

Научная статья

УДК 553.981.2:658.58

DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.30410>



С.А. Ялыгин¹, Н.О. Шапошников²,
Б.С. Ермаков², О.В. Швецов² ✉

¹ ПАО «Газпром нефть», Санкт-Петербург, Россия;

² Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Санкт-Петербург, Россия

✉ shvec_off@mail.ru

ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ЭКСПЛУАТАЦИИ НА ХАРАКТЕР РАЗРУШЕНИЯ И УСТАЛОСТНЫЕ СВОЙСТВА СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ИЗ ТРУБНЫХ ЗАГОТОВОК СТАЛИ 10

Аннотация. Экспериментально исследовано влияние микроструктуры на усталостные свойства и механизмы разрушения сварных соединений стали 10, применяемых в свайном фундаменте. Установлено, что причиной возникновения и развития повторных трещин в строительных конструкциях, где были выполнены ремонтные сварочные работы в холодное время года, является высокая скорость охлаждения сварного соединения, приводящая к возникновению в участке перегрева зоны термического влияния структуры Видманштеттена. Соответственно, подобные структуры являются не пригодными к восприятию знакопеременных нагрузок. Однако для обеспечения работоспособности ремонтных сварных соединений, выполненных в холодное время года, необходимо проведение дополнительных технологических операций, способствующих снижению скорости охлаждения.

Ключевые слова: сваи, сталь 10, ЗТВ, микроструктура Видманштеттена, усталость, предел выносливости, усталостное разрушение.

Благодарности: Исследование выполнено при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках государственного задания «Разработка моделей деградации служебных свойств металлических и композиционных материалов для строительства в условиях многолетнемерзлых грунтах» (FSEG-2024-0009).

Для цитирования:

Ялыгин С.А., Шапошников Н.О., Ермаков Б.С., Швецов О.В. Влияние температуры эксплуатации на характер разрушения и усталостные свойства сварных соединений из трубных заготовок стали 10 // Глобальная энергия. 2024. Т. 30, № 4. С. 119–129. DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.30410>



S.A. Yalygin¹, N.O. Shaposhnikov²,
B.S. Ermakov², O.V. Shvetsov² ✉

¹ Gazprom Neft PJSC, St. Petersburg, Russia;

² Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University,
St. Petersburg, Russia

✉ shvec_off@mail.ru

THE EFFECT OF OPERATING TEMPERATURE ON THE NATURE OF FRACTURE AND FATIGUE PROPERTIES OF WELDED JOINTS MADE OF STEEL 10 PIPE BLANKS

Abstract. The effect of microstructure on fatigue properties and fracture mechanisms of welded joints of steel 10 used in pile foundations has been experimentally investigated. It has been established that the cause of the occurrence and development of repeated cracks in building structures where repair welding work was performed in the cold season is the high cooling rate of the welded joint, leading to the appearance of an overheating of the Widmanstätten structure in the section of the heat-affected zone. Accordingly, such structures are unsuitable for the perception of alternating loads. However, in order to ensure the operability of repair welded joints made in the cold season, it is necessary to perform additional technological operations that reduce the cooling rate.

Keywords: piles, steel 10, HAZ, Widmanstätten microstructure, fatigue, endurance limit, fatigue failure.

Acknowledgements: The research was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the framework of the state assignment “Development of models of degradation of service properties of metallic and composite materials for construction in permafrost soils” (FSEG-2024-0009).

Citation:

Yalygin S.A., Shaposhnikov N.O., Ermakov B.S., Shvetsov O.V., The effect of operating temperature on the nature of fracture and fatigue properties of welded joints made of steel 10 pipe blanks, *Global Energy*, 30 (04) (2024) 119–129, DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.30410>

Введение. Основные предприятия по добыче и первичной переработке нефти и газа все больше перемещаются в наиболее удаленные северные регионы страны, характеризующиеся длительным временным периодом экстремально низких температур, повышенной влажностью и обводненностью территории, практически полным отсутствием транспортной доступности, что делает весьма затруднительным и дорогостоящим процесс поставки запасных частей и конструкций к объектам добычи и переработки сырья. К настоящему времени основными регионами добычи полезных ископаемых стали удаленные и труднодоступные области, расположенные в Западной и Восточной Сибири. Так, более 90% добычи природного газа и большую часть нефти в нашей стране добывают на территории Ямало-Ненецкого автономного округа [1–3].

Это выдвигает необходимость организации на разрабатываемых месторождениях полноразмерных предприятий, в состав которых входят ремонтно-восстановительные службы, оснащенные современным комплексом оборудования и способные проводить ремонтно-восстановительные работы в неблагоприятных климатических условиях. К числу таких работ в первую очередь относятся сварочные операции, часть из которых должна выполняться на открытом воздухе в зимние месяцы.

Обустройство новых площадок добычи и переработки должно соответствовать требованиям [4], регламентирующим перечень технологического оборудования объектов основного производства обустройства нефтяных месторождений. Согласно этим ведомственным строительным нормам, оборудование обустройства нефтяных месторождений представляет собой сложный производственный комплекс, в котором можно выделить несколько основных технологических групп. К их числу принадлежит ряд объектов, оборудование которых подвержено значительным циклическим нагрузкам, воспринимаемым строительными конструкциями, в которых это оборудование расположено. Это каркасные здания и здания с несущими стенами; блочно-комплектные сооружения, в которых находится компрессорное и насосное оборудование, мощные вентиляторные системы, прессы и другие агрегаты; объекты, воспринимающие циклическую ветровую нагрузку, например линии электропередач и осветительные мачты. Зачастую насосное, компрессорное и другое оборудование монтируется в необогреваемых зданиях и помещениях, поэтому их несущие конструкции, например металлические свайные фундаменты и колонны, в ходе эксплуатации испытывают не только циклическое, но и низкотемпературное воздействие, а восстановительные наплавки возникающих трещин и других дефектов этих конструкций осуществляются, в том числе, и в зимние холодные месяцы. В связи с этим проблема выбора технологии сварки, обеспечения надежности ремонтных работ становится крайне актуальной и требует дополнительного анализа [5–8].

При строительстве и обустройстве месторождений допускается использовать углеродистые и низколегированные стали [9, 10]. Например, свайные фундаментные и другие строительные конструкции могут изготавливаться из труб, поставляемых по ГОСТ 10704-91 и изготовленных из углеродистых конструкционных спокойных и полуспокойных сталей.

Целью настоящей работы являлась оценка надежности и долговечности ремонтных сварных соединений, выполненных в зимние месяцы на строительных конструкциях, испытывающих циклическое воздействие от установленного на нем оборудования.

Методы и материалы

Для проведения исследований были использованы вырезки из трубных элементов строительных конструкций диаметром 159 и 219 мм, изготовленных из спокойной углеродистой стали 10 ГОСТ 1050-2013 после выполнения на них ремонтно-восстановительных сварочных работ в условиях температуры наружного воздуха $-22 \dots -25^{\circ}\text{C}$ и влажности около 90% и повторно поврежденных трещинами, развившимися в зоне термического влияния (ЗТВ) ремонтной заварки. Ремонтные швы были выполнены методом ручной электродуговой сварки по режимам, принятым для данной марки стали.

Для проверки соответствия химического состава исследуемых образцов требованиям ГОСТ 1050-2013 был выполнен микрорентгеноспектральный анализ. Показано, что содержание основных химических компонентов в исследуемых образцах полностью соответствует стандартным значениям (табл. 1).

Для определения фактических механических свойств основного металла и ремонтных сварных соединений проводились испытания на статическое растяжение с использованием испытательной машины Instron 8801, результаты приведены в табл. 2. Испытания на многоцикловую усталость проводились согласно стандарту ГОСТ 25.502-79 с использованием стендовой установки, позволяющей реализовывать знакопеременные нагрузки. Образцы для металлографических исследований подготавливались из рабочей части образцов после испытаний на усталость в продольном направлении с использованием шлифовально-полировального станка Buehler EcoMet 4. Затем полированную поверхность шлифа подвергали травлению в 4%-ном растворе азотной кислоты в спирте. Исследования микроструктуры проводили методами оптической металлографии при различных увеличениях на микроскопе Reichert-Jung MeAF-3A и количественном анализаторе изображений ThixometPro.

Таблица 1

Химический состав металла вырезок

Table 1

Chemical composition of the metal of the cuttings

Материал	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu
Вырезка 1	0,08	0,28	0,41	0,021	0/014	0,19	0,24	0,09
Вырезка 2	0,11	0,31	0,54	0,017	0,022	0,22	0,11	0,19
ГОСТ 1050-2013	0,07–0,14	0,17–0,37	0,35–0,65	<0,030	<0,035	<0,25	<0,30	<0,30

Результаты

В табл. 2 приведены результаты исследований механических свойств основного металла и ЗТВ ремонтных сварных швов. Причина исследования именно ЗТВ ремонтного сварного соединения заключалась в том, что обнаруженные усталостные дефекты в местах восстановительной наплавки были обнаружены только в ЗТВ сварных соединений, дефектов в металле шва обнаружено не было.

Таблица 2

Механические свойства основного металла и ЗТВ

Table 2

Mechanical properties of the base metal and HAZ

T, °C	Основной металл				Зона термического влияния			
	σ_b , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ_5 , %	KCU, кДж/см ²	KCU, кДж/см ²	σ_b , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ_5 , %
20°C	356/401*	225/242	35/33	278/272	61/57	545/560	502/511	8/6
–20°C	407/434	244/261	28/24	224/206	14/12	570/583	540/552	7/4
–40°C	472/481	330/372	17/13	198\180	—	610/607	—	—
–50°C	515/525	—	—	—	—	640/634	—	—

* В числителе — вырезка 1; в знаменателе — вырезка 2

Установлено, что при температуре испытаний до –20°C основной металл трубных вырезок сохраняет вязкий механизм разрушения, при –40°C основным становится механизм квазискола, а при более низких температурах — хрупкого разрушения — скола; в ЗТВ ремонтных швов квазихрупкое разрушение отмечено в диапазоне +20 ... –20°C, причем относительное удлинение образцов наблюдалось даже при положительных климатических температурах ниже требований, предъявляемых к металлу труб ГОСТ 1050-2013. На рис. 1 показана микроструктура металла в зоне усталостного разрушения сварного соединения. Структура представляет собой грубую игольчатую структуру с разорванной ферритной сеткой по границам зерен — структурой типа видманштеттеновых структур [11], ориентировочно соответствующей 4–5 баллам ряда А шкалы 4 ГОСТ 5640-2020.

Определение участка ЗТВ, где вероятность образований усталостной трещины будет максимальна, было проведено путем моделирования процесса сварки на образцах из стали 10, вырезанных из прямошовных сварных труб (ГОСТ 10705-80) в лабораторных условиях. С этой целью операция сварки была выполнена в двух вариантах. Первый — в условиях, максимально приближенных к тем, которые были отмечены при проведении ремонтных работ на строительных

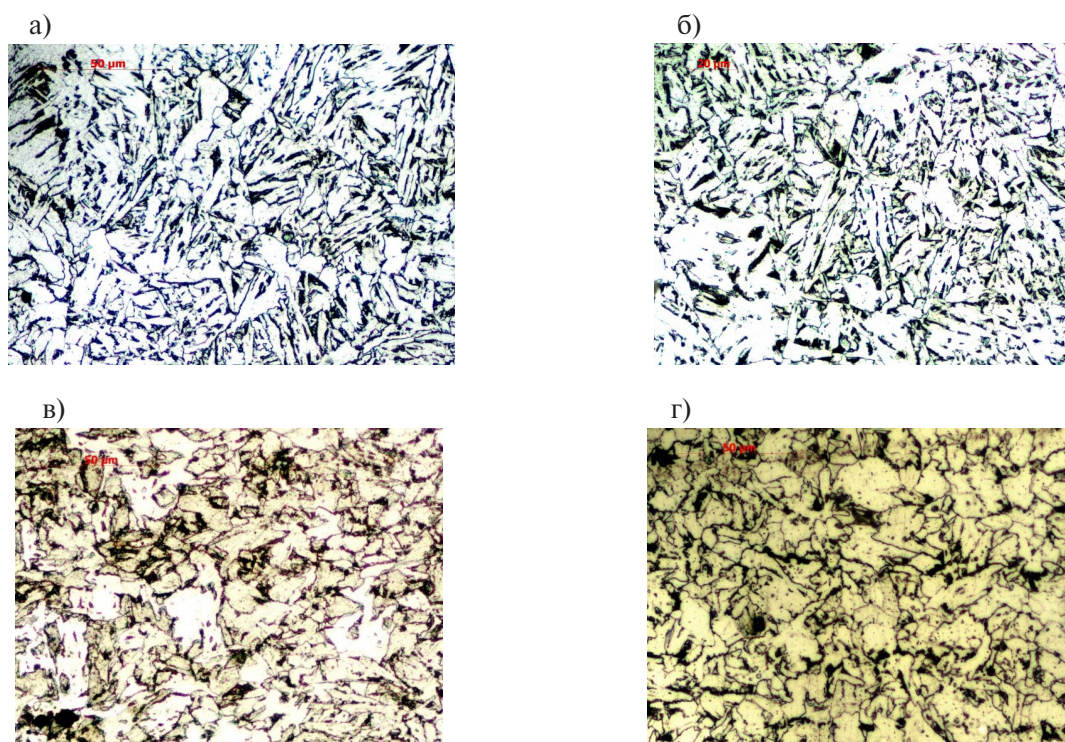


Рис. 1. Микроструктура металла в зоне усталостной трещины конструкции после сварки при пониженной температуре (а), модельного сварного соединения (зона игольчатых кристаллов) после сварки при температуре -23°C (б), модельного сварного соединения после сварки при температуре $+22^{\circ}\text{C}$ (в) и после наложения отжигающего валика (г)

Fig. 1. Microstructure of metal in the fatigue crack zone of the structure after welding at a reduced temperature (а), a model welded joint (needle crystal zone) after welding at a temperature of -23°C (б), a model welded joint after welding at a temperature of $+22^{\circ}\text{C}$ (с) and after applying an annealing weld (d)

конструкциях: температура воздуха в момент проведения сварочных работ составляла -23°C , влажность воздуха – около 82%; второй – в помещении при температуре $+22^{\circ}\text{C}$ и влажности 37% [12, 13].

Определение участка с минимальным уровнем вязкости было проведено с использованием пробы Чабелки [14, 15] для двух групп образцов, сваренных при положительной и отрицательной температурах воздуха (табл. 3).

В результате проведенных испытаний было определено, что минимальный уровень ударной вязкости ЗТВ получен в зоне, отстоящей от границы сплавления на ~ 2 мм в зоне крупных игольчатых кристаллов структур типа структуры Видманштеттена, характеризующихся повышенной твердостью и почти полным отсутствием пластичности и ударной вязкости (ГОСТ 5640-2020). Разница в ударной вязкости, отличающаяся более чем в семь раз при сварке при положительных и пониженных температурах, объясняется интенсивностью образования структур Видманштеттена – при положительных температурах в структуре ЗТВ отмечены только отдельные участки игольчатой структуры, соответствующие 1–2 баллам ряда А шкалы 4 ГОСТ 5640-2020, при отрицательных – ярко выраженная игольчатая структура 4–5 баллов. Подобные структуры, отличающиеся повышенной твердостью и хрупкостью, являются естественными концентраторами напряжений и служат местом зарождения трещины.

Как следует из приведенных данных, основной причиной повторного трещинообразования конструкций после восстановительных наплавки явилась неблагоприятная структура ЗТВ, прилегающей к границе сплавления сварного шва, связанная с ускоренным охлаждением металла после

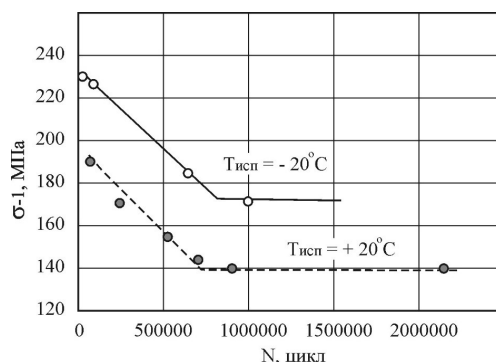


Рис. 2. S-N кривые усталости образцов после сварки при положительных температурах.
Испытания в диапазоне температур +20°C ... -20°C

Fig. 2. S-N fatigue curves of samples after welding at positive temperatures.
Tests in the temperature range of +20°C ... -20°C

сварки. Для подтверждения подобного утверждения на металле вырезок и модельных образцах были проведены усталостные испытания сварных соединений при положительных и отрицательных температурах окружающей среды после сварки, которая была осуществлена при температурах -23°C и +22°C [16]. На рис. 2 представлена S-N зависимость модельных образцов, сваренных при положительных температурах и испытанных в диапазоне температур от +20°C до -20°C.

Таблица 3

Ударная вязкость металла сварных соединений

Table 3

Impact toughness of metal welded joints

КСУ, кДж/см ²	+22°C	-23°C
Металл шва	198	161
Граница сплавления — зона крупных равноосных зерен	81	74
Зона перегрева (2 мм от границы сплавления) — игольчатая структура	74	11
Зона A _{c3}	174	152
Зона A _{c1}	145	97
Зона деформационного старения	129	51

На рис. 3 представлена S-N зависимость модельных образцов, сваренных при положительных температурах и испытанных в диапазоне температур от -20°C до -40°C.

Анализ результатов рис. 2 и 3 показал, что для металла сварных соединений, полученных при положительных температурах, наблюдается повышение предела выносливости сварного соединения при понижении температуры испытания до -20°C, что может быть связано с общим повышением прочностных свойств металла. В целом сварка при положительных климатических температурах не оказывает сколь-нибудь заметного влияния на работоспособность строительных конструкций при температурах до -20°C, что подтверждается результатами контроля за ремонтными сварными соединениями на действующих объектах [17].

Однако дальнейшее понижение температуры до -40°C приводит к определенному росту ее прочности при циклическом нагружении только на определенном числе циклов нагружения (рис. 3). Увеличение числа циклов нагружения до ~2 · 10⁶ вызывает определенное снижение

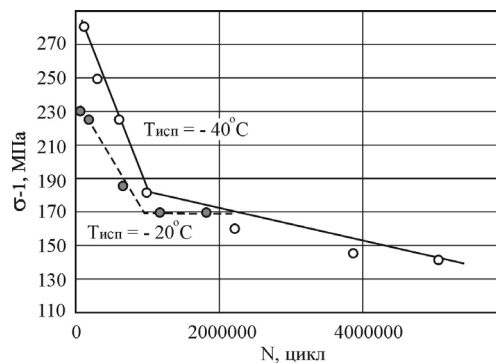


Рис. 3. S-N кривые усталости образцов после сварки при положительных температурах.
Испытания в диапазоне температур $-20^{\circ}\text{C} \dots -40^{\circ}\text{C}$

Fig. 3. S-N fatigue curves of samples after welding at positive temperatures.
Tests in the temperature range of $-20^{\circ}\text{C} \dots -40^{\circ}\text{C}$

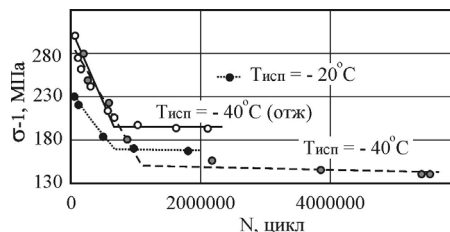


Рис. 4. S-N кривые усталости модельных образцов

Fig. 4. S-N fatigue curves of model samples

усталостной прочности. Это противоречит признанному факту, что с понижением температуры усталостная прочность материала должна расти [16]. Вероятно, это может быть объяснено следующими факторами: крайне неравновесным структурным состоянием ЗТВ, частотой нагружения, сложным напряженным состоянием, связанным с высоким уровнем остаточных сварочных напряжений в ремонтном сварном соединении. Подобная картина наблюдается и после сварки при отрицательных температурах (рис. 4).

Снижение усталостной прочности без заметного выхода на горизонтальный участок предела выносливости при испытаниях при температурах -40°C (рис. 3, 4) указывает, что разрушение происходит из-за лавинообразного накопления дислокаций, характерного для высокопрочных материалов, и, вероятно, может быть объяснено наличием в ЗТВ грубой игольчатой структуры.

С целью уточнения влияния структуры Видманштеттена на усталостную прочность стали в ходе сварки при температуре -23°C одного из модельных образцов был добавлен еще один отжигающий валик, позволяющий снизить скорость охлаждения сварного шва, уменьшить уровень остаточных сварочных напряжений. Анализ микроструктуры участка перегрева (рис. 1) показал, что введение дополнительной сварочной операции позволяет несколько стабилизировать структуру зоны перегрева и значительно повысить усталостную прочность сварного соединения (рис. 4).

Обсуждение

По результатам исследования было выявлено, что причиной возникновения и развития повторных трещин в строительных конструкциях, где были выполнены ремонтные сварочные работы в холодное время года, является высокая скорость охлаждения сварного соединения, приводящая к возникновению в участке перегрева ЗТВ структуры Видманштеттена с массивными

иглами и разорванной ферритной сеткой по границам зерен. Подобные структуры в участке перегрева ЗТВ ремонтных сварных соединений являются недопустимым дефектом, который превращает ЗТВ в область, абсолютно не пригодную к восприятию знакопеременных нагрузок. Для устранения такой структуры и обеспечения работоспособности ремонтных сварных соединений, выполненных в холодное время года, необходимо проведение дополнительных технологических операций, способствующих снижению скорости охлаждения, например послесварочный подогрев зоны ремонтного сварного шва или наложение отжигающего валика.

Выводы

Полученные результаты исследования влияния температуры эксплуатации на характер разрушения и циклические свойства сварных соединений трубных заготовок из стали 10 позволили заключить следующее. Грубая игольчатая структура с разорванной ферритной сеткой по границам зерен в зоне перегрева является недопустимой структурой в конструкции, подверженной циклическим нагрузкам, особенно при пониженных температурах эксплуатации. Доказана принципиальная возможность дальнейшего использования труб в отрицательных температурах после восстановительных и ремонтных работ при условии проведения технологических операций, позволяющих снизить скорость охлаждения после сварки, например нанесение отжигающего валика.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- [1] Dmitrievskiy A.N., Eremin N.A., Shabalin N.A., Basnieva I.K., Kondratyuk A.T. The oil and gas potential of the north of the Siberian platform and adjacent shelf // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2021. Vol. 1201. Art. no. 012076. DOI: 10.1088/1757-899X/1201/1/012076
- [2] Дмитриевский А.Н., Еремин Н.А., Хитров А.М. О нефтегазоносности глубоких горизонтов северной части сибирской платформы // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. 2024. Т. 5. № 389. С. 5–15.
- [3] Конторович А.Э., Бурштейн Л.М., Лившиц В.Р., Рыжкова С.В. Главные направления развития нефтяного комплекса России в первой половине XXI века // Вестник Российской Академии наук. 2019. Т. 89. № 11. С. 1095–1104. DOI: 10.31857/S0869-587389111095-1104
- [4] Министерство нефтяной промышленности. Нормы и правила проектирования объектов нефтяной промышленности. Ведомственные нормы строительного проектирования. ВСН 39.1.06-84. 1982. 26 с.
- [5] Слепцов О.И., Михайлов В.Е., Петушков В.Г. Повышение прочности сварных конструкций для Севера. Новосибирск: Наука, 1989. 223 с.
- [6] Radaj D. Design and analysis of fatigue resistant welding structures. USA: Abington Publishing, 1990. 380 p.
- [7] Кривоносова Е.А., Язовских В.М., Вассерман Н.Н. Структурные аспекты усталостного разрушения металла сварных швов // Тяжелое машиностроение. 2005. № 9. С. 20–23.
- [8] Язовских В.М., Кривоносова Е.А., Шумяков В.И., Летягин И.Ю., Вылежнева Н.В. Структурные факторы хладостойкости сварных швов // Сварочное производство. 2002. № 1. С. 12–14.
- [9] Министерство строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации (Минстрой России). Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах. СП 25.13330.2020. 2020. 136 с.
- [10] Министерство строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации (Минстрой России). Стальные конструкции. СП 16.13330.2017. 2017. 151 с.
- [11] Cui K., Yang H., Yao S., Li Z., Wang G., Zhao H., Nan X. Effects of V–N microalloying on microstructure and property in the welding heat affected zone of constructional steel // Metals. 2022. Vol. 12. Art. no. 480. DOI: 10.3390/met12030480

- [12] Sedmak A., Grbović A., Gubeljak N., Sedmak S., Budimir N. Numerical simulation of fatigue crack growth and fracture in welded joints using XFEM—A review of case studies // *Materials*. 2024. Vol. 17. Art. no. 5531. DOI: 10.3390/ma17225531
- [13] Milosevic N., Younise B., Sedmak A., Travica M., Mitrovic A. Evaluation of true stress–strain diagrams for welded joints by application of Digital Image Correlation // *Engineering Failure Analysis*. 2021. Vol. 128. Art. no. 105609. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2021.105609
- [14] Копельман Л.А. Основы теории прочности сварных конструкций. СПб.: Лань, 2010. 464 с.
- [15] Федосеева Е.М. Влияние структуры и неметаллических включений на свойства сварных швов из стали Х65 // *Вестник ПНИПУ. Машиностроение, материаловедение*. 2015. Т. 17. № 4. С. 76–88. DOI: 10.15593/2224-9877/2015.4.06
- [16] Мыльников В.В. Циклическая прочность и долговечность конструкционных материалов: монография. Нижний Новгород: Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет, 2018. 177 с.
- [17] Braun M., Scheffer R., Fricke W., Ehlers S. Fatigue strength of fillet-welded joints at subzero temperatures // *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*. 2019. Vol. 43. No. 2. P. 403–416. DOI: 10.1111/ffe.13163

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ЯЛЫГИН Сергей Алексеевич — старший менеджер программ по реализации проектов новых технологий, ОАО Газпром нефть, без степени.

E-mail: yalygin.s@mail.ru

ШАПОШНИКОВ Никита Олегович — главный инженер проекта, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, канд. техн. наук.

E-mail: shaposhnikovno@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9735-3800>

ЕРМАКОВ Борис Сергеевич — главный научный сотрудник, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, д-р техн. наук.

E-mail: ermakov55@bk.ru

ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-0932-2408>

ШВЕЦОВ Олег Викторович — инженер-исследователь, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, канд. техн. наук.

E-mail: shvec_off@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9368-4074>

REFERENCES

- [1] A.N. Dmitrievskiy, N.A. Eremin, N.A. Shabalin, I.K. Basnieva, A.T. Kondratyuk, The oil and gas potential of the north of the Siberian platform and adjacent shelf, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1201 (2021) 012076. DOI: 10.1088/1757-899X/1201/1/012076
- [2] A.N. Dmitrievskiy, N.A. Eremin, A.M. Khitrov, The oil and gas potential of the deep horizons in the northern part of the Siberian platform, *Geology, geophysics and development of oil and gas fields*, 5 (389) (2024) 5–15.
- [3] A.E. Kontorovich, L.M. Burshtein, V.R. Livshits, S.V. Ryzhkova, Main directions in the development of Russia's oil sector in the first half of the XXI century, *Herald of the Russian Academy of Sciences*, 89 (11) (2019) 1095–1104. DOI: 10.31857/S0869-587389111095-1104

- [4] Ministerstvo nef'tianoi promyshlennosti [Ministry of Oil Industry]. Normy i pravila proektirovaniia ob'ektov nef'tianoi promyshlennosti. Vedomstvennye normy stroitel'nogo proektirovaniia [Norms and rules for designing oil industry facilities. Departmental standards for construction design]. VSN 39.1.06-84. 1982. 26 p.
- [5] **O.I. Sleptsov, V.E. Mikhailov, V.G. Petushkov**, Povyshenie prochnosti svarnykh konstrukttsii dlia Severa [Increasing the strength of welded structures for the North]. Novosibirsk: Nauka, 1989. 223 p.
- [6] **D. Radaj**, Design and analysis of fatigue resistant welding structures. USA: Abington Publishing, 1990. 380 p.
- [7] **E.A. Krivonosova, V.M. Iazovskikh, N.N. Vasserman**, Strukturnye aspekty ustalostnogo razrusheniia metalla svarnykh shvov [Structural aspects of fatigue failure of weld metal], Tyazheloye Mashinostroyeniye [Heavy engineering], 9 (2005) 20–23.
- [8] **V.M. Iazovskikh, E.A. Krivonosova, V.I. Shumiakov, I.Iu. Letiagin, N.V. Vylezhneva**, Strukturnye faktory khladoistoikosti svarnykh shvov [Structural factors of cold resistance of welded seams], Svarochnoe proizvodstvo [Welding Production], 1 (2002) 12–14.
- [9] Ministerstvo stroitel'stva i zhilishchno-kommunal'nogo khoziaistva Rossiiskoi Federatsii (Minstroii Rossii) [Ministry of Construction and Housing and Communal Services of the Russian Federation]. Osnovaniia i fundamenty na vechnomerzlykh gruntakh [Foundations and bases on permafrost soils]. SP 25.13330.2020. 2020. 136 p.
- [10] Ministerstvo stroitel'stva i zhilishchno-kommunal'nogo khoziaistva Rossiiskoi Federatsii (Minstroii Rossii) [Ministry of Construction and Housing and Communal Services of the Russian Federation]. Stal'nye konstrukttsii [Steel structures]. SP 16.13330.2017. 2017. 151 s.
- [11] **K. Cui, H. Yang, S. Yao, Z. Li, G. Wang, H. Zhao, X. Nan**, Effects of V–N microalloying on microstructure and property in the welding heat affected zone of constructional steel, Metals, 12 (2022) 480. DOI: 10.3390/met12030480
- [12] **A. Sedmak, A. Grbović, N. Gubelj, S. Sedmak, N. Budimir**, Numerical simulation of fatigue crack growth and fracture in welded joints using XFEM—A review of case studies, Materials, 17 (2024) 5531. DOI: 10.3390/ma17225531
- [13] **N. Milosevic, B. Younise, A. Sedmak, M. Travica, A. Mitrovic**, Evaluation of true stress–strain diagrams for welded joints by application of Digital Image Correlation, Engineering Failure Analysis, 128 (2021) 105609. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2021.105609
- [14] **L.A. Kopel'man**, Osnovy teorii prochnosti svarnykh konstrukttsii [Fundamentals of the theory of strength of welded structures]. St. Petersburg: Lan', 2010. 464 p.
- [15] **E.M. Fedoseeva**, Influence of structure and nonmetallic inclusions on properties of welded seams from X65 steel, Bulletin PNRPU. Mechanical engineering, materials science, 17 (4) (2015) 76–88. DOI: 10.15593/2224-9877/2015.4.06
- [16] **V.V. Myl'nikov**, TSiklicheskaia prochnost' i dolgovechnost' konstruktсионnykh materialov: monograph. Nizhny Novgorod: Nizhegorodskii gosudarstvennyi arkhitekturno-stroitel'nyi universitet, 2018. 177 p.
- [17] **M. Braun, R. Scheffer, W. Fricke, S. Ehlers**, Fatigue strength of fillet-welded joints at subzero temperatures, Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, 43 (2) (2019) 403–416. DOI: 10.1111/ffe.13163

INFORMATION ABOUT AUTHORS

Sergey A. YALYGIN — *Gazprom Neft PJSC*.
E-mail: yalygin.s@mail.ru

Nikita O. SHAPOSHNIKOV — *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University*.
E-mail: shaposhnikovno@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9735-3800>

Boris S. ERMAKOV – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.*

E-mail: ermakov55@bk.ru

ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-0932-2408>

Oleg V. SHVETSOV – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.*

E-mail: shvec_off@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9368-4074>

Поступила: 02.12.2024; Одобрена: 25.12.2024; Принята: 28.12.2024.

Submitted: 02.12.2024; Approved: 25.12.2024; Accepted: 28.12.2024.