

УДК 621.791.461:678.029.43

## Определение технологических параметров сварки полипропиленовых труб в раструб в условиях низких температур\*

Д-р техн. наук Н. П. СТАРОСТИН<sup>1</sup>, канд. техн. наук О. А. АММОСОВА<sup>2</sup>

<sup>1</sup>nikstar56@mail.ru, <sup>2</sup>amosova\_o@mail.ru

Институт проблем нефти и газа СО РАН

\* Работа выполнена в рамках Госзаказа ФАНО РФ (проект № 0377-2016-0004)

Согласно нормативным документам, сварку полипропиленовых труб нагретым инструментом в раструб рекомендуется проводить при положительных температурах окружающего воздуха. Рассматриваемая технология сварки полипропиленовых труб при температурах воздуха ниже нормативных, включает следующие операции: предварительный подогрев свариваемых участков труб и муфт специальными насадками, свободное охлаждение для выравнивания температур в зоне термического влияния соединения до допустимой для сварки, оплавление в штатном режиме и охлаждение сварного соединения в теплоизоляционной камере с воздушной прослойкой расчетной толщины. В данной работе предлагается методика определения технологических параметров сварки полипропиленовых труб в раструб при низких температурах из условия обеспечения протекания теплового процесса по закономерностям, соответствующим изменению температуры при сварке в условиях допустимых для сварки температур воздуха. Расчет технологических параметров сварки проводится на основе математического моделирования теплового процесса сварки с учетом двухфазной зоны, в которой вещество находится как в твердом, так и в жидком состоянии. При этом долю жидкой фазы предлагается определять, используя температурные зависимости количества выделяемой (поглощаемой) при фазовом превращении теплоты, полученные методом дифференциальной сканирующей калориметрии. Предполагая, что предварительный подогрев осуществлен, проведен расчет технологических параметров раструбной сварки заданного типоразмера при температуре окружающего воздуха ниже нормативного. Показано, что эффективным является охлаждение сварного соединения в теплоизоляционной камере с прослойкой воздуха, по сравнению с использованием слоя теплоизоляции. Предлагаемая технология сварки может использоваться для монтажа и ремонта систем горячего и холодного водоснабжения из полипропиленовых труб в условиях низких температур.

**Ключевые слова:** полипропиленовые трубы, сварка в раструб, математическая модель, фазовый переход, технологические параметры, охлаждение, теплоизоляция.

### Информация о статье:

Поступила в редакцию 29.04.2018, принята к печати 20.07.2018

DOI: 10.17586/1606-4313-2018-17-3-29-36

Язык статьи — русский

### Для цитирования:

Старостин Н. П., Аммосова О. А. Определение технологических параметров сварки полипропиленовых труб в раструб в условиях низких температур // Вестник Международной академии холода. 2018. № 3. С. 29–36.

## Technological parameters for welding polypropylene pipes into the socket at low temperatures

D. Sc. N. P. STAROSTIN<sup>1</sup>, Ph. D. O. A. AMMOSOVA<sup>2</sup>

<sup>1</sup>nikstar56@mail.ru, <sup>2</sup>amosova\_o@mail.ru

Institute of Oil and Gas problems, SB RAS

According to the regulatory documents welding of polypropylene pipes with a heated instrument into the socket is recommended at positive ambient temperatures. The proposed technology for welding polypropylene pipes at air temperatures below the standard includes the following operations: preheating the welded sections of pipes and couplings with special nozzles, free cooling to equalize the temperatures in the zone of thermal impact of the joint to the allowable for welding, reflow in the standard mode, and cooling the welded joint in a heat-insulating chamber with an air layer of calculated thickness. In this paper, we propose a technique for determining the technological parameters for welding polypropylene pipes into the socket at low temperatures from the condition of ensuring the flow of the thermal process according to the regularities corresponding to the temperature change during welding under conditions acceptable for welding air temperatures. Calculation of technological parameters of welding is carried out on the basis of mathematical modeling of the heat process of welding taking into account a two-phase zone in which the substance is in both solid and liquid state. The fraction of the

*liquid phase is proposed to be determined using the temperature dependences of the amount of heat released (absorbed) during the phase transformation, obtained by differential scanning calorimetry. Assuming that the pre-heating has been carried out, the calculation of the technological parameters of socket fusion of a given size is carried out at an ambient temperature below the standard one. It is shown that it is effective to cool the welded joint in a heat-insulating chamber with an air layer, in comparison with the use of a layer of thermal insulation. The proposed welding technology can be used for installation and repair of hot and cold water supply systems made of polypropylene pipes at low temperatures.*

**Keywords:** polypropylene pipes, socket welding, mathematical model, phase transition, technological parameters, cooling, thermal insulation.

#### Article info:

Received 07/05/2018, accepted 20/07/2018

DOI: 10.17586/1606-4313-2018-17-3-29-36

Article in Russian

#### For citation:

Starostin N. P., Ammosova O. A. Technological parameters for welding polypropylene pipes into the socket at low temperatures. *Vestnik Mezhdunarodnoi akademii kholoda*. 2018. No 3. p. 29–36.

## Введение

Широкое использование полипропилена (ПП) связано с универсальностью этого материала. Согласно отчету Ассоциации производителей пластмасс [1], ПП является одним из важных полимеров, ожидаемые доходы которого к 2019 г. составят более 130 млрд €. В сравнении с другими товарными полимерами, ПП имеет преимущества в прочности, жесткости и более высокой температурой плавления. Это позволяет использовать его во многих отраслях. Использование полипропиленовых труб для систем отопления, горячего и холодного водоснабжения также получило широкое распространение [2, 3]. Сварку полипропиленовых труб нагретым инструментом в раструб рекомендуется проводить при положительных температурах окружающего воздуха (ОВ) [4]. В случаях необходимости проведения сварки при других температурах воздуха работы выполняются в укрытиях (палатки, шатры и т. п.) с обеспечением подогрева зоны сварки [5]. В то же время в документе не приводится схема и параметры подогрева.

Методика определения технологических параметров предварительного подогрева (продолжительностей подогрева и охлаждения для выравнивания температур) для полипропиленовых муфт и свариваемых участков труб горячего и холодного водоснабжения нагревательной пластиной сварочного аппарата со сменными насадками при низких температурах окружающего воздуха разработана в работе [6]. Параметры подогрева определяются из условия обеспечения в конце подогрева близкого к однородному распределению температуры, значения которого лежат в допустимом для проведения сварки интервале.

Установление ограничения по температуре наружного воздуха, при котором допускается проводить сварочные работы, связано с недостаточным использованием возможностей существующей технологии сварки. Практически не используются методы управления температурным режимом сварки. Способы сварки полиэтиленовых труб для газопроводов с управлением тепловым процессом при низких температурах (до  $-50^{\circ}\text{C}$ ) встык нагретым инструментом (стыковая сварка) и при помощи соединительных деталей с закладными нагревателями

(муфтовая сварка) предложены работах [7, 8]. Опыт разработки способов стыковой и муфтовой сварки при низких температурах показал эффективность математических методов моделирования теплового процесса и методов управления температурным режимом сварки для обеспечения протекания теплового процесса по закономерностям, соответствующим изменению температуры при сварке в условиях допустимых для сварки температур воздуха [9, 10]. На основе изложенного, можно предположить, что управление температурным режимом и обеспечение такого же температурного поля при нагреве (оплавлении) и такого же темпа охлаждения, как и при допустимых температурах наружного воздуха, позволит провести сварку полипропиленовых труб в раструб при температурах воздуха ниже нормативных и обеспечить требуемую прочность соединения.

Целью данной работы является разработка методики определения технологических параметров сварки полипропиленовых труб в раструб при низких температурах на открытом воздухе из условия обеспечения протекания теплового процесса по закономерностям, соответствующим изменению температуры при сварке в условиях допустимых для сварки температур воздуха.

## Моделирование теплового процесса сварки

Моделирование температурных полей полиэтиленовых труб при стыковой и муфтовой сварке приводилось в работах [11–13]. Моделирование теплового процесса сварки полимерных труб в раструб не рассматривалось, несмотря на отличие процесса оплавления. При сварке труб в раструб свариваемые поверхности трубы и муфты оплавляются сменными насадками. Поверхность трубы оплавляется гильзой, а поверхность муфты — дорном, устанавливаемым на нагревательную пластину сварочного аппарата. Тем не менее, при моделировании теплового процесса сварки ПП труб в раструб можно исключить моделирование теплового состояния сменных насадок. На рис. 1 показана термограмма дорна на нагревательной пластине, полученная с помощью тепловизора, при температурах окружающего воздуха 15,  $-10$  и  $-42^{\circ}\text{C}$ . Из термограмм видно, что при темпера-

туре окружающего воздуха, равной 15 °С, перепад температур на поверхности дорна составляет 12 °С, который сохраняется при отрицательных температурах ОВ. При понижении температуры ОВ от 15 до –10 °С, максимальное значение температуры дорна уменьшается на 5 °С. При понижении температуры ОВ от –10 до –42 °С, температура дорна понижается на 3 °С. На поверхности гильзы термограммы аналогичны.

Исследования температур поверхности сменных насадок с помощью тепловизора показывают, что перепад температур с основания до торца насадки составляет 12 °С и не меняется с изменением температуры окру-

жающего воздуха. Таким образом, незначительным повышением температуры нагревательной пластины можно добиться одинакового распределения температур на рабочих поверхностях насадок. Стабильность температуры на поверхности сменных насадок позволяет упростить расчетную схему для моделирования теплового процесса оплавления поверхностей трубы и муфты, приведения их контакт, исключая моделирование теплового процесса в сменных насадках. Для этого необходимо на оплавливаемых поверхностях трубы и муфты задать температуру, изменяющуюся линейно от 260 до 248 °С.

На рис. 2 приведена схема для расчета температурного поля для трех режимов сварки: нагрева (оплавления) трубы и муфты, технологической паузы и охлаждения. При оплавлении и технологической паузы расчет ведется для муфты и трубы в отдельности. При охлаждении считается, что труба и муфта контактируют по свариваемым поверхностям. Обозначим  $\Omega$  область стенки муфты и трубы из полиэтилена.

Определение динамики температурного поля при раструбной сварке при допущении об однородности распределения температуры по угловой координате представляет осесимметричную задачу. Распределение температуры при раструбной сварке полипропиленовых труб можно описать уравнением теплопроводности с учетом двухфазной зоны:

$$\left( c(T) + \rho_{df}(T)L \frac{d\Theta}{dT} \right) \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \lambda(T) \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda(T) \frac{\partial T}{\partial z} \right), \quad (1)$$

где  $L$  — удельная теплота фазового перехода;  $\rho_f$  — плотность фазы, претерпевающей превращение;  $\rho_f = \rho^+$  — при оплавлении,  $\rho_f = \rho^-$  — при кристаллизации;  $\Theta(T) = \begin{cases} 0, & T < T_\Phi \\ 1, & T \geq T_\Phi \end{cases}$ .

В полимерных материалах не существует четко выраженной границы раздела фаз, фазовый переход происходит в интервале температур. В этом случае в математической модели необходимо учитывать промежуточную фазу между твердым и жидким веществом, в которой

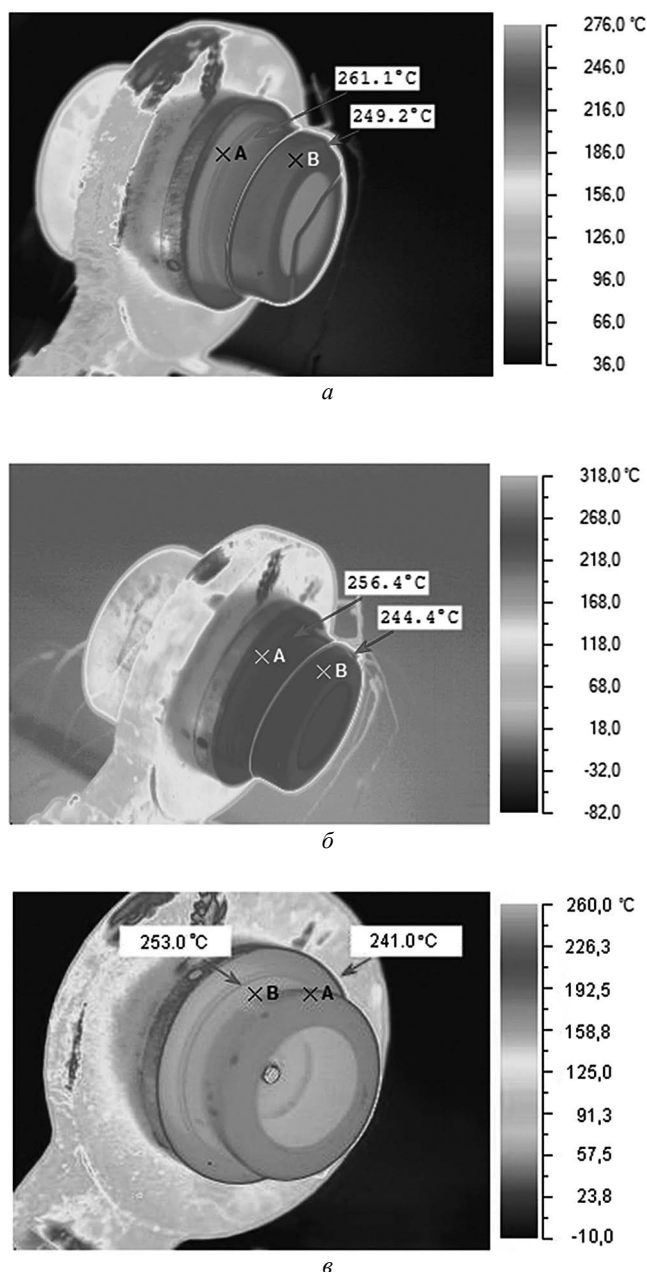


Рис. 1. Термограмма дорна на нагревательной пластине после 10 мин разогрева при различных температурах окружающего воздуха: а — при 15 °С; б — при –10 °С; в — при –42 °С

Fig. 1. Thermogram of mandrel pin on the heater plate after 10 min. of heating at the different ambient temperatures: а — at 15 °С; б — at –10 °С; в — at –42 °С

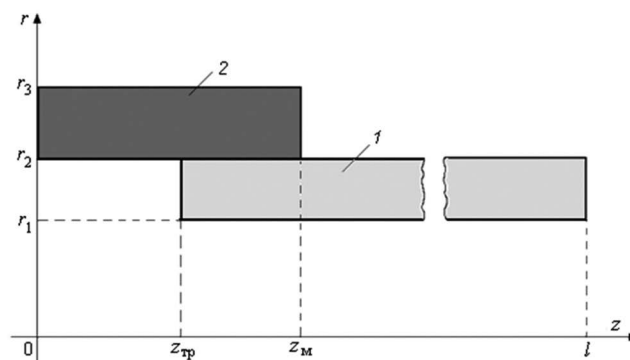


Рис. 2. Расчетная схема оплавления полипропиленовых труб: 1 — стенка трубы; 2 — муфта

Fig. 2. Calculation scheme for reflowing polypropylene pipes: 1 — pipe wall, 2 — coupling

вещество находится как в твердом, так и в жидком состоянии [14]. Теплоту фазового перехода в интервале температур учитывают различными способами, самый простой из которых заключается в формальном описании доли твердой фазы в виде линейной функции [15]. Учет в теплоте фазового перехода образования зародышей кристаллизации и их рост с использованием кинетического уравнения изотермической кристаллизации приводится, например, в работах [13, 16, 17]. Однако такой учет фазового перехода достаточно трудоемкий и требует определения параметров уравнения, используя данные дифференциального сканирующего калориметра (ДСК), и оправдан в случае учета формы кристаллов. Воспользуемся более простым способом учета фазового перехода в интервале температур без разделения зародышеобразования и их роста, используя суммарную скорость кристаллизации. В качестве приближения для функции Хэвисайда  $\Theta$  возьмем функцию  $\tilde{\Theta}(T)$ :

$$\tilde{\Theta}(T) = \begin{cases} 0, & T \leq T_s, \\ \frac{\int_{T_s}^T q(u) du}{\int_{T_s}^{T_L} q(u) du}, & T_s < T < T_L, \\ 1, & T \geq T_L, \end{cases}$$

характеризующую долю жидкой фазы, где  $q(T)$  — зависимость теплового потока от температуры, отнесенная к единице массы вещества, регистрируемая дифференциальным сканирующим калориметром,  $T_s$ ,  $T_L$  — температуры солидуса и ликвидуса.

Удельная теплота фазового перехода  $L$  определяется по формуле:

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

где  $t_1$ ,  $t_2$  — время начала и окончания фазового перехода. Следовательно,

$$\chi(T) = L \frac{d\tilde{\Theta}}{dT} = \begin{cases} 0, & T \leq T_s, \\ \frac{q(T)}{v_T}, & T_s < T < T_L, \\ 0, & T \geq T_L, \end{cases}$$

где  $v_T$  — скорость нагрева (охлаждения), варьируемая в ДСК.

В расчетах использовались непрерывные функции теплового потока, полученные ДСК при скорости изменения температуры 10 К/мин и аппроксимированные кубическими B-сплайнами [18–20]. На рис. 3 показаны, использованные далее в расчетах, функции теплового потока при оплавлении и кристаллизации полипропилена.

Таким образом, получим следующее уравнение для температуры во всей расчетной области  $\Omega$ :

$$\begin{aligned} & \left( c(T) + \rho_{df} \chi(T) \right) \frac{\partial T}{\partial t} = \\ & = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \lambda(T) \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda(T) \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \gamma Q(t), \end{aligned} \quad (2)$$

$$r, z \in \Omega, \quad 0 < t \leq t_m,$$

где коэффициенты уравнения выражаются следующими соотношениями:

$$\begin{aligned} c(T) &= \rho^- c^- + \tilde{\Theta}(T) (\rho^+ c^+ - \rho^- c^-); \\ \lambda(T) &= \lambda^- + \tilde{\Theta}(T) (\lambda^+ - \lambda^-), \end{aligned}$$

где  $c^-$ ,  $\rho^-$ ,  $\lambda^-$  и  $c^+$ ,  $\rho^+$ ,  $\lambda^+$  — удельная теплоемкость, плотность и теплопроводность для твердой и жидкой фазы материала трубы, соответственно.

Предполагается, что предварительный подогрев для проведения сварки осуществлен, как описывается в работе [6], и из расчетов известно распределение температуры  $T_n(r, z)$ , которое при определении динамики температурного поля сварки труб при низких температурах используется в качестве начального условия:

$$T(r, z, 0) = T_n(r, z). \quad (3)$$

В режиме нагрева на оплавляемых поверхностях и торцах трубы и муфты задаются условия первого рода с температурой  $T_{нагр}(z)$ :

$$\begin{aligned} T(r_2, z, t) &= T_{нагр}(z), \quad z_{тр} < z < z_m, \\ T(r, z_{тр}, t) &= T_{нагр}(z_{тр}), \\ T(r, z_m, t) &= T_{нагр}(z_m). \end{aligned} \quad (4)$$

В режиме технологической паузы — условие конвективного теплообмена:

$$\lambda_i \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{r=r_2} = -\alpha (T|_{r_2} - T_{окр}), \quad z_{тр} < z < z_m. \quad (5)$$

В режиме охлаждения, в зоне контакта внешней стенки трубы и внутренней поверхности муфты задается условие идеального теплового контакта:

$$\begin{aligned} \lambda_i \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=r_2-0} &= \lambda_i \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=r_2+0}, \quad z_{тр} < z < z_m; \\ T(r_2 - 0, z, t) &= T(r_2 + 0, z, t), \quad z_{тр} < z < z_m. \end{aligned} \quad (6)$$

Учитывая низкую теплопроводность полипропилена, примем, что на некотором удалении от зоны сварки, температура трубы не изменяется на протяжении всего времени протекания процесса. Таким образом, на торце трубы задается условие:

$$T(r, l, t) = T_{окр}, \quad (7)$$

на торце муфты:

$$T(r, 0, t) = T_{окр} \quad (8)$$

На внутренней поверхности трубы при нагреве, паузе и охлаждении задается условие идеального теплового контакта с воздухом:

$$\lambda_3 \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=r_1-0} = \lambda_{1,2} \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=r_1+0};$$

$$T(r_1-0, z, t) = T(r_1+0, z, t). \quad (9)$$

При  $r=0$  условие ограниченности решения:

$$\lim_{r \rightarrow 0} \lambda r \frac{\partial T}{\partial r} = 0. \quad (10)$$

При всех режимах на не контактирующей внутренней поверхности муфты  $G$  задается условие конвективного теплообмена:

$$\lambda_1 \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_G = -\alpha (T|_G - T_{\text{окр}}). \quad (11)$$

Представляемая расчетная схема, расположение трубы и муфты и математическая модель позволяют строить одну расчетную сетку, пригодную для расчета температурных полей в трубе и муфте в отдельности при нагреве и технологической паузе и для их охлаждения при приведении в контакт (сварке). Такой подход позволяет не пересчитывать температуры при приведении в контакт из-за изменения координат в пространстве и несоответствия нумераций узлов сетки. Расчет ведется для одной и той же расчетной сетки, в которой изменяются лишь граничные условия в зависимости от режима сварки — нагрева, технологической паузы и охлаждения. Основой предлагаемого подхода расчета послужили предварительные исследования температурных полей с помощью тепловизора.

Оплавление, технологическая пауза и приведение в контакт свариваемых поверхностей проводится согласно режимам, регламентируемым нормативными документами [4]. Моделирование теплового процесса трубной сварки с предварительным подогревом проводилось для полипропиленовой трубы SDR11 63×5,8 при температуре окружающего воздуха  $-40^\circ\text{C}$ . Расчеты проводились при следующих данных:  $r_1=25,7$  мм;  $r_2=31,5$  мм;  $r_3=40,8$  мм;  $\lambda_1=0,40$  Вт/(кг·К);  $\lambda_2=0,20$  Вт/(кг·К);  $r_1=862$  кг/м<sup>3</sup>;  $r_2=702$  кг/м<sup>3</sup>;  $c_1=6900$  Дж/(кг·К);  $c_2=1900$  Дж/(кг·К). Длина подогреваемой области нагревательного инструмента равнялась 30 мм.

### Результаты расчетов

Поскольку в условиях низких температур, при использовании предварительного подогрева тепловой процесс оплавления протекает практически также как при стандартной сварке, его рассматривать не будем. Свойства сварного соединения зависят от влияния сложной термомеханической истории на развитие микроструктуры, формирующейся при охлаждении соединения. Скорость охлаждения влияет на процесс кристаллизации, которая идет очень быстро при температурах между точками плавления и стеклования [16]. Процессы зародышеобразования и скорости роста сферолитов были рассмотрены в работах [21–23]. Детально рассмотрим процесс охлаждения, при котором формируется сварное соединение. Определены временные зависимости температур, сформированные при предельно допустимых значениях температуры окружающего воздуха для проведения сварки ПП труб (рис. 4). Температура  $0^\circ\text{C}$  является предельно допустимой для

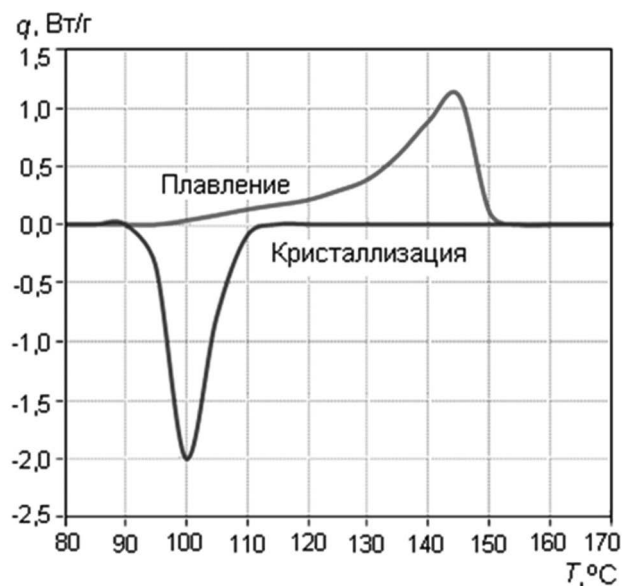


Рис. 3. Зависимости теплового потока при кристаллизации и плавлении полипропилена от температуры, регистрируемые дифференциальным сканирующим калориметром (ДСК)

Fig. 3. The dependence of heat flow at polypropylene crystallization and melting on temperature recorded by Differential Scanning Calorimeter

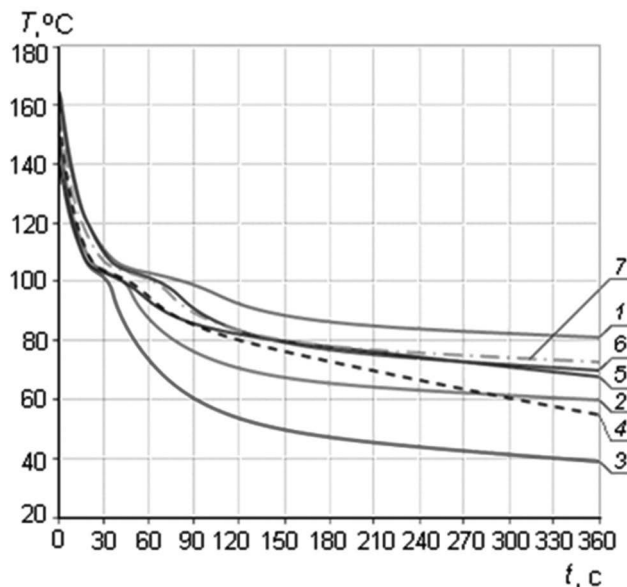


Рис. 4. Временные зависимости температур в точке (31,5; 0,085) мм (а) при различных температурах окружающего воздуха с теплоизоляционной камерой и без нее: 1 — при  $30^\circ\text{C}$ ; 2 — при  $5^\circ\text{C}$ ; 3 — при  $-40^\circ\text{C}$ ; 4 — при  $-40^\circ\text{C}$ , с подогревом, охлаждение в теплоизоляции, 2 см; 5 — при  $-40^\circ\text{C}$  с подогревом, охлаждение в камере (2 см воздух, 2 см толщина стенки камеры); 6 — при  $0^\circ\text{C}$ ; 7 — при  $20^\circ\text{C}$  (ПП 63 PN10)

Fig. 4. Time dependencies in the point (31,5; 0,085) mm (a) at different temperatures of ambient air both with and without heat-insulating chamber: 1 — at  $30^\circ\text{C}$ ; 2 — at  $5^\circ\text{C}$ ; 3 — at  $-40^\circ\text{C}$ ; 4 — at  $-40^\circ\text{C}$ , with heating, cooling in thermal insulation, 2 cm; 5 —  $-40^\circ\text{C}$  with heating, cooling in the chamber (2 cm — air; 2 cm = chamber wall thickness); 6 — at  $0^\circ\text{C}$ ; 7 — at  $20^\circ\text{C}$  (ПП 63 PN10)

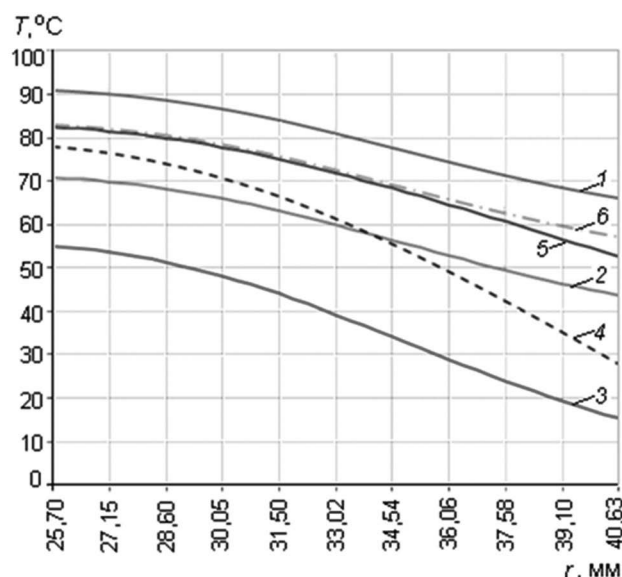


Рис. 5. Распределения температур в стенках трубы и муфты по радиальной координате после охлаждения сварного соединения в течение 4 мин при различных температурах окружающего воздуха и с теплоизоляционной камерой и без нее: 1 — при 30 °C; 2 — при 5 °C; 3 — при –40 °C; 4 — при –40 °C, с подогревом, охлаждение в теплоизоляции, 2 см; 5 — при –40 °C с подогревом, охлаждение в камере (2 см воздух, 2 см толщина стенки камеры); 6 — при 20 °C

Fig. 5. Temperature distribution in the pipe and coupling walls in radial coordinate after cooling the welded joint or 4 min. at different temperatures of ambient air both with and without heat-insulating chamber: 1 — at 30 °C; 2 — at 5 °C; 3 — at –40 °C; 4 — at –40 °C, with heating, cooling in thermal insulation, 2 cm; 5 — at –40 °C with heating, cooling in the chamber (2 cm — air, 2 cm = chamber wall thickness); 6 — at 20 °C

проведения сварочных работ, но поскольку при температурах воздуха ниже 5 °C время нагрева торцов свариваемых труб и муфты увеличивается на 50%, то распределение температуры становится практически идентично распределению, полученному при 20 °C (кривые 6, 7, рис. 4). Поэтому, за нижнюю границу допустимого коридора примем распределение, полученное при температуре ОВ 5 °C. При температурах ОВ ниже допустимых, временная зависимость температур выходит за допустимый коридор распределения (кривая 3, рис. 4). Для снижения темпов охлаждения предлагается использование различных типов теплоизоляции. Использование теплоизоляции (вспененный полиэтилен) толщиной 2 см не обеспечивает протекание теплового процесса по закономерностям, близким допустимой динамике температурного поля (кривая 4, рис. 4). Расчеты показывают, что при низких температурах ОВ увеличение толщины теплоизоляции до 3 см и его уменьшение до 1 см не приводит к существенному изменению распределения температуры по толщине стенки трубы и муфты в конце стадии охлаждения. Таким образом, использование вспененного полиэтилена в качестве теплоизоляции не позволяет управлять процессом охлаждения в широком температурном интервале. Аналогичный результат получается при использовании в качестве теплоизолятора других известных теплоизоляционных материалов. Такое положение объясняется тем, что традиционные

теплоизоляционные материалы эффективны при сохранении теплоты при стационарном тепловом процессе, при котором теплоемкость не влияет на распределение и динамику температуры. При управлении нестационарным тепловым процессом, каковым является процесс охлаждения при сварке, значение теплоемкости теплоизоляционного материала имеет существенное влияние на динамику и распределение температуры. Распределение температуры в муфте и трубе существенно меняется при малых значениях теплоемкости теплоизоляционного материала. Исходя из этого, для приближения распределения температуры в муфте и трубе к допустимым значениям предлагается использовать теплоизолирующие свойства воздушной прослойки, имеющей достаточно малое значение теплоемкости. Расчеты показали, что использование теплоизоляционной камеры с воздушной прослойкой 2 см и толщиной стенки 2 см позволяет добиться попадания в допустимый коридор распределения температур (кривая 5, рис. 4).

На рис. 5 представлены распределения температуры на стадии охлаждения в течение 4 мин, при использовании различных способов теплоизоляции и без нее. При допустимых значениях температур ОВ 5 °C и 30 °C охлаждение проводится без теплоизоляции (кривые 1, 2, рис. 5).

За критерий оценки возьмем перепад температур по радиальной переменной в конце этапа охлаждения при допустимых температурах воздуха. Так при температуре ОВ ровной 5 °C перепад достигает 28 °C, а при температуре 30 °C перепад температур составляет 26 °C. Например, перепад температур по радиальной координате в конце охлаждения при допустимой температуре воздуха (20 °C) составляет примерно 27 °C (кривая 6, рис. 5). При температуре ОВ –40 °C охлаждение без теплоизоляции приводит к существенному снижению температур, и кривые распределения температур лежат вне допустимого коридора изменения температур (кривая 3, рис. 5). Перепад температур в конце охлаждения с использованием теплоизоляции достигает 52 °C, что может привести к формированию значительных температурных напряжений в зоне сварного соединения и отразиться на качестве последнего. Использование камеры со слоем воздуха 2 см, выполненной из теплоизоляционного материала (вспененного полиэтилена) толщиной 2 см, приводит к допустимому распределению температуры в конце стадии охлаждения (кривая 5, рис. 5).

## Выводы

В результате проведенного исследования разработана методика определения технологических параметров сварки полипропиленовых труб в раструб при низких температурах, из условия обеспечения протекания теплового процесса по закономерностям, соответствующим изменению температуры при сварке в условиях допустимых для сварки температур воздуха.

Предлагаемая технология сварки, включающая предварительный подогрев свариваемых концов трубы и муфты с выравниванием температур, оплавление в штатном режиме с охлаждением сварного соединения в теплоизоляционной камере с воздушной прослойкой расчетной толщины, может быть рекомендована для монтажа и ремонта систем горячего и холодного водоснабжения из полипропиленовых труб в условиях низких температур.

## Литература

1. Plastics — the facts 2016. The special presentation is organised jointly by Messe Düsseldorf and PlasticsEurope Deutschland [Электронный ресурс]: <https://www.tecnofer.biz/plastics-the-facts-2016/>
2. Жерлыкина М. Н., Кононова М. С. Техничко-экономическое сравнение различных материалов труб, применяемых при поквартирной разводке системы отопления // Жилищное хозяйство и коммунальная инфраструктура. 2018. № 1 (4). С. 96–103.
3. Отставнов А. А., Харькин В. А. Напорные трубы из полипропилена четвертого поколения // Сантехника, отопление, кондиционирование. 2014. № 5. (149). С. 14–17.
4. СП 40-101-96. Проектирование и монтаж трубопроводов из полипропилена «Рандом сополимер». — М.: Минстрой России, 1996. 33 с.
5. СП 40-102-2000. Проектирование и монтаж трубопроводов систем водоснабжения и канализации из полимерных материалов. Общие требования. — М.: Госстрой России, ГУП ЦПП, 2001. 34 с.
6. Старостин Н. П., Васильева М. А., Ботвин Г. В. Определение технологических параметров предварительного подогрева полипропиленовых труб при сварке в раструб в условиях низких температур // Вестник Международной академии холода. 2016. № 2. С. 54–59. DOI: 10.21047/1606-4313-2016-15-2-54-59
7. Патент РФ № 2343331 RU F16L 13/00, 47/00. Способ сварки полимерных труб/Старостин Н. П., Герасимов А. И., Аммосова О. А. — № 2006144681/06; заявл. 14.12.2006; опубл. 10.01.2009, Бюл. № 1.
8. Патент РФ № 2450202 RU F16L47/02. Способ муфтовой сварки полимерных труб/Старостин Н. П., Ботвин Г. В., Данзанова Е. В. — № 2010130131/06; заявл. 19.07.2010; опубл. 10.05.2012, Бюлл. № 13.
9. Starostin N. P., Ammosova O. A. Simulation of the Thermal Process of Butt Welding of Polyethylene Pipes at Low Temperatures // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. 2016. 89 (3). pp. 714–720. DOI: 10.1007/s10891-016-1430-8
10. Старостин Н. П., Аммосова О. А. Управление тепловым процессом электромужфтовой сварки полиэтиленовых труб при низких температурах // Сварка и диагностика. 2017. № 5. С. 21–25.
11. 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. Vol. 2016. pp. 1–13. DOI: 10.1155/2016/6483295
12. Yoo J. H., Choi S., Nam J., Ahn K. H., Oh J. S. Numerical analysis of the heat transfer and fluid flow in the butt-fusion welding process // Korea-Australia Rheology Journal. 2017. 29 (1). pp. 37–49. DOI: 10.1007/s13367-017-0005-3
13. Chebbo Z., Vincent M., Boujlal A., Gueugnaut D., Tillier Y. Numerical and experimental study of the electrofusion welding process of polyethylene pipes // Polym. Eng. Sci. 2015. Vol. 55. Issue 1. pp. 123–131. DOI: 10.1002/pen. 23878
14. Mua Y., Zhaoa G., Chen A., Dong G., Li S. Numerical investigation of the crystallization and orientation behavior in polymer processing with a two-phase model // Computers & Chemical Engineering. 2014. Vol. 63. Pp. 91–107. DOI: 10.1016/j.compchemeng. 2013.12.010
15. Вабищевич П. Н., Варламов С. П., Васильев В. И., Васильева М. В., Степанов С. П. Численное моделирование температурного поля многолетнемерзлого грунтового основания железной дороги // Матем. моделирование. 2016. том 28. № 10. С. 110–124.

## References

1. Plastics — the facts 2016. The special presentation is organised jointly by Messe Düsseldorf and PlasticsEurope Deutschland [Электронный ресурс]: <https://www.tecnofer.biz/plastics-the-facts-2016/>
2. Garlikina M. N., Kononova M. S. Techno-economic comparison of various pipe materials used in door-to-door bussing of a heating system. *Housing and communal infrastructure*. 2018. No. 1 (4). P. 96–103. (in Russian)
3. Otstavnov A. A., Khar'kin V. A. Pressure pipe made of polypropylene the fourth generation. *Plumbing, heating, air conditioning*. 2014. No. 5. (149). P. 14–17. (in Russian)
4. SP 40-101-96. Design and installation of pipelines made of polypropylene «Random Sopolymer». Moscow. 1996. 33 p. (in Russian)
5. SP 40-102-2000. Design and installation of pipelines of water supply and Sewerage systems made of polymer materials. General requirements. Moscow. 2001. 34 p. (in Russian)
6. Starostin N. P., Vasileva M. A., Botvin G. V. Determination of technological parameters of preheating of the polypropylene pipes for welding into the socket at low temperatures. *Journal International Academy of Refrigeration*. 2016. No 2. p. 54–59. DOI: 10.21047/1606-4313-2016-15-2-54-59. (in Russian)
7. Patent RF № 2343331 RU F16L 13/00, 47/00. Method of welding of polymeric pipes/Starostin N. P. Gerasimov A. I., Amosova O. A. — № 2006144681/06; announced 14.12.2006; publ. 10.01.2009, bull. No. 1. (in Russian)
8. Patent RF № 2450202 RU F16L47/02. Method socket welding of plastic pipes/Starostin N. P., Botwin G. V., Danzanova E. V. — No. 20131/06; announced 19.07.2010; publ. 10.05.2012, bull. No. 13. (in Russian)
9. Starostin N. P., Ammosova O. A. Simulation of the Thermal Process of Butt Welding of Polyethylene Pipes at Low Temperatures. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. 2016. 89 (3). pp. 714–720. DOI: 10.1007/s10891-016-1430-8
10. Starostin N. P. Ammosova O. A. Control of thermal process of electrofusion welding of polyethylene pipes at low temperatures. *Welding and Diagnostics*. 2017. No. 5. P. 21–25. (in Russian)
11. 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. Vol. 2016. pp. 1–13. DOI: 10.1155/2016/6483295
12. Yoo J. H., Choi S., Nam J., Ahn K. H., Oh J. S. Numerical analysis of the heat transfer and fluid flow in the butt-fusion welding process. *Korea-Australia Rheology Journal*. 2017. 29 (1). pp. 37–49. DOI: 10.1007/s13367-017-0005-3
13. Chebbo Z., Vincent M., Boujlal A., Gueugnaut D., Tillier Y. Numerical and experimental study of the electrofusion welding process of polyethylene pipes. *Polym. Eng. Sci.* 2015. Vol. 55. Issue 1. pp. 123–131. DOI: 10.1002/pen. 23878
14. Mua Y., Zhaoa G., Chen A., Dong G., Li S. Numerical investigation of the crystallization and orientation behavior in polymer processing with a two-phase model. *Computers & Chemical Engineering*. 2014. Vol. 63. Pp. 91–107. DOI: 10.1016/j.compchemeng. 2013.12.010
15. Vabischevich P. N., Varlamov S. P., Vasilyev V. I., Vasilyeva M. V., Stepanov S. P. Numerical simulation of temperature field of long-term frozen ground of the railway. *Mathematical modeling*. 2016. Vol. 28. No. 10. P. 110–124. (in Russian)

16. Spina R., Spekowius M., Hopmann C. Simulation of crystallization of isotactic polypropylene with different shear regimes // *Thermochimica Acta*. 2018. Vol. 659. pp. 44–54. DOI: 10.1016/j.tca. 2017.10.023
17. Spina R., Spekowius M., Küsters K., Hopmann C. Multiphysics simulation of thermoplastic polymer crystallization // *Mater. Des.* 2016. Vol. 95. Pp. 455–469.
18. Grošelj J., Speleers H. Construction and analysis of cubic Powell — Sabin B-splines // *Computer Aided Geometric Design*. 2017. Vol. 57. Pp. 1–22. DOI: 10.1016/j.cagd. 2017.05.003
19. Engleitner N., Jüttler B. Patchwork B-spline refinement // *Computer-Aided Design*. 2017. Vol. 90. Pp. 168–179. DOI: 10.1016/j.cad. 2017.05.021
20. Segeth K. Some splines produced by smooth interpolation // *Applied Mathematics and Computation*. 2018. Vol. 319. Pp. 387–394. DOI: 10.1016/j.amc. 2017.04.022
21. Hamad F. G., Colby R. H., Milner S. T. Onset of flow-induced crystallization kinetics of highly isotactic polypropylene // *Macromolecules*. 2015. Vol. 48. Pp. 3725–3738. DOI: 10.1021/acs.macromol. 5b00386
22. Hamad F. G., Colby R. H., Milner S. T. Transition in crystal morphology for flowinduced crystallization of isotactic polypropylene // *Macromolecules*. 2016. Vol. 49. Pp. 5561–5575. DOI: 10.1021/acs.macromol. 6b00303
23. De Santis F., Pantani R., Titomanlio G. Effect of shear flow on spherulitic growth and nucleation rates of polypropylene // *Polymer*. 2016. Vol. 90. Pp. 102–110. DOI: 10.1016/j.polymer. 2016.02.059
16. Spina R., Spekowius M., Hopmann C. Simulation of crystallization of isotactic polypropylene with different shear regimes. *Thermochimica Acta*. 2018. Vol. 659. pp. 44–54. DOI: 10.1016/j.tca. 2017.10.023
17. Spina R., Spekowius M., Küsters K., Hopmann C. Multiphysics simulation of thermoplastic polymer crystallization. *Mater. Des.* 2016. Vol. 95. Pp. 455–469.
18. Grošelj J., Speleers H. Construction and analysis of cubic Powell — Sabin B-splines. *Computer Aided Geometric Design*. 2017. Vol. 57. Pp. 1–22. DOI: 10.1016/j.cagd. 2017.05.003
19. Engleitner N., Jüttler B. Patchwork B-spline refinement. *Computer-Aided Design*. 2017. Vol. 90. Pp. 168–179. DOI: 10.1016/j.cad. 2017.05.021
20. Segeth K. Some splines produced by smooth interpolation. *Applied Mathematics and Computation*. 2018. Vol. 319. Pp. 387–394. DOI: 10.1016/j.amc. 2017.04.022
21. Hamad F. G., Colby R. H., Milner S. T. Onset of flow-induced crystallization kinetics of highly isotactic polypropylene. *Macromolecules*. 2015. Vol. 48. Pp. 3725–3738. DOI: 10.1021/acs.macromol. 5b00386
22. Hamad F. G., Colby R. H., Milner S. T. Transition in crystal morphology for flowinduced crystallization of isotactic polypropylene. *Macromolecules*. 2016. Vol. 49. Pp. 5561–5575. DOI: 10.1021/acs.macromol. 6b00303
23. De Santis F., Pantani R., Titomanlio G. Effect of shear flow on spherulitic growth and nucleation rates of polypropylene. *Polymer*. 2016. Vol. 90. Pp. 102–110. DOI: 10.1016/j.polymer. 2016.02.059

### Сведения об авторах

#### Старостин Николай Павлович

д. т. н., профессор, главный научный сотрудник, и. о. зав. лабораторией климатических испытаний Института проблем нефти и газа СО РАН, 677980, Республика Саха (Якутия), г. Якутск, ул. Октябрьская, 1, nikstar56@mail.ru

#### Аммосова Ольга Александровна

к. т. н., старший научный сотрудник лаборатории климатических испытаний Института проблем нефти и газа СО РАН, 677980, Республика Саха (Якутия), г. Якутск, ул. Октябрьская, 1, ammosova\_o@mail.ru

### Information about authors

#### Starostin Nikolay Pavlovich

D. Sc., Professor, Chief Researcher, acting head of laboratory of climatic tests of Institute of Oil and Gas problems, SB RAS, 677980, Russia, Yakutsk, ul. Oktyabr'skaya, 1, nikstar56@mail.ru

#### Ammosova Olga Aleksandrovna

Ph. D., senior researcher of the laboratory of climatic tests of Institute of Oil and Gas problems, SB RAS, 677980, Russia, Yakutsk, ul. Oktyabr'skaya, 1, ammosova\_o@mail.ru



Тел.: +7 (495) 730-79-06, +7 (812) 327-49-18

XXVII Международная  
Продовольственная  
выставка «Петерфуд»

13–15 НОЯБРЯ, 2018  
САНКТ-ПЕТЕРБУРГ  
ЭКСПОФОРУМ

#### Разделы выставки:

- Мясо и мясопродукты. Мясная гастрономия.
- Птица. Яйцо.
- Рыба и морепродукты.
- Овощи. Фрукты.
- Замороженные продукты. П/ф.
- Молочная продукция. Сыры.
- Бакалея (зернопродукты, макаронные изделия)
- Готовые блюда, салаты.
- Масложировая группа.
- Кондитерская продукция.
- Снэки, орехи, сухофрукты.
- Соки. Воды. Безалкогольные напитки.
- Чай. Кофе. Какао.
- Спиртные напитки. Табак.
- Здоровое питание. Детское питание.
- Консервация. Соусы.
- Салон сопутствующего оборудования «ПетерфудТех».

#### Оргкомитет выставки:

ООО «КВК Империя-Форум»

Тел./ф.: 8 (812) 327-49-18, (495) 730-79-06

E-mail: imperia@imperiaforum.com, press@imperiaforum.com

<http://peterfood.ru/>