



Расчетное определение технологических параметров электромужфтовой сварки полиэтиленовых труб при низких температурах

Старостин Н.П., Аммосова О.А.

Полиэтиленовые трубы, ввиду множества преимуществ по сравнению с металлическими аналогами, все чаще применяются при строительстве газопроводов. С ростом протяженности газопроводов из полиэтиленовых труб крайне важным становится решение проблемы их оперативного ремонта при аварийных ситуациях в зимний период в северных регионах. Сварочные работы при монтаже и ремонте газопроводов из полиэтиленовых труб рекомендуется проводить при температуре окружающего воздуха (ОВ) **от минус 15 °С до плюс 45 °С**. При более низких температурах воздуха сварочные работы рекомендуется проводить в легких отопляемых конструкциях с поддержанием температуры из допустимого диапазона. Между тем, такая сварка обусловлена большими энергетическими, непроизводительными затратами и длительной подготовкой, что неприемлемо в аварийных ситуациях.

Актуальной проблемой является разработка методов и средств оперативной сварки полиэтиленовых труб соединительными деталями с закладными нагревателями (электромужфтовой сварки) в зимних условиях без строительства отопляемых укрытий. Привлечение средств математического моделирования позволит наиболее полно изучить тепловой процесс при электромужфтовой сварке, как на стадии оплавления, так и на стадии охлаждения сварного соединения и найти эффективные способы управления тепловым процессом для разработки технологии сварки при температурах ниже нормативных.

Цель работы: Разработка технологии мужфтовой сварки полиэтиленовых труб (ПЭ) для газопроводов при низких температурах окружающего воздуха (ОВ) без использования укрытий.

Идея работы



Идея предлагаемого в работе подхода сварки закладным нагревательным элементом (ЗНЭ) при температурах воздуха ниже нормативных заключается в обеспечении в области сварного соединения регламентированной температуры путем предварительного подогрева области сварки с помощью нагревательной спирали самой муфты. После предварительного подогрева для достижения более однородного температурного поля муфта и труба выдерживаются в течение расчетного времени – технологическая пауза. Для поддержания необходимого темпа охлаждения муфта вместе с трубой укрываются теплоизоляционным материалом. Для определения продолжительностей предварительного подогрева, выравнивания, толщины теплоизоляции, мощности источника тепла при подогреве целесообразно использование методов математического моделирования.

Сварка муфтой с закладным нагревательным элементом

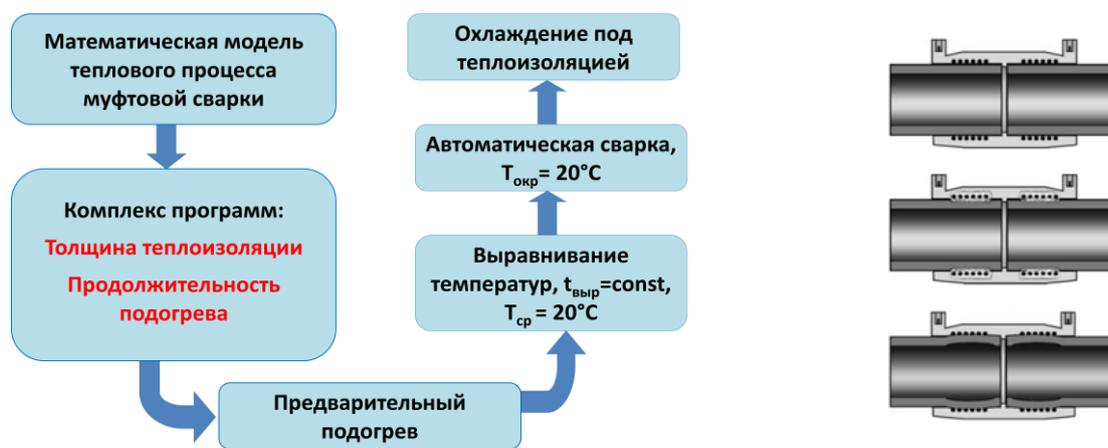


Схема определения режимов сварки ЗНЭ с предварительным подогревом при низких температурах

Сварка муфтой с ЗНЭ

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В данной работе рассматривается задача определения динамики температурного поля при электромуфтовой сварке в осесимметричной постановке. Расчетная схема трубы с муфтой представлена на рис. 1. Обозначим Ω_1 подобласть стенки муфты и трубы из полиэтилена, Ω_2 – подобласть нагревательного элемента. В силу симметрии рассматривается одна из половин соединения муфты с отрезком трубы. Расчет температурного поля проводится в расчетной области $\Omega = \Omega_1 \cup \Omega_2$.

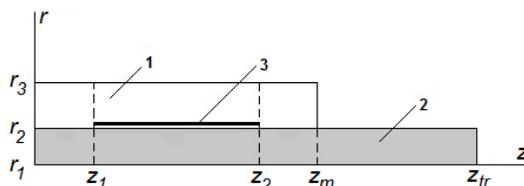


Рис. 1. Расчетная схема: 1 – стенка муфты; 2 – стенка трубы; 3 – нагревательный элемент

Рассмотрим осесимметричную задачу для уравнения теплопроводности в цилиндрических координатах:

$$C(T)\rho_i(T)\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(r\lambda_i(T)\frac{\partial T}{\partial r}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\lambda_i(T)\frac{\partial T}{\partial z}\right) + \gamma Q(r, z), (r, z) \in \Omega \quad (1)$$

где $C(T)$ – удельная теплоемкость, $\rho(T)$ – плотность и $\lambda(T)$ – коэффициент теплопроводности, для твердой фазы с индексом 1, для жидкой – с индексом 2, $\gamma = \begin{cases} 1, & (r, z) \in \Omega_2 \\ 0, & (r, z) \in \Omega_1 \end{cases}$

Поскольку в полимерных материалах фазовый переход происходит в интервале температур, то для адекватного описания теплового процесса в математической модели необходимо учитывать промежуточную фазу между твердым и жидким веществом, в которой вещество находится как в твердом, так и в жидком состоянии [1]. В этом случае температурное поле описывается уравнением (1) с эффективным коэффициентом теплоемкости:

$$\tilde{C}(T) = \begin{cases} C_1, & T \leq T_s \\ C_1 - \frac{q(T)}{\Delta}, & T_s < T < T_L, \quad \Delta = \frac{(T_L - T_s)}{(t_2 - t_1)} \\ C_2, & T \geq T_L \end{cases} \quad (2)$$

где Δ – скорость нагрева, варьируемая в дифференциальном сканирующем калориметре (ДСК), $q(T)$ – зависимость теплового потока от температуры, отнесенная к единице массы вещества, регистрируемая ДСК. T_s, T_L – температуры солидуса и ликвидуса, t_1, t_2 – моменты времени достижения температуры солидуса и ликвидуса. В расчетах использовались непрерывные функции теплового потока при скорости изменения температуры 40 К/мин, полученные аппроксимацией кубическим В-сплайном [2].

В начальный момент времени распределение температуры однородное:

$$T(r, z, 0) = T_0$$

На левой границе рассматриваемой области выполняется условие симметрии, на правой – условие первого рода.

$$\left. \frac{\partial T}{\partial z} \right|_{z=0} = 0, \quad T(r, L, t) = T_0.$$

На свободных поверхностях выполняются условия теплообмена с окружающей средой с температурой T_0 .

$$\lambda(T) \left. \frac{\partial T}{\partial n} \right|_G = -\alpha(T|_G - T_0)$$

Мощность источника тепла вычислялась по формуле:

$$Q(t) = \frac{U^2}{R \cdot (1 + \beta(T(r_M, z, t) - 20))V_S},$$

где R – сопротивление спирали при температуре 20 °С; β – температурный коэффициент сопротивления; V_S – объем источника тепла.

Для решения задачи использовалась программа свободного доступа Dolfin/FEniCS [3]. Геометрия и триангуляция расчетной области строилась с использованием программы GMSH [4]. Визуализация полученных результатов расчетов проводилась с помощью программы ParaView [5]. Аппроксимация по времени проводилась с использованием неявной схемы [6].

Для численного определения температурного поля в расчетной области проведем аппроксимацию уравнения (1) с учетом граничных условий. Для аппроксимации уравнения по времени используем метод конечных разностей. Аппроксимацию по пространственным переменным производим с использованием метода конечных элементов с разбиением области на треугольные элементы. Поскольку в действительности область цилиндрическая, элементы образуются вращением треугольников вокруг оси Oz . Чтобы интегрирование в среде Dolfin/FEniCS производилось по такой области, умножим уравнение (1) на $2\pi r$. Для задания вариационной постановки задачи умножим полученное уравнение (1) на тестовую функцию V и проинтегрируем по области Ω :

$$2\pi \int_{\Omega} C(T) \rho_i(T) \frac{\partial T}{\partial t} V r dr dz = 2\pi \int_{\Omega} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \lambda_i(T) \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_i(T) \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \gamma Q(r, z) \right) V r dr dz \quad (3)$$

Используя формулу интегрирования по частям и неявную разностную схему для аппроксимации по времени, получим следующую вариационную постановку задачи:

$$2\pi \int_{\Omega} \left(C \rho V r \frac{T}{\tau} + r \lambda \frac{\partial T}{\partial r} \frac{\partial V}{\partial r} + r \lambda \frac{\partial T}{\partial z} \frac{\partial V}{\partial z} \right) dr dz - 2\pi \int_{\Gamma} \alpha (T - T_{окр}) V r ds = 2\pi \int_{\Omega} \left(\gamma Q r v + r V C \rho \frac{\bar{T}}{\tau} \right) dr dz \quad (4)$$

Данные для расчетов

Моделирование температурных полей при электродуговой сварке проводилось для ПЭ100 трубы SDR 11 63×5,8 при температуре окружающего воздуха 20 и минус 40 °С. Расчеты проводились при следующих данных:

$r_1=0,0257$ – внутренний радиус трубы;

$r_2=0,0315$; $r_3=0,0395$ – внешние радиусы трубы и муфты, м;

теплопроводность: $\lambda_1=0,46$; $\lambda_2=0,24$ Вт/(м·К);

плотность: $\rho_1=950$; $\rho_2=800$ кг/м³;

удельная теплоемкость $c_1=2000$; $c_2=2400$ Дж/(кг·К);

нагревательный элемент расположен при радиусе $r=0,0325$ м; $z_1=0,012$; $z_2=0,030$; $z_m=0,048$; $z_{tr}=0,1$ м.

Сварочное напряжение $U=32$ В; $R=1,6$ Ом; $\beta=0,00433$ 1/°С.

Продолжительности нагрева и охлаждения для стандартной сварки составляют 70 секунд и 6 мин соответственно.

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ

На рис. 2 представлено сравнение размеров оплавленной зоны в вертикальном сечении при сварке при различных температурах ОВ в момент завершения нагрева согласно допустимым режимам. Согласно расчетам при низких температурах ОВ размер оплавленной зоны уменьшается, что свидетельствует о меньшем объеме полученного расплава, следствием которого будет недостаточное давление свариваемых поверхностей, более интенсивная кристаллизация и формирование мелкой структуры материала сварного шва и т.д., приводящие к низкому значению прочности соединения. Результаты расчета показывают необходимость проведения предварительного подогрева при сварке ПЭ труб при низких температурах окружающего воздуха. Расчетами также установлена необходимость использования теплоизоляции на стадии охлаждения сварного соединения.

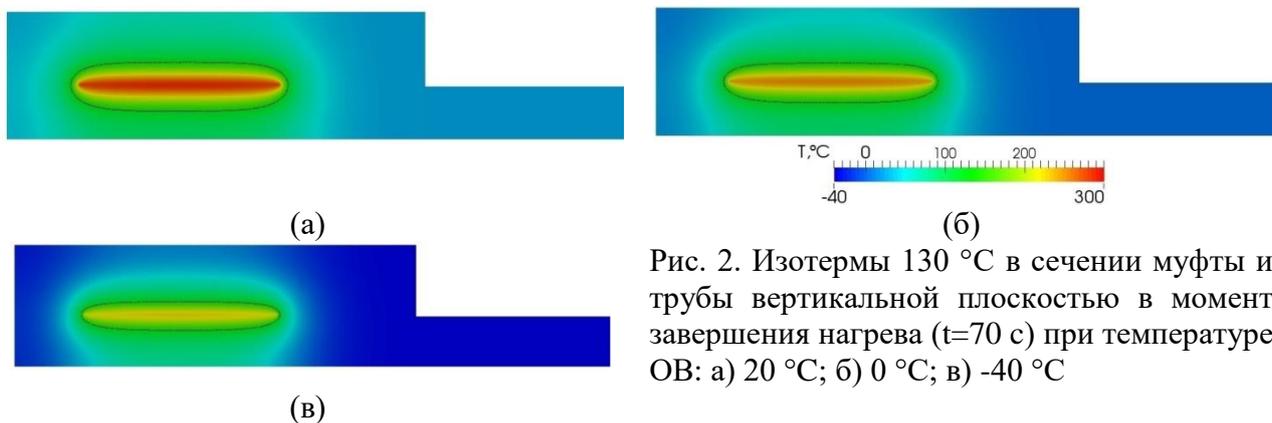


Рис. 2. Изотермы 130 °С в сечении муфты и трубы вертикальной плоскостью в момент завершения нагрева ($t=70$ с) при температуре ОВ: а) 20 °С; б) 0 °С; в) -40 °С

Приведено распределение температуры при проведении предварительного подогрева и использования теплоизоляции при температуре воздуха -40°С (рис. 3). Исследование динамики температурных полей показало увеличение оплавленной зоны после проведения предварительного подогрева, выравнивания и сварки при низких температурах, которая сопоставима с зоной, полученной при допустимых температурах ОВ.

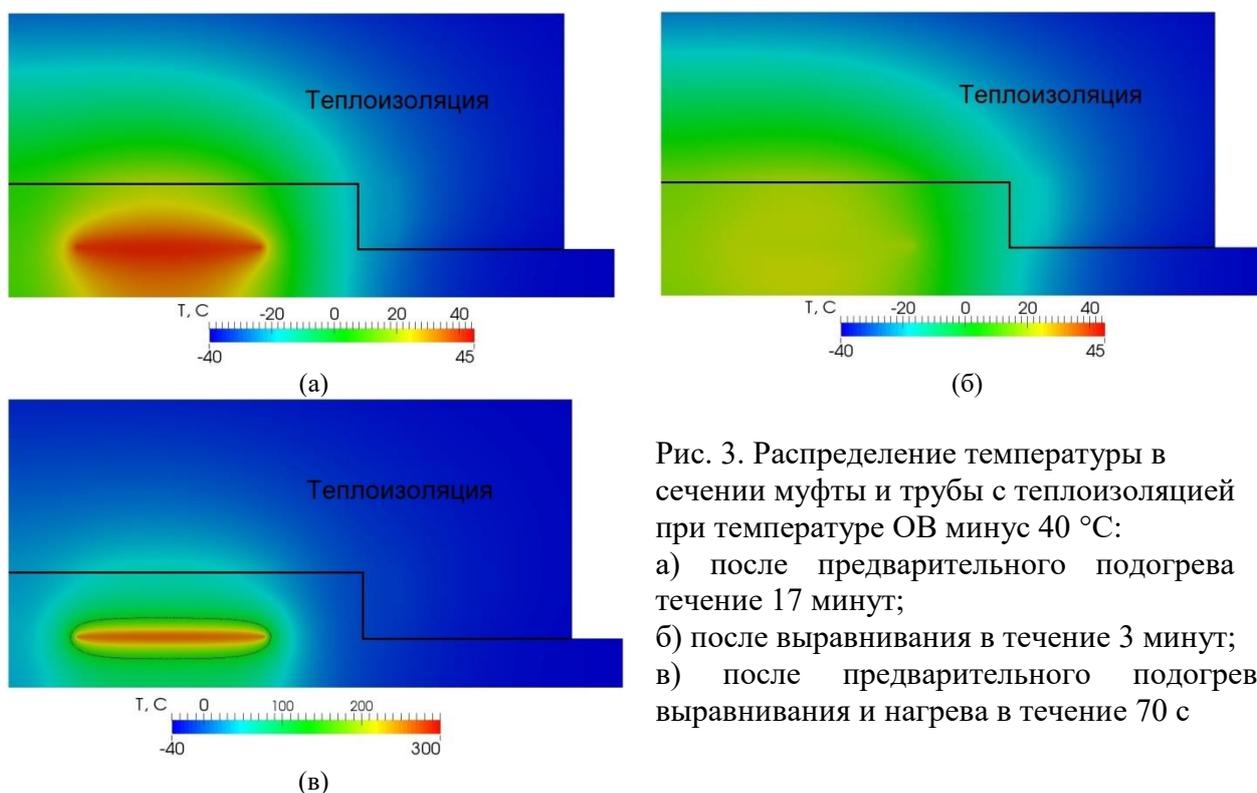


Рис. 3. Распределение температуры в сечении муфты и трубы с теплоизоляцией при температуре ОВ минус 40 °С: а) после предварительного подогрева в течение 17 минут; б) после выравнивания в течение 3 минут; в) после предварительного подогрева, выравнивания и нагрева в течение 70 с

Для получения качественного сварного соединения важную роль играет размер зоны термического влияния (ЗТВ), в которой происходят структурные изменения свариваемого материала. Обычно считается, что ЗТВ при сварке ПЭ ограничена изотермой 80 °С, при которой начинается фазовый переход с выделением теплоты, характеризующей структурные изменения. Были определены ЗТВ в различные моменты охлаждения сварного соединения при допустимой температуре воздуха 0 °С (стандартная сварка) и температуре ниже нормативного -40 °С (рис. 4). При охлаждении соединения под слоем теплоизоляции с толщиной, определяемой расчетом, динамика температурного поля близка к допустимой.

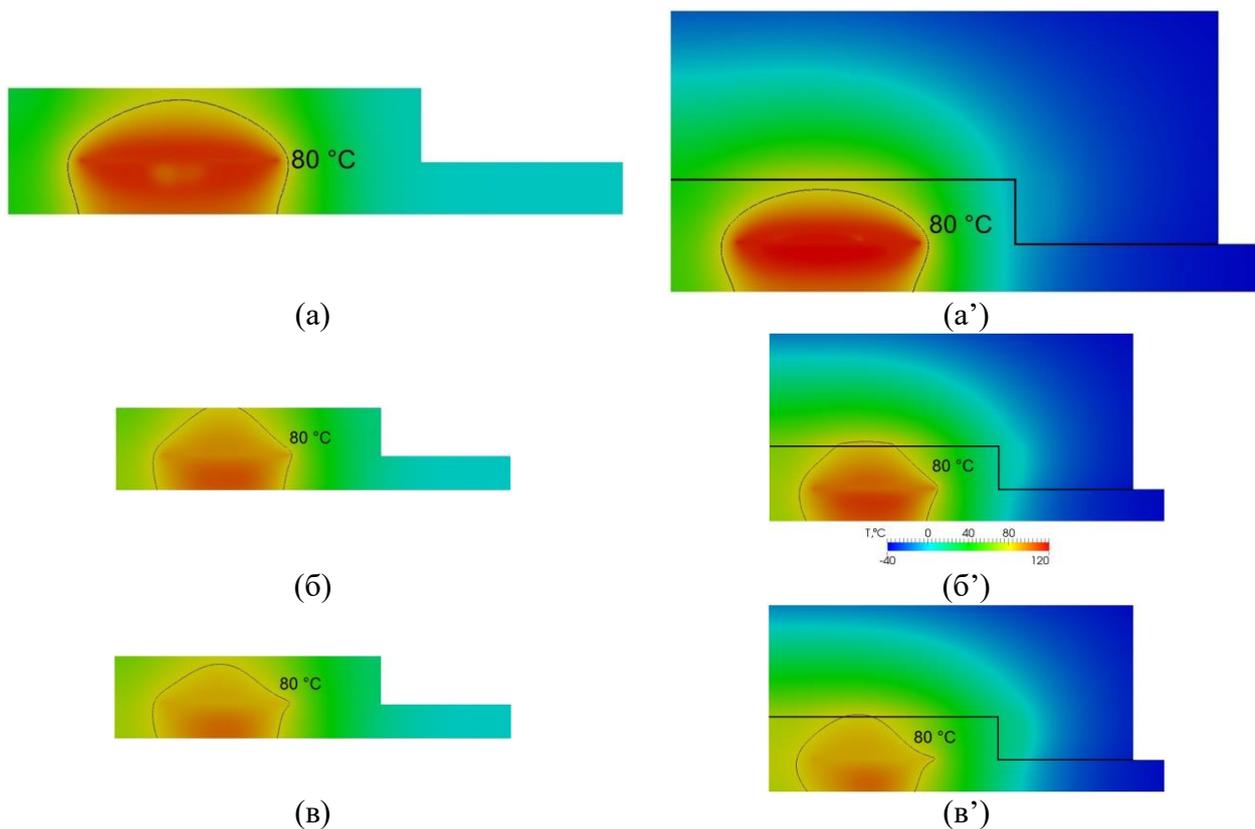


Рис. 4. Распределения температур в сечении муфты и трубы во время охлаждения при температурах ОВ 0 °С (а, б, в) и минус 40 °С (а', б', в'): а, а') – охлаждение 1 мин.; б, б') – охлаждение 3 мин.; в, в') – охлаждение 5 мин.

Вычислительными экспериментами установлено, что варьируя технологическими параметрами электромуфтовой сварки полиэтиленовых труб (подаваемое в нагревательный элемент напряжение для подогрева, продолжительности подогрева и выравнивания, толщина теплоизоляции при охлаждении) можно обеспечить динамику температурного поля при низких температурах близкую характерным для сварки при допустимых температурах воздуха.

* Работа выполнена при поддержке Гранта Главы Республики Саха (Якутия) для молодых ученых, специалистов и студентов.

Литература

1. N. P. Starostin, O. A. Ammosova, J Eng Phys Thermophy, **89**(3), 714-720 (2016).
2. Стечкин С. Б., Субботин Ю. Н. Сплайны в вычислительной математике. М.: Наука, 1976. 248 с.
3. Библиотека FEniCS. <http://fenicsproject.org/>
4. Программа GMSH. <http://geuz.org/gmsh/>
5. Программа ParaView <http://paraview.org/>
6. Самарский А.А. Теория разностных схем. Москва: Наука, 1977. 656 с.