

УДК 621.791.461
ГРНТИ 81.35.35

На правах рукописи



БОТВИН ГЛЕБ ВЛАДИМИРОВИЧ

**РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ СВАРКИ ПОЛИПРОПИЛЕНОВЫХ ТРУБ
НАГРЕТЫМ ИНСТРУМЕНТОМ В РАСТРУБ ПРИ ОТРИЦАТЕЛЬНЫХ
ТЕМПЕРАТУРАХ ОКРУЖАЮЩЕГО ВОЗДУХА**

Специальность: 05.02.10 – Сварка, родственные процессы и технологии

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург - 2020

Работа выполнена в Институте проблем нефти и газа Сибирского отделения
Российской академии наук
Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального
исследовательского центра «Якутский научный центр Сибирского отделения
Российской академии наук»

Научный руководитель:

Старостин Николай Павлович доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты:

Бухаров Сергей Викторович доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВО «Московский авиационный
институт (национальный исследовательский
университет)», профессор кафедры
«Технологии композиционных материалов,
конструкций и микросистем».

Волков Станислав Степанович кандидат технических наук, доцент
ФГБОУ ВО «Московский государственный
технический университет имени Н.Э. Баумана
(национальный исследовательский
университет)», профессор кафедры
«Технологии сварки и диагностики».

Ведущая организация: ФГАОУ ВО «Северо-Восточный федеральный
университет имени М.К. Аммосова»

Защита состоится **«30» сентября 2020 г. в 11⁰⁰** на заседании диссертационного
совета Д411.006.01 созданного на базе Федерального государственного унитарного
предприятия «Центральный научно-исследовательский институт конструкционных
материалов «Прометей» имени И.В. Горынина Национального исследовательского
центра «Курчатовский институт» (НИЦ «Курчатовский институт» – ЦНИИ КМ
«Прометей»), 191015, Санкт-Петербург, Шпалерная ул., 49.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке
НИЦ «Курчатовский институт» – ЦНИИ КМ «Прометей» и на сайте:

<http://dissovet.crism-prometey.ru/ThesisDetails.aspx?id=34>

Автореферат разослан « ____ » _____ 2020г.

Учёный секретарь
диссертационного совета Д411.006.01
доктор технических наук, профессор



Е.И.Хлусова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность. Применение полипропиленовых (ПП) труб для систем холодного и горячего водоснабжения позволяет коренным образом решить проблемы защиты от коррозии, значительно повысить долговечность, минимизировать затраты на эксплуатацию. Одним из основных факторов, препятствующих широкому применению таких перспективных труб в регионах холодного климата, является отсутствие надежной технологии сварки при низких температурах окружающего воздуха (ОВ). Согласно нормативным документам сварку ПП труб и деталей трубопровода рекомендуется проводить при температуре ОВ не ниже 0 °С либо в отапливаемых укрытиях. Из-за низких температур воздуха, например, в г. Якутске сварочные работы ПП труб на открытом воздухе могут вестись около 160 дней в год.

Установление ограничения по температуре наружного воздуха, при котором допускается проводить сварку ПП труб, связано с недостаточным использованием возможностей существующей технологии сварки. Не применяются методы управления температурным режимом сварки путем предварительного подогрева и использования теплоты, накопленной свариваемыми термопластичными материалами при их оплавлении. В ИПНГ СО РАН разработаны технологии сварки нагретым инструментом встык (сварка встык) и сварки деталями с закладными нагревателями (электромuftовая сварка) полиэтиленовых труб для газопроводов при значениях температуры ниже допустимых без использования укрытий.

Раструбное соединение ПП труб существенно отличается от стыкового и муфтового соединения труб. Поскольку для раструбного соединения используется нагретый инструмент другой формы, чем при сварке встык, и не используется закладной нагреватель, как при муфтовой сварке, возникает необходимость разработки технологии сварки в раструб при низких температурах, отличающейся от стыковой и муфтовой.

При сварке ПП труб при отрицательных температурах недостаточно исследованы условия формирования структуры материала сварного шва, обеспечивающего прочное соединение. Актуальной проблемой остается разработка технологии сварки ПП труб в раструб при отрицательных температурах на основе управления температурным режимом и обеспечения динамики температурного поля, свойственного сварке в условиях допустимых температур. При таких условиях можно ожидать формирования структуры сварного шва, обеспечивающего прочность соединения не ниже, чем при сварке при положительных температурах ОВ.

Работа выполнена в рамках утвержденного плана фундаментальных и прикладных исследований согласно проекта “Исследование физико-химических особенностей формирования морозостойких композиционных материалов и

прогнозирование их долговечности в условиях холодного климата” 2013-2016 гг., Госконтракта Республики Саха (Якутия) “Разработка технологии строительства систем холодного и горячего водоснабжения из ПП труб в зимних условиях Республики Саха (Якутия)” 2014-2015 гг. и договора– НИОКР/УИР “Исследование свойств трубопроводов из коррозионностойких материалов, включая полимерные, с целью разработки нормативной документации к применению в системах ГВС в условиях надземной прокладки” 2014-2015 гг.

Цель работы заключается в разработке технологии сварки ПП труб нагретым инструментом в раструб на открытом воздухе при низких температурах и научном обосновании условий формирования структуры материала шва, обеспечивающей прочность соединения не ниже, чем при сварке при допустимых нормативами температурах ОВ.

Для достижения цели поставлены следующие задачи:

- Изучение влияния низких температур при раструбной сварке ПП труб на структуру и свойства материалов зон сварных соединений.
- Исследование влияния скорости охлаждения на формирование структуры и прочность материала сварного шва.
- Установление взаимосвязи структуры и свойств материалов зон сварного соединения;
- Обоснование условия формирования структуры полипропилена в зоне термического влияния при сварке в раструб при отрицательных температурах, обеспечивающего качественное соединение.
- Исследование влияния предварительного подогрева и применения теплоизоляционной камеры на формирование структуры сварного раструбного соединения.
- Определение оптимальных параметров сварки нагретым инструментом в раструб ПП труб при низких температурах.
- Обеспечение кратковременной прочности и длительной несущей способности материала шва при сварке в раструб при отрицательных температурах не ниже соответствующих показателей сварных соединений, выполненных при допустимых температурах.
- Разработка технологии сварки нагретым инструментом в раструб ПП труб при отрицательных температурах, обеспечивающую качество сварного соединения выполненного при положительных температурах ОВ.

Основные научные положения, выносимые на защиту

- Установленные закономерности влияния отрицательных температур ОВ при сварке ПП труб нагретым инструментом в раструб на структуру материала шва и его физико-механические свойства.
- Результаты исследования причин снижения прочности раструбных сварных соединений ПП труб, выполненных при отрицательных температурах.
- Выявленные условия формирования структуры материала шва раструбных соединений при сварке ПП труб при низких температурах ОВ подобной структуре материала сварных соединений, выполненных при положительных температурах.
- Результаты определения технологических параметров раструбной сварки при отрицательных температурах, обеспечивающих структуру и прочность материала сварного шва, свойственные при сварке в условиях допустимых температур.

Научная новизна:

1. Установлено, что основной причиной снижения прочности сварных раструбных соединений ПП труб, выполненных при отрицательных температурах ОВ, является недостаточный нагрев участков, удаленных от сварного шва, что способствует увеличению кондуктивной теплопередачи при охлаждении, приводящей к формированию фибриллярной или фибриллярно-сферолитной структуры на участке вблизи шва и частично в зоне термического влияния трубы и муфты.
2. Установлено, что при раструбной сварке ПП труб независимо от температуры окружающей среды в области шва формируется сферолитная структура.
3. Установлено, что структура материала сварного шва, обуславливающая прочное раструбное соединение ПП труб не ниже 90% от прочности основного материала, сферолитная с размерами сферолитов 4-5 мкм. Условия формирования такой структуры включают распределение температуры в конце нагрева, близкое температурному полю сварки при допустимой температуре ОВ, и охлаждение материала шва со скоростью $V_{105-100}=10$, $V_{100-90}=20$ °C/мин.
4. Научно обоснована и экспериментально доказана возможность получения качественного сварного соединения ПП труб на открытом воздухе при отрицательных температурах путем предварительного подогрева свариваемого участка трубы и муфты с выравниванием температуры, оплавления в штатном режиме и охлаждения в теплоизоляционной камере.
5. Определены сочетания оптимальных технологических параметров сварки ПП труб различного сортамента при отрицательных температурах ОВ, приводящие к формированию сферолитной структуры материала шва, обеспечивающей прочность соединения не ниже 90% от прочности основного материала.

Научная новизна разработок защищена патентами РФ на изобретения (Пат. № 2627170, Пат. №2615890).

Личный вклад автора заключается в анализе научной литературы по сварке полимерных труб в различных условиях, постановке задач исследований, подготовке и проведении экспериментальной сварки при низких температурах ОВ, анализе и обобщении теоретических и экспериментальных результатов, внедрении разработок и включает:

1. Исследование влияния температур ОВ на структуру материала сварного шва и на динамику температурного поля при раструбной сварке ПП труб по существующей технологии и с ее нарушением.

2. Исследование тепловых процессов раструбной сварки ПП труб при различных температурах ОВ, включая естественно низкие температуры до минус 50 °С.

3. Определение технологических режимов в зависимости от температуры ОВ и проведение сварки ПП труб с расчетными параметрами при отрицательных температурах регионов холодного климата. Корректировку значений параметров.

4. Разработку методов испытаний для контроля качества сварных раструбных соединений, в том числе по ширине сварного шва.

5. Исследование кратковременной и длительной прочности раструбных соединений, выполненных при отрицательных температурах по предлагаемым режимам сварки.

6. Разработку технологии сварки ПП труб в раструб при отрицательных температурах ОВ, обеспечивающей прочность соединения не ниже прочности соединений, выполненных при положительных температурах.

Достоверность результатов исследований обеспечивается применением апробированных методов решения задач теплопроводности, стандартизованных методик, современного испытательного оборудования, выполнением большого объема экспериментов по сварке ПП труб при естественно низких температурах воздуха и испытаний полученных сварных соединений с положительным результатом.

Практическая значимость

Разработанная и научно обоснованная технология сварки нагретым инструментом в раструб расширяет диапазон допустимых температур ОВ до минус 50 °С при строительстве трубопроводов из ПП труб без использования временных отапливаемых укрытий.

Использование разработанной методики кратковременных механических испытаний позволяет количественно определить прочность сварного соединения ПП труб по выбранной ширине сварного шва.

Результаты проведенных исследований приняты к использованию в ПАО «Якутскэнерго».

Апробация результатов диссертации

Основные результаты исследований докладывались и обсуждались: на Всероссийской научно-практической конференции «Сварка и безопасность» (г. Якутск, 2012 г.), Международном симпозиуме «Новые материалы и технологии в условиях Арктики» (г. Якутск, 2014 г.), конференции «Материалы для технических устройств и конструкций, применяемых в Арктике» (г. Москва, 2015 г.), международной конференции «Механика, ресурс и диагностика материалов и конструкций» (г. Екатеринбург, 2016 г.), международной научно-практической конференции «Инновации, технологии, наука» (Киров, 2016г.), конференции Ассоциации сварщиков полимерных материалов «Сварка полимерных материалов» (г. Москва, 2017 г.).

Публикации. Всего опубликовано 54 научных труда. Основные результаты диссертационной работы отражены в 18 публикациях, из них 6 статей в журналах из Перечня рецензируемых научных изданий, 2 патента РФ на изобретение и 2 свидетельства государственной регистрации программ для ЭВМ. Материалы диссертации докладывались на 6 международных и российских конференциях.

Объем и структура работы. Диссертация изложена на 174 страницах, состоит из введения, 4 глав, основных результатов и выводов, 3 приложений, содержит 8 таблиц, 90 рисунков. Библиографический список включает 137 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, сформулированы ее цель и задачи, определены объект и предмет исследования, приведены научная новизна и практическая значимость.

В первой главе представлен аналитический обзор информационных источников, посвященных изучению состояния проблемы применения ПП труб. Описаны свойства полипропилена и сополимеров полипропилена, виды и типоразмеры объекта исследования.

В разное время изучением полимерных материалов, их свойств, сварочных процессов, формированием структуры и свойств сварных соединений полимеров занимались такие известные ученые как А.А. Адаменко, Ф.И. Бабенко, В.Е. Бухин, Б.Ф. Виндт, С.С. Волков, У.Ш.-М. Гисер, К.И. Зайцев, Г.К. Кайгородов, В.Ю. Каргин, Е.А. Кашковская, Г.В. Комаров, Г.Н. Кораб, А.С. Стручков и другие. Однако, в

настоящее время недостаточно исследована технология сварки ПП труб нагретым инструментом в раструб при низких температурах без строительства отапливаемых укрытий, что послужило основанием для постановки цели и задач работы.

Также выбраны направления исследования, проведена сравнительная оценка эффективности возможных направлений и обосновано оптимальное направление исследования, заключающееся в сварке с предварительным подогревом конца трубы и муфты с помощью сменных насадок.

Вторая глава посвящена определению параметров сварки ПП труб в раструб при низких температурах. Экспериментальное определение параметров сварки в широком интервале отрицательных температур для различных типоразмеров и сортментов ПП труб даже в регионе холодного климата, представляет достаточно сложную задачу. Поэтому для их определения предлагается использовать математические модели теплового процесса сварки, реализованные в виде программ с диалоговым режимом ввода-вывода данных, с корректировкой по результатам экспериментальной сварки. Приведено описание использованных при разработке технологии раструбной сварки математических моделей теплового процесса предварительного подогрева, оплавления и охлаждения под слоем теплоизоляции и без него.

Для обеспечения равномерного распределения температуры из допустимого для сварки значения температуры ОВ в стенке свариваемого конца трубы предложено предварительно подогреть конец трубы на длину, превышающую ширину сварного шва, специальными сменными насадками для подогрева, устанавливаемыми на нагревательную пластину серийно выпускаемого сварочного аппарата. Для ускорения процесса подогрева на пластине сварочного аппарата задается температура, превышающая максимальное значение допустимого значения температуры ОВ. Через определенное время подогрева производится свободное охлаждение для выравнивания температур в стенках конца трубы и муфты. Продолжительности подогрева и охлаждения для выравнивания температур предложено определять расчетным путем на основе решения нестационарного уравнения теплопроводности в цилиндрических координатах с использованием программы для ЭВМ PWH-Trumpet.

Процессы нагрева (оплавления), охлаждения при технологической паузе и охлаждения при контакте свариваемых поверхностей трубы и муфты описываются уравнением теплопроводности, учитывающим теплоту фазового превращения в интервале температур, с различными граничными условиями. Для задания известной температуры на границе свариваемых участков трубы и муфты при оплавлении сменными нагревателями во всем интервале температур ОВ, включая температуры ниже нормативных, исследовались изменения температур на поверхностях сменных

нагревателей с помощью тепловизора «THERMO TRACER TH7102/WV». На рисунке 1 представлены термограммы поверхностей дорна при различных температурах ОБ.

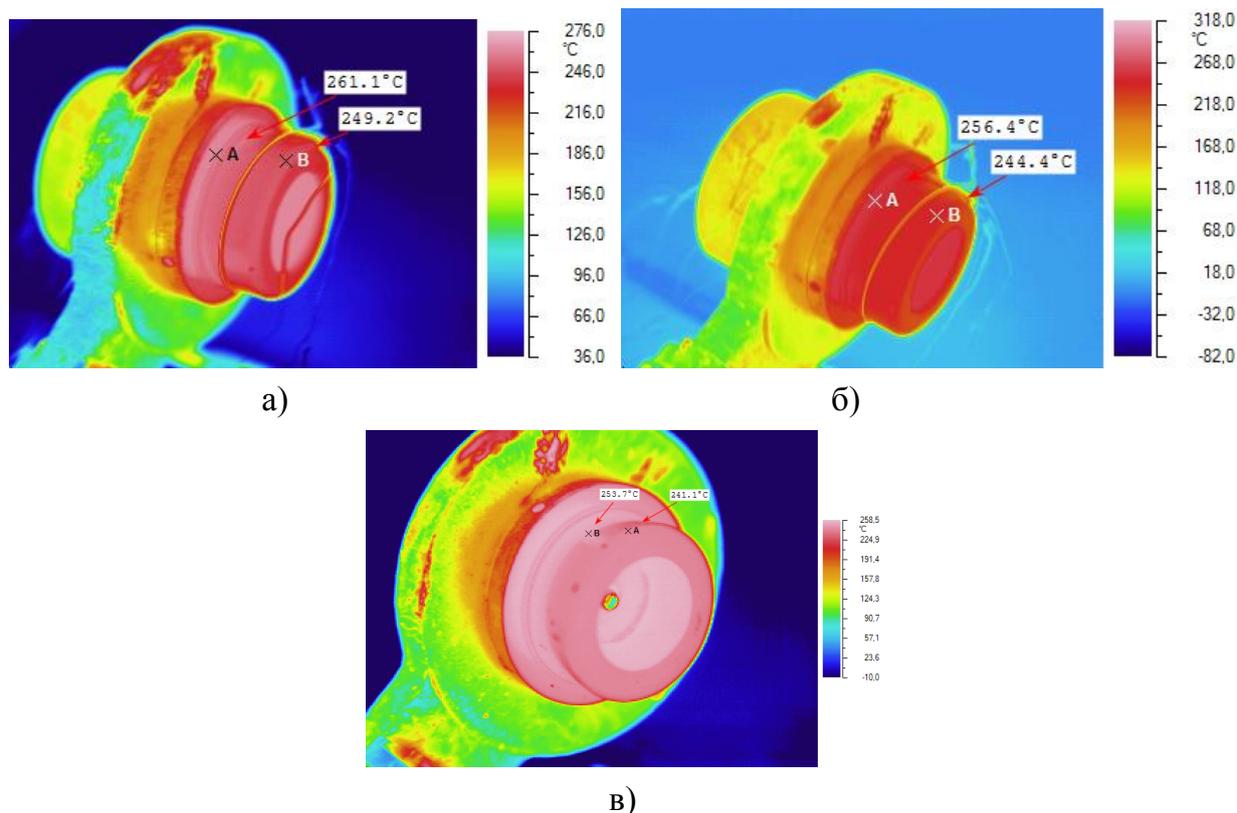


Рисунок 1 - Термограммы поверхности дорна на нагревательной пластине после 10 минут разогрева при температуре ОБ: а) 15 °С; б) минус 10 °С; в) минус 42 °С

Из термограмм видно, что при температуре ОБ 15 °С разница температур на поверхности дорна составляет 12 градусов, которая сохраняется при температуре ОБ минус 10 °С и минус 42 °С. Это обусловлено высокой теплопроводностью материала дорна. При понижении температуры ОБ от 15 до минус 10 °С максимальное значение температуры дорна уменьшается на 5 °С. При понижении температуры ОБ от минус 10 до минус 42 °С температура дорна понижается на 3 °С. В результате исследований температур на поверхностях сменных насадок на нагревательной пластине установлено, что для оплавления свариваемых поверхностей трубы и муфты необходимо повышать температуру нагревательной пластины следующим образом. При сварке ПП труб при температурах ОБ в диапазоне от 0 до минус 10 °С следует повышать температуру нагревательной пластины на 5 градусов, в диапазоне от минус 10 до минус 50 °С – на 10 °С от рекомендуемых нормативными документами при допустимых температурах ОБ. Кроме того, исследованиями установлено, что при отрицательных температурах ОБ нагревательные пластины позволяют поддерживать стабильную температуру на рабочих поверхностях сменных насадок. Такая стабильность температуры нагревательного инструмента позволяет при

моделировании нагрева (оплавления) трубы и муфты исключить рассмотрение сменных насадок и задавать температуру сварки на свариваемых поверхностях, что упрощает модель теплового процесса. Таким образом, все тепловые режимы сварки описываются одним и тем же уравнением теплопроводности. В режиме технологической паузы на свариваемых поверхностях задается условие конвективного теплообмена, в режиме охлаждения – условие идеального теплового контакта.

Сопоставлением расчетных и экспериментальных временных зависимостей температур в процессе сварки установлено соответствие модели реальному тепловому процессу при сварке. На рисунке 2 представлены расчетные и экспериментальные временные зависимости температур в сварном шве в середине раструба на стадии охлаждения, подтверждающие их удовлетворительное совпадение.

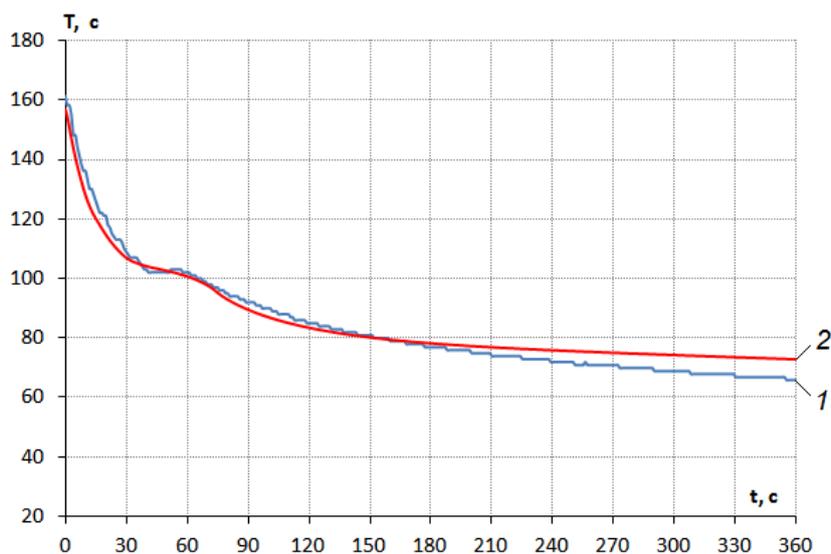


Рисунок 2 - Сопоставление экспериментальных (кривая 1) и расчетных (кривая 2) температурных зависимостей при охлаждении сварного раструбного соединения ПП труб 63 SDR 11 в сварном шве в середине раструба при температуре ОВ +23 °С

Полученные результаты совпадения температур позволяют рекомендовать программу для ЭВМ «Weld-Trumpet» для исследования теплового процесса нагрева (оплавления), технологической паузы, охлаждения с теплоизоляцией и без нее при различных температурах ОВ.

Технологическая схема процесса предварительного подогрева и сварки при отрицательных температурах ОВ показана на рисунке 3. Расчетами определена длина подогреваемой области трубы, равная произведению длины раструба на число $k=1,66$, обеспечивающая достижение максимального значения температуры на расстоянии длины раструба при используемой схеме подогрева в интервале температур ОВ от

минус 50 до 0 °С для труб диаметром 50 – 110 мм SDR 11 и 6. На рисунке 4 представлены распределения температур в стенке ПП трубы $\varnothing 63$ SDR 6 по осевой координате после подогрева сменной насадкой при температуре ОВ минус 50 °С и температуре нагревательной пластины 35 °С и последующего охлаждения для выравнивания температур. Таким образом, в результате подогрева и последующего охлаждения на открытом воздухе в свариваемой области длиной 30 мм получили распределение температуры в допустимом для сварки в раструб интервале от 20 до 30 °С.

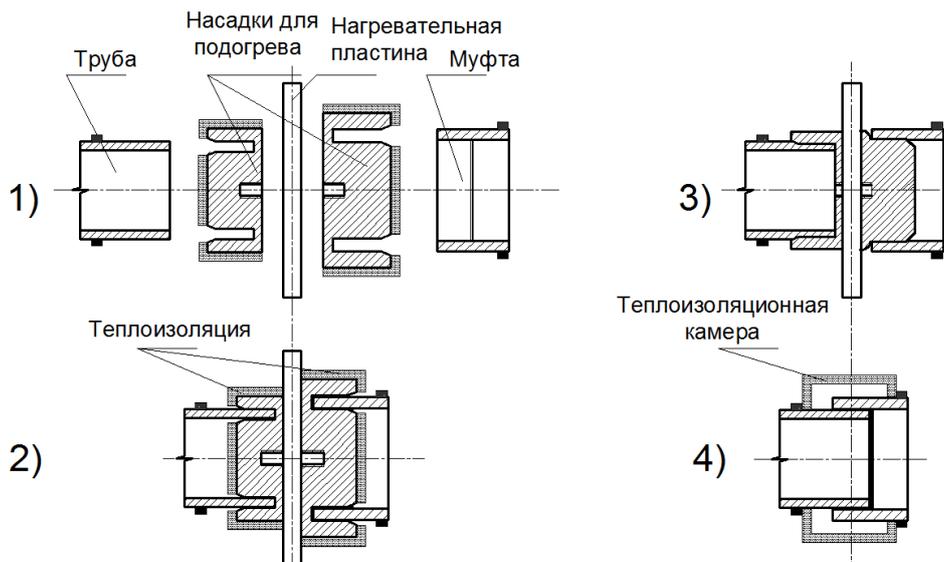


Рисунок 3 - Технологическая схема сварки ПП труб при низких температурах: 1- 2 – предварительный подогрев; 3 – оплавление; 4 – охлаждение

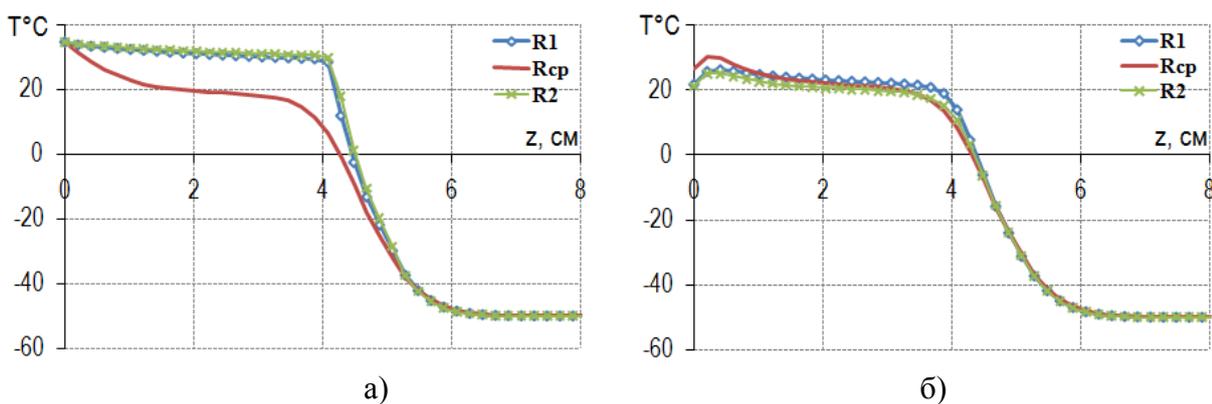


Рисунок 4 - Распределение температур в стенке трубы $\varnothing 63$ SDR 6 по осевой координате после подогрева в течение 3,5 минут (а) и последующего охлаждения в течение 20 с (б): R_1 , R_2 –внутренний и внешний радиусы трубы; R_{cp} – радиус середины стенки трубы; при температуре нагревательной пластины 35 °С

Установлено, что при подогреве сменными насадками с последующим свободным охлаждением более однородное распределение температуры в трубе и

муфте получается при температуре нагревательной пластины 35 °С. При этом продолжительности подогрева и охлаждения труб совпадают с продолжительностями подогрева и охлаждения для выравнивания температур муфт.

Тем не менее, для практического применения рекомендуется температура нагревательной пластины, равная 50 °С, при которой продолжительности подогрева трубы и муфты хоть и становятся разными для труб SDR 11, но значительно сокращаются. Поэтому при предварительном подогреве муфту необходимо начать подогревать раньше с таким расчетом, чтобы подогрев муфты и трубы закончился одновременно. Продолжительности охлаждения для выравнивания температур в муфте и в свариваемом участке трубы одинаковые.

Результаты расчета продолжительности подогрева и охлаждения для выравнивания температур, обеспечивающие распределения температур в зоне сварки, близкие к однородному при температуре нагревательной пластины 50 °С, для различного сортамента труб и различных низких температур приведены в таблице 1.

Предварительный подогрев свариваемых концов труб и муфты позволяет произвести сварку по режимам, рекомендуемым нормативными документами. Управлять динамикой температурного поля можно на стадии охлаждения используя теплоизоляцию. В этом случае управляющим параметром будет служить толщина теплоизоляционного слоя. Необходимо определить такую толщину теплоизоляции, которая бы обеспечивала изменение температурного поля по закономерностям близким динамике температурного поля при допустимых температурах ОВ.

Таблица 1

Продолжительности подогрева (в секундах) для муфты, труб SDR 11 и SDR 6 и их последующего охлаждения для выравнивания температур

Температура ОВ		Диаметр трубы, мм				
		50	63	75	90	110
-50°C	Муфта	120	180	300	360	540
	SDR 11	60	90	180	180	240
	SDR 6	120	180	300	360	540
	Охлаждение	30	40	50	50	60
-40°C	Муфта	120	180	240	300	480
	SDR 11	90	120	120	180	240
	SDR 6	120	180	240	300	480
	Охлаждение	40	50	60	60	60
-30°C	Муфта	120	180	240	300	480
	SDR 11	90	90	120	180	240
	SDR 6	120	180	240	300	480
	Охлаждение	50	60	70	90	90
-20°C	Муфта	90	120	180	300	420
	SDR 11	60	90	120	180	180

	SDR 6	90	120	180	300	420
	Охлаждение	60	80	90	120	120
-10°C	Муфта	90	120	180	240	300
	SDR 11	60	90	120	120	180
	SDR 6	90	120	180	240	360
	Охлаждение	90	120	150	150	180

На рисунке 5 представлены временные зависимости температур в сварном шве (а) и распределения температур в стенках трубы $\varnothing 63$ SDR 11 и муфты по радиальной координате после охлаждения сварного соединения в течение 4 мин (б) при использовании различных способов теплоизоляции и без нее.

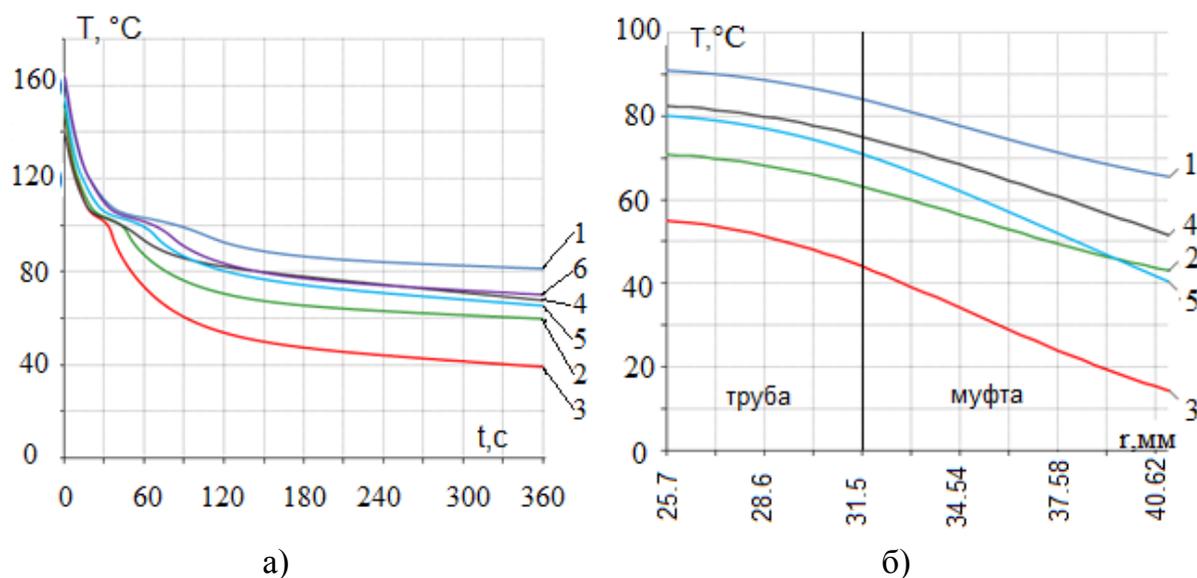


Рисунок 5 - Временные зависимости температур в сварном шве на этапе остывания (а) и распределения температур в стенках трубы $\varnothing 63$ SDR 11 и муфты по радиусу после охлаждения сварного соединения в течение 4 мин (б) при различных температурах ОВ с теплоизоляционной камерой и без нее: 1 – 30 °С; 2 – 5 °С; 3 – минус 40 °С; 4 – минус 40 °С с подогревом, охлаждение с камерой (2 см воздух, 2 см толщина стенки камеры); 5 – -40 °С с подогревом, охлаждение без камеры; 6 – 0 °С

При допустимых значениях температур ОВ 30 и 5 °С охлаждение проводится без теплоизоляционной камеры (рисунок 5а, кривые 1-2). Скорость остывания расплава при температуре ОВ 30 °С, в интервале 105 -100 °С, в котором происходит интенсивная кристаллизация составляет $V_{105-100}=10$ °С/мин, а в интервале 100-80 °С до конца процесса кристаллизации - $V_{100-80}=20$ °С/мин. При температуре ОВ 5 °С (нижний предел допустимых для сварки температур ОВ без увеличения времени нагрева) скорости остывания расплава составляют $V_{105-100}=40$, $V_{100-80}=30$ °С/мин. При температуре ОВ минус 40 °С сварка без подогрева и охлаждения без теплоизоляционной камеры приводит к существенному снижению температур за единицу времени ($V_{105-100}=75-60$, $V_{100-80}=30$ °С/мин) за счет кондуктивной

теплопередачи и кривые распределения температур лежат вне допустимого коридора изменения температур (рисунок 5а, кривая 3). В условиях низких температур использование предварительного подогрева и теплоизоляционной камеры с толщиной стенки 2 см и прослойкой воздуха 2 см приводит на стадии кристаллизации к охлаждению со скоростью, характерной при сварке в условиях допустимой температуры ОВ (рисунок 5а, кривая 4). Для сравнения приводится кривая изменения во времени температуры в сварном шве при температуре 0 °С (рисунок 5а, кривая 6).

На рисунке 6 представлена схема теплоизоляционной камеры, используемой для охлаждения сварного соединения в условиях отрицательной температуры.

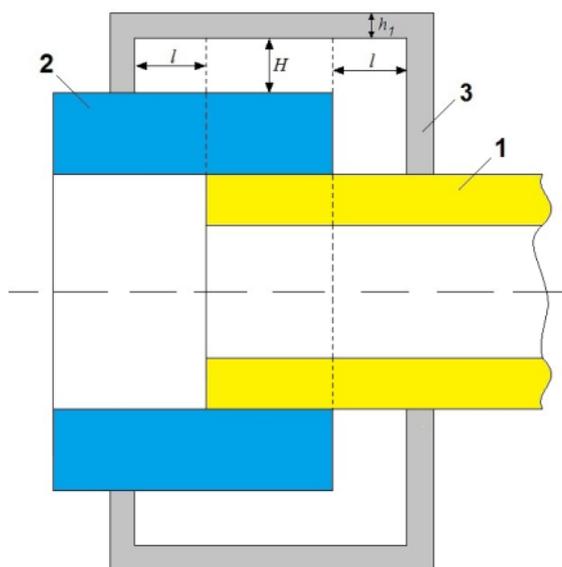


Рисунок 6 - Схема теплоизоляционной камеры: 1 – стенка трубы; 2 – стенка муфты; 3 – стенка камеры

Расчетные размеры теплоизоляционных камер, изготавливаемых из вспененного полиэтилена с коэффициентом теплопроводности 0,035 Вт/(м °С), для сварки ПП труб различного типоразмера в интервале температур ОВ (-50, 0) °С обеспечивающих скорость остывания шва при отрицательных температурах ОВ близкую скорости остывания при положительных температурах ОВ, приведены в таблице 2.

Таблица 2

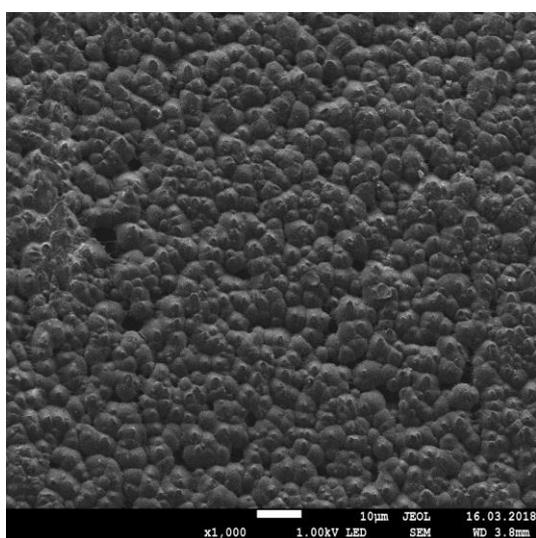
Размеры теплоизоляционной камеры для труб SDR 11 и SDR 6

∅	Воздушная прослойка, см (H)	Воздушная прослойка, см (l)	Толщина стенки камеры, см (h ₁)
50	2	2	2
63	2	2	2
75	2-4	2	2
90	2-4	2	2
110	2-4	2	2

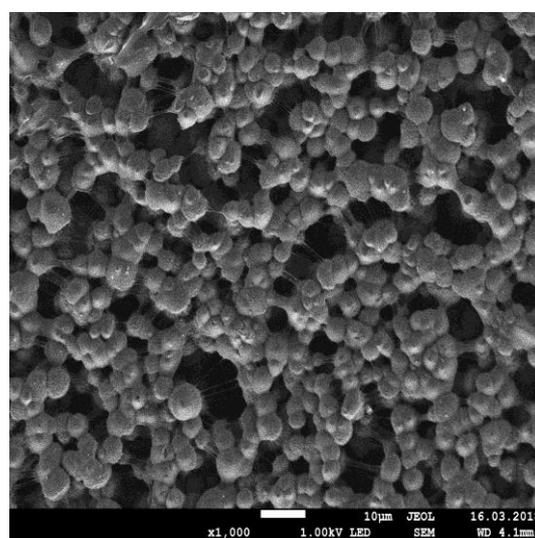
В третьей главе представлены результаты микроскопического и калориметрического исследований структуры материала сварных соединений ПП труб, выполненных при положительных и отрицательных температурах ОВ.

На рисунке 7 представлены микрофотографии структуры основного материала ПП трубы и муфты. Фотографии были получены на растровом электронном микроскопе JEOL JSM-7800F.

Структура материала муфты значительно отличается от структуры материала трубы. Структура более пористая, а размеры сферолитов варьируются от 3 до 8 мкм. Такая разница в структуре объясняется разными способами производства труб и муфт (экструзия и литье под давлением).



а)

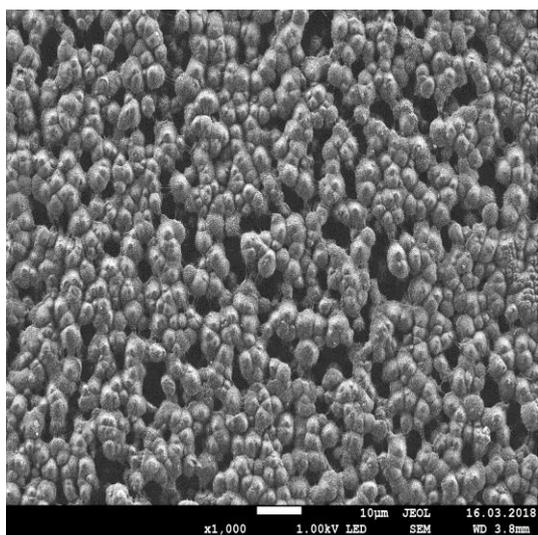


б)

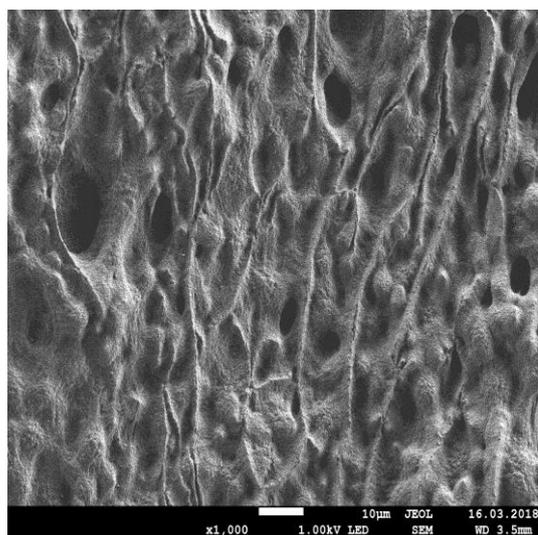
Рисунок 7 - Структура основного материала ПП трубы (а) и муфты (б)

На рисунке 8 представлены микрофотографии зоны термического влияния сварных соединений, выполненных при различных температурах ОВ.

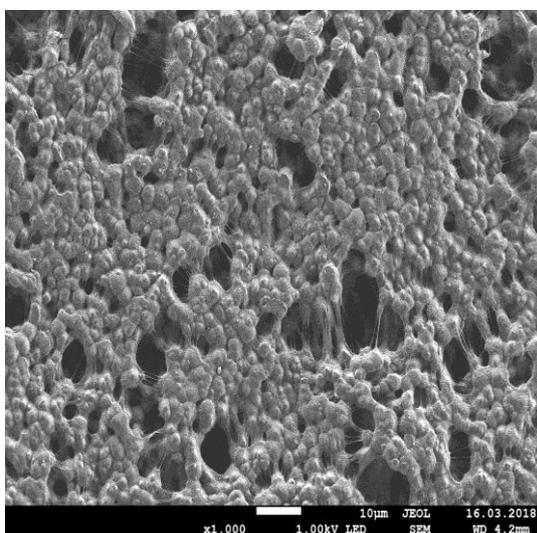
На рисунке 8 б и 8 г видно, что при температуре ОВ 1°C и при минус 30°C, из-за высокой скорости остывания ($V_{105-100}=75-40$, $V_{100-90}=30$ °C/мин) в ЗТВ формируется фибриллярная, или фибриллярно-сферолитная структура материала, в то время как при сварке при температуре ОВ 23 °C и при минус 30 °C по разработанной технологии (скорости остывания $V_{105-100}=10$, $V_{100-90}=20$ °C/мин) структура сферолитная (рисунок 8а, в). В участке вблизи шва сварных соединений ПП труб, выполненных при температуре ОВ 1 °C и при минус 30 °C, структура так же является фибриллярно - сферолитной (рисунок 9 б, г), в отличие от материала сварных соединений, выполненных при положительных температурах и при минус 30 °C по разработанной технологии, где структура остается сферолитной (рисунок 9 а, в)



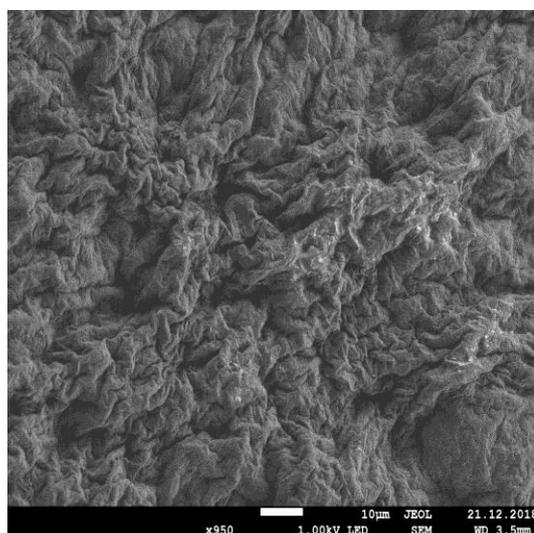
а)



б)



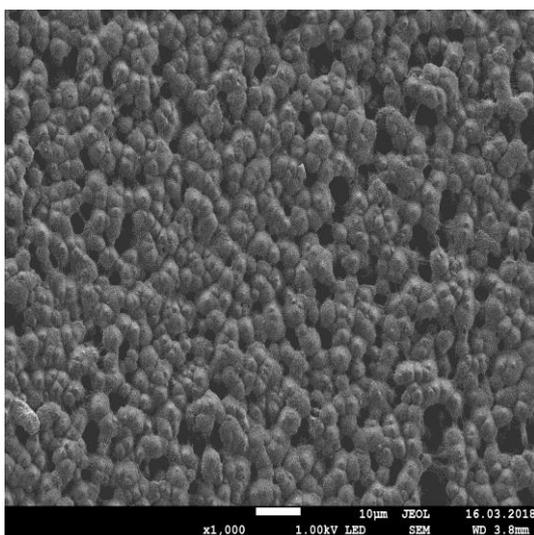
в)



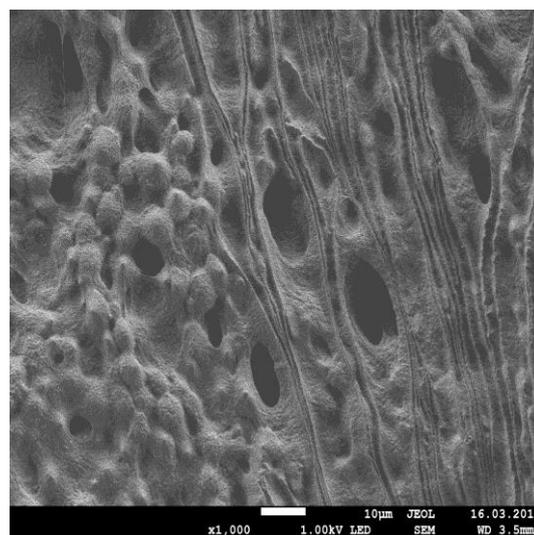
г)

Рисунок 8 - Структура материала зоны термического влияния (ЗТВ) сварных раструбных соединений ПП труб, выполненных при различных температурах ОВ:
а) 23 °С; б) 1 °С; в) минус 30 °С по разработанной технологии; г) минус 30 °С

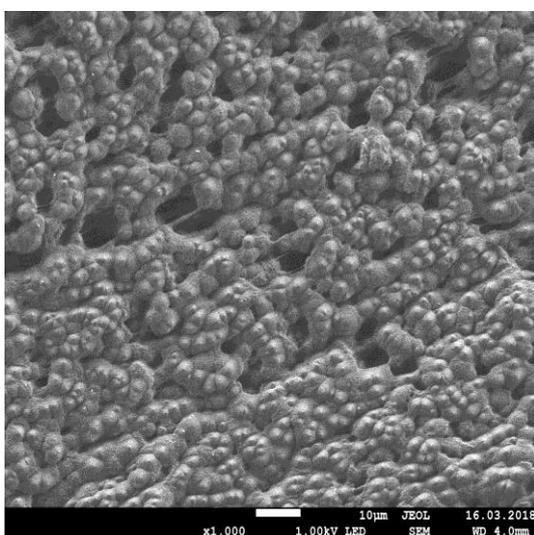
Вследствие низкой теплопроводности материалов муфты и трубы влияние температуры ОВ, в том числе низких температур, на скорость охлаждения зоны сварного шва минимальное, что обуславливает одинаковую структуру материала шва при различных внешних условиях.



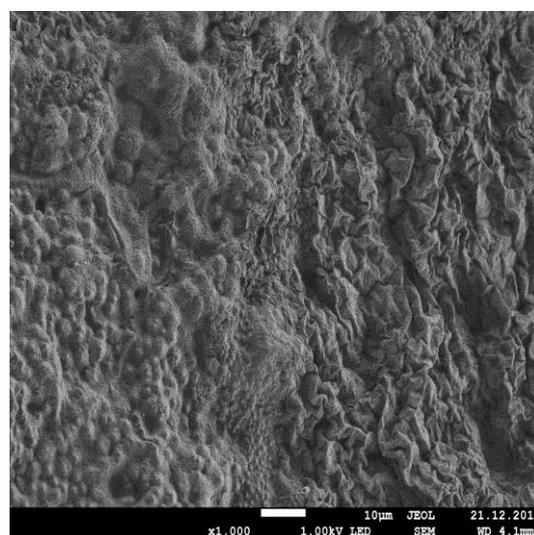
а)



б)



в)

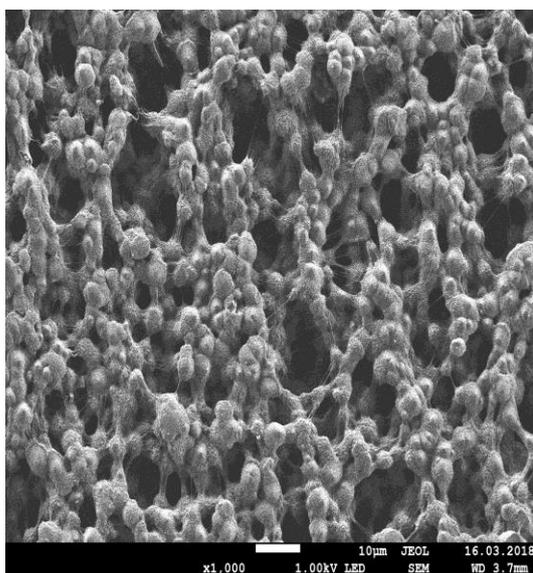


г)

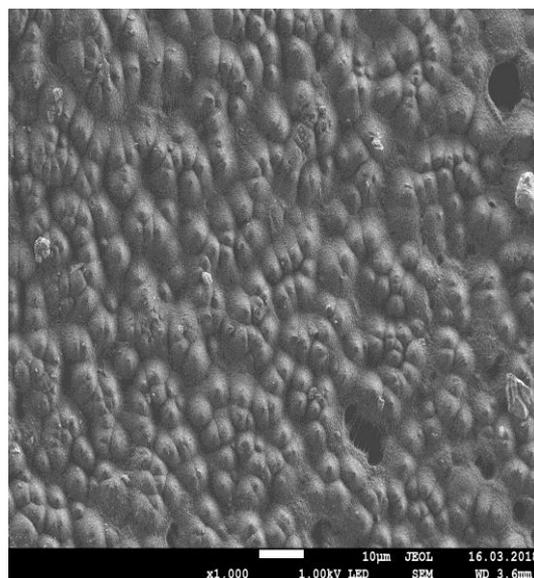
Рисунок 9 - Структура материала участка вблизи шва сварных раструбных соединений ПП труб. Обозначения те же, что на рисунке 8.

На рисунке 10 приведены фотографии структуры области шва, иллюстрирующие, что независимо от температуры ОВ, надмолекулярная структура материала сферолитная, без наличия фибрилл.

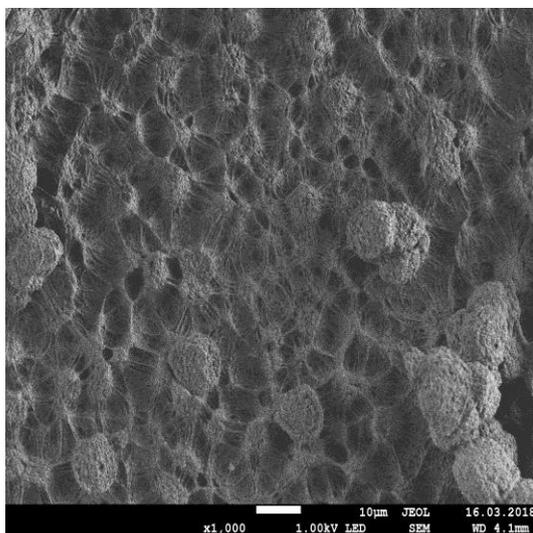
В процессе сварки при низких температурах ОВ из-за высокой скорости охлаждения сварного соединения в участке вблизи шва и ЗТВ формируется фибриллярная или фибриллярно- сферолитная структура материала. При сварке в условиях отрицательных температур применение предварительного подогрева и теплоизоляционной камеры на стадии охлаждения приводит к формированию сферолитной структуры материала в околошовных зонах и ЗТВ, т.е. структур, близких к структуре материала сварного соединения, выполненного при температуре ОВ 23 °С.



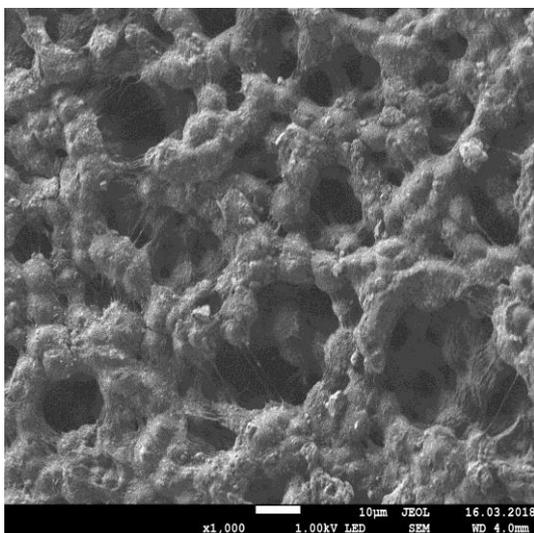
а)



б)



в)



г)

Рисунок 10 - Структура материала области шва сварных раструбных соединений ПП труб. Обозначения те же

Проведен термический анализ материалов зон сварных соединений, выполненных в различных условиях. На рисунке 11 представлена гистограмма ширины интервалов температур фазового превращения ΔT материалов зон сварных соединений ПП труб. Ширина интервала температур фазового превращения, характеризует разброс размеров кристаллитов материала. Меньшая ширина интервалов фазового превращения свойственна материалам с близкими размерами кристаллитов.

Из гистограммы видно, что закономерности изменения ширины интервалов температур фазового превращения по зонам сварных соединений, выполненных при $23\text{ }^{\circ}\text{C}$ и минус $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ по разработанной технологии, близки друг другу, что еще раз подтверждает схожесть их структур.

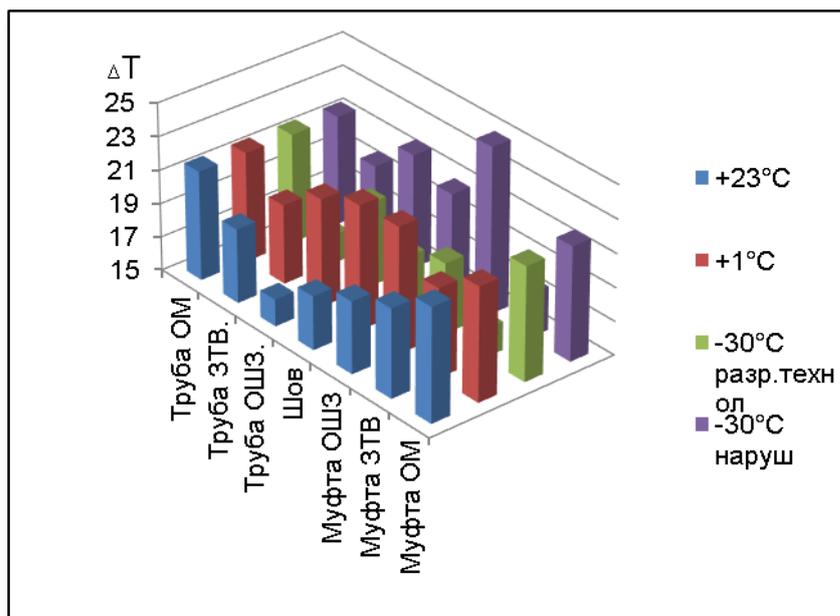


Рисунок 11 - Гистограмма ширины фазовых превращений зон сварных раструбных соединений ПП труб

Схожесть этих структур также подтверждает и идентичность кривых относительной кристалличности материалов сварных соединений, выполненных при 18 °С и минус 30 °С по разработанной технологии (рисунок 12).

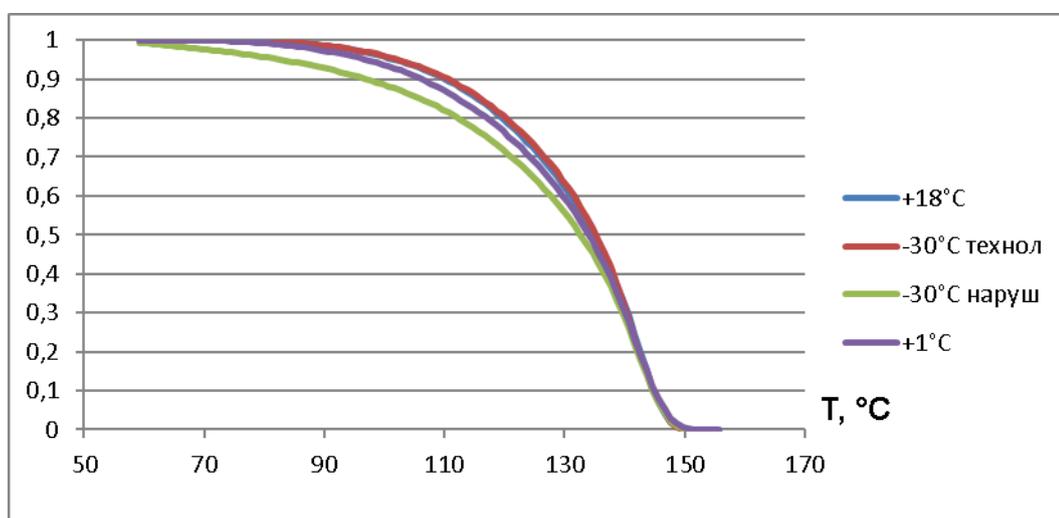


Рисунок 12 – Кривая степени превращения участка вблизи шва сварных соединений

Таким образом, при сварке полипропиленовых труб в условиях отрицательных температур ОВ в сварном шве формируется разнородная структура материала. Применение разработанной технологии сварки при отрицательных температурах ОВ устраняет этот дефект - формируется однородная сферолитная структура материала шва.

Четвертая глава посвящена контролю качества сварных раструбных соединений ПП труб, произведенных при различных температурах ОВ. Контроль качества сварных раструбных соединений проводился существующими в действующих нормативных документах методами испытания: испытание внутренним давлением (ГОСТ 24157-80), гидравлическое испытание напорных трубопроводов (СП 40-102-2000), испытания на статический отдрин (ВСН 440-83), испытания на сдвиг сжатием (ВСН 003-88). Показано, что приведенные методы испытаний сварных соединений не выявляют нарушения технологии сварки и не дают количественной оценки прочности соединения.

Для получения количественной оценки прочности раструбного сварного соединения ПП труб была разработана новая методика (патент РФ № 2627171). Суть метода заключается в том, что на стандартном образце для испытаний на растяжение, где исследуемое раструбное сварное соединение расположено посередине образца, на муфте 1 вырезается прорезь 2 параллельно краю муфты глубиной более оплавленной глубины стенки муфты, но не более толщины стенки, на внутренней стенке трубы 3 вырезается прорезь 4 глубиной более глубины проплавления стенки трубы, но не более толщины стенки труб параллельно краю трубы (рисунок 13).

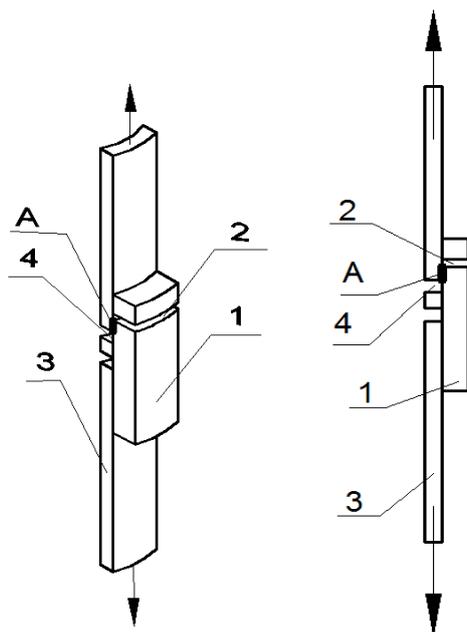


Рисунок 13 - Образец для определения прочности раструбного сварного соединения

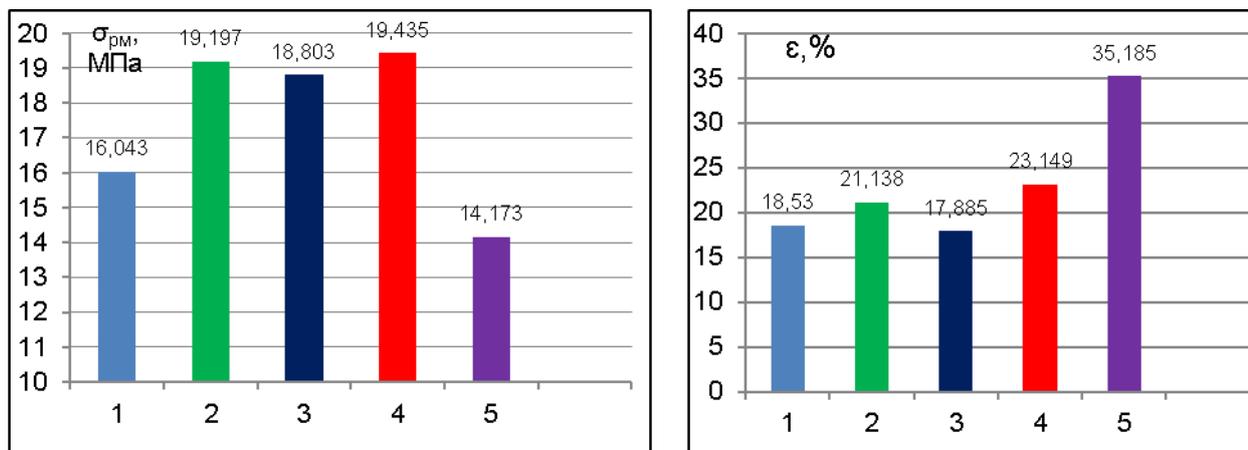
Расстояние между прорезями 2 и 4 рассчитывается таким образом, чтобы площадь сечения испытываемой части А раструбного сварного соединения была меньше, чем площадь минимального поперечного сечения образца вне зоны раструбного соединения (рисунок 13). При стандартных кратковременных испытаниях на растяжение разрушение образца произойдет по сварному шву в

области А, так как прочность сварного соединения, как правило, меньше, чем прочность основного материала.

Испытаниям на растяжение подвергались сварные соединения, произведенные при следующих режимах:

- 1) Температура ОВ минус 16 °С, время нагрева $t_H=36$ с;
- 2) Температура ОВ минус 35 °С, $t_H=24$ с, предварительный подогрев, охлаждение в теплоизоляционной камере;
- 3) Температура ОВ +23 °С, $t_H=24$ с, стандартная сварка;
- 4) Основной материал трубы;
- 5) Основной материал муфты.

Результаты испытаний, приведенные на рисунке 14, показывают, что предел текучести сварных соединений, выполненных при отрицательных температурах ОВ по предлагаемой технологии не ниже, чем в сварных соединениях, полученных при положительной температуре ОВ.



а)

б)

Рисунок 14 - Результаты испытаний на растяжение сварных соединений: а) предел текучести; б) относительное удлинение при разрыве

Результаты испытаний на длительное растяжение согласно ГОСТ Р 55142-2012 показали, что время разрушения сварных раструбных соединений, полученных при низких температурах с предварительным подогревом и охлаждением соединения в теплоизоляционной камере, соответствует длительной прочности соединений стандартной сварки (рисунок 15).

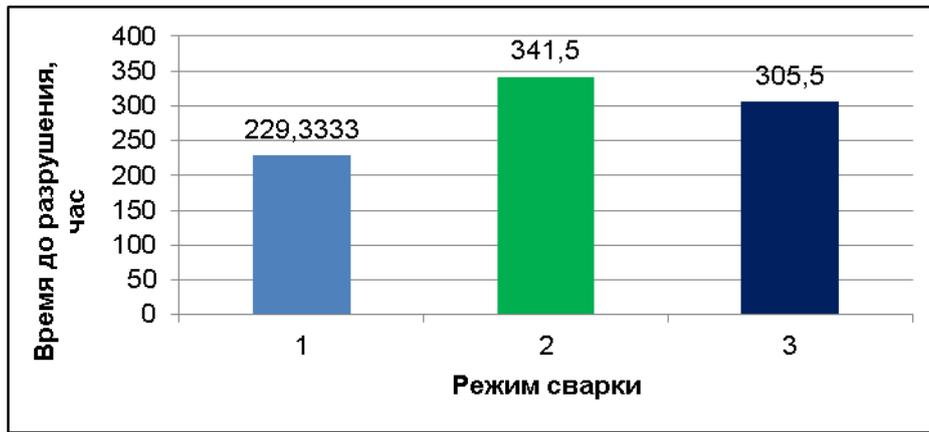


Рисунок 15 - Время до разрушения образцов сварных раструбных соединений, полученных при различных режимах сварки: 1) температура ОВ -16 °С, время нагрева $t_n=36$ с; 2) температура ОВ -35 °С, $t_n=24$ с, предварительный подогрев, охлаждение в теплоизоляции; 3) температура ОВ +23 °С, $t_n=24$ с, стандартная сварка

В рамках данной работы было получено два патента РФ, два свидетельства о регистрации программы для ЭВМ и подписан акт внедрения разработанной технологии в ПАО Якутскэнерго.



ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Разработана технология сварки ПП труб при температурах ОВ до минус 50 °С без строительства временных отапливаемых укрытий.
2. Установлено, что при раструбной сварке ПП труб независимо от температуры окружающей среды в области шва формируется сферолитная структура.
3. При сварке в условиях отрицательных температур ОВ вследствие высокой скорости охлаждения ($V_{105-100}=75-60$, $V_{100-90}=30$ °С/мин) в участке вблизи шва и ЗТВ формируется фибриллярная или фибриллярно-сферолитная структура материала, обуславливающая низкую прочность сварного соединения.
4. Установлено, что при сварке в условиях низких температур для обеспечения прочности раструбного сварного соединения ПП труб не ниже 90% прочности основного материала трубы необходимо обеспечение условий формирования в участке вблизи шва и в ЗТВ сферолитной структуры с размерами сферолитов 4-5 мкм.
5. Установлено, что формирование сферолитной структуры с размерами сферолитов 4-5 мкм происходит при охлаждении материала шва со скоростью $V_{105-100}=10$, $V_{100-90}=20$ °С/мин.
6. Установлено, что при низких температурах ОВ предварительный подогрев в течение времени, определяемого расчетом, участка свариваемой в раструб трубы и соединительной муфты отдельным инструментом с температурой 50 °С и последующее их свободное охлаждение в течении расчетного времени приводит к выравниванию температурных полей в зоне термического влияния трубы и муфты до допустимой для сварки температуры и образованию сферолитной структуры при охлаждении в теплоизоляционной камере расчетных размеров.
7. Разработаны методики определения параметров предварительного подогрева (продолжительности подогрева и охлаждения для выравнивания температур), а также размеров теплоизоляционной камеры, позволяющие расчетом определять данные параметры для труб различного сортамента в интервале низких температур ОВ.
8. В результате анализа эффективности методов контроля качества сварных соединений установлено, что существующие испытания зачастую не выявляют нарушения технологии сварки нагретым инструментом в раструб и не дают количественную оценку прочности сварного соединения.
9. Разработана методика испытаний, позволяющая количественно определить прочностные свойства сварного раструбного соединения полимерных труб и использовать ее как метод оценки качества сварки.
10. На основе исследований соединений ППП труб, сваренных при низких температурах ОВ, и проведения кратковременных и длительных исследований

прочности установлено соответствие показателей качества раструбных соединений, выполненных при низких температурах, показателям соединений, полученных при допустимых температурах воздуха.

11. Результаты проведенных исследований приняты к использованию в ПАО “Якутскэнерго”, что подтверждается актом внедрения от 30.05.2017г.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ ОПУБЛИКОВАНЫ В СЛЕДУЮЩИХ НАУЧНЫХ ТРУДАХ

1. Старостин Н.П., Аммосова О.А., Ботвин Г.В. Тепловой процесс сварки полипропиленовых труб в раструб при низких температурах // **Сварка и диагностика**. 2015. № 6. С. 57-61.
2. Ботвин Г.В., Данзанова Е.В., Герасимов А.И. Исследование сварки в раструб полипропиленовых труб при отрицательных температурах // **Вестник БГТУ имени В.Г. Шухова**. 2016. № 4. С. 105-110.
3. Старостин Н.П., Васильева М.А., Ботвин Г.В. Определение технологических параметров предварительного подогрева полипропиленовых труб при сварке в раструб в условиях низких температур // **Вестник Международной академии холода**. 2016. № 2. С. 54-59.
4. Ботвин Г.В., Данзанова Е.В., Герасимов А.И. Методика испытаний на прочность сварного соединения полипропиленовых труб // **Заводская лаборатория. Диагностика материалов**. 2017. Т. 83. № 9. С. 70-72.
5. Герасимов А.И., Данзанова Е.В., Ботвин Г.В. Испытания сварных соединений полипропиленовых труб // **Вестник Восточно-Сибирского государственного университета технологий и управления**. 2017. № 3 (66). С. 38-42.
6. Старостин Н. П., Васильева М. А., Аммосова О. А., Данзанова Е. В., Ботвин Г. В. Способ повышения прочности сварных соединений труб из термопластичных полимерных материалов // **Полимерные материалы и технологии**. – 2019. – Т.5, №1. – С. 43–52.
7. Старостин Н.П., Герасимов А.И., Ботвин Г.В., Данзанова Е.В. Сварка полипропиленовых труб при отрицательных температурах // **Строительство уникальных зданий и сооружений**. 2017. № 4 (55). С. 7-18.
8. Botvin G. V., Danzanova E. V., Gerasimov A. I. Research of strength of welded socket joints of polypropylene pipes // **MECHANICS, RESOURCE AND DIAGNOSTICS OF MATERIALS AND STRUCTURES (MRDMS-2016): Proceedings of the 10th International Conference**. – AIP Publishing. Vol. 1785, 030006 (2016); <http://dx.doi.org/10.1063/1.4967027> ,

https://scholar.google.ru/citations?view_op=view_citation&hl=en&user=ipc00CMAAAAJ&sortby=pubdate&citation_for_view=ipc00CMAAAAJ:JOhajB-2wfwC

9. Герасимов А.И., Ботвин Г.В., Данзанова Е.В. Способы испытаний сварного соединения полимерных труб // Арктика. XXI век. Технические науки. 2013. № 1. С. 64-76.
10. Ботвин Г.В., Данзанова Е.В., Герасимов А. И., Федоров Н.Р. Исследование прочности сварных соединений в раструб полипропиленовых труб по ширине сварного шва при различных температурах окружающего воздуха // Сварка и безопасность: Тр. II Всеросс. научно-практич. конф., посвященной 80-летию д.т.н., проф. А.П. Аммосова. – Якутск: Цумори Пресс, 2017. С. 300-304
11. Старостин Н.П., Ботвин Г.В., Герасимов А.И., Аммосова О.А., Васильева М.А. Сварка полипропиленовых труб водоснабжения при низких температурах окружающего воздуха // Сб. докл. конф. «Материалы для технических устройств и конструкций, применяемых в Арктике» - М: ФГУП ВИАМ, 2015. – С. 25.
12. Ботвин Г.В., Герасимов А.И., Данзанова Е.В. Сварка в раструб полипропиленовых труб при отрицательных температурах окружающего воздуха. // Сборник статей Международной научно-практической конференции “Инновации, технологии, наука”, Киров, 23.01.2016. С. 5-7.
13. Ботвин Г. В., Данзанова Е.В., Герасимов А. И. Исследование прочности сварных раструбных соединений полипропиленовых труб // Хладостойкость. Новые технологии для техники и конструкций Севера и Арктики: труды Всеросс. конф. с межд. участием, посвященной 70-летию профессора-механика, д.т.н. А.В. Лыглаева. – Якутск: Изд. дом СВФУ, 2016. – С. 236-237.
14. Старостин Н.П., Герасимов А.И., Аммосова О.А., Васильева М.А., Данзанова Е.В., Ботвин Г.В. Сварка полимерных труб при низких климатических температурах // Разработка материалов, адаптированных к природно-климатическим условиям Арктики, а также внедрения технических систем и приборной базы, адаптированных к выполнению сварочно-монтажных и ремонтных работ в условиях низких климатических температур: Мат. III научно-техн.семинара. – Якутск: Сахаада, 2016. – С. 40-46.
15. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ 2015661105 Рос. Федерация. DurHeatTrans- Расчет продолжительности подогрева полипропиленовых труб для погрузки, транспортировки и разгрузки при низких температурах / Старостин Н. П., Васильева М.А., Ботвин Г.В.; ФГБУН ИПНГ СО РАН. заяв. 27.08.2015.; Оpubл. 16.10.2015.
16. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ 2016615747 Рос. Федерация, PWNTrumpet – Программа для расчета

продолжительности предварительного подогрева для сварки полипропиленовых труб в раструб в условиях низких температур / Старостин Н. П., Васильева М.А., Ботвин Г.В.; ФГБУН ИПНГ СО РАН. заяв. 08.10.2015.; Оpubл.27.05.2016.

17. Пат. 2627170 Российская Федерация МПК G01L 1/00, G01N 3/12. Способ и образец для определения прочности муфтового сварного соединения полимерных труб /А. И. Герасимов, Н. П.Старостин, Г. В. Ботвин, Е. В. Данзанова; заявитель и патентообладатель Ин-т проблем нефти и газа СО РАН. – № 2016116073; заявл. 25.04.2016; опубл. 03.08.2017, Бюл. № 22

18. Пат. 2615890 Российская Федерация МПК F16L 13/02. Способ сварки нагретым инструментом в раструб полимерных труб / Старостин Н.П., Аммосова О.А., Васильева М.А., Ботвин Г.В., Данзанова Е.В.; заявитель и патентообладатель Ин-т проблем нефти и газа СО РАН. – № 2016113937; заявл. 11.04.2016; опубл. 11.04.2017, бюл. № 11.