

Тепловые процессы в технике. 2024. Т. 16. № 4. С. 162–169
Thermal processes in engineering, 2024, vol. 16, no. 4, pp. 162–169

Научная статья
УДК 621.791.46

Управление движением фронта кристаллизации при сварке полиэтиленовых труб в условиях низких температур

Н.П. Старостин¹, О.А. Аммосова¹✉

¹Федеральный исследовательский центр «Якутский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук», Якутск, Россия

✉ amosova_o@mail.ru

Аннотация. Существующими сварочными аппаратами соединения полиэтиленовых труб для газопроводов деталями с закладными нагревателями выполняются в температурном интервале от –10 до 40 °С. В данной работе при сварке в условиях температур ниже допустимых предлагается управлять кристаллизацией материала зон сварного шва и термического влияния с помощью закладного нагревателя. Приводятся результаты решения обратной задачи управления кристаллизацией свариваемых материалов по температурным данным в неподвижных точках. Показано, что управлением тепловым режимом обеспечивается движение фронта кристаллизации в изменяющемся во времени допустимом «коридоре».

Ключевые слова: тепловой режим, закладной нагреватель, кристаллизация, обратная задача, зона термического влияния, зона сварного шва

Финансирование. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-29-20135.

Для цитирования. Старостин Н.П., Аммосова О.А. Управление движением фронта кристаллизации при сварке полиэтиленовых труб в условиях низких температур // Тепловые процессы в технике. 2024. Т. 16. № 4. С. 162–169. URL: <https://tptmai.ru/publications.php?ID=180943>

Original article

Crystallization front movement control when welding polyethylene pipes at low temperatures

N.P. Starostin¹, O.A. Ammosova¹✉

¹Federal Research Center “The Yakut Scientific Center of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences”, Yakutsk, Russia

✉ amosova_o@mail.ru

Abstract. Existing welding machines allow connections of polyethylene pipes for gas pipelines with built-in heaters in temperatures ranging from –10 to 40 °C. In this work, we propose controlling the

crystallization of the material of the weld zones and the heat-affected zone by using a built-in heater when welding at temperatures below the permitted range. We present the results of solving the inverse problem of controlling the crystallization of welded materials using temperature data at fixed points are presented. It is shown that the movement of the crystallization front in a time-varying permitted range is ensured by controlling the thermal regime.

Keywords: thermal regime, embedded heater, crystallization, inverse problem, heat affected zone, weld zone

Funding. The work was supported by the Russian Science Foundation under grant No. 24-29-20135.

For citation. Starostin N.P., Ammosova O.A. Crystallization front movement control when welding polyethylene pipes at low temperatures. *Thermal processes in engineering*, 2024, vol. 16, no. 4, pp. 162–169. (In Russ.). URL: <https://tptmai.ru/publications.php?ID=180943>

Введение

Согласно нормативным документам сварку с закладными нагревателями полиэтиленовых труб для газопроводов рекомендуется выполнять аппаратами, предназначенными для работы в температурном диапазоне от -10 до 40 °С. При более низких температурах сварочные работы выполняются в укрытиях, в которых поддерживается температура из допустимого интервала. Вследствие необходимости длительного кондиционирования концов труб для выполнения сварки (от 1 до 16 часов в зависимости от типоразмера труб) такой способ не может применяться при ремонтно-восстановительных работах в зимних условиях. Актуальной задачей является разработка технологии оперативной сварки полиэтиленовых труб на открытом воздухе, позволяющей получать качественное соединение при температурах ниже нормативных. Способ сварки полиэтиленовых труб встык при низких температурах и методика определения параметров сварки рассматривались в работе [1].

При исследовании качества сварного соединения важную роль играет зона термического влияния (ЗТВ), представляющая участок, который при нагреве в процессе сварки не расплавился, но его микроструктура и свойства изменились. Известно, что при механических нагрузках разрушение сварных соединений почти всегда происходит в этой зоне. Установление нижнего ограничения температуры воздуха для сварки связано с увеличением интенсивности охлаждения в ЗТВ с понижением температуры воздуха. При быстром охлаждении формируется мелкокристаллическая или несо-

вершенная надмолекулярная структура, обуславливающая низкую прочность соединения. При сварке в допустимом интервале температур скорость охлаждения расплавленного материала способствует формированию в ЗТВ сферолитной надмолекулярной структуры, обеспечивающей необходимую прочность сварного соединения. Для получения прочного сварного соединения при сварке на открытом воздухе в условиях низких температур необходимо обеспечить в ЗТВ и зоне шва движение фронта кристаллизации, характерного для сварки при допустимых температурах.

Для сварки деталями с закладными нагревателями при низких температурах разработана технология, позволяющая получать прочное сварное соединение путем предварительного подогрева, выравнивания температур, оплавления по регламентированному для допустимой температуры воздуха режиму и охлаждения в течение определенного времени. При выполнении всех операций для снижения тепловых потерь используется слой теплоизоляционного материала, толщина которого зависит от температуры окружающего воздуха и типоразмера свариваемых труб [2]. Эффективность предложенной технологии установлена экспериментальными исследованиями прочности сварных соединений, выполненных при естественно низких температурах до -50 °С [3, 4].

Исследования показали возможность получения качественного соединения при низких температурах путем управления тепловым режимом сварки. Полученные результаты позволили разработать технологию сварки при низких темпе-

ратурах, в которой исключено использование слоя теплоизоляционного материала для автоматического выполнения сварки деталями с закладными нагревателями [5]. Все операции выполняются на открытом воздухе без использования теплых укрытий. Предварительный подогрев осуществляется закладным нагревателем с постоянной мощностью. Затем выполняется выравнивание температур и производится оплавление, как при допустимой для сварки температуре. Наиболее сложным является управление тепловым режимом на стадии охлаждения с помощью закладного нагревателя, мощность которого изменяется во времени.

Обзор способов управления кристаллизацией материала сварного шва как инструмента улучшения структуры соединения и повышения эксплуатационных свойств сварных конструкций приведен в работе [6]. Анализ научных исследований в этом направлении показал, что эффективными средствами управления процессом кристаллизации являются способы, оказывающие влияние на движения границы фазового превращения. Подобные задачи управления движением фронта кристаллизации сводятся к обратным задачам определения теплового источника по известному закону движения границы раздела жидкой и твердой фаз [7–9]. В то же время при такой постановке решение обратной задачи заметно отклоняется от точного решения в начальный период, когда фронт кристаллизации удален от теплового источника. Подобное отклонение существенно проявляется при определении временной функции мощности нагревателя при сварке материалов с низкой теплопроводностью, каким является полиэтилен. Связано это с особенностью процесса теплопроводности, заключающейся в запаздывании характерных особенностей функции теплового источника по мере удаления от нагревателя фронта кристаллизации, на которой задается дополнительная информация о температуре [10].

В данной работе предлагается определять зависящую от времени мощность нагревателя для управления фронтом кристаллизации полимерного материала при сварке полиэтиленовых труб на открытом воздухе в условиях низких температур по температурным данным на фиксированной границе зоны сварного шва и зоны термического влияния.

Постановка задачи

Для сварки полиэтиленовых труб используются различные соединительные детали с закладными нагревателями: муфты, отводы, тройники, седловые отводы, редукционные переходы, заглушки и т. д. В качестве примера рассмотрим сварку труб муфтой. Соединение труб с помощью муфт с закладными нагревателями удобно для отработки методики расчетного определения параметров сварки.

Схема сборки муфты и трубы представлена на рис. 1. В силу симметрии показана одна из половин. Процесс сварки заключается в оплавлении соединяемых поверхностей труб и муфты с помощью встроенного в муфту закладного нагревателя, который примем как линейный источник тепла $Q(t)$. Для упрощения изложения будем предполагать, что в результате предварительного подогрева, выравнивания температур и нагрева по регламентированному режиму для допустимой температуры воздуха получено температурное поле $T_n(r, z)$, которое примем за начальное распределение температуры в момент времени $t = 0$.

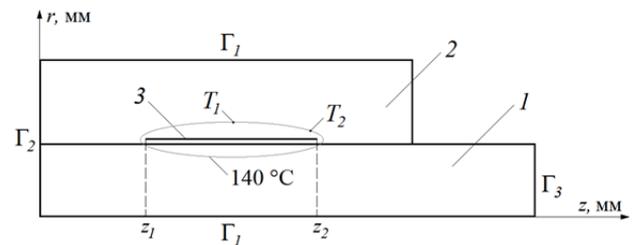


Рис. 1. Схема трубы с муфтой: 1 – труба, 2 – муфта, 3 – закладной нагреватель S

Обратная задача управления кристаллизацией при сварке в условиях низких температур ставится следующим образом. Требуется определить функцию мощности нагревателя $Q(t)$ и температурное поле $T(r, z, t)$ из уравнения теплопроводности:

$$C(T) \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \lambda(T) \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \frac{Q(t)}{2\pi r_s d} \delta(r - r_s) \gamma, \quad (1)$$

$$(r, z) \in \Omega; \quad 0 < t \leq t_{cool};$$

$$\gamma = 1, (r, z) \in S; \quad \gamma = 0, (r, z) \notin S$$

с начальным:

$$T(r, z, 0) = T_n, \quad (r, z) \in \Omega, \quad (2)$$

и граничными условиями:

$$-\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial n} = \alpha(T - T_0), \quad (r, z) \in \Gamma_1, \quad (3)$$

$$-\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial n} = 0, \quad (r, z) \in \Gamma_2, \quad (4)$$

$$T(r, z, t) = T_0, \quad (r, z) \in \Gamma_3 \quad (5)$$

по известным остальным причинным характеристикам и дополнительным условиям:

$$T(r_i, z_i, t) = g_i(t), \quad i = 1, \dots, n, \quad 0 < t \leq t_{cool} \quad (6)$$

в фиксированных точках $(r_i, z_i), i = 1, \dots, n$.

Функции $g(t), i = 1, \dots, n$ получаются расчетом динамики температурного поля сварки полиэтиленовой трубы при температуре воздуха 20 °С по режиму, определенному по данным штрих-кода муфты. Термический анализ образцов трубного полиэтилена методом дифференциальной сканирующей калориметрии показывает, что плавление материала происходит в интервале температур от 120 до 140 °С. Точки задания температур $(r_i, z_i), i = 1, \dots, n$ расположим в муфте на изотерме 140 °С, определенной в момент завершения нагрева. Такая изотерма расположена практически на границе зон термического влияния и сварного шва.

Граничное условие (4) вытекает из симметричного расположения труб относительно середины муфты. На границе Γ_3 , расположенной достаточно далеко от закладного нагревателя, температура предполагается равной температуре окружающего воздуха. Кроме того, в целях упрощения описания теплового процесса опущено уравнение теплопроводности для металлического закладного нагревателя. При решении краевых задач численными методами в области S задаются теплофизические свойства материала нагревателя.

В системе (1)–(5) приняты следующие обозначения: t – текущее время; t_{cool} – время охлаждения; r, z – цилиндрические координаты, r_S – радиус местоположения нагревателя; $d = z_2 - z_1$; C, λ – эффективные объемная теплоемкость и коэффициент теплопроводности; T_0 – температура окружающего воздуха; α – коэффициент теплоотдачи.

В уравнении (1) количество выделившейся теплоты фазового превращения в интервале температур учитывается введением эффективной теплоемкости, определяемой по формуле [11, 12]:

$$C(T) = c(T) + \rho^- L^{100\%} \frac{dX_C(T)}{dT}, \quad (7)$$

$$c(T) = c^+ + X_C(T)(c^- - c^+).$$

Эффективный коэффициент теплопроводности определяется аналогично:

$$\lambda(T) = \lambda^+ + X_C(T)(\lambda^- - \lambda^+). \quad (8)$$

Здесь $c(T)$ – зависимость объемной теплоемкости от температуры; X_C – степень кристалличности; c^-, λ^- и c^+, λ^+ – объемная теплоемкость и теплопроводность для твердой и жидкой фазы материала свариваемых тел соответственно, ρ^- – плотность твердой фазы.

Степень кристалличности определяется по формуле:

$$X_C(T) = \begin{cases} X_C^\infty, & T \leq T_{c1}, \\ X_C^\infty - \frac{\int_{T_{c1}}^T q(u) du}{L^{100\%} v_T}, & T_{c1} < T < T_{c2}, \\ 0, & T \geq T_{c2}, \end{cases} \quad (9)$$

где X_C^∞ – степень кристалличности исходного трубного полиэтилена; v_T – скорость изменения температуры; $q(T)$ – зависимость теплового потока от температуры, регистрируемая ДСК; T_{c2}, T_{c1} , – температуры начала и завершения кристаллизации.

Дифференцируя в уравнение (9) интеграл по переменному верхнему пределу, получим формулу для вычисления производной $\frac{dX_C}{dT}$, необходимой для определения эффективной теплоемкости.

Поскольку мощность нагревателя зависит только от времени, то для определения функции $Q(t)$ достаточно задавать временную зависимость температуры в одной точке. Тем не менее для нахождения мощности нагревателя, обеспечивающей динамику температур в ЗТВ и свар-

ном шве, близкую временному изменению температур при сварке в условиях допустимых температур, зададим температурную информацию в нескольких точках указанной выше границы. Это связано с неодинаковой скоростью охлаждения участков соединения в зависимости от их расположения. В зоне, расположенной ближе к средней части нагревателя, охлаждение происходит с меньшей скоростью, чем в периферийной зоне ближе к внешнему краю нагревателя.

В вариационной постановке обратная задача состоит в определении мощности нагревателя $Q(t)$ и температурного поля в соединении на стадии охлаждения из условия минимума функционала:

$$J[Q(t)] = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \int_0^{t_{cool}} \rho_i(t) [T(r_i, z_i, t) - g_i(t)]^2 dt \quad (10)$$

на решениях системы (1)–(5) при $T_0 = -40$ °С. Здесь $\rho_i(t) \geq 0$ – весовые функции, выбираемые по уровню вклада температурной информации для определения функции $Q(t)$. Сформулированная нелинейная обратная задача решалась градиентным методом минимизации функционала [9].

Результаты расчетов

Эффективность определения функции мощности нагревателя для обеспечения необходимой закономерности движения фронта кристаллизации в сварном соединении рассмотрим на примере сварки полиэтиленовых труб ПЭ 100 SDR 11 диаметром 110 мм с помощью электросварной муфты при температуре воздуха -40 °С. В расчетах брались следующие значения характеристик: коэффициенты теплопроводности $\lambda^- = 0,38$; $\lambda^+ = 0,26$ Вт/(м×К); плотность $\rho^- = 950$ кг/м³; теплоемкости $c^- = 1,8 \times 10^6$; $c^+ = 1,83 \times 10^6$ Дж/(м³×К). Согласно данным штрих-кода муфты время нагрева составляет 200 с, охлаждения – 10 минут, напряжение нагревателя при нагреве – $U = 40$ В, сопротивление $R = 0,96$ Ом.

При решении обратной задачи управления кристаллизацией предполагается, что выполнен предварительный подогрев с помощью закладного нагревателя, в результате которого в зонах сварного шва и термического влияния средняя температура близка 20 °С.

Дополнительные температурные данные для решения обратной задачи задавалась в двух точ-

ках с координатами: $T_1(58,94; 38)$, $T_2(56,3; 54,6)$. Весовые функции выбирались изменяющимися во времени из условия близости расчетных и заданных температур при кристаллизации в интервале от 120 до 100 °С и равнялись:

$$\rho_1(t) = \begin{cases} 0,5; & 0 \leq t \leq 300 \\ -0,000667 \times t + 0,7; & 300 < t \leq 600, \\ 0,3; & t > 600 \end{cases}$$

$$\rho_2(t) = 1.$$

На рис. 2 представлена зависимость мощности нагревателя от времени, полученная решением обратной задачи. Данная зависимость мощности нагревателя имеет характерные участки резкого убывания, минимальных значений, возрастания и незначительного убывания.

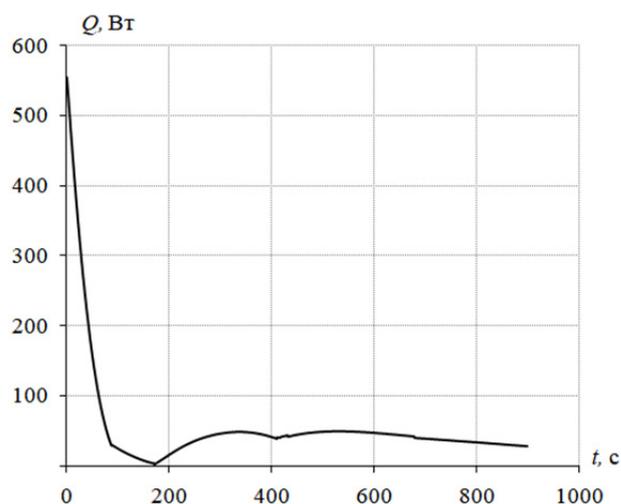


Рис. 2. Зависимость мощности нагревателя от времени для управления кристаллизацией, полученная решением обратной задачи

В интервале времени, соответствующему резкому убыванию мощности нагревателя, происходит кристаллизация полиэтилена (рис. 3), где кривые заданных температурных данных сопоставлены с кривыми температур, полученными решением обратной задачи. Зависимости заданных и расчетных температур отличаются больше в точке, расположенной ближе к краю источника теплоты. Это обусловлено конвективной теплоотдачей в окружающую среду с низкой температурой, как с внешней поверхности, так и с торца муфты. Расчеты показывают, что с увеличением толщин трубы и муфты отклонения температур уменьшаются.

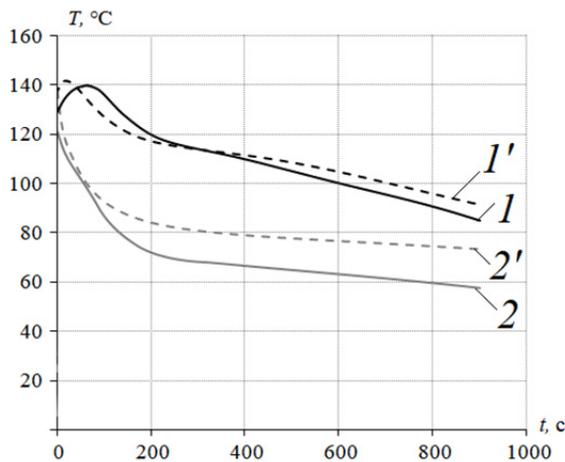


Рис. 3. Температурные зависимости в точках замера T_1 и T_2 : 1', 2' – сварка в условиях температуры воздуха 20 °С; 1, 2 – сварка в условиях температуры воздуха –40 °С с управлением кристаллизацией полиэтилена

Термический анализ образцов трубного полиэтилена на NETZSCH DSC 204 показывает, что структурные изменения полиэтилена ПЭ 100 происходят в интервале температур от 120 до 140 °С. Полиэтилен кристаллизуется при изменении температуры от 120 до 100 °С (рис. 4).

Зона термического влияния при сварке представляет участок свариваемых деталей, который при нагреве не расплавился полностью, но его микроструктура и свойства изменились. При исследовании кристаллизации интерес представляет участок, в котором произошли структурные изменения. Внешней границей такого участка будет замкнутая кривая, в точках которой достигнута температура 120 °С.

Как показывают расчеты при сварке в допустимом интервале температур на стадии охлаждения (нагреватель отключен) в течение примерно 3 мин граница области структурных изменений, включающей зону сварного шва и зону термического влияния, на участках ближе к середине нагревателя продвигается дальше. В то же время в окрестностях концов нагревателя начинается кристаллизация материала. Границу области структурных изменений найдем как огибающую изотерм 120 °С с максимально удаленными от нагревателя точками в различные моменты времени. Вне такой области структура материала стабильна, и при охлаждении в полиэтилене не образуются новые кристаллические образования. В связи с изложенным исследуем движение фронта завершения кристаллизации, то есть изотермы 100 °С, внутри области структурных изменений.

Моделировались тепловые режимы сварки при минимальной и максимальной допустимой температуре окружающего воздуха и определялись области структурных изменений. Режимы сварки соответствовали данным штрихкода муфты. Также определялась область структурных изменений сварки при температуре –40 °С по предлагаемой технологии с предварительным подогревом, выравниванием температур, нагревом по режиму, регламентированному для допустимой температуры 20 °С, и управляемой кристаллизацией с использованием решения обратной задачи. На рис. 5 показано сравнение расчетных областей структурных изменений.

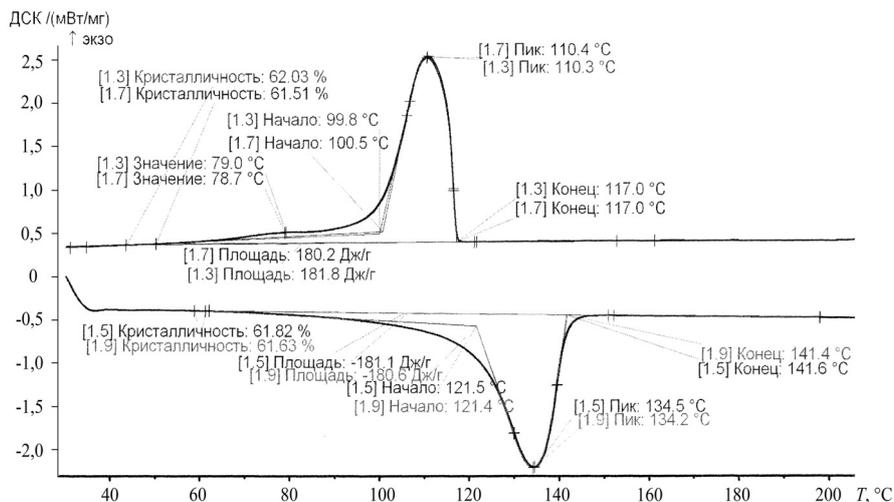


Рис. 4. Зависимости теплового потока при кристаллизации и плавлении полиэтилена от температуры, регистрируемые ДСК, при скорости охлаждения (нагрева) 10 °С×мин⁻¹

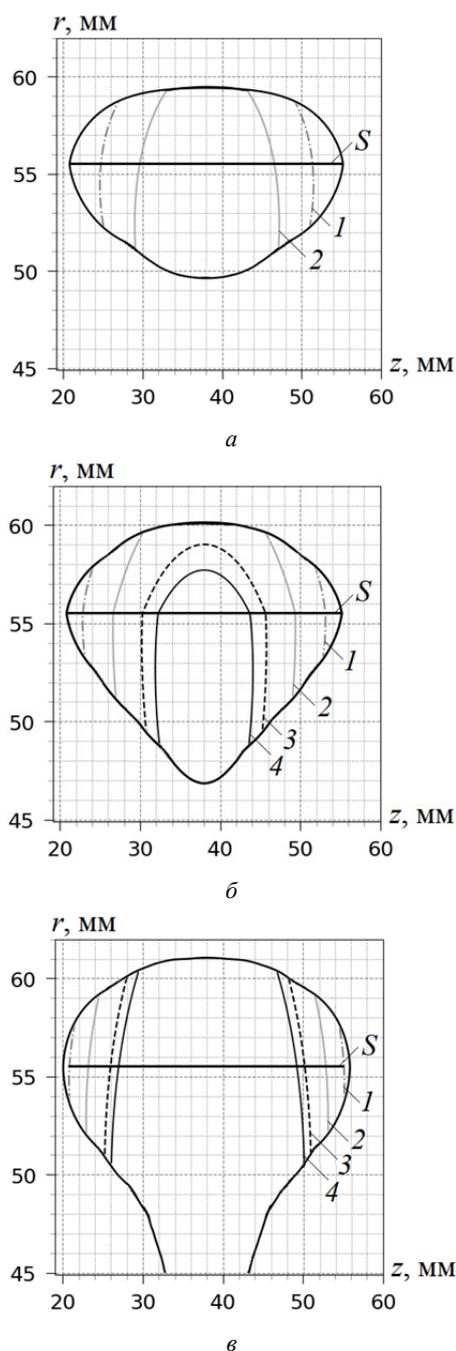


Рис. 5. Динамика изотермы $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ в сечении муфты и трубы вертикальной плоскостью при различных температурах ОВ и режимах сварки: *а* – -10 , *б* – -40 по технологии с предварительным подогревом, выравниванием температур и управляемой кристаллизацией, *в* – $+40$ °C; 1 – 2; 2 – 5; 3 – 10; 4 – 12 мин охлаждения соответственно; *S* – закладной нагреватель

Внутри областей структурных изменений показаны изотермы с температурой $100\text{ }^{\circ}\text{C}$, при которой кристаллизация полиэтилена завершается. В течение регламентированного времени охлаждения изотермы сварки по предлагаемой технологии располагаются между изотермами свар-

ки при температурах из допустимого интервала. Такое движение фронта кристаллизации будет способствовать формированию надмолекулярной структуры материала зоны сварного шва и зоны термического влияния, обеспечивающей необходимую прочность соединения.

Разработанная методика позволяет варьировать количеством точек задания температурной информации и весовыми функциями для определения мощности нагревателя, немного отличающейся от функции, полученной в рассмотренном примере. Такие функции могут использоваться для корректировки управляющей функции по результатам экспериментов по сварке в условиях низких температур. По разработанной методике также можно определить функции мощности нагревателя от времени для сварки полиэтиленовых труб различного диаметра при разных низких температурах окружающего воздуха и, обобщая полученные результаты, получить простую функцию. Такие функции могут быть заложены в программное обеспечение сварочного аппарата для выполнения сварки полиэтиленовых труб различного диаметра в расширенном температурном интервале, включая низкие климатические температуры.

Заключение

На основе градиентного метода минимизации функционала невязки разработан алгоритм нахождения временной функции мощности нагревателя при сварке в условиях низких температур, обеспечивающей скорость движения фронта кристаллизации, свойственную при сварке в допустимом интервале температур окружающего воздуха. Найденные решением обратной задачи теплообмена функции управления движением фронта кристаллизации могут быть рекомендованы для проведения исследовательской сварки полиэтиленовых труб при температурах воздуха ниже нормативных.

Список источников

1. Старостин Н.П., Аммосова О.А. Технологические режимы сварки полиэтиленовых труб для газопроводов при низких температурах // Тепловые процессы в технике. 2010. Т. 2. № 8. С. 377–380. (In Russ.).
2. Старостин Н.П., Аммосова О.А. Управление тепловым процессом электромужфтовой сварки полиэтиленовых труб при низких температурах // Сварка и диагностика. 2017. № 5. С. 21–25. (In Russ.).

3. Старостин Н.П., Герасимов А.И., Данзанова Е.В., Ботвин Г.В., Андреев Б.И. Эффективность электромуфтовой сварки полиэтиленовых труб при низких температурах окружающего воздуха // Сварочное производство. 2017. № 11. С. 47–49. (In Russ.).
4. Николаева М.А., Старостин Н.П., Данзанова Е.В. Влияние температурно-временных режимов сварки полимерных труб при низких температурах на структуру и свойства материалов сварных соединений. Часть II. Экспериментальные исследования // Вестник Югорского государственного университета. 2023. № 4. С. 120–132. (In Russ.). DOI: 10.18822/byusu202304120-132
5. Способ сварки полимерных труб соединительными деталями с закладным нагревателем: пат. Российская Федерация / Старостин Н.П., Герасимов А.И., Данзанова Е.В., Аммосова О.А. – № 2019114641; заявл. 13.05.2021; опубл. 03.03.2021. Бюл. № 7.
6. Лебедев В.А., Козырко О.А. Способы и устройства для управления кристаллизацией наплавленного металла при дуговой сварке (обзор и анализ) // Заготовительные производства в машиностроении. 2015. № 9. С. 8–16. (In Russ.).
7. Евтушенко Ю.Г., Зубов В.И., Албу А.Ф. Оптимальное управление тепловыми процессами с фазовыми переходами. Москва: МАКС Пресс, 2021. 248 с. DOI: 10.29003/m2449.978-5-317-06677-2
8. Албу А.Ф. Управление эволюцией поверхности раздела фаз в процессе кристаллизации // Доклады академии наук. 2015. Т. 465. № 1. С. 24–27. (In Russ.).
9. Алифанов О.М., Артюхин Е.А., Румянцев С.В. Экстремальные методы решения некорректных задач. Москва: Наука, 1988. 188 с.
10. Алифанов О.М. Идентификация процессов теплообмена летательных аппаратов. Москва: Машиностроение, 1979. 216 с.
11. Авдонин Н.А. Математическое описание процессов кристаллизации. Рига: Зинатне, 1980. 180 с.
12. Самарский А.А., Вабищевич П.Н. Вычислительная теплопередача. Москва: Едиториал УРСС, 2003. 784 с.
3. Starostin N.P., Gerasimov A.I., Danzanova E.V., Botvin G.V., Andreev B.I. Effektivnost' elektromuftovoi svarki polietilenovykh trub pri nizkikh temperaturakh okruzhayushchego vozdukha [Efficiency of electrofusion welding of polyethylene pipes at low ambient temperatures]. *Svarochnoe Proizvodstvo*, 2017, no. 11, pp. 47–49. (In Russ.).
4. Nikolaeva M.A., Starostin N.P., Danzanova E.V. Vliyanie temperaturno-vremennykh rezhimov svarki polimernykh trub pri nizkikh temperaturakh na strukturu i svoystva materialov svarnykh soedinenii. Chast' II. Eksperimental'nye issledovaniya [Influence of temperature-time conditions of polymer pipes welding at low temperatures on the structure and properties of materials of joints. Part II. Experimental studies]. *Vestnik Yugorskogo Gosudarstvennogo Universiteta*, 2023, no. 4, pp. 120–132. (In Russ.). DOI: 10.18822/byusu202304120-132
5. Starostin N.P., Gerasimov A.I., Danzanova E.V., Ammosova O.A. Sposob svarki polimernykh trub soedinitel'nymi detalyami s zakladnym nagrevatelem [Method of welding polymer pipes with connecting parts with an embedded heater]. Patent Rossiiskaya Federatsiya no. 2019114641 (2021).
6. Lebedev V.A., Kozyrko O.A. Sposoby i ustroystva dlya upravleniya kristallizatsiei naplavlennogo metalla pri dugovoi svarke (obzor i analiz) [Methods and devices for controlling the crystallization of deposited metal during arc welding (review and analysis)]. *Zagotovitel'nye Proizvodstva v Mashinostroenii*, 2015, no. 9, pp. 8–16. (In Russ.).
7. Evtushenko Y.G., Zubov V.I., Albu A.F. Optimal control of thermal processes with phase transitions. Moscow: MAKS Press, 2021, 248 p. (In Russ.). URL: <https://doi.org/10.29003/m2449.978-5-317-06677-2>
8. Albu A.F. Upravlenie evolyutsiei poverkhnosti razdela faz v protsesse kristallizatsii [Control of the phase boundary evolution in solidification]. *Doklady akademii nauk*, 2015, vol. 465, no. 1, pp. 24–27. (In Russ.).
9. Alifanov O.M., Artyukhin E.A., Rummyantsev S.V. Ekstremal'nye metody resheniya nekorrektnykh zadach [Extreme methods for solving ill-posed problems]. Moscow: Nauka, 1988, 188 p. (In Russ.).
10. Alifanov O.M. Identifikatsiya protsessov teploobmena letatel'nykh apparatov [Identification of heat transfer processes in aircraft]. Moscow: Mashinostroenie, 1979, 216 p. (In Russ.).
11. Avdonin N.A. Matematicheskoe opisanie protsessov kristallizatsii [Mathematical description of crystallization processes]. Riga: Zinatne, 1980, 180 p. (In Russ.).
12. Samarskii A.A., Vabishchevich P.N. Vychislitel'naya teploperedacha [Computational Heat Transfer]. Moscow: Editorial URSS, 2003, 784 p. (In Russ.).

References

1. Starostin N.P., Ammosova O.A. Technological modes of the welding of the polyethylene pipes for gas mains under low temperature. *Thermal processes in engineering*, 2010, vol. 2, no. 8, pp. 377–380. (In Russ.).
2. Starostin N.P., Ammosova O.A. Upravlenie teplovym protsessom elektromuftovoi svarki polietilenovykh trub pri nizkikh temperaturakh [Control of the thermal process of electrofusion welding of polyethylene pipes at low temperatures]. *Welding and Diagnostics*, 2017, no. 5, pp. 21–25. (In Russ.).

Статья поступила в редакцию 16.04.2024; одобрена после рецензирования 20.04.2024; принята к публикации 25.04.2024.

The article was submitted on 16.04.2024; approved after reviewing on 20.04.2024; accepted for publication on 25.04.2024.