

Тепловые процессы в технике. 2025. Т. 17. № 5. С. 235–243
Thermal processes in engineering, 2025, vol. 17, no. 5, pp. 235–243

Научная статья
УДК 621.791.46
URL: <https://tptmai.ru/publications.php?ID=185569>
EDN: <https://www.elibrary.ru/OTPUTF>

Эффективность управления движением фронта кристаллизации при сварке полиэтиленовых труб в условиях низких температур

Н.П. Старостин¹, О.А. Аммосова²✉

^{1,2}Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Федеральный исследовательский центр «Якутский научный центр Сибирского отделения российской академии наук», обособленное подразделение Институт проблем нефти и газа Сибирского отделения Российской академии наук, Якутск, Российская Федерация

²ammosova_o@mail.ru✉

Аннотация. Нелинейные обратные задачи теплопроводности (ОЗТ) применяются для реализации технологии сварки полиэтиленовых труб при температурах окружающего воздуха ниже рекомендуемых нормативными документами. Функция управления движением фронта кристаллизации в разработанном прототипе сварочного аппарата для соединения полиэтиленовых труб различного диаметра в интервале естественно низких температур определяется на основе решений ОЗТ. Расчетами определено расстояние точек задания температурной информации от нагревателя, при котором решение обратной задачи обеспечивает минимум функционала качества и динамику температур в зоне термического влияния в допустимом «коридоре» изменения. Термическим анализом установлена близость кривых скоростей изменения степени кристалличности материалов соединений, выполненных стандартной сваркой и с управлением кристаллизацией. Экспериментально показано, что реализация управления кристаллизацией обеспечивает прочность сварных соединений, выполненных при низких температурах, не ниже, чем при сварке в нормальных условиях.

Ключевые слова: тепловой процесс, сварка, полиэтилен, закладной нагреватель, кристаллизация, обратная задача, зона термического влияния, дифференциальная сканирующая калориметрия, прочность

Финансирование. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-29-20135, <https://rscf.ru/project/24-29-20135/>

Для цитирования. Старостин Н.П., Аммосова О.А. Эффективность управления движением фронта кристаллизации при сварке полиэтиленовых труб в условиях низких температур // Тепловые процессы в технике. 2025. Т. 17. № 5. С. 235–243. URL: <https://tptmai.ru/publications.php?ID=185569>

Original article

Efficiency of controlling crystallization front movement in welding polyethylene pipes under low-temperature conditions

N.P. Starostin¹, O.A. Ammosova²✉

^{1,2}*Federal Research Center "Yakut Scientific Center of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences", a separate division Institute of Oil and Gas Problems of the Siberian Branch of the RAS, Yakutsk, Russian Federation*

²*ammosova_o@mail.ru*✉

Abstract. Nonlinear inverse heat conduction problems are employed to facilitate the welding of polyethylene pipes at ambient temperatures that fall below the levels recommended by regulatory standards. The proposed technique for low-temperature welding consists of several operations: preliminary heating, temperature equalization, heating according to a specific welding mode at permissible air temperatures, and cooling with controlled crystallization of the welded joint material. All these operations are performed automatically. To determine the parameters for heating and temperature equalization – such as heater power, heating duration, and equalization temperature – direct heat conduction problems are solved. Regression equations are utilized to establish these parameters based on the ambient temperature and the diameter of the pipe in the welding machine. The functions controlling the motion of the crystallization front in the developed prototype for welding polyethylene pipes of various diameters in naturally low temperatures are determined by solving inverse heat conduction problems, combined with a full factorial experiment methodology. The influence of the distance from the heater to the temperature setting points on the solution of the inverse problem has been analyzed. Calculations have identified the optimal distance for temperature information setting points from the heater, ensuring that the solution minimizes the quality functional and maintains temperature dynamics within an acceptable range of variation in the heat-affected zone. Thermal analysis has shown that the curves representing the rates of change in the degree of crystallinity for joints created by standard welding and those utilizing crystallization control are closely aligned. This indicates the formation of similar supramolecular structures. Physicomechanical testing has demonstrated that implementing crystallization control guarantees the strength of welded joints made at low temperatures, equal to or exceeding that of joints welded under standard conditions. The results of strength tests confirm the effectiveness of the crystallization front control method when welding at low temperatures. The proposed method for establishing welding modes at low temperatures in a welding machine, which involves solving direct and inverse heat conduction problems, can be recommended for determining the parameters and functions required for welding polyethylene pipes and other components with built-in heaters in low air temperature conditions.

Keywords: thermal process, welding, polyethylene, embedded heater, crystallization, inverse problem, heat-affected zone, differential scanning calorimetry, strength

Funding. The work was supported by the Russian Science Foundation under grant No. 24-29-20135, <https://rscf.ru/project/24-29-20135/>

For citation. Starostin N.P., Ammosova O.A. Efficiency of controlling crystallization front movement in welding polyethylene pipes under low-temperature conditions. *Thermal processes in engineering*. 2025, vol. 17, no. 5, pp. 235–243. (In Russ.). URL: <https://tptmai.ru/publications.php?ID=185569>

1. Введение

Соединения полиэтиленовых (ПЭ) труб для газопроводов выполняют двумя видами сварки – встык и с закладными нагревателями (ЗН). Сварку

с ЗН рекомендуется выполнять в интервале температур окружающего воздуха от –10 до 40 °С. Такой интервал температур воздуха назовем допустимым. Для сварки с ЗН применяются различ-

ные фитинги (муфты, тройники, седловые отводы, редукционные переходы, угловые отводы и т.д.), в свариваемой области которых вмонтированы металлические спирали. В данной работе рассматривается соединение ПЭ труб муфтами с ЗН как наиболее удобное для разработки технологии сварки при низких температурах. Концы свариваемых труб вставляются в деталь с ЗН, на клеммы которой подается электрический ток, происходит интенсивный нагрев зоны соединения, сопровождаемый сложными физическими и химическими процессами. При стандартной сварке охлаждение с протеканием кристаллизации материала сварного шва происходит при выключенном ЗН.

Приоритетным при сварке является тепловой процесс, являющийся ключевым для всех процессов, происходящих при сварке. В условиях низких температур окружающего воздуха в процессе сварки нарушается температурный режим, обуславливающий формирование надмолекулярной структуры материала в зонах сварного шва и термического влияния, обеспечивающей качественное соединение. Допустим, что прочное соединение получается при обеспечении в зоне структурных изменений динамики температурного поля, характерной для сварки в допустимом интервале температур окружающего воздуха. Тогда изменением мощности ЗН по времени можно добиться динамики температурного поля в окрестности сварного шва по закономерности, близкой к заданной. Именно на таком подходе основана технология сварки полиэтиленовых труб деталями с ЗН при низких климатических температурах с управлением фронтом кристаллизации в зоне структурных изменений, предложенная в работе [1]. Такая сварка при низких температурах выполняется специальным сварочным аппаратом, реализующим режимы предварительного подогрева, выравнивания температур, нагрева и охлаждения с управляемой кристаллизацией [2]. Расчетное определение параметров предварительного подогрева и выравнивания температур приведено в работе [3]. Предварительный подогрев с последующим выравниванием до допустимой для сварки температуры позволяет производить нагрев по режиму, регламентированному штрих-кодом сварной детали. Управление кристаллизацией материалов сварного шва и зоны термического влияния

осуществляется, изменяя мощность закладного нагревателя по времени. При этом параметры (мощность нагревателя, продолжительности подогрева и выравнивания температур), а также функции управления кристаллизацией определяются на основе математического моделирования теплового процесса и решения прямых и обратных задач теплопроводности, используя достаточно высокопроизводительные ЭВМ. Функции управления и параметры сварки не могут быть оперативно определены, используя процессор сварочного аппарата. Актуальной является задача разработки методики определения простых зависимостей параметров и функций управления от температуры воздуха и диаметров свариваемых труб на основе результатов решения прямых и обратных задач теплопроводности.

Естественно использование упрощенных зависимостей будет вносить погрешности в результаты вычисления параметров и функций режимов сварки. Кроме того, небольшие погрешности в управлении движением фронта кристаллизации вносятся на этапе реализации. Целью данной работы является экспериментальная проверка суммарного влияния подобных погрешностей теплового процесса на прочность сварного соединения, выполненного при низкой температуре по предлагаемой технологии.

2. Решение обратной задачи

Рассмотрим сварку ПЭ труб при низкой температуре с помощью муфт, расчетная схема теплового процесса которой представлена на рис. 1.

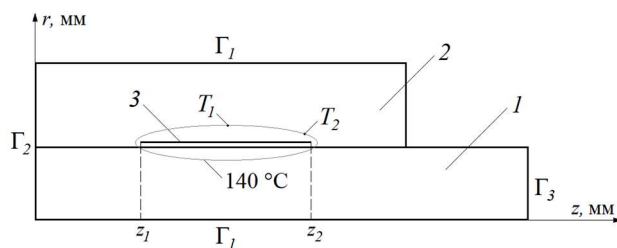


Рис. 1. Схема трубы с муфтой: 1 – труба; 2 – муфта; 3 – закладной нагреватель S

Нестационарное температурное поле при сварке описывалось нелинейным уравнением теплопроводности в цилиндрических координатах с учетом теплоты фазового превращения полимерного материала в интервале температур на стадиях нагрева и охлаждения [1]:

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

$$(r, z) \in \Omega; -t_{\text{наг}} < t \leq t_{\text{охла}} + \Delta t_{\text{охла}};$$

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

$$T(r, z, 0) = T_{\text{нач}}, (r, z) \in \Omega, \quad (2)$$

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

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

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

В качестве примера рассмотрим сварку труб с внешним диаметром 160 мм и толщиной стенки 14,2 мм при температуре окружающего воздуха -40°C . Расчеты проводились при следующих свойствах полиэтилена: коэффициенты теплопроводности для твердой и жидкой фазы $\lambda^- = 0,38$; $\lambda^+ = 0,26$ Вт/(м $\times$ °C); объемные теплоемкости $c^- = 1,75 \times 10^6$; $c^+ = 1,85 \times 10^6$ Дж/(м 3 $\times$ °C).

На решение обратной задачи определения управления фронтом кристаллизации путем временного изменения мощности ЗН $Q(t)$ на стадии охлаждения при сварке в условиях низкой температуры воздуха важную роль играет однородность температурного поля в области сварки, достигнутая в результате предварительного подогрева и выравнивания температур. В то же время, при выполнении ремонтно-восстановительных работ на газопроводах в зимних условиях сварку труб необходимо выполнить не только качественно, но и оперативно. Допустимое для сварки однородное распределение температуры в зоне сварного шва с помощью ЗН за короткий промежуток времени получить достаточно трудно. Для предварительного подогрева концов труб и муфты с помощью ЗН задавали максимально допустимое время проведения такой операции. Тогда, например, параметры предварительного подогрева и выравнивания температур определяются следующим образом. Мо-

делируется подача на ЗН постоянной мощности, при действии которой в течение 20–30 минут максимальная температура поднимается до 60°C , т.е. ниже температуры размягчения полиэтилена. Время достижения такой температуры бралось за время подогрева. Для последующего выравнивания температур закладной нагреватель выключается. При достижении между трубой и муфтой в середине ЗН по осевой координате температуры 20°C выравнивание завершается. Научный интерес представляет исследование влияния полученного неоднородного температурного поля на определение функции управления движением фронта кристаллизации.

Расчетами получены следующие параметры: мощность нагревателя – 218 Вт, время подогрева – 28 минут, время выравнивания температур – 6 минут.

На рис. 2 представлены изолинии температур в стенках муфты и участка трубы в моменты завершения подогрева и выравнивания температур.

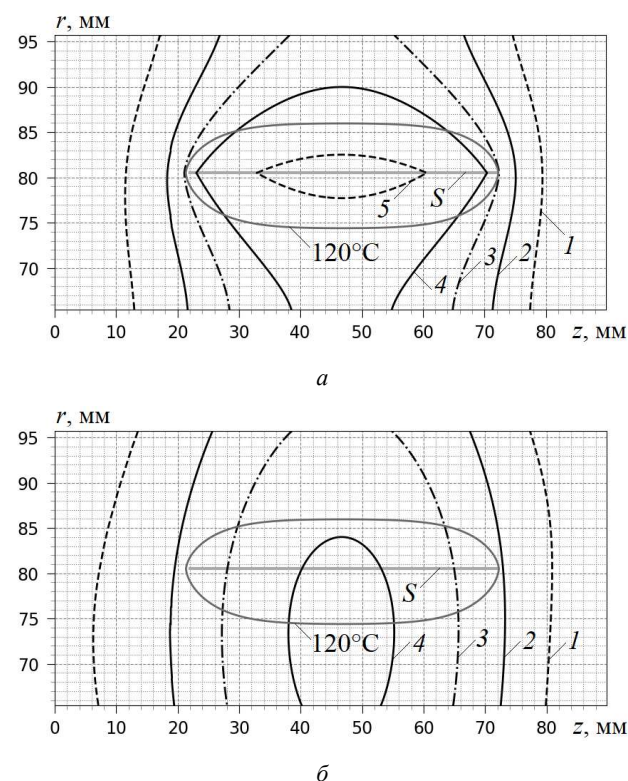


Рис. 2. Изолинии температур в вертикальном сечении стенок участка трубы и муфты: а – в момент завершения подогрева; б – конец выравнивания на открытом воздухе при температуре -40°C ; 1 – -10 ; 2 – 0; 3 – 10; 4 – 20; 5 – 40°C ; S – закладной нагреватель

Расчеты показывают, что в области муфты изотермы ссужены и опущены вниз, что свидетельствует о заметном влиянии низких температур воздуха на температурное поле муфты по сравнению со свариваемыми концами труб, как на стадии подогрева, так и на стадии выравнивания температур. При сварке в условиях низких температур тепловые процессы рассматривали в зонах сварного шва и термического влияния, полученных при сварке в условиях допустимой температуры 20 °С. В исследуемых зонах в результате выравнивания температура изменяется в пределах от 2 до 22 °С.

Несмотря на неоднородность распределения температуры в стенках труб и муфты нагрев (оплавление) производили по режиму сварки с параметрами, указанными в штрих-коде муфты для допустимой температуры воздуха – напряжение $U = 40$ В, время нагрева 350 с.

Мощность теплового источника вычислялась по формуле:

$$Q(t) = \frac{U^2}{R \times (1 + \beta(T_{3H}(t) - 20))}, \quad (6)$$

где R – сопротивление электронагревательной спирали при температуре 20 °С; T_{3H} – температура в закладном нагревателе с сопротивлением $R = 0,78$ Ом, температурный коэффициент сопротивления $\beta = 0,0034$ °С⁻¹.

Согласно режиму стандартной сварки управление охлаждением соединения необходимо провести в течение 30 минут так, чтобы кристаллизация материала сварного шва и зоны термического влияния (ЗТВ) протекала по закономерности, характерной для сварки в условиях допустимых температур.

Для нахождения функции управления движением фронта кристаллизации при сварке в условиях низких температур решалась обратная задача определения временной функции мощности нагревателя $Q(t)$, обеспечивающей заданный температурный режим на границе сварного шва и зоны термического влияния. В качестве заданной температурной информации для решения обратной задачи использовались значения температур $T_1^{20}(t)$, $T_2^{20}(t)$, рассчитанных в точках изотермы 140 °С, получаемой при выполнении сварки при температуре воздуха 20 °С. Точки

задания температур имели следующие координаты: $T_1(84,595; 47)$ и $T_2(81,3; 71,2)$. Расстояние первой точки от ЗН равно 4,095 мм, второй – 0,8 мм.

Функцию управления кристаллизацией определяли на стадии охлаждения. Тем не менее, решение обратной задачи определяли в расширенном интервале времени от $-t_{наг}$ до $t_{охл} + \Delta t_{охл}$, где $t_{наг}$ – время нагрева и $\Delta t_{охл}$ – дополнительное время охлаждения. Такой прием позволяет снизить влияние нулевого значения градиента функционала (7) в конце временного интервала и мгновенного распространения температурной неоднородности в начальный момент времени [4–5].

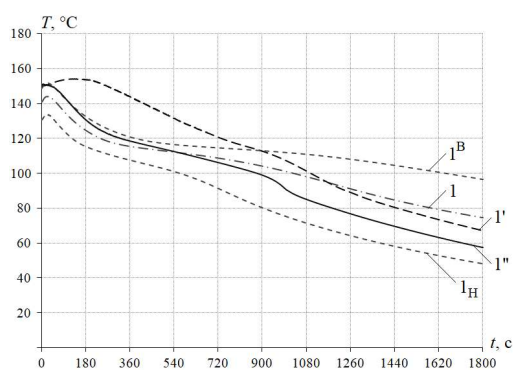
Функция $Q(t)$ определялась из условия минимума функционала

$$J[Q(t)] = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^2 \int_{-t_{наг}}^{t_{охл} + \Delta t_{охл}} \rho_i(t) [T(r_i, z_i, t) - T_i^{20}(t)]^2 dt, \quad (7)$$

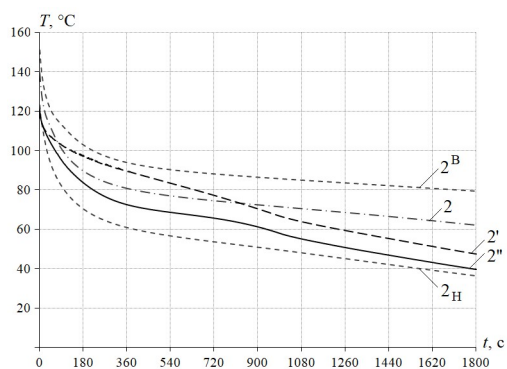
на решениях системы (1)–(5), где $\rho_i(t)$ – весовые функции. Задача решалась методом конечных разностей при различных весовых функциях [6].

Итерационный процесс отыскания решения обратной задачи прекращался по условию «слипания» двух последовательных приближений функции мощности нагревателя. В результате получалась функция мощности нагревателя на стадии охлаждения $Q(t)$ во временном интервале $[0, t_{охл}]$. Моделировалось выполнение нагрева (оплавления) с параметрами стандартной сварки, подавая на клеммы муфты напряжение 40 В. При охлаждении управление кристаллизацией производится закладным нагревателем, мощность которого изменяется согласно функции $Q(t)$. Не взирая на близость последовательных приближений мощности нагревателя, расчетные температурные зависимости недостаточно близки к заданным.

На рис. 3 представлено сравнение заданных температурных зависимостей $T_i^{20}(t)$ и расчетных $T(r_i, z_i, t)$, $i = 1, 2$, на стадии охлаждения. Также показаны верхние и нижние границы «коридоров» допустимых изменений температур.



а



б

Рис. 3. Зависимости температуры от времени в точках на границе зон сварного шва и термического влияния: а – T_1 ; б – T_2 ; 1, 2 – заданные; 1', 2' – расчетные; 1^B, 2^B – верхние границы; 1_H, 2_H – нижние границы

Показано, что при сварке труб диаметром более 110 мм граница зон сварного шва и термического влияния, на которой располагали температурные датчики, смещается в область отсутствия возможности определения мощности нагревателя [4]. Известно, что по мере удаления точек задания температурной информации от источника теплоты решение обратной задачи определения мощности нагревателя будет ухудшаться в зависимости от температуропроводности материала.

Решение модельных обратных задач для тела с температуропроводностью полиэтилена показало возможность определения источника тепла с приемлемой для практики точностью при расположении измерителя температуры на расстоянии, не превышающем 2,4 мм. В связи с такой особенностью обратных задач точки задания температур располагали в зоне сварного шва на расстоянии 2 мм от нагревателя.

На рис. 4 представлено найденное решение обратной задачи $Q(t)$ и его кусочно-линейная аппроксимация $\tilde{Q}(t)$.

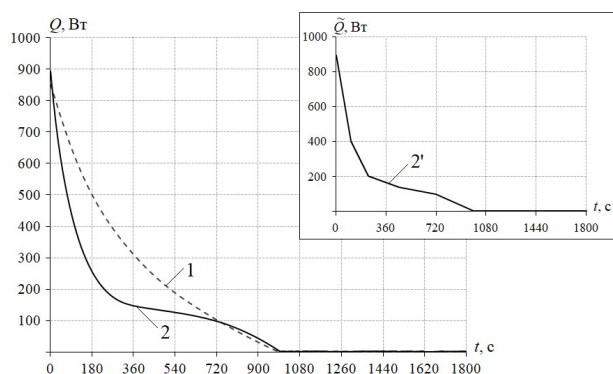


Рис. 4. Зависимость мощности закладного нагревателя при управлении кристаллизацией: 1 – по точкам T_1 , T_2 ; 2 – по точкам T'_1 , T'_2

Динамика температур в контрольных точках T_1 и T_2 на границе зон сварного шва и термического влияния на стадии охлаждения с управлением кристаллизацией $Q(t)$ показана на рис. 3. Таким образом, управление кристаллизацией, найденное по температурным данным на расстоянии, не превышающем 2 мм, в точках T'_1 , T'_2 обеспечивает динамику температур в ЗТВ в допустимом «коридоре» (рис. 3, кривые 1'', 2''). Численным вычислением производных от функций можно показать, что скорости изменения температур не выходят за пределы допустимых.

3. Контроль качества соединений

Косвенным подтверждением эффективности управления движением фронта кристаллизации при сварке ПЭ труб при низких температурах можно считать обеспечение прочности соединения не ниже, чем прочность соединения при сварке в условиях допустимой температуры. Для реализации сварки при низких температурах по предлагаемой технологии разработан прототип сварочного аппарата [2]. Прототип позволяет при допустимых температурах воздуха автоматически выполнять сварку по режиму, регламентированному штрих-кодом электросварной муфты. При более низких температурах прототип автоматически выполняет предварительный подогрев и выравнивание температур с расчетными параметрами, нагрев согласно режиму для допустимой температуры воздуха. При охлаждении управляет движением фронта кристаллизации материала в зонах сварного шва и термического влияния, изменяя мощность нагревателя по заданной функции.

При этом параметры подогрева и выравнивания температур и функция управления кристаллизацией для интервала температур от -40 до -10 °С для любого диаметра труб от 63 до 160 мм вычисляются в сварочном аппарате по простым формулам. В качестве примера вкратце изложим получение формул для определения функций управления кристаллизацией. Нахождение функций управления движением фронта кристаллизации, зависящих от времени, для всех значений интервала низких температур окружающего воздуха и рассматриваемых диаметров труб осуществлялось с использованием уравнений регрессии. В качестве данных «измерений» служили результаты решения обратной задачи по определению функций управления при предельных значениях факторов.

Для приведения продолжительностей охлаждения при сварке труб различного диаметра к некоторой общей шкале без потери информации о различии диапазонов проводили нормализацию. Полученные зависимости от нормализованного времени аппроксимировали кусочно-линейными функциями. Координаты концов звеньев кусочно-линейных функций представляли значения отклика систем и определялись, например, в виде, $\tilde{f}(x_1, x_2) = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + a_{12}x_1x_2$, где a_0, a_1, a_2, a_{12} – неизвестные коэффициенты, x_1, x_2 – факторы (температура воздуха, диаметр трубы).

При нахождении коэффициентов уравнения регрессии использовалась совокупность данных плана полного факторного эксперимента (ПФЭ) [7–8]. Для получения формул для вычисления параметров предварительного подогрева и выравнивания температур в условиях низких температур также использовались данные плана ПФЭ, полученные расчетами.

Полученные уравнения регрессии были введены в программное обеспечение прототипа сварочного аппарата для определения режимов автоматической сварки при низких температурах. Прототипом аппарата выполнена сварка ПЭ труб рассмотренного типоразмера при температуре окружающего воздуха -39 °С. Термический анализ материалов ЗТВ сварных соединений проводился на дифференциальном сканирующем калориметре (ДСК) Netzsch DSC 204 HP Phoenix в режиме нагрева со скоростью 10 °С/мин. Об-

разцы материалов брались в окрестности контрольной точки T_1 . Анализу подвергались образцы сварных соединений, выполненных при температуре $+20$ и -39 °С с управлением кристаллизацией и по режиму стандартной сварки. Сварку при низкой температуре по стандартному режиму назовем сваркой с нарушением.

На рис. 5 представлены кривые скоростей изменения степени кристалличности образцов материалов зон термического влияния, рассчитанные по формуле:

$$\frac{\partial X_c}{\partial t} = \frac{-q(T)}{L^{100\%}}, \quad (8)$$

где X_c – степень кристалличности, t – время, q – тепловой поток на единицу массы, регистрируемый ДСК, $L^{100\%}$ – энтальпия плавления полиэтилена со 100% степенью кристалличности.

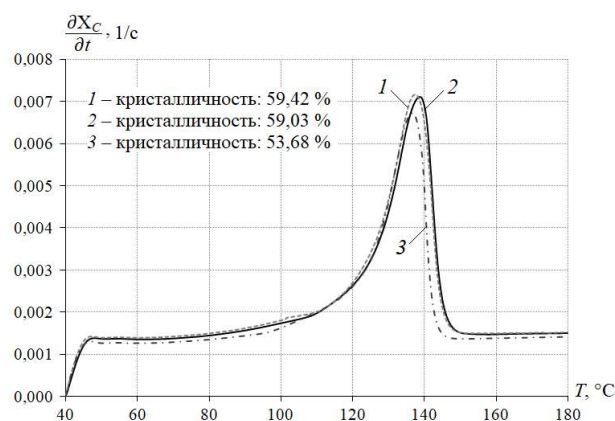


Рис. 5. Скорости изменения степени кристалличности материалов ЗТВ сварных соединений, выполненных при различных температурах ОВ; 1 – 20 ; 2 – -39 с управлением кристаллизацией; 3 – -39 °С с нарушением

Известно, что кривая ДСК в режиме нагрева отражает предысторию формирования надмолекулярных структур материала [9]. Близость кривых скоростей изменения степени кристалличности материалов соединений, выполненных стандартной сваркой и с управлением кристаллизацией при низкой температуре воздухе свидетельствует о том, что при сварке сформированы идентичные надмолекулярные структуры. Кривые скоростей изменения степени кристалличности материалов соединений, выполненных с нарушением, смещены в сторону меньших значений температур, что показывает наличие мелких структур, обуславливающих пластичность

материала сварного соединения. Полученные результаты подтверждаются механическими испытаниями на прочность соединения.

Контроль качества муфтовых соединений проводят испытаниями на стойкость к расслоению (ГОСТ Р 58121.1-2018). Однако при таких испытаниях разрушение зачастую происходит по месту приложения нагрузки, либо по основному материалу трубы или муфты. В связи с этим, испытания на стойкость к расслоению проводились способом, позволяющим при испытаниях гарантированно разрушать соединение по сварному шву трубы и муфты. Суть способа заключалась в уменьшении площади сварного шва путем нанесения на готовые образцы надрезов с двух сторон [10].

На рис. 6 приведен результаты испытания образцов с надрезами.

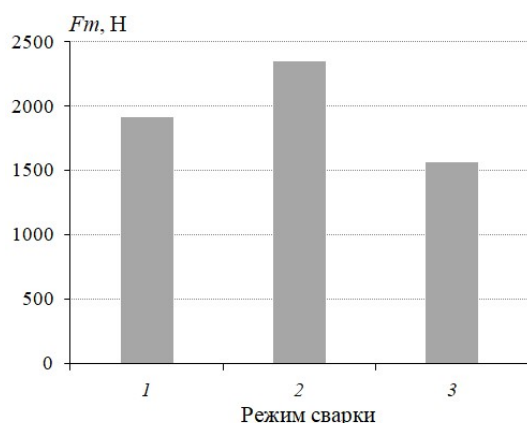


Рис. 6. Сравнения значений максимального усилия расслоения сварных соединений, выполненных при различных температурах ОБ: 1 – 20; 2 – –39 с управлением кристаллизацией; 3 – –39 °С с нарушением

Значения максимального усилия расслоения соединений, выполненных при низких температурах воздуха с управлением кристаллизацией, не ниже значений максимальной нагрузки расслоения сварных соединений, выполненных стандартной сваркой.

4. Выводы

Реализация сварки полиэтиленовых труб с помощью муфт при низких температурах по режиму с управлением движением фронта кристаллизации, найденной на основе решения обратных задач теплопроводности и уравнения регрессии, обеспечивает прочность сварных со-

единений не ниже, чем при сварке в нормальных условиях. Предлагаемая методика определения режимов сварки в сварочном аппарате может быть рекомендована для определения параметров и функций сварки полиэтиленовых труб при низких температурах воздуха другими деталями с закладными нагревателями.

Список источников

1. 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.
2. Старостин Н.П., Аммосова О.А., Петров Д.Д. и др. Сварка полиэтиленовых труб муфтами с закладными нагревателями при низких температурах. 1. Реализация управления фронтом кристаллизации // Сварка и диагностика. 2024. № 6. С. 44–49. DOI: 10.52177/2071-5234_2024_06_44
3. Старостин Н.П., Аммосова О.А. Моделирование предварительного подогрева и нагрева при соединении полиэтиленовых труб электросварными муфтами // Нефтегазовое дело. 2024. Т. 22. № 5. С. 149–158. DOI: 10.17122/ngdelo-2024-5-149-158
4. Алифанов О.М. Идентификация процессов теплообмена летательных аппаратов. Москва: Машиностроение, 1979. 216 с.
5. Бубнов В.А., Соловьев И.А. Об использовании гиперболического уравнения в теории теплопроводности // Инженерно-физический журнал. 1977. Т. 33. № 6. С. 1131–1135.
6. Самарский А.А. Теория разностных схем. Москва: Наука, 1977. 656 с.
7. Адлер Ю.П., Маркова Е.В., Грановский Ю.В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. Москва: Наука, 1976. 279 с.
8. Хартман К. Планирование эксперимента в исследовании технологических процессов. Москва: Мир, 1997. 278 с.
9. Годовский Ю.К. Теплофизические методы исследования полимеров. Москва: Химия, 1976. 216 с.
10. Петров Д.Д., Ботвин Г.В., Старостин Н.П. и др. Способ испытания муфтового сварного соединения полимерных труб. Патент RU 2802888: G01L1/00 F16L21/00, 47/00. № 2022130847. Бюл. № 25, 05.09.2023.

References

1. Starostin NP, Ammosova OA. Crystallization front movement control when welding polyethylene pipes at low temperatures. *Thermal Processes in Engineering*. 2024;16(4):162–169. (In Russ.).
2. Starostin NP, Ammosova OA, Petrov DD et al. Welding of polyethylene pipes by couplings with embedded heaters at low temperatures. Part 1. Realization of crystallization front control. *Welding and Diagnostics*. 2024;(6):44–49. DOI: 10.52177/2071-5234_2024_06_44 (In Russ.).
3. Starostin NP, Ammosova OA. Simulation of pre-heating and heating when connecting polyethylene pipes with electrofusion couplings. *Petroleum Engineering*. 2024;22(5):149–158. DOI: 10.17122/ngdelo-2024-5-149-158 (In Russ.).
4. Alifanov OM. *Identification of heat transfer processes in aircraft*. Moscow: Mashinostroenie; 1979. 216 p. (In Russ.).
5. Bubnov VA, Solov'ev IA. On the use of hyperbolic equations in the theory of thermal conductivity. *Engineering and Physics Journal*. 1977; 33(6):1131–1135. (In Russ.).
6. Samarskii AA. *The theory of difference schemes*. New York, Basel: Marcel Dekker Inc; 2001. 761 p. (In Russ.).
7. Adler YuP, Markova EV, Granovskii YuV. Experiment planning in the search for optimal conditions. Moscow: Nauka Publ.; 1976. 279 p. (In Russ.).
8. Khartman K. *Planning an experiment in the study of technological processes*. Moscow: Mir Publ.; 1997. 278 p. (In Russ.).
9. Godovskii YuK. *Thermophysical methods of polymer research*. Moscow: Khimiya Publ.; 1976. 216 p. (In Russ.).
10. Petrov DD, Botvin GV, Starostin NP et al. *Method of testing the coupling welded joint of polymer pipes*. Patent RU 2802888, 05.09.2023 (In Russ.).