МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

MECHANICAL ENGINEERING AND MACHINE SCIENCE

Оригинальная статья / Original article

(cc) BY 4.0

https://doi.org/10.21869/2223-1560-2023-27-4-8-24

Напряженно-деформированное состояние сварного соединения при приварке седлового отвода к полиэтиленовой трубе в условиях низких температур

Н.П. Старостин¹, Р.С. Тихонов¹ ⊠, М.А. Николаева¹, М.П. Акимов²

¹ Институт проблем нефти и газа Сибирского отделения РАН – обособленное подразделение ФГБНУ ФИЦ «Якутский научный центр Сибирского отделения РАН», ул. Автодорожная, д. 20, г. Якутск 677007, Российская Федерация

² Северо-Восточный федеральный университет имени М.К. Аммосова, ул. Кулаковского, д. 48, г. Якутск 677891, Российская Федерация

⊠ e-mail: roman_tikhon@mail.ru

Резюме

Целью исследования является сравнительный анализ напряженно-деформированных состояний сварных соединений при приварке седловых отводов к действующим газопроводам в нормальных условиях по стандартной технологии и низких температурах по предлагаемой технологии.

Методы. Для достижения цели выполнена численная реализация математической модели термоупругого состояния методом конечных элементов. Динамика изменения температурного поля в процессе приварки седлового отвода к полиэтиленовой трубе описывалась нестационарным трехмерным уравнением теплопроводности с учетом фазовых превращений в интервале температур. Температурные напряжения при приварке седлового отвода к полиэтиленовым трубам рассматриваются в квазистационарный постановке, в которой напряжения зависят от решения тепловой задачи сварки в каждый расчетный момент времени. Вычислительные эксперименты проводились в среде программирования Python с использованием вычислительного пакета Dolphin/Fenics. Вычислительная сетка построена с использованием программы GMSH. Визуализация полученных результатов реализовывалась с помощью пакета Paraview.

Результаты. При приварке седлового отвода к полиэтиленовой трубе при температурах воздуха ниже нормативных расчетами определены технологические параметры сварки. На основе вычислительных экспериментов приварки седлового отвода к действующему газопроводу при допустимых и низких температурах окружающего воздуха динамики полей температур, напряжений и деформаций в зоне термического влияния практически идентичны.

Заключение. Результаты расчетов показали, что при приварке седловых отводов к полиэтиленовым трубам действующих газопроводов в условиях низких температур по предлагаемой технологии основные физические и механические процессы будут протекать как при сварке в нормальных условиях и обеспечат необходимую прочность.

[©] Старостин Н.П., Тихонов Р.С., Николаева М.А., Акимов М.П., 2023

Ключевые слова: математическое моделирование; сварка полиэтиленовых труб; напряженно-деформированное состояние; седловой отвод; метод конечных элементов.

Конфликт интересов: Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Финансирование. Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской федерации № 122011100162-9.

Для цитирования: Напряженно-деформированное состояние сварного соединения при приварке седлового отвода к полиэтиленовой трубе в условиях низких температур / Н.П. Старостин, Р.С. Тихонов, М.А. Николаева, М.П. Акимов // Известия Юго-Западного государственного университета. 2023; 27(4): 8-24. https://doi.org/ 10.21869/2223-1560-2023-27-4-8-24.

Поступила в редакцию 12.09.2023 Подписана в печать 28.10.2023 Опубликована 21.12.2023

Stress-Strain State of a Welded Joint in Welding a Saddle Branch to a Polyethylene Pipe under Low Temperatures

Nikolay P. Starostin ¹, Roman S. Tikhonov ¹ ⊠, Mariya A. Nikolaeva ¹, Mir P. Akimov ²

¹ Institute of Oil and Gas Problems of the Siberian Branch of the RAS - Division of Federal Research Centre «Yakut Scientific Centre of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences», 20, Avtodorozhnaya str., Yakutsk 677007, Russian Federation

² North-East Federal University, Yakutsk48, Kulakovskogo str., Yakutsk 677891, Russian Federation

⊠ e-mail: roman_tikhon@mail.ru

Abstract

Purpose of research. The aim of the study is a comparative analysis of the stress-strain states of welded joints during welding of saddle branches to existing gas pipelines under normal conditions using standard technology and low temperatures using the proposed technology.

Methods. To achieve the goal, a numerical implementation of the mathematical model of the thermoelastic state by the finite element method in the Python programming environment using the Fenics computing package was performed. The computational grid was built using the GMSH program. Visualization of the obtained results was implemented using the Paraview package.

Results. On the basis of computational experiments of welding a saddle branch to an existing gas pipeline at permissible and low ambient temperatures, the dynamics of the temperature fields, stresses and strains in the heat-affected zone are almost identical.

Conclusion. The calculation results showed that when welding saddle branches to polyethylene pipes of existing gas pipelines at low temperatures using the proposed technology, the main physical and mechanical processes will proceed as in welding under normal conditions and provide the necessary strength.

Keywords: mathematical modeling; welding of polyethylene pipes; stress-strain state; saddle branch; finite element method.

10 Машиностроение и машиноведение / Mechanical engineering and machine science

Conflict of interest. The authors declare the absence of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.

Funding: The work was carried out within the framework of the state task of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation No. 122011100162-9.

For citation: Starostin N. P., Tikhonov R. S., Nikolaeva M. A., Akimov M. P. Stress-Strain State of a Welded Joint in Welding a Saddle Branch to a Polyethylene Pipe under Low Temperatures. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University.* 2023; 27(4): 8-24 (In Russ.). https://doi.org/10.21869/ 2223-1560-2023-27-4-8-24.

Received 12.09.2023

Accepted 28.10.2023

Published 21.12.2023

Введение

Седловой отвод представляет собой седловидную накладку из полиэтилена с коротким патрубком, устанавливаемую на полиэтиленовую трубу для приварки. Он используется для разветвления газопровода и приварки байпаса (обходного газопровода). В седловом отводе имеется вмонтированный в тело закладной нагреватель, представляющий спираль. Седелка закрепляется к месту приварки с помощью хомутов. При подаче напряжения на нагреватель происходит оплавление свариваемых поверхностей. Приварку седловых отводов к полиэтиленовым трубам, как и сварку, деталями с закладными нагревателями, рекомендуется проводить при температурах окружающего воздуха от -15 до 40 °C. При более низких температурах рекомендуется проводить сварку в укрытиях, в которых поддерживается температура воздуха из указанного интервала. Однако при такой сварке необходимо выдерживать трубы длительное время в укрытии для установления однородного распределения температуры в трубе в зоне приварки и

седелки, что неприемлемо при выполнении ремонтных работ в зимних условиях. Предложенная нами технология приварки при низких температурах седловых отводов к полиэтиленовым трубам без газа заключается в выполнении предварительного подогрева, выравнивания температур, оплавлении в регламентированном режиме и охлаждении соединения под слоем теплоизоляционного материала. Такая технология выполнения операций с рациональными параметрами (напряжения подогрева, времени подогрева, времени выравнивания, толщины теплоизоляции) приводит к протеканию теплового процесса в зоне термического влияния по закономерности, свойственной при приварке в условиях допустимой для сварки температуры [1]. Технология может применяться при строительстве газопроводов в зимних условиях регионов холодного климата. При разработке подобных технологий на основе методов математического моделирования тепловых процессов сварки, анализа полученных численных решений определяются параметры сварки при низких температурах, обеспечиваю-

Старостин Н.П., Тихонов Р.С., Николаева М.А. и др.

щие необходимую скорость охлаждения соединения для формирования структуры материала прочного сварного шва.

Выполнение ремонтных работ на газопроводе зачастую выполняется под давлением газа. Особую важность имеет выполнение ремонтных работ на газопроводе под давлением газа при температурах воздуха ниже нормативных. Существуют различные технологии ремонта ПЭ газопроводов без отключения подачи газа, в том числе с использованием Стоп-Систем и запорных шаров и приварки байпаса. Байпас приваривается к газопроводу с помощью седлового отвода до прерывания подачи газа на поврежденный участок. В то же время, технологии приварки седловых отводов к действующим газопроводам из полиэтиленовых труб при низких температурах не разработаны.

При сварке полимерных труб деталями с закладными нагревателями давление в зоне сварки создается за счет теплового расширения свариваемых элементов. Естественно, при сварке в условиях допустимых и низких температур, несмотря на обеспечение идентичных динамик температурных полей в зоне термического влияния, напряженно-деформированные состояния сварных соединений будут различаться в силу неодинаковых температурных полей в периферийных зонах.

Математическое моделирование деформационных процессов при сварке полиэтиленовых труб с помощью муфт рассматривалось в работах [2-4]. При Напряженно-деформированное состояние... 11

приварке седловых отводов к полиэтиленовым трубам подобные задачи не рассматривались.

Постановка задачи

Расчетная область Ω для определения динамики температурных полей и напряженно-деформированного состояния в седловом отводе и трубы под давлением газа представлена на рис. 1. Учитывая достаточно плотное расположение витков в закладном нагревателе, примем допущение о равномерном распределении источника теплоты по области D₃.



Рис. 1. Расчетная область седлового отвода и участка трубы: D₁ – седелка; D₂ – труба; D₃ – нагреватель

Fig.1. Computational area of saddle branch and pipe section: D_1 – saddle; D_2 – pipe; D_3 – heater

Термоупругая задача для седелки и труб рассматривается в несвязанной форме, в которой при действии на упругую систему внешней тепловой нагрузки не учитывается влияние скорости изменения объема на температурное поле. Термоупругая задача в такой постановке учитывает температурную зави-

симость физико-механических характеристик и возникновение тепловых деформаций и напряжений вследствие неравномерного нагрева сварного соединения. При численном решении термоупругой задачи на каждом временном шаге решается температурная задача, решение которой поставляется в уравнение термоупругости для определения напряженнодеформированного состояния.

Динамика температурного поля при предварительном подогреве, выравнивании температур, нагреве и охлаждении определяется решением трехмерного нестационарного уравнения теплопроводности в декартовой системе координат [5]:

$$\left(c(T) - \rho^{-} L^{100\%} \frac{dX_{C}}{dT} \right) \frac{\partial T}{\partial t} = = div (\lambda(T) gradT) + Q(T)\gamma,$$
(1)
 $(r, z) \in \Omega, \ 0 < t \le t_{m}.$

Уравнение (1) дополняется начальным и граничными условиями:

$$T(x,0) = T_0, \ (r,z) \in \Omega,$$
 (2)

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial n}\Big|_{\Gamma} = \alpha_0 \left(T\Big|_{\Gamma} - T_0\right), \qquad (3)$$

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial n}\Big|_{\Gamma_g} = \alpha_g \left(T\Big|_{\Gamma_g} - T_{gas}\right), \tag{4}$$

$$T\big|_{\Gamma_T} = T_0, \tag{5}$$

где

$$X_{C}(T) = \begin{cases} X_{C}^{\infty}, \ T \leq T_{1}, \\ \int_{T}^{T} q(u) du \\ X_{C}^{\infty} - \frac{T_{1}}{L^{100\%}} v_{T}, \ T_{1} < T < T_{2}, \\ 0, \ T \geq T_{2}, \end{cases}$$
(6)

$$c(T) = \rho^{+}c^{+} + X_{C}(T) \times (\rho^{-}c^{-}-\rho^{+}c^{+}),$$

$$\lambda(T) = \lambda^{+} + X_{C}(T) \times (\lambda^{-}-\lambda^{+});$$

T – температура; t – время; t_m – расчетное время; $c^{-}, \rho^{-}, \lambda^{-}$ и $c^{+}, \rho^{+}, \lambda^{+}$ – удельная теплоемкость, плотность и теплопроводность для твердой и жидкой фазы материала трубы соответственно; Q(t) – плотность теплового источника нагревателя; $L^{100\%}$ – удельная теплота фазового превращения полностью кристаллического полимера; Х_С – степень кристалличности; X_C^{∞} – степень кристалличности материала трубы и седелки до начала сварки; *Т*₁, *T*₂, – температуры солидуса и ликвидуса; q(T) – зависимость теплового потока от температуры, отнесенная к единице массы вещества, регистрируемая дифференциальным сканирующим калориметром (ДСК); V_T – скорость изменения температуры; Т₀ – температура окружающего воздуха; T_{gas} – температура газа внутри трубы; Г – свободная боковая поверхность трубы и отвода; Г_д – внутренняя поверхность трубы; Г_Т – поверхность

торцов трубы; $\gamma = \begin{cases} 1, (r, z) \in D_3 \\ 0, (r, z) \notin D_3 \end{cases}$.

На поверхностях сечений записываются условия равенства нулю тепловых потоков в силу симметрии.

Температурные напряжения при приварке седлового отвода к полиэтиленовым трубам рассматриваются в квазистационарной постановке, в которой напряжения зависят от решения

тепловой задачи сварки в каждый расчетный момент времени:

$$\operatorname{div} \sigma - \overline{\beta} \operatorname{grad} (T - T_p) = 0, \qquad (7)$$

где $\overline{\beta} = \beta(3\lambda + 2\mu)$.

Соотношения Коши между тензором деформаций є и вектором перемещений **u** имеют вид:

$$\varepsilon = 0, 5(\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T).$$
(8)

Поскольку термическое влияние учтено в уравнении равновесия (7) в виде объёмных напряжений, физические соотношения Гука между тензорами напряжений и деформаций напишем без учёта температурных деформаций

$$\sigma = \lambda \nabla \mathbf{u} \, \mathbf{I} + 2\,\mu\varepsilon \,, \tag{9}$$

в котором I – единичный тензор.

Принимая допущение, что слой теплоизоляционного материала не влияет на напряженно-деформированное состояние сварного соединения, на внешних поверхностях Γ_p , Γ_W трубы и отвода зададим граничное условие:

$$\sigma \mathbf{n} = \overline{\beta} \left(T - T_p \right), \ x \in \Gamma = \Gamma_p \cup \Gamma_W. \ (10)$$

На поверхностях сечений плоскостями *уОz, хОу* зададим условия:

$$\mathbf{u}_x = 0, \ x \in \Gamma_{yz}, \ \mathbf{u}_z = 0, \ x \in \Gamma_{xy}.$$
(11)

На конце трубы:

$$\mathbf{u} = 0, \ x \in \Gamma_T \,. \tag{12}$$

Внутри трубы:

$$\sigma \mathbf{n} = p_g, \ x \in \Gamma_g \ . \tag{13}$$

Термоупругая задача (7)–(13) в вариационной постановке предполагает равенство энергии деформации и внутренних объёмных сил с энергией поверхностных сил

$$\int_{\Omega} \left(\sigma(\mathbf{u}) \varepsilon(\mathbf{v}) - \left(\overline{\beta} \operatorname{grad} \left(T - T_p \right), \mathbf{v} \right) \right) dr dz =$$

=
$$\int_{\Gamma} \overline{\beta} \left(T - T_p \right) \mathbf{v} ds + \int_{\Gamma_g} \mathbf{p}_g \mathbf{v} ds.$$
(14)

Здесь v – пробная вектор-функция для вектора перемещений u.

Результаты и их обсуждение

Рассматривалась приварка седлового отвода 110/63 к полиэтиленовой трубе ПЭ 100 SDR 11 110×10,0 при температуре окружающего воздуха минус 45 °C. При допустимой температуре приварка проводится с напряжением 39,5 В, время нагрева (оплавления) – 210 с, время охлаждения – 30 мин. Значения теплофизических характеристик материала полиэтиленовой трубы для расчётов брались следующими: для твердой фазы $c^{-} = 1900 \ Дж/(кг \cdot °C); \ \rho^{-} = 950 \ кг/м^{3}; \ \lambda^{-} =$ 0,38 Bт/(м·°С); для жидкой фазы с⁺=2200 Дж/(кг.°С); $\rho^{+}=800$ $K\Gamma/M^3$: $\lambda^{+}=0,29 \text{ BT/(M} \cdot ^{\circ}\text{C}).$

Мощность теплового источника вычислялась по формуле

$$Q(t) = \frac{U^2}{R \cdot (1 + \beta_R (T - 20))}.$$

Сопротивление спирали для рассматриваемого седлового отвода R = 5,8 Ом. Свойства нихрома: удельная теплоемкость c = 460 Дж/(кг·°С); плотность $\rho = 8400$ кг/м³, коэффициент теплопроводности λ =12,2 Вт/(м·°С), температурный коэффициент сопротивления β_R =0,00017 1/°С.

При приварке седлового отвода к полиэтиленовой трубе при температурах воздуха ниже нормативных все опе-

Известия Юго-Западного государственного университета / Proceedings of the Southwest State University. 2023; 27(4): 8-24

рации выполняются с теплоизоляцией внешних свободных поверхностей участка трубы длиной 10 см и седелки. Для того, чтобы расчетная область оставалась неизменной при варьировании толщиной теплоизоляции на внешних поверхностях седлового отвода и труб вводился эффективный коэффициент теплообмена α eff, значение которого зависит от коэффициента теплообмена поверхности с воздухом α 0, толщины hiz и теплопроводности λ iz используемого теплоизоляционного материала. Значение α eff определяется из формулы [6-7]: $\frac{1}{\alpha_{eff}} = \frac{1}{\alpha_0} + \frac{h_{iz}}{\lambda_{iz}}$. В каче-

теплоизоляционного материала

стве

был использован пенофол. Теплофизические параметры газа внутри газопровода брались из работы [8]. Скорость движения газа внутри трубы при ремонтных работах в газопроводе принималась равной 3 м/с, и при этом температура газа равна $T_{gas} = -7,5$ °C. Коэффициент теплообмена внутри трубы α_g вычислялся по известной формуле [9]:

$$\alpha_g = \mathrm{Nu} \frac{\lambda_g}{2R_1}, \, \mathrm{Nu} = 0,023 \, \mathrm{Pr}^{1/3} \, \mathrm{Re}^{0.8}.$$
 (15)

Среднемесячные температуры газа представлены Якутским газоперерабатывающим заводом АО «Сахатранснефтегаз». На рис. 2 представлены значения среднемесячных температур газа.



Рис. 2. Среднемесячные значения температуры газа в подземном магистральном газопроводе **Fig. 2.** Monthly average values of gas temperature in the underground main gas pipeline

Задачи (1)-(5) и (7)-(13) решались методом конечных элементов с использованием программы свободного доступа Dolfin/FEniCS [10-11]. Триангуляция вычислительной расчетной области Ω выполнялась с использованием генератора сетки Gmsh [12]. Визуализация полученных результатов реализовывалась с помощью пакета Paraview [13]. Приведем результаты расчетов

термоупругого состояния сварного соединения при приварке седлового отвода к рассматриваемой полиэтиленовой трубе при различных температурах окружающего воздуха. Равновесная температура $T_p = 20 \,^{\circ}\text{C}$. При моделировании термоупругого состояния в условиях низких температур считается, что сварное соединение с равновесной температурой охлаждается свободно при -45 °C в течение 3 часов. При полученном состоянии свободный торец трубы предполагается защемленным. Производится предварительный подогрев с выравниванием температур, затем производится нагрев по регламентированному режиму и охлаждение под слоем теплоизоляционного материала. При расчетах теплового состояния учитывается движение газа с температурой -7,5 °С. При температуре воздуха 20 °С температура газа бралась равной 4,49 °С. В расчетах также использовались следующие значения свойств материала трубы и седлового отвода: температурные коэффициенты полиэтилена линейного расширения $\beta^- = 0,9.10^{-5}; \ \beta^+ = 2,8.10^{-5}$ 1/К; модули упругости $E^- = 250,0; E^+ = 12,5$ МПа; коэффициенты Пуассона $v^{-}=0,35;$ v⁺=0,49. Для нихрома *E*=100 ГПа; v=0,34. Давление газа *p_s* на внутренние стенки труб бралось равным 0,3 МПа.

Расчетами определены следующие технологические параметры приварки при температуре окружающего воздуха минус 45 °C: толщина теплоизоляционного слоя при охлаждении – 2 см; мощность закладного нагревателя для подогрева – 36,25 Вт; продолжительность подогрева – 10 минут; продолжительность технологической паузы для выравнивания температур – 2,5 минуты. Температурные поля, рассчитанные при найденных технологических параметрах, сравним с температурными полями при приварке в условиях допустимых температур воздуха.

На рис. 3 представлены сравнения размеров зон сплавления, ограниченных изотермой со значением температуры 140 °С, в сечении вертикальной плоскостью при сварке при температуре ОВ +20 и -45 °C по существующему режиму приварки, а также при -45 °C с использованием предлагаемой технологии в момент завершения нагрева. Показаны изотермы в момент завершения нагрева и через небольшой промежуток времени после выключения нагревателя. Видно, что после завершения нагрева оплавление продолжается в средней части расположения нагревателя. Зона сплавления представляет собой огибающую множества таких изотерм с максимально удаленными от нагревателя точками в различные моменты времени. Меньший размер зоны сплавления при низкой температуре ОВ свидетельствует о меньшем объеме полученного расплава, кристаллизация которого будет происходить по закономерности, нехарактерной для приварки седлового от-

Известия Юго-Западного государственного университета / Proceedings of the Southwest State University. 2023; 27(4): 8-24

вода при допустимой температуре. При такой закономерности кристаллизации невозможно гарантировать требуемую прочность соединения. Как видно из рис. 3, размеры зон сплавления при сварке при температуре +20 °C по регламентированному режиму и при –45 °C – по предлагаемой технологии отличаются незначительно.

Зона термического влияния (ЗТВ) расположена между границей зоны сплавления и огибающей изотерм 120 °С, при которой начинается плавление полиэтилена. Расчеты распределения температур после плавления показали, что ЗТВ достигает максимального объема после завершения нагрева на третьей минуте охлаждения. Охлаждение соединения под слоем теплоизоляции с расчетной толщиной при низкой температуре ОВ протекает по закономерности, характерной при допустимой температуре на открытом воздухе. На рис. 4 показано сравнение температур в ЗТВ при приварке седлового отвода к полиэтиленовой трубе в условиях допустимой и низкой температуре после охлаждения в течение 3 минут. На десятой минуте охлаждения в обоих случаях температуры становятся ниже 100 °C, т.е. процесс кристаллизации завершается.

На рис. 5 представлено сравнение временных зависимостей температур в точке между трубой и седелкой, расположенной в средней части по длине нагревателя, при приварке седлового отвода к трубе при температуре минус 45 °C по предлагаемой технологии и при допустимых для сварки температурах +20 °C и минус 10 °C по регламентированному режиму. В начальный момент процесса температуры в рассматриваемой точке отличаются от температуры окружающего воздуха вследствие теплового воздействия газа, движущегося внутри трубы.



Рис. 3. Изотермы 140 °С в сечении седлового отвода и трубы в момент завершения нагрева (t=210 c) и на стадии охлаждения при температуре OB: **a** – 20 °C; **б** – –45 °С по режиму для допустимой температуры воздуха; **в** – –45 °С по предлагаемой технологии

Fig. 3. Isotherms of 140 °C in the cross section of the saddle branch and the pipe at the moment of completion of heating (t=210 s) and at the stage of cooling at the temperature of the RH:
a - 20 °C; 6 - -45 °C according to the regime for the permissible air temperature;
B - -45 °C according to the proposed technology



- Рис. 4. Распределение температуры в зоне термического влияния в момент времени охлаждения 3 минут после завершения нагрева при температуре OB: **a** +20 °C; **б** -45 °C с предварительным подогревом и охлаждением под теплоизоляцией
- Fig. 4. Temperature distribution in the heat-affected zone at the time of cooling 3 minutes after completion of heating at the temperature of the RH: a – +20 °C; σ – -45 °C with preheating and cooling under thermal insulation



- Рис. 5. Временные зависимости температур между трубой и седелкой при приварке седлового отвода к полиэтиленовой трубе в условиях температур окружающего воздуха: 1 – +20 °C; 2 – минус 45 °C по предлагаемой технологии; 3 – минус 10 °C
- Fig. 5. Time dependences of temperatures between the pipe and the saddle branch when welding a saddle branch to a polyethylene pipe at ambient temperatures: 1 +20;
 2 minus 45 according to the proposed technology; 3 minus 10 °C

Формирование структуры материала сварного шва и ЗТВ происходит при снижении температуры от 120 °С до 100 °С. Считается, что сформировавшаяся структура материала сварного шва и ЗТВ, обеспечивают необходимую прочность соединения, если кривые временных зависимостей температур, в области, претерпевшей структурные изменения, лежат в «коридоре» соответствующих температурных зависимостей, получающихся при допустимых для сварки температурах воздуха. Кроме того, скорости охлаждения в интервале фазового превращения должны быть близки. Из рис. 4 видно, что кривая 2 указанным условиям соответствует. Аналогичные зависимости получаются и для других точек ЗТВ соединения. Такая динамика температурного поля в зоне термического влияния будет способствовать формированию структуры материала сварного шва и ЗТВ, свойственной при сварке в условиях допустимой температуры.

Решение трехмерной термоупругой задачи в декартовых координатах усложняет анализ термомеханического состояния соединения, используя значения напряжений и деформаций по осям декартовой системы координат. Анализ напряженно-деформированных состояний сварных соединений проведем сравнением полей напряжений и деформаций в цилиндрической системе координат при приварке седлового отвода при температурах окружающего воздуха 20 °C по стандартной технологии и -45 °C по предлагаемой технологии. Напряжения и деформации в цилиндрической системе координат рассчитывались по значениям напряжений и деформаций в декартовой системе координат, используя известные формулы перехода [14].

Радиальные напряжения между трубой и седелкой определяют усилие прижатия свариваемых элементов. На рис. 6 представлены радиальные напряжения и деформации при приварке седловых отводов к полиэтиленовой трубе в момент завершения нагрева. Детализация распределений радиальных напряжений показывает, что в момент завершения нагрева по линии соединения трубы и седелки действуют сжимающие напряжения от 0,55 до 0,8 МПа в случае приварки в условиях комнатной температуры и от 0,53 до 0,88 МПа - по предлагаемой технологии. Распределения радиальных деформаций в ЗТВ при сварке в стандартных условиях и при низких температурах по предлагаемой технологии практически илентичны.

На рис.7 представлены распределения радиальных напряжений и деформаций при сравниваемых приварках в момент завершения охлаждения, т.е. после 10 минут охлаждения после нагрева. В момент завершения охлаждения, при котором кристаллизация завершилась, различия радиальных напряжений по линии соединения трубы и седелки незначительны. Если при стандартной приварке сжимающие радиальные напряжения изменяются в пределах 0,17 – 0,46 МПа,

то при низкой температуре с использованием теплоизоляции напряжения изменяются от 0,13 до 0,47 МПа. Распределения радиальных деформаций также сопоставимы.

На рис. 8 представлены кривые изменения во времени радиальных напряжений в процессе сварки в точке между трубой и седелкой, начиная с момента начала нагрева. Абсолютные значения сжимающих напряжений возрастают на стадии нагрева (до 210 с) с повышением температуры. При охлаждении в интервале времени (210, 810) секунд – снижаются со временем. Заметные клебания значений радиальных напряжений обусловлены поглощением и выделением теплоты фазового превращения.



- Рис. 6. Распределение радиальных напряжений (а, б) и деформаций (а', б') при приварке седлового отвода к трубе в момент завершения нагрева при температурах OB: 20 °C (а, а'); -45 °C по предлагаемой технологии (б, б')
- Fig. 6. Distribution of radial stresses (a, δ) and deformations (a', δ') during welding or a saddle branch to the pipe at the moment of completion of heating at ambient temperatures of: 20 °C (a, a'); -45 °C according to the proposed technology (δ, δ')



Рис. 7. Распределение радиальных напряжений (а, б) и деформаций (а', б') при приварке седлового отвода к трубе в момент завершения охлаждения при температурах OB: 20 °C (а, а'); -45 °C по предлагаемой технологии (б, б')

Fig. 7. Distribution of radial stresses (a, δ) and deformations (a', δ') during welding or a saddle branch to the pipe at the moment of completion of cooling at ambient temperatures of: 20 °C (a, a');
-45 °C according to the proposed technology (δ, δ')

Расчеты показывают, что сжимающие радиальные напряжения не ниже 0,2 МПа сохраняются до конца стадии охлаждения. При приварке седлового отвода в условиях низких температур по предлагаемой технологии на стадиях нагрева и охлаждения радиальные напряжения и деформации изменяются в допустимых пределах. Изменения во времени температур, напряжений и деформаций в окрестности сварного шва в «коридоре» допустимых изменений будут обусловливать формирование в зоне термического влияния и сплавления надмолекулярной структуры, характерной для сварки в нормальных условиях.



Рис. 8. Динамика радиальных напряжений в точке между трубой и седелкой в процессе приварки седлового отвода при температуре окружающего воздуха:

1 – минус 45 °C по предлагаемой технологии; 2 – +40 °C; 3 – минус 15 °C

Выводы

Анализ термоупругих состояний показывает, что при приварке седлового отвода к полиэтиленовой трубе действующего газопровода в условиях низких температур по предлагаемой технологии можно ожидать достижения прочности соединения не ниже, чем при приварке в стандартных условиях.

Список литературы

1. Васильева М.А., Старостин Н.П. Анализ температурных полей сварки полиэтиленовых распределительных трубопроводов с помощью седлового отвода при температурах воздуха ниже нормативных // Информационные технологии в проектировании и производстве. 2022. № 1 (185). С. 54–58. DOI: 10.52190/2073-2597 2022 1 54

2. Математическое моделирование деформационных процессов при сварке полиэтиленовых труб / В.И. Махненко, Е.А. Великоиваненко, Г.Ф. Розынка, Е.Ш. Гисер // Автоматическая сварка. 1991. № 4. С. 1–6.

3. Труфанов Н.А., Сметанников О.Ю., Завьялова Т.Г. Численное решение краевых задач механики полимеров с учетом фазовых и релаксационных переходов // Математическое моделирование. 2000. Т. 12, № 7. С. 45–50.

<sup>Fig. 8. Dynamics of radial stresses at the point between the pipe and the saddle during welding of the saddle branch at ambient temperature: 1 – minus 45°C according to the proposed technology;
2 – +40 °C; 3 – minus 15 °C</sup>

4. Тихонов Р.С., Старостин Н.П., Аммосова О.А. Исследование влияния низких температур окружающего воздуха на термоупругое состояние электромуфтового сварного соединения полиэтиленовых труб // Информационные технологии в проектировании и производстве. 2022. № 3 (187). С. 41–47. DOI: 10.52190/2073-2597 2022 3 41

5. Старостин Н.П., Николаева М.А. Приварка седлового отвода к полиэтиленовой трубе газопровода при низких температурах // Нефтегазовое дело. 2022. Т. 20, № 4. С. 133–140.

6. Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С. Теплопередача. Изд. 2-е. М: Энергия, 1969. 440 с.

7. Численное моделирование температурного поля многолетнемерзлого грунтового основания железной дороги / П. Н. Вабищевич, С. П. Варламов, В. И. Васильев, М. В. Васильева, С. П. Степанов // Математическое моделирование. 2016. Т. 28. № 10. С. 110–124.

8. Bondarev E.A., Rozhin I.I., Argunova K.K. Generalized Mathematical Model of Hydrate Formation in Gas Pipelines // Journal of Applied Mechanics and Technical Physics. 2019. Vol. 60. No. 3. Pp. 503-509. DOI: 10.1134/S002189441903012X

9. Кутателадзе С.С. Основы теории теплообмена. Изд. 5-е. М.: Атомиздат, 1979. 416 с.

10. Зенкевич О., Морган К. Конечные элементы и аппроксимация. М.: Мир, 1986. 318 с.

11. Logg A., Mardal K.A, Wells G. Automated Solution of Differential Equations by the Finite Element Method: The FEniCS Book. New York: Springer Sci. & Business Media. 2012. DOI: 10.1007/978-3-642-23099-8

12. Software package GMSH. URL: http://geuz.org/gmsh/ (дата обращения: 31.03.2023).

13. Software package ParaView. URL: http://paraview.org/ (дата обращения: 31.03.2023).

14. Лехницкий С.Г. Теория упругости анизотропного тела. М.: Наука, 1977. 416 с.

References

1. Vasileva M.A., Starostin N.P. Analiz temperaturnykh poley svarki polietilenovykh raspredelitel'nykh truboprovodov s pomoshch'yu sedlovogo otvoda pri temperaturakh vozdukha nizhe normativnykh [Temperature field analysis in the welding of polyethylene distribution gaspipelines with the use of a saddle branch at ambient temperatures below standard]. *Informatsionnyye tekhnologii v proyektirovanii i proizvodstve = Information Technologies of CAD/CAM/CAE*, 2022, no. 1 (185), pp. 54–58. DOI: 10.52190/2073-2597_2022_1_54.

2. Makhnenko, V. I., Velikoivanenko, E. A., Rozynka, G. F., Giser, E. Sh. Matematicheskoye modelirovaniye deformatsionnykh protsessov pri svarke polietilenovykh trub [Mathematical modeling of deformation processes in the welding of polyethylene pipes]. *Avtomaticheskaya svarka* = *Automatic Welding*, 1991, no. 4, pp. 1–6.

3. Trufanov, N. A., Smetannikov O. Yu., Zav'yalova T. G. Chislennoye resheniye krayevykh zadach mekhaniki polimerov s uchetom fazovykh i relaksatsionnykh perekhodov [Numerical solution of boundary value problems of polymer mechanics with allowance for phase and relaxation transitions]. *Matematicheskoye modelirovaniye* = *Mathematical Modeling*, 2000, vol. 12, no. 7, pp. 45–50.

4. Tikhonov R.S., Starostin N.P., Ammosova O.A. Issledovaniye vliyaniya nizkikh temperatur okruzhayushchego vozdukha na termouprugoye sostoyaniye elektromuftovogo svarnogo soyedineniya polietilenovykh trub [Investigation of the effect of low ambient temperatures on the thermoelastic state of electrofusion welded joint of polyethylene pipes]. *Informatsionnyye tekhnologii v proyektirovanii i proizvodstve = Information Technologies of* CAD/CAM/CAE, 2022, no. 3 (187), pp. 41–47.

5. Starostin N.P., Nikolayeva M.A. Privarka sedlovogo otvoda k polietilenovoy trube gazoprovoda pri nizkikh temperaturakh [Welding of tapping saddle to a polyethylene pipe of the gas pipeline at low temperatures]. *Neftegazovoye delo = Petroleum Engineering*, 2022, vol. 20, no. 4, pp. 133–140.

6. Isachenko V.P., Osipova V.A., Sukomel A.S. *Teploperedacha* [Heat transfer. Edit.2] Moscow, Energiya Publ., 1969, 440 p.

7. Vabishchevich P.N., Varlamov S.P., Vasiliev V.I., Vasilieva M.V., Stepanov S.P. Numerical simulation of the temperature dynamics of railway foundation material in permafrost. *Matematicheskoe modelirovanie = Mathematical Models and Computer Simulations*, 2017, no. 9, pp. 292–304.

8. Bondarev E.A., Rozhin I.I., Argunova K.K. Generalized Mathematical Model of Hydrate Formation in Gas Pipelines. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 2019, vol. 60, no. 3, pp. 503-509. DOI: 10.1134/S002189441903012X

9. Kutateladze S.S. *Osnovy teorii teploobmena* [Fundamentals of the theory or heat transfer]. Moscow, Atomizdat Publ., 1979, 416 p.

10. Zenkevich O., Morgan K. *Konechnyye elementy i approksimatsiya* [Finite elements and approximations]. Moscow, Mir Publ., 1986, 318 p.

11. Logg A., Mardal K.A, Wells G. Automated Solution of Differential Equations by the Finite Element Method: The FEniCS Book. New York: Springer Sci. & Business Media. 2012. DOI: 10.1007/978-3-642-23099-8

12. Software package GMSH. Available at: http://geuz.org/gmsh/ (accessed: 31.03.2023).

13. Software package ParaView. Available at: http://paraview.org/ (accessed: 31.03.2023).

14. Lekhnitskiy S.G. *Teoriya uprugosti anizotropnogo tela* [Theory of elasticity of an anisotropic body]. Moscow, Nauka Publ., 1977, 416 p.

Информация об авторах / Information about the Authors

Старостин Николай Павлович, доктор технических наук, профессор, г.н.с., и.о. зав.лабораторией климатических испытаний, Институт проблем нефти и газа Сибирского отделения РАН – обособленное подразделение ФГБНУ ФИЦ «Якутский научный центр Сибирского отделения РАН», г. Якутск, Российская Федерация, e-mail: nikstar56@mail.ru, ORCID: http://orcid.org/0000-0002-5686-1817, AuthorID 7004125992

Тихонов Роман Семенович, кандидат технических наук, с.н.с., Институт проблем нефти и газа Сибирского отделения РАН – обособленное подразделение ФГБНУ ФИЦ «Якутский научный центр Сибирского отделения РАН», г. Якутск, Российская Федерация, e-mail: roman_tikhon@mail.ru, ORCID: http://orcid.org/0000-0002-9930-3305, AuthorID 56763891300

Николаева Мария Александровна, кандидат физико-математических наук, с.н.с., Институт проблем нефти и газа Сибирского отделения РАН – обособленное подразделение ФГБНУ ФИЦ «Якутский научный центр Сибирского отделения РАН», г. Якутск, Российская Федерация, e-mail: eowa@mail.ru, ORCID: http://orcid.org/0000-0002-1805-1776, AuthorID 36867667000

Акимов Мир Петрович, кандидат технических наук, доцент, Северо-Восточный федеральный университет имени М.К. Аммосова, г. Якутск, Российская Федерация, e-mail: mir_akimov@mail.ru, AuthorID 57214972589 Nikolay P. Starostin, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Chief Scientific Officer, Acting Head Climate Testing Laboratory, Institute of Oil and Gas Problems of the Siberian Branch of the RAS -Division of Federal Research Centre «Yakut Scientific Centre of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences», Yakutsk, Russian Federation, e-mail: nikstar56@mail.ru, ORCID: http://orcid.org 0000-0002-5686-1817, AuthorID 7004125992

Roman S. Tikhonov, Cand. of Sci. (Engineering), Senior Researcher, Institute of Oil and Gas Problems of the Siberian Branch of the RAS -Division of Federal Research Centre «Yakut Scientific Centre of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences», Yakutsk, Russian Federation, e-mail: roman_tikhon@mail.ru, ORCID: http://orcid.org/0000-0002-9930-3305, AuthorID 56763891300

Mariya A. Nikolaeva, Cand. of Sci. (Physics and Mathematics), Senior Researcher, Institute of Oil and Gas Problems of the Siberian Branch of the RAS - Division of Federal Research Centre «Yakut Scientific Centre of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences», Yakutsk, Russian Federation, e-mail: eowa@mail.ru, ORCID: http://orcid.org/0000-0002-1805-1776, AuthorID 36867667000

Mir P. Akimov, Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor, North-East Federal University, Yakutsk, Russian Federation, e-mail: mir_akimov@mail.ru, AuthorID 57214972589