой ликвации от 1-2 до 3,5. Также к факторам, которые отрицательно влияют на склонность к НС относятся: охлаждения в 3 и 4 зонах МНЛЗ, биение роликов, качение кристаллизатора, резкое колебание скоростей охлаждения и давления роликов между непрерывно литыми заготовками. Работы о влиянии толщины сляба на осевую ликвацию и структуру металла дают противоречивые сведения, с одной стороны увеличения толщины сляба от 250 до 300 мм увеличивает зону осевых кристаллов и в тоже время снижает балл осевой ликвации. В тоже время, в работе [49] показано, что уменьшение толщины слябов позволяет уменьшать сегрегацию атомов.

Кроме технологический параметров разливки металла наибольшее влияние на осевую ликвацию, и как следствие на склонность металла к НС, является химический состав [50]. К наиболее важным легирующим элементам, влияющим на коэффициенты сегрегации других легирующих элементов на фронте кристаллизации расплавленного металла, таких как: марганец, фосфор, кремний и т.д, является углерод. Углерод является одним из наиболее значимых легирующих элементов в осевой зоне, т.к он определяет твёрдость и склонность к растрескиванию. Вывод о влиянии углерода на центральную сегрегацию легирующих элементов сделан в работах [38,51], кроме того, в работе [52] показана мера влияние углерода на дефекты в непрерывно- литых заготовках на основе построения моделей методами машинного обучения. Общими выводами работ [51,52] является: снижение углерода приводит к значительному снижению баллов осевой ликвации. Так при уменьшении углерода от 0,19 до 0,03% балл осевой ликвации сляба снижается от 4 до 1 при оценке по ОСТ 14-1-73 и от 5 до < 2 при оценке по методике Mannesmann. При этом коэффициенты сегрегации элементов в слябе снизились:  $K(S)$  – в 3 раза,  $K(P)$  – в 2

раза,  $K(\text{Nb})$ ,  $K(\text{C})$ ,  $K(\text{Mn}) \sim$  в 1,5 раза. Показано, что по возрастанию склонности к центральной сегрегации химические элементы располагаются в последовательности:  $\text{Mn}, \text{V}, \text{C}, \text{Nb}, \text{P}, \text{S}$ .

Кроме углерода, одним из основных ликвидирующих элементов в трубных сталях является  $\text{Mn}$ . Так в работах посвящённых исследованию водородного растрескивания и трещиностойких сталей показано, что при снижении марганца в стали, происходит уменьшения центральной сегрегации и снижение склонности металла к НИС.

Например, исследования [53] показали, что показатели НИС ( $\text{CLR}$  и  $\text{CTR}$ ) значительно возрастают при увеличении содержания  $\text{Mn}$  до 1,2%. Также в исследовании [54] утверждается, что при содержании марганца  $\sim 1\%$  в центральной зоне наблюдается колебание концентрации марганца на  $\sim 0,3\%$ , напротив при низком содержании марганца  $\sim 0,3\%$  таких скачков концентрации не наблюдалось. В связи с этим, некоторые исследователи [34] предлагают производить низкомарганцевые стали, которая была бы стойкой против водородного растрескивания. В такой стали содержание марганца  $\sim 0,3\%$ , а углерода  $\sim 0,2-0,45\%$ , также сталь дополнительно легирована хромом  $\sim 0,5\%$ , ниобием, никелем и медью. Такой состав низкомарганцевой стали позволит значительно снизить разницу между микротвердостью осевой зоны и основным металлом, а значит и снизить склонность к НИС. В работе [21] показано, что оптимальное содержание марганца будет зависеть от содержания углерода в стали. Другие легирующие элементы, кроме рассмотренных, также влияют на склонность стали к НИС. Так в работе [52] исследовано влияние легирующих элементов таких как  $\text{Ni}, \text{Cr}, \text{Mo}$  на температурный интервал  $\delta$ -ферритной области, уменьшение этого интервала приводит к уменьшению центральной сегрегации атомов, так при содержании в количестве 1,0% снижает интервал  $\sim$  на  $80^\circ\text{C}$ , меди  $\sim$  на  $45^\circ\text{C}$ . Молибден в количестве 1,0% повышает область  $\delta$ -феррита от 150 до  $\sim 245^\circ\text{C}$ , а хром не влияет на температурный интервал  $\delta$ -ферритной области. Кроме легирующих элементов, вводимых в сталь, особое внимание уделяют содержанию примесных атомов в металле, таких как  $\text{S}, \text{P}, \text{H}, \text{O}$ . В ряде работ отмечается значительная склонность серы и фосфора к сегрегации [28,48,50,], для уменьшения их роли в формировании баллов осевой ликвации их нужно ограничивать в пределах:  $\text{S} \leq 0,001\%$ ,  $\text{P} \leq 0,012\%$ .

Кроме указанных выше технологических факторов, для уменьшения баллов осевой ликвации и увеличения качества непрерывно литых заготовок применяют различные технологии улучшения разливки металла на МНЛЗ:

Установка ЭМП в зоне вторичного охлаждения, вибрационная обработка кристаллизующегося металла, введение в расплав кристаллизатора МНЛЗ затравок

твёрдой фазы, системы «мягкого» обжата [36]. Кроме того, разрабатываются новейшие модели разливки металла на МНЛЗ, улучшающие качества непрерывно литых заготовок [53], в первую очередь построенные на основе алгоритмов машинного обучения.

1.3 Определение показателей стойкости стали против водородного растрескивания

1.3.1 Основные стандарты, регламентирующие проведение испытаний на водородное растрескивание.

В качестве основных документов регламентирующих методы испытания металла на водородное растрескивание в данной работе были использованы документы NACE TM 0284, NACE TM 0177 [11,12].

Суть метода испытаний заключается в том, что испытывают ненагруженные образцы, подвергая их воздействию одного из двух стандартных растворов либо раствора А (использовался в данной работе) – раствора хлорида натрия, уксусной кислоты ( $\text{NaCl}$ ,  $\text{CH}_3\text{COOH}$ ), насыщенного сероводородом, – определённой температуре и нормальном давлении, либо раствора В – искусственного раствора морской воды, насыщенного сероводородом, также при определённой температуре и нормальном давлении. Через некоторое время испытываемые образцы вынимают и оценивают последствия водородного растрескивания.

1.3.2 Технологическая схема проведения испытаний на водородное растрескивание

Схема проведения испытаний на водородное растрескивание состоит из нескольких этапов:

- 1) Изготовление металлических темплетов из патрубков металла.
- 2) Изготовление образцов с заданными геометрическими параметра в заданном направлении.
- 3) Проведение испытаний на водородное растрескивание.
- 4) Проведение ультразвукового контроля по результатам испытаний (используется для контроля, не проводится обязательно).
- 5) Изготовление микрошлифов металла.

б) Металлографический анализ показателей стойкости металла против ВР

В данной работе были реализованы все стадии (указаны выше) испытаний на водородное растрескивание. При этом металл, из которого были изготовлены патрубки для испытаний, заведомо являлся склонным к водородному растрескиванию, это требовалось для более качественного измерения показателей стойкости металла против ВР и валидации результатов. Из патрубков диаметром 219 мм с толщиной стенки 22 мм были изготовлены темплеты, а затем образцы. Отбор образцов производился согласно стандарту, а именно параллельно оси бесшовной трубы. Для испытаний на водородное растрескивание от патрубка отбирали по 3 образца размером 20x10x100 мм. Эскиз отбора образцов представлен в приложении А. Схема отбора, представленная на эскизе, соответствует схеме, представленной в стандарте [12]. Важно отметить, что патрубки были получены от бесшовной цельнотянутой трубы. Полученные образцы соответствуют требованиям стандарта [12].

По результатам визуального осмотра и контроля шероховатости, было сделано заключение, что образцы соответствуют требованиям. После контроля геометрических размеров, перед проведением испытаний образцы были обработаны раствором ацетона с целью обезжирить поверхность образцов.

### 1.3.3. Проведения испытаний на водородное растрескивание

После контроля качества изготовленных образцов и их обезжиривания, следует стадия приготовления раствора А в котором происходит испытание. Состав раствора А: 5 мас.% NaCl, 0.5 мас.% CH<sub>3</sub>COOH в дистиллированной или деионизированной воде. Обязательным этапом приготовления испытательного раствора является контроль рН: согласно стандарту до начала испытания рН раствора должен равняться  $2,7 \pm 0,1$ . На рисунке 1.3.3.1, представлен этап контроля уровня рН.

Образцы помещаются в герметичную ёмкость и заполняются приготовленным раствором. При этом образцы в испытательной ёмкости не должны соприкасаться, также в ней не должно быть других металлов (чтобы исключить возникновение гальванической пары).

Распределение образцов в испытательном сосуде, соответствующее требованию стандарта, представлено на рисунке 1.3.3.2.

Важно отметить, что также было соблюдено условие: отношение объёма испытательного раствора к общей площади поверхности образцов превышала минимальную требуемую величину 3 мл/см<sup>2</sup>. После установки образцов, осуществлялась продувка азотом в течении 1 часа со скоростью не менее 100 мл/мин, при этом контроль расхода азота определялся по ротаметру. После продувки испытательного раствора азотом, осуществлялась продувка сероводородом.

Испытания проводились в установке, схема которой приведена на рисунке 1.3.3.3 [12]:

#### Описание работы установки:

Газ (H<sub>2</sub>S или N<sub>2</sub> в зависимости от стадии продувки) поступает через расходомер в промежуточную колбу, затем происходит барботаж раствора в герметичном испытательном сосуде с образцами, остатки газа проходят через промежуточную колбу и нейтрализуются в 10% растворе NaOH.

Важнейшим условием, определяющим качество испытаний на водородное растрескивание, является контроль концентрации сероводорода. Для контроля концентрации сероводорода и установления требуемого режима продувки использовался метод йодометрического титрования [11].

Согласно стандарту [11], минимальная концентрация сероводорода необходимая для проведения испытания по методу А 2300 мг/л.

Сероводород плохо растворим в воде, в работе [56] представлено исследование растворимости сероводорода. Его растворимость при  $t = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$  составляет 3375 мг/л это отображено в таблице 2.3.1.

Таблица 1.3.3.1 – Растворимость сероводорода при различных температурах

Температура, °С	Растворимость H <sub>2</sub> S		Температура, °С	Растворимость H <sub>2</sub> S	
	см <sup>3</sup> / см <sup>2</sup> H <sub>2</sub> O	г/100 г H <sub>2</sub> O		см <sup>3</sup> / см <sup>2</sup> H <sub>2</sub> O	г/100 г H <sub>2</sub> O
0	4,670	0,7066	40	1,660	0,2361
5	3,977	0,6001	45	1,516	0,2110
10	3,399	0,5112	50	1,392	0,1883
15	2,945	0,4411	55	1,190	0,1480
20	2,582	0,3846	60	1,022	0,1101
25	2,282	0,3375	65	0,917	0,0765
30	2,037	0,2983	70	0,84	0,041
35	1,831	0,2661	75	0,81	0,040

Контейнер с раствором продувался азотом, а затем сероводородом. Для определения уменьшения концентрации сероводорода после прекращения продувки, расход сероводорода был равен 1,3 л/мин (соответствует 50-ти по шкале ротаметра РМ-А-0.16 ГУЗ). Для определения скорости насыщения раствора сероводородом при продувке, расход сероводорода был равен 0,8 л/мин (соответствует 30-ти по шкале ротаметра). В таблице 1.3.3.2 представлены значения интенсивности продувки по ротаметру РМ-А-0.16 ГУЗ и в л/мин.

Таблица 1.3.3.2 – Интенсивности продувки испытательного раствора сероводородом по ротаметру РМ-А-0.16 ГУЗ

Расход по ротаметру	м <sup>3</sup> /мин	л/мин
100	0,002667	2,67
90	0,0024	2,40
80	0,002133	2,13
70	0,001867	1,87
60	0,0016	1,60
50	0,001333	1,33
40	0,001067	1,07
35	0,000933	0,93
30	0,0008	0,80
20	0,000533	0,53
10	0,000267	0,27
0	0	0,00

Результаты определения поправочного коэффициента (К) для метода йодометрического титрования представлены в таблице 1.3.3.3.

Таблица 1.3.3.3 – Определение поправочного коэффициента

Номер колбы	Начальный уровень раствора (Na <sub>2</sub> S <sub>2</sub> O <sub>3</sub> в бюретке)	Конечный уровень раствора	Объем раствора (Na <sub>2</sub> S <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ) израсходовавшегося на титрование
1	0	4.1	4.1
2	4.1	8.8	4.7
3	8.8	13.2	4.4

Исходя из полученных данных поправочный коэффициент  $K = 0.44$ .

После продувки ячейки с образцом и раствором А инертным газом 1 час, а затем сероводородом в течении 1 часа, были взяты пробы раствора из ячейки через

промежутки времени и определены остаточные концентрации сероводорода в этом растворе. Во всех опытах объём анализируемого раствора был принят 5 мл.

Результаты титрования приведены в таблице 1.3.3.4.

Таблица 1.3.3.4 – Результаты титрования

Время после барботажа, мин	объем йодного раствора, мл	№ колбы	н.м тиосульфата натрия	к.м тиосульфата натрия	Объем раствора тиосульфата натрия, мл	Концентрация сероводорода, мг/л
5	16	1	0	0,2	0,2	2331,1
5	16	2	0,2	0,4	0,2	2331,1
5	16	3	0,4	0,7	0,3	2297,0
60	16	1	0	0,4	0,4	2262,9
60	16	2	0,4	0,8	0,4	2262,9
60	16	3	0,8	1,3	0,5	2228,8
120	15	1	0	0,3	0,3	2147,0
120	15	2	0,3	0,7	0,4	2113,0
120	15	3	0,7	1,5	0,8	1976,6
180	15	1	3	3,7	0,7	2010,7
180	15	2	3,7	4,5	0,8	1976,6
180	15	3	7,1	8,3	1,2	1840,3
210	15	1	8,7	10,5	1,8	1635,8
210	15	2	10,8	13,1	2,3	1465,4
210	15	3	13,6	15,8	2,2	1499,5
1440	15	1	0	3	3	1226,9
1440	15	2	3	6,3	3,3	1124,6
1440	15	3	6,3	9,6	3,3	1124,6

Из полученных результатов следует, что существующий режим продувки (без непрерывного барботажа) не обеспечивает требуемой минимальной концентрации в течении длительного времени по НТД [11], а значит необходимо установить другой режим продувки.



График в координатах «концентрация сероводорода» - «время», для интервала времени 5-210 мин представлен на рисунке 1.3.3.4., график был построен исходя из результатов титрования, представленных в таблице 1.3.3.5.

Из графика 1.3.3.4 следует, что концентрация сероводорода уменьшается по полиномиальному закону. Построив линию тренда, найдём скорость изменения концентрации сероводорода от времени  $(V_{H_2S})_{ум}$  :

$$(V_{H_2S})_{ум} = (C_{H_2S})'_{t_{ум}} = -0.04t + 0.949, \text{ мг/л} \cdot \text{мин} \quad (1.3.3.1)$$

Таблица 1.3.3.5 – Результаты титрования

Время продувки	объем йодного раствора, мл	№ колбы	н.м тиосульфата натрия	к.м тиосульфата натрия	Объем раствора тиосульфата натрия, мл	Концентрация сероводорода, мг/л
60	15	1	0,1	2,5	2,4	1431,4
	15	2	2,5	5,2	2,7	1329,1
	15	3	5,4	7	1,6	1704,0
120	20	1	11,6	12,8	1,2	2590,1
	20	2	12,8	14,7	1,9	2351,5
	20	3	14,7	16	1,3	2556,0
150	21	1	0	1,5	1,5	2637,8
	21	2	1,5	2,7	1,2	2740,0
	21	3	2,7	4,1	1,4	2671,9

График зависимости концентрации сероводорода от времени продувки представлен на рисунке 1.3.3.5

Из рисунка 1.3.3.5, что концентрация сероводорода увеличивается по полиномиальному закону. Построив линию тренда, найдём скорость изменения концентрации сероводорода от времени  $(V_{H_2S})_{нас}$  :

$$(V_{H_2S})_{нас30} = (C_{H_2S})'_{t_{нас30}} = -0.2382t + 38.283, \text{ мг/л}\cdot\text{мин} \quad (1.3.3.2)$$

Предполагая, что скорость насыщения раствора сероводородом линейно зависит (при небольших интенсивностях продувки) от расхода сероводорода в единицу времени на одну ячейку, определим интенсивность продувки при которой скорость насыщения, равна скорости уменьшения концентрации сероводорода в растворе (приняли параметры  $t_1 = 50$  мин (для скорости уменьшения вблизи концентрации 2300 мг/л·мин)  $t_2 = 100$  мин (для скорости насыщения вблизи концентрации 2300 мг/л·мин) :

$$|(V_{H_2S})_{ум}| = (x/0.8) |(V_{H_2S})_{нас30}| ; x = 0.8 \cdot |(V_{H_2S})_{ум}| / |(V_{H_2S})_{нас30}| = 0.058 \text{ л/мин}$$

В таблице 1.3.3.5 представлены значения интенсивности продувки по ротаметру РМА 0,063 ГУЗ и в л/мин.

Таблица 1.3.3.6 – Интенсивность продувки сероводородом

расход по ротаметру	м <sup>3</sup> /мин	л/мин
100	0,00105	1,05
90	0,0000945	0,09
80	0,000084	0,08
70	0,0000735	0,07
60	0,000063	0,06
50	0,0000525	0,05
40	0,000042	0,04
35	0,00003675	0,04
30	0,0000315	0,03
20	0,000021	0,02
10	0,0000105	0,01
0	0	0,00

То есть после насыщения сероводородом до 2330 мг/л с интенсивностью 1,33 л/мин необходимо выставить расход сероводорода 60 по ротаметру РМА 0,063 ГУЗ и производить непрерывный барботаж контейнера сероводородом до окончания испытания.

Таким образом, были выполнены все требования стандарта [12] для проведения испытания на водородное растрескивание. Образцы подвергались барботажу в течении 96 часов. После проведения испытаний определялся уровень pH, согласно требованиям, он должен находится в интервале от 4,8 до 5,4, только в этом случае испытания признаются валидными.

После испытаний каждый образец был зачищен от окалины и осадков. Важно отметить, что при этом не использовались жёсткие абразивные средства и кислоты. Изображения некоторых образцов после испытаний представлены на рисунках 1.3.3.6, 1.3.3.7.

На некоторых из образцов выделялись вспучивания металла (блистеринги), что свидетельствует о высокой восприимчивости данного металла к водородному растрескиванию.

Образцы были подвергнуты ультразвуковому дефектоскопическому контролю для получения реальной картины распределения блистерингов и водородных трещин в объёме металла. Результаты дефектоскопического контроля некоторых образцов представлены на рисунках 1.3.3.8, 1.3.3.9, 1.3.3.10, 1.3.3.11.

Из рисунков распределения трещин в объёме образцов следует, что металл труб действительно сильно восприимчив к водородному растрескиванию. Каждый образец поражён трещинами и порами. Кроме того, морфология трещин, их характер распределения соответствует схеме из стандарта [12]. В то же время, каждый образец при прочих равных условиях имеет своё уникальное распределение трещин вдоль оси образца. Это может свидетельствовать о неоднородности структуры металла патрубка из которых были отобраны образцы для испытаний и других условий, указанных ранее (см. прошлый раздел).

После проведения УЗК каждый образец поступает на резку и изготовление микрошлифов. Согласно стандарту [12], должны быть разрезаны так как показано на рисунке 1.3.3.12.

Каждая разрезанная часть образца была отполирована для металлографических исследований. Группы образцов были запечены в таблетки. Важно отметить, что на металлографический анализ поступали нетравленные микрошлифы, поскольку трещины в основном были различимы от прочих расслоений и царапин. На некоторых образцах трещины и следы коррозии были видны без увеличения (рисунок 1.3.3.13)

Измерение трещин производилось так как показано на 1.3.3.14. При замере их длины и ширины, учитывалось, что если расстояние между ними было менее 0,5 мм, то эти трещины считали за одну. В расчёт включали все распознаваемые трещины, видимые при увеличении до 1000 раз, кроме тех, которые находились на расстоянии до 1,0 мм от внутренней или наружной поверхности образца. Также в некоторых случаях проверялись при больших увеличениях для выявления различий между трещинами, включениями, ямками на боковых, или иными нарушениями непрерывности.

Для каждого разреза вычислялись коэффициенты (CSR,CLR,CTR) по формулам (1.3.3.3 - 1.3.3.5) [12], а также и средние значения для каждого испытанного образца. Результаты расчётов и условия испытаний представлены в таблице 1.3.3.7.

Коэффициент чувствительности трещины:

$$CSR, \% = \sum \frac{(a \cdot b)}{(W \cdot T)} \cdot 100\% \quad (1.3.3.3)$$

Коэффициент длины трещины

$$CLR, \% = \sum \frac{a}{W} \cdot 100\% \quad (1.3.3.4)$$

Коэффициент толщины трещины

$$CTR, \% = \sum \frac{b}{T} \cdot 100\% \quad (1.3.3.5)$$

В этих формулах:

a – длина трещины; b – ширина трещины; W – ширина разреза; T – толщина образца.

В качестве программы для анализа изображений была использована программа «Thixomet Pro»[13]. Порядок анализа изображений был следующим:

- 1) Съёмка участка микрошлифа с предполагаемой трещиной при увеличении  $\times 100$ .
- 2) Верификация истинной природы трещины при больших увеличениях (является ли причина трещины коррозионное растрескивание), фильтрация прочих дефектов поверхности (неметаллические включения, царапины, сколы металла и т.д.)
- 3) Сборка изображений участков микрошлифа и определение основных характеристик трещиностойкости образца по формулам (1.3.3.3 - 1.3.3.5).

Снимки, сделанные в процессе проведения металлографического анализа представлены на рисунках 1.3.3.15 – 1.3.3.15.

Результаты проведения металлографического анализа по сечениям образцов приведены в таблице 1.3.3.7

Таблица 1.3.3.7 – Результаты проведения испытаний

№ сечения	a, мм	b, мм	W, мм	T, мм	a·b, мм <sup>2</sup>	CLR, %	CTR, %	CSR, %
1.1	3,7	1,2	20,0	6,7	1,2	18,6	17,9	0,9
1.2	11,1	1,1	20,0	6,7	4,9	55,7	16,1	3,7
1.3	3,3	0,3	20,0	6,7	0,4	16,4	4,8	0,3
<b>Среднее</b>	<b>6,0</b>	<b>0,9</b>	<b>20,0</b>	<b>6,7</b>	<b>2,1</b>	<b>30,2</b>	<b>12,9</b>	<b>1,6</b>
2.1	0	0	20	6,7	0	0	0	0
2.2	9,92	0,23	20	6,7	1,1538	49,6	3,432	0,861
2.3	0	0	20	6,7	0	0	0	0
<b>Среднее</b>	<b>3,3</b>	<b>0,1</b>	<b>20,0</b>	<b>6,7</b>	<b>0,4</b>	<b>16,5</b>	<b>1,1</b>	<b>0,3</b>
3.1	13,1	0,16	20	6,7	2,096	65,5	2,38	1,564
3.2	2,72	0,077	20	6,7	0,209	13,6	1,149	0,156
3.3	0	0	20	6,7	0	0	0	0
<b>Среднее</b>	<b>5,3</b>	<b>0,1</b>	<b>20,0</b>	<b>6,7</b>	<b>0,8</b>	<b>26,4</b>	<b>1,2</b>	<b>0,6</b>
4.1	0	0	20	6,7	0	0	0	0
4.2	9,83	0,483	20	6,7	3,25	49,15	7,208	2,427
4.3	0,89	0,04	20	6,77	0,035	4,45	0,59	0,0262
<b>Среднее</b>	<b>3,6</b>	<b>0,2</b>	<b>20,0</b>	<b>6,7</b>	<b>1,1</b>	<b>17,9</b>	<b>2,6</b>	<b>0,8</b>

5.1	6,8	0,31	20	6,7	2,108	34	4,626	1,573
5.2	11,9	0,68	20	6,7	8,092	59,5	10,149	6,038
5.3	14,26	1,036	20	6,7	7,22	71,3	15,46	5,39
<b>Среднее</b>	<b>11,0</b>	<b>0,7</b>	<b>20,0</b>	<b>6,7</b>	<b>5,8</b>	<b>54,9</b>	<b>10,1</b>	<b>4,3</b>
6.1	1,24	0,12	20	6,7	0,148	6,2	1,791	0,11
6.2	5,24	0,24	20	6,7	1,25	26,2	3,582	0,938
6.3	1,9	0,17	20	6,7	0,32	9,5	2,53	0,241
<b>Среднее</b>	<b>2,8</b>	<b>0,2</b>	<b>20,0</b>	<b>6,7</b>	<b>0,6</b>	<b>14,0</b>	<b>2,6</b>	<b>0,4</b>
7.1	1,07	0,12	20	6,7	0,1284	5,35	1,79	0,0958
7.2	4,32	0,68	20	6,7	1,8632	21,6	10,15	1,39
7.3	0	0	20	6,7	0	0	0	0
<b>Среднее</b>	<b>1,8</b>	<b>0,3</b>	<b>20,0</b>	<b>6,7</b>	<b>0,7</b>	<b>9,0</b>	<b>4,0</b>	<b>0,5</b>
8.1	16,99	0,565	20	6,7	7,67	84,95	8,432	5,72
8.2	18,9	0,89	20	6,7	16,82	94,5	13,283	12,55
8.3	3,9	0,5	20	6,7	1,95	19,5	7,462	1,45
<b>Среднее</b>	<b>13,3</b>	<b>0,7</b>	<b>20,0</b>	<b>6,7</b>	<b>8,8</b>	<b>66,3</b>	<b>9,7</b>	<b>6,6</b>
9.1	0	0	20	6,7	0	0	0	0
9.2	2,41	0,053	20	6,7	0,127	12,05	0,791	0,095
9.3	0	0	20	6,7	0	0	0	0
<b>Среднее</b>	<b>0,8</b>	<b>0,0</b>	<b>20,0</b>	<b>6,7</b>	<b>0,0</b>	<b>4,0</b>	<b>0,3</b>	<b>0,0</b>
10.1	0	0	20	6,7	0	0	0	0
10.2	0	0	20	6,7	0	0	0	0
10.3	12,5	0,84	20	6,7	10,5	62,5	12,53	7,83

Продолжение таблицы

<b>Среднее</b>	<b>4,2</b>	<b>0,3</b>	<b>20,0</b>	<b>6,7</b>	<b>3,5</b>	<b>20,8</b>	<b>4,2</b>	<b>2,6</b>
11.1	0	0	20	6,7	0	0	0	0
11.2	2,42	0,61	20	6,7	1,476	12,1	9,1	1,10
11.3	0	0	20	6,7	0	0	0	0
<b>Среднее</b>	<b>0,8</b>	<b>0,2</b>	<b>20,0</b>	<b>6,7</b>	<b>0,5</b>	<b>4,0</b>	<b>3,0</b>	<b>0,4</b>
12.1	0	0	20	6,7	0	0	0	0
12.2	0	0	20	6,7	0	0	0	0
12.3	15,87	0,097	20	6,7	1,53	79,35	1,44	1,14
<b>Среднее</b>	<b>5,3</b>	<b>0,0</b>	<b>20,0</b>	<b>6,7</b>	<b>0,5</b>	<b>26,5</b>	<b>0,5</b>	<b>0,4</b>
13.1	7,05	1,682	20	6,7	3,51	35,25	25,10	2,62
13.2	0,87	0,071	20	6,7	0,061	4,35	1,05	0,046
13.3	1,21	0,14	20	6,7	0,17	6,05	2,08	0,126
<b>Среднее</b>	<b>3,0</b>	<b>0,6</b>	<b>20,0</b>	<b>6,7</b>	<b>1,2</b>	<b>15,2</b>	<b>9,4</b>	<b>0,9</b>
14.1	12,32	0,2	20	6,7	2,46	61,6	2,98	1,838
14.2	7,23	0,407	20	6,7	0,94	36,15	6,07	0,703
14.3	0	0	20	6,7	0	0	0	0
<b>Среднее</b>	<b>6,5</b>	<b>0,2</b>	<b>20,0</b>	<b>6,7</b>	<b>1,1</b>	<b>32,6</b>	<b>3,0</b>	<b>0,8</b>
15.1	5,76	1,39	20	6,7	1,74	28,8	20,74	1,30
15.2	1,04	0,084	20	6,7	0,087	5,2	1,25	0,065
15.3	4,74	0,51	20	6,7	2,41	23,7	7,61	1,80
<b>Среднее</b>	<b>3,8</b>	<b>0,7</b>	<b>20,0</b>	<b>6,7</b>	<b>1,4</b>	<b>19,2</b>	<b>9,9</b>	<b>1,1</b>
16.1	0	0	20	6,7	0	0	0	0
16.2	0	0	20	6,7	0	0	0	0
16.3	10,84	0,2	20	6,7	2,168	54,2	2,98	1,61
<b>Среднее</b>	<b>3,6</b>	<b>0,1</b>	<b>20,0</b>	<b>6,7</b>	<b>0,7</b>	<b>18,1</b>	<b>1,0</b>	<b>0,5</b>
17.1	11,17	0,61	20	6,7	3,94	55,85	9,10	2,94
17.2	13,54	0,48	20	6,7	3,31	67,7	7,16	2,47
17.3	5,81	0,18	20	6,7	1,04	29,05	2,68	0,78
<b>Среднее</b>	<b>10,2</b>	<b>0,4</b>	<b>20,0</b>	<b>6,7</b>	<b>2,8</b>	<b>50,9</b>	<b>6,3</b>	<b>2,1</b>
18.1	14	0,5	20	6,7	7	70	7,46	5,22
18.2	10,77	1,05	20	6,7	11,30	53,85	15,67	8,44
18.3	0	0	20	6,7	0	0	0	0
<b>Среднее</b>	<b>8,3</b>	<b>0,5</b>	<b>20,0</b>	<b>6,7</b>	<b>6,1</b>	<b>41,3</b>	<b>7,7</b>	<b>4,6</b>
19.1	5,91	0,19	20	6,7	0,41	29,55	2,83	0,31
19.2	13,4	0,6	20	6,7	8,04	67	8,95	6
19.3	6,6	0,263	20	6,7	1,072	33	3,92	0,8
<b>Среднее</b>	<b>8,6</b>	<b>0,4</b>	<b>20,0</b>	<b>6,7</b>	<b>3,2</b>	<b>43,2</b>	<b>5,2</b>	<b>2,4</b>
20.1	5,12	0,5	20	6,7	1,04	25,6	7,46	0,78
20.2	4,99	0,534	20	6,7	0,64	24,95	7,97	0,478
20.3	10,82	1,06	20	6,7	5,23	54,1	15,82	3,90
<b>Среднее</b>	<b>7,0</b>	<b>0,7</b>	<b>20,0</b>	<b>6,7</b>	<b>2,3</b>	<b>34,9</b>	<b>10,4</b>	<b>1,7</b>
21.1	9,61	0,53	20	6,7	5,09	48,05	7,91	3,80
21.2	6,66	0,49	20	6,7	1,74	33,3	7,31	1,30
21.3	14,95	0,185	20	6,7	2,2	74,75	2,76	1,64
<b>Среднее</b>	<b>10,4</b>	<b>0,4</b>	<b>20,0</b>	<b>6,7</b>	<b>3,0</b>	<b>52,0</b>	<b>6,0</b>	<b>2,2</b>
22.1	6,63	1,2	20	6,7	3,9	33,15	17,91	2,98
22.2	6,2	0,36	20	6,7	2,23	31	5,37	1,66
22.3	7,32	1,13	20	6,7	4,12	36,6	16,86	3,07
<b>Среднее</b>	<b>6,7</b>	<b>0,9</b>	<b>20,0</b>	<b>6,7</b>	<b>3,4</b>	<b>33,6</b>	<b>13,4</b>	<b>2,6</b>



Из результатов металлографического анализа следует, что испытываемые металлы являются склонными к водородному растрескиванию (трещины на некоторых образцах занимали до 80% от длины сечения). Кроме того несмотря на схожие условия испытаний (различия только в рН и температуре) на образцах из одного и того же металла наблюдается отличающиеся величины трещиностойкости в зависимости от сечений.

Это может быть связано с рядом факторов, важнейшими из которых являются: неоднородность структуры металла по сечению, различные значения рН и температуры (изменяются в пределах допустимых значений согласно стандарту испытаний), погрешность при определении показателей стойкости металла против ВР, неисправность основного испытательного оборудования (неправильные режимы насыщения сероводородом). Среди этих факторов технологическими, то есть теми которые не зависят от испытываемого материала являются, температура и рН испытаний, погрешность при определении показателей стойкости против ВР, неисправность основного испытательного оборудования.

Для дополнительного контроля качества был проведён дисперсионный анализ для подтверждения гипотезы о влиянии факторов (Т и рН) на результаты коррозионного растрескивания (при нахождении величин этих факторов в пределах установленных стандартом испытывания).

В качестве зависимой переменной был выбран показатель CSR, поскольку при его определении используется длина и ширина трещины одновременно. Для проведения дисперсионного анализа к данным представленным ранее в таблице 1.3.3.7 были добавлена информация об условиях испытаний, а именно значение рН после проведения насыщения раствора сероводородом и температура испытаний.

Исходные данные для дисперсионного анализа со средними значениями показателя CSR по сечениям представлены в таблице 1.3.3.8.

Таблица 1.3.3.8 – Исходные данные для дисперсионного анализа

№ об-разца	a, мм	b, мм	W, мм	T, мм	a·b	CSR, %	T,°C	pH
1	6,0	0,9	20,0	6,7	2,1	1,6	24,5	2,9
2	3,3	0,1	20,0	6,7	0,4	0,3	24,5	2,9
3	5,3	0,1	20,0	6,7	0,8	0,6	23,0	3,0
4	3,6	0,2	20,0	6,7	1,1	0,8	23,0	3,0
5	11,0	0,7	20,0	6,7	5,8	4,3	23,0	3,0
6	2,8	0,2	20,0	6,7	0,6	0,4	22,7	3,1
7	1,8	0,3	20,0	6,7	0,7	0,5	22,7	3,1
8	13,3	0,7	20,0	6,7	8,8	6,6	22,7	3,1
9	0,8	0,0	20,0	6,7	0,0	0,0	22,7	3,1
10	4,2	0,3	20,0	6,7	3,5	2,6	22,7	3,1
11	0,8	0,2	20,0	6,7	0,5	0,4	26,0	3,0
12	5,3	0,0	20,0	6,7	0,5	0,4	23,0	2,8
13	3,0	0,6	20,0	6,7	1,2	0,9	23,0	2,8
14	6,5	0,2	20,0	6,7	1,1	0,8	23,0	2,8
15	3,8	0,7	20,0	6,7	1,4	1,1	23,0	2,8
16	3,6	0,1	20,0	6,7	0,7	0,5	23,0	2,8
17	10,2	0,4	20,0	6,7	2,8	2,1	23,0	2,8
18	8,3	0,5	20,0	6,7	6,1	4,6	23,6	2,9
19	8,6	0,4	20,0	6,7	3,2	2,4	23,6	2,9
20	7,0	0,7	20,0	6,7	2,3	1,7	23,6	2,9
21	10,4	0,4	20,0	6,7	3,0	2,2	23,1	3,0
22	6,7	0,9	20,0	6,7	3,4	2,6	23,1	3,0

Для удобства представления данных и проверки гипотез данные были разделены на группы следующим образом:

По значению pH:  $pH < 3$  – 1-я группа;  $pH \geq 3$  – 2-я группа;

По температуре испытаний:  $T < 23^\circ\text{C}$  – 1-я группа;  $T \geq 23^\circ\text{C}$  – 2-я группа;

Преобразованные данные для проведения дфухфакторного дисперсионного анализа представлены в таблице 1.3.3.9.

Таблица 1.3.3.9 – Разделение данных на группы

Т(№ группы)	рН(№ группа)	CSR, %
2	1	<b>1,6</b>
2	1	0,3
2	2	0,6
2	2	0,8
2	2	4,3
1	2	0,4
1	2	0,5
1	2	6,6
1	2	0,0
1	2	2,6
2	1	0,4
2	1	0,4
2	1	0,9
2	1	0,8
2	1	1,1
2	1	0,5
2	1	2,1
2	1	<b>4,6</b>
2	1	2,4
2	1	1,7
2	1	2,2
2	1	<b>2,6</b>

Нулевая гипотеза данного дисперсионного анализа: средняя величина показателя трещиностойкости CSR одинакова для каждого из факторов.

Дисперсионный анализ был произведён в пакете языка программирования рython “**Pingouin**” [57]. Результаты анализа представлены в таблице 1.3.3.10 и на рисунке 1.3.3.17.

Таблица 1.3.3.10 – Результаты дисперсионного анализа

Фактор	SS	DF	MS	F	p-value
рН	16,37343	1	16,37343	5,475193	0,030357
Т	28,63804	1	28,63804	9,576417	0,005967
рН Т	4,557496	1	4,557496	1,524004	0,232066

Уровень значимости  $p$ -value меньше 0,05 для гипотез:

- 1)  $pH$  после продувки не влияет на величину показателя CSR,
- 2)  $T$  опыта не влияет на величину показателя CSR.

Следовательно, их можно отвергнуть, но гипотезу о не влиянии фактора  $pH \cdot T$  на показатель CSR отвергнуть нельзя, так как  $p$ -value  $>0,05$ . Таким образом, эксперимент показал, что даже небольшие изменения факторов температуры и уровня кислотности среды влияют на величину трещиностойкости, что подтверждает исследования проведённые ранее (начало главы 2).

1.3.4. Проблемы, возникающие при определении показателей стойкости металла против ВР металлографическим методом

Ранее были обозначены основные проблемы при определении показателей стойкости металла против ВР (введение). При этом наиболее трудоёмкими стадиями являются процессы идентификации и замера трещины. Это связано в первую очередь с некачественным изготовлением шлифа и наличием дефектов поверхности металла (окислы металла, неметаллические включения и т.д). Далее на рисунке 1.3.4.1 приведены металлографические изображения шлифов металла после водородного растрескивания, по которым трудно идентифицировать трещину и измерить параметры каждой из них. Кроме того, возможны ситуации, когда трещина настолько мала, что её трудно отличить от строчечных неметаллических включений.

Во всех этих случаях требуется дополнительные исследования с целью определения типа трещины и её размеров, что дополнительно увеличивает трудоёмкость процесса определения показателей стойкости металла против ВР.

Таким образом, определение показателей стойкости металла против ВР является одним из наиболее трудоёмких процессов при проведении испытаний на водородное растрескивание. Это приводит к возникновению экономических потерь предприятия особенно в период поточных испытаний. В тоже время отсутствуют программные комплексы для автоматического определения показателей трещиностойкости по металлографическому изображению (смотреть раздел 1).

Создание таких комплексов позволило бы значительно ускорить процесс проведения испытаний на водородное растрескивание, а также улучшить качество определения показателей стойкости металла против ВР. Поэтому именно так поставлена цель нашей работы (смотреть раздел введение).

## 2 ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

### 2.1 Понятие нейросетевой модели

Существует множество определений понятия нейросетевой модели, таких как:

1) Нейронная сеть – это математическая модель, а также её программная или аппаратная реализации, построенная по принципу работы биологических нейронных сетей – сетей состоящих из нервных клеток [58].

2) Нейронная сеть – это громадный распределённый параллельный процессор, состоящий из элементарных единиц обработки информации, накапливающих экспериментальные знания и предоставляющих их для последующей обработки [58]

Нейронная сеть сходна с головным мозгом по нескольким причинам :

1) Данные поступающие в нейронную сеть из внешней среды и в дальнейшем используются для процесса обучения.

2) Для хранения накопленных данных используется связи между нейронами, которые называются синаптическими весами.

Процедура, которая используется для процесса обучения, определяется как алгоритм обучения. Эта процедура определённым образом выстраивает синаптические веса сети для обеспечения необходимого отклика. Таким образом, изменяя синаптические веса можно настраивать нейронные сети. Кроме того нейронные сети могут изменять своё строение в процессе обучения (регуляризация сетей) [59].

## 2.2 Строение элементов нейросети – нейронов

Нейронная сеть состоит из множества единиц – нейронов. Нейрон представляет собой единицу обработки информации, состоящую из трёх основных элементов [58]:

1) *Набор синапсов*, каждый из которых характеризуется своим “весом”. Так, при передаче сигнала  $x_j$  на вход синапса  $j$ , который связан с нейроном  $k$ , умножается на вес  $w_{kj}$ . Здесь, первый индекс относится к рассматриваемому нейрону, а второй – ко входному окончанию синапса, с которым связан данный вес. При этом синаптический вес искусственного нейрона может иметь как положительные, так и отрицательные значения.

2) *Сумматор* складывает взвешанные входные сигналы.

3) *Функция активации* ограничивает величину выходного сигнала нейрона. Обычно диапазон величин выходного сигнала нейрона лежит в интервалах от  $[0,1]$  или  $[-1,1]$ .

Блок-схема описанной модели нейрона представлена на рисунке 2.2.1.

В данной блок схеме включена пороговая величина  $b_k$  которая ограничивает величину входного сигнала, подаваемого на функцию активации.

Математически, описать функционирование нейрона можно с помощью уравнений:

$$u_k = \sum_{j=1}^m w_{kj} x_j, \quad (2.2.1)$$

$$y_k = \varphi(u_k + b_k) \quad (2.2.2)$$

Представленная на рисунке 2.2.1 модель нейрона представляет собой детерминистическую модель. Также существует другой тип моделей нейронов – стохастические модели. Ключевое отличие стохастических от детерминистических моделей в том, что в последних используется функция активации с вероятностной интерпретацией. В этих моделях нейрон может находиться в одном из двух состояний +1 и -1. Решение о переключении нейрона принимается с учётом вероятности этого события. Существует огромное количество моделей нейронов отличающиеся прежде всего функциями активации, синаптическими значениями и т.д. Нейроны соединенные с другими нейронами образуют нейронные сети. Они отличаются друг от друга архитектурами (способами построения нейронных связей), плотностью связей, моделями нейронов и т.д. Количество архитектур нейронных сетей велико[60]. На рисунке 2.2.2 представлены общие группы архитектур нейронных сетей использующиеся в настоящее время.

С каждым годом их количество увеличивается в соответствии с решаемыми задачами [60]

Одними из наиболее фундаментальных классов нейросетей являются: нейросети прямого распространения, сверточные нейронные сети, рекуррентные нейронные сети [61]. В данной работе будет рассматриваться только свёрточные нейронные сети, поскольку именно они чаще используются для анализа изображений и решения задач сходных с поставленными ранее[62,63].

Общо, можно выделить схожие для нейросетей различных архитектур этапы построения моделей. Этапы построения нейросетевых моделей можно разбить на несколько этапов.[58]:

- Сбор исходных данных
- Подготовка данных
- Выбор архитектуры сети



- Выбор гиперпараметров модели
- Подбор параметров обучения
- Обучение нейросети
- Валидация результатов

### 2.3 Свёрточные нейронные сети

Свёрточные нейронные сети (СНС) занимают центральное место в решении задач компьютерного зрения. Структура СНС как правило следующая: несколько слоёв обработки, которые могут содержать как линейные так и нелинейные преобразователи. Типы этих слоёв: свёрточный (convolutional) слой, субдискретизирующий (subsampling), или подвыборочный слой и выходной слой (MLP) (чаще всего полносвязный) [64]. Слои в СНС расположены последовательно, структура свёрточной нейронной сети представлена на рисунке 2.3.1 [54].

Считается, что свёрточный и субдискретизирующий слои являются слоями с двумерной размерностью, напротив выходной слой обычно является вектором единичной размерности. В СНС каждый двумерный слой состоит из нескольких уровней. Каждый уровень в свою очередь также является двумерным массивом. А выход каждого уровня называется картой признаков [65].

Свёрточные нейронные сети получили своё названия из-за использования операции “свёртки” в свёрточном слое. Каждой карте признака соответствует некоторый фильтр, представляющий собой двумерный массив меньший чем исходная карта признаков. Суть операции свёртки заключается в последовательном перемещении проекции ядра(фильтра) по карте признаков и её преобразование в следующую карту признаков. Пример выполнения операции свёртки представлен на рисунке 2.3.2. Следует отметить, что первоначально операции свёртки подвергается исходное изображение.

Суть следующего слоя в свёрточной нейронной сети – субдискретизирующего слоя, заключается в уменьшении размера изображения. Здесь принимается, что если на предыдущей операции свёртки уже были выявлены признаки

изображения, то для дальнейшей обработки не требуется изображение такой же размерности.

Субдискретизирующий слой также как и свёрточный слой содержит ядро, с помощью которого преобразуется изображение полученное с предыдущего этапа свёртки в уменьшенное, но в отличие от свёрточного слоя в процессе сканирования ядром субдискретизирующего слоя (фильтром) карты предыдущего слоя, сканирующее ядро не пересекается. Обычно, каждая карта имеет ядро размером  $2 \times 2$ , что позволяет уменьшить предыдущие карты свёрточного слоя в 2 раза [66]. Таким образом, основная структура СНС заключается в последовательном чередовании свёрточных и субдискретизирующих слоёв. Используя подобную структуру, можно преобразовывать исходное изображение в карты признаков.

Следующим слоем свёрточной нейронной сети является выходной слой (полносвязный), по сути являющийся многослойным перцептроном (MLP). Выходной слой плотно(полно) связан с нейронами предыдущего слоя. При этом, например при решении задачи классификации, количество выходных нейронов будет равно количеству классов, то есть объектов, которые требуется различить. Настройка параметров нейронов выходного слоя, как в прочем и всей структуры сети, является трудной задачей, зависящей в первую очередь от конкретно решаемой проблемы.

Как уже было сказано ранее свёрточные нейронные сети используются для решения задач компьютерного зрения, среди которых основными являются классификация, детекция, сегментация, сегментация экземпляров каждого класса. Пример разделения типов задач компьютерного зрения показан на рисунке [[https://github.com/matterport/Mask\\_RCNN](https://github.com/matterport/Mask_RCNN)]

- 1) Классификация (Classification). Определение классов объектов на изображении, например отделение трещин от неметаллических включений, прочих дефектов поверхности на металлографическом изображении.
- 2) Детекция (Detection). Определение класса объекта, а также его местоположение на изображении.
- 3) Сегментация (Segmentation). Определение всех пикселей объекта, который принадлежит заданному классу
- 4) Сегментация экземпляров каждого класса (Instance Segmentation). Определение всех пикселей всех объектов на изображении принадлежащих множеству классов.

Соответственно, самой сложной и полной задачей является задача сегментация экземпляров каждого класса. В данной работе приведено решение задачи сегментации, а именно сегментация водородных трещин на изображении. Именно решение этой задачи в приложении к металлографическому исследованию посвящён данный раздел этой работы.

## 2.4 Нейросетевой алгоритм «U-net»

Проанализировав литературу в области нейросетевого моделирования [58-63] и ознакомившись с примерами работ [62-70] было принято решение использовать алгоритм Unet для решения задачи определения показателей стойкости металла против ВР по металлографическим изображениям шлифов после проведения испытаний на водородное растрескивание.

Название сети Unet получила из-за своей формы архитектуры сети (рисунок 2.4.1). Unet относится к типу свёрточных нейронных сетей, она была разработана в 2015 году для решения задачи instance segmentation в области биомедицинских изображений. Свёрточные сети с архитектурой типа Unet показывают высокую эффективность при решении задач типа сегментация, так в 2018 году в соревнованиях на платформе Kaggle [71] в задаче сегментации изображений клеток, по снимкам полученным с микроскопа, победило решение с использованием сети с архитектурой Unet [72](именно это решение было положено в основу данной работы).

На рисунке 2.4.1 представлена архитектура сети U-net. К достоинствам данной архитектуры является высокая точность работы, а также относительно небольшой набор обучающих данных для построения модели. Архитектура сети unet состоит из двух ветвей: сужающейся (слева) и расширяющейся (справа). Сужающаяся ветвь соответствует типичной архитектуре свёрточных нейронных сетей. Она состоит из повторяющихся двухкратных операций свёрток  $3 \times 3$ , каждая из которых сопровождается применением операции ReLU [73] и операцией объединения (max pooling) слоями  $2 \times 2$  с шагом 2 для субдискретизации (downsampling). Каждый субдискретизирующий слой удваивает количество каналов признаков. Напротив, каждый шаг расширяющийся ветки объединяет карты признаков с помощью свёрточных слоёв  $2 \times 2$ , так что число каналов признаков сокращается в два раза, так происходит конкатенация с соответствующей “обрезанной” картой признаков с сужающейся ветки, затем данные проходят через два свёрточных слоя  $3 \times 3$ , каждый из которых сопровождается применением операции ReLU. Обрезка (cropping) необходима, т.к. в процессе свёртки теряются пиксели, которые находились по границам изображения. В последнем слое сети unet используется свёртка  $1 \times 1$  для отображения вектора признаков размерностью  $64 \times 1$ . Таким образом, всего архитектура сети U-net содержит 23 свёрточных слоя.

Вкратце сеть U-net можно описать так: последовательность свёрточных и субдискретизирующих слоёв, предназначенные для уменьшения пространственного разрешения картинки вначале, а затем для увеличения, при этом объединив с данными картинку и пропустив через другие слои свёртки. Таким образом сеть U-net выступает в качестве фильтра, применяемого к входному изображению.

## 2.5 Реализация нейросетевого алгоритма «U-net» для решения задачи определения показателей трещиностойкости

Для решения поставленной задачи была построена блок-схема алгоритма определения стойкости металла против ВР, представленная на рисунке 2.5.1. Важно отметить, что основой для создания нейросетевой модели являлся код [72], представленный для решения задачи сегментирования изображений, полученных на микроскопе, клеток в рамках международных соревнований по Data Science на платформе Kaggle.

Описание представленных на рисунке 2.5.1 операций:

1. Передача исходного массива сделанных изображений в блок обработки изображений. Здесь происходит нарезка исходного большого изображения на множество малых изображений заданного размера с присвоением уникальных идентификаторов (потребуется на этапе 4).
2. Передача массива малых изображений в нейросетевую модель. Нарезанные изображения заданного размера поступают в обученную нейросетевую модель, где происходит прогнозирование масок (слепка изображения где по “мнению” модели находятся трещины от водородного растрескивания).

Каждой прогнозируемой маске присваивается уникальный идентификатор (путём копирования идентификатора с малого изображения).

3. Сборка масок изображений по уникальным идентификаторам. В блоке “сборки масок” происходит восстановление изображения до исходного размера, путём компоновки масок по уникальным идентификаторам. А также определяются размеры масок изображений.
4. Передача изображений собранных из масок в блок “определение показателей трещиностойкости”. В этом блоке происходит суммирование размеров трещин при условии последовательного следования масок с трещинами, то есть, если последующее изображение не содержит трещину, то считается, что трещина закончилась и началась новая [12]. Затем, получив размеры трещин, происходит определение показателей стойкости металла против ВР по формулам указанным ранее (смотреть главу 2).
5. Вывод результатов определения показателей стойкости металла, собранного изображения из масок, а также исходного металлографического изображения.

Первой задачей, которую необходимо решить в процессе создания программного комплекса для определения показателей стойкости металла против ВР является формирование обучающей выборки. В ходе металлографического анализа были получены металлографические изображения участков шлифов металла после водородного растрескивания. Кроме того, были сделаны фотографии участков шлифов, в которых не было трещин (это потребуется для решения задачи фильтрации дефектов с поверхности шлифа). Часть этих изображений были приведены ранее. На рисунках 2.5.2 -2.5.5 представлен подробный разбор двух изображений металлографического изображения шлифа с разбором классов объектов на изображениях (увеличение  $\times 100$ ), которые наиболее часто встречаются при металлографическом анализе шлифов металла после водородного растрескивания.

Для обучения нейронной сети необходимо подготовить изображения. Всего было собрано по 20 изображений с 22 валидных образцов. Для каждого из этих изображений необходимо было сопоставить изображение маски, то есть такое изображение, на котором было бы только положение трещины как на исходном изображении. Для этого исходное изображение преобразовалось в негативное с помощью библиотеки “Pillow” python, фрагмент кода приведён на рисунке 2.5.6, пример получившегося изображения приведён на рисунке 2.5.7.

```
#перебор имён в массиве
for image_name in ID:
    # открывает данное изображение
    image = Image.open(PATH+image_name)
    d = ImageDraw.Draw(image)
    #определяем размеры изображения
    width = image.size[0]
    height = image.size[1]
    #Получаем значение пикселей
    pixels = image.load()
    # преобразуем в негативное изображение и сохраняем его
    for i in range(width):
        for j in range(height):
            a = pixels[i, j][0]
            b = pixels[i, j][1]
            c = pixels[i, j][2]
            draw.point((i, j), (255 - a, 255 - b, 255 - c))
    image.save('..\data\' + name.split('.')[0]+".PNG")
    del d
```

Рисунок 2.5.6. -фрагмент кода преобразования в негатив

Затем следовал этап получения масок негативного изображения. Для этого использовалась программа Adobe Photoshop [74]. Важно отметить, что маски изображений были сделаны только для трещин на водородное растрескивание. Пример исходного изображения и изображения маски приведён на рисунке 2.5.8.

Исходные изображения полученные при металлографическом анализе имели размер 2046x1536, было принято решение разбить изображение на более мелкие размером (320x256) с целью увеличения объёма выборки и облегчения операции определения размеров маски трещины. Фрагмент кода разбиения изображений представлен на рисунке 2.5.9.

Проделав описанные выше операции, для каждого из исходных изображений была сформирована выборка, которые были разделены на обучающую и тестовую



в процентном соотношении 80% и 20% соответственно.

Затем полученные изображение преобразовывались в numpy массивы [75].  
Фрагмент кода приведён на рисунке 2.5.10.

Далее следовал этап выбора метрики качества. В качестве метрики качества был выбран коэффициент Дайса [76]. Этот коэффициент вычисляется по формуле 2.5.1.

$$D = \frac{2 \sum_i^N p_i g_i}{\sum_i^N p_i^2 + \sum_i^N g_i^2}, \quad (2.5.1)$$

Здесь, N – число вокселей предсказанных при бинарной сегментацией в  $p_i$  объёме при реальных объёмах  $g_i$ . Это выражение может быть также представлено в виде градиента функции D:

$$\frac{\partial D}{\partial p_j} = 2 \left[ \frac{g_j (\sum_i^N p_i^2 + \sum_i^N g_i^2) - 2 p_j (\sum_i^N p_i g_i)}{(\sum_i^N p_i^2 + \sum_i^N g_i^2)^2} \right] \quad (2.5.2)$$

Архитектура сети, используемая в работе, была представлена ранее (рисунок 2.4.1) её программная реализация представлена в приложении Б. Важно уточнить, что в разработке программы использовалась библиотека машинного обучения Keras, обладающая мощным функционалом, для создания подобных проектов [73]. В качестве оптимизатора при обучении сети использовался оптимизатор “Adam” [77], функция потерь: “binary\_crossentropy” [78]. После обучения нейросети были предсказаны маски на тестовых изображениях, тесты нейросетевой модели представлены на рисунках 2.5.11.

Несмотря на наличие некоторых ошибочных масок и масок в которых в качестве трещин включены прочие объекты (рисунок (2.5.12)) большая часть была предсказана верно. Кроме того, некоторые предсказание неверных масок не являются критичным моментом (если размеры объекта на маске невелики), поскольку отсеиваются при использовании пороговых условий, накладываемых на геометрические размеры объекта на маске в процессе суммирования в блоке программы “определение показателей трещиностойкости”.

Получившиеся маски имеют размеры идентичные изображениям, которые использовались для получения прогноза. Кроме того, они имеют уникальные

идентификаторы, по которым маски собираются в исходное (до разделения на малые части) изображение. Визуализация процесса разбиения участка изображения микрошлифа и сборки масок представлена на рисунках 2.5.13, 2.5.14.

В это же время происходит суммирование длин масок и получение общих параметров трещин (длины и толщины), причём в функции суммирования масок были учтены следующие моменты [12]: трещины считались за одну, если расстояние между ними было менее 0,5 мм.

Таким образом, получив параметры трещин, происходит расчёт параметров стойкости металла против ВР. Полученные показатели выгружаются в .csv файл для удобства чтения результатов.

## 2.6 Анализ результатов работы программного комплекса

В таблице 2.6.1 представлено сопоставление результатов в определении показателей стойкости металла против ВР инженером-металловедом и разработанным программным комплексом по металлографическим изображениям на валидационной выборке.

Таблица 2.6.1 – Сравнение результатов определения показателей трещиностойкости

№ образца	Показатели, определённые инженером-металловедом			Показатели, определённые разработанным программным комплексом		
	CLR, %	CTR, %	CSR, %	CLR*, %	CTR*, %	CSR*, %
16	18,1	1,0	0,5	14,99	1,08	0,65
17	50,9	6,3	2,1	47,29	4,08	1,66
18	41,3	7,7	4,6	26	9,32	5,91
19	43,2	5,2	2,4	40,27	4,64	2,96
20	34,9	10,4	1,7	21,19	8,28	1,57
21	52,0	6,0	2,2	39,77	6,53	2,65
22	33,6	13,4	2,6	29,3	17,41	2,22

Диаграммы рассеяния, отображающие сходство предсказанных и измеренных величин представлены на графиках 2.6.1 – 2.6.3.

При этом среднеквадратичные отклонения при определении показателей составили:

$$\sigma_{CLR,\%} = 12,89 \%;$$

$$\sigma_{CTR,\%} = 5,39 \%;$$

$$\sigma_{CSR,\%} = 1,73 \%.$$

Этот результат был получен только при использовании металлографических изображений с 15 образцов металла после водородного растрескивания для обучения нейронной сети, что является отличным результатом.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе работы, были решены следующие задачи:

1. Изготовление образцов для проведения испытаний на водородное растрескивание. Осуществлён входной контроль образцов для коррозионных испытаний согласно стандарту NACE TM0284.

2. Проведение коррозионных испытаний согласно стандарту NACE TM0284. При этом особое внимание было уделено контролю качества испытаний, а именно: экспериментально были определены требуемые режимы продувки для достижения целевой концентрации  $H_2S$  в растворе. Была проведена валидация результатов испытаний на водородное растрескивание по средством металлографического анализа и ультразвукового контроля образцов. Экспериментально было подтверждено влияние важнейших факторов (pH, T) на величину водородного растрескивания (показатель CSR, %) по средством поведения дисперсионного анализа. Проведена общая валидация результатов испытаний на водородное растрескивание.

3. Проведение металлографического анализа показателей стойкости металла против ВР по изображениям поверхности шлифа после водородного растрескивания. Для каждого из образцов была проведена валидация результата путём сверки показателей с картами распределения дефектов в объёме шлифа, полученными на этапе ультразвукового контроля.

4. Подбор нейросетей для решения задачи сегментации. Был осуществлён поиск наиболее подходящих для данной задачи нейросетевых алгоритмов. В качестве основного типа нейросетевых алгоритмов был выбран тип свёрточная нейронная сеть. Осуществлён подбор нейросетевых алгоритмов применительно к задаче. В качестве базовой модели была выбрана нейросетевая модель “U-net”. Реализация нейросетевой модели была осуществлена на языке Python, с использованием библиотек Keras, Numpy, Scikit-learn и т.д

5. Создание обучающей и тестовой выборки для нейросетевой модели. Проведён анализ классов объектов присутствующих на металлографических изображениях. Произведена агрегация и идентификация критических случаев при распознавании трещины инженером-металловедом. Определены характерные признаки

трудоёмкости процесса металлографического анализа шлифов после водородного растрескивания. Созданы маски для массива изображений водородных трещин. Для создания тестовой и обучающей выборок использованы 22 валидных образца после испытаний на водородное растрескивание.

6. Обучение и тестирование нейросетевой модели. Осуществлён подбор гиперпараметров модели, выбрана метрика качества, задана функция потерь, доработана архитектура сети. В качестве платформы для обучения и реализации программного кода использован сервис “Google Colab”. Проведена валидация результатов работы нейросетевой модели путём сравнения предсказанных и тестовых масок соответственно.

7. Разработка алгоритма определения показателей стойкости металла против ВР. Создан алгоритм обработки изображений металлографических шлифов любых размеров, например панорамных изображений, для ускорения процесса проведения металлографического анализа. Создан алгоритм определения размеров трещин на масках, а также определение истинных размеров трещин на исходных изображениях при работе в связке с нейросетевой моделью “U-net”. Разработан общий алгоритм определения показателей стойкости металла против ВР по металлографическому изображению.

8. Создание программного комплекса определения показателей стойкости металла против ВР. Создан программный код алгоритма определения показателей стойкости металла против ВР. Осуществлена общая сборка модулей в единый программный комплекс, реализованный на языке Python.

9. Валидация результатов работы программного комплекса. Осуществлено тестирование программного комплекса по средством сравнения результатов определения показателей стойкости металла против ВР инженером-металловедом и разработанной программы. Результаты работы являются удовлетворительными, нейросетевая модель распознавания трещин, лежащая в основе разработанной программы, хорошо справляется с задачей прогнозирования. Несмотря на достаточно малую обучающую выборку по меркам аналогичных задач в области машинного зрения.

Таким образом, в работе достигнута поставленная цель получения программного кода для уменьшения трудоёмкости металлографического анализа стойкости металла против ВР на шлифах после водородного растрескивания стали. Полученный программный комплекс должен вести себя “гибко” по отношению к задаче прогнозирования показателей стойкости металла против ВР, поскольку является универсальным для анализа металлографических изображений водородных трещин без относительно к программам получения изображений шлифов.

По результатам работы поставленную гипотезу о возможности прогнозирования показателей стойкости металла против ВР по металлографическому изображению можно считать доказанной.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Башкатова, Ю. И. Анализ российской нефтедобывающей отрасли и тенденций слияний и поглощений в ней / Ю. И. Башкатова, Н. И. Решетько // Вестник евразийской науки. – 2015. – №3 (28). – С. 10–15.
2. Пономарев, А.В. Нефтедобывающая промышленность России как объект рентных отношений: состояние и перспективы развития / А.В Пономарев // Экономический анализ: теория и практика. – 2005. – №19 – С. 52 – 63.
3. <http://ngo.slant.ru/interview/id34/>
4. Симбухов, И.А. Разработка химического состава, технологии термомеханической обработки высокопрочной стали категории прочности х120 (к90) для труб магистральных газопроводов высокого давления. дис. канд. техн. наук. /И.А. Симбухов. – М., 2014. – 153 с.
5. Харионовский, В.В. Стресс-коррозия магистральных газопроводов: методы, объёмы, эффективность диагностирования / В.В. Харионовский //Газовая промышленность. – 2005.–№ 7. – С. 14 – 17.
6. Климов, П.В. Исследование и разработка методов торможения стресс-коррозии на примере магистральных газопроводов Средняя Азия-Центр/ П.В. Климов, А.К. Гумеров, Р.Н. Кунафин // Под. ред. Гумерова К.М. – СПб.: ООО “Недра”, 2011. – 228 с.
7. Басиев, К.Д. Длительная прочность стали и сварных соединений трубопроводов под воздействием водорода и напряженного состояния / К.Д. Басиев, А.Д. Алборов, Т.М. Дзущев, М.В Етдзаев// Экспозиция Нефть Газ. – 2017. – №1 (54).
8. Сильвестров С. А. Изменение механических свойств металла труб в водородосодержащих средах / С. А. Сильвестров, К. М. Гумеров // Сварка. Реновация. Триботехника : тезисы докладов VIII Уральской научно-практической конференции. — Нижний Тагил : НТИ (филиал) УрФУ, 2017. — С. 85-90.
9. Надёжность трубопроводов, транспортирующих сероводородосодержащие нефтегазовые среды: монография / А.А. Бауэр, В.М. Кушнарченко, А.Е. Пятаев, Ю.А. Чирков, Д.Н. Щепинов – Оренбург: ОренПечать, 2015. – 506 с.



10. Фролова, Л.В. Коррозия и наводораживание углеродистых сталей в карбонатно-бикарбонатных средах/ Л.В. Фролова // Коррозия: материалы, защита. – 2004. – № 3. – С. 22-25.
11. NACE TM0177 – 2016. Лабораторные испытания металлов на сопротивление сульфидному растрескиванию под напряжением и коррозионному растрескиванию под напряжением в H<sub>2</sub>S – содержащих средах . –Хьюстон: Международная ассоциация специалистов по коррозии, 2016. – 46 с.
12. NACE TM0284-2011. Оценка сталей для трубопроводов и сосудов высокого давления на сопротивляемость водородному растрескиванию. – Хьюстон: Международная ассоциация специалистов по коррозии, – 64 с.
13. <https://thixomet.ru/product/thixomet-pro/>
14. Grill-Spector, K. Repetition and the brain: neural models of stimulus-specific effects/ K. Grill-Spector, R. Henson, A. Martin. // Trends in Cognitive Sciences. – 2015. – 10(1). – P. 14–23.
15. Grossberg, S. Nonlinear neural networks: Principles, mechanisms, and architectures/ S. Grossberg //Neural Networks. –1988. – 1(1). – P. 17 – 61.
16. Mendyk, A. Unified methodology of neural analysis in decision support systems built for pharmaceutical technology/ A. Mendyk, R. Jachowicz, //Expert Systems with Applications. – 2007. – 32(4). – P. 1124 – 1131.
17. Филист, С.А. Нечеткие нейросетевые структуры для сегментации изображений глазного дна/ С.А. Филист, С.В. Пихлап, Р.А. Томакова // Вестник Воронежского государственного технического университета. – Воронеж, – 2009. – Т. 5, № 4. – С. 42 – 45.
18. Tianjun X. The Application of Two-Level Attention Models in Deep Convolutional Neural Network for Fine-Grained Image Classification / X. Yichong, Y. Kuiyuan, Z. Jiaxing, P. Yuxin, Z. Zheng // The IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), – 2015. – P. 842 – 850.
19. Yamashita, R. Convolutional neural networks: an overview and application in radiology / R. Yamashita, M. Nishio // Insights Imaging. – 2018. – P. 611 – 629.

20. X, Wang. ChestX-Ray8: Hospital-Scale Chest X-Ray Database and Benchmarks on Weakly-Supervised Classification and Localization of Common Thorax Diseases / Wang X., Peng Y., Lu L., Lu Z, Bagheri M. // 2017 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR) – 2017. – P. 3462 – 3471.
21. Kholodnyi, A.A. Effect of Carbon and Manganese on Low-Carbon Pipe Steel Hydrogen-Induced Cracking Resistance/ A.A Kholodnyi, Y.I. Matrosov, M.Y. Matrosov //Metallurgist. – 2016. – vol. 60. – P. 54–60.
22. Эфрон, Л.И. Металловедение в «большой» металлургии. Трубные стали/ Л.И. Эфрон. – М.: Металлургиздат, 2012. - 696 с.
23. Hara, T. Conditions of Hydrogen-induced Corrosion Occurrence of X65 Grade Line Pipe steels in Sour Environments / T. Hara, H. Asahi, H. Ogawa // Corrosion. – 2004. – 60(12) – P. 1113-1121
24. Murata, T. 78, 79th Nishiyama Memorial Lecture / T. Murata //International Steel Institute of Japan (ISIJ). – 1981 – P.227.
25. Shinohara Y., Hara T. Metallurgical design of UOE line pipe for sour service // Microalloyed Steels for Sour Service International Seminar. São Paulo, Brazil. 20-22 august 2012.
26. Шрейдер, А. В. Влияние водорода на нефтяное и химическое оборудование / А. В. Шрейдер, И. С. Шпарбер, Ю. И. Арчаков // Машиностроение. – 1976. – С. 144.
27. Fowler, C. The history and development of a new SOHIC test method / C. Fowler, J. Malcolm Gray // «Microalloyed Steels for Sour Service International Seminar». São Paulo, Brazil. – 2012. – P. 47– 60.
28. Yamada, K. Influence of metallurgical factors on HIC of high strength ERW line pipe for sour gas service /K. Yamada // International Conference on Technology and Applications of HSLA Steels. – 1983. – P. 835-842.
29. Kalwa, Ch. Europipe’s experience and developments on pipe material for sour service applications / Ch. Kalwa , H-G Hillenbrand // «Microalloyed Steels for Sour Service International Seminar». São Paulo, Brazil. – 2012. – P. 99-106.

30. Nieto, J. Process and quality controls for production of linepipe slabs for sour service applications at Arcelormittal Lazardo Cardenas / J. Nieto // «Microalloyed Steels for Sour Service International Seminar». São Paulo, Brazil. – 2012. – P. 107-118.
31. Металловедение: учебник для вузов / под ред. А.П. Гуляева, – 6-е изд., перераб. и доп. – М.: Металлургия, 1986. – 544 с
32. Ishikawa, N. Proceedings of the Microalloyed Steels for Sour Service / N. Ishikawa, S. Endo // International Seminar: CBMM. – 2014. – P. 135-154
33. Anelli, E. Sour Service X65 Seamless Linepipe For Offshore Special Applications// E. Anelli, D. Colleluori, J. C. Gonzalez // International Society of Offshore and Polar Engineers. – 2001.
34. Malkolm Gray, J. Low manganese sour service linepipe steel / J. Malkolm Gray // Microalloyed Steels for Sour Service International Seminar. São Paulo, Brazil. – 2012. – P. 165-182.
35. Матросов, Ю.И. Ускоренное охлаждение после контролируемой прокатки при производстве толстолистовых трубных сталей на стане 3600 ПАО «МК «АЗОВСТАЛЬ» / Ю.И. Матросов, Э.О. Цкитишвили, Е.С. Попов, Г.Н. Коновалов, А.А. Холодный // Металлург. – 2013. – № 9. – С. 77–83.
36. Матросов, Ю.И. Влияние режимов деформационно-термической обработки трубной стали на формирование микроструктуры и сопротивление водородному растрескиванию (НІС) / Ю.И. Матросов, А.А. Холодный, Е.С. Попов, С.В. Сосин, Г.Н. Коновалов // Проблемы черной металлургии и материаловедения. – 2014. – № 1. – С. 98–104.
37. Матросов, Ю.И. Микроструктура и свойства толстолистового проката из трубных сталей X52–X65 после ТМО 28 с ускоренным охлаждением / Ю.И. Матросов, А.А. Холодный, Е.С. Попов, С.В. Сосин, Г.Н. Коновалов // Проблемы черной металлургии и материаловедения. – 2014. – № 3. – С. 53–60.
38. Матросов, Ю.И. Влияние параметров ускоренного охлаждения на микроструктуру и сопротивление водородному растрескиванию (НІС) низколегированных трубных сталей / Ю.И. Матросов, А.А. Холодный, Е.С. Попов, С.В. Сосин, Г.Н. Коновалов // Металлург. – 2015. – № 1. – С. 68–75.

39. Cumino, G. Evaluation of high steel grade linepipes for sour service with special corrosion testing / G. Cumino and, R. Spelgatti // United States: – 1998.
40. Moore, J.J. Review of axial segregation in continuously cast steel / J.J. Moore // Continuous Casting – 1984. – vol 3 – P. 11-20.
41. Дубовенко, И.П. Физические основы кристаллизации непрерывноотливаемого слитка и пути дальнейшего развития непрерывной разливки / И.П. Дубовенко, Д.А. Дюдкин, Ю.П. Семенцов // Metallургические методы повышения качества стали. М.: Наука. – 1979. – С. 181-184.
42. Денисова, Т.В. Изменение структуры и свойств низкоуглеродистых микролегированных трубных сталей при модифицировании РЗМ/ Т.В. Денисова, М.А. Выбойщик, Т.В. Тетюева, А.В. Иоффе. // МиТОМ. – 2012. – №10. – С. 39-44.
43. Cappel, J. Centre Segregation, Soft Reduction and Oxide Cleanness for Large Diameter Line Pipe with Highest Demands on HI/ J. Cappel, G. Flender, R. Hoffken // Steel Research Int. – 2005. – №8. – P. 588-594.
44. Паршин, В.М. Снижение пораженности непрерывнолитых слябов сетчатыми трещинами при повышенной скорости разливки / В.М. Паршин, С.Д. Разумов, О.Е. Молчанов // Сталь. – 1986. – №10. – С. 33-34.
45. Малиночка, Я.Н., Есаулов В.С., Носоченко О.В. Причины образования осевых трещин в слябах, отливаемых на криволинейной МНЛЗ / Я.Н. Малиночка, В.С. Есаулов, О.В. Носоченко // Сталь. – 1984. – №1. – С. 32-33.
46. Поживанов, А.М. Улучшение качества непрерывнолитых слябов / А.М. Поживанов, А.П. Шаповалов, Ю.С. Климов // Сталь. – 1984. – №8. – С. 25-27.
47. Либерман, А.Л. Влияние скорости вытягивания на качество непрерывнолитых заготовок / А.Л. Либерман, В.И. Лебедев, Ю.Е. Кан // Сталь. – 1985. – №12. – С. 26-28.
48. Сокол, С.П. Прогнозирование дефектов при производстве литых заготовок / С.П. Сокол // ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет». – 2008. – №18-2.

49. Шукстуский, И.Б. Непрерывная разливка и прокатка заготовок разной толщины / И.Б. Шукстуский, Ю.В. Фурман // Совершенствование процессов непрерывной разливки стали. Киев. – 1985. – С. 77-79.
50. Ботников, С.А. Современный атлас дефектов непрерывнолитой заготовки и причины возникновения прорывов кристаллизующейся корочки металла / С.А. Ботников. – Волгоград, 2011. – 97 с.
51. Матросов, Ю.И. Влияние углерода и центральной сегрегационной неоднородности на H<sub>2</sub>S-стойкость непрерывнолитых трубных сталей. / Ю.И. Матросов, Н.В. Колясникова, А.О. Носоченко, И.В. Ганошенко // Сталь. – 2002. – №11.– С. 71-74.
52. Kobayashi, K. High strength sour grade line pipe X70 / K. Kobayashi// Pipe Technology. Conference Ostend, Belgium. – 2009 – № 22. – P. 43-48.
53. Varfolomeev, I. A. Control of Defects in a Continuously Cast Billet Based on Machine Learning and Data Analysis Methods/ I. A. Varfolomeev, E. V. Ershov, L. N. Vinogradova. //Automation and Remote Control. – 2018. – 79(8) – P. 1450–1457.
54. Taira, T. HIC and SSC Resistance of Line Pipes for Sour Gas Service/ T. Taira// NKK Technical Report . – 1981. – P. 100–120.
55. James G.W. New Alloy Design Perspectives for High Strength Steels / G.W. James // Third International Conference on Thermomechanical Processing of Steels. – 2008.
56. <http://www.td-automatika.ru/upload/iblock/836/>
57. <https://pingouin-stats.org/api.html>
58. Нейронные сети: полный курс, 2-е издание.: Пер. с англ. – М. :Издательский дом “Вильямс”, 2006. – 1104 с.
59. <https://keras.io/api/layers/regularizers/>
60. <https://www.asimovinstitute.org/neural-network-zoo/>
61. Funahashi, K. Approximation of dynamical systems by continuous time recurrent neural networks / K. Funahashi, Y. Nakamura // Neural Networks. – 1993. – 6(6). – P. 801–806.

62. McLaren, M. Application of convolutional neural networks to speaker recognition in noisy conditions / M. McLaren, Y. Lei// In INTERSPEECH. – 2014. – P. 686-690.
63. Zhang, Z. Complex-Valued Convolutional Neural Network and Its Application in Polarimetric SAR Image Classification / Z. Zhang, H. Wang, F. Xu and Y. Jin // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. – 2017. – vol. 55. – №12. – P. 7177-7188.
64. Jones, K. S. A statistical interpretation of term specificity and its application in retrieval/Jones K. S // Journal of Documentation. – 2017.
65. Qian Y. Very Deep Convolutional Neural Networks for Noise Robust Speech Recognition / M. Bi, T. Tan, K. Yu // IEEE/ACM Transactions on Audio, Speech, and Language Processing. – 2016. – vol. 24. – №12. – P. 7177-7188.
66. <https://habr.com/ru/post/348000/>
67. [https://github.com/matterport/Mask\\_RCNN](https://github.com/matterport/Mask_RCNN)
68. <https://keras.io/>
69. <http://deeplearning.net/software/theano/>
70. <https://pytorch.org/>
71. <https://www.kaggle.com/>
72. <https://www.kaggle.com/c/data-science-bowl-2018>
73. <https://keras.io/api/layers/activations/>
74. <https://www.adobe.com/ru/products/>
75. <https://numpy.org/>
76. Milletari F. V-Net: Fully Convolutional Neural Networks for Volumetric Medical Image Segmentation / F. Milletari, N. Navab and S. Ahmadi// 2016 Fourth International Conference on 3D Vision (3DV), Stanford. – 2016. – P. 565-571.
77. <https://keras.io/api/optimizers/>
78. <https://keras.io/api/losses/>