

**Анализ надежности и работоспособности буронапускных свай при
обустройстве месторождений нефти в зоне многолетнемерзлых грунтов**

**Н. О. Шапошников^{1*}, С. А. Ялыгин², Б. С. Ермаков¹, О. В. Швецов¹,
С. Б. Ермаков¹, Н. И. Голиков³, О. И. Слепцов³, Ю. С. Клочков⁴**

¹Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия

²ООО «Газпромнефть НТЦ», Санкт-Петербург, Россия

³Институт физико-технических проблем Севера СО РАН им. В. П. Ларионова, Якутск, Россия

⁴Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Россия

*shaposhn_no@spbstu.ru

Аннотация. Перемещение основных мощностей добывающих предприятий из центральных регионов страны в северные регионы потребовало полного переосмысления проблемы обустройства месторождений. К числу таких проблем относится возведение фундаментов под трубопроводы, технологические объекты, энергетические станции. В основном такие фундаменты изготавливают методом погружения свай в заранее пробуренные скважины. Использование буронапускных свай в условиях многолетнемерзлых грунтов является технологической необходимостью и связано с невозможностью применения свай других типов. Наибольшее распространение получили буронапускные сваи, изготовленные из прямошовных труб, сваренных токами высокой частоты (ГОСТ 20295 и ГОСТ Р 58064). Оценка работоспособности таких труб в условиях многолетнемерзлых грунтов была проведена посредством моделирования условий эксплуатации труб в лабораторных условиях, а также установки полноразмерных макетов свай в многолетнемерзлые плотные суглинистые и влажные — заторфованные — грунты полигона ФИЦ «Якутский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук». Испытаниям были подвергнуты как трубы с обязательной послесварочной термической обработкой, по требованиям СП 16.13330.2017, так и без термической обработки. Были проведены исследования статических механических свойств и ударной вязкости основного металла и сварных соединений труб, проведена оценка их коррозионной стойкости и трещиностойкости. Результаты исследований показали, что проведение послесварочной термической обработки не приводит к значительному повышению надежности буронапускных свай из стали 09Г2С. Одновременно анализ микроструктуры сварных соединений выявил значительное количество дефектов, расположенных по линии сплавления сварного шва, которые могут привести к ускоренному повреждению свай.

Ключевые слова: многолетнемерзлые грунты, буронапускные сваи, сварка токами высокой частоты, послесварочная термическая обработка, механические свойства, коррозионная стойкость, трещиностойкость

Благодарности: работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (№ FSEG-2024-0009 «Разработка моделей деградации служебных свойств металлических и композиционных материалов для строительства в условиях многолетнемерзлых грунтах»).

Для цитирования: Анализ надежности и работоспособности буронапускных свай при обустройстве месторождений нефти в зоне многолетнемерзлых грунтов / Н. О. Шапошников, С. А. Ялыгин, Б. С. Ермаков [и др.]. – DOI 10.31660/0445-0108-2024-4-96-118 // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. – 2024. – № 4. – С. 96–118

**Analysis of reliability and efficiency of drill dipping piles for oil field
construction in permafrost zone**

Nikita O. Shaposhnikov^{1*}, Sergey A. Yalygin², Boris S. Ermakov¹, Oleg V. Shvetsov¹, Sergey B. Ermakov¹, Nikolay I. Golikov³, Gavriil N. Sleptsov³, Yurii S. Klochkov⁴

¹ Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Saint Petersburg, Russia

² "Gazprom Neft PJSC", Saint Petersburg, Russia

³ V. P. Laronov Institute of the Physical-Technical Problems of the North of the Siberian Branch of the RAS, Yakutsk, Russia

⁴ Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russia

*shaposhn_no@spbstu.ru

Abstract. Relocation of the main capacities of oil production infrastructure from Central to Northern Russia necessitated a re-evaluation of oilfield development strategies, particularly addressing the challenges of constructing foundations for pipelines, processing facilities, and power plants. These foundations are formed by drill-dipping piles into pre-drilled boreholes. The use of drill dipping piles in permafrost is technologically essential as alternative pile types are impractical. The most common are drill dipping piles fabricated from longitudinal seam pipes welded with high frequency current techniques (as per GOST 20295 and GOST R 58064). Performance of such piles in permafrost conditions was evaluated through laboratory simulations mimicking operational conditions, as well as in-situ at the test site of Federal Research Centre "The Yakut Scientific Centre of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences" where full-size piles were installed in firm loamy and wet peaty permafrost soils. Pipes both with and without post-weld heat treatment, as specified in SP 16.13330.2017, were tested. The authors examined static mechanical properties and impact toughness of the base metal and welded joints of the pipes, as well as corrosion resistance and crack resistance. The research revealed that post-weld heat treatment did not significantly enhance the reliability of drill dipping piles fabricated from 09G2S steel. Concurrently, microstructure analysis of the welded joints revealed a considerable number of defects along the weld-fusion line, potentially accelerating pile failure.

Keywords: permafrost soils, drill dipping piles, high frequency current welding, post-weld heat treatment, mechanical properties, corrosion resistance, crack resistance

Acknowledgments: the work was performed within the government order from the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (No. FSEG-2024-0009 "Development of degradation models of metallic and composite materials service properties for construction in conditions of permafrost soils").

For citation: Shaposhnikov, N. O., Yalygin, S. A., Ermakov, B. S., Shvetsov, O. V., Ermakov, S. B., Golikov, N. I., ... Klochkov, Yu. S. (2024). Analysis of reliability and efficiency of drill dipping piles for oil field construction in permafrost zone. *Oil and Gas Studies*, (4), pp. 96-118. (In Russian). DOI: 10.31660/0445-0108-2024-4-96-118

Введение

Последние десятилетия основные мощности добывающих компаний перемещаются в сторону арктического пояса РФ. При этом происходят принципиально важные изменения в обустройстве площадок добычи и первичной переработки добываемого сырья, строительстве линейных объектов — трубопроводов и линий электропередач. Главной причиной таких изменений является то, что на этих территориях строительство ведется в зоне многолетнемерзлых грунтов (ММГ), что накладывает ряд ограничений на применение традиционных строительных технологий. Обеспечение надежности и долговечности возводимых сооружений в зоне закладывается на первом этапе строительства — стадии установки фундамента. Наибольшее распространение в зоне ММГ получили свайные фундаменты, обеспечивающие оптимальное соотношение качества, надежности и экономичности строительных фундаментных работ. К числу преимуществ использования свайных фундаментов относятся относительно небольшая стоимость

их строительства, значительная глубина установки свай, что позволяет избежать негативных последствий морозного пучения, возможность ведения строительных работ в зимние месяцы.

Однако традиционные методы строительства таких фундаментов, которые применяются в средней полосе страны и позволяют использовать забивку, вибропогружение и задавливание свай в грунт, малоприменимы в условиях очень плотных ММГ. Учитывая их повышенную прочность, основным способом установки свай в этом регионе является их погружение в заранее изготовленные скважины, диаметр которых превышает наибольший размер поперечного сечения сваи. Перед погружением сваи скважина заполняется цементно-песчаным раствором в заранее рассчитанном объеме до уровня сезонного промерзания и оттаивания. Способ такого устройства свай называется буроопускным [1]. Дополнительные сложности при строительстве фундаментов накладывают климатические и географические особенности территорий строительства — их значительная удаленность от крупных промышленных центров, слабая логистика и экстремальные климатические условия Крайнего Севера.

В Российской Федерации зона ММГ занимает значительные территории, распространяется от берегов Белого моря до Тихого океана и располагается на глубине от 0,5 до 4,5 м, толщина слоя колеблется от нескольких метров до 1,5 км и более, что требует специального анализа и соответствующих подходов к проектированию и строительству фундаментов в этом регионе [2]. Главными факторами, определяющими надежность эксплуатации фундаментов в условиях ММГ, которые должны учитываться при их проектировании, являются глубина деятельного слоя грунта, то есть грунта, который расположен у поверхности земли выше зоны ММГ и ежегодно оттаивает в летние месяцы года, и максимальная температура ММГ [3, 4]. Эти два фактора определяют основные параметры свайного фундамента — минимально допустимую длину свай, их количество и расположение, что необходимо при расчете давления под подошвой фундамента, которое не должно превышать несущей способности фундамента несущей способности грунта.

К числу наиболее активно развивающихся производств в Арктической и Субарктической зонах РФ относятся нефтедобывающие компании, при обустройстве месторождений которых используется значительное количество свайных фундаментов. Число ежегодно используемых на новых месторождениях свай может достигать нескольких десятков и даже сотен тысяч штук, которые необходимо транспортировать на значительные расстояния в зоны с практически полным отсутствием транспортной инфраструктуры [5]. Именно свайные фундаменты являются одними из наиболее материалоемких объектов обустройства месторождений. Учитывая сложную логистику и значительные массы перемещаемых материалов, рентабельность строительства объектов добычи и транспортировки добытых продуктов в северных регионах может быть обеспечена только при условии использования высококачественных материалов и конструкций, способных к длительной и безаварийной эксплуатации в условиях экстремально низ-

ких климатических температур и коррозионно- агрессивного воздействия добываемых продуктов и растепленного в летние месяцы деятельного слоя почвы, например, торфяников и засоленных почв [6, 7]. Традиционно при обустройстве месторождений в качестве свай используются сварные (изготовленные методом сварки токами высокой частоты) металлические трубы длиной 10–15 м. Оценка надежности их использования проводится как традиционными методами, согласно СП 24.13330.2011¹, так и с учетом особенностей поведения ММГ в ходе длительной эксплуатации зданий и сооружений. Как известно, в ММГ могут протекать процессы, приводящие к потере устойчивости фундаментов. К ним относятся колебания температуры в слоях, примыкающих к деятельному слою, что приводит к образованию морозных трещин и клиньев льда, это может быть связано как с переносом тепла от поверхности к ММГ по телу металлической сваи, так и с объективными климатическими процессами. При этом при протаивании мерзлого грунта вокруг сваи наблюдается осадка фундамента, а при последующем промерзании в зимние месяцы — пучение грунта [1, 8]. Это приводит к возникновению дополнительных, зачастую не учтенных при проведении прочностных расчетов напряжений в материале сваи и требует проведения дополнительных испытаний, в том числе полигонных, для подтверждения работоспособности свайного основания.

Конструкция буроопускной сваи состоит из двух основных элементов — бесшовной или прямошовной стальной трубы длиной более 4 метров и диаметром, обычно не превышающим 426 мм, и свайного наконечника [9]. Основные требования, предъявляемые к качеству сваи, это требования к ее основному элементу — металлической трубе. Согласно СП 25.13330.2020², металлические сваи следует проектировать из стальных электросварных прямошовных и бесшовных труб. Требования к условиям изготовления свай и их механическим свойствам обозначены в СП 16.13330.2017³, где сказано, что электросварные трубы, сваренные высокочастотной сваркой (ВЧС), следует применять только после объемной термической обработки (ОТО). Наиболее распространенным материалом прямошовных труб для буроопускных свай являются углеродистые и низколегированные стали (ГОСТ 20295⁴ и ГОСТ 58064⁵). Требования первого ГОСТа распространяются в основном на трубы, изготовленные из углеродистых сталей и сталей повышенной прочности (кремний-марганцовистых

¹ СП 24.13330.2011. Свайные фундаменты. Актуализированная редакция СНиП 2.02.03-85 [Электронный ресурс]. – Введ. 2011-05-20. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200084538>.

² СП 25.13330.2020. Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах [Электронный ресурс]. – Введ. 2021-07-01. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/573659326>.

³ СП 16.13330.2017. Стальные конструкции. Актуализированная редакция СНиП II-23-81 [Электронный ресурс]. – Введ. 2017-08-28. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/456069588>.

⁴ ГОСТ 20295-85. Трубы стальные сварные для магистральных газонефтепроводов. Технические условия [Электронный ресурс]. – Введ. 1987-01-01. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200002056>.

⁵ ГОСТ Р 58064-2018. Трубы стальные сварные для строительных конструкций. Технические условия [Электронный ресурс]. – Введ. 2018-09-01. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200158296>.

сталей, к числу которых принадлежит и сталь 09Г2С, наиболее часто применяемая для производства буроопускных свай), второго — на трубы из стали с повышенным содержанием марганца (для буроопускных свай — в основном сталь 09Г2С). Однако в нормативной документации существует некоторое разночтение в требованиях к качеству сварных труб между государственными стандартами и сводами правил. В первую очередь это касается требований к минимально допустимой величине и температуре испытания ударной вязкости основного металла и сварного соединения трубы. Так, согласно СП 16.13330.2017 (таблица В.1 приложения В), ударная вязкость металла труб должна быть $KCV \geq 34$ Дж/см² при температуре минус 40 °С, причем эти требования распространяются на ударную вязкость основного металла трубы, металла шва и границы сплавления вне зависимости от химического состава стали.

В то же время ГОСТ 20295-85 (табл. 8), на который ссылается СП 16.13330.2017 как на обязательный нормативный документ, по требованиям которого поставляются сварные прямошовные трубы для буроопускных свай, указывает, что ударная вязкость труб диаметром 219–426 мм (трубы этого диаметра чаще всего применяют для изготовления буроопускных свай) определяется при температуре не ниже минус 40 °С и составляет $KCU \geq 29,4$ Дж/см², причем, согласно п. 2.6.1. ГОСТ 20295, эта величина должна быть получена при испытаниях основного металла трубы. Величина ударной вязкости металла шва труб 1 типа (п. 1.1. ГОСТ 20295), то есть сваренных методом ВЧС, в данном стандарте не регламентируется. Для производства прямошовных труб из проката повышенной прочности (например, из стали 09Г2С) методом ВЧС используется стальной лист, изготовленный в соответствии с ГОСТ 19281-2014⁶. В соответствии с этим стандартом класс прочности сталей, используемых для прямошовных труб, находится в пределах 265–440, при этом ударная вязкость листов толщиной до 10 мм при температуре минус 40 и 60 °С составляет $KCU \geq 29$ Дж/см² для классов прочности 295 и 325; $KCU \geq 34$ Дж/см² для класса прочности 345. Для остальных классов прочности ударная вязкость определяется для набора статистических данных, и ее результаты не являются браковочным признаком. Ударная вязкость образцов с острым надрезом (KCV) регламентируется только для температур до минус 20 °С (таблица 11 ГОСТ 19281-2014).

Еще одним стандартом, по требованиям которого допускается применение сварных прямошовных труб для производства буроопускных свай, является ГОСТ Р 58064. Выбор марок и химических составов сталей по данному стандарту регламентируется ссылкой на таблицу 1 ГОСТ 27772-2015. Анализ химических составов сталей, приведенных в этой таблице, позволяет установить, что изготовление необходимых для свай труб из стали 09Г2С возможно только класса прочности С345, что соответствует кате-

⁶ГОСТ 19281-2014. Прокат повышенной прочности. Общие технические условия [Электронный ресурс]. – Введ. 2015-01-01. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200113779>.

гориям 5 и 6 (таблица 3 ГОСТ Р 58064–2018). При этом, согласно таблице 6 того же ГОСТа, для сталей 5 категории ударная вязкость ($KCV \geq 34$ Дж/см²) определяется только при температуре минус 20 °С, и только для категории 6 минимальная температура испытаний снижается до минус 40 °С. Анализ нормативной документации на прямошовные трубы, приведенный в СП 16.13330.2017, показал, что, учитывая жесткие ограничения по химическому составу, согласно ГОСТ 58064, трубы из стали 09Г2С, предназначенные для производства буроопускных свай, поставляются по ГОСТ 20295 и должны сертифицироваться на соответствие требованиям этого нормативного документа, а требования к величине ударной вязкости для сварных соединений прямошовных труб, изготовленных из стали 09Г2С методом ВЧС, предъявляемые СП 16.13330.2017, соответствуют только требованиям к 6 категории труб класса прочности С345, производимых по ГОСТ Р 58064. Распространение этих требований на трубы, выпускаемые по ГОСТ 20295, и трубы категории 5 ГОСТ Р 58064, не соответствует требованиям нормативных документов, на которые ссылается настоящий СП 16.13330.2017.

Также следует отметить, что в том же СП 16.13330.2017 (приложение В) буроопускные сваи относятся ко второй или третьей группе конструкций, соответственно, это или сварные конструкции либо их элементы, работающие при статической нагрузке при наличии растягивающих напряжений, или сварные конструкции либо их элементы, работающие при статической нагрузке преимущественно на сжатие, то есть, согласно СП 16.13330.2017, буроопускные сваи в ходе монтажа и эксплуатации вообще не испытывают динамических нагружений, поэтому не совсем ясно, почему в качестве параметра оценки хладостойкости металла свай выбрана ударная вязкость, а не статическая трещиностойкость, с помощью которой оценка работоспособности буроопускных свай в условиях низких климатических температур была бы более рациональной и приближенной к условиям их эксплуатации.

Целью настоящей работы было проведение исследований комплекса свойств металла свай для доказательства возможности использования для буроопускных свай сварных прямошовных труб, изготовленных методом высокочастотной сварки, и избыточности проведения послесварочной объемной термической обработки трубы для обеспечения требуемого уровня ударной вязкости основного металла и сварного соединения.

Объект и методы исследования

Для достижения поставленной цели были проведены лабораторные исследования металла труб, выполнен комплекс полигонных и опытно-промышленных испытаний свайных конструкций, изготовленных из прямошовных труб, произведенных методом ВЧС без послесварочной термической обработки. Проведено сравнение полученных результатов испытаний с результатами испытаний аналогичных свай, изготовленных из таких

же труб, но подвергшихся объемной термической обработке. Ранее в наших работах, в частности в [10], и в исследованиях других авторов [11–13] было показано, что объемная термическая обработка не может полностью восстановить структуру металла зоны термического влияния сварного шва и устранить полученные в ходе сварки дефекты и неравновесности микро-структуры сварного соединения, а обеспечение соответствия требованиям, указанным в различных строительных нормах и правилах, достигается путем изменения геометрии шва — образования при сварке, его усиления и формирования в этих зонах структур повышенной прочности. При этом дополнительная термическая обработка прямошовных труб, сваренных методом ВЧС, повышает их себестоимость примерно на 20 %. Для проведения исследований были выбраны прямошовные трубы, сваренные методом ВЧС, с объемной послесварочной обработкой и без термической обработки. Диаметр труб 219 мм, толщина стенки 7,5 мм, материал — сталь 09Г2С. Химический состав металла труб полностью соответствовал ГОСТ 19281-2014. Проведенный визуально-измерительный и ультразвуковой контроль всех труб не выявил каких-либо недопустимых дефектов сварных швов.

Для испытания работоспособности и моделирования эксплуатации фундамента из буроопускных свай в условиях ММГ и оценки влияния послесварочной термической обработки на эксплуатационную надежность буроопускных свай в условиях многолетнемерзлых грунтов были закуплены трубы, изготовленные по ГОСТ 58064, после объемной термической обработки и без нее — сразу после проведения сварочных работ. Длина труб составляла 6 м, толщина стенки 7 мм, диаметр трубы 219 мм. Из труб были изготовлены полноразмерные макеты буроопускных свай с длиной трубной части сваи 4 м — оставшиеся 2 погонных метра каждой из труб были использованы при проведении лабораторных испытаний. Испытания работоспособности фундамента были проведены на климатическом полигоне ФИЦ «Якутский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук» в г. Якутске (глубина сезонного оттаивания грунта — деятельного слоя — в месте установки свай не превышает 1,5 м). Выбор места расположения полигона был обусловлен климатическими условиями — средняя годовая температура в г. Якутске составляет минус 9,7 °С, а температурный диапазон *зима — лето* превышает 100 °С — от минус 60 °С зимой до плюс 38 °С летом, при этом число температурных переходов через ноль в течение года не менее 50 раз. То есть сваи не только были погружены в многолетнемерзлые грунты, но дополнительно испытывали максимально экстремальное температурное воздействие надземного участка [14].

На территории полигона выполнена разбивка осей свайного поля и определен участок погружения свай. С целью создания максимально неблагоприятных температурных условий монтажа свай их установка была проведена в зимние месяцы 2022 г. при температуре наружного воздуха минус 35 °С. Всего было установлено 14 свай в двух типах грунтов —

плотном сжимаемом суглинистом грунте и влажном просадочном — за- торфованном. Глубина погружения свай составляла 3,5 м, высота свай над поверхностью грунта — 50 см. На каждую из свай был установлен рост- верк, обеспечивающий размещение груза массой 1,5 т (рис. 1 а). В процес- се полигонных испытаний проводились визуально-измерительный кон- троль свай в доступных местах и геотехнический мониторинг, основанный на натурных наблюдениях за деформациями (вертикальными перемещени- ями) и температурным режимом грунтов их оснований. После полутора лет полигонных испытаний часть свай была извлечена для проведения иссле- дований (рис. 1 б, в, г). Для проведения исследований из трубчатой части сваи были вырезаны три участка трубы: первый — расположенный на от- крытом воздухе, второй — в зоне летнего оттаивания (деятельного слоя грунта) и третий — в зоне ММГ.

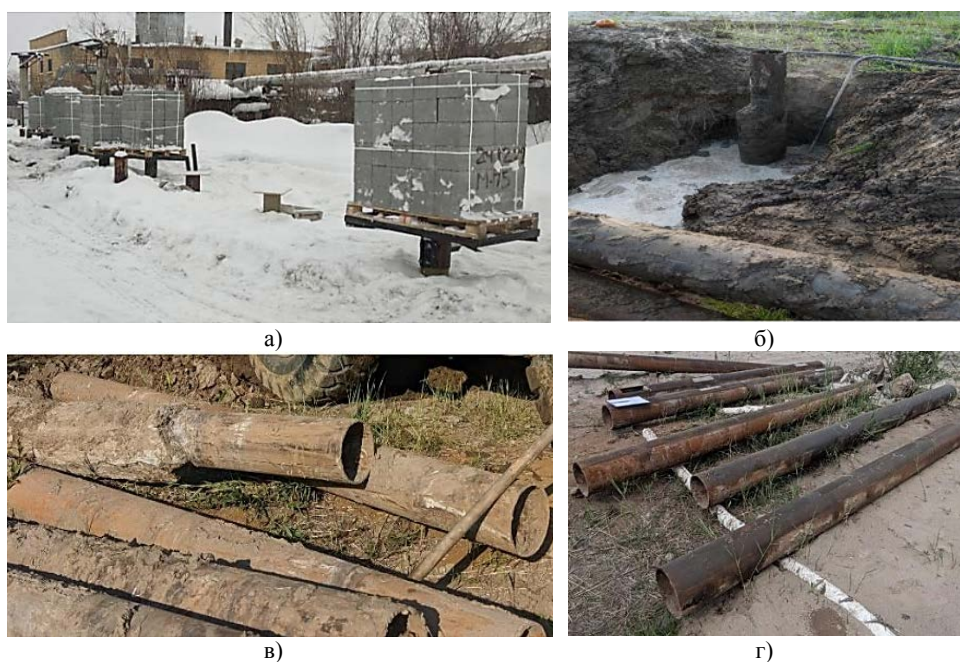


Рис. 1. Сваи на полигоне ФИЦ «Якутский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук»: а) сваи с установленными ростверками с бетонными грузами общей массой 1,5 т; б) извлеченные сваи после испытаний на полигоне; в) сваи до очистки; г) сваи после очистки

Оценка влияния послесварочной обработки на работоспособность буроопускных свай, изготовленных из прямошовных труб, сваренных ме- тодом ВЧС, и их механических свойств осуществлялась путем оценки ве- личины остаточных сварочных напряжений в точках, расположенных на линии, перпендикулярной сварному шву, по центру образцов с внешней и внутренней стороны трубных фрагментов на рентгеновском дифрактометре Ultima IV фирмы Rigaku; испытаний основного металла и металла сварного

соединения на растяжение на универсальной испытательной машине Instron 8850 и ударный изгиб на маятниковом копре INSTRON мод. 600MPX (ГОСТ 1497-84⁷, ГОСТ 6996-68⁸, ГОСТ 9454-78⁹). Испытания на трещиностойкость металла свай были проведены в соответствии с ГОСТ 25.506-85¹⁰. Металлографический анализ на поперечных шлифах выполнен на оптическом микроскопе Reichert-Jung MeF3A при увеличениях в 50–500 раз. Микротвердость определяли по методу Виккерса на приборе Reichert-Jung Micro-Duromat 4000E в соответствии с процедурой, предписанной ГОСТ 9450-76¹¹. Коррозионная стойкость металла сварного соединения была испытана в соответствии с ГОСТ 9.908-85¹². Ультразвуковой контроль металла сварного соединения свай выполнен с помощью импульсного дефектоскопа УД2В-46П в соответствии с требованиями ГОСТ 55724-2013¹³. Магнитопорошковая дефектоскопия выполнена в соответствии с ГОСТ 56512-2015¹⁴.

До полигонных испытаний был проведен визуально-измерительный контроль металла швов всех труб, выполнена магнитопорошковая и ультразвуковая дефектоскопия. Был обнаружен ряд дефектов сварных швов. По итогам анализа принято решение использовать трубы с обнаруженными дефектами с целью определения их роли в развитии механических и коррозионных повреждений в условиях агрессивного воздействия грунтов и экстремально низких температур.

Результаты и обсуждение

Результатами геотехнического мониторинга, проводимого в ходе полигонных испытаний ежеквартально, было установлено, что вертикальные перемещения свай не зависели от режима их термической обработки и составили от 0,4 до 1,8 мм на плотном грунте, что не превышает предельно

⁷ ГОСТ 1497-84 (ИСО 6892-84). Группа В09. Металлы. Методы испытаний на растяжение [Электронный ресурс]. – Введ. 1986-01-01. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200004888>.

⁸ ГОСТ 6996-66 (ИСО 4136-89, ИСО 5173-81, ИСО 5177-81). Группа В09. Сварные соединения. Методы определения механических свойств [Электронный ресурс]. – Введ. 1967-01-01. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200003544>.

⁹ ГОСТ 9454-78. Группа В09. Металлы. Метод испытания на ударный изгиб при пониженных, комнатной и повышенных температурах [Электронный ресурс]. – Введ. 1979-01-01. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200005045>.

¹⁰ ГОСТ 25.506-85. Группа В09. Расчеты и испытания на прочность. Методы механических испытаний металлов [Электронный ресурс]. – Введ. 1986-01-01. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200004652>.

¹¹ ГОСТ 9450-76 (СТ СЭВ 1195-78). Группа Т59. Измерение микротвердости вдавливанием алмазных наконечников [Электронный ресурс]. – Введ. 1977-01-01. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200012869>.

¹² ГОСТ 9.908-85. Группа Т99. Единая система защиты от коррозии и старения. Металлы и сплавы [Электронный ресурс]. – Введ. 1987-01-01. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200007383>.

¹³ ГОСТ Р 55724-2013. Контроль неразрушающий. Соединения сварные. Методы ультразвуковые [Электронный ресурс]. – Введ. 2015-07-01. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200107569>.

¹⁴ ГОСТ Р 56512-2015. Контроль неразрушающий. Магнитопорошковый метод. Типовые технологические процессы [Электронный ресурс]. – Введ. 2016-06-01. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200122220>.

допустимое значение ошибки их определения ($m\sigma$ доп $\leq \pm 2,0$ мм), и более 3,0 мм в просадочном заторфованном грунте.

После извлечения свай (по 3 сваи из труб с послесварочной термической обработкой и без нее) был выполнен повторный визуально-измерительный, магнитопорошковый и ультразвуковой контроль сварных соединений труб. По результатам анализа полученных данных контроля не было выявлено каких-либо дефектов, связанных с их длительным пребыванием в условиях полигона, или развития ранее обнаруженных дефектов сварных швов. В местах дефектов были изготовлены металлографические шлифы — виды дефектов приведены на рис. 2. Хотя обнаруженные дефекты не привели к появлению и развитию хрупких трещин или коррозионных повреждений, тем не менее, в ходе длительной эксплуатации они могут явиться источниками ускоренного разрушения свай. Следовательно, требуется повышение качества выполнения сварочных работ.

Основным тезисом о необходимости выполнения послесварочной термической обработки прямошовных труб, изготовленных методом ВЧС, является тезис об опасности высокого уровня остаточных сварочных напряжений в металле шва и их негативной роли в формировании длительной работоспособности свай, погруженной в многолетнемерзлый грунт. Известно [15], что в сталях типа 09Г2С следует ожидать остаточных сварочных напряжений только первого рода, то есть напряжений, уравновешенных в пределах областей, размеры которых соизмеримы с размерами трубы.

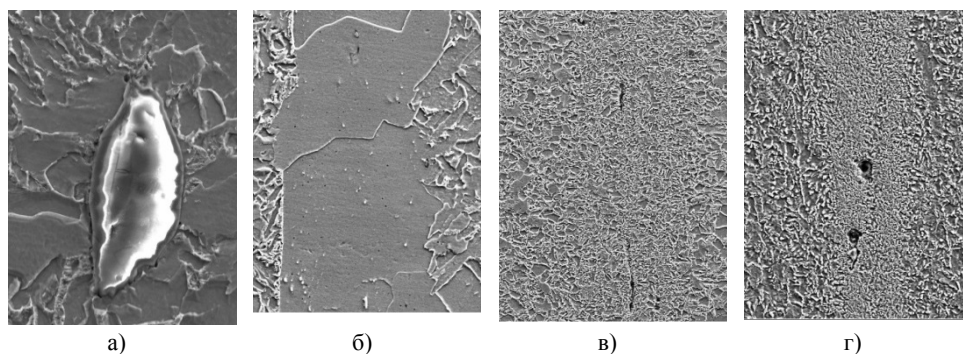


Рис. 2. Типичные дефекты в линии сплавления, обнаруженные при исследовании металла сварных соединений в исходном состоянии: а) отдельные крупные оксиды ($\times 1500$); б) точечные и строчечные неметаллические включения, в основном оксиды ($\times 400$); в) несплавления ($\times 150$); г) поры ($\times 150$)

Причиной возникновения подобных напряжений, как растягивающих, так и сжимающих, является неравномерный нагрев микрообъемов металла при ТВЧ воздействии, при котором создается неравномерное поле температур в соединяемых поверхностях. С этой целью в работе были проведены исследования величины остаточных сварочных напряжений первого рода в трубах в исходном состоянии до установки на полигоне и после

полуторогодиной выдержки в грунтах обоих типов. Измерения были проведены от линии сплавления шва до точек, удаленных от линии сплавления на 20 мм. Результаты измерений остаточных напряжений зоны сварного соединения приведены в таблице 2 на примере результатов измерений участка 2 (зона деятельного грунта) свай, установленной на заторфованных грунтах. Результаты исследований остаточных напряжений участков 1 и 3 данной свай и свай, установленной на суглинистом участке, показали результаты, близкие к данным таблицы 1.

Таблица 1

Остаточные сварочные напряжения в трубных элементах свай

Поверхность	Состояние*	Расстояние от линии сплавления (ЛС) сварного шва, мм						
		ЛС	1,5	3	5	10	15	20
		Остаточные напряжения, МПа						
Наружная	1	-25	-37	-42	-42	-34	3	17
	2	-31	-44	-45	-39	-81	-11	23
	3	-23	-50	-53	-59	-101	-72	-34
	4	-163	-157	-82	-51	-177	-170	-163
Внутренняя	1	109	127	123	120	117	114	106
	2	38	24	33	42	58	42	38
	3	117	117	121	143	127	106	84
	4	45	26	39	48	68	61	58

Примечание:

* 1 — труба без термической обработки в исходном состоянии; 2 — термически обработанная труба в исходном состоянии; 3 — труба без термической обработки после полигонных испытаний; 4 — термически обработанная труба после полигонных испытаний.

Таким образом, было показано, что величины остаточных сварочных напряжений в термически обработанных трубах и трубах без термической обработки близки между собой как в исходном состоянии, так и после полигонных испытаний на всей длине свай. На наружных поверхностях металла шва (линии сплавления) и зоны термического влияния швов обеих труб (в участках 1–3) в основном обнаружены сжимающие напряжения, на внутренней — растягивающие, а величина остаточных напряжений находится в пределах от напряжения сжатия наружной поверхности не более 180 МПа до 150 МПа растягивающих напряжений на внутренней поверхности. Анализ остаточных напряжений исследованных образцов труб также позволил определить, что уровень микроискажений во всех исследованных образцах как в исходном состоянии, так и после полигонных испытаний с наружной и внутренней стороны труб примерно одинаков и составляет $5,1 \cdot 10^{-3}$ – $7,2 \cdot 10^{-3}$. Также было отмечено, что уровень микроискажений после полигонной выдержки свай снизился на порядок, а разница в их величинах между термически обработанными сваями и сваями без термической обработки мала и не превышает 5–11 %.

В ходе работы был проведен анализ влияния выдержки на вырезанные из труб образцы. В таблицах 2 и 3 приведены результаты механических испытаний зон сварных соединений металла труб в исходном состоянии и после полигонных испытаний.

Таблица 2

**Механические свойства основного металла
и сварных соединений трубных элементов свай**

Состояние*	Основной металл			Сварное соединение		
	$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_B , МПа	δ_5 , %	$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_B , МПа	δ_5 , %
1	450	585	26	450	590	14**
2	465	610	28	474	632	15
3-1	430	565	26	422	557	15
3-2	445	570	27	453	577	16
3-3	425	565	25	441	569	16
4-1	450	580	27	440	575	14
4-2	445	570	28	436	570	18
4-3	450	570	26	445	574	15
ГОСТ 5520-79	>345	>490	>21			

Примечание:

*1 — труба без термической обработки в исходном состоянии; 2 — термически обработанная труба в исходном состоянии; 3 — труба без термической обработки после полигонных испытаний, где 3-1 — образцы трубы, расположенной на открытом воздухе, 3-2 — образцы трубы, расположенной в деятельном слое грунта, 3-3 — образцы трубы, расположенной в зоне ММГ; 4 — термически обработанная труба после полигонных испытаний, где 4-1 — образцы трубы, расположенной на открытом воздухе, 4-2 — образцы трубы, расположенной в деятельном слое грунта, 4-3 — образцы трубы в зоне ММГ;

** Все образцы разрушились по зоне термического влияния сварного соединения.

Как видно из приведенных данных, механические свойства основного металла и металла сварного соединения термически обработанной трубы и трубы без послесварочной термической обработки практически не отличаются друг от друга как в исходном состоянии (до полигонных испытаний), так и после полутора лет выдержки в условиях, максимально приближенных к условиям эксплуатации свайного фундамента в зоне многолетнемерзлых грунтов. Так, свойства основного металла всех испытанных образцов находятся в следующих диапазонах: предел текучести — 425–465 МПа, временное сопротивление — 570–610 МПа, относительное удлинение — 25–28 %, что полностью соответствует требованиям ГОСТ 5520-79¹⁵ и ГОСТ 20295 (свойства основного металла труб класса прочности К55, согласно таблице 7, не менее следующих значений: временное сопротивление — 539 МПа, предел текучести — 372 МПа, относительное удлинение — 20 %). Анализ образцов, вырезанных из зоны сварного соедине-

¹⁵ ГОСТ 5520-79. Группа В23. Прокат листовой из углеродистой, низколегированной и легированной стали для котлов и сосудов, работающих под давлением. Технические условия [Электронный ресурс]. — Введ. 1980-01-01. — URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200005025>.

ния, показал, что все они разрушены по основному металлу — на расстоянии от 2 до 5 мм от линии сплавления сварного шва. Прочностные свойства этой группы образцов также полностью удовлетворяют требованиям ГОСТ 5520-79 и ГОСТ 20295, относительное удлинение находится в пределах 14–18 % вне зависимости от того, были образцы вырезаны из труб с после-сварочной термической обработкой или без нее.

Результаты исследования ударной вязкости металла труб приведены в таблице 3. Следует обратить внимание на то, что СП 16.13330.2017 (таблица В1) следующим образом прописывает нормируемый показатель ударной вязкости металла труб, изготовленных методом ВЧС: «нормы распространяются на ударную вязкость основного металла, металла сварного шва и границы сплавления. Ударная вязкость принимается для образцов с острым надрезом». Учитывая, что в случае сварки токами высокой частоты, то есть сварки давлением, металл шва — «сплав, образованный расплавленным основным и наплавленным металлом или только переплавленным основным металлом» (п. 121 ГОСТ 2601–84), — отсутствует, а ширина линии сплавления обычно не превышает 20–100 мкм (рис. 3), выполнить требования СП 16.13330.2017 практически невозможно, так как радиус закругления вершины V-образного надреза образца (тип 11-14 ГОСТ 9454-78) составляет 250 ± 25 мкм, то есть в 2,5–10 раз больше, чем линия сплавления шва, полученного методом ВЧС).

Таблица 3

**Ударная вязкость основного металла и сварных соединений
трубных элементах свай**

Состояние*	Основной металл				Сварное соединение**				
	KCV Дж/см ² при температуре, °C				KCV Дж/см ² при температуре, °C				KCU ₄₀
	20	–20	–40	–60	20	–20	–40	–60	
1	52	49	40	34	61/39	51/34	38/18	22/7	35
2	57	51	43	36	54/41	50/36	42/27	29/14	38
3-1	52	47	39	33	50/31	50/31	40/16	25/11	34
3-2	49	45	40	34	49/33	50/31	42/19	28/17	36
3-3	49	48	38	34	51/25	49/29	41/14	26/12	34
4-1	61	54	41	37	52/37	52/37	44/26	24/16	39
4-2	57	55	40	36	51/38	51/34	42/16	26/15	36
4-3	60	52	41	35	53/35	49/34	43/19	27/14	38

Примечание:

* Маркировка состояния образцов аналогична маркировке из таблицы 2;

** В числителе — испытания образцов с надрезом, расположенным максимально близко к линии сплавления; в знаменателе — по зоне термического влияния сварного соединения.

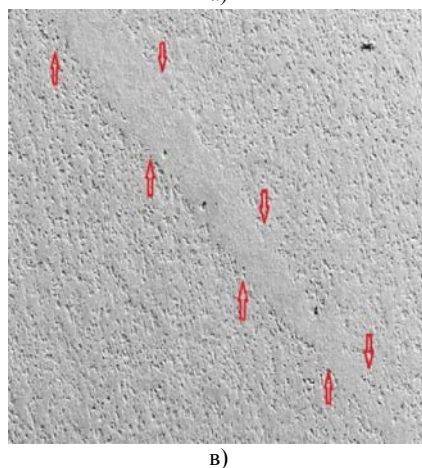
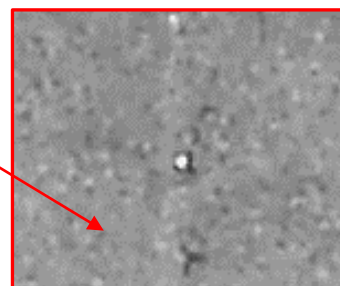
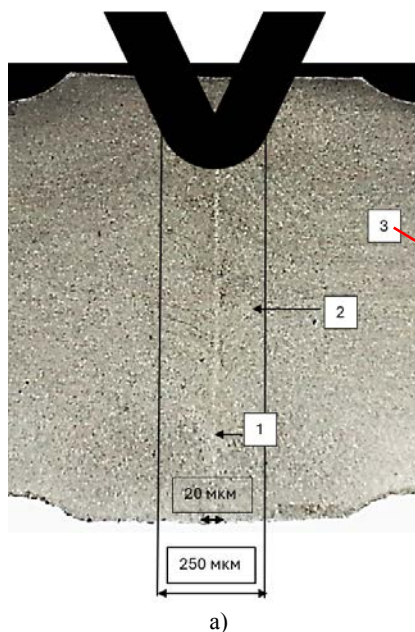


Рис. 3. Микроструктура металла сварного соединения труб ВЧС:
 а) общий вид (1 — линия сплавления, 2 — зона термического влияния, 3 — линии течения металла, сверху черным цветом схематично показан V-образный надрез образца для испытаний на ударный изгиб (KCV));
 б) дефекты на линии сплавления;
 в) линия сплавления (увеличение $\times 400$, средняя ширина линии сплавления у наружной поверхности трубы — 20 мкм)

При проведении испытаний для получения максимально приближенного к требованиям СП 16.13330.2017 результата — определения ударной вязкости по линии сплавления — часть образцов до нанесения надреза была подвергнута полировке и травлению с целью выявления линии сплавления и разметке по этой линии для последующего нанесения надреза. В таблице 3 в графе «Сварное соединение» в числителе приведены результаты испытаний металла после предварительной разметки линии сплавления, в знаменателе — без разметки, когда надрез с высокой степенью вероятности проходил по зоне термического влияния сварного шва.

В числе показателей надежности и долговечности буроопускных свай, учитывая их длительное пребывание в средах различной коррозионной агрессивности, было необходимо определить влияние послесварочной термической обработки трубы на ее сопротивляемость агрессивному кор-

розионному воздействию. Исследования были проведены в двух типах сред, которые могут влиять на коррозионную стойкость металла свай — щелочной и кислотной. К щелочным грунтам обычно относят глинистые почвы с высоким pH (более 8,5), иногда такие грунты имеют твердый известковый слой на глубинах, соответствующих глубине деятельного слоя, к кислым почвам относятся заторфованные грунты с повышенным содержанием гуминовых кислот, ряд осадочных пород, особенно в зоне хвойных лесов и лесотундре [16, 17]. Исследования коррозионной стойкости были проведены в соответствии с требованиями ГОСТ 9.908-85 в двух типах сред: щелочной (pH = 11) и кислой (pH = 3). Образцы, вырезанные из труб до и после полигонных испытаний, были испытаны на стойкость к общей коррозии в двух модельных средах. Среда 1–5 масс. % водный раствор хлорида натрия с доведением уксусной кислотой до pH = 3; среда 2–5 масс. % водный раствор хлорида натрия с концентрацией 0,1 масс. % с доведением гидрооксидом натрия до pH = 11. Продолжительность испытания составила 240 часов. Температура испытательной среды 23 ± 2 °C поддерживалась на протяжении всего испытания.

Результаты испытаний приведены в таблице 4, на рис. 4 показан вид образцов после испытаний.

Таблица 4

Скорость коррозии основного металла и сварных соединений трубных элементов свай в щелочной и кислой средах

Состояние*	Щелочная среда pH = 11		Кислая среда pH = 3	
	Скорость коррозии, г/м ² ·ч	Скорость коррозии, мм/год	Скорость коррозии, г/м ² ·ч	Скорость коррозии, мм/год
1	0,0983	0,0686	0,2872	0,3209
2	0,0874	0,0712	0,2912	0,3270
3–1	0,0795	0,0710	0,2898	0,3216
3–2	0,0923	0,0693	0,2870	0,3223
3–3	0,0698	0,0719	0,2903	0,3241
4–1	0,0911	0,0731	0,2906	0,3215
4–2	0,0814	0,0770	0,2877	0,3221
4–3	0,0785	0,0639	0,2901	0,3261

Примечание:

* Маркировка состояния образцов аналогична маркировке из таблицы 2.

Было установлено, что скорость коррозии всех испытанных образцов (рис. 4) находится в пределах 0,3 мм/год в кислых средах и около 0,1 мм/год в щелочных средах. Влияния послесварочной термической обработки на коррозионную стойкость основного металла и зон сварного соединения труб обнаружено не было.

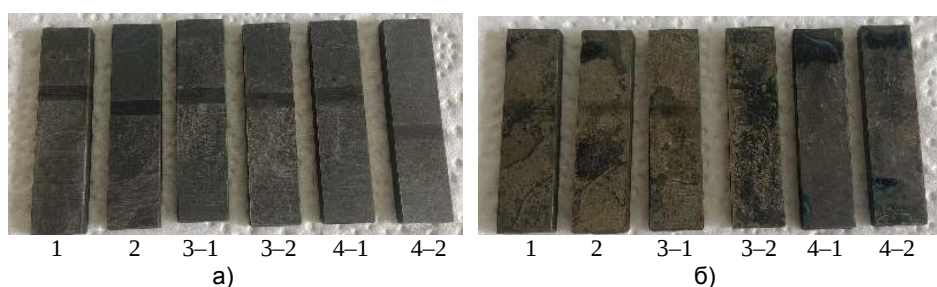


Рис. 4. Внешний вид образцов после испытания с отложениями продуктов коррозии: а) с $pH = 3$; б) с $pH = 11$ (маркировка состояния образцов соответствует маркировке из таблицы 2)

Учитывая, что по СП 16.13330.2017 сваи относятся к третьей группе конструкций, т. е. конструкций, эксплуатируемых в условиях статического нагружения при сжимающих или/и сжато-изгибающих усилиях нагружения, было определено влияние послесварочной термической обработки на сопротивляемость металла труб развитию трещин в процессе статического нагружения — критическую величину раскрытия трещины (СТОД), δ_c . Согласно ГОСТ 25.506-85, такие испытания проводятся при испытаниях на трехточечный изгиб образцов типа 4 — плоских прямоугольных образцов с краевой трещиной. В соответствии с [18], испытание по определению СТОД проводится в три этапа. Первый является подготовительным и служит для создания усталостного увеличения длины надреза образца, то есть создания трещины. Второй этап — основной и заключается в квазистатическом изгибном нагружении образца до состояния, при котором длина трещины начнет прогрессировать. Третий этап состоит в проверке корректности определения полученной на предыдущем этапе критической величины раскрытия вершины трещины. По данным [19, 20], при оценке трещиностойкости зоны термического влияния сварного соединения может наблюдаться достаточно большой разброс результатов СТОД, что авторы связывают со случайным попаданием в ту или иную область термического влияния сварного шва. Дополнительное внимание требуется при определении того, в какой части зоны термического влияния будет нанесен надрез.

В ходе работы были испытаны образцы основного металла и зоны сварного соединения труб. Для обеспечения максимально точного нанесения надреза в область линии сплавления поверхность образцов в этой зоне предварительно полировалась и травилась металлографическим травителем — 4 %-ным раствором азотной кислоты в спирте до выявления «белой линии» (линии сплавления шва). Результаты испытаний, проведенных при температуре минус 20 °С, приведены в таблице 5.

Таблица 5

**Трещиностойкость основного металла
и металла сварных соединений трубных элементов свай**

Состоя- ние*	Номер испытания				Среднее	Состоя- ние*	Номер испытания				Среднее
	1	2	3	4			1	2	3	4	
	СТОД, мм						СТОД, мм				
	Основной металл						Сварное соединение				
1	0,57	0,49	0,61	0,53	0,55	1	0,43	0,35	0,31	0,39	0,37
2	0,61	0,53	0,60	0,55	0,57	2	0,51	0,33	0,41	0,34	0,40
3–1	0,56	0,51	0,59	0,57	0,56	3–1	0,41	0,29	0,39	0,35	0,36
3–2	0,54	0,55	0,52	0,55	0,54	3–2	0,31	0,43	0,32	0,37	0,38
3–3	0,49	0,62	0,60	0,54	0,56	3–3	0,29	0,37	0,33	0,35	0,34
4–1	0,61	0,55	0,51	0,57	0,56	4–1	0,42	0,37	0,41	0,35	0,39
4–2	0,56	0,52	0,60	0,51	0,55	4–2	0,31	0,36	0,37	0,32	0,34
4–3	0,52	0,55	0,49	0,59	0,54	4–3	0,47	0,31	0,37	0,36	0,38

Примечание:

* Маркировка состояния образцов аналогична маркировке из таблицы 2.

Как следует из приведенных данных, трещиностойкость основного металла и зон сварного соединения трубы без термической обработки и после объемной послесварочной термической обработки имеет близкие значения как в исходном состоянии, так и после полигонных испытаний.

Поверхности разрушения образцов сварных соединений (рис. 5) представляют собой комбинированные структуры: вблизи усталостной трещины — зоны вязкого ямочного отрыва, по мере удаления от трещины — участки скола и квазискола, трещина развивается по ферритному зерну линии сплавления (рис. 5 б, г).

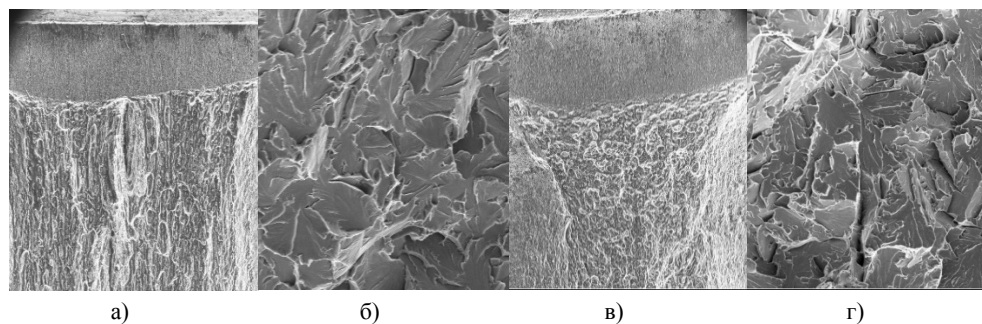


Рис. 5. Поверхности разрушения сварного соединения: а, б) — состояние 3–2; в, г) состояние 4–2 (увеличение а, в $\times 35$; б, г $\times 2000$)

Выводы

В работе был выполнен комплекс неразрушающих и разрушающих испытаний металла трубных элементов буроопускных свай, эксплуатация которых планируется при обустройстве месторождений полезных ископаемых в Арктической и Субарктической зонах России в условиях ММГ. С целью уточнения возможности использования в этом регионе буроопускных свай без послесварочной термической обработки были проведены испытания полноразмерных макетов свай на полигоне ФИЦ «Якутский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук» (г. Якутск). После полуторагодичных полигонных испытаний сваи были подвергнуты комплексу испытаний, по результатам которых можно сделать ряд выводов.

1. После проведения полигонных испытаний термически обработанных свай и свай без термической обработки не было выявлено каких-либо поверхностных или внутренних дефектов сварных соединений, способных препятствовать их дальнейшей безопасной эксплуатации.

2. Анализ остаточных сварочных напряжений свай обоих типов показал, что на наружных поверхностях металла шва (линии сплавления) и зоны термического влияния швов обеих труб присутствуют сжимающие напряжения, на внутренней — растягивающие. Величина остаточных напряжений находится в пределах менее 180 МПа на наружной поверхности труб и до 150 МПа на внутренней поверхности. Установлено, что уровень микроискажений во всех исследованных образцах в исходном состоянии и после полигонных испытаний с наружной и внутренней стороны труб примерно одинаков и составляет $5,1 \cdot 10^{-3} - 7,2 \cdot 10^{-3}$. Также было отмечено, что уровень микроискажений после полигонной выдержки свай снизился на порядок, а разница в их величинах между термически обработанными сваями и сваями без термической обработки мала и не превышает 5–11 %.

3. Механические свойства металла трубных элементов свай как в исходном состоянии, так и после полигонных испытаний близки и соответствуют требованиям ГОСТ 20295. Следует отметить, что требования СП 16.13330.2017 к величине ударной вязкости основного металла и сварных соединений труб не могут быть выполнены, так как литого металла шва в трубах, изготовленных методом ВЧС, не существует, а линия сплавления имеет ширину в 2–10 раз меньше, чем радиус скругления вершины V-образного надреза образцов 11–14 типов (ГОСТ 9454-78).

4. Показано, что коррозионная стойкость основного металла и сварных соединений обеих труб идентична и составляет 0,3 мм/год в кислых средах (pH = 3) и около 0,1 мм/год в щелочных средах (pH = 11).

5. Установлено, что трещиностойкость CTOD основного металла и сварных соединений обеих труб близка и при температуре испытаний минус 20 °С находится в пределах: основного металла — 0,53–0,57 мм, сварного соединения — 0,34–0,40 мм. Анализ поверхностей разрушения зон сварных соединений обеих труб показал, что имеет место смешанный

механизм развития трещины — у вершины усталостной трещины основным механизмом разрушения является ямочный отрыв, по мере удаления от нее происходит постепенное изменение с вязкого на хрупкий характер разрушения типа квазискола и скола, а хрупкая трещина развивается по ферритным зернам линии сплавления шва.

6. Проведенные исследования показали, что объемная термическая обработка не оказывает существенного влияния на механические свойства и микроструктуру свай из стали 09Г2С как в состоянии поставки, так и после эксплуатационной выдержки в грунтах различного типа.

7. Оценка качества металла швов обеих труб показала, что для повышения надежности и обеспечения безопасной эксплуатации буропускных свай, изготовленных методом ВЧС без послесварочной термической обработки, необходимо оптимизировать режим сварки токами высокой частоты, что также должно положительно сказаться на повышении ударной вязкости сварных соединений труб из стали 09Г2С и удовлетворении требований СП 16.13330.2017.

Список источников

1. Алексеев, А. Г. К вопросу усовершенствования технологии устройства и расчета различных видов свай / А. Г. Алексеев, П. М. Сазонов, Д. В. Зорин. — Текст : непосредственный // Вестник НИЦ Строительство. — 2019. — № 1 (20). — С. 5–13.
2. Свая на вечномерзлом грунте / О. М. Преснов, Л. А. Иванова, С. И. Бычкова, Д. А. Ломова. — Текст : непосредственный // Экономика строительства. — 2022. — № 1 (73). — С. 41–45.
3. Алексеева, А. И. Информационные модели криосферы Земли / А. И. Алексеева, В. Т. Балобаев. — Текст : непосредственный // Криосфера Земли. — 2002. — Т. VI, № 1. — С. 62–71.
4. Гончаров, Ю. М. Производство свайных работ на вечномерзлых грунтах / Ю. М. Гончаров, Ю. О. Таргулян, С. Х. Варганов. — 2-е изд., перераб. и доп. — Ленинград : Стройиздат, 1981. — 160 с.
5. Спиридонов, А. А. Системное развитие транспортной инфраструктуры в Арктике / А. А. Спиридонов, А. М. Фадеев. — DOI 10.51823/74670_2022_4_31. — Текст : непосредственный // Арктика 2035: актуальные вопросы, проблемы, решения. — 2022. — № 4 (12). — С. 31–37.
6. Притула, В. В. Коррозионная ситуация на газонефтепроводах России и их промышленная безопасность / В. В. Притула. — Текст : непосредственный // Трубопроводный транспорт: теория и практика. — 2015. — № 2 (48). — С. 6–10.
7. Гуляев, А. С. Влияние почв на коррозию стальных труб. Моделирование стресс-коррозионных процессов / А. С. Гуляев. — DOI 10.22184/2227-572X.2017.37.6.74.77. — Текст : непосредственный // Аналитика. — 2017. — № 6 (37). — С. 74–77.
8. Технические решения ОАО «Гипротюменнефтегаз» при проектировании объектов нефтегазового комплекса на многолетнемерзлых грунтах (часть 1) / И. А. Щербинин, И. З. Фахретдинов, С. С. Иванов, И. А. Жолобов. — Текст : непосредственный // Нефтяное хозяйство. — 2015. — № 1. — С. 90–92.

9. Пьянков, С. А. Свайные фундаменты : учебное пособие / С. А. Пьянков. – Ульяновск : УлГТУ, 2007. – 104 с. – Текст : непосредственный.
10. Влияние послесварочной термической обработки на эксплуатационные свойства стали 09Г2С, применяемой для изготовления буроопускных свай / С. А. Ялыгин, Б. С. Ермаков, А. В. Столяров [и др.]. – DOI 10.51890/2587-7399-2024-9-1-173-182. – Текст : непосредственный // ПРОнефть. Профессионально о нефти. – 2024. – Т. 9, № 1 (31). – С. 173–182.
11. Ткачук, М. А. Разработка режимов локальной термической обработки сварного шва труб среднего диаметра, сваренных токами высокой частоты / М. А. Ткачук, О. А. Багмет, П. П. Степанов. – Текст : непосредственный // Сталь. – 2016. – № 3. – С. 54–59.
12. Исследование влияния термической обработки на металлофизические свойства металла сварных швов / Н. Г. Гончаров, А. А. Юшин, О. И. Колесников [и др.]. – DOI 10.28999/2541-9595-2021-11-4-412-419. – Текст : непосредственный // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. – 2021. – Т. 11, № 4. – С. 412–419.
13. Исследование причин снижения механических характеристик горячедеформированных отводов из стали 09Г2С / К. Н. Пантюхова, Д. А. Негров, О. Ю. Бургонова, В. Ю. Путинцев. – DOI 10.25206/1813-8225-2019-163-11-16. – Текст : непосредственный // Омский научный вестник. – 2019. – № 1 (163). – С. 11–16.
14. Старцев, О. В. Старение полимерных композиционных материалов в условиях экстремально холодного климата / О. В. Старцев, М. П. Лебедев, А. К. Кычкин. – DOI 10.14258/izvasu(2020)1-06. – Текст : непосредственный // Известия Алтайского государственного университета. – 2020. – № 1 (111). – С. 41–51.
15. Сальманов, И. Д. Остаточные напряжения и деформации при сварке / И. Д. Сальманов, М. Ю. Барановский, В. А. Тарасов. – Текст : непосредственный // Строительство уникальных зданий и сооружений. – 2014. – № 12 (27). – С. 64–75.
16. Брушков, А. В. Засоленные многолетнемерзлые породы Арктического побережья, их происхождение и свойства / А. В. Брушков. – Москва : Издательство Московского университета, 1998. – 330 с. – ISBN 5-211-04017-1. – Текст : непосредственный.
17. Шамрикова, Е. В. Кислотно-основное состояние почв таежной и тундровой зон Европейского Северо-Востока России : специальность 03.02.13 «Почвоведение» : диссертация на соискание ученой степени доктора биологических наук / Шамрикова Елена Вячеславовна ; Институт биологии Коми научного центра Уральского отделения Российской академии наук, 2015. – 302 с. – Текст : непосредственный.
18. Определение критической величины раскрытия трещины (CTOD) по испытаниям образцов на трехточечный изгиб / В. Н. Кожин, В. И. Астафьев, А. В. Иоффе [и др.]. – Текст : электронный // Вестник евразийской науки. – 2021. – Т. 13, № 3. – URL: <https://esj.today/PDF/27SAVN321.pdf> (дата обращения: 15.04.2024).
19. Маркадеева, А. Ю. Исследование трещиностойкости зоны термического влияния сварных соединений сталей, применяемых для арктических конструкций / А. Ю. Маркадеева, А. В. Ильин, М. А. Гусев. – DOI 10.18323/2073-5073-2018-1-43-51. – Текст : непосредственный // Вектор науки Тольяттинского государственного университета. – 2018. – № 1 (43). – С. 43–51.

20. Effect of strength mismatch on fracture mechanical behavior of HAZ-notched weld joint / F. Minami, M. Toyoda, C. Thaulow, M. Hauge. – DOI 10.2207/qjws.13.508. – Текст : непосредственный // Quarterly Journal of the Japan Welding Society. – 1995. – Vol. 13, No. 4. – P. 508–517.

References

1. Alekseev, A. G., Sazonov, P. M., & Zorin, D. V. (2019). On the issue of improving the technology of making and calculation of various types of piles. Bulletin of Science and Research Center of Construction, (1(20)), pp. 5-13. (In Russian).
2. Presnov, O. M., Ivanova, L. A., Bychkovskaya, S. I., & Lomova, D. A. (2022). Pile on permafrost soil. Construction Economy, (1(73)), pp. 41-45. (In Russian).
3. Alekseeva, O. I., & Balobaev, V. T. (2002). Information models of the Earth cryosphere. Kriosfera Zemli, 6(1), pp. 62-71. (In Russian).
4. Goncharov, Yu. M., Targulyan, Yu. O., & Vartanov, S. Kh. (1981). Pro-izvodstvo svaynykh rabot na vechnomerzlykh gruntakh. 2nd edition, revised. Leningrad : Stroyizdat Publ., 160 p. (In Russian).
5. Spiridonov, A. A., & Fadeev, A. M. (2022). Systematic development of transport infrastructure in the Arctic. Arctic 2035: current issues, problems, solutions, (4(12)), pp. 31-37. (In Russian). DOI 10.51823/74670_2022_4_31.
6. Pritula, V. V. (2015). Situation with corrosion on the Russian gas and oil pipelines and with their industrial safety. Pipeline transport: Theory and practice, (2(48)), pp. 6-10. (In Russian).
7. Gulayev, A. S. (2017). Effect of soils on the corrosion of steel pipes. Modeling stress-corrosion processes. Analytics, (6(37)), pp. 74-77. (In Russian). DOI 10.22184/2227-572X.2017.37.6.74.77
8. Shcherbinin, I. A., Fakhretudinov, I. Z., Ivanov, S. S., & Zholobov, I. A. (2015). Giprotymenneftegaz engineering solutions for construction of oil and gas industrial facilities in permafrost areas (Part 1). Oil Industry, (1), pp. 90-92. (In Russian).
9. P'yankov, S. A. (2007). Svaynye fundamenty. Ulynovsk, 104 p. (In Russian).
10. Yalygin, S. A., Ermakov, B. S., Stolyarov, A. V., Koinov, E. G., Shvetsov, O. V., Shaposhnikov, N. O., ... Golikov, N. I. (2024). The influence of heat treatment after high-frequency welding on the operational properties of steel 09G2S used for the manufacturing of drilled piles. Proneft. Professionals about Oil, (1(31)), pp. 173-182. (In Russian). DOI 10.51890/2587-7399-2024-9-1-173-182
11. Tkachuk, M. A., Bagmet, O. A., & Stepanov, P. P. (2016). Local heat treatment of weld seams in moderate-diameter pipe produced by high-frequency current. Steel in Translation, 46(3), pp. 224-229. (In English). DOI 10.3103/S0967091216030141
12. Goncharov, N. G., Yushin, A. A., Kolesnikov, O. I., Nesterov, G. V., & Azarin, A. I. (2021). Research of influence of heat treatment on metallophysical properties of metal of welded seams. Science and Technologies: Oil and Oil Products Pipeline Transportation, 11(4), pp. 412-419. (In Russian). DOI 10.28999/2541-9595-2021-11-4-412-419
13. Pantyukhova, K. N., Negrov, D. A., Burgonova, O. Yu., & Putintsev, V. Yu. (2019). Investigation of reasons for decrease in mechanical characteristics of hot-rolled steel 09G2S bends. Omsk Scientific Bulletin, (1(163)), pp. 11-16. (In Russian). DOI 10.25206/1813-8225-2019-163-11-16

14. Startsev, O. V., Lebedev, M. P., & Kychkin, A. K. (2020). Aging of polymer composites in extremely cold climates. *Izvestiya of Altai State University*, (1(111)), pp. 41-51. (In Russian). DOI 10.14258/izvasu(2020)1-06
15. Salmanov, I. D., Baranovskii, M. Yu., & Tarasov, V. A. (2014). Welding deformations and residual stresses. *Construction of Unique Buildings and Structures*, (12(27)), pp. 64-75. (In Russian).
16. Brushkov, A. V. (1998). *Zasolennyye mnogoletnemerzlye porody Arkticheskogo poberezh'ya, ikh proiskhozhdenie i svoystva*. Moscow, Izdatelstvo Moskovskogo universiteta Publ., 330 p. (In Russian). ISBN 5-211-04017-1
17. Shamrikova, E. V. (2015). *Kislotno-osnovnoe sostoyanie pochv taezhnoy i tundrovoy zon Evropeyskogo Severo-Vostoka Rossii*. Diss. kand. biolog. nauk. Syktyvkar, 302 p. (In Russian).
18. Kozhin, V. N., Astafev, V. I., Ioffe, A. V., Sergeeva, A. O., & Bulgakov, S. A. (2021). Critical crack opening (CTOD) determination from three-point flexion tests of samples. *The Eurasian Scientific Journal*, 13(3). Available at: <https://esj.today/PDF/27SAVN321.pdf> (accessed 15.04.2024)
19. Markadeeva, A. Yu., Ilyin, A. V., & Gusev, M. A. (2018). The study of fracture toughness of heat-affected zone of welded joints of steels applied for arctic structures. *Science Vector of Togliatti State University*, (1(43)), pp. 43-51. (In Russian).
20. Minami, F., Toyoda, M., Thaulow, C., & Hauge, M. (1995). Effect of strength mismatch on fracture mechanical behavior of HAZ-notched weld joint. *Quarterly Journal of the Japan Welding Society*, 13(4), pp. 508-517. (In English). DOI 10.2207/qjws.13.508

Сведения об авторах / Information about the authors

Шапошников Никита Олегович, кандидат технических наук, доцент, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, г. Санкт-Петербург, shaposhn_no@spbstu.ru

Nikita O. Shaposhnikov, *Candidat. of Engineering, Associate Professor, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Saint Petersburg*, shaposhn_no@spbstu.ru

Ялыгин Сергей Алексеевич, директор программ технологического развития функции «Капитальное строительство», Группа компаний «Газпром нефть»

Sergey A. Yalygin, *Director of Technological Development Programs of the "Capital Construction" function, "Gazprom Neft PJSC"*

Ермаков Борис Сергеевич, доктор технических наук, профессор, заведующий лабораторией ресурса материалов, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, г. Санкт-Петербург, ermakov_bs@spbstu.ru, ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-0932-2408>

Boris S. Ermakov, *Doctor of Engineering, Head of the Materials Resource Laboratory, Peter the Great Saint Petersburg Polytechnic University, Saint Petersburg*, ermakov_bs@spbstu.ru, ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-0932-2408>

Швецов Олег Викторович, кандидат технических наук, заместитель заведующего лабораторией ресурса материалов, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, г. Санкт-Петербург, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9368-4074>

Ермаков Сергей Борисович, ведущий инженер Научно-технологического комплекса «Новые технологии и материалы», Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, г. Санкт-Петербург, ermakov_sb@spbstu.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4243-0984>

Голиков Николай Иннокентьевич, доктор технических наук, и.о. заместителя генерального директора по науке и техническим проектам, Институт физико-технических проблем Севера СО РАН им. В. П. Ларионова, г. Якутск, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9209-1592>

Слепцов Гавриил Николаевич, заведующий отделом технологий сварки и металлургии, Институт физико-технических проблем Севера СО РАН им. В. П. Ларионова, г. Якутск

Клочков Юрий Сергеевич, доктор технических наук, доцент, и. о. ректора, Тюменский индустриальный университет, г. Тюмень, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7913-8285>

Oleg V. Shvetsov, Candidat. of Engineering, Deputy head of the Materials Resource Laboratory, Peter the Great Saint Petersburg Polytechnic University, Saint Petersburg, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9368-4074>

Sergey B. Ermakov, Leading engineer of the Scientific and Technological Center “New Technologies and Materials”, Peter the Great Saint Petersburg Polytechnic University, Saint Petersburg, ermakov_sb@spbstu.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4243-0984>

Nikolay I. Golikov, Doctor of Engineering, Acting Deputy Director for Science and Technical Projects, V. P. Larionov Institute of the Physical-Technical Problems of the North of the Siberian Branch of the RAS, Yakutsk, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9209-1592>

Gavriil N. Sleptsov, Head of Welding and Metallurgy Technology Department, V. P. Larionov Institute of the Physical-Technical Problems of the North of the Siberian Branch of the RAS, Yakutsk

Yurii S. Klochkov, Doctor of Engineering, Associate Professor, Acting Rector, Industrial University of Tyumen, Tyumen, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7913-8285>

Статья поступила в редакцию 05.08.2024; одобрена после рецензирования 19.08.2024; принята к публикации 23.08.2024.

The article was submitted 05.08.2024; approved after reviewing 19.08.2024; accepted for publication 23.08.2024.