

МЕТАЛЛУРГИЯ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

Материаловедение

УДК 621.791.46; 621.791.052.3

DOI 10.31242/2618-9712-2019-24-4-13

Регулирование теплового процесса при электромуфтовой сварке полиэтиленовых труб при низких температурах

Н.П. Старостин, О.А. Аммосова

Институт проблем нефти и газа СО РАН, Якутск, Россия
ammosova_o@mail.ru

Аннотация. На основе математического моделирования теоретически исследуется тепловой процесс при электромуфтовой сварке полиэтиленовых труб для газопроводов соединительными муфтами с закладными нагревательными элементами. Исследуется влияние температуры окружающего воздуха на динамику температурного поля при электромуфтовой сварке полиэтиленовых труб. Математическая модель теплового процесса сварки учитывает геометрические размеры, теплофизические свойства материала свариваемых труб и муфты, температуру окружающего воздуха, скрытую теплоту фазового превращения полиэтилена, напряжение, подаваемое на закладной нагреватель. Приводятся результаты численного расчета теплового процесса сварки при различных температурах окружающего воздуха. Разработана методика определения параметров электромуфтовой сварки полиэтиленовых труб, обеспечивающих протекание теплового процесса при низких температурах окружающего воздуха по закономерностям, свойственным при сварке при допустимых температурах. Показано, что для обеспечения допустимой динамики температурного поля при температурах воздуха ниже нормативных, необходимо предварительно перед сваркой подогреть муфту и свариваемые участки труб. Предварительный подогрев осуществляется вмонтированным штатным нагревателем. Для снижения скорости охлаждения сварного муфтового соединения предлагается использование слоя теплоизоляции. Приведены рекомендуемые технологические параметры электромуфтовой сварки для труб ПЭ 80 ГАЗ SDR 11 63×5,8 при температурах воздуха ниже нормативных.

Ключевые слова: математическая модель, температура, расчет, метод конечных разностей, управление, тепловой процесс, электромуфтовая сварка, предварительный подогрев, охлаждение, фазовый переход, оплавление, кристаллизация, теплоизоляция.

Благодарности. Работа выполнена в рамках Госзаказа ФАНО РФ (проект № АААА-А17-117040710038-8 от 07.04.2017 г.

Введение

Полиэтиленовые трубы широко применяются при строительстве внутрипоселковых газораспределительных сетей, а также в других отраслях жилищно-коммунального хозяйства [1–5]. Это обусловлено их существенными преимуществами по сравнению со стальными: прочность, гибкость, химическая инертность, простота монтажа. С ростом протяженности полиэтиленовых трубопроводов проведение оперативного ремон-

та в зимний период в районах холодного климата становится особенно актуальной задачей. По действующим нормативным документам температура окружающего воздуха от –15 до +45 °С является допустимой для осуществления сварки полиэтиленовых труб при ремонтно-восстановительных и монтажных работах [6]. В случае более низких температур воздуха сварочные работы рекомендуется проводить в легких отапливаемых укрытиях, в которых поддерживается температура

выше -15°C . Проведение таких работ обуславливает значительные непроизводительные затраты и длительную подготовку, что непозволительно в аварийных ситуациях. Несоблюдение технологии сварки и отсутствие достаточного технического обслуживания приводят к возникновению дефектов в зоне сварного соединения [7–10]. Существуют различные способы соединения полиэтиленовых труб: стыковая, раструбная, электромужовая, сварка вибрацией и трением [11–14]. В статье исследуется электромужовая сварка.

Актуальной задачей является разработка методов и средств оперативной электромужовой сварки полиэтиленовых труб (соединительными деталями с закладными нагревателями) в зимних условиях без применения отапливаемых укрытий. Поскольку определение параметров сварки для труб из одного материала и одного типоразмера в интервале низких температур воздуха посредством проведения только экспериментальных работ является достаточно трудоемкой задачей, то целесообразно привлечение методов и средств математического аппарата. Определение эффективных способов регулирования тепловым процессом возможно с применением математического моделирования.

Поскольку в процессе сварки происходят оплавление и отвердевание материала в сварном соединении, то для определения динамики температурного поля в системе «соединительная деталь – труба» необходимо решать уравнение теплопроводности с эффективным коэффициентом теплоемкости в цилиндрических координатах, учитывающее скрытую теплоту фазового перехода на движущейся границе оплавления (отвердевания) [15, 16]. Подобные задачи успешно решаются численно методом сглаживания [17, 18]. Математическое моделирование позволит выявить

особенности теплового процесса сварки при температурах окружающей среды ниже нормативных.

Постановка задачи

Расчетная схема трубы с муфтой представлена на рис. 1. В силу симметрии рассматривается одна из половин соединения муфты с отрезком трубы. Предполагается, что распределение температуры по окружности любого поперечного сечения трубы и муфты однородное. Математическая задача ставится следующим образом. Область Ω , занятая муфтой и отрезком трубы, в момент времени $t > 0$ разбивается некоторой гладкой поверхностью $\Gamma(t)$, подлежащей определению, на две подобласти $\Omega^+(t)$ и $\Omega^-(t)$, занятые соответственно жидкой и твердой фазами материала трубы и муфты. В каждой из областей $\Omega^+(t)$ и $\Omega^-(t)$ температура $T(r, z, t)$ удовлетворяет двумерному уравнению теплопроводности в цилиндрических координатах:

$$\tilde{C}(T)\rho(T)\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(r\lambda(T)\frac{\partial T}{\partial r}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\lambda(T)\frac{\partial T}{\partial z}\right), \quad (1)$$

$$0 < t < t_m, \quad r_1 < r < r_3, \quad 0 < z < z_{tr},$$

где

$$\tilde{C}(T) = \begin{cases} C_1, & T \leq T_s, \\ C_1 - L \frac{d\Psi}{dT}, & T_s < T < T_L, \\ C_2, & T \geq T_L, \end{cases}$$

$\Psi(T)$ – объемная доля твердой фазы, $\rho(T)$ – плотность и $\lambda(T)$ – коэффициент теплопроводности. При предположении прямой пропорциональности объема расплавленного полиэтилена количеству выделившейся теплоты, $\Psi(T)$ определяется по формуле:

$$\Psi(T) = 1 - \frac{\int_{T_s}^T q(u) du}{\int_{T_s}^{T_L} q(u) du},$$

где $q(T)$ – зависимость теплового потока от температуры, отнесенная к единице массы вещества, регистрируемая дифференциальным сканирующим калориметром.

Так как удельная теплота фазового перехода L определяется по формуле

$$L = \frac{(t_1 - t_2) \int_{T_s}^{T_L} q(u) du}{(T_L - T_s)},$$

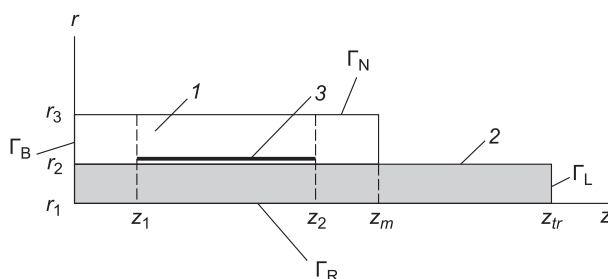


Рис. 1. Расчетная схема:

1 – стенка муфты; 2 – стенка трубы; 3 – нагревательный элемент.

Fig. 1. Design scheme:

1 – wall of the coupling; 2 – pipe wall; 3 – heating element.

то

$$L \frac{d\Psi}{dT} = - \frac{q(T)(t_1 - t_2)}{(T_L - T_S)},$$

t_1, t_2 – время начала и окончания фазового перехода. Эффективный коэффициент теплоемкости вычислим по формуле [16]

$$\tilde{C}(T) = \begin{cases} C_1, & T \leq T_S, \\ C_1 - \frac{q(T)}{\Delta}, & T_S < T < T_L, \\ C_2, & T \geq T_L, \end{cases}$$

где $\Delta = \frac{(T_L - T_S)}{(t_1 - t_2)}$ – скорость нагрева, варьируемая в ДСК.

Нагревательный элемент рассматривается как сосредоточенный источник тепла. В месте расположения источника тепла решение задачи удовлетворяет условиям сопряжения;

$$\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r_h-0} - \lambda(T) \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r_h+0} = Q(t), \quad (2)$$

$$T \Big|_{r_h-0} = T \Big|_{r_h+0}, \quad (3)$$

где $Q(t)$ – мощность источника тепла.

На левой границе рассматриваемой области задается условие симметрии:

$$\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=0} = 0, \quad (4)$$

на правой – условие первого рода:

$$T(r, z_{tr}, t) = T_0. \quad (5)$$

На свободных поверхностях G выполняются условия теплообмена с окружающей средой:

$$\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_G = -\alpha(T|_G - T_0). \quad (6)$$

В начальный момент времени распределение температуры однородное:

$$T(r, z, 0) = T_0. \quad (7)$$

Задача решалась методом сглаживания коэффициентов с использованием метода конечных разностей [17]. При численном решении задачи на каждом временном слое проводятся итерации.

Мощность источника тепла вычислялась по формуле

$$Q(t) = \frac{U^2}{R \cdot (1 + \beta(T(r_h, z, t) - 20))S}, \quad (8)$$

где U – сварочное напряжение; R – сопротивление спирали при температуре 20 °С; β – температурный коэффициент сопротивления; S – площадь поверхности источника тепла.

В математической модели имитировалось, что соединяемые детали длительное время выдержаны при температуре окружающего воздуха (ОВ), т. е. в начальный момент времени температура в элементах соединения равнялась температуре ОВ. Сварочное напряжение равным $U = 32$ В, продолжительность нагрева равна 70 с. $z_1 = 0,012$; $z_2 = 0,03$ – координаты расположения нагревательного элемента; $z_m = 0,048$ – длина муфты; $z_{tr} = 0,1$ – длина трубы, м; $r_1 = 0,025$ – внутренний радиус трубы; $r_2 = 0,0315$; $r_3 = 0,0395$ – внешние радиусы трубы и муфты, м; коэффициенты теплопроводности $\lambda_1 = 0,46$; $\lambda_2 = 0,24$ Вт/(м·К); плотности $\rho_1 = 950$; $\rho_2 = 800$; удельные теплоемкости $c_1 = 2000$; $c_2 = 2400$ Дж/(кг·К), $U = 32,8$ В; $R = 1,6$ Ом; $\beta = 0,00433 \frac{1}{^\circ\text{C}}$ [19, 20].

Результаты и обсуждение

Сравнивались распределения температур в муфте и трубе при температурах ОВ 20 (допустимая температура ОВ) и –40 °С (ниже нормативных). На рис. 2 представлено распределение температуры по длине стенки трубы на различном расстоянии от нагревательного элемента, которое получается в момент окончания стадии нагрева. На поверхности трубы максимальные температуры близки температурам нагревательного элемента. Оплавление полиэтилена не достигает середины стенки трубы, поскольку максимальная температура при радиусе $r = 28,25$ мм

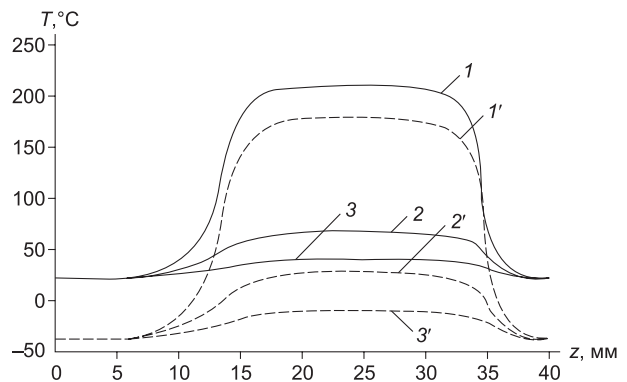


Рис. 2. Распределение температуры по длине трубы в конце стадии нагрева ($t = 70$ с) при температуре ОВ 20 °С (кривые 1–3) и –40 °С (кривые 1'–3') и различных радиусах r , мм: 1, 1' – 31,5; 2, 2' – 28,25; 3, 3' – 25.

Fig. 2. The temperature distribution along the length of the pipe at the end of the heating stage ($t = 70$ s) at an ambient temperature of 20 °C (curves 1–3) and minus 40 °C (curves 1'–3') and different radii r , mm: 1, 1' – 31,5; 2, 2' – 28,25; 3, 3' – 25.

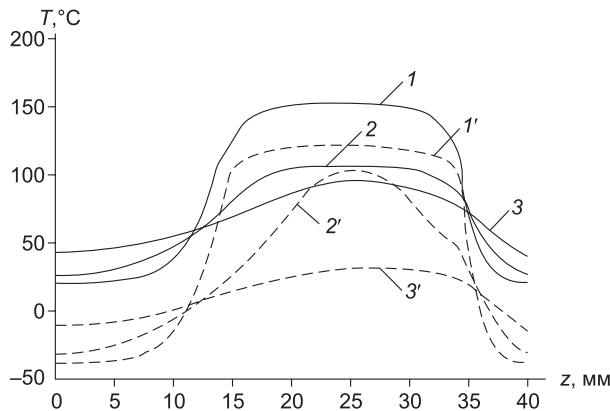


Рис. 3. Распределение температуры по длине муфты при $r = 31,75$ мм при температуре окружающего воздуха $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ (кривые 1–3) и $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ (кривые 1'–3') в различные моменты времени t стадии охлаждения, с: 1, 1' – 76; 2, 2' – 210; 3, 3' – 570.

Fig. 3. The temperature distribution along the length of the coupling at $r = 31.75$ mm at various times t of the cooling stage at an ambient temperature of $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ (curves 1–3) and minus $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ (curves 1'–3'), s: 1, 1' – 76; 2, 2' – 210; 3, 3' – 570.

не достигает $80\text{ }^{\circ}\text{C}$, при которой начинаются структурные изменения в полиэтилене. На внутренней поверхности трубы температура трубы в период нагрева повышается примерно на $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ при низкой температуре ОВ и на $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ при допустимой.

Из графиков распределения температур видно, что разница температур при различных температурах ОВ увеличивается по мере удаления от источника теплоты. Очевидно, что увеличение мощности источника нагрева способствует повышению максимальной температуры и градиента температуры. При увеличении продолжительности нагрева повышается температура частей, удаленных от источника тепла, и градиент уменьшается. Поэтому для обеспечения допустимой динамики температурного поля в зоне термического влияния при низких температурах ОВ на стадии нагрева необходимо уменьшить мощность источника тепла и увеличить продолжительность нагрева, т. е. стадия сварки должна предшествовать стадия предварительного подогрева.

Температура окружающего воздуха оказывает существенное влияние на динамику температурного поля в период охлаждения. При оптимальных технологических режимах сварки ленточные образования, сформированные в зоне вмонтированного штатного нагревателя, вследствие релаксации расплава трансформируются в сферолит-

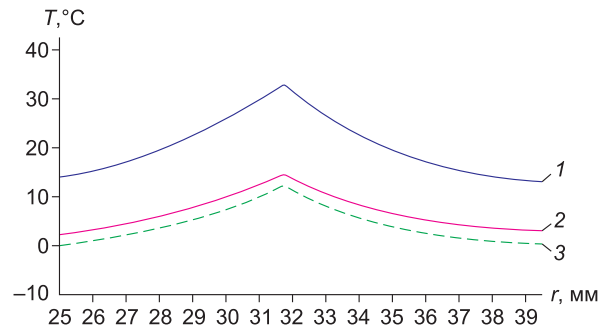


Рис. 4. Распределение температуры по радиусу в конце предварительного прогрева с теплоизоляцией при температуре ОВ $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ в сечении: 1 – по середине нагревательного элемента; 2 – по линии z_1 (рис. 1); 3 – по линии z_2 (см. рис. 1). Напряжение $U = 8\text{ В}$.

Fig. 4. The distribution of temperature along the radius at the end of the preheating with thermal insulation at an ambient temperature $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ in the section: 1 – in the middle of the heating element; 2 – along the line z_1 (Fig. 1); 3 – along the line z_2 (Fig. 1). Voltage $U = 8\text{ В}$.

ные. Формирование ленточной структуры в зоне сплавления связывают с повышением температуры кристаллизации деформируемых полимерных расплавов [21–22]. Механические свойства полиэтилена зависят от кристалличности, плотности молекулы связки и морфологии, размеров сферолитов, на которые влияет термическая история и любая последующая обработка, включая сварку [23]. При определенных температурах ленточная структура может сохраниться вследствие ранней кристаллизации расплава.

Распределение температуры по длине муфты в месте расположения нагревателя (рис. 3), однородное в начале периода охлаждения, со временем становится неоднородным, а затем снова стремится к однородному распределению – к температуре ОВ. При этом неоднородности температуры более выражены при низких температурах ОВ. Это обусловлено не только конвективным теплообменом, но и низкими температурами частей труб и муфты, удаленных от закладного нагревателя. Это также подтверждает необходимость стадии подогрева, которая обеспечит в зоне термического влияния температуру в допустимом для проведения сварочных работ интервале.

Рассмотрим стадию предварительного прогрева системы «труба–муфта» с использованием штатного закладного нагревателя муфты. Отметим, что имеются два параметра, которыми мож-

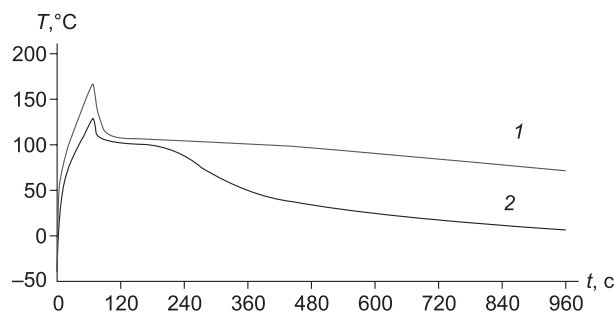


Рис. 5. Изменение температуры по времени в точке с координатами $r = 0,031$, $z = 0,021$ м: 1 – при температуре ОВ 20 °С; 2 – при температуре ОВ –40 °С.

Fig. 5. Change in temperature over time at a point with coordinates $r = 0,031$, $z = 0,021$ m: 1 – at an ambient temperature 20 °С; 2 – at an ambient temperature –40 °С.

но варьировать: напряжение и продолжительность прогрева. Мощность источника и продолжительность нагрева при подогреве необходимо выбирать из условия недопущения структурных изменений в материале трубы. В качестве такого условия может быть выбрано условие, лимитирующее максимальную температуру $T_{\max}$ в сварном соединении при подогреве, например, $T_{\max} < 60$ °С. Максимальная температура при подогреве может быть выше допустимой температуры ОВ. Такой прием позволит предусмотреть период охлаждения после подогрева, способствующий выравниванию температурного поля перед сваркой.

На рис. 4 представлено распределение температуры по радиусу в различных сечениях трубы и муфты в конце предварительного прогрева при температуре окружающего воздуха –40 °С. Повышение однородности температуры в зоне сварки может быть достигнуто при теплоизоляции внешней поверхности муфты. Расчетами найдена толщина теплоизоляции (пенополиэтилена), равная 2 см, обеспечивающая повышение температуры на внешней поверхности муфты.

При низких температурах ОВ скорость охлаждения заметно повышается (рис. 5). Известно, что прочность полиэтилена зависит от степени кристалличности и размеров надмолекулярных образований, которые, в свою очередь, определяются режимом охлаждения. Если скорость охлаждения высокая, то образуется много центров кристаллизации и их рост происходит медленно, при этом формируется мелкокристаллическая

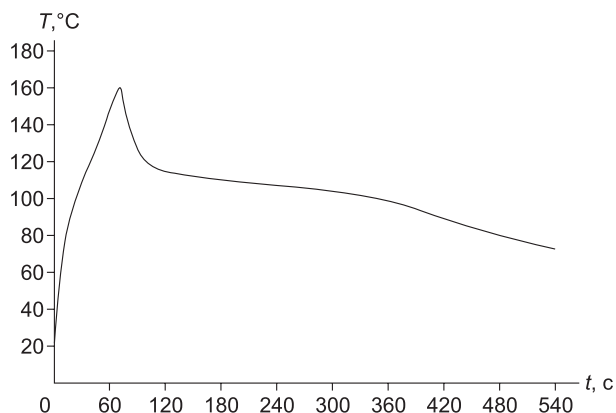


Рис. 6. Изменение температуры по времени в точке с координатами $r = 0,031$, $z = 0,021$ м при температуре ОВ –40 °С после предварительного подогрева и выравнивания.

Fig. 6. Change in temperature over time at a point with coordinates $r = 0,031$, $z = 0,021$ m at an ambient temperature –40 °С after preheating and leveling.

структура, обуславливающая пластичность полиэтилена. При медленном охлаждении расплава формируется крупнокристаллическая структура, которая увеличивает склонность полиэтилена к хрупкому разрушению [24, 25]. Считается, что при охлаждении сварного соединения при допустимой температуре воздуха достигается близкое к оптимальному сочетание свойств материала и прочность.

Для снижения скорости охлаждения при низких температурах ОВ необходимо теплоизолировать внешние поверхности трубы и муфты в окрестности соединения. Для эффективного сохранения теплоты теплоизоляцию следует произвести перед предварительным подогревом. На рис. 6 представлено изменение температуры в точке с координатами $r = 0,031$, $z = 0,021$ м при температуре окружающего воздуха –40 °С с проведением предварительного подогрева и выравнивания под слоем теплоизоляции. Как видно из рисунка, скорость охлаждения значительно снизилась, что способствует формированию прочного сварного муфтового соединения.

Заключение

Методом математического моделирования установлено, что протекание теплового процесса по закономерностям, свойственным динамике температуры при сварке в условиях, допустимых для сварки температур воздуха, достигается путем предварительного подогрева свариваемых концов трубы и муфты, выравнивания темпера-

тур путем охлаждения (паузы), сваркой в штатном режиме с охлаждением сварного соединения под слоем теплоизоляции расчетной толщины.

Преимущество предлагаемого расчетного метода определения параметров сварки (продолжительностей предварительного подогрева и выравнивания температур, мощности теплового источника при подогреве и толщины теплоизоляции) при температурах окружающего воздуха ниже нормативных заключается в существенном сокращении объемов экспериментальных исследований в условиях низких температур.

Литература

1. Боровский Б.И., Кунский М.О. Оптимизация систем газоснабжения городских микрорайонов // Строительство и техногенная безопасность. 2014. № 50. С. 29–33.
2. Петришин А. К вопросу использования полиэтилена в трубопроводах // Наука сегодня: задачи и пути их решения: мат. межд. научно-практ. конф. Тюмень: Изд. ООО «Маркер», 2017. С. 31–32.
3. Kuliczowska E., Gierczak M. Buckling failure numerical analysis of HDPE pipes used for the trenchless rehabilitation of a reinforced concrete sewer // Engineering Failure Analysis. 2013. Vol. 32. P. 106–112. doi: 10.1016/j.engfailanal.2013.03.007
4. Luo X., Lu S., Shi J., Li X., Zheng J. Numerical simulation of strength failure of buried polyethylene pipe under foundation settlement // Engineering Failure Analysis. 2015. Vol. 48. P. 144–152. doi: 10.1016/j.engfailanal.2014.11.014
5. Gould S.J.F., Davis P., Beale D.J., Marlow D.R. Failure analysis of a PVC sewer pipeline by fractography and materials characterization // Engineering Failure Analysis. 2013. Vol. 34. P. 41–50. doi: 10.1016/j.engfailanal.2013.07.009
6. СП 42-103-2003. Проектирование и строительство газопроводов из полиэтиленовых труб и реконструкция изношенных газопроводов. М.: Полимергаз, ФГУП ЦПП, 2004. 86 с.
7. Chen H., Scavuzzo R.J., Srivatsan T.S. Influence of joining on the fatigue and fracture behavior of high density polyethylene pipe // Journal of Materials Engineering and Performance. 1997. N 6(4). P. 473–480. doi: 10.1007/s11665-997-0119-8
8. Lai H.S., Tun N.N., S.H. Kil, et al. Effect of defects on the burst failure of butt fusion welded polyethylene pipes // Journal of Mechanical Science and Technology. 2016. Vol. 30 (5). P. 1973–1981. doi: 10.1007/s12206-016-0403-3
9. Tariq F., Naz N., Khan M.A. et al. Failure analysis of high density polyethylene butt weld joint // Journal of Failure Analysis and Prevention. 2012. Vol. 12 (2). P. 168–180. doi: 10.1007/s11668-011-9536-y
10. Zakar F., Budinski M. Fracture of a saddle fusion (weld) joint in high density polyethylene (HDPE) pipe // Engineering Failure Analysis. 2017. Vol. 82. P. 481–492. doi: 10.1016/j.engfailanal.2017.03.009
11. Bowman J. A review of the electrofusion joining process for polyethylene pipe systems // Polymer Engineering & Science. 1997. Vol. 37(4). P. 674–691. doi:10.1002/pen.11712
12. Lee B.Y., Kim Y.K., Hwnag W.G., Kim J.S., Lee S.Y. Improvement of butt-welding characteristics of double wall polyethylene pipes // Metals and Materials International. 2012. Vol. 18 (5). P. 851–856. doi: 10.1007/s12540-012-5016-5
13. Stokes V.K. The vibration and hot-tool welding of polyamides // Polymer Engineering & Science. 2001. Vol. 41 (8). P. 1427–1439. doi: 10.1002/pen.10842
14. Panaskar N., Terkar R. Study of joining different types of polymers by friction stir welding // Mandal D.K., Syan C.S. (eds) CAD/CAM, Robotics and Factories of the Future. Lecture Notes in Mechanical Engineering. New Delhi: Springer, 2016. P. 731–739. doi: 10.1007/978-81-322-2740-3_70
15. Авдонин Н.А. Математическое описание процессов кристаллизации. Рига: Зинатне, 1980. 180 с.
16. Вабищевич П.Н. Численные методы решения задач со свободной границей. М.: Изд-во МГУ, 1987. 164 с.
17. Samarskii A.A. The theory of difference schemes. Basel: Marcel Dekker Inc, NY, 2001.
18. Самарский А.А., Моисеенко Б.Д. Экономичная схема сквозного счета для многомерной задачи Стефана // Журн. вычислит. математики и мат. физики. 1965. Т. 5, № 5. С. 816–827.
19. Физические величины: Справочник / А.П. Бабичев, Н.А. Бабушкина, А.М. Братковский и др.; под ред. И.С. Григорьева, Е.З. Мейлхтова. М.: Энергоатомиздат, 1991. 1232 с.
20. Горюловский М.И., Калугина Е.В., Иванов А.Н., Сатдинова Ф.К. Исследование кристалличности и термостабильности в трубах, полученных из различных видов полиэтилена // Пластические массы. 2005. № 4. С. 9–12.
21. Barber P., Atkinson J.R. Some microstructural features of the welds in butt-welded polyethylene and polybutene-1 pipes // Journal of Materials Science. 1972. Vol. 7 (10). P. 1131–1136. doi: 10.1007/BF00550195
22. Pokharel P., Kim Y., Choi S. Microstructure and mechanical properties of the butt joint in high density polyethylene pipe // International Journal of Polymer Science. 2016. P. 1–13. doi: 10.1155/2016/6483295
23. Ageorges C., Ye L., Hou M. Advances in fusion bonding techniques for joining thermoplastic matrix composites: a review, Composites Part A: Applied Science and Manufacturing. 2001. Vol. 32(6). P. 839–857. doi: 10.1016/S1359-835X(00)00166-4

24. Кайгородов Г.К., Каргин В.Ю. Влияние скорости охлаждения полиэтиленового сварного шва на его прочность // Трубопроводы и экология. 2001. № 2. С. 13–14.

25. Крюкова И.М., Сквирская И.И., Ушаков В.Я., Шмаков Б.В. Влияние температуры расплава на свойства полиэтилена в крупногабаритных изделиях // Пластические массы. 1998. № 6. С. 38–39.

Поступила в редакцию 09.09.2019

Принята к публикации 14.11.2019

Об авторах

СТАРОСТИН Николай Павлович, доктор технических наук, профессор, заведующий лабораторией, Институт проблем нефти и газа СО РАН, 677980, Якутск, ул. Автодорожная, д. 20, Россия, <https://orcid.org/0000-0002-5686-1817>, nikstar56@mail.ru;

АММОСОВА Ольга Александровна, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Институт проблем нефти и газа СО РАН, 677980, Якутск, ул. Автодорожная, д. 20, Россия <https://orcid.org/0000-0003-3551-0417>, ammosova_o@mail.ru.

Информация для цитирования

Старостин Н.П., Аммосова О.А. Регулирование теплового процесса при электромурфтовой сварке полиэтиленовых труб при низких температурах // Природные ресурсы Арктики и Субарктики. 2019, Т. 24, № 4. С. 143–151. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2019-24-4-13>

DOI 10.31242/2618-9712-2019-24-4-13

Thermal process control during electrofusion welding of polyethylene pipes at low temperatures

N.P. Starostin, O.A. Ammosova

*Institute of Oil and Gas Problems SB RAS, Yakutsk, Russia
ammosova_o@mail.ru*

Abstract. *The thermal process during electrofusion welding of polyethylene pipes for gas pipelines by connecting couplings with embedded heater is theoretically investigated on the basis of mathematical modeling. The influence of ambient temperature on the dynamics of the temperature field in the electrofusion welding of polyethylene pipes is investigated. The mathematical model of the thermal welding process considers geometric dimensions, thermophysical properties of welded pipes and coupling material, ambient temperature, latent heat of polyethylene phase transition, voltage applied to embedded heater. Results of numerical calculation of thermal welding process at various ambient temperatures are presented. Methodology has been developed for determining the parameters of electrofusion welding of polyethylene pipes, ensuring the flow of thermal process at low ambient temperatures according to the laws inherent in welding at permissible temperatures. It is shown that in order to ensure acceptable dynamics of the temperature field at air temperatures below standard, it is necessary to preheat the coupling and sections of pipes before welding. Preheating is carried out by standard embedded heater. The use of thermal insulation layer is proposed in order to reduce cooling rate of the welded coupling. Recommended technological parameters of electrofusion welding are given for pipes PE 80 GAZ SDR 11 63×5.8 at air temperatures below standard.*

Key words: mathematical model, temperature, calculation, finite difference method, control, heat process, electrofusion welding, preheating, cooling, phase transition, reflow, crystallization, thermal insulation.

Acknowledgements. *The research was carried out within the state assignment of FASO of Russia (project No. AAAA-A17-117040710038-8 of 04/07/2017).*

References

1. Borovskij B.I., Kunsij M.O. Optimizacija sistem gazosnabzhenija gorodskih mikrorajonov // Stroitel'stvo i tehnogennaja bezopasnost'. 2014. No. 50. P. 29–33.
2. Petrishin A. K voprosu ispol'zovanija polijetilena v truboprovodah // Nauka segodnja: zadachi i puti ih reshenija: mat. mezhd. nauchno-prakt. konf. Tjumen': Izd. OOO "Marker", 2017. P. 31–32.
3. Kuliczowska E., Gierczak M. Buckling failure numerical analysis of HDPE pipes used for the trenchless rehabilitation of a reinforced concrete sewer // Engineering Failure Analysis. 2013. Vol. 32. P. 106–112. doi: 10.1016/j.engfailanal.2013.03.007
4. Luo X., Lu S., Shi J., Li X., Zheng J. Numerical simulation of strength failure of buried polyethylene pipe under foundation settlement // Engineering Failure Analysis. 2015. Vol. 48. P. 144–152. doi: 10.1016/j.engfailanal.2014.11.014
5. Gould S.J.F., Davis P., Beale D.J., Marlow D.R. Failure analysis of a PVC sewer pipeline by fractography and materials characterization // Engineering Failure Analysis. 2013. Vol. 34. P. 41–50. doi: 10.1016/j.engfailanal.2013.07.009
6. SP 42-103-2003. Proektirovanie i stroitel'stvo gazoprovodov iz polijetilenovyh trub i rekonstrukcija iznoshennyh gazoprovodov. M.: Polimergaz, FGUP CPP, 2004. 86 p.
7. Chen H., Scavuzzo R.J., Srivatsan T.S. Influence of joining on the fatigue and fracture behavior of high density polyethylene pipe // Journal of Materials Engineering and Performance. 1997. N 6(4). P. 473–480. doi: 10.1007/s11665-997-0119-8
8. Lai H.S., Tun N.N., S.H. Kil, et al. Effect of defects on the burst failure of butt fusion welded polyethylene pipes // Journal of Mechanical Science and Technology. 2016. Vol. 30 (5). P. 1973–1981. doi: 10.1007/s12206-016-0403-3
9. Tariq F., Naz N., Khan M.A. et al. Failure analysis of high density polyethylene butt weld joint // Journal of Failure Analysis and Prevention. 2012. Vol. 12 (2). P. 168–180. doi: 10.1007/s11668-011-9536-y
10. Zakar F., Budinski M. Fracture of a saddle fusion (weld) joint in high density polyethylene (HDPE) pipe // Engineering Failure Analysis. 2017. Vol. 82. P. 481–492. doi: 10.1016/j.engfailanal.2017.03.009
11. Bowman J. A review of the electrofusion joining process for polyethylene pipe systems // Polymer Engineering & Science. 1997. Vol. 37(4). P. 674–691. doi:10.1002/pen.11712
12. Lee B.Y., Kim Y.K., Hwnag W.G., Kim J.S., Lee S.Y. Improvement of butt-welding characteristics of double wall polyethylene pipes // Metals and Materials International. 2012. Vol. 18 (5). P. 851–856. doi: 10.1007/s12540-012-5016-5
13. Stokes V.K. The vibration and hot-tool welding of polyamides // Polymer Engineering & Science. 2001. Vol. 41 (8). P. 1427–1439. doi: 10.1002/pen.10842
14. Panaskar N., Terkar R. Study of joining different types of polymers by friction stir welding, // Mandal D.K., Syan C.S. (eds) CAD/CAM, Robotics and Factories of the Future. Lecture Notes in Mechanical Engineering. New Delhi: Springer, 2016. P. 731–739. doi: 10.1007/978-81-322-2740-3_70
15. Avdonin N.A. Matematicheskoe opisanie processov kristallizacii. Riga: Zinatne, 1980. 180 p.
16. Vabishhevich P.N. Chislennye metody reshenija zadach so svobodnoj granicej. M.: Izd-vo MGU, 1987. 164 p.
17. Samarskii A.A. The theory of difference schemes. Basel: Marcel Dekker Inc, NY, 2001.
18. Samarskii A.A., Moiseenko B.D. Jekonomichnaja shema skvoznogo scheta dlja mnogomernoj zadachi Stefana // Zhurn. vychislit. matematiki i mat. fiziki. 1965. Vol. 5, N 5. P. 816–827.
19. Fizicheskie velichiny: Spravochnik / A.P. Babičev, N.A. Babushkina, A.M. Bratkovskij i dr.; pod red. I.S. Grigor'eva, E.Z. Mejlthova. M.: Jenergoatomizdat, 1991. 1232 p.
20. Gorilovskij M.I., Kalugina E.V., Ivanov A.N., Satdinova F.K. Issledovanie kristallichnosti i termostabil'nosti v trubah, poluchennyh iz razlichnyh vidov polijetilena // Plasticheskie massy. 2005. N. 4. P. 9–12.
21. Barber P., Atkinson J.R. Some microstructural features of the welds in butt-welded polyethylene and polybutene-1 pipes // Journal of Materials Science. 1972. Vol. 7 (10). P. 1131–1136. doi: 10.1007/BF00550195
22. Pokharel P., Kim Y., Choi S. Microstructure and mechanical properties of the butt joint in high density polyethylene pipe // International Journal of Polymer Science. 2016. P. 1–13. doi: 10.1155/2016/6483295
23. Ageorges C., Ye L., Hou M. Advances in fusion bonding techniques for joining thermoplastic matrix composites: a review // Composites Part A: Applied Science and Manufacturing. 2001. Vol. 32(6). P. 839–857. doi: 10.1016/S1359-835X(00)00166-4
24. Kajgorodov G.K., Kargin V.Ju. Vlijanie skorosti ohlazhdenija polijetilenovogo svarnogo shva na ego prochnost' // Truboprovody i jekologija. 2001. N. 2. P. 13–14.
25. Krjukova I.M., Skvirskaja I.I., Ushakov V.Ja., Shmakov B.V. Vlijanie temperatury rasplava na svojstva polijetilena v krupnogabaritnyh izdelijah // Plasticheskie massy. 1998. N. 6. P. 38–39.

About the authors

STAROSTIN Nikolai Pavlovich, doctor of technical sciences, professor, head of laboratory, Institute of Oil and Gas Problems SB RAS, 20 Avtodorozhnaya st., Yakutsk, 677980, Russia, <https://orcid.org/0000-0002-5686-1817>, nikstar56@mail.ru;

AMMOSOVA Olga Aleksandrovna, Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher, Institute of Oil and Gas Problems SB RAS, 20 Avtodorozhnaya st., Yakutsk, 677980, Russia, <https://orcid.org/0000-0003-3551-0417>, ammosova_o@mail.ru.

Citation

Starostin N.P., Ammosova O.A. Thermal process control during electrofusion welding of polyethylene pipes at low temperatures // Arctic and Subarctic Natural Resources. 2019, Vol. 24, N 4. P. 143–151. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2019-24-4-13>