Нефтегазовое дело. 2025. Т. 23, № 6. С. 263-277. ISSN 2073-0128 (print)

Petroleum Engineering. 2025. Vol. 23. No. 6. P. 263-277. ISSN 2073-0128 (print)

Научная статья

УДК 620.16; 620.18; 620.193
DOI: 10.17122/ngdelo-2025-6-263-277

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ МИКРОСТРУКТУРЫ НАСОСНО-КОМПРЕССОРНЫХ ТРУБ НА ИХ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА

Дмитрий Игоревич Андриянов[1], Жанна Валерьевна Князева[1], Сергей Степанович Петров[1,2], Павел Евгеньевич Юдин[1,3]

[1]ООО «Научно-производственный центр «Самара», Самара, Россия

[2]Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева, Самара, Россия

[3]Самарский государственный технический университет, Самара, Россия

Автор, ответственный за переписку

Жанна Валерьевна Князева, Knyazeva@npcsamara.ru

Аннотация. Насосно-компрессорные трубы (далее — НКТ) в процессе эксплуатации подвергаются комплексным механическим и коррозионным воздействиям, а их надежность при эксплуатации является важной неотъемлемой составляющей безаварийной работы нефтепромыслового оборудования. На ресурс работы НКТ влияют внешние факторы, характеризующие условия эксплуатации (такие как содержание коррозионно-агрессивных газов, общее давление системы, температура, степень обводненности и пр.) и внутренние факторы, характеризующие исполнение и качество используемых труб.

Данная статья посвящена исследованию влияния внутренних факторов, в частности микроструктуры материала НКТ, формирующейся в зависимости от выбранного режима термической обработки и определяющей эксплуатационные свойства изделия, от которых зависит надежность и ресурс НКТ, что особенно важно при эксплуатации в осложненном фонде скважин. Основанием для исследования послужила негативная статистика по отказам НКТ группы прочности N80 тип Q, изготовленных в соответствии с локальными нормативными документами производителей, которые формально представлены как дополнения к ГОСТ 31446-2017 «Трубы Стальные обсадные и насосно-компрессорные для нефтяной и газовой промышленности. Общие технические условия», а фактически — противоречат ему и содержат требования, отличные от стандарта.

В статье рассмотрены требования стандартов и локальных документов для НКТ группы прочности N80 тип Q, а также проведен анализ исследований причин отказов НКТ данной группы прочности. Экспериментально исследовано влияние вида термообработки и микроструктуры материала НКТ на их механические свойства и коррозионную стойкость, в частности на стойкость к динамическим механическим воздействиям и сульфидному коррозионному растрескиванию под напряжением.

Проведение исследований в данной области является актуальной и перспективной задачей, направленной на решение проблем низкой наработки на отказ нефтепромыслового оборудования и преждевременного их выхода из строя, в частности НКТ группы прочности N80 тип Q при эксплуатации в осложненных условиях. Кроме того,

Ключевые слова

насосно-компрессорные трубы; эксплуатация; ресурс; микроструктура; механические свойства; коррозионная стойкость; сульфидное коррозионное растрескивание под напряжением

© Андриянов Д.И., Князева Ж.В., Петров С.С., Юдин П.Е., 2025

дополнительные исследования в данной области, включающие изучение зависимостей эксплуатационных характеристик от вида термообработки и особенностей микроструктуры, а также комплексное материаловедческое изучение преждевременных причин отказов оборудования позволяют выявлять первопричины, что в конечном итоге способствует принятию и проведению своевременных и, что самое главное, правильных корректирующих мероприятий, направленных на оптимизацию и повышение эффективности использования оборудования.

Для цитирования
Андриянов Д.И., Князева Ж.В., Петров С.С., Юдин П.Е. Исследование влияния микроструктуры насосно-компрессорных труб на их эксплуатационные свойства // Нефтегазовое дело. 2025. Т. 23, № 6 С. 263-277. https://doi.org/10.17122/ngdelo-2025-6-263-277.

Original article

INVESTIGATION OF THE INFLUENCE OF THE MICROSTRUCTURE OF TUBING ON THEIR OPERATIONAL PROPERTIES

Dmitry I. Andriyanov[1], Zhanna V. Knyazeva[1], Sergey S. Petrov[1,2], Pavel E. Yudin[1,3]

[1]Scientific-Production Center «Samara» LLC, Samara, Russia
[2]Samara National Research University named after Academician S.P. Korolev, Samara, Russia
[3]Samara State Technical University, Samara, Russia

Corresponding author
Zhanna V. Knyazeva, Knyazeva@npcsamara.ru

Abstract. tubing subjected to various complex mechanical and corrosive effects during their operation, and their service life is an important integral part of the reliable operation of oilfield equipment. The service life of tubing is influenced by external factors that characterize the operating conditions (such as the presence of corrosive gases, the overall pressure of the system, temperature, water cut, etc.) and internal factors that determine the design and quality of the pipes used.
This article is devoted to the study of the influence of internal factors, in particular, the microstructure of the tubing material, which forms the performance properties of the product, on which the resource of the tubing directly depends. The basis for the study was the negative statistics on failures of N80 type Q tubing of the strength group, manufactured according to State Standard 31446 and additional internal local regulatory documents of manufacturers, which allow deviations from the requirements of State Standard for N80 type Q tubing in terms of heat treatment.
The article discusses the requirements of standards and local documents for N80 type Q tubing, and analyzes the causes of failures in this type of tubing. The article experimentally studies the effect of heat treatment and microstructure on the performance, mechanical and corrosion resistance, as well as resistance to dynamic mechanical stress and stress corrosion cracking.
Conducting research in this area is an urgent and promising task aimed at solving the problems of low failure rates of oilfield equipment and their premature failure, particularly of N80 type Q tubing in difficult operating conditions. In addition, additional research in this area, including the study of the dependence of performance characteristics on the type of heat treatment and the features of the microstructure, as well as a comprehensive materials science study of the premature causes of equipment failures, allows for the identification of the root causes, which ultimately contributes to the adoption and implementation of timely and, most importantly, correct corrective measures aimed at optimizing and improving the efficiency of equipment use.

Ключевые слова

tubing; exploitation; resource; microstructure; mechanical properties; corrosion resistance; stress corrosion cracking

For citation
Andriyanov D.I., Knyazeva Zh.V., Petrov S.S., Yudin P.E. Issledovanie vliyaniya mikrostruktury nasosno-kompressornyh trub na ih ekspluatacionnye svojstva // [Investigation of the influence of the microstructure of tubing on their operational properties] // *Neftegazovoe delo — Petroleum Engineering*, 2025, Vol. 23, No. 6. pp. 263-277. [in Russian]. https://doi.org/10.17122/ngdelo-2025-6-263-277.

Введение

Достаточно широкое распространение в отрасли получили НКТ группы прочности N80 тип Q. Изготовление насосно-компрессорных труб группы прочности N80 тип Q осуществляется в соответствии с межгосударственным стандартом ГОСТ 31446-2017. Кроме того, требования к насосно-компрессорным трубам группы прочности N80 тип Q отражены в отраслевых стандартах СТО ИНТИ S.30.12-2024 «Трубы стальные обсадные и насосно-компрессорные. Общие технические условия» и СТО ИНТИ S.100.31-2023 «Трубы стальные обсадные и насосно-компрессорные для нефтяной и газовой промышленности. Общие технические условия».

Стандарт ГОСТ 31446-2017 распространяется на бесшовные и электросварные трубы, которые в зависимости от условий эксплуатации могут быть изготовлены с определенным уровнем требований (PSL-1, PSL-2, PSL-3). Базовый уровень требований PSL-1 сопоставим с уровнем требований ГОСТ 633-80 «Трубы насосно-компрессорные и муфты к ним. Технические условия», продукцию которого (НКТ, муфты) применяют, как правило, на скважинах неосложненного фонда. Более высокие уровни требований PSL-2 и PSL-3 позволяют дополнительно учесть осложняющие факторы при эксплуатации: эксплуатацию при низких температурах и/или эксплуатацию в сероводородсодержащих средах. Соблюдение требований ГОСТ 31446-2017 обеспечивает получение необходимых свойств НКТ, определяющих возможность их безаварийной эксплуатации и способствующих снижению влияния осложняющих факторов.

По ГОСТ 31446-2017 бесшовные НКТ группы прочности N80 тип Q должны быть подвергнуты объемной термической обработке по режиму «закалка + отпуск» или «прерванная закалка с последующим контролируемым охлаждением».Материальное исполнение НКТ базового уровня PSL-1 ограничивается требованиями к химическому составу, а именно к содержанию вредных примесей в стали (содержание серы и фосфора не должно превышать 0,030 % каждого), а также требованиями к механическим свойствам при растяжении. Для группы прочности N80 тип Q предел прочности при растяжении должен быть не ниже 689 МПа, предел текучести должен находиться в диапазоне от 552 до 758 МПа. Значения требуемого относительного удлинения при растяжении должно составлять не менее 12 %. Для уровня требований PSL-1 НКТ должны проходить испытаний на ударных изгиб при этом минимальные значение работы удара для полноразмерных продольных образцов должно составлять не менее 27 Дж. Для уровня требований PSL-2 при проведении испытаний по определению ударной вязкости вводится дополнительное требований по содержанию доли вязкой составляющей (ДВС) в изломе — не менее 75 %. При условии обеспечения технологией производства труб регламентированной (значений) работы удара и ДВС и невозможности изготовления образцов наименьшего размера ГОСТ 31446-2017 допускает отсутствие контроля перечисленных параметров. Требованиями ГОСТ 31446-2017 регламентированы минимальные расчетные толщины стенки труб, необходимых для изготовления образцов на ударный изгиб. Если рассматривать сортамент НКТ, то минимальная расчетная толщина стенки труб, необходимая для изготовления продольных образцов ½ размера должна составлять от 6,22 до 6,97 мм (в зависимости от наружного диаметра), что исключает возможность контроля данного параметра для НКТ с номинальной толщиной стенки 5,51 мм. При этом, как упоминалось ранее, требуемый уровень вязко-пластических свойств должен быть гарантирован производителем.

Уровень требований PSL-3 по ГОСТ 31446-2017 позволяет учесть возможность эксплуатации в сероводородсодержащих средах и для определенных групп регламентирует проведение испытаний на стойкость к сульфидному коррозионному растрескиванию под напряжением (СКРН) по NACE TM0177-2016. Уровень требований PSL-3 для НКТ группы прочности N80 тип Q достигается путем соблюдения требований к термической обработке, поверхностной

твердости, контролю толщины стенки, неразрушающему контролю наружной и внутренней поверхности для выявления дефектов и неразрушающему контролю концов труб после окончательной отделки. Для группы прочности N80 тип Q испытания на стойкость к СКРН требованиями ГОСТ 31446-2017 не предусмотрены, при этом стандарт ГОСТ Р 53678-2009 «Нефтяная и газовая промышленность. Материалы для применения в средах, содержащих сероводород, при добыче нефти и газа. Часть 2. Углеродистые и низколегированные стали, стойкие к растрескиванию, и применению чугунов» допускает применение НКТ группы прочности N80 тип Q в средах, содержащих 0,1–1,0 кПа H_2S при 3,5–6,5 pH и рабочей температурой среды до 80 ºС при условии наличия положительных результатов на стойкость к СКРН.

В отраслевых стандартах СТО ИНТИ S.30.12-2024 и СТО ИНТИ S.100.31-2023 в отношении НКТ группы прочности N80 тип Q регламентированы аналогичные ГОСТ 31446-2017 требования к термической обработке, химическому составу, механическим и вязко-пластическим свойствам.

Помимо основных межгосударственных и отраслевых стандартов изготовление и поставку НКТ группы прочности N80 тип Q осуществляют в соответствии с локальными нормативными документами нефтяных компаний (ЕТТ, СТО и пр.) или изготовителей в виде технических соглашений или протоколов, заключенных между изготовителем и потребителем НКТ. На сегодняшний день существует ряд локальных нормативных документов поставщиков и потребителей, которые формально позиционируются как дополнения к требованиям ГОСТ 31446-2017, фактически — противоречат ему и содержат требования, отличные от стандарта. Главным образом, эти противоречия отражаются в части требований к термической обработке НКТ группы прочности N80 тип Q: локальными нормативными документами снимаются требования по обязательной термической обработке по режиму «закалка+отпуск» (или «прерванная закалка с последующим контролируемым охлаждением»), при этом вводится формулировка, позволяющая изготавливать трубы с термической обработкой по режимам завода-изготовителя, обеспечивающей получение максимально возможного уровня механических свойств. Другими словами, допускается поставка труб без отдельной термической обработки в состоянии с «прокатного нагрева». Этот факт, несомненно, способствует снижению стоимости продукции ввиду снижения трудозатрат на ее изготовления, при этом, по мнению авторов, может в значительной степени отразиться на свойствах изготавливаемой продукции.

Цель настоящего исследования заключается в анализе влияния режимов термической обработки и микроструктуры металла НКТ группы прочности N80 тип Q на их механические и коррозионные свойства.

Материалы и методы

В последние годы наблюдается увеличение числа отказов НКТ группы прочности N80 тип Q, изготовленных в соответствии с требованиями локальных нормативных документов потребителя и/или изготовителя с уровнем требований PSL-2 по ГОСТ 31446-2017, который предполагает возможность эксплуатации изделия при низких температурах. При этом требования локальных нормативных документов допускает изготовление и поставку труб без отдельной термической обработки, регламентированной ГОСТ 31446-2017.

В рамках выполнения договорных работ в ООО «НПЦ «Самара» было проведено несколько десятков экспертиз по определению причин разрушения НКТ Ø73,02×5,51 мм группы прочности N80 тип Q. В таблице 1 представлены сведения случайной выборки исследованных НКТ.

По данным анализа аварийные НКТ имеют различную наработку на отказ (от 28 до 522 суток), при этом все трубы имеют идентичные хрупкий характер и область локализации разрушения (рисунок 1) — поперечный излом по 1–2 виткам от сбега резьбы (в одном случае по 3–6 виткам от сбега). Идентичность исполнения авариных НКТ, в частности проводимом при производстве режиме термообработки и формируемой при ней микроструктуре, а также схожести локализации и характера разрушений говорит о системности наблюдаемого вида разрушения.

Металл всех аварийных образцов НКТ имеет феррито-перлитную структуру с пластинчатой формой цементита в перлитной составляющей. В данном случае строение микроструктуры металла характерно для вида термической обработки «нормализация с прокатного нагрева». Для оценки вязкопластиче-

Таблица 1. Сведения об аварийных НКТ группы прочности N80 тип Q

Table 1. Data on emergency tubing of strength group N80 type Q

Объект	Наработка, сутки	Уровень требований по ГОСТ 31446-2017	Характер и локализация повреждений	Тип структуры	ДВС, %	Причина разрушения
1	258	PSL-2	Поперечный излом по 1-2 виткам от сбега резьбы	Феррито-перлитная	0	Низкий уровень вязко-пластических свойств при динамических и эксплуатационных нагрузках в процессе эксплуатации
2	258	PSL-2			0	
3	393	PSL-2			0	
4	148	PSL-2			0	
5	406	PSL-2			0	
6	34	PSL-2	Поперечный излом по 3-6 виткам от сбега резьбы		0	
7	522	PSL-2	Поперечный излом по 1-3 виткам от сбега резьбы		0	
8	163	PSL-2	Поперечный излом по 1-2 виткам от сбега резьбы		0	
9	92	PSL-2			0	
10	28	PSL-2			0	
11	68	PSL-2			0	

Примечание:
[1] Исследованные НКТ эксплуатировались не в сероводородсодержащих средах, что исключает возможность развития разрушения по механизму сульфидного коррозионного растрескивания под напряжением (СКРН).
[2] Исследованные НКТ изготовлены в соответствии с требованиями локальных нормативных документов с уровнем свойств PSL-2 по стандарту ГОСТ 31446-2017.



а) б)

а) область локализации повреждений;
б) поверхность излома

a) damage localization area;
b) fracture surface

Рисунок 1. Характерный вид повреждений аварийных НКТ

Figure 1. Typical appearance of emergency tubing damage

ских свойств проводились дополнительные исследования металла аварийных НКТ на ударную вязкость. Для проведения исследований изготовлялись образцы с V-образным надрезом максимально возможной толщиной (для стенки 5,51 мм) — 4,88 мм. Известно [1, 2], что энергия разрушения зависит от геометрии образца, его размера и типа концентратора. Следовательно, оценить соответствие работы удара металла аварийных образцов требованиям ГОСТ 31446-2017 не представляется возможным. При этом прямая связь размера образца с характером излома отсутствует. Так в работе [2] показано, что после испытаний на ударную вязкость поверхность излома полноразмерным и уменьшенных образцов имеет идентичное строение, что позволяет нам оценить долю вязкой составляющей аварийных НКТ. По результатам исследований доля вязкой составляющей для всех исследованных образцов НКТ составляет 0 % исвидетельствует о низком уровне вязкопластических свойств металла НКТ, которые при воздействии эксплуатационных нагрузок становятся

причиной развития хрупкого разрушения металла в зоне резьбового соединения.

Как известно, механические и коррозионные свойства сталей в значительной степени определяются их химическим составом и микроструктурой. Согласно литературным данным [3-12], различные режимы термической обработки одной и той же стали обеспечивают формирование принципиально различных типов микроструктур, что напрямую отражается на свойствах материала. В работах [3, 4] установлено, что необходимые характеристики трубных сталей по прочности, вязкости, трещиностойкости, хладостойкости и коррозионной стойкости не могут быть достигнуты при наличии ферритно-перлитных структур. В этой связи для обеспечения необходимых эксплуатационных показателей применяются термически обработанные стали с формированием более дисперсных структур. Как показывают исследования [4, 7, 12], их получение возможно при улучшении (закалке с последующим высоким отпуском) либо в результате промежуточного (бейнитного) превращения переохлаждённого аустенита. Результаты проведённых исследований аварийных НКТ наглядно подтверждают низкий уровень вязко-пластических свойств стали с феррито-перлитной структурой. Проведение комплексного анализа причин снижения наработки нефтепромыслового оборудования и его преждевременного выхода из строя, включающего изучение зависимостей эксплуатационных характеристик от вида термообработки и особенностей микроструктуры, представляет собой актуальную и перспективную задачу, направленную в конечном итоге на оптимизацию и повышение эффективности использования оборудования.

В качестве объектов исследования использовались фрагменты НКТ Ø73,02×5,51 мм группы прочности N80 тип Q с уровнем требований PSL-2 с заводской термической обработкой по различным режимам:

— образец №1 — термическая обработка по режиму «закалка + отпуск»;

— образец №2 — термическая обработка по режиму «нормализация с прокатного нагрева».

Определение химического состава металла НКТ осуществлялось с использованием оптико-эмиссионном спектрометра «ДФС-500Н». Механические свойства при одноосном растяжении покрытия определялись при температуре плюс 20 ºС на двух плоских пятикратных образцах по ГОСТ 10006-80 с использованием разрывной машины ТРМ-П 200 С1 Tochline. Испытания на ударный изгиб проводились по ГОСТ 9454 при температуре минус 0 ºС на трех продольных образцах с V-образным концентратором (KCV), отобранных от гладкой части НКТ, с помощью маятникового копра «TEJBS-300». Определение стойкости к сульфидному коррозионному растрескиванию под напряжением осуществлялось по NACE TM 0177 (Метод С) на трех образцах при напряжении 80 % от минимального гарантированного предела текучести. Исследование микроструктуры металла образцов осуществлялось на металлографических шлифах с помощью растрового электронного микроскопа TESCAN VEGA3 SBH с приставкой для проведения энергодисперсионного анализа «Oxfordinstruments x-act».

Результаты

По результатам исследований металл исследуемых образцов НКТ имеет практически идентичный химический состав, который удовлетворяет требованиям ГОСТ 31446-2017 по содержанию серы и фосфора. Химический состав металла образцов представлен в таблице 2.

Металл НКТ образца №1, термообработанного по режиму «закалка+отпуск», имеет однородную по толщине стенки трубы мелкозернистую микроструктуру, представленную феррито-карбидной смесью, соответствую-

Таблица 2. Химический состав металла исследуемых НКТ

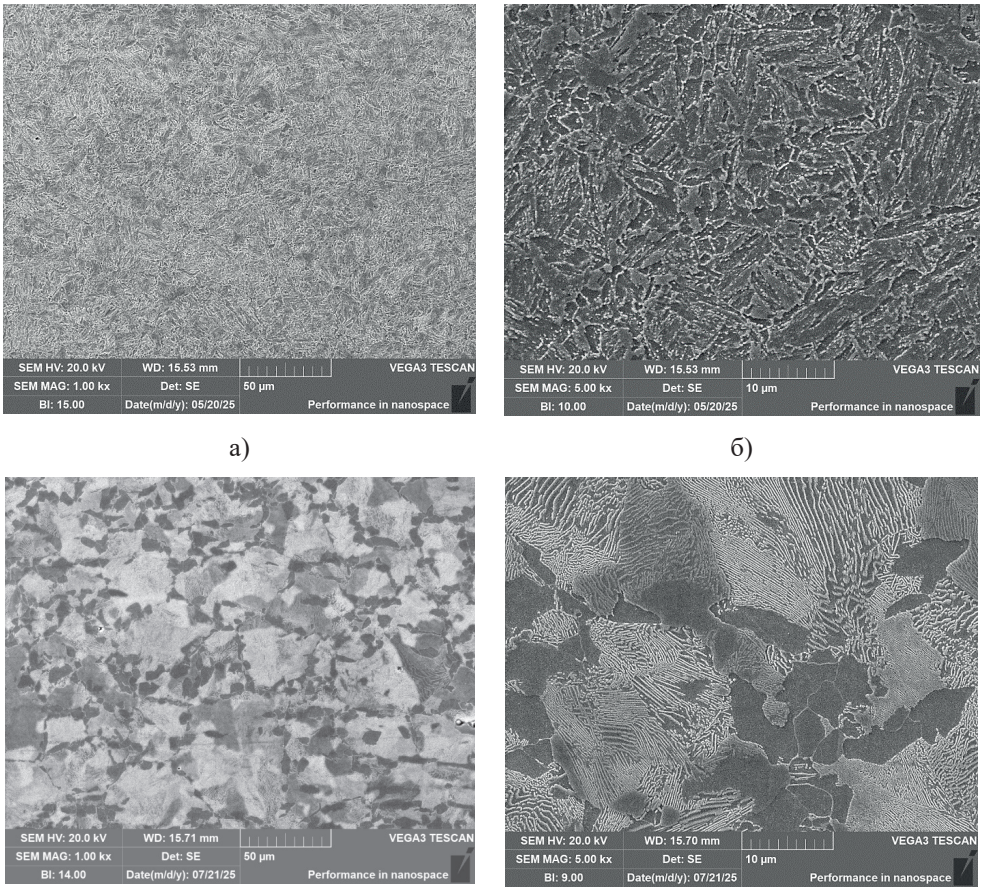
Table 2. Chemical composition of the analyzed tubing metal

Измерения	Массовая доля элементов, %									
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu	Al	V
Образец №1	0,40	0,57	1,33	0,008	0,006	0,13	0,20	0,16	0,02	0,10
Образец №2	0,41	0,39	1,30	0,010	0,006	0,09	0,11	0,15	0,02	0,11
Требования ГОСТ 31446-2017										
N-80 тип Q	—	—	—	≤0,030	≤0,030	—	—	—	—	—

щей сорбиту отпуска. Карбидная фаза подверглась сфероидизациии коагуляции, представлена мелкодисперсной округлой формой, равномерно распределенной в ферритной матрице. Размер ферритного зерна соответствует 11 номеру по ГОСТ 5639-82 (рисунок 2, а, б). Микроструктура образца НКТ №2 с термической обработкой «нормализация с прокатного нагрева» значительно отличается распределением фаз и размером зерна, представлена крупнозернистой феррито-перлитной микроструктурой с пластинчатой формой цементита в перлитных зернах. Размер ферритного зерна соответствует 6 номеру по ГОСТ 5639-82 рисунок 2 в, г).

Результаты механических свойств при растяжении исследуемых образцов приведены в таблице 3. Оба режима термической обработки («закалка + отпуск» и «нормализация с прокатного нагрева») НКТ обеспечивают получение механических свойств при растяжении (предел прочности, предел текучести, относительное удлинение), соответствующих группе прочности N80 тип Q по ГОСТ 31446-2017. При этом, значения показателя предела прочности металла НКТ с термической обработкой «нормализация с прокатного нагрева» (образец №2) выше на 146 в абсолютных и на 19 % в относительных единицах, по сравнению с образцом №1, термообработанного по режиму «закалка + отпуск».

Результаты испытаний на ударный изгиб (таблица 4) при температурах 0 и минус 20 ºС свидетельствуют о том, что уровень ударной вязкости металла НКТ образца №2 после термической обработки «нормализация с прокатного нагрева» более, чем в 4 и 5 раз ниже, при температурах испытаний 0 и минус 20 ºС,



а) б)

в) г)

а) образец №1, увеличение х1000; б) образец №1, увеличение х5000;
в) образец №2, увеличение х1000; г) образец №2, увеличение х5000

a) sample No. 1, magnification x1000; b) sample No. 1, magnification x5000;
c) sample No. 2, magnification x1000; d) sample No. 2, magnification x5000

Рисунок 2. Микроструктура металла НКТ

Figure 2. Tubing metal microstructure

Таблица 3. Свойства металла НКТ при испытании на растяжение

Table 3. Properties of tubing metal during tensile testing

Маркировка		Предел прочности, $\sigma_в$	Предел текучести, $\sigma_т$	Относительное удлинение
		МПа		%
Образец №1	1	784,0	692,0	20,0
	2	784,0	681,0	24,0
	Среднее	784,0	686,5	22,0
Образец №2	1	930,0	660,0	21,0
	2	930,0	660,0	21,0
	Среднее	930,0	660,0	21,0
Требования ГОСТ 31446-2017 для группы прочности N-80 тип Q		Не менее 689,0	552,0-758,0	Не менее 12,0

соответственно, относительно металла НКТ образца №1, термообработанного по режиму «закалка + отпуск». При этом для обеих температур испытания ДВС в изломе ударных образцов у образца №2 составляет 0 % (рисунок 3), что не соответствует требованиям ГОСТ 31446-2017 для уровня требований PSL-2.

Обсуждение

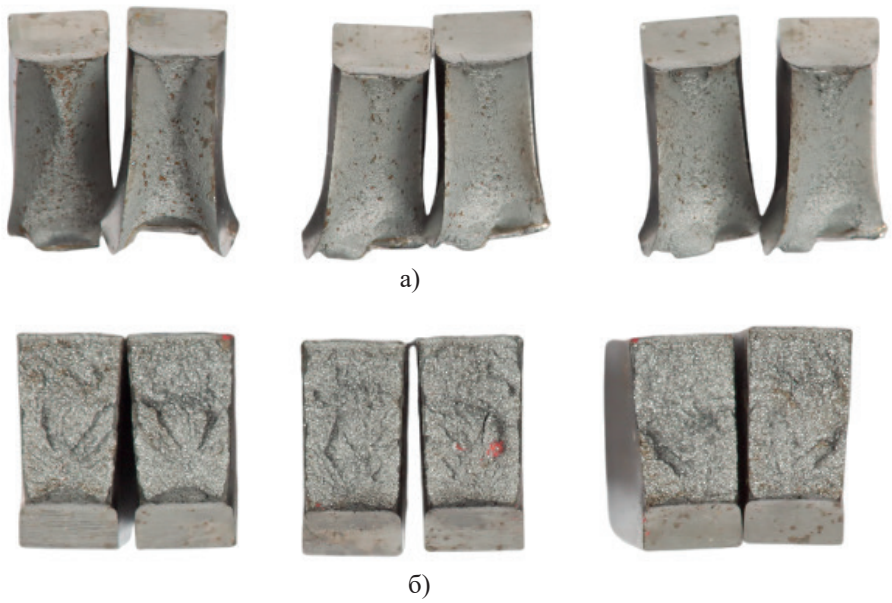
Поверхности изломов, исследуемых образцов, имеют классическое строение, характерное для вязкого (образец №1) и хрупкого (образец №2) механизма разрушения (рисунок 3). Поверхности излома образцов №1 имеют волокнистое строение, характеризуются матовой поверхностью без металлического блеска, ДВС составляет 100 %. Поверхности изломов образцов №2 отличаются блестящей поверхностью, имеют кристаллическое грубое строение без видимых признаков пластической деформации, ДВС составляет 0 %.

На рисунках 4, 5 представлена микроструктура поверхности изломов образцов №1 и №2 после испытаний на ударный изгиб при температуре 0 ºС. В первом случае образец №1 имеет «чашечное» строение излома, образуемого совокупностью многочисленных отдельных ямок, характерное для вязкого разрушения (рисунок 4, а, в, д). Поверхность хрупкого излома образца №2 представлена крупными транскристаллитными фасетками скола со ступеньками в виде ручьистых узоров (рисунок 4, б, г, е). Микростроение поверхности изломов образцов №1 и №2 свидетельствует о том, что разрушение протекало при внутри зеренном развитии трещины.

Таблица 4. Свойства металла НКТ при испытании на ударный изгиб

Table 4. Properties of tubing metal during impact bending test

Маркировка		Ударная вязкость, $KCV^{0°C}$, Дж/см^2	Доля вязкой составляющей^{0ºC}, %	Ударная вязкость, $KCV^{-20°C}$, Дж/см^2	Доля вязкой составляющей$^{-20ºC}$, %
Образец №1	1	153,5	100	145,6	100
	2	171,7	100	156,3	100
	3	186,9	100	147,7	100
	Среднее	170,7	100	149,9	100
Образец №2	1	35,3	0	28,6	0
	2	39,2	0	25,2	0
	3	51,3	0	28,9	0
	Среднее	41,9	0	27,6	0
Требования ГОСТ 31446-2017для группы прочности N-80 тип Q, PSL-2		—	Не менее 75	—	—



а)

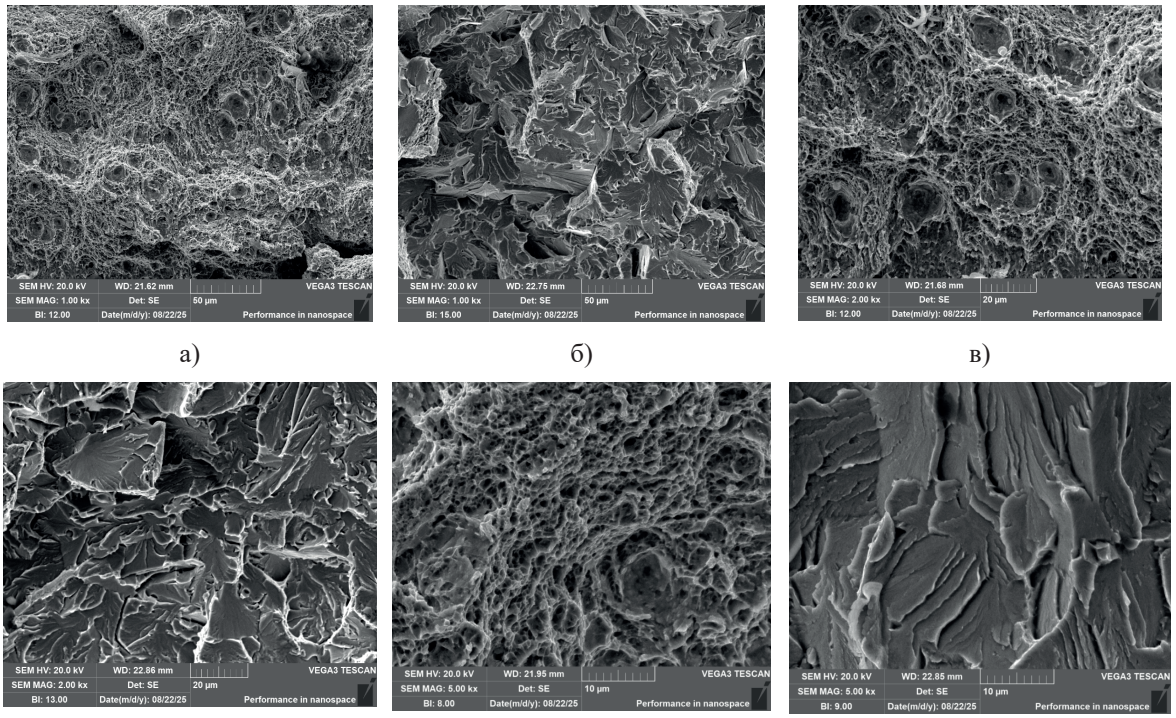
б)

а) образец №1;
б) образец №2

a) sample no. 1;
b) sample no. 2

Рисунок 3. Поверхности изломов образцов после испытаний на ударный изгиб при температуре испытания 0 °С

Figure 3. Fracture surfaces of samples after impact bending tests



а) б) в)

г) д) е)

а) образец №1, увеличение х1000; б) образец №2, увеличение х1000; в) образец №1, увеличение х2000; г) образец №2, увеличение х2000; д) образец №1, увеличение х5000; е) образец №2, увеличение х5000

a) sample No. 1, magnification x 1000; b) sample No. 2, magnification x 1000;
c) sample No. 1, magnification x 2000; d) sample No. 2, magnification x 2000;
e) sample No. 1, magnification x 5000; f) sample No. 2, magnification x 1000

Рисунок 4. Микроструктура поверхности излома

Figure 4. Microstructure of the fracture surface

Дополнительно, для оценки влияния типа структуры металла формируемой при различных режимах термической обработки было проведено исследование металла НКТ на стойкость к сульфидному коррозионному растрескиванию под напряжением (СКРН). Испытания проводились на образцах в виде С-колец по стандарту NACE TM0177-2016 (метод С). Продолжительность испытаний составляла 720 часов.

По результатам испытаний выдержка образцов в испытательной среде привела к образованию трещин на поверхности образцов №1 и № 2 (таблица 5). Однако внешний вид образцов после испытаний (рисунок 5) и результаты микроструктурных исследований свидетельствуют о различной степени интенсивности протекания процесса коррозионного растрескивания у образцов с разной микроструктурой.

На наружной поверхности С-колец образца №1 после выдержки в течение 720 часов наблюдается образование многочисленных неглубоких микротрещин, максимальной глубиной, в исследуемом сечении, 148 мкм (0,15 мм) (рисунки 6, а, 7).

С-кольца образца №2 покрыты плотным слоем продуктов коррозии. Основная трещина С-колец образца №2 локализована в центральной части, в области максимальной концентрации напряжений, и распространяется перпендикулярно приложенной нагрузке. Степень распространения трещины, после выдержки в течение 720 часов, кратно превышает показатели образца №1. Максимальная глубина трещина, в исследуемом сечении, составляет 4257 мкм (4,26 мм). Также наблюдается образование множества вторичных трещин в структуре образца № 2, ориентированных как в продольном, так и поперечном, относительно основной магистральной трещины, направлении (рисунки 6, б, 8).

Таким образом, по результатам комплексного лабораторного исследования экспериментально подтверждена существенная зависимость эксплуатационных характеристик НКТ от вида термообработки и особенностей микроструктуры. Наиболее предпочтительной с точки зрения эксплуатационной надежности, особенно в условиях осложненного фонда является мелкодисперсная микроструктура с зернистой формой цементита, равномерно распределённой в матрице, формирующейся при термической обработки по режиму «закалка + высокий отпуск» по отношению с крупнозернистой ферритно-перлитной микроструктурой с пластинчатым цементитом, формирующейся при термической обработке «нормализация с прокатного нагрева»», имеющей пониженные свойства в части стойкости к динамическим механическим воздействиям и сульфидному коррозионному растрескиванию под напряжением.

Таблица 5. Результаты испытаний на стойкость металла НКТ к СКРН

Table 5. Test results for tubing metal resistance to oil spill response

Маркировка	№ образца	Пороговое напряжение при коррозионном растрескивании, % от $\sigma_{тmin}$	Минимальный предел текучести, $\sigma_т$, МПа	Продолжительность испытаний, ч	Результат
Образец №1	1	80	552	720	Трещины
	2				Трещины
	3				Трещины
Образец №2	1	80	552	720	Трещины
	2				Трещины
	3				Трещины



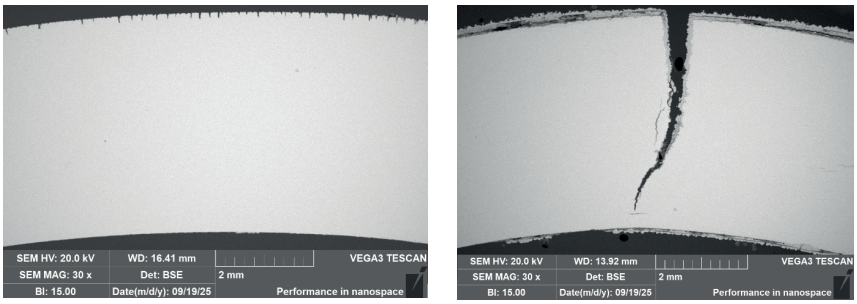
а) б)

а) образец №1;
б) образец №2

a) sample no. 1;
b) sample no. 2

Рисунок 5. Внешний вид образцов после испытаний на стойкость к СКРН

Figure 5. Appearance of samples after SSC



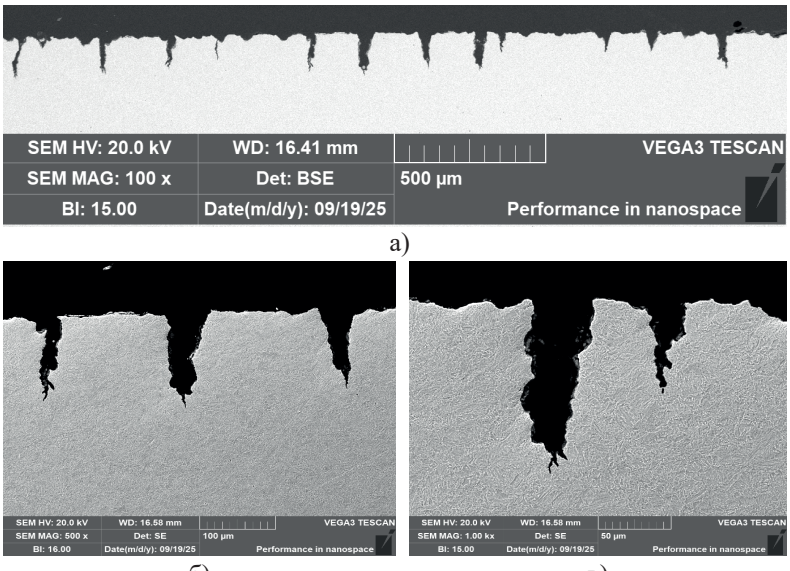
а) б)

а) образец №1;
б) образец №2

a) sample No. 1;
b) sample No. 2

Рисунок 6. Поперечное сечение образцов после коррозионных испытаний на стойкость к СКРН при увеличении х30

Figure 6. Cross-section of samples after corrosion tests for resistance to SSC at amagnification x30



а)

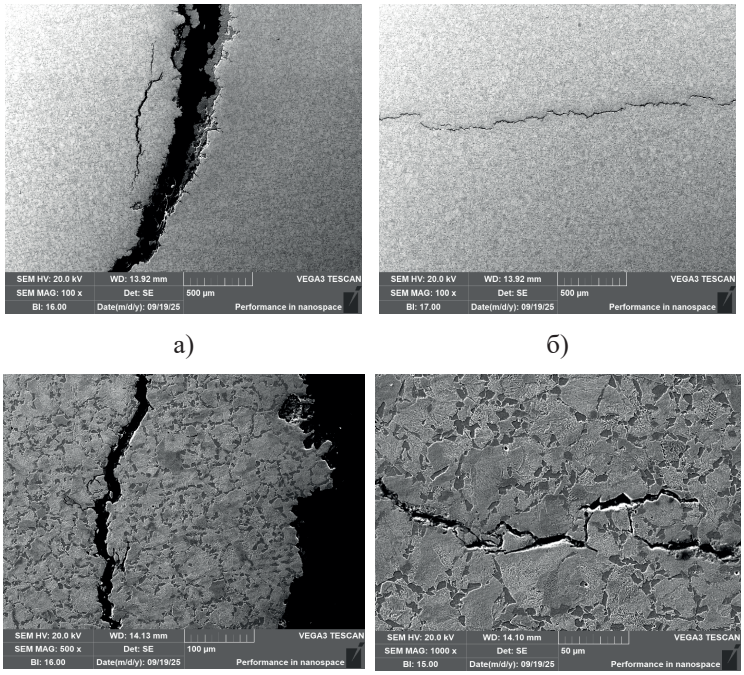
б) в)

а) х100 б) х500; в) х1000

a) x100; b) x500; c) x1000

Рисунок 7. Вид трещин на наружной поверхности образца №1 после коррозионных испытаний на стойкость к СКРН при увеличении

Figure 7. View of cracks on the outer surface of sample No. 1 after corrosion tests for resistance to SSC at magnification



а) б)

в) г)

а) x100 б) x500; в) x1000

a) x100; b) x500; c) x1000

Рисунок 8. Вид трещин на наружной поверхности образца №2 после коррозионных испытаний на стойкость к СКРН при увеличении

Figure 8. The appearance of cracks on the outer surface of sample No. 2 after corrosion tests for resistance to SSC under magnification

Выводы

1. В результате проведенного комплекса лабораторных испытаний и исследований образцов металла НКТ группы прочности N80 тип Q, термообработанных по различным режимам, экспериментально подтверждена зависимость эксплуатационной надёжности НКТ от проводимой, при производстве, термической обработки металла, в частности формирующейся в зависимости от режима термообработки микроструктуры, которая определяет основные механические и коррозионные свойства материала.

2. Материал НКТ группы прочности N80 тип Q с крупнозернистой ферритно-перлитной микроструктурой с пластинчатым цементитом, формирующейся при термической обработке «нормализация с прокатного нагрева», имеет пониженные свойства в части стойкости к динамическим механическим воздействиям и сульфидному коррозионному растрескиванию под напряжением по сравнению с более мелкодисперсной микроструктурой с зернистой формой цементита, равномерно распределённой в матрице, формирующейся при термической обработки по режиму «закалка + высокий отпуск».

Снижение ударной вязкости материала НКТ группы прочности N80 тип Q на исследуемых образцах с ферритно-перлитной микроструктурой составляет свыше 4 и 5 раз при температурах испытаний 0 и минус 20 ºС, соответственно, при этом наблюдается значительное снижение (до 0 %) доли вязкой составляющей в изломе ударных образцовс ферритно-перлитной микроструктурой по сравнению с образцами с микроструктурой, представленной сорбитом отпуска, где доля вязкой составляющей в изломе ударных образцов составляет 100 %. Снижение стойкости к сульфидному коррозионному растрескиванию под напряжением, определенной по степени (глубине) распространения трещин за время испытаний, на образцах НКТ группы прочности N80 тип Q с ферритно-перлитной микроструктурой по сравнению с образцами с микроструктурой, представленной сорбитом отпуска составляет более чем 28 раз.

Соблюдение технических требований в части обеспечения необходимых механических свойств при растяжении для конкретной группы прочности НКТ, в частности группы прочности N80 тип Q, без дополнительного контроля и обеспечения получения необходимых свойств, таких как стойкость к динамическим нагрузкам и сульфидному коррозионному растрескиванию под напряжением не гарантируют обеспечение надежной работы НКТ особенно в осложнённых условиях эксплуатации.

Микроструктура стали, в частности НКТ, является определяющим фактором ее свойств. Правильный выбор режима термообработки, формирующей микроструктуру стали, позволяет получить НКТ с оптимальным сочетанием механических и коррозионных свойств, что важно с точки зрения их эксплуатационного ресурса и безаварийной работы.

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Singh A.N. Study of Deformation and Fracture Behaviour of Alloy 617 // A thesis submitted to the Board of Studies in Engineering Sciences in partial fulfillment of requirements for the Degree of DOCTOR OF PHILOSOPHY of HOMI BHABHA NATIONAL INSTITUTE Mumbai, India. 2017. 181 p.

2. Tatsuya Kobayashi, Tetsuya Ando. Recent Development of Joining and Conductive Materials for Electronic Components // Materials Transactions. 2021. Vol. 62. No. 8. P. 1270-1276. DOI: 10.2320/matertrans.MT-M2021060.

3. Черканов В.В., Петерникова К.Л. Влияние состава и термической обработки на механические свойства литых сталей // Инноватика: разработка инновационных проектов для развития отраслей жизнедеятельности общества: Сб. науч. ст. Барнаул: Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова. 2018. С. 174-180. EDN: ZCDLCX.

4. Иоффе А.В., Липатов Р.А., Зырянов А.О. Надежность элементов погружного оборудования при эксплуатации в условиях коррозионно-активных сред. Расследование причин отказов // Инженерная практика. 2017. № 1-2. С. 30-42.

5. Алиева Е.С. Исследование механических свойств и коррозионной стойкости насосно-компрессорных труб из стали с феррито-перлитной структурой // Матер. XVIII Междунар. науч.-технич. Уральской школы-семинара металловедов-молодых ученых. Екатеринбург: Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, 2017. № 18. С. 479-483. EDN: YTDWGA.

6. Гарифуллина Г.И., Ягафарова Х.Н. Исследование структурно-механических свойств сталей насосно-компрессорных труб // Нефтегазовое дело. 2024. Т. 22. № 3. С. 131-140. DOI: 10.17122/ngdelo-2024-3-131-140. EDN: LYPFCK.

7. Попкова Ю.И., Григорьев А.Я. Влияние состава стали на коррозионную стойкость насосно-компрессорных труб в условиях углекислотной коррозии // Вестник Гомельского государственного технического университета им. П.О. Сухого. 2024. № 1 (96). С. 48–62. DOI: 10.62595/1819-5245-2024-1-48-62. EDN: NUVQKJ.

8. Петров С.С., Васин Р.А., Князева Ж.В., Андриянов Д.И., Сургаева Е.С. Коррозионное разрушение металла нефтегазопроводных труб в процессе эксплуатации и при лабораторных испытаниях // Нефтегазовое дело. 2020. Т. 18. № 4. С. 102-112. DOI: 10.17122/ngdelo-2020-4-102-112. EDN: XAEEYW.

9. Гарифуллина Г.И., Гиззатуллина А.А., Литвинов И.И. Комплексное исследование материала насосно-компрессорныхтруб группы прочности Д // Нефтегазовое дело. 2025. Т. 23. № 2. С. 116-127. DOI: 10.17122/ngdelo-2025-2-116-127. EDN: BKULIL.

10. Малинин А.В., Ситдиков В.Д. Механизмы деформации при разрушении патрубка насосно-компрессорной трубы изферритно-перлитной стали // Нефтегазовое дело. 2024. Т. 22. № 4. С. 126-141. DOI: 10.17122/ngdelo-2024-4-126-141. EDN: JTSFQT.

11. Тихонцева Н.Т., Савченко И.П., Битюков С.М., Варнак О.В., Софрыгина О.А. Исследование коррозионной стойкости насосно-компрессорных труб из феррито-перлитной стали под воздействием углекислотных сред // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. 2021. Т. 77. № 5. С. 572-579. DOI: 10.32339/0135-5910-2021-5-572-579. EDN: FWYYQL.

12. Смарыгина И.В., Алещенко А.С., Антощенков А.Е., Капуткина Л.М. Структура и свойства горячекатаных бесшовных труб из углеродистых и низколегированных сталей после термической обработки // Черные металлы. 2024. № 4. С. 55-62. DOI: 10.17580/chm.2024.04.06. EDN: BRMYZD.

REFERENCES

1. Singh A.N. *Study of Deformation and Fracture Behaviour of Alloy 617*. A thesis submitted to the Board of Studies in Engineering Sciences in partial fulfillment of requirements for the Degree of DOCTOR OF PHILOSOPHY of HOMI BHABHA NATIONAL INSTITUTE Mumbai, India. 2017. 181 p.

2. Tatsuya Kobayashi, Tetsuya Ando. Recent Development of Joining and Conductive Materials for Electronic Components. *Materials Transactions*, 2021, Vol. 62, No. 8, pp. 1270-1276. DOI: 10.2320/matertrans.MT-M2021060.

3. Cherkanov V.V., Peternikova K.L. Vliyanie sostava i termicheskoj obrabotki na mekhanicheskie svojstva lityh stalej [Effect of Composition and Thermal Processing on the Mechanical Properties of Cast Steels]. *Sbornik nauchnyh statej «Innovatika: razrabotka innovacionnyh proektov dlya razvitiya otraslej zhiznedeyatel'nosti obshchestva»* [Collection of scientific articles «Innovation: development of innovative projects for the development of social life sectors»]. Barnaul, Altai State Technical University. I.I. Polzunova Publ,. 2018, pp. 174-180. EDN: ZCDLCX. [in Russian].

4. Ioffe A.V., Lipatov R.A., Zyryanov A.O. Nadezhnost' elementov pogruzhnogo oborudovaniya pri ekspluatacii v usloviyah korrozionno-aktivnyh sred. Rassledovanie prichin otkazov [Reliability of Submersible Equipment Elements During Operation in Corrosive Environments. Investigation of The Reasons for Failures]. *Inzhenernaya praktika — Engineering Practice*, 2017, No. 1-2, pp. 30-42. [in Russian].

5. Alieva E.S. Issledovanie mekhanicheskih svojstv i korrozionnoj stojkosti nasosno-kompressornyh trub iz stali s ferrito-perlitnoj strukturoj [Investigation of Mechanical Properties and Corrosion Resistance of Tubing with Ferrito-Perlite Structure]. *Materialy XVIII Mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskoj Ural'skoj shkoly-seminara metallovedov - molodyh uchenyh* [Materials of the XVIII International Scientific and Technical Ural School-Seminar of Metal Scientists - Young Scientists]. Yekaterinburg, Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin Publ., 2017, No. 18. pp. 479-483. EDN: YTDWGA. [in Russian].

6. Garifullina G.I., Yagafarova Kh.N. Issledovanie strukturno-mekhanicheskih svojstv stalej nasosno-kompressornyh trub [Investigation of Structural and Mechanical Properties of Tubing Steels]. *Neftegazovoe delo — Petroleum Engineering*, 2024, Vol. 22, No. 3, pp. 131-140. DOI: 10.17122/ngdelo-2024-3-131-140. EDN: LYPFCK. [in Russian].

7. Popkova Yu.I., Grigoriev A.Ya. Vliyanie sostava stali na korrozionnuyu stojkost' nasosno-kompressornyh trub v usloviyah uglekislotnoj korrozii [Influence of Steel Characteristics on The Corrosion Resistance of Tubing Under Carbon Dioxide Corrosion Conditions]. *Vestnik Gomel'skogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. P.O. Suhogo — Bulletin of Gomel State Technical University named after P.O. Sukhoi*, 2024, No. 1 (96), pp. 48–62. DOI: 10.62595/1819-5245-2024-1-48-62. EDN: NUVQKJ. [in Russian].

8. Petrov S.S., Vasin R.A., Knyazeva Zh.V., Andriyanov D.I., Surgaeva E.S. Korrozionnoe razrushenie metalla neftegazoprovodnyh trub v processe ekspluatacii i pri laboratornyh ispytaniyah [Metal Corrosion Destruction of Oil and Gas Pipelines During Operation and Laboratory Tests]. *Neftegazovoe delo — Petroleum Engineering*, 2020, Vol. 18, No. 4, pp. 102-112. DOI: 10.17122/ngdelo-2020-4-102-112. EDN: XAEEYW. [in Russian].

9. Garifullina G.I., Gizzatullina A.A., Litvinov I.I. Kompleksnoe issledovanie materiala nasosno-kompressornyhtrub gruppy prochnosti D [Comprehensive Study of the Material of Tubing of Strength Group D]. *Neftegazovoe delo — Petroleum Engineering*, 2025, Vol. 23, No. 2, pp. 116-127. DOI: 10.17122/ngdelo-2025-2-116-127. EDN: BKULIL. [in Russian].

10. Malinin A.V., Sitdikov V.D. Mekhanizmy deformacii pri razrushenii patrubka nasosono-kompressornoj truby izferritno-perlitnoj stali [Deformation Mechanisms in Case of Destruction of the Tubing Nozzle Made of Ferrite-Pearlite Steel]. *Neftegazovoe delo — Petroleum Engineering*, 2024, Vol. 22, No. 4, pp. 126-141. DOI: 10.17122/ngdelo-2024-4-126-141. EDN: JTSFQT. [in Russian].

11. Tikhontseva N.T., Savchenko I.P., Bityukov S.M., Varnak O.V., Sofrygina O.A. Issledovanie korrozionnoj stojkosti nasosno-kompressornyh trub iz ferrito-perlitnoj stali pod vozdejstviem uglekislotnyh sred [Study of Corrosion Resistance of Pump-Compressor Pipes Made of Ferrite-Pearlite Steel Under the Action of Carbon Dioxide Mediums]. *Chernaya metallurgiya. Byulleten' nauchno-tekhnicheskoj i ekonomicheskoj informacii — Ferrous Metallurgy. Bulletin of Scientific, Technical and Economic Information*, 2021, Vol. 77, No. 5, pp. 572-579. DOI: 10.32339/0135-5910-2021-5-572-579. EDN: FWYYQL. [in Russian].

12. Smarygina I.V., Aleshchenko A.S., Antoshchenkov A.E., Kaputkina L.M. Struktura i svojstva goryachekatanyh besshovnyh trub iz uglerodistyh i nizkolegirovannyh stalej posle termicheskoj obrabotki [Structure and Properties of Hot-Rolled Seamless Pipes Made of Carbon and Low-Alloy Steels After Heat Treatment]. *Chernye metally — Ferrous Metals*, 2024, No. 4, pp. 55-62. DOI: 10.17580/chm.2024.04.06. EDN: BRMYZD. [in Russian].

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ
INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Дмитрий Игоревич Андриянов, *кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник, ООО «НПЦ «Самара», Самара, Россия*

Dmitry I. Andriyanov, *candidate of technical sciences, senior researcher, SPC «Samara» LLC, Samara, Russia*

Andriyanov@npcsamara.ru

Жанна Валерьевна Князева, *научный сотрудник, ООО «НПЦ «Самара», Самара, Россия*

Zhanna V. Knyazeva, *senior researcher, SPC «Samara» LLC, Samara, Russia*

Knyazeva@npcsamara.ru

Сергей Степанович Петров, *кандидат физико-математических наук,*
доцент кафедры физики твердого тела,
Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева;
начальник аналитического отдела, ООО «НПЦ «Самара», Самара, Россия

Sergey S. Petrov, *candidate of physical and mathematical sciences, associate professor,*
Solid state physics department, Samara National Research University named after Academician S.P. Korolev;
head of the Analytical department, SPC «Samara» LLC, Samara, Russia

Petrov@npcsamara.ru

Павел Евгеньевич Юдин, *кандидат технических наук, доцент кафедры*
«Металловедение, порошковая металлургия, наноматериалы»,
Самарский государственный технический университет;
директор по науке ООО «НПЦ «Самара», Самара, Россия

Pavel E. Yudin, *candidate of technical sciences, associate professor,*
Metallurgy, powder metallurgy, nanomaterials department, Samara state technical university;
director of science, SPC «Samara» LLC, Samara, Russia

Yudin@npcsamara.ru

Статья поступила в редакцию 12.09.2025; одобрена после рецензирования 09.10.2025; принята к публикации 30.11.2025.

The article was submitted 12.09.2025; approved after reviewing 09.10.2025; accepted for publication 30.11.2025.