EDN: https://elibrary.ru/GQPYVR DOI: https://doi.org/10.33408/2519-237X.2025.9-1.66

УДК 621.77:669.14.018.27

# ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ КОНСТРУКЦИОННЫХ СТАЛЕЙ РАЗРУШЕННЫХ ДЕТАЛЕЙ НЕФТЕБУРОВОГО ОБОРУДОВАНИЯ

**Фомихина И.В., Бирюк В.А., Маркова Л.В.**

*Цель.* Определение причин разрушения деталей нефтебурового оборудования из конструкционных сталей под действием эксплуатационных нагрузок.

*Методы.* Исследования выполнялись на аттестованном оборудовании аккредитованного органами Госстандарта Республики Беларусь Испытательного центра Института порошковой металлургии имени академика О.В. Романа.

*Результаты.* Проведены исследования элементного состава, морфологии излома, структуры, механических свойств, твердости деталей нефтебурового оборудования, разрушенных под действием эксплуатационных нагрузок. Установлены причины разрушения муфты обсадной трубы, шпильки, кольца замковой опоры и насосной штанги буровых установок, эксплуатируемых на крупнейших месторождениях ГПО «Белоруснефть».

*Область применения исследований.* Результаты исследований могут быть использованы в субъектах промышленной безопасности, эксплуатирующих потенциально опасные объекты, работающие в условиях действия эксплуатационных нагрузок различной интенсивности и типов нагружения с целью повышения уровня промышленной безопасности.

*Ключевые слова*: нефтебуровое оборудование, детали буровой установки, структура, свойства, твердость, морфология излома, разрушение, термообработка, промышленная безопасность.

(Поступила в редакцию 10 января 2025 г.)

## Введение

В промышленных масштабах добыча нефти в Беларуси началась в 1965 г. Запасы углеводородов сосредоточены в районе Припятского прогиба (Гомельская и Могилевская области) – большая их часть относится к трудноизвлекаемым. С начала разработки добыто более 145 млн т нефти и свыше 16 млрд куб. м попутного нефтяного газа. Основной объем ресурсов нефтяники получили из крупнейших месторождений – Речицкого, Осташковичского, Южно-Осташковичского и Вишанского.

Общий фонд скважин – более тысячи единиц. Эксплуатационный фонд составляет около 800 скважин – 95 % из них работают с помощью электроцентробежных и штанговых глубинных насосов. Эксплуатацией скважин занимается Государственное производственное объединение «Белоруснефть» (НГДУ «Речицанефть»).

Максимальный годовой уровень нефтедобычи в Беларуси был зафиксирован в 1975 г. – 7,96 млн т. Так как основные месторождения вступили в заключительную стадию разработки, с 1976 г. добыча углеводородов начала снижаться. Показатель за 1997 г. – 1,82 млн т. Организация рациональной разработки залежей помогла стабилизировать ситуацию. С 2013 г. уровень добычи начал удерживаться на отметке 1645 тыс. т. С 2017-го – постепенный ежегодный прирост и в 2024 г. он достиг 1938 тыс. т.

Проходка нефтегазовых скважин производится с помощью специальной техники – бурового оборудования. Согласно ГОСТ Р 51365-2009 (ISO 10423:2003) [1] к деталям бурового оборудования относят отдельные части, используемые при сборке узлов оборудования,

[1] Нефтяная и газовая промышленность. Оборудование для бурения и добычи. Оборудование устья скважины и фонтанное устьевое оборудование. Общие технические требования: ГОСТ Р 51365-2009 (ISO 10423:2003). – Взамен ГОСТ Р 51365-99; введ. 15.12.2009. – М.: Стандартинформ, 2011. – 58 с.

а также детали, нарушение функционирования которых приводит к вытеканию жидкости скважины в атмосферу.

В процессе эксплуатации нефтебуровое оборудование подвергается воздействию широкого спектра нагрузок, вследствие которых в структуре металла происходит накопление повреждений и их последующая трансформация в микротрещины. Нагрузки могут быть кратковременными (в том числе ударными), длительными и многократно прилагаемыми. Чрезмерные внешние нагрузки со временем становятся причиной разрушения оборудования. Под действием длительных нагрузок происходит медленная деформация объекта, постепенно ослабляющая его прочность. Длительная статическая нагрузка приводит к разрушению объекта даже в тех случаях, когда такая же кратковременная нагрузка для него не опасна [1–4]. Деформация металла при нагружении отражается изменением формы и размеров деталей. Эти изменения могут быть временными (упругие деформации, исчезающие после снятия нагрузки) и остаточными (пластические деформации, остающиеся после снятия нагрузки). Повреждение деталей выражается в виде изгибов, вмятин и скручиваний [4–6]. Дефекты структуры металла зарождаются и развиваются в зонах концентрации механических напряжений [3–8].

Усталостные трещины являются наиболее распространенными эксплуатационными дефектами. Основная причина усталостных разрушений деталей – действие высоких переменных напряжений. Усталостные изломы возникают при напряжениях ниже предела текучести. Процесс начинается с зарождения усталостной трещины, появлению которой способствует наличие концентратора напряжений в основном сечении детали. Возникнув, усталостная трещина под действием циклической нагрузки, распространяется вглубь детали, что приводит к ее разрушению [3–10].

Возникновение различных повреждений или неисправностей оборудования обусловлено конструктивными, технологическими и эксплуатационными факторами. К конструктивным факторам относятся: величина зазоров и натягов в сопряжениях сборочных единиц; материал деталей; величина расчетных нагрузок и характер их воздействия. Технологическими факторами являются: способы получения заготовок; технология обработки деталей (механическая, термическая и др.); точность обработки; соблюдение технологических процессов при изготовлении или ремонте деталей, проведении сборочных работ, испытаний и др. Эксплуатационные факторы определяются: режимами нагруженности оборудования; интенсивностью эксплуатации во времени; своевременным проведением регламентных работ; полнотой и качеством технического обслуживания и ремонта; квалификацией обслуживающего персонала; воздействием внешней среды и др. [8–10].

**Основная часть**

Для проведения экспериментальных исследований были выбраны образцы деталей и узлов бурового оборудования, разрушившиеся в процессе эксплуатации при проходке скважин. В качестве таковых по обращению эксплуатирующей организации были выбраны муфта обсадной трубы Ø 140 мм и шпилька (Речицкое месторождение), кольцо замковой опоры (Вишанское месторождение) и насосная штанга НШ-19 (Давыдовское нефтяное месторождение).

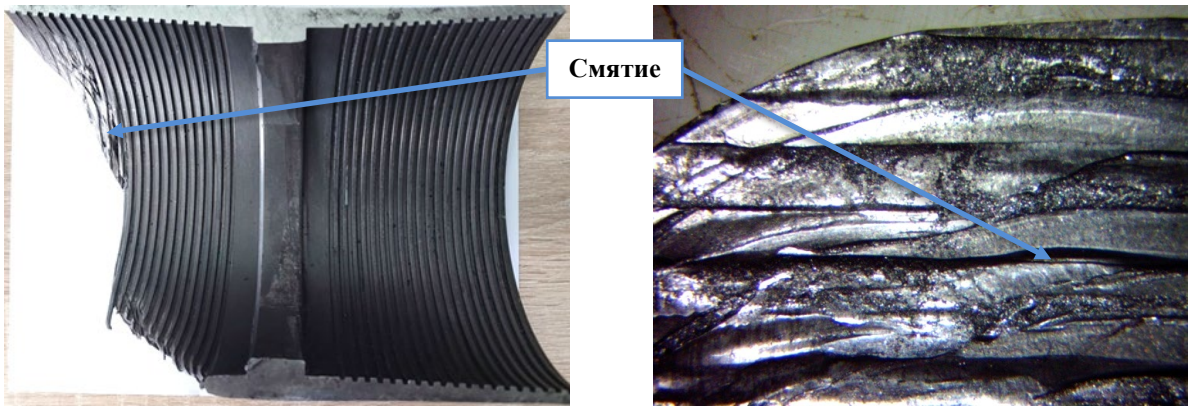
Исследование элементного состава проводилось на рентгенофлуоресцентном спектрометре ED 2000 фирмы Oxford Instruments Analytical (Великобритания) и на атомно-эмиссионном спектрометре «ЭМАС-200ССД». Анализ на углерод выполнялся на экспресс-анализаторе АН 7529. Анализ на серу осуществлялся на экспресс-анализаторе АС 7932. Съемка общего вида разрушенных образцов и исследование морфологии излома проводились с помощью стереоскопического микроскопа «Альтами СМ0745». Размеры резьбы измерялись с помощью двухкоординатного измерительного микроскопа ДИП-1. Испытание на растяжение выполнялось на универсальной испытательной машине Tinius Olsen H150K-U (Англия)

согласно ГОСТ 1497-84 (ИСО 6892-84)[2]. Ударная вязкость определялась по ГОСТ 9454-78[3] на маятниковом копре Tinius Olsen IT406 с максимальной энергией удара маятника 406 Дж. Исследование микроструктуры проводилось на световом микроскопе MeF-3 фирмы Reichert (Австрия). Твердость по Роквеллу определялась на твердомере ТК14-250 по ГОСТ 9013-59[4]. Микротвердость измерялась на микротвердомере Micromet-II с нагрузкой 1 кг по ГОСТ 9450-76[5]. Перевод микротвердости в твердость по Роквеллу осуществлялся по таблицам ASTM. Погрешность перевода ± 3 ед.

Исследование причин разрушения муфты трубы обсадной Ø 140 мм группы прочности Р110 Речицкого месторождения. Для установления причины разрушения было проведено определение соответствия элементного состава, размеров резьбы, механических свойств, твердости, микроструктуры требованиям ГОСТ Р 53366-2009[6], сертификату № 32301954 ОА «Таганрогский металлургический завод» и API Spec 5 CT. Для выявления характера разрушения изучалась морфология излома. Оценка соответствия по требованиям заказчика проводилась по ГОСТ Р 53366-2009, т.к. трубы и комплектующие к ним были введены в эксплуатацию до 2017 г. (до отмены данного ГОСТ).

Общий вид и морфология поверхности фрагментов резьбового соединения разрушенной муфты представлены на рисунке 1. Из рисунка видно, что разрушение произошло на участке резьбы. В представленных фрагментах разрушенного резьбового соединения муфты наблюдаются смятые, вытянутые и сильно деформированные витки. Присутствуют трещины, на внутренней поверхности имеются затертости.

Элементный состав образца муфты следующий: C – 0,25 %, S – 0,0072 %, Mn – 0,86 %, Cr – 0,78 %, Si – 0,27 %, Mo – 0,21 %, Cu – 0,21 %, Ni – 0,07 %, P – 0,014 %, Fe – основа.




*а* *г*

**Рисунок 1. – Общий вид (*а–в*) и морфология поверхности (*г–е*) фрагментов резьбового соединения разрушенной муфты**

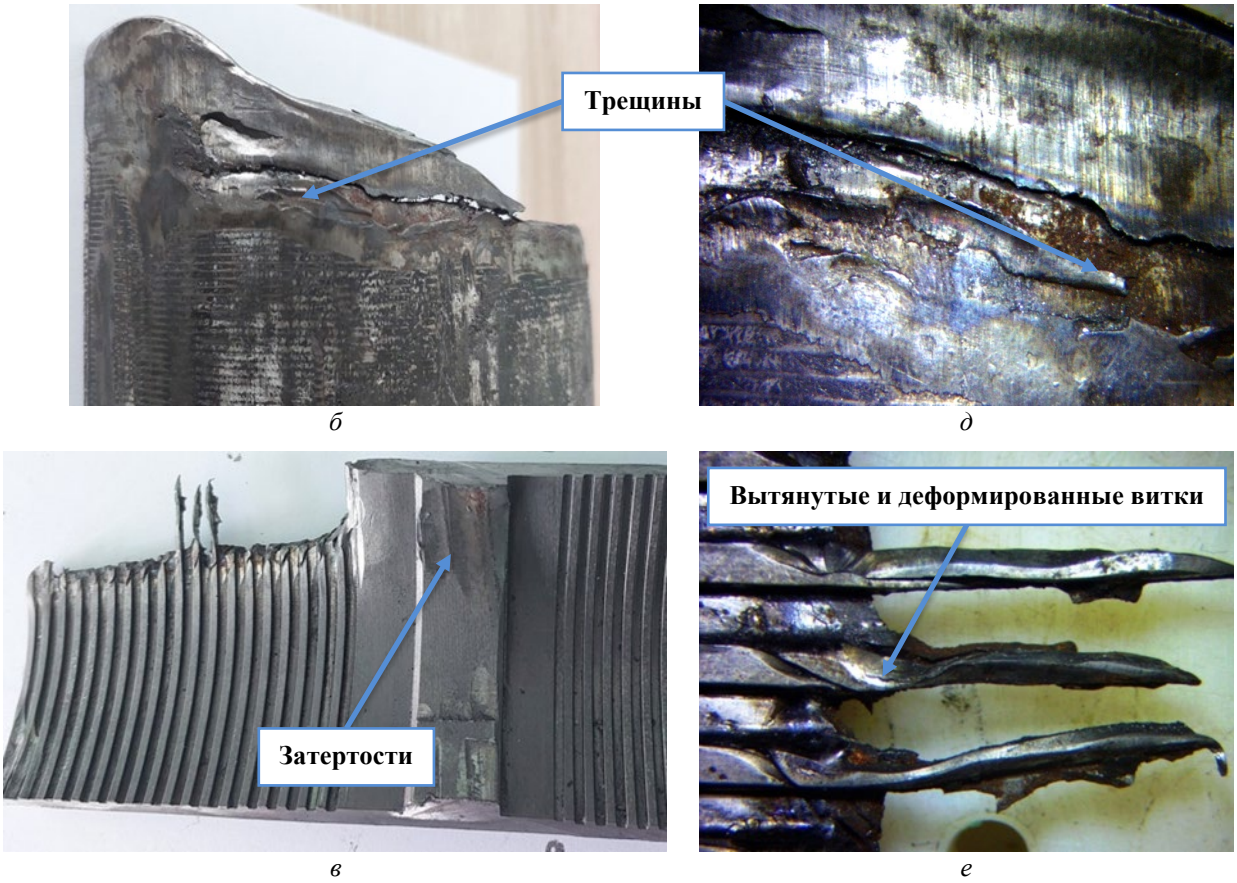
[2] Металлы. Методы испытаний на растяжение: ГОСТ 1497-84 (ИСО 6892-84). – Взамен ГОСТ 1497-73; введ. 16.07.1984. – М.: Стандартинформ, 2008. – 24 с.

[3] Металлы. Метод испытания на ударный изгиб при пониженной, комнатной и повышенной температурах: ГОСТ 9454-78. – Введ. 01.01.1979. – М.: Издательство стандартов, 2003. – 12 с.

[4] Металлы. Метод измерения твердости по Роквеллу: ГОСТ 9013-59 (ИСО 6508-86). – Введ. 01.01.1960. – М.: Издательство стандартов, 2003. – 10 с.

[5] Измерение микротвердости вдавливанием алмазных наконечников: ГОСТ 9450-76. – Введ. 01.01.1977. – М.: Издательство стандартов, 1993. – 35 с.

[6] Трубы стальные, применяемые в качестве обсадных или насосно-компрессорных труб для скважин в нефтяной и газовой промышленности. Общие технические условия: ГОСТ Р 53366-2009 (ИСО 11960:2004). – Действ. до 01.07.2018; введ. 01.03.2010. – М.: Стандартинформ, 2010. – 202 с.




*б* *д*

*в* *е*

**Рисунок 1. – Общий вид (*а–в*) и морфология поверхности (*г–е*) фрагментов резьбового соединения разрушенной муфты**

В результате исследований установлено, что по элементному составу с учетом погрешности измерений ближайшим отечественным аналогом материала образца является сталь марки 25ХГМ (ГОСТ 4543-2016[7]), но отличается более низким содержанием хрома (по ГОСТ Cr должно быть 0,9–1,2 %). Для группы прочности Р110 по API Spec 5 CT в составе металла труб регламентируются содержание фосфора и серы в количествах до 0,030 %.

Исходя из полученных результатов элементного состава, можно сделать вывод, что по содержанию фосфора и серы образец муфты соответствует требованиям API Spec 5 CT.

Качественная оценка резьбы проводилась по результатам измерений геометрических параметров резьбы муфты, представленных в таблицах 1, 2.

**Таблица 1. – Результаты измерения геометрических параметров резьбы в соответствии с ГОСТ Р 53365-2009**

| Наименование параметра | Номер измерения | Полученные значения, мм | Значение по ГОСТ Р 53365-2009 |
|---|---|---|---|
| Шаг резьбы, мм | 1 | 5,08 | 5,08 ± 0,10 |
| | 2 | 5,10 | |
| | 3 | 5,09 | |
| | **среднее** | **5,09** | |
| Высота профиля, мм | 1 | 1,59 | 1,60 ± 0,03 |
| | 2 | 1,62 | |
| | 3 | 1,60 | |
| | **среднее** | **1,60** | |
| Угол профиля | 1 | 13° | 13° |
| | 2 | 13° | |
| | 3 | 13° | |
| | **среднее** | **13°** | |

[7] Металлопродукция из конструкционной легированной стали. Технические условия: ГОСТ 4543-2016. – Введ. 01.10.2017. – М.: Стандартинформ, 2019. – 53 с.

**Продолжение таблицы 1**

| Наименование параметра | Номер измерения | Полученные значения, мм | Значение по ГОСТ Р 53365-2009 |
|---|---|---|---|
| Ширина вершины профиля, мм | 1 | 2,29 | 2,29 |
| | 2 | 2,29 | |
| | 3 | 2,29 | |
| | **среднее** | **2,29** | |
| Ширина впадины профиля, мм | 1 | 2,47 | $2,43^{+0,05}$ |
| | 2 | 2,48 | |
| | 3 | 2,48 | |
| | **среднее** | **2,48** | |

**Таблица 2. – Результаты измерения геометрических параметров резьбы в соответствии с API Spec 5 B**

| Наименование параметра | Номер измерения | Полученные значения, мм | Значение по API Spec 5 B |
|---|---|---|---|
| Шаг резьбы, дюйм | 1 | 0,200 | 0,200 |
| | 2 | 0,201 | |
| | 3 | 0,200 | |
| | **среднее** | **0,200** | |
| Высота профиля, дюйм | 1 | 0,063 | 0,062 ± 0,001 |
| | 2 | 0,063 | |
| | 3 | 0,063 | |
| | **среднее** | **0,063** | |
| Угол профиля | 1 | 13° | 13° |
| | 2 | 13° | |
| | 3 | 13° | |
| | **среднее** | **13°** | |
| Ширина вершины профиля, дюйм | 1 | 0,097 | $0,099_{-0,003}$ |
| | 2 | 0,097 | |
| | 3 | 0,098 | |
| | **среднее** | **0,097** | |
| Ширина впадины профиля, дюйм | 1 | 0,103 | $0,101^{+0,003}$ |
| | 2 | 0,103 | |
| | 3 | 0,103 | |
| | **среднее** | **0,103** | |

Определено, что качество резьбы по геометрическим параметрам резьбы соответствует ГОСТ Р 53365-2009[8] и API Spec 5 CT (API Spec 5 B).

Испытание на растяжение выполнялось на образцах, вырезанных из целых участков муфты. Скорость нагружения образцов при испытаниях составляла 5 мм/мин. Результаты механических испытаний приведены в таблице 3.

**Таблица 3. – Механические свойства муфты после испытания на растяжение в сравнении с данными сертификата и требованиями API 5CT**

| Маркировка образцов | Предел текучести, МПа | Предел прочности, МПа |
|---|---|---|
| 1 | 945 | 1036 |
| 2 | 928 | 1016 |
| **среднее** | **937** | **1026** |
| Сертификат качества 32301954 АО «Таганрогский металлургический завод» (партия 20021, плавка 93722) | 961 | 1025 |
| Требования API 5CT (группа прочности P110) | min 758 max 965 | min 862 |

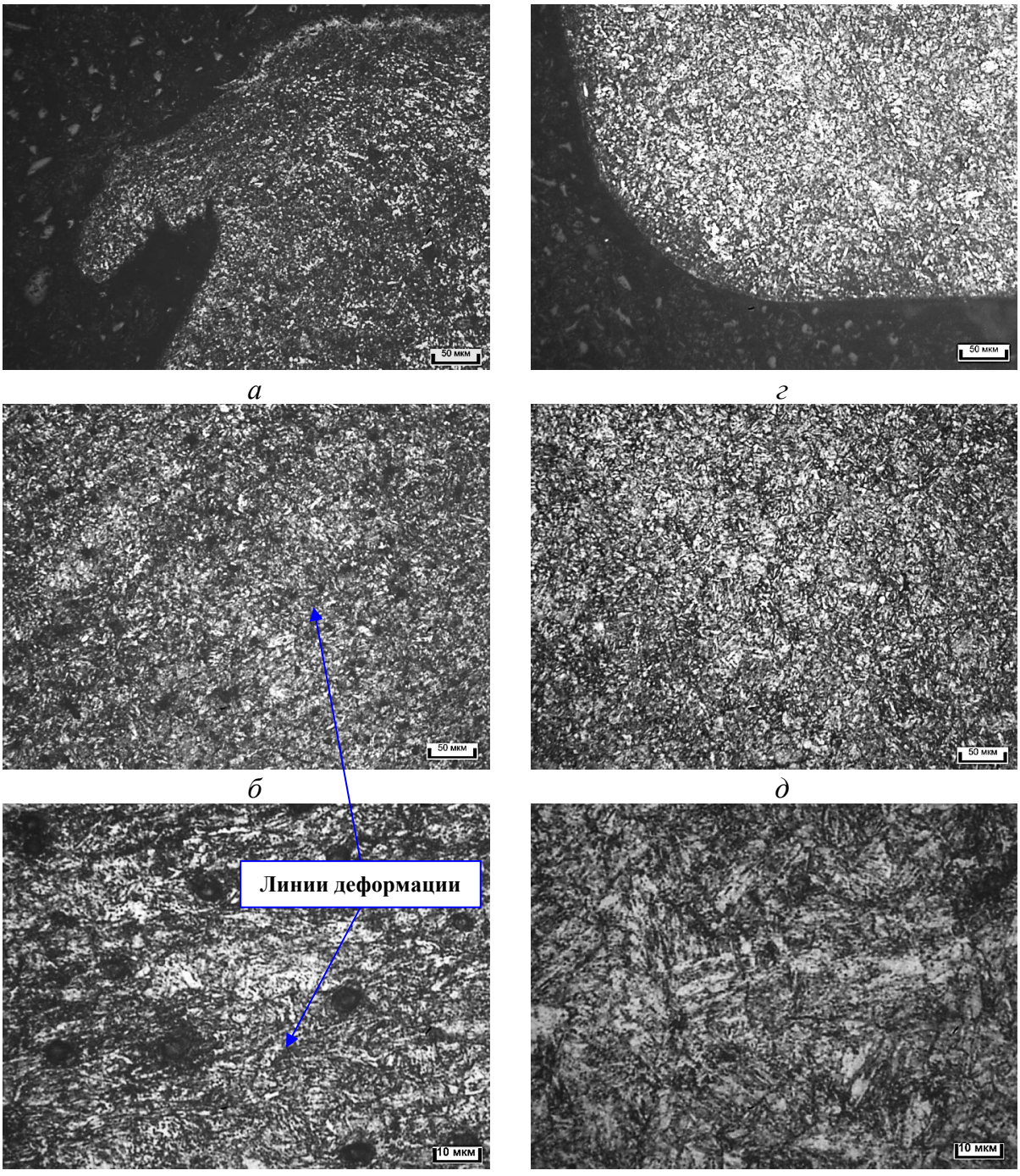
Сравнение результатов испытаний на растяжение с сертификатом качества АО «Таганрогский металлургический завод» и требованиями стандарта API 5CT показало, что по механическим свойствам муфта соответствует заявленной группе прочности P110.

[8] См. сноску 6.

Микроструктура образца на участке разрушения и на целом участке представлена на рисунке 2. Микроструктура представляет собой сорбит, полученный в результате закалки с высоким отпуском, что соответствует требованиям API Spec 5 CT.

Твердость по Роквеллу составляет 30 HRC, что подтверждает термообработанное состояние материала после закалки с высоким отпуском.

В районе смятия резьбы (рис. 2 *а–в*) присутствуют линии деформации, свидетельствующие о приложении значительных нагрузок в процессе эксплуатации к изделию. На остальном (неразрушенном) участке (рис. 2 *г–е*) микроструктура однородная, без деформационных искажений.




*а* *г*

*б* *д*

*в* *е*

*а* – смятие витка, х100; *б, в* – линии деформации, х100, х500; *в* – фрагмент целого зуба, х100; *д, е* – сорбит, полученный после закалки с высоким отпуском, х100, х500

**Рисунок 2. – Микроструктура на участке разрушения муфты (*а–в*) и на неразрушенном участке (*г–е*)**

Исследования показали, что муфта трубы обсадной Ø 140 мм Речицкого месторождения по элементному составу (сера, фосфор), механическим характеристикам, качеству резьбы, режимам термообработки соответствует сертификату № 32301954 АО «Таганрогский металлургический завод» (партия 20021, плавка 93722) и требованиям API Spec 5 CT (API Spec 5 B). Смятие резьбы, деформирование витков и наличие трещин свидетельствуют о превышении эксплуатационных нагрузок. Вывод носит информационный характер, т.к. расчеты на прочность и установление причин превышения эксплуатационных нагрузок не входят в область аккредитации Испытательного центра.

**Исследование причин разрушения шпильки соединительной.** Определение причины разрушения шпильки проводилось путем сравнения ее элементного состава, структуры, твердости и микротвердости с целой шпилькой. Изучалась морфология излома разрушенной шпильки.

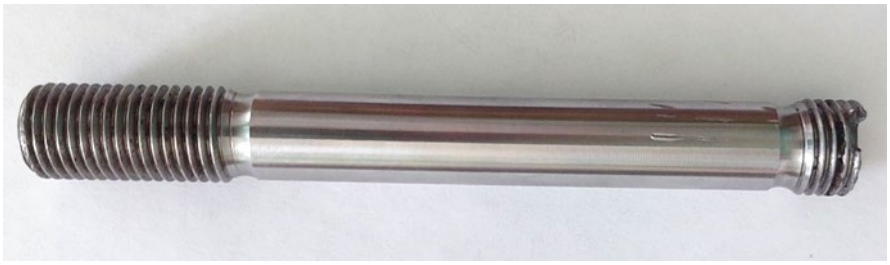
В результате исследований определен элементный состав.

Целая шпилька: C – 0,39 %, S – 0,020 %, Cr – 0,95 %, Mn – 0,90 %, Si – 0,30 %, Mo – 0,15 %, Ni – 0,13 %, Cu – не более 0,1 %, Ti – 0,02 %, Al – 0,02 %, P – не более 0,02 %, V – не более 0,01 %, Nb – не более 0,01 %, Fe – основа.

Разрушенная шпилька: C – 0,39 %, S – 0,032 %, Cr – 0,99 %, Mn – 0,80 %, Si – 0,33 %, Mo – 0,17 %, Ni – 0,17 %, Cu – не более 0,1 %, Ti – 0,03 %, Al – 0,02 %, P – не более 0,02 %, V – не более 0,01 %, Nb – не более 0,01 %, Fe – основа.

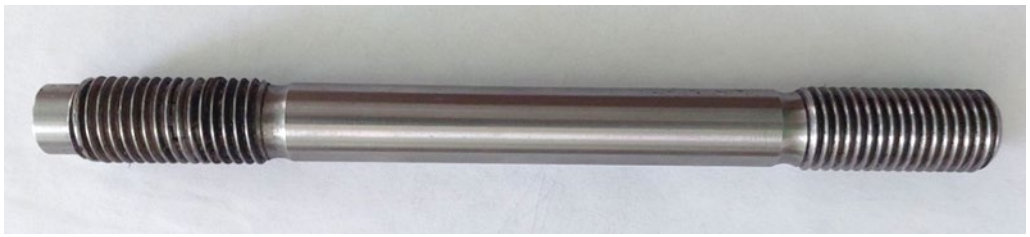
Установлено, что по элементному составу с учетом погрешности измерений материалы целой и разрушенной шпилек соответствуют стали марки 38ХГМ (ГОСТ 4543-2016[9]).

Общий вид шпилек представлен на рисунке 3.



*а* – разрушенная

*б* – разрушенная



*в* – целая

**Рисунок 3. – Общий вид (*а*, *в*) и морфология излома (*б*) шпилек, предоставленных на исследование, х4**

Визуальный осмотр разрушенной шпильки показал (рис. 3*а*), что шпилька изогнута, разрушение произошло в районе резьбы. Поверхность излома частично затерта. Морфологический анализ излома выявил присутствие круговых деформационных линий, свидетельствующих о разрушении шпильки при кручении. Морфология поверхности излома разрушенной шпильки представлена на рисунках 3*б* и 4.

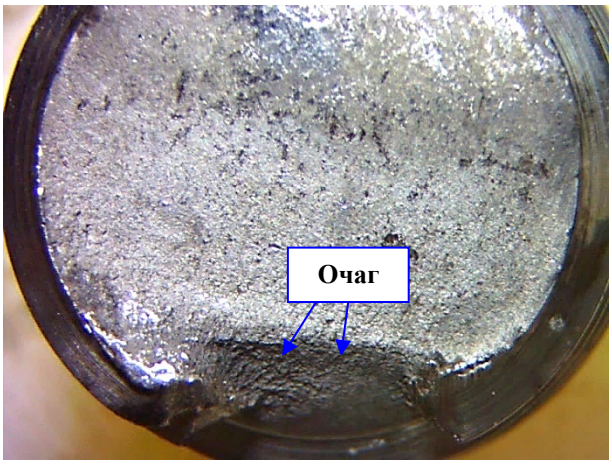
На поверхности излома в районе резьбы наблюдается участок очага разрушения (рис. 4 *а, б*) и долом (рис. 4 *а, в*). От очага разрушения отходят лучи развития трещины, долом находится на противоположной стороне шпильки в виде выкрашивания вершины витка резьбы.

[9] См. сноску 7.

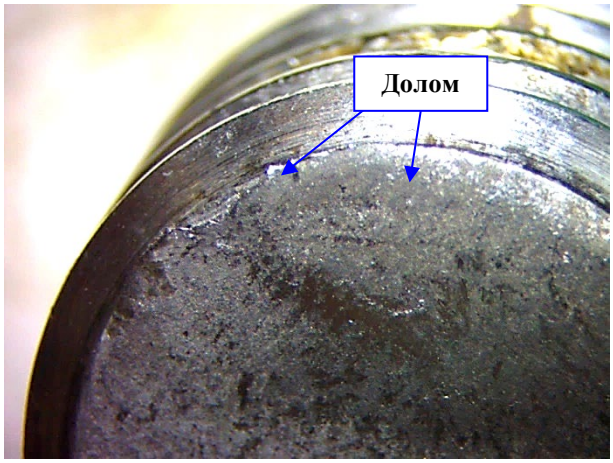
Твердость определялась по Роквеллу и составила: целая часть – 35–39 HRC, разрушенная часть – 29–34 HRC. Класс прочности шпилек определялся по твердости по Роквеллу согласно ГОСТ 1759.4-87[10] «Болты, винты и шпильки. Механические свойства и методы испытаний».

Исходя из полученной твердости, установлено, что класс прочности целой шпильки – 10.9 (35–39 HRC), что соответствует номинальному временному сопротивлению – 1000 Н/мм$^2$, разрушенной шпильки – 9.8 (29–34 HRC), номинальное временное сопротивление составляет 900 Н/мм$^2$. Временное сопротивление разрушенной шпильки на 10 % меньшее, чем целой шпильки класса прочности 10.9.

*а* – общий вид




*б* – очаг




*в* – долом

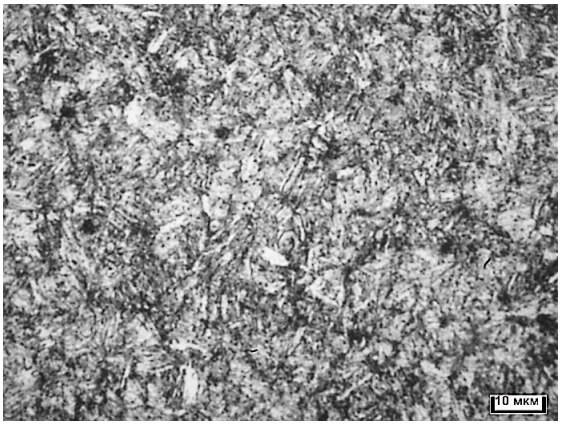
**Рисунок 4. – Морфология излома разрушенной шпильки**

Микроструктура шпилек приведена на рисунке 5.

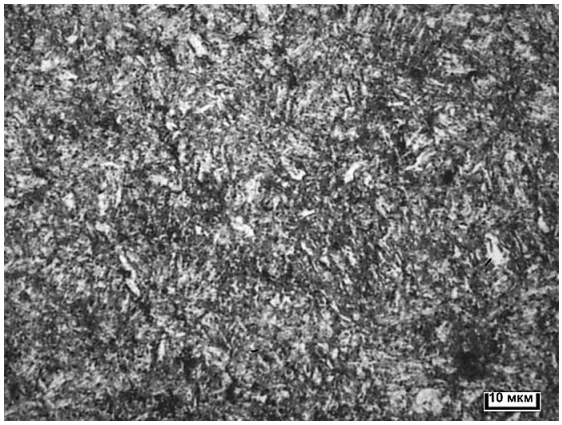
Как видно из рисунка 5, микроструктура шпилек троостосорбитная, полученная в результате закалки с отпуском. Микроструктура разрушенной шпильки отличается от целой, большим количеством сорбитной составляющей в троостосорбите, на что также указывает меньшая, по сравнению с целой, твердость.

Причиной разрушения шпильки является развитие преждевременных усталостных явлений в материале шпильки с классом прочности 9.8, вызванных превышением предела прочности при эксплуатации.

[10] Болты, винты и шпильки. Механические свойства и методы испытаний: ГОСТ 1759.4-87. – Введ. 01.01.1989. – М.: Стандартинформ, 20106. – 17 с.




*а* – целая




*б* – разрушенная

**Рисунок 5. – Микроструктура шпилек**

**Исследование причин разрушения кольца замковой опоры (Вишанское месторождение).** Для определения причины разрушения проведен анализ элементного состава, исследование микроструктуры, морфологии излома, измерение твердости.

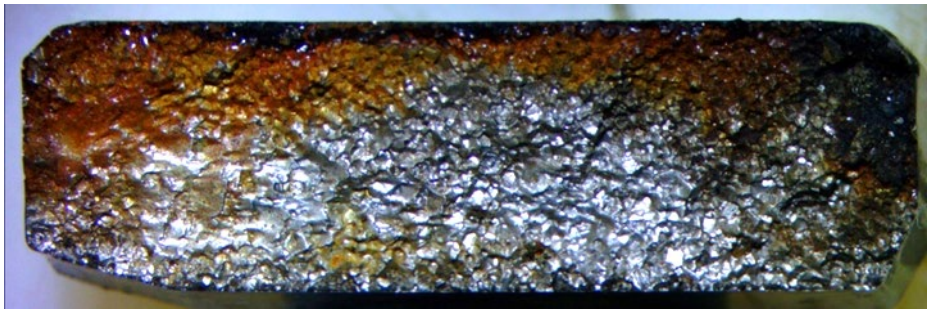
Элементный состав кольца следующий: C – 0,40 %, Cr – 13,5 %, Si – 0,7 %, Mn – 0,3 %, Ni – 0,2 %, Cu – 0,08 %, V – 0,04 %, Ti – 0,03 %, Mo – не более 0,02 %, P – не более 0,02 %, Fe – основа.

В результате исследований установлено, что по элементному составу с учетом погрешности измерений материал образца соответствует стали марки 40Х13 (ГОСТ 5632-2014[11]).

Общий вид образца кольца замковой опоры и морфология излома представлены на рисунке 6.

*а* – общий вид

*б* – общий вид



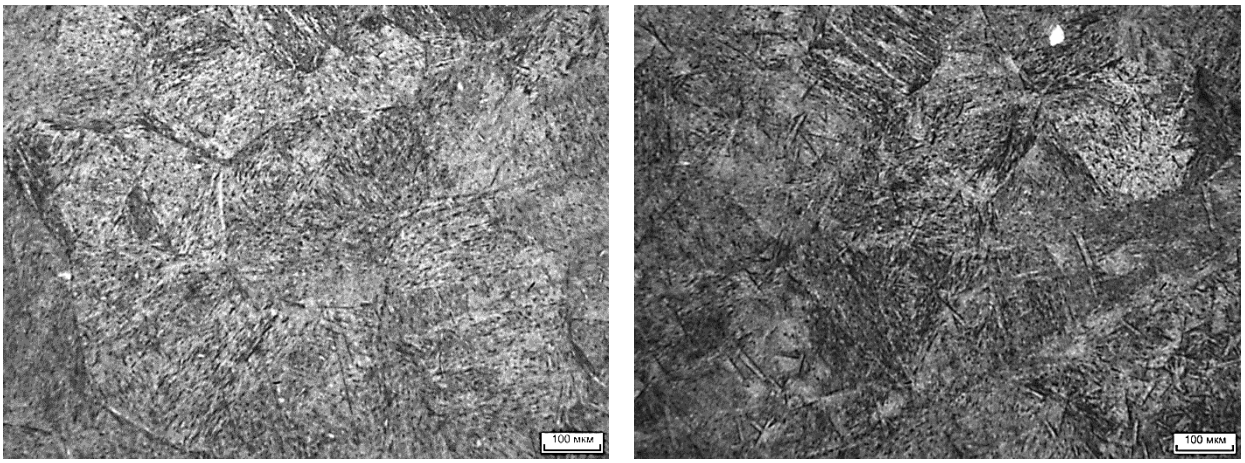
*в* – морфология излома, х50

**Рисунок 6. – Разрушенное кольцо замковой опоры Вишанского месторождения**

[11] Легированные нержавеющие стали и сплавы коррозионностойкие, жаростойкие и жаропрочные: ГОСТ 5632-2014. – Введ. 01.01.2015. – М.: Стандартинформ, 2015. – 54 с.

На рисунке 6 показано, что на боковой поверхности кольца присутствует трещина глубиной на полную толщину образца. Излом крупнокристаллический. Порядка 1/3 части излома окислена и имеет ржавый вид, что указывает на то, что деталь разрушилась не одномоментно, а некоторое время перед разрушением проработала. Развитие трещины происходило по границам зерен.

Микроструктура кольца замковой опоры представлена на рисунке 7.




*а* – под изломом *б* – на расстоянии от излома

**Рисунок 7. – Микроструктура кольца замковой опоры Вишанского месторождения**

Микроструктура крупнозернистая, представляет собой троостомартенсит с карбидами внутри и по границам зерен. Размер аустенитного зерна от 0,2 до 0,4 мм (среднее 0,3 мм), что соответствует 0 баллов зерна по ГОСТ 5639-82[12]. Микроструктура получена в результате закалки с последующим отпуском. Твердость составляет 46-50 HRC.

Определено, что разрушение кольца замковой опоры Вишанского месторождения произошло из-за получения в процессе термообработки (закалки) в материале крупнозернистой микроструктуры, имеющей повышенную хрупкость. Разрушение произошло по границам крупного аустенитного зерна.

**Исследование причин разрушения насосной штанги НШ-19 (Давыдовское нефтяное месторождение).** Элементный состав штанги следующий: C – 0,42 %, S – 0,0068 %, P – 0,01 %, Mn – 1,0 %, Si – 0,25 %, Cr – 1,2 %, Ni – 0,04 %, Cu – 0,05 %, Mo – 0,21 %, V – не более 0,02 %, Fe – основа.

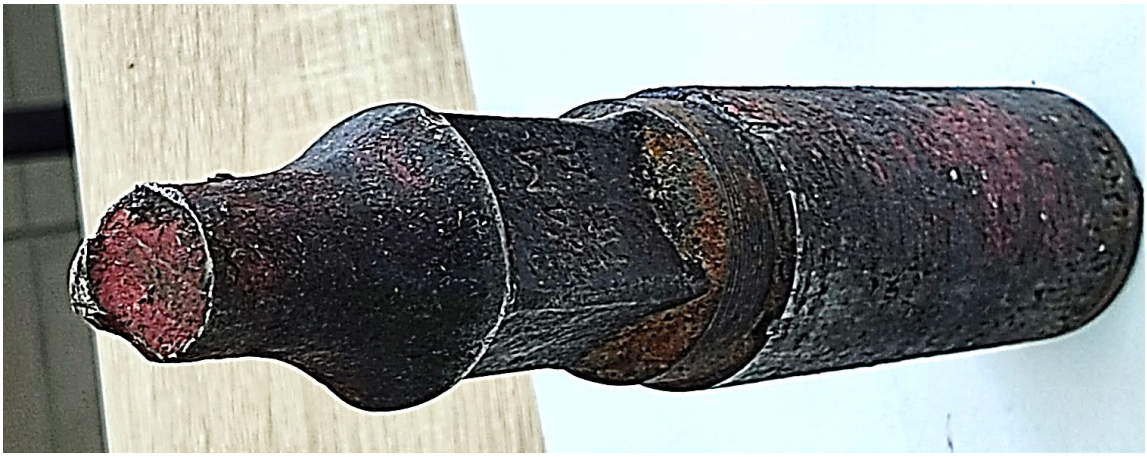
В результате исследований установлено, что по элементному составу с учетом погрешности измерений материал образца соответствует стали марки 40ХГМА (ГОСТ 4543-2016[13]).

Общий вид штанги и морфология излома представлены на рисунке 8, из которого видно, что излом затерт и покрашен краской. Для исследования морфологии излома проводилось удаление краски растворителем. Участки с удаленной краской показали, что на изломе присутствуют затертые бороздки – ступеньки усталости, что свидетельствует об усталостном характере разрушения.

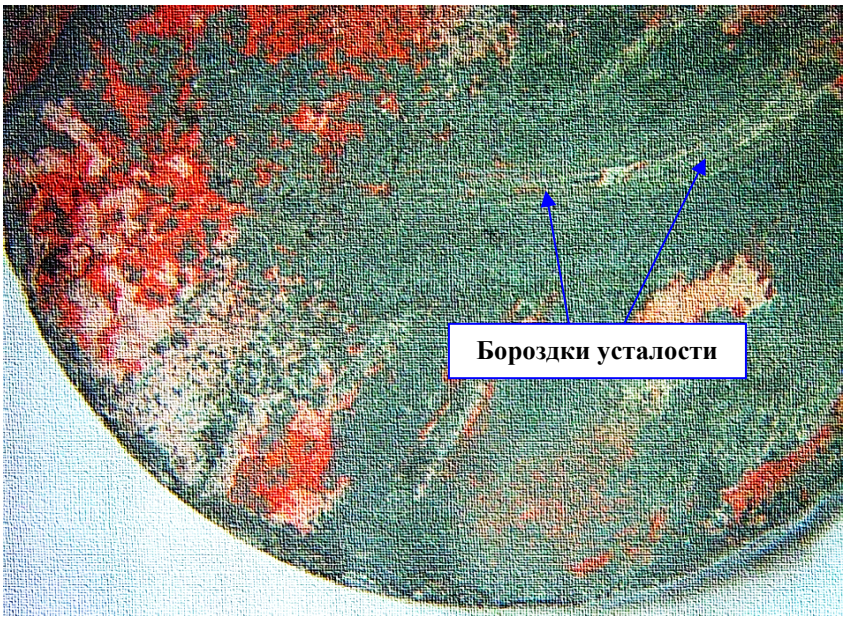
Результаты испытаний на растяжение и ударный изгиб приведены в таблице 4. Проверка на ударный изгиб проводилась по требованиям заказчика.

По механическим свойствам штанга соответствует требованиям класса Д ТУ 3665-020-48416997-2003 (по ТУ предел прочности должен находиться в диапазоне 793–965 МПа, предел текучести – не менее 586 МПа). Твердость по Роквеллу составляет 24-25 HRC.

[12] Стали и сплавы. Методы выявления и определения величины зерна: ГОСТ 5639-82. – Введ. 01.01.1983. – М.: Издательство стандартов, 2003. – 21 с.
[13] См. сноску 7.



*а* – общий вид




*б* – морфология излома

**Рисунок 8. – Фрагмент штанги НШ-19 Давыдовского месторождения**

**Таблица 4. – Механические свойства материала штанги после испытания на растяжение и ударный изгиб**

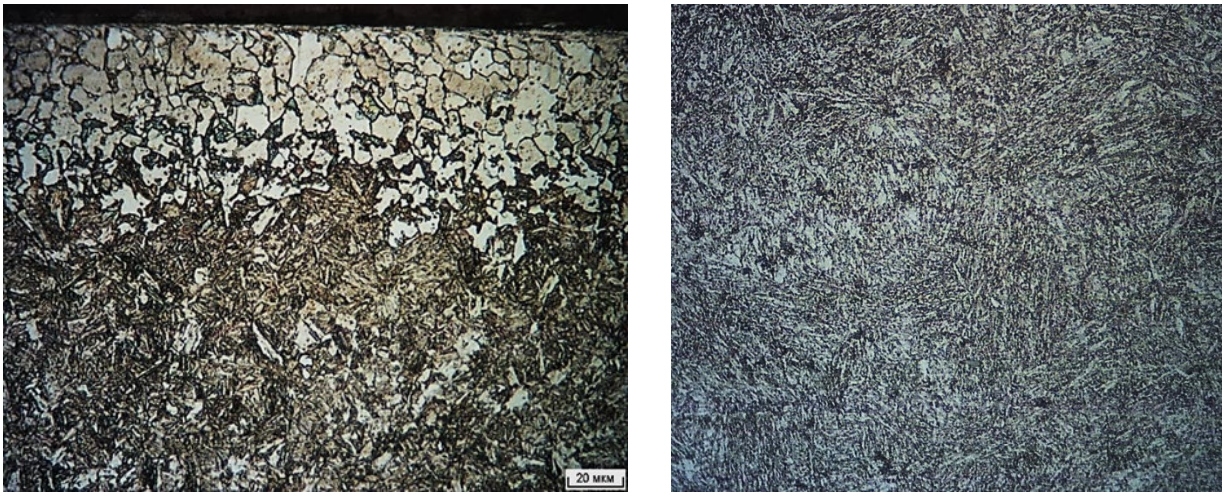
| № образца | Предел прочности, МПа | Предел текучести, МПа | Относительное удлинение, % | Относительное сужение, % | KCU, Дж/см$^2$ |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 917 | 725 | 18,4 | 56,5 | 62 |
| 2 | 913 | 712 | 17,7 | 55,9 | 61 |
| 3 | 918 | 722 | 17,4 | 55,3 | 65 |
| **среднее** | **916** | **720** | **17,8** | **55,9** | **63** |

Микроструктура представлена на рисунке 9. Исследования показали, что у края поверхности присутствует обезуглероженный слой со структурой феррита и сорбита на глубину до 0,1 мм (рис. 9*а*).

Микроструктура штанги представляет собой сорбит (рис. 9*б*). Микроструктура получена в результате закалки с высоким отпуском (улучшения). Размер зерна находится в диапазоне 5–15 мкм (средний 11 мкм, 10 баллов). Размер зерна материала штанги соответствует требованиям ТУ 3665-020-48416997-2003. По ТУ размер зерна должен быть не крупнее 6 баллов (44 мкм).

В результате проведенных исследований образца насосной штанги НШ-19 Давыдовского нефтяного месторождения определено:

– химический состав соответствует требованиям ГОСТ 4543-2016 и ТУ 3665-020-48416997-2003;




*а* – край *б* – сердцевина

**Рисунок 9. – Микроструктура образца насосной штанги НШ-19 Давыдовского нефтяного месторождения**

– механические свойства (предел прочности и предел текучести) соответствуют классу Д по ТУ 3665-020-48416997-2003;

– ударная вязкость для стали 40ХГМА ТУ не регламентируется;

– твердость ТУ не регламентируется и определяется факультативно;

– микроструктура сердцевины – сорбит, получена в результате закалки с высоким отпуском. Микроструктура ТУ не регламентируется. Размер зерна соответствует требованию п. 2.4.18 ТУ 3665-020-48416997-2003;

– присутствует обезуглероженный слой, который ТУ не регламентируется.

Установлено, что разрушение произошло в результате усталостных процессов, происходящих в материале штанги, вызванных превышением предела прочности материала в процессе эксплуатации (предположительно, изгибные напряжения), т.к. химический состав, механические свойства, структура (размер зерна) соответствуют требованиям ГОСТ 4543-2016[14] и ТУ 3665-020-48416997-2003.

**Заключение**

При проходке скважин основными элементами бурильной колонны помимо бурового инструмента (долота) являются бурильные трубы, соединенные с помощью различных деталей (муфты, кольца, замки, шпильки), а также разные вспомогательные детали и узлы (переходники, переводники, калибраторы и т.д.). В процессе бурения происходит периодическое свинчивание-развинчивание составных частей бурильной колонны, что при многократном и длительном воздействии может вызывать разрушение деталей и усложнение процесса бурения скважин.

Было проведено комплексное исследование образцов, разрушенных в процессе бурения деталей бурильной колонны, предоставленных ГПО «Белоруснефть», с целью установления причин их разрушения. Анализ элементного состава, морфологии излома, структуры, механических свойств, твердости разрушенных деталей нефтебурового оборудования, работающих под действием эксплуатационных нагрузок различной степени интенсивности и типов нагружения показали, что наиболее часто встречающимися причинами разрушения являются:

– превышения эксплуатационных нагрузок, о чем свидетельствуют деформации, смятия, наличие трещин;

[14] См. сноску 7.

– технологические дефекты, связанные с нарушением режимов термообработки, приводящие к получению крупнозернистой структуры, имеющей повышенную хрупкость; недостаточная твердость; обезуглероженность поверхности;

– усталостные явления материала, вызываемые знакопеременными (изгибными, крутящими) нагрузками.

## ЛИТЕРАТУРА


1. Венгринович, В. Научный анализ и оценка рисков в системах безопасности / В. Венгринович // Наука и инновации. – 2013. – № 6 (124). – С. 4–7. – EDN: TNCEYH.
2. Кушнаренко, В.М. Анализ причин отказов оборудования и трубопроводов / В.М. Кушнаренко, В.С. Репях, Е.В. Кушнаренко, Е.Ю. Чирков // Вестник Оренбургского государственного университета. – 2010. – № 10 (116). – С. 153–159. – EDN: MVSQGV.
3. Жарский, И.М. Технологические методы обеспечения надежности деталей машин: учебник / И.М. Жарский, И.Л. Баршай, Н.А. Свидунович, Н.В. Спиридонов. – Минск: Вышэйшая школа, 2010. – 336 с. – ISBN 978-985-06-1833-7.
4. Пантелеенко, Ф.И. Методология оценки состояния материала ответственных металлоконструкций / Ф.И. Пантелеенко, А.С. Снарский. – Минск: БНТУ, 2010. – 194 с. – ISBN 978-985-525-570-4.
5. Кабалдин, Ю.Г. Информационные модели структурообразования и усталостного разрушения металлических материалов / Ю.Г. Кабалдин, С.Н. Муравьев // Вестник машиностроения. – 2007. – № 8. – С. 46–50. – EDN: LYDADZ.
6. Махутов, Н.А. Роль механических испытаний в обосновании прочности, ресурса и безопасности / Н.А. Махутов // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2007. – Т. 73, № 9. – С. 56–63. – EDN: KUSZDN.
7. Брандон, Д. Микроструктура материалов. Методы исследования и контроля / Д. Брандон, У. Каплан; пер. с англ. под ред. С.Л. Баженова. – М.: Техносфера, 2004. – 384 с. – ISBN 5-94836-018-0.
8. Ильющенко, А.Ф. Атлас производственных разрушений различных конструкций / А.Ф. Ильющенко, Л.В. Маркова, В.А. Чекан [и др.]. – Минск: Беларуская навука, 2017. – 313 с. – ISBN 978-985-08-2142-3.
9. Фомихина, И.В. Механизмы деградации структуры конструкционных сталей, методы повышения эксплуатационных свойств изделий из них: дис. … д-ра техн. наук: 05.16.09 / Фомихина Ирина Викторовна; Институт порошковой металлургии. – Минск, 2018. – 398 л.
10. Фомихина, И.В. Методы контроля и пути устранения технологических и эксплуатационных дефектов в конструкционных сталях: монография / И.В. Фомихина; Национальная академия наук Беларуси, Институт порошковой металлургии имени академика О.В. Романа. – Минск: Беларуская навука, 2024. – 302 с. – ISBN 978-985-08-3205-4.

# Исследование структуры и свойств конструкционных сталей разрушенных деталей нефтебурового оборудования

# Investigation of the structure and properties of structural steels of destroyed oil drilling equipment parts

***Фомихина Ирина Викторовна***
доктор технических наук,
доцент

Государственное учреждение образования «Университет гражданской защиты Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь», кафедра промышленной безопасности, профессор

Адрес: ул. Машиностроителей, 25, 220118, Беларусь, г. Минск
Email: ivfom@tut.by
SPIN-код: 5660-6815

***Irina V. Fomikhina***
Grand PhD in Technical Sciences,
Associate Professor

State Educational Establishment «University of Civil Protection of the Ministry for Emergency Situations of the Republic of Belarus», Chair of Industrial Safety, Professor

Address: Mashinostroiteley str., 25, 220118, Belarus, Minsk
Email: ivfom@tut.by
ORCID: 0009-0007-2164-412X
ScopusID: 6507443284

***Бирюк Виктор Алексеевич***
кандидат технических наук, доцент

Государственное учреждение образования «Университет гражданской защиты Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь», кафедра промышленной безопасности, заведующий кафедры

Адрес: ул. Машиностроителей, 25, 220118, Беларусь, г. Минск
Email: vikbiruk72@gmail.com
SPIN-код: 5948-1623

***Viktor A. Biryuk***
PhD in Technical Sciences, Associate Professor

State Educational Establishment «University of Civil Protection of the Ministry for Emergency Situations of the Republic of Belarus», Chair of Industrial Safety, Head of the Chair

Address: Mashinostroiteley str., 25, 220118, Belarus, Minsk
Email: vikbiruk72@gmail.com
ORCID: 0000-0002-3110-9557
ScopusID: 6507076955

***Маркова Людмила Владимировна***
кандидат технических наук

Государственное научное учреждение «Институт порошковой металлургии имени академика О.В. Романа», отделение исследований и испытаний материалов, заместитель заведующего отделением

Адрес: ул. Платонова, 41, 220005, Беларусь, г. Минск
Email: lv345lv@gmail.com
SPIN-код: 7946-2117

***Lyudmila V. Markova***
PhD in Technical Sciences

State Scientific Institution «Powder Metallurgy Institute», Materials Research and Testing Department, Deputy Head of the Department

Address: Platonov str., 41, 220005, Belarus, Minsk
Email: lv345lv@gmail.com
ORCID: 0000-0002-3396-9235

DOI: https://doi.org/10.33408/2519-237X.2025.9-1.66 EDN: https://elibrary.ru/GQPYVR

# INVESTIGATION OF THE STRUCTURE AND PROPERTIES OF STRUCTURAL STEELS OF DESTROYED OIL DRILLING EQUIPMENT PARTS

**Fomikhina I.V., Biruk V.A., Markova L.V.**

*Purpose*. Determination of the causes of destruction of oil drilling equipment parts made of structural steels under the influence of operational loads.

*Methods*. The research was carried out on certified equipment from the Testing Center of Powder Metallurgy Institute named after of O.V. Roman accredited by the State Standard of RB (accreditation certificate BY/112 1.0263). The studied samples were provided by the State Production Association «Belorusneft».

*Findings*. The studies of the elemental composition, fracture morphology, structure, mechanical properties, and hardness of oil drilling equipment parts destroyed under the influence of operational loads have been carried out. The causes of the destruction of the casing coupling, stud, lock support ring and pump rod of drilling rigs operated at the largest fields of «Belorusneft» have been established.

*Application field of research.* The research results can be used in industrial safety subjects operating potentially dangerous facilities working under operating loads of varying intensity and loading types in order to increase the industrial safety level.

*Keywords:* oil drilling equipment, drilling rig parts, structure, properties, hardness, fracture morphology, breakdown, heat treatment, industrial safety.

(The date of submitting: January 10, 2025)

## REFERENCES

1. Vengrinovich V. Nauchnyy analiz i otsenka riskov v sistemakh bezopasnosti [Scientific analysis and risk assessment of security systems]. *Nauka i innovatsii*, 2013. No. 6 (124). Pp. 4–7. (rus). EDN: TNCEYH.
2. Kushnarenko V.M., Repyakh V.S., Kushnarenko E.V. Chirkov E.Yu. Analiz prichin otkazov oborudovaniya i truboprovodov [Analysis of causes of equipment and pipeline failures]. Vestnik Orenburgskogo gosudarstvennogo universiteta, 2010. No. 10 (116). Pp. 153–159. (rus). EDN: MVSQGV.
3. Zharskiy I.M., Barshay I.L., Svidunovich N.A., Spiridonov N.V. *Tekhnologicheskie metody obespecheniya nadezhnosti detaley mashin* [Technological methods of ensuring reliability of machine parts]: textbook. Minsk: Vysheyshaya shkola, 2010. 336 p. (rus). ISBN 978-985-06-1833-7.
4. Panteleenko F.I., Snarskiy A.S. *Metodologiya otsenki sostoyaniya materiala otvetstvennykh metallokonstruktsiy* [Methodology for assessing the material condition of critical steel structures]. Minsk: BNTU, 2010. 194 p. (rus). ISBN 978-985-525-570-4.
5. Kabaldin Yu.G. Murav'ev S.N. Informatsionnye modeli strukturoobrazovaniya i ustalostnogo razrusheniya metallicheskikh materialov [Information models of structure formation and fatigue failure of metallic materials]. *Vestnik mashinostroeniya*, 2007. No. 8. Pp. 46–50. (rus). EDN: LYDADZ.
6. Makhutov N.A. Rol' mekhanicheskikh ispytaniy v obosnovanii prochnosti, resursa i bezopasnosti [A role of mechanical tests in substantiation of the strength life time and safety]. *Industrial Laboratory. Diagnostics of Materials*, 2007. Vol. 73, No. 9. Pp. 56–63. (rus). EDN: KUSZDN.
7. Brandon D. Kaplan U. *Mikrostruktura materialov. Metody issledovaniya i kontrolya* [Microstructural Characterization of Materials]. Ed. by S.L. Bazhenov. Moscow: Tekhnosfera, 2004. 384 p. (rus). ISBN 5-94836-018-0.
8. Il'yushchenko A.F., Markova L.V., Chekan V.A., Fomikhina I.V., Koleda V.V. *Atlas proizvodstvennykh razrusheniy razlichnykh konstruktsiy* [Atlas of production failures of various structures]. Minsk: Belaruskaya navuka, 2017. 313 p. (rus). ISBN 978-985-08-2142-3.
9. Fomikhina I.V. *Mekhanizmy degradatsii struktury konstruktsionnykh staley, metody povysheniya ekspluatatsionnykh svoystv izdeliy iz nikh* [Mechanisms of degradation of the structure of structural steels, methods for improving the performance properties of products made from them]. Grand PhD tech. sci. diss.: 05.16.09; Powder Metallurgy Institute. Minsk, 2018. 398 p. (rus).
10. Fomikhina I.V. *Metody kontrolya i puti ustraneniya tekhnologicheskikh i ekspluatatsionnykh defektov v konstruktsionnykh stalyakh* [Methods of control and ways to eliminate technological and operational defects in structural steels]: monograph. Minsk: Belaruskaya navuka, 2024. 302 p. (rus). ISBN 978-985-08-3205-4.

Copyright © 2025 Fomikhina I.V., Biruk V.A., Markova L.V.
This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License.