

Федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение  
высшего образования  
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»  
Политехнический институт  
Кафедра «Материаловедение и технологии обработки материалов»

УТВЕРЖДАЮ  
Заведующий кафедрой  
 В. И. Темных  
«28» 06 2021 г.

## БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

Направление: 22.03.01 Материаловедение и технологии материалов

Исследование механизмов разрушения конструкционных и  
инструментальных сталей

Научный руководитель

  
(подпись, дата)


А. М. Токмин

Выпускник

28.06.21   
(подпись, дата)

Е. Н. Вершинникова

Нормоконтролер

25.06.21.   
(подпись, дата)

Л. А. Свечникова


Красноярск 2021

Федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение  
высшего образования  
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Политехнический институт  
Кафедра «Материаловедение и технологии обработки материалов»

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой

 В. И. Темных

« 28 » 06 2021 г.

**ЗАДАНИЕ  
НА ВЫПУСКНУЮ КВАЛИФИКАЦИОННУЮ РАБОТУ**

Студент: Вершинникова Елизавета Николаевна.

Группа: МТ 17-01Б.

Направление (специальность): 22.03.01 Материаловедение и технологии обработки материалов.

Профиль: 22.03.01.07 Материаловедение и технологии материалов в машиностроении.

Тема ВКР: Исследование механизмов разрушения конструкционных и инструментальных сталей, утвержденная приказом по университету № 307/с от 15.01.2021

Исходные данные для ВКР: информационный обзор, исследования на кафедре.

Перечень разделов ВКР:

1 Обзор литературы по проблеме.

2 Методы исследования изломов.

3 Анализ эксплуатационных разрушений.

Перечень графического материала: Презентационный материал, раздаточный материал.

Руководитель  доцент, к. т. н.  
подпись, дата      должность, ученая степень

А. М. Токмин  
инициалы, фамилия

Задание принял к исполнению 28.06.21   
подпись, дата

Е. Н. Вершинникова  
инициалы, фамилия

## РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа по теме «Исследование механизмов разрушения конструкционных и инструментальных сталей» содержит 52 страниц, 26 рисунков, 12 таблиц и 13 источника литературы.

**Актуальность:** понимание механики разрушения конструкционных и инструментальных материалов, учитывая их условия эксплуатации, позволяет в значительной степени повысить надежность и долговечность изделий на стадии проектирования и выбора материалов.

**Новизна:** исследуемые причины разрушения материалов позволяют предотвратить их повторное появление в процессе эксплуатации.

**Цель работы:** определение механизмов и причин разрушения конструкционных и инструментальных сталей в конкретных условиях эксплуатации.

### **Задачи:**

- провести литературный обзор по проблеме;
- выполнить структурирование видов разрушения;
- осуществить анализ видов изломов на разрывных и ударных образцах;
- проанализировать особенности разрушения изделий в различных условиях эксплуатации.

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	6
1 Обзор литературы по проблеме.....	9
1.1 Основные понятия.....	9
1.2 Общие сведения об изломах.....	13
1.3 Образование микротрещин. Медленное докритическое подрас- тание.....	15
1.4 Макростроение изломов.....	17
1.5 Классификация разрушения .....	21
1.6 Описание наиболее часто встречающихся изломов.....	22
2 Методы исследования изломов.....	25
3 Анализ эксплуатационных разрушений.....	40
3.1 Калибратор КЛС-295,3.....	40
3.2 Приводной вал гидравлического насоса.....	46
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	51
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	52

## ВВЕДЕНИЕ

Разрушение деталей машин, приборов, элементов конструкций и сооружений происходит по ряду причин, а в большинстве случаев за счет совокупного воздействия нескольких факторов, это, прежде всего, относится к разрушениям, носящим катастрофические последствия.

Причины разрушения в процессе эксплуатации можно разделить на несколько групп: нарушение условий эксплуатации; несоответствие химического состава материала; несоответствие структурного состояния материала, вызванное нарушениями технологии в процессе производства или термической обработки; нарушение технологии в процессе изготовления изделий или конструкций и др.

Для определения причин разрушения проводятся комплексные исследования, зависящие от большого числа факторов и требуемых результатов. Для анализа причин разрушения часто используют такие, как: визуальные исследования; определение химического состава; макроанализ; микроанализ структуры и фрактотографические исследования; определение механических свойств.

Под разрушением понимают процесс зарождения и развития в металле трещин, приводящий к разделению его на части. Разрушение происходит в результате развития трещины, или слияния рядом расположенных трещин в одну магистральную трещину, по которой происходит полное разрушение [1]. Разрушение может быть хрупким и вязким. Механизм зарождения трещин одинаков как при хрупком, так и при вязком разрушении. Возникновение микротрещин чаще происходит благодаря скоплению движущихся дислокаций (пластической деформации) перед препятствием (границами зерен, межфазными границами и т. д.).

Важнейшая роль в установлении причины разрушения материалов (из конструкционных и инструментальных сталей) принадлежит анализу эксплуатационных изломов. Визуальный осмотр при малом увеличении

(макрофрактография) важен для идентификации областей, нуждающихся в дальнейшем исследовании при более высоком увеличении (микрофрактография).

Анализ изломов материалов позволяет получить важную информацию о нагружении образца или элемента конструкции. Это дает возможность устанавливать обратную связь между действительными и расчетными характеристиками материала, необходимую при диагностике аварийных случаев разрушения конструкций и выяснении причин, вызвавших поломку.

Для диагностики разрушения необходимо знать структуру и свойства материалов, строение изломов, механизмы разрушения, методы изучения изломов, методы механических испытаний, методы количественной оценки параметров разрушения, методики расчетов конструкций с трещиной на прочность. Изучение механизмов разрушений металлических материалов позволяет использовать полученные результаты для прогнозирования поведения материала в конкретных условиях эксплуатации.

Связь физических и металловедческих аспектов разрушения с критериями механики разрушения представляет особую актуальность и дает представление о природе процессов зарождения и распространения трещин при различных условиях нагружения, позволяет более корректно описывать поведение материала на различных стадиях разрушения.

Реальные случаи поломок приведены ниже.

Аргентина 1998 г. Продольная трещина длиной 4.8 м в нефтепроводе. Образовалась после одного из проходов скрепера, удаляющего парафин. Диаметр 356 мм, толщина стенки 6.35 мм. Срок эксплуатации двадцать лет.

Самолет Боинг 737–200. Авиационное происшествие, произошло в четверг 28 апреля 1988 г. на высоте около 8000 м после разрушения фюзеляжа в полете. Согласно отчёту, причинами аварии стали: коррозия металла, плохая эпоксидная связка частей фюзеляжа, усталость заклёпок, повреждения металла фюзеляжа

(из-за множества циклов «взлёт-посадка»; самолёт совершал только короткие рейсы).



# 1 Обзор литературы по проблеме

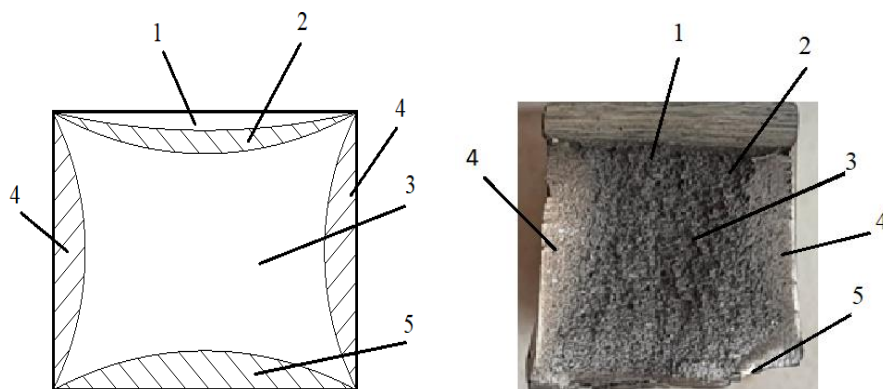
## 1.1 Основные понятия и определения

Разрушение является чрезвычайно сложным, многостадийным процессом и управляется различными факторами. Описание макро- и микрорельефов изломов осуществляется с применением стандартной терминологии, рассматриваемые далее.

**Излом** – это поверхность разрушения твердого тела.

Излом технологической пробы (ударного образца) представляет собой поверхность раздела, получаемую путем изгиба надрезанных образцов.

Строение излома показано на рисунке 1.



1 – очаг разрушения; 2 – зона зарождения трещины; 3 – зона распространения трещины; 4 – утяжка излома; 5 – зона долома

*a*

*б*

Рисунок 1 – Изображения изломов, сталь 4X5МФС: *a* – схема излома ударного образца; *б* – излом образца

**Макростроение (макрорельеф) излома** – поверхность разрушения, определяющая дефекты строения сплава, химическую и структурную неоднородность при визуальном рассмотрении или с небольшим увеличением.

**Зона излома** – участок поверхности разрушения, характеризующийся строением, отличным от строения других частей излома.

**Очаг разрушения** – место зарождения разрушения.

**Рубцы** – линии на изломе, представляющие собой следы слияния отдельных, близко расположенных соседних трещин, распространяющихся в одном направлении (как правило, от очага разрушения).

**Зона долома** – конечная стадия разрушения.

**Магистральная трещина** – трещина, приводящая к окончательному разрушению.

**Ступенька** – след слияния двух трещин, распространяющихся в различных направлениях, при образовании магистральной.

**Расслоение** – несплошности, образующиеся вдоль границ структурных элементов, ориентированные по направлению деформации.

**Усталостные линии** – линии на усталостном изломе, представляющие собой расходящиеся от очага разрушения отметки фронта трещины на определенной стадии ее развития.

**Микростроение (микрорельеф) излома** – поверхность разрушения, используемая для идентификации излома, методами световой, электронной микроскопии и др. при увеличении более  $\times 50$ .

**Фасетка** – элемент поверхности разрушения с четкими границами, лежащий в одной или близких плоскостях.

**Фасетка скола** – фасетка внутризеренного хрупкого разрушения, образующаяся в результате разрушения по определенным кристаллографическим плоскостям (плоскостям скола), в пределах которой разрушение развивается в одном направлении.

**Фасетка квазискола** – относительно ровный участок разрушения, развивающийся преимущественно от центральной части фасетки к периферии, наряду с признаками хрупкого разрушения имеет признаки пластической деформации (гребни).

**Фасетка межзеренная (межсубзеренная)** – фасетка в виде многоугольника, образующаяся при разрушении по одной грани зерна (субзерна).

**Ямки** – микроуглубления на поверхности разрушения, образующиеся в процессе пластического течения металла.

**Ямка волокнисто-полосчатого излома** – микроуглубление на поверхности разрушения, возникшее в результате образования и слияния микропустот около вытянутых структурных неоднородностей (неметаллических включений и ликвационных зон).

**Сотовый рельеф** – микрорельеф поверхности разрушения в виде мелких плоских ямок. Свидетельствует о малой доле локальной пластической деформации при разрушении.

**Гребень** – вытянутый участок, возвышающийся над поверхностью разрушения, образовавшийся в результате пластической деформации и разрушения перемычек между другими элементами излома.

**Ступенька** – элемент излома прямолинейной или изогнутой формы, образующийся в результате скола вдоль границ двойников и при соединении двух микроповерхностей разрушения, расположенных на разных уровнях.

**Ручьистый узор** – элемент строения поверхности фасеток скола, представляющий собой систему сходящихся ступенек, образующуюся в плоскости скола в результате разрушения перемычек между хрупкими микротрещинами, распространяющимися по параллельным кристаллографическим плоскостям. Направление слияния ступенек скола в ручьистом узоре соответствует направлению распространения трещины.

Частный случай ручьистого узора – веерообразный узор. Возникает, если ступеньки скола сходятся в одной точке в пределах фасетки.

**Язычок** – элемент строения поверхности фасетки скола и квазискола треугольной или трапециевидной формы, образующийся в результате локального разрушения вдоль поверхности раздела. Язычку, находящемуся на одной половине излома, соответствует углубление на ответной половине излома.

**Усталостные бороздки** – элемент микрорельефа усталостного излома в виде повторяющихся удлиненных впадин и выступов, не пересекающихся между собой и ориентированных перпендикулярно локальному направлению развития трещины на данном микроучастке.

**Плато** – плоские участки, вытянутые в основном в направлении локального распространения трещины, на которых располагаются усталостные бороздки.

**Траковые следы** – образуется в результате соприкосновения противоположных поверхностей разрушения, возможно, связанных с влиянием включений, выделений или твердых составляющих.

**Зона вытягивания** – сглаженный участок микрорельефа, отвечающий зоне стягивания трещины при наличии пластического затупления ее вершины при всех видах нагружения.

**Механизм разрушения** – механизм распространения трещины, оцениваемый на микроуровне.

**Скол** – механизм хрупкого разрушения, возникающий, путем разделения (раскалывания) металла по определенным кристаллографическим плоскостям (внутризеренный скол) или границам зерен (межзеренный скол), а также по границам субструктурных элементов, межфазным границам, с образованием микрорельефа.

**Квазискол** – механизм внутризеренного квазихрупкого разрушения, характеризующийся распространением трещины преимущественно путем разделения металла по плоскостям, не совпадающим с кристаллографическими плоскостями зерен.

**Слияние микропустот** – механизм внутризеренного или межзеренного вязкого разрушения путем разделения металла вследствие слияния микропустот, зарождение и рост которых происходит в процессе пластического течения металла.

**Расслоение** – механизм разрушения металла вследствие образования несплошностей вдоль границ структурных элементов.

**Усталостный механизм** – механизм разрушения под воздействием циклического нагружения, часто связанный с образованием при продвижении трещины усталостных бороздок путем микросдвига и микроотрыва.

Усталостное разрушение может происходить путем образования фасеток межзеренного и внутризеренного разрушения.

**Смешанный излом** – поверхность разрушения, представляющая собой сочетание двух или более видов изломов, различающихся по механизму разрушения.

**Внутризеренный излом** – излом, образующийся при разрушении по телу зерна.

**Межзеренный (зернистый) излом** – излом, образующийся при разрушении по границам зерен (межсубзеренный – по границам субзерен).

**Дефект в изломе** – дефект строения металла, проявляющийся на поверхности разрушения [3].

## 1.2 Общие сведения об изломах

Характер разрушения, после растяжения детали, различают по внешнему виду излома:

– **хрупкий** (светлый) излом, поверхность разрушения характеризуется наличием блестящих плоских участков;

– **вязкий** (матовый) излом поверхность разрушения содержит весьма мелкие уступы – волокна, образующиеся при пластической деформации зерен в процессе разрушения;

– **смешанный**. На поверхности излома возникают участки металла хрупкого и вязкого разрушения [2].

Изломы обычно имеют смешанный характер.

В таблице 1 представлены отличительные характеристики изломов.

Таблица 1 – Отличительные характеристики изломов

Отличительные признаки	Хрупкое тело	Пластичное тело
Кристаллографический характер разрушения	Скол	Срез
Внешний вид излома	Кристаллический	Волокнистый
Скорость распространения трещины	Высокая (неустойчивая трещина)	Низкая (устойчивая трещина)

Вид разрушения зависит от многих факторов: состава металла, его структурного состояния, условий нагружения и температуры. Вид разрушения вязкий или хрупкий определяют в результате изучения изломов.

**Хрупкое разрушение** происходит внезапно при однократном приложении силы или под действием повторных ударных сил при малой степени местной пластической деформации.

Хрупкое разрушение характеризуется быстрым ростом трещины, не требующее повышения действующих напряжений. Ему достаточно запасенной упругой энергии.

Излом имеет ярко выраженное кристаллическое строение у недеформируемых материалов и гладкое от сдвига у мягких материалов. Кромки изломов гладкие, ровные без сколов или с небольшими сколами. Скол на хрупком изломе указывает место долома, то есть окончание разрушения. Участок без скола (с меньшим сколом) обычно примыкает к фокусу излома.

Хрупкие разрушения в большинстве случаев начинают развиваться в зонах концентрации напряжений, в местах приварки элементов жёсткости, пересечения сварных швов, у отверстий и галтелей, в зонах резкого изменения толщины.

В отличие от вязкого разрушения хрупкое разрушение распространяется внутри отдельных зерен вдоль плоскости с наиболее плотной упаковкой атомов, называемой плоскостью скола.

**Вязкое разрушение** характеризуется не только предшествующей ему большой пластической деформацией, но и медленным развитием трещины, при чем для роста трещины необходим подвод энергии извне.

Излом имеет волокнистое строение и, вследствие сильной деформации зёрен, не имеет кристаллического блеска. Неровные участки рассеивают свет и поверхность излома кажется матовой. Причиной образования является воздействие значительных кратковременных сил, возникающих при заклинивании механизма или нарушениях технологического режима. Вязкое разрушение имеет место и при длительном действии сил, вызывающих напряжения, превосходящие предел текучести материала детали. Признаком вязкого излома является наличие боковых скосов по его краю.

**Смешанное разрушение** происходит в условиях плоской деформации при низких температурах, высоких скоростях нагружения. Такой вид разрушения характерен для материалов с ГЦК решеткой.

Полученные изломы имеют матовую и «бархатистую» поверхность; они ровные, без губ среза или имеют небольшие губы среза и небольшую шероховатость; металлический блеск отсутствует.

При микрофрактографическом исследовании таких изломов можно обнаружить практически все виды микрорельефа: ямочный, квазискол, межзеренное хрупкое разрушение.

### **1.3 Образование микротрещин. Медленное докритическое подрастание**

Процесс образования и распространения трещины на начальном этапе разрушения рассматривается с позиции движения дислоцированного атома, вакансий и дислокаций.

Под действием напряжений и термических флуктуаций в вершине трещины атом вылетает в междоузлие, становясь дислоцированным и вместо

атомов в вершине образуются пустые места, трещина подрастает. Движение дислоцированного атома 1 км/ч и вакансии 10 км/ч.

Почти аналогично растут трещины при вакансионном механизме, но на движение вакансий требуется меньше энергии. Докритическое подрастание трещина неразрывно связано с пластической деформацией за счет повышения плотности дислокаций, где  $\rho = 10^{10} \text{ см}^{-2}$ .

**Докритический период.** По мере подрастания докритической трещины в окружающем металле протекает пластическая деформация, ведущая к упрочнению металла. Особенно активна она в вершине медленно ползущей трещины.

Поток энергии из напряженного массива конструкции переходит к трещине и обменивается на процессы необратимой деформации. Вокруг трещины объем металла за счет пластической деформации упрочняется до предела.

Она движется с ограниченным числом дислокаций одного знака. Кристаллиты (зерна) материала пришли в движение. Они разворачиваются к вершине трещины, подставляя свои уязвимые кристаллографические направления. Количество мельчайших трещин в итоге становится огромным, что магистральная присоединяет их к себе, становясь все больше и больше. Начиная с этого момента, вся поступающая из напряженной конструкции упругая энергия доходит до трещины. Основной поток энергии идет на разрыв межатомных связей в вершине трещины.

Теперь процесс становится либо подлинно хрупким, либо квазихрупким.

Ускорение трещины достигает  $10^8 \text{ м/с}^2$ , за тысячную долю секунды трещина способна развить скорость –  $V = 3 \text{ км/с}$ .

На последнем этапе закритического разрушения главным в механике разрушения является надструктурный характер. Быстрая трещина сечет все структурные составляющие (феррит, цементит, перлит), не замечая этого. Далее, когда трещина приобретает большую скорость материалы становятся хрупкими.

Таким образом, в механике структура материала уже не так важна. Важнее механические свойства материала – прочность, вязкость, модуль упругости и др.



Трещина может поддерживать  $V$  неограниченно долго. Было показано, что при  $V=0,6$  скорости поперечных упругих волн, наступает ветвление трещины и скорость ее распространения 1600–2000 м/с, при этом происходит ее разделение на два или три. Каждая из возникших способна распространяться дальше и также ветвиться. Однако, после каждого ветвления трещина теряет свою скорость, иной раз до 0. Ответвления могут разворачиваться на  $90^\circ$  и даже в противоположном направлении. Такая картина часто наблюдается при взрывном нагружении.

При докритическом подрастании, как правило главной является трещина наибольшая по размерам и расположенная перпендикулярно к направлению растягивающих напряжений.

Разрушение есть следствие упругой и пластической деформации [10].

#### **1.4 Макростроение изломов**

По ориентировки микроскопической поверхности различают разрушение отрывом и срезом: при отрыве эта поверхность перпендикулярна направлению наибольшего растягивающего напряжения, а при срезе наклонена к нему под углом примерно  $45^\circ$ . Отрыв происходит под действием нормальных напряжений и обычно наблюдается при хрупком разрушении, а срез происходит под действием касательных напряжений и характерен для вязкого разрушения. Но хрупкое разрушение может протекать под действием касательных напряжений.

Оба эти разрушения – вязкое и хрупкое – включают в себя две стадии: зарождение зародышевой трещины и ее распространение. По механизму зарождения трещин они не различаются. Качественное различие между ними связано с энергоемкостью и скоростью распространения трещин. При хрупком разрушении эта скорость очень велика и достигает 0.4–0.5 от скорости звука [5].

Энергоемкость вязкого разрушения значительно больше потому, что при развитии вязкой трещины пластическая деформация идет не только вблизи ее

вершины, но и по значительному объему детали (образца). В результате работа, необходимая для продвижения трещины, здесь значительно больше, чем при развитии хрупкой трещины.

Вторая стадия разрушения является наиболее важной, так как именно она в основном определяет сопротивление материала разрушению.

По Я. Б. Фридману процесс разрушения на стадии развития трещины состоит из четырех этапов: инкубационного, на котором скорость распространения трещины постепенно возрастает; периода торможения, характеризующегося замедлением роста трещины; стационарного, когда скорость развития трещины постоянна; ускоренного, иногда лавинообразного, периода трещины со все возрастающей скоростью вплоть до полного разрушения тела. Первые три периода соответствуют так называемой *докритической стадии* развития трещины, когда процесс разрушения еще можно контролировать, а четвертый – *закритическая стадия* распространения трещины, когда окончательное разрушение становится уже трудно управляемым и часто необратимым.

Исследование поверхности разрушения обычно начинают с визуального осмотра строения излома или при небольших (до 30 крат) увеличениях. В этом случае наблюдаемый рельеф изломов называют макрорельефом, а его строение – макростроением. Это исследование позволяет выявить общий характер строения излома, достаточно крупные дефекты материала и т. п.

Изучение макростроения излома позволяет выделить очаг разрушения, зоны зарождения и развития трещины. Анализ размеров зон и участков на поверхности изломов дает информацию о поведении материала в условиях нагружения. Наблюдение ориентации излома по отношению к направлению нагружения позволяет определить характер силового воздействия (сдвиг, отрыв и т. д.).

В большинстве изломов основная плоскость перпендикулярна максимальным растягивающим напряжениям. Напряжения могут быть нормальные (результат - хрупкие изломы) и касательные (вязкие изломы). На рисунке 2 схематически изображены направления действия нормальных и касательных

напряжений в любой точке на поверхности или внутри цилиндра при одноосном растяжении.

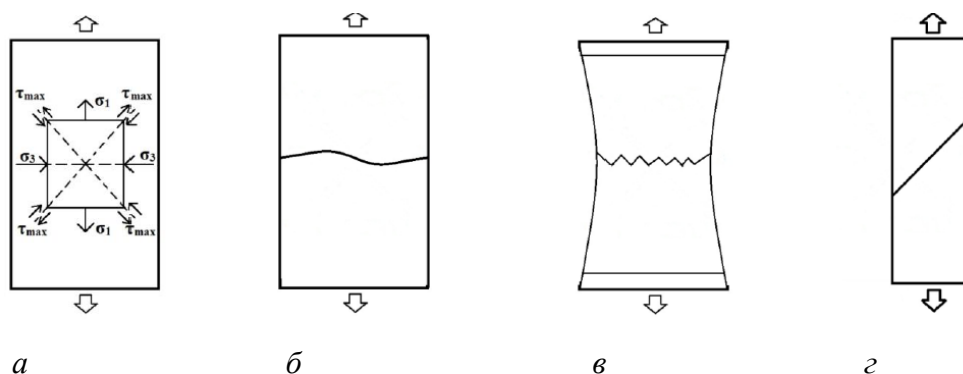


Рисунок 2 – Направление действия напряжений при одноосном растяжении:  
*a* – распределение напряжений внутри образца; *б* – хрупкий образец; *в* – вязкий образец чашевидного типа; *г* – вязкий образец косоугольного излома

Растягивающие напряжения  $\sigma_1$  – действуют в продольном направлении, а сжимающие напряжения  $\sigma_3$  – в поперечном. Касательные напряжения  $\tau_{max}$  направлены под углом  $45^\circ$  к оси образца (рис. 2, *a*).

В хрупких материалах излом при однократном нагружении перпендикулярен к направлению растяжения, при этом разрушение происходит с малой пластической деформацией. Распределение упругих напряжений при одноосном растяжении в отсутствие концентраторов равномерно по сечению, поэтому разрушение может начаться в любой точке внутри объема образца с высокими напряжениями (рис. 2, *б*).

В вязких материалах касательные напряжения вызывают значительную пластическую деформацию (удлинение и образование шейки), предшествующую разрушению. Разрушение при растяжении начинается вблизи оси образца и распространяется по направлению к поверхности, заканчиваясь конической зоной среза, обычно под углом в  $45^\circ$  к оси (рис. 2, *в*, *г*).

На рисунке 3 схематически изображены направления действия нормальных и касательных напряжений при одноосном сжатии. При сжатии цилиндра в

продольном направлении действуют сжимающие напряжения  $\sigma_3$ , а в поперечном – растягивающие напряжения  $\sigma_1$ . Касательные напряжения  $\tau_{max}$  действуют под углом  $45^\circ$  к оси образца, как при одноосном растяжении.

Хрупкий материал при одноосном сжатии без изгиба будет ломаться перпендикулярно направлению действия максимальных растягивающих напряжений. Так как растягивающие напряжения действуют в поперечном направлении, хрупкое разрушение происходит в продольном направлении, т. е. параллельно оси образца (рис. 3, б).

В вязком материале касательные напряжения вызывают значительную пластическую деформацию и обычно не приводят к разрушению. Образец укорачивается и становится бочкообразным под совместным влиянием касательных напряжений и сил трения, возникающих при сжатии на торцах образца (рис. 3, в).

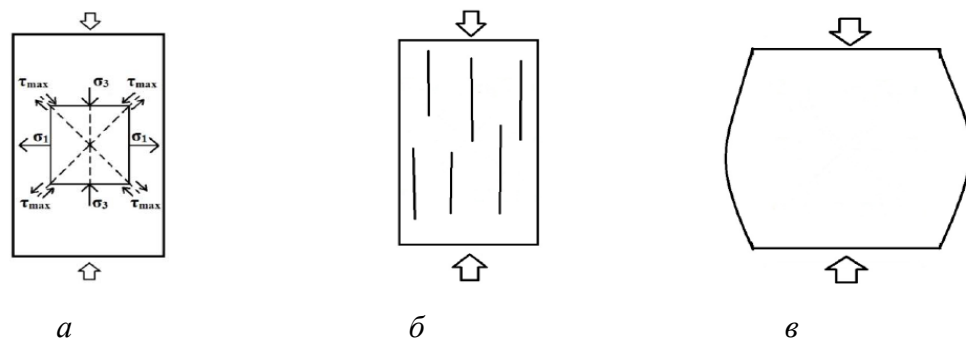


Рисунок 3 – Направление действия напряжений при сжатии: а – распределение напряжений внутри образца; б – хрупкий образец; в – вязкий образец бочкообразного типа

На рисунке 4 схематически изображены направления действия напряжений при кручении. При данном испытании растягивающие и сжимающие напряжения действуют под углом  $45^\circ$  к оси образца и взаимно перпендикулярны, а касательные напряжения действуют в продольном и поперечном направлениях.

Хрупкий материал при чистом кручении разрушается по плоскости, перпендикулярной к растягивающим напряжениям. Характерным для разрушения такого материала при этом типе нагружения является спиральный излом (рис. 4, б).

Изломы, образовавшиеся при кручении в случае вязкого материала, обычно пересекают цилиндр по поперечной плоскости действия максимальных касательных напряжений и имеют явно выраженный воронкообразный вид. При этом касательные напряжения также вызывают значительную пластическую деформацию, но часто не столь наглядно (рис. 4, в).

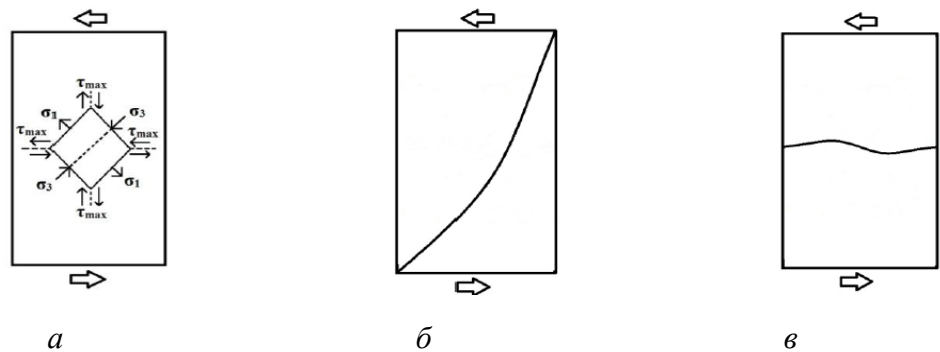


Рисунок 4 – Направление действия напряжений при кручении: а – распределение напряжений внутри образца; б – хрупкий образец; в – вязкий образец

## 1.5 Классификация разрушения

В таблице 2 приведена классификация основных видов изломов их характерные признаки и особенности строения [4].

Таблица 2 – Классификация изломов по основным признакам

Механизм разрушения		Микромеханизм разрушения	
Хрупкий Вязкий	Смешанный	Скол Квазискол	Слияние микропустот
Макрогеометрия		Энергия разрушения	
Однородный	Неоднородный: – излом звездочкой – чашечный излом – шевронный излом	Хрупкий излом: – малая работа разрушения Вязкий: – высокая работа разрушения	Смешанный: – средняя работа разрушения
Морфология поверхности разрушения		Микрорельеф	
Кристаллический: – фарфоровидный – бархатистый Дендридный Камневидный Нафталинистый	Волокнистый: – волокнисто- чешуйчатый – волокнисто- полосчатый	Хрупкий: – фасетки внутри межзеренного скола – ступеньки скола – ручьиный узор – язычки	Вязкий: – ямки Смешанный: – ямки и фасетки скола
Характер силового воздействия		Цвет	Блеск
Длительного статического нагружения: – изломы замедленного разрушения – изломы ползучести – изломы коррозионного растрескивания Изломы кратковременного однократного статического и динамического нагружения	Изломы циклического нагружения (усталостные): – многоцикловые усталостные – малоцикловые – термоусталостные – коррозионно- усталостные	Светлый Серебристый Серый Светло-серый Темно-серый Черный	Блестящий Матовый Матово- бархатистый

Анализ изломов с применением классификации выполнен в п. 3.

## 1.6 Описание наиболее часто встречающихся изломов

Изломы *циклического нагружения* (усталостные изломы) возникают в результате действия нагрузки, периодически и многократно изменяющейся в

процессе нагружения и разрушения (в широком диапазоне частот и коэффициентов асимметрии цикла). Различают многоцикловые и малоцикловые изломы.

**Многоцикловые усталостные изломы.** Усталостное повреждение или разрушение происходит в основном при упругом деформировании.

Типично усталостный излом характеризуется, как правило, наличием на поверхности разрушения нескольких зон:

- зоны с более ровной и блестящей («притертой») поверхностью, которая включает в себя очаг разрушения и зону стабильного развития трещины;
- зоны долома, как правило, характеризующейся значительной (по сравнению с «притертой» зоной) шероховатостью;
- переходной зоны (зоны ускоренного по сравнению с «притертой» зоной развития трещины), которую не всегда удастся выделить.

При рассмотрении на микроуровне выявляются усталостные бороздки, плато, траковые следы, межзеренные фасетки, а также все элементы микрорельефа, характерные для разрушения при статическом нагружении.

**Малоцикловые усталостные изломы.** Усталостное повреждение или разрушение происходит при упругопластическом деформировании.

Для строения излома характерно:

- более шероховатая поверхность разрушения;
- отсутствие четкой границы между зонами;
- изменение соотношения размеров зон.

В частности, на изломе увеличивается доля рельефа, имеющего признаки статического разрушения.

**Коррозионно-усталостные изломы.** Усталостное повреждение или разрушение происходит при воздействии коррозионной среды.

К особенностям строения излома относятся:

- большое количество очагов разрушения;
- наличие продуктов коррозии на поверхности разрушения;
- большое количество трещин.

При рассмотрении на микроуровне обнаруживаются усталостные бороздки, лежащие на фасетках скола и межзеренных фасетках.

**Термоусталостные изломы.** Образуются под действием переменных напряжений, возникающих при температурных изменениях тела.

Характерные признаки:

- не наблюдается зон с резко очерченными границами;
- множественность очагов разрушения;
- интенсивное окисление поверхности разрушения [6].

*Изломы кратковременного однократного статического и динамического нагружения* возникают под действием нагрузки без скачков, при этом периода постоянной нагрузки нет или он мал относительно периода нагружения.



## 2 Методы исследования

На данный момент для исследования изломов применяют как традиционные методы макро- и микроанализа, так и методы физического металловедения с использованием электронно-вакуумного оборудования. Значительное развитие получили методы количественного автоматического исследования изломов с использованием компьютеров. Эти исследования позволяют дать сравнительную оценку характера разрушения и вида излома, выяснить причины и природу отклонения вида излома от оптимального, определить способы предупреждения этих отклонений.

Для изучения поверхностей разрушения и зон материала, непосредственно примыкающих к излому, были применены различные методы.

Для исследования образцов под микроскопом необходимо подготовить шлиф. На шлифовальном круге проводится обработка плоскости образца после чего шлифование на наждачной бумаге с разным размером абразива (от 800 до 2500). Конечной операцией является полировка, которая выполняется на алмазной пасте высокой дисперсности. Для выявления структуры необходимо травление шлифа. Для этого применялся травитель, состоящий из 3 % раствора азотной кислоты ( $\text{HNO}_3$ ) в спирте ( $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ ). Для нержавеющей стали использовался травитель состоящий из 8% серной кислоты ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) и 4% соляной кислоты ( $\text{HCl}$ ).

Макроструктура образцов исследовалась с использованием визуального анализа и на оптическом бинокулярном микроскопе МБС.

Анализ микроструктуры проводился на цифровом оптическом микроскопе *Carl Zeiss* с целью определения соответствия материала разрушенной детали при разных увеличениях. Для более детального изучения поверхности разрушения проводились фрактографические исследования на электронном сканирующем микроскопе *Hitachi TM 1000*. Исследование микроструктуры и выполнение микрорентгеноспектрального анализа выполнялись на растровом электронном микроскопе *JEOL JSM 7001F*

Измерение твердости проведено твердомером Бринелля модель ТБ50-04 и методом Роквелла модель ТР5014. Микротвердость измерялась на ПМТ-3.

Для определения ударной вязкости использовался маятниковый копер КМ-300.

Химический анализ проводился с помощью спектрального анализатора *Olympus Delta Element* (в ЭВРЗ)

Многообразие задач, которые могут быть поставлены при изучении изломов, исключает возможность единого подхода и единой методики их исследования. Метод исследования должен быть выбран с учетом поставленной задачи и характера изучаемого объекта.

### 3. Изучение поверхности разрушений конструкционных и инструментальных сталей

Для исследования механизмов разрушения, происходящих в реальных условиях, были выбраны конструкционные материалы и инструментальные стали (табл. 3).

Таблица 3 – Материалы для исследования

Конструкционные	Чугуны	Инструментальные
30X13	ЧВГ45	4X5B2ФС
38ХГМ		4X5МФС
40ХН		

Для исследования был принят образец для определения ударной вязкости из конструкционной стали 40ХН. После стандартной термической операции, включающей закалку и отпуск, твердость составляла НВ 302. KCV составляет 0,5 МДж/м.<sup>2</sup> После разрушения образца на маятниковом копре были выполнены комплексные исследования поверхности разрушения.

Для определения марки стали был выполнен химический анализ. Сталь, из которой изготовлен переводник, соответствует марке 40ХН ГОСТ 4543-71 (табл. 4).

Таблица 4 – Химический анализ

Наименование	C	Mn	Si	P	S	Cr	Mo	Ni
Переводник	0,416	0,588	0,257	0,012	0,006	0,707	0,044	1,40

Механические свойства стали оказывают определяющее влияние на циклическую прочность и долговечность изделий. Невысокие показатели пластичности и ударной вязкости сказываются, в первую очередь на скорости распространения трещины усталости, а наличие концентраторов напряжений, в виде

резьбовых канавок, технологических и металлургических дефектов способствует образованию трещин усталости.

Механические свойства фрагмента переводника приведены в таблице 5.

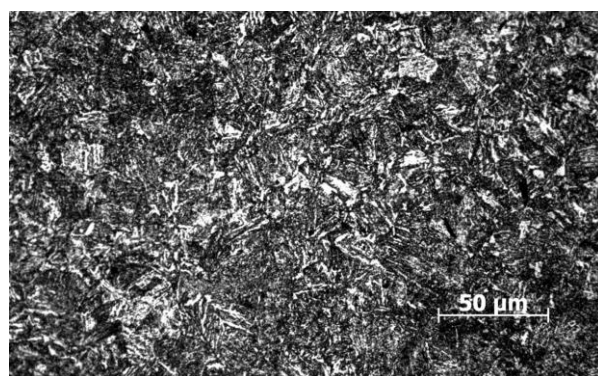
Таблица 5 – Механические свойства

Характеристики	Временное сопротивление, $\sigma_b$ , МПа	Предел Течучести, $\sigma_t$ , МПа	Относительное удлинение, $\delta$ , %	Твердость, НВ	Ударная вязкость, КСV, МДж/м <sup>2</sup> при 20° С
Образец	938	844	4,4	302	0,5

Визуальный анализ образца (рис. 5, *a*) указывает на вязко-хрупкий характер разрушения. Отчетливо различимы: очаг разрушения под надрезом (обозначено цифрой 1); зона стабильного роста трещины (занимающая 50 % от площади излома, обозначено цифрой 2); зона ускоренного развития трещин (занимающая 45 % от площади излома, обозначено цифрой 3); зона долома (занимающая 5 % от площади излома, обозначено цифрой 4). На этом же рисунке под номером два присутствуют фасетки с зеркальным блеском. В периферийной части образуются губы среза.



*a*



*б*

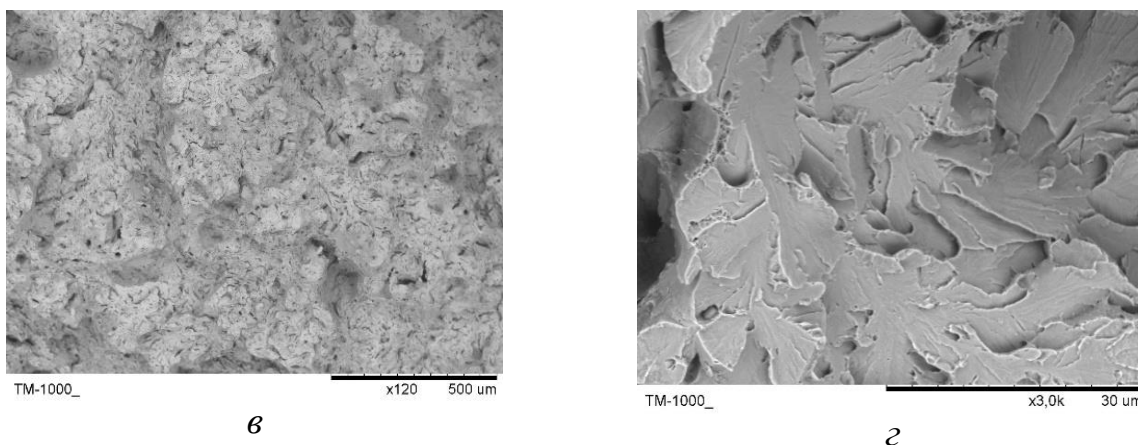


Рисунок 5 – Поверхность разрушения стали 40ХН, лист 1:  
*a* – макростроение,  $\times 4,5$  (1 – очаг разрушения; 2 – стабильный рост трещины; 3 – ускоренное развитие трещины; 4 – зона долома);  
*б* – сорбитная структура с наличием неоднородности;  
*в-г* – фрактограмма

Микроструктура имеет неоднородное строение, соответствующее сорбиту (рис. 5, *б*). Такая структура сформировалась в результате охлаждения от температур выше критических. Такая термическая обработка соответствует нормализации стали. Имеется значительная неоднородность микроструктуры в темных и светлых участках полосчатой структуры. Это связано с химической неоднородностью, которая возникла в процессе кристаллизации и дальнейшей пластической деформации стали.

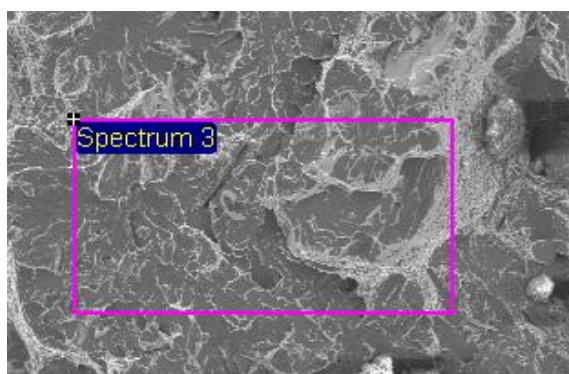


Рисунок 6 – Электронно-микроскопическое изображение поверхности образца стали 40ХН, site 2,  $\times 400$

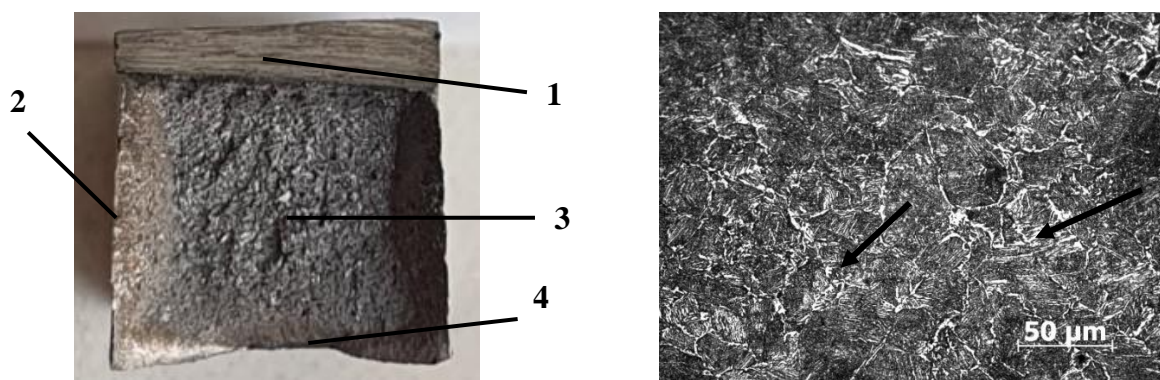
Фрактографические исследования на электронном сканирующем микроскопе подтверждает, что отдельные участки разрушения имеют хрупкий вид (рис. 5, в-г).

Микрорентгеноспектральный анализ указывает на соответствие химического состава исследуемого образца данным, полученным на спектральном анализаторе (рис. 6), (табл. 6).

Таблица 6 – элементный состав поверхности образца стали 40ХН, мас. %

Spectrum	C	Fe	Ni	Total
Spectrum 3	1,48	96,98	1,54	100

Для следующего изучения был применен образец для определения ударной вязкости из стали 40ХНМА. Разрушение носит смешанный характер (рис. 7, а). Об этом свидетельствуют утяжки по бокам излома, характерные для вязкого разрушения, отмеченные цифрой 2 (занимающая 30 % от площади излома) и зона распространения трещины, характерно для хрупкого разрушения, обозначено цифрой 3 (занимающая 65 % от площади). Зона долома всего 5 % от площади излома (отмечена цифрой 4).



1 – зона зарождения трещины; 2 – утяжки; 3 – зона распространения трещины;  
4 – зона долома

*a*

*б*

Рисунок 7 – Поверхность разрушения и микроструктура стали 40ХНМА:

*a* – макроструктура излома,  $\times 4,5$ ; *б* – микроструктура

Сталь, из которой изготовлена труба, соответствует марке 40ХНМА ГОСТ 4543-71 (табл. 7)

Таблица 7 – Химический состав стали

Наименование	C	Mn	Si	P	S	Cr	Mo	Ni
УБТС	0,372	0,682	0,285	0,012	0,008	0,873	0,157	1,320

Для определения соответствия механических свойств стали были выявлены основные механические свойства (табл. 8).

Таблица 8 – Механические свойства

Характеристики	Временное сопротивление, $\sigma_b$ , МПа	Предел текучести, $\sigma_t$ , МПа	Относительное удлинение, $\delta$ , %	Твердость, НВ	Ударная вязкость, КСV, МДж/м <sup>2</sup> при 20 °С
Данные паспорта	950	820	15	285-321	0,7-0,758
Образец	856	812,5	6	277	0,82

Проанализировав данные таблицы 8 было выявлено, что механические свойства имеют меньшие значения по сравнению с требуемыми. Низкие показатели предела прочности (временное сопротивление), предела текучести и твердости способствуют более быстрому образованию трещин усталости. Небольшие значения пластичности (относительное удлинение и ударная вязкость) снижают сопротивление распространению трещины.

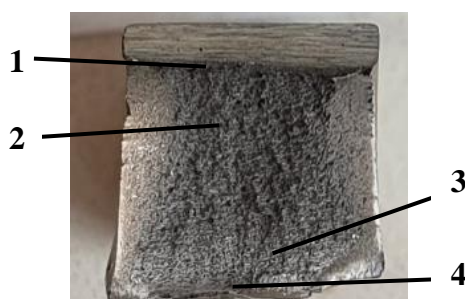
Для более детального анализа были проведены металлографические исследования. Следует отметить, что на образце имеется видманштеттова структура снижающая пластичность металла (указано стрелкой, рис. 7, б).

Последующий образец для исследования из конструкционной стали 38ХГМ. Визуальный осмотр излома имеет следующий вид: очаг разрушения под надрезом (обозначено 1); зона стабильного роста трещины (занимающая 70 % от площади излома, обозначено 2); зона ускоренного развития трещин

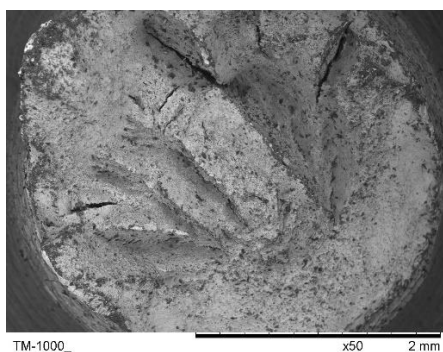


(занимающая 25 % от площади излома, обозначено 3); зона долома (занимающая 5 % от площади излома, обозначено 4) (рис. 8, *а*).

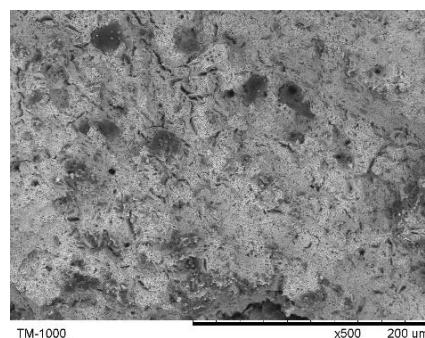
При небольшом увеличении отчетливо видны радиальные рубцы (рис. 8, *б*). При больших увеличениях получаемое изображение более детализировано (рис. 8, *в*). Такие рубцы образуются при переходе трещины от медленного роста к быстрому или нестабильному ее распространению. Также можно наблюдать продольные расщепления. Они могут быть вызваны высокими нормальными растягивающими напряжениями в результате разделения радиальных поверхностей вдоль плоскости максимального сдвига.



*а*



*б*



*в*

Рисунок 8 – Исследуемая поверхность стали 38ХГМ:

*а* – макроструктура,  $\times 3,5$ ; *б-в* – фрактограммы (разрывной образец). Имеются радиальные рубцы

Для исследования свойств отливки из стали 30Х13 полученной методом ЭКЛ из нее были изготовлены образцы, которые были подвергнуты стандартной термической обработке на твердость HRC 45. Поверхность образца указывает



на преимущественно хрупкий характер разрушения (рис. 9). Визуально излом имеет дендридное строение. Он представляет собой неоднородную поверхность разрушения, характеризующуюся столбчатыми кристаллами с четко выраженным рельефом элементов дендритного строения металла.

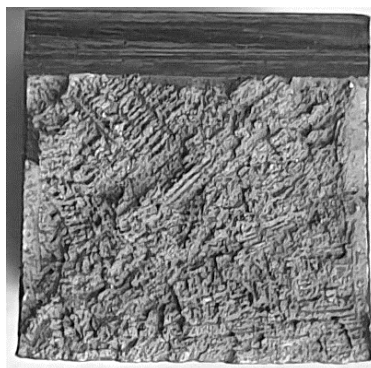
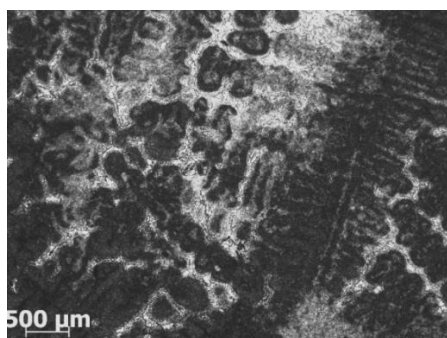
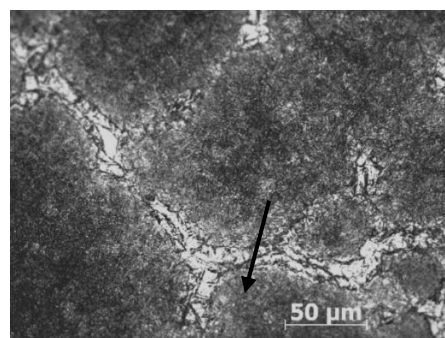


Рисунок 9 – Поверхность разрушения ударного образца (с ярко выраженным дендридным строением),  $\times 4,5$

Можно наблюдать, что отливка имеет характерное дендридное строение. Исследование при большем увеличении указывает на наличие междендридных участков имеющих меньшую травимось, вызванную ликвацией легирующих элементов (рис. 10, *a – б*). Это указывает на неоднородность химического состава.



*a*



*б*

Рисунок 10 – Микроструктура отливки из стали 30X13: *a* – дендридная структура; *б* – междендридные участки (указано стрелкой)

Дендритный излом образуется в следствии ликвации, вызванной наличием легирующих элементов с небольшим коэффициентом распределения. [9].

Для следующего исследования был принят образец для определения ударной вязкости из инструментальной стали 4Х5МФС который был изготовлен из деформированной заготовки. После стандартной термической операции, включающей закалку и отпуск, твердость составляла HRC 46. KCU составляет 0,25 МДж/м.<sup>2</sup> После разрушения образца на маятниковом копре были выполнены комплексные исследования поверхности разрушения.

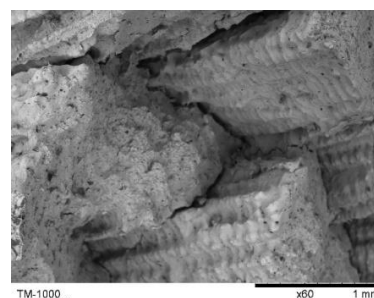
Визуальный анализ поверхности разрушения указывает, что излом имеет древовидный вид (рис. 11, а). Поверхность разрушения с грубоволокнистым слоистым строением, вызванная многочисленными микрорасслоениями в металле характерна для деформированной стали, при нарушении технологии горячей пластической деформации. Наиболее отчетливо проявляется на поперечных пробах и, как правило, занимает большую площадь поверхности разрушения.

При древовидном изломе снижаются пластичность и ударная вязкость, причем особенно значительно в поперечном направлении деформированного металла.

Образование рельефных участков связано с неоднородностью структуры металлов и сплавов (рис. 11, б) [7].



*а*

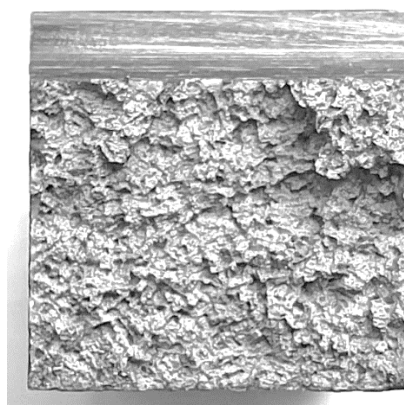


*б*

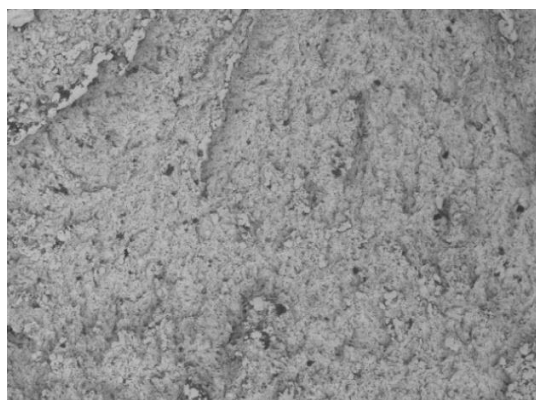
Рисунок 11 – Исследуемая поверхность стали 4Х5МФС: *а* – макроструктура,  $\times 4$ ;  
*б* – фрактограмма (микрорасслоения)

Следующий образец из инструментальной стали 4X5B2ФС полученный ЭКЛ. После разрушения образца на маятниковом копре были выполнены комплексные исследования поверхности разрушения.

Визуальный анализ поверхности разрушения указывает на кристаллическое строение (рис. 12, *а*). Поверхность разрушения относительно ровная. Присутствуют фасетки квазискола и гребни (признак пластической деформации) (рис. 12, *в*).

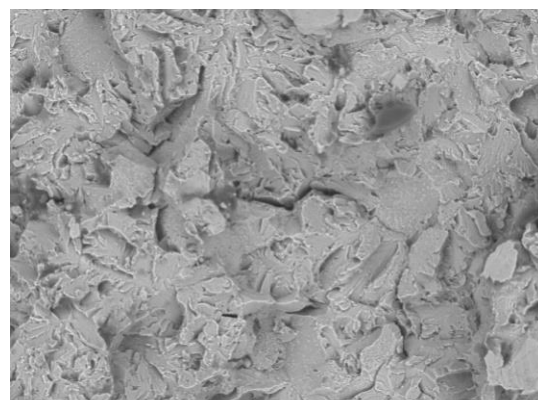


*а*



TM-1000\_ x100 1 mm

*б*



TM-1000\_ x1,5k 50 um

*в*

Рисунок 12 – Поверхность разрушения стали 4X5B2ФС: *а* – макроструктура,  $\times 5$ ;

*б* и *в* – фрактограммы

Микрорентгеноспектральный анализ участка (рис. 13) указывает на соответствие химического состава, определенного по стандартной методике.

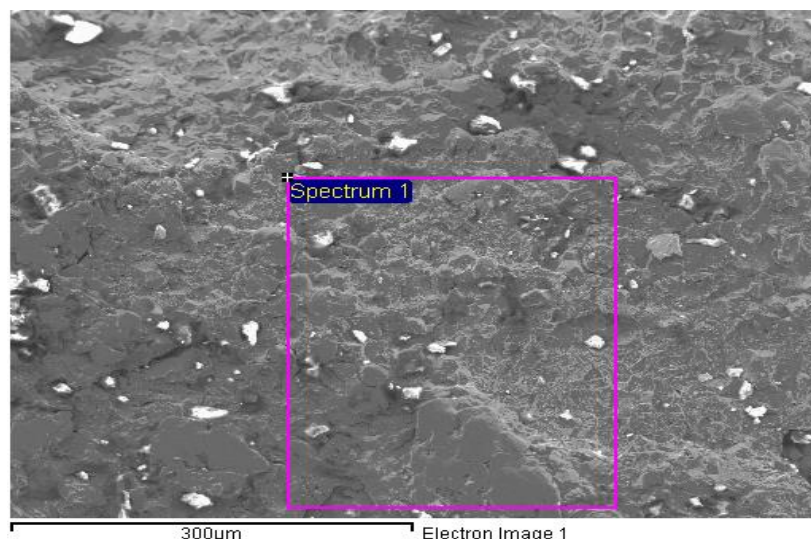


Рисунок 13 – Электронно-микоскопическое изображение поверхности образца стали 4X5B2ФС, site 3, x200

В таблице 9 показан элементный состав поверхности, ограниченной прямоугольником на рисунке 13.

Таблица 9 – Элементный состав поверхности образца стали 4X5B2ФС, мас. %

Spectrum	C	O	Si	Cr	Fe	W	Total
Spectrum 1	13,68	2,86	0,68	5,36	73,12	4,31	100

Исследование поверхности разрушения с наличием неметаллического включения (рис. 14) указывает на большое содержание в нем кислорода, что является подтверждением наличия крупного оксидного включения, которое, по-видимому, сформировалось в процессе литья.

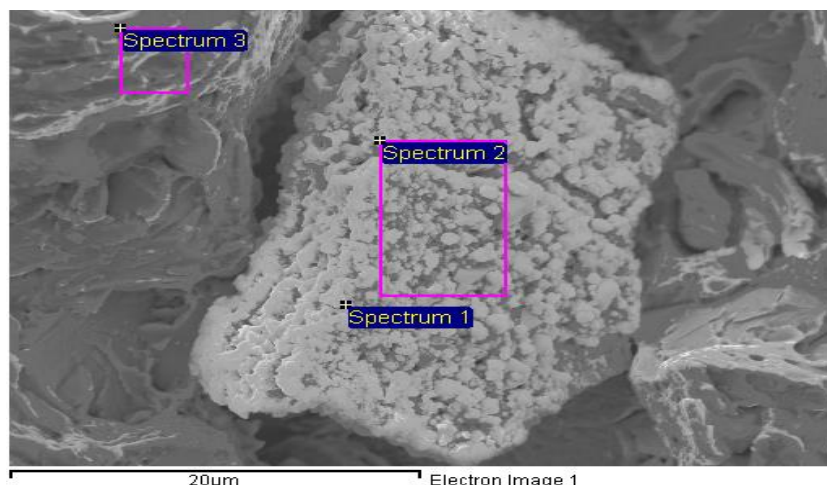


Рисунок 14 – Электронно-микроскопическое изображение поверхности  
Образца с крупным включением стали 4X5B2ФС, site 6, x3000

Элементный состав крупного включения показан в таблице 10.

Таблица 10 – Элементный состав поверхности образца стали 4X5МФС, мас. %

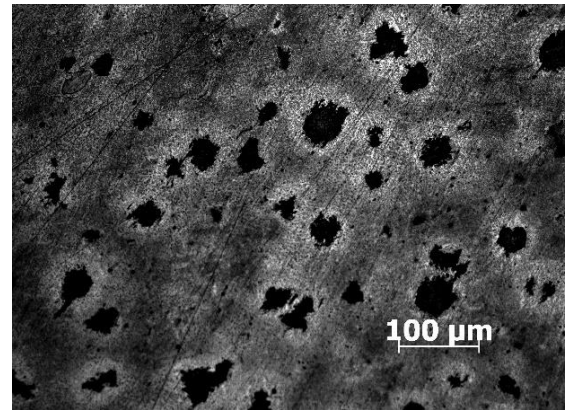
Spectrum	C	O	Ti	V	Cr	Fe	Mo	W	Total
Spectrum 1	2,81	27,33		0,63	3,60	63,14		2,50	100
Spectrum 2	3,38	25,73	1,08		4,19	62,03		3,59	100
Spectrum 3	16,61	3,77			5,21	65,32	2,23	6,85	100

Исследование механизма разрушения чугуна ЧВГ45 выполнялось на образце после испытания на временное сопротивление (рис. 15, а). Твердость в соответствии с ГОСТ 28394-89 составляла НВ 250.

Марки чугуна для отливок, имеющих в структуре графит вермикулярной формы (ВГ) с количеством шаровидного графита не более 40 %. Условное обозначение марки включает: букву Ч – чугун; буквы ВГ – форма графита (вермикулярный графит) и цифровое обозначение минимального значения временного сопротивления разрыву при растяжении в  $10^{-1}$  МПа [8].



*a*



*б*

Рисунок 15 – Поверхность разрушения и структура чугуна ЧВГ45: *a* – макроструктура,  $\times 4$ ; *б* – микроструктура, (вермикулярный графит на перлитной основе.

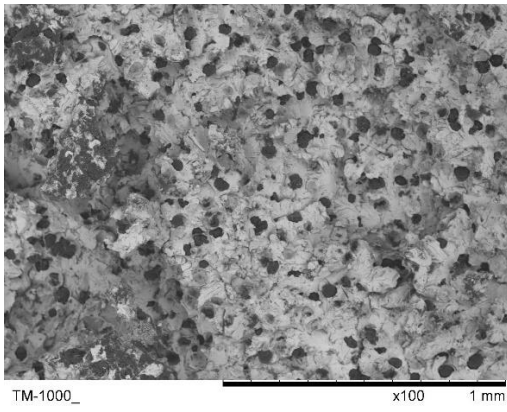
Феррит по границам графита)

Такой чугун применяют для деталей, работающих при значительных механических нагрузках, в условиях трения, износа и при повышенных термоциклических нагрузках.

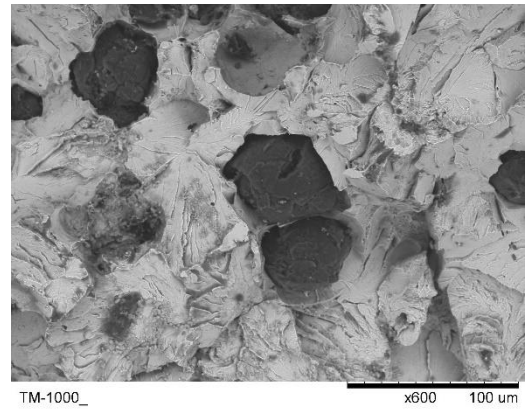
Пластические характеристики чугуна имеют низкие значения, поэтому разрушения носит преимущественно хрупкий характер, что хорошо подтверждается макроструктурой (рис. 15, *a*) и фрактограммой (рис. 16).

Исследовав поверхность чугуна на оптическом микроскопе, была выявлена перлитоферритная структура с вермикулярным графитом (рис. 16, *б*). Такая форма графита способствует повышению напряжений для зарождения и распространения трещины. Вермикулярный графит создает условия для повышенных механических свойств, а также обеспечивает хорошую теплопроводность.





*a*



*б*

Рисунок 16 – Электронно-микроскопическое изображение поверхности разрушения чугуна

### 3 Анализ эксплуатационных разрушений

Для анализа эксплуатационных разрушений рассмотрено два случая: разрушение калибратора и вал гидравлического насоса

#### 3.1 Калибратор КЛС-295,3

Калибратор предназначен для калибровки ствола скважины, центрирования и улучшения работы долота (породоразрушающий инструмент) и забойного двигателя, управления параметрами искривления ствола скважины. Для корректной работы калибратора необходимо обеспечить давления, составляющее 450 атм.

На анализ был представлен фрагмент калибратора лопастного спирального диаметром 295,3 после разрушения трубы в муфтовой части (рис. 17).



Рисунок 17 – Фрагмент калибратора после разрушения,  $\times 0,13$

Разрушение произошло по муфтовой части калибратора по предпоследней впадине резьбовой канавки по плоскости, перпендикулярной оси вращения. Поверхность разрушения за счет механического воздействия подвержена значительной пластической деформации. Это привело к полной утрате рельефа (рис. 18). Механизм разрушения можно охарактеризовать по нескольким признакам. Одним из признаков усталостного разрушения является ориентация поверхности



разрушения, которая лежит в плоскости перпендикулярной оси вращения. (рис. 2, поверхность разрушения, отмеченная цифрой 1).



1 – поверхность разрушения вала; 2 – внутренняя поверхность корпуса калибратора

Рисунок 18 – Вид калибратора со стороны разрушения,  $\times 4,6$ . Поверхность разрушения со следами значительной пластической деформации

Для определения марки стали был выполнен химический анализ. Сталь, из которой изготовлен калибратор, соответствует марке 40ХН ГОСТ 4543-71 (табл. 11).

Таблица 11 – Химический анализ стали

Наименование	C	Mn	Si	P	S	Cr	Mo	Ni
Калибратор	0,431	0,565	0,268	0,009	0,031	0,526	0,023	1,046

Механические свойства вала калибратора приведены в таблице 12.

Таблица 12 – Механические свойства

Характеристики	Временное сопротивление, $\sigma_b$ , МПа	Предел текучести, $\sigma_t$ , МПа	Относительное удлинение, $\delta$ , %	Твердость, НВ	Ударная вязкость, КСV, МДж/м <sup>2</sup> при 20° С
ГОСТ 7360-82	950	830	15	285-321	0,7-0,758
Калибратор	761,5	477	6,25	241	0,54

Циклическая прочность и циклическая долговечность изделий находится в прямой зависимости от механических свойств стали, а наличие концентраторов напряжений, в виде резьбовых канавок, переходов сечения и др., облегчает процесс образования трещин усталости.

В данном случае механические свойства стали имеют значительно меньшие значения по сравнению с требуемыми. Так, показатели твердости, предела прочности и предел текучести (табл. 12) способствуют ускоренному образованию трещин усталости. Невысокие значения пластичности (относительного удлинения и ударной вязкости), снижают сопротивление распространению образовавшейся трещины усталости (табл. 12) [11].

Для более детального анализа были проведены металлографические исследования, выполненные на оптическом микроскопе. На образце при небольших увеличениях отчетливо наблюдается полосчатая структура (рис. 19).

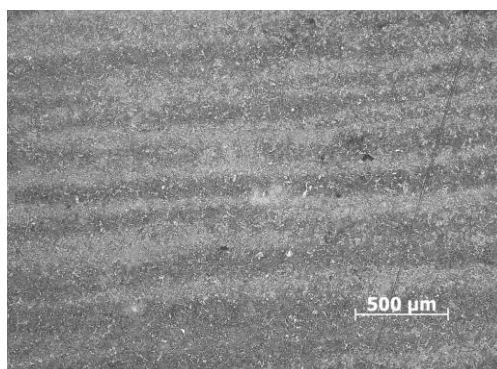


Рисунок 19 – Полосчатая микроструктура вала калибратора

Первичная полосчатая структура является результатом ликвации, возникающей в процессе кристаллизации легированной стали и последующей горячей пластической деформации. Полосчатая структура является анизотропной. Свойства вдоль и поперек волокон могут сильно отличаться.

В процессе эксплуатации калибратор находится в сложнапряженном состоянии. У основания резьбовой канавки действуют растягивающие и сжимающие напряжения, направленные перпендикулярно к поверхности резьбового выступа, а касательные напряжения во время работы, направлены по радиусу. В результате такого силового воздействия накапливаются дефекты, которые спрощены полосчатой структурой.

Наличие полосчатой структуры снижает усталостную выносливость и способствует образованию очагов усталостного разрушения.

Полосчатая микроструктура может быть вызвана несколькими причинами: режимами прокатки, когда прокатка выполняется при пониженных температурах, не успевают пройти процессы рекристаллизации, и остается преимущественная ориентация зерен; из-за значительной ликвации легирующих элементов, которая после прокатки также создает волокнистую структуру [12].

При исследовании структуры при больших увеличениях отчетливо наблюдаются значительная неоднородность структуры в различных участках. Присутствуют области значительной протяженности с явно выраженной разнотернистостью (рис. 20). Такая структура сформировалась в результате охлаждения от температур выше критических со скоростью, при которой первоначально образовался феррит преимущественно по границам зерен, а при дальнейшем охлаждении сорбит.

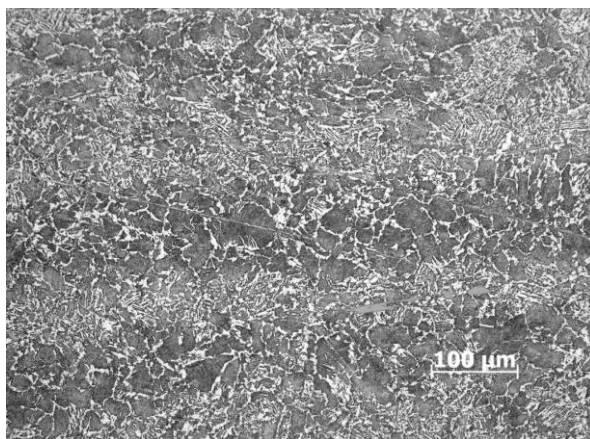


Рисунок 20 – Разнозернистая структура стали, с выделениями феррита по границам зерен

При больших увеличениях отчетливо наблюдаются участки с видманштеттовой структурой, феррит имеет ориентированное игольчатое строение (рис. 21)

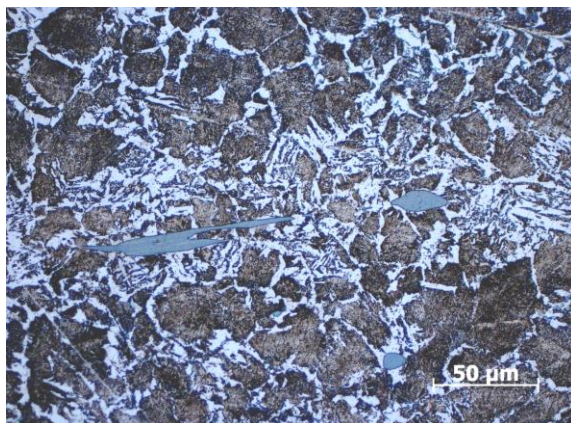
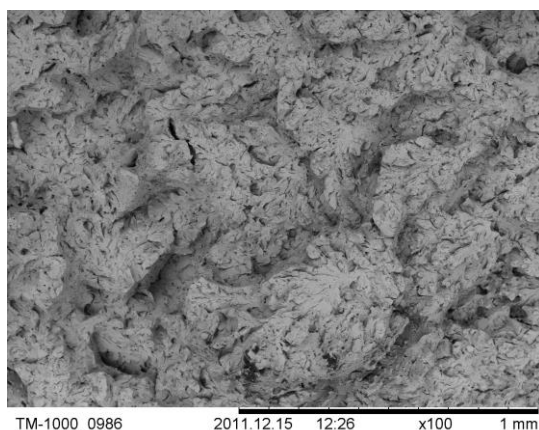


Рисунок 21 – Видманштеттова структура вала калибратора (округлые и вытянутые области голубоватого цвета являются неметаллическими включениями (сульфидами))

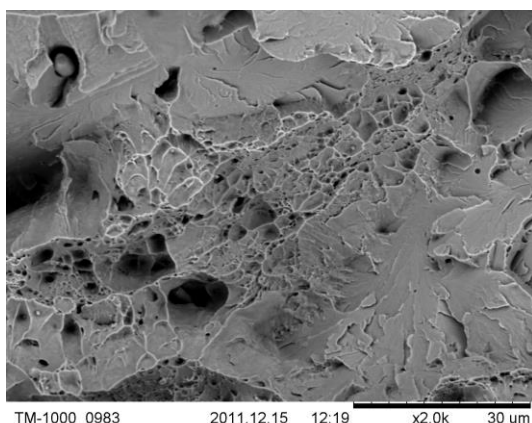
Неоднородность и наличие видманштеттовой структуры отрицательно сказывается на механических свойствах стали, что находится в хорошем соответствии с данными механических испытаний (табл. 12).

Фрактографические исследования поверхностей разрушения ударных образцов, выполненные на сканирующем электронном микроскопе, указывают на преимущественно хрупкий характер разрушения образцов при ударных

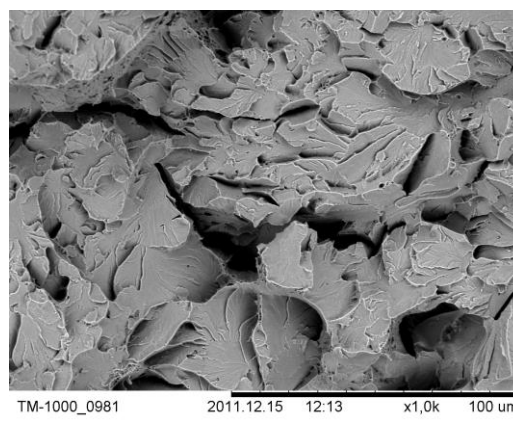
испытаниях (рис. 22). При небольших увеличениях (рис. 22, *а*) отчетливо наблюдается «ботанический узор», характерный для хрупкого разрушения. При больших увеличениях (рис. 22, *б*) наблюдаются участки, характерные для хрупкого разрушения, имеющие гладкую поверхность и участки, характерные для вязкого разрушения, имеющие ямочное строение [13].



*а*



*б*



*в*

Рисунок 22 – Поверхность разрушения ударных образцов: *а – в* – фрактограммы

Большая часть поверхности разрушения имеет строение, характерное для хрупкого разрушения. Разрушение носит транскристаллитный характер по механизму скола (рис. 22, *в*). Наблюдается большое количество вторичных трещин.

В результате исследования были сделаны следующие выводы:

1 Разрушение трубы муфтовой части калибратора произошло по усталостному механизму.

2 В зоне, прилежащей к поверхности разрушения наблюдается видманшкеттова структура, сформировавшаяся в условиях охлаждения от температур значительно превышающих  $A_3$ , что является следствием нарушения технологии термической обработки.

3 Низкие механические свойства стали в сочетании с грубой видманшкеттовой структурой привели к снижению циклической прочности и циклической долговечности калибратора.

### 3.2 Приводной вал гидравлического насоса

Буровой насос применяют на бурильных установках, обеспечивая циркуляцию буровых растворов при бурении скважин. Для выполнения задач необходимо обеспечить высокие давления, которые составляют 450 атм.

На валу отчетливо видна трещина, которая распространилась на значительную глубину перпендикулярно оси вала (рис. 23, б).



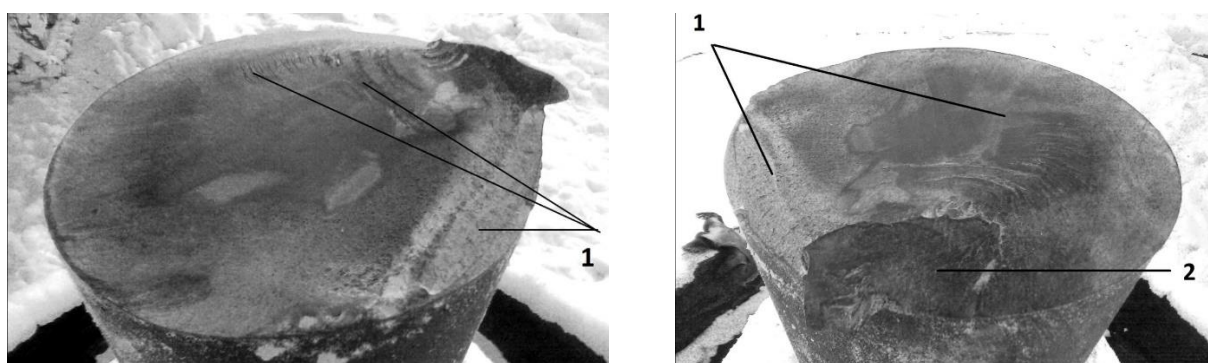
*а*



*б*

Рисунок 23 – Приводной вал гидравлического насоса: *а* – общий вид;  
*б* – трещина на валу

Поверхность разрушения вала имеет типичное строение характерное для усталостного разрушения (рис. 24). Большая часть поверхности разрушения имеет гладкий вид с четко видимыми линиями останков трещины (на рисунке 24, *а* они отмечены цифрой – 1). Усталостная трещина прошла практически по всему сечению вала на это указывает небольшая зона долома (на рисунке 24, *б* она отмечена цифрой – 2). Небольшая площадь долома, которое было искусственно выполнено после демонтажа вала, свидетельствует о небольших действующих нагрузках в процессе эксплуатации гидравлического насоса.



1 – усталостная трещина с линиями останков трещины, 2 – зона долома, которая сформировалась в результате разрушения вала после его демонтажа

*а*

*б*

Рисунок 24 – Поверхность усталостного разрушения вала (*а – б*)

Для большой номенклатуры изделий ответственного назначения, работающих в условиях циклического нагружения, устанавливается определенное время (число циклов нагружения), в течение которого данное изделие будет сохранять свою работоспособность при данных условиях эксплуатации. В случае увеличения времени эксплуатации возможно разрушение по усталостному механизму.

После демонтажа вала была отделена часть зуба, через который проходила трещина (рис. 25).

Фрактографические исследования трещины, проходившей через зуб до разрушения, указывают на то, что разрушение произошло по усталостному



механизму. Поверхность разрушения имеет два характерных участка, отличающихся своим строением. Зона один – очаги зарождения трещины усталости, зона два – зона распространения усталостной трещины с типичным строением в виде линий остановки трещины. Наблюдается многоочаговый характер зарождения трещины, о чем свидетельствуют несколько ступенек (на рисунке они отмечены – 1), развитие которых привело к слиянию отдельных трещин усталости в магистральную трещину (на рисунке они отмечены – 2).

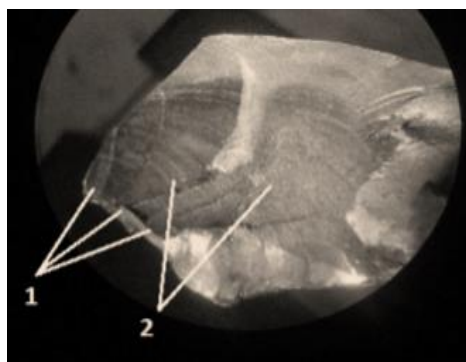


Рисунок 25 – Поверхность усталостного разрушения зуба с характерным рельефом:

1 – очаги зарождения трещины; 2 – усталостные трещины с четко видимыми линиями остановки трещины

Следует отметить, что данная трещина является продолжением трещины, идущей практически через все тело вала. Образование нескольких очагов у основания зуба связано с изменением напряженного состояния в этой области, поскольку в ней возникают напряжения в процессе зацепления зубьев в косозубой передаче.

На основной поверхности зуба видны питтинги (рис. 26). Данный вид износа, сопровождающийся образованием питтинга на поверхностях зубьев в зубчатых колесах, относится к усталостному виду, который возникает под действием циклических нагрузок.



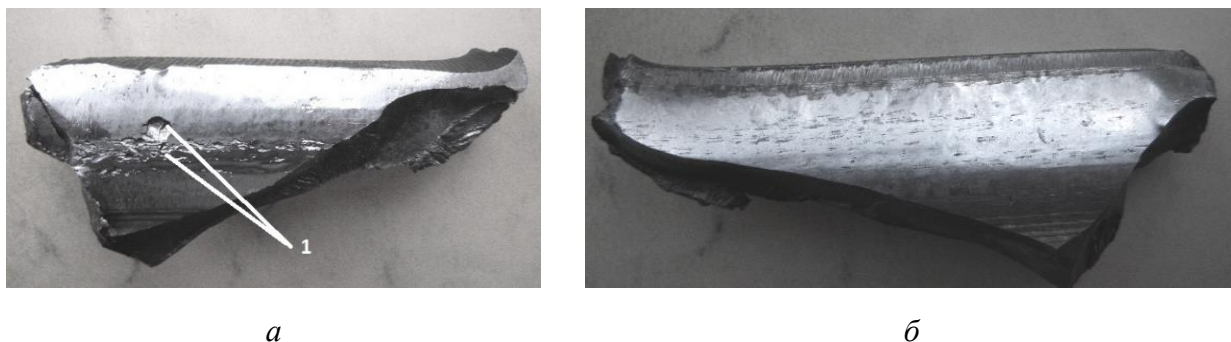


Рисунок 26 – Фрагменты зуба зубчатого колеса: *a* – вид со стороны основной поверхности зуба (1 – питтинги на основной контактных поверхностях зубчатого колеса);  
*б* – вид с другой стороны зуба

Склонность к питтингообразованию при эксплуатации детали в течение времени меньше ресурса увеличивается с увеличением количества неметаллических включений и наличием несплошностей в приповерхностной зоне, качеством поверхностей зубьев и др. В случаях применения поверхностной обработки при нарушении технологии в переходной зоне могут образовываться надрывы и зародыши усталостного разрушения, которые способствуют выкрашиванию. Питтинги также могут образовываться в случае эксплуатации изделия в течение времени существенно, превышающем ресурс данной детали.

Выводы:

- Выход из строя вала обусловлен распространением усталостной трещины практически по всему сечению (около 90 %).
- Вал в процессе эксплуатации испытывал невысокие нагрузки.
- Возникновение и распространение усталостной трещины обусловлено действием циклических нагрузок, имеющих характер вращения с изгибом.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

- Показано, что разрушение изделий, работающих в условиях циклического нагружения происходит, в основном, по усталостному механизму.
- Очагами зарождения трещины служат локальные зоны, испытывающие наибольшее напряжение в процессе эксплуатации.
- Установлено, что протяженность зоны долома зависит от уровня действующих напряжений и свойств материала.
- Получены данные о взаимосвязи макро- и микроструктуры материала с характером разрушения и видом изломов.
- Определено, что наличие неоднородной микроструктуры способствует ускоренному распространению трещины усталости и окончательному разрушению.
- Изложена более полная классификация основных признаков макростроения и микростроения изломов.
- Изучена поверхность разрушения образцов из конструкционной и инструментальной стали после испытания на ударную вязкость.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 Разрушение металлов [Электронный ресурс] : – Режим доступа: <https://www.metalcutting.ru/content/razrushenie-metallov>
- 2 Анализ изломов металлов в лаборатории ООО «Диагностика металлов» [Электронный ресурс] : – Режим доступа: <https://диагностика-металлов.рф/metallografiya/analiz-razrusheniya/>
- 3 Герасимова, Л. П., Ежов, А. А., Маресев, М. И. Изломы конструкционных сталей: Справ. Изд.: Металлургия, 1987. – 272 с.
- 4 Методические указания. Расчеты и испытания. Классификация видов изломов металлов. РД 50-672-88. – Москва, 1989. – 21 с.
- 5 Роднянская, А. Л. Механические свойства металлов: Сборник задач и упражнений/ ГАЦМиЗ. – Красноярск, 1999. – 112 с.
- 6 Бобровицкий, В. И., Сидоров, В. А. Механическое оборудование: техническое обслуживание и ремонт. – Донецк: Юго-Восток, 2011. – 238 с.
- 7 Фролова, О. А. Особенности разрушения конструкционных матер при различных условиях нагружения: учебное пособие. – Оренбург, 2019: ОГУ, 2019. – 91 с.
- 8 ГОСТ 28394-89 Чугун с вермикулярным графитом для отливок. Марки. – Введен 01.01.1991. – Сборник ГОСТов. - Москва: ИПК Издательство стандартов, 2004 г.
- 9 Дендритный излом. Дефекты стали [Электронный ресурс] : – Режим доступа: <https://markmet.ru/defekty-stalei/dendritnyi-izlom>
- 10 Финкель, В. М. Портрет трещины. 2-е изд., перераб и доп. – Москва: Металлургия, 1989. – 192 с.
- 11 Сароян, А. Е. Трубы нефтяного сортамента. Справочник. – Москва: Недра, 1987. – 488 с.
- 12 Арзамасов, Б. Н. Материаловедение – Москва: Машиностроение – 1986, – 363 с.

13 Энгель, Л., Клингеле, Г. Растровая электронная микроскопия. Справочник – Москва: Металлургия – 1986, – 231 с.

Федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение  
высшего образования  
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»  
Политехнический институт  
Кафедра «Материаловедение и технологии обработки материалов»

УТВЕРЖДАЮ  
Заведующий кафедрой  
В. И Темных  
«28» 06 2021 г.

### БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

**Направление:** 22.03.01 Материаловедение и технологии материалов

**Исследование механизмов разрушения конструкционных и инструментальных сталей**

Научный руководитель

  
(подпись, дата)

А. М. Токмин

Выпускник

28.06.21   
(подпись, дата)

Е. Н. Вершинникова

Нормоконтролер

25.06.21.   
(подпись, дата)

Л. А. Свечникова

Красноярск 2021

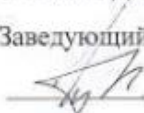
---

Федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение  
высшего образования  
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Политехнический институт  
Кафедра «Материаловедение и технологии обработки материалов»

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой

  
В. И. Темных

« 28 » 08 2021 г.

**ЗАДАНИЕ  
НА ВЫПУСКНУЮ КВАЛИФИКАЦИОННУЮ РАБОТУ**

---

Студент: Вершинникова Елизавета Николаевна.

Группа: МТ 17-01Б.

Направление (специальность): 22.03.01 Материаловедение и технологии обработки материалов.

Профиль: 22.03.01.07 Материаловедение и технологии материалов в машиностроении.

Тема ВКР: Исследование механизмов разрушения конструкционных и инструментальных сталей, утвержденная приказом по университету № 307/с от 15.01.2021

Исходные данные для ВКР: информационный обзор, исследования на кафедре.


Перечень разделов ВКР:


1 Обзор литературы по проблеме.

2 Методы исследования изломов.

3 Анализ эксплуатационных разрушений.

Перечень графического материала: Презентационный материал, раздаточный материал.

Руководитель  доцент, к. т. н. А. М. Токмин  
подпись, дата      должность, ученая степень      инициалы, фамилия

Задание принял к исполнению 28.06.21  Е. И. Вершинникова  
подпись, дата      инициалы, фамилия