



**РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ СВАРКИ В РАСТРУБ ПОЛИЭТИЛЕНОВЫХ ТРУБ
В ГОРНОДОБЫВАЮЩЕЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ**

Н. П. Старостин, О. А. Аммосова

*Институт проблем нефти и газа СО РАН, E-mail: ammosova_o@mail.ru,
ул. Автоторожная 20, г. Якутск 677000, Республика Саха (Якутия), Россия*

Предлагается технология сварки в раструб полиэтиленовых труб, которая может применяться при строительстве систем трубопроводов из полиэтилена в горнодобывающей промышленности. На основе численного моделирования теплового процесса исследовано влияние низких температур на динамику температурного поля в сварном раструбном соединении. Показана необходимость предварительного подогрева и использования теплоизоляции на стадии охлаждения при сварке в условиях низких температур для протекания теплового процесса по закономерностям, характерным для сварки при допустимых температурах. Приведена методика определения размеров теплоизоляционной камеры для охлаждения сварного раструбного соединения при низких температурах из условия обеспечения скорости охлаждения, свойственной при сварке при допустимых температурах.

Полиэтиленовые трубы, сварка в раструб, предварительный подогрев, фазовый переход, системы трубопроводов, горнодобывающая промышленность

**DEVELOPMENT OF TECHNOLOGY OF POLYETHYLENE
PIPES SOCKET WELDING FOR MINING INDUSTRY**

N. P. Starostin and O. A. Ammosova

*Institute of Oil and Gas Problem, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences,
E-mail: ammosova_o@mail.ru, ul. Avtdorozhnaya 20, Yakutsk 677000, Republic of Sakha (Yakutia), Russia*

The proposed technology of polyethylene pipes socket welding can be used in construction of polyethylene pipe systems in mining industry. Based on numerical simulation of thermal process, the effect of low temperatures on the temperature field dynamics in socket weld joint is investigated. The need of preheating and usage of thermal insulation at the cooling stage during welding at low temperatures for the flow of heat process according to the patterns of welding at acceptable temperatures is shown. The procedure for calculating dimensions of heat-insulating chamber for cooling socket weld joint at low temperatures from the condition of ensuring cooling rate inherent to welding at acceptable temperatures is given.

Polyethylene pipes, socket welding, preheating, phase transition, piping systems, mining industry

Системы трубопроводов из полиэтилена получили широкое использование в горнодобывающей промышленности благодаря уникальным механическим характеристикам полиэтилена. Сопротивление к истиранию, гладкая внутренняя поверхность, высокая устойчивостью к химическим веществам, устойчивость к ударам, низкая стоимость, легкость монтажа и эксплуатации являются преимуществом полиэтиленовых труб в сравнении с тяжелыми металлическими трубами в горнодобывающей промышленности. Раструбная сварка считается удобной и эффективной при монтаже трубопроводов с большим количеством поворотов. Сварку полиэтиленовых

труб рекомендуется проводить при температурах окружающего воздуха от минус 15 °С до +45 °С. [1]. В случае необходимости проведения сварки при других температурах воздуха работы выполняются в укрытиях (палатки, шатры и т. п.) с обеспечением соблюдения заданного температурного интервала. При этом свариваемые концы труб на определенную длину вылета и соединительные детали должны иметь температуры из интервала, допустимого для проведения сварочных работ значения. Такая сварка связана с большими энергетическими затратами и длительной подготовкой, что недопустимо при аварийных ситуациях. Актуальной проблемой является разработка технологии оперативной раструбной сварки ПЭ труб при температурах воздуха ниже допустимых без использования укрытий.

Установление ограничения по температуре наружного воздуха, при котором допускается проводить сварочные работы, связано с повышением скорости охлаждения. В полиэтиленовых трубах и соединительных деталях, термостатированных при низкой температуре, при нагреве (оплавлении) периферийные области не прогреваются, что способствует повышению темпа охлаждения наряду с интенсивным конвективным теплообменом с окружающим воздухом. Известно, что при повышенных темпах охлаждения процесс формирования надмолекулярной структуры прерывается на ранней стадии и образуется мелкокристаллическая структура материала сварочного шва, обуславливающая низкую прочность сварного соединения [2]. Для повышения длительной прочности сварных соединений, полученных при низких температурах, разработана технология сварки с предварительным подогревом [3].

В данной работе предлагается технология сварки ПЭ труб в раструб при низких температурах, включающая следующие основные операции: предварительный подогрев свариваемых участков труб и соединительных деталей (муфт) с помощью серийно выпускаемого сварочного аппарата; оплавление в регламентированном режиме для допустимых температур воздуха; охлаждение соединения с использованием теплоизоляции. В качестве управляющих параметров служат технологические параметры (продолжительности подогрева и выравнивания температур, параметры теплоизоляции), которые определяются расчетным путем на основе моделирования динамики температурных полей.

При раструбной сварке полиэтиленовых труб соединение осуществляется по внешней поверхности трубы и внутренней поверхности муфты на длину раструба. Расчеты теплового процесса раструбной сварки, включая предварительный подогрев, проводились для полиэтиленовых труб ПЭ 100 SDR 11 63×5.8 и муфты с длиной раструба 26 мм. Температура окружающего воздуха принималась равной –40 °С. Допустим, что на торцах свариваемых труб и муфты проведен предварительный подогрев. Предварительный подогрев осуществляется дополнительной нагревательной пластиной со сменной насадкой подогревающей как внешнюю, так и внутреннюю стенки трубы и муфты. Температура сменной насадки выбирается из допущения отсутствия структурных изменений материала трубы. Расчетами определена температура сменной насадки для предварительного подогрева равная 35 °С. По конструктивным особенностям муфта может быть подогрета сменной насадкой на длину раструба. Глубина паза l_p сменной насадки для подогрева трубы определяется по формуле: $l_p = 1.66 l_{ras}$, где l_{ras} — длина раструба.

Вследствие низкой теплопроводности полиэтилена при подогреве участка трубы (муфты) сменной насадкой распределение температуры в стенке по радиальной переменной неоднородно и имеет максимумы на внешних поверхностях. Для получения распределения температуры близкого к однородному после подогрева производится выравнивание температур путем свободного охлаждения.

На рис. 1 представлены распределения температур в стенках муфты и трубы в конце подогрева продолжительностью 90 с для муфты и 60 с для трубы и последующего выравнивания температур продолжительностью 60 с. Таким образом, при температуре окружающего воздуха

–40 °С в результате подогрева и последующего охлаждения на открытом воздухе в свариваемых участках трубы и муфты получили распределение температуры в допустимом для сварки интервале. Оплавление свариваемых поверхностей можно произвести в регламентированном режиме для допустимых температур.

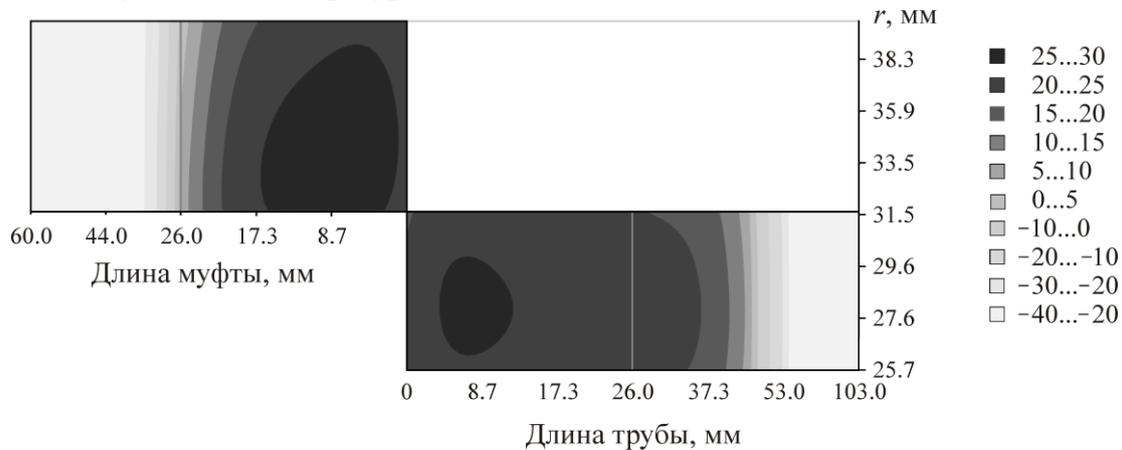


Рис. 1. Распределение температуры в стенках муфты и трубы после предварительного подогрева и охлаждения при температуре окружающего воздуха –40 °С

При сварке ПЭ труб в раструб свариваемые поверхности трубы и муфты оплавляются штатными сменными насадками сварочного аппарата. Внешняя свариваемая поверхность трубы оплавляется гильзой, а внутренняя поверхность муфты — дорном, устанавливаемыми на нагревательную пластину сварочного аппарата. При моделировании теплового процесса сварки ПЭ труб в раструб можно исключить математическое описание теплового состояния сменных насадок, на рабочих поверхностях которых поддерживается неизменное распределение температуры независимо от температуры окружающей среды [4]. На рис. 2 приведена схема для расчета температурного поля раструбного сварного соединения трубы с муфтой.

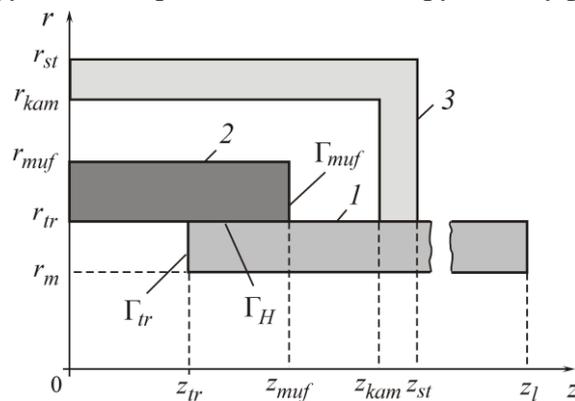


Рис. 2. Схема для расчета температурного поля соединения полиэтиленовой трубы и муфты в раструб: 1 — стенка трубы; 2 — муфта; 3 — теплоизоляционная камера

При оплавлении и технологической паузе расчет ведется для муфты и трубы отдельно для каждой, задавая на свободных поверхностях условия конвективного теплообмена с окружающим воздухом и температуры сменных насадок в зонах оплавления. Нестационарное температурное поле при сварке полиэтиленовых труб в раструб описывается уравнением теплопроводности с учетом двухфазной зоны при плавлении и кристаллизации полимерного материала [5]:

$$\left(c(T) - \rho^{-1} L^{100\%} \frac{dX_c}{dT} \right) \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \lambda(T) \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial z} \right), \quad (r, z) \in D, \quad 0 < t \leq t_m, \quad (1)$$

где c^- , ρ^- , λ^- и c^+ , ρ^+ , λ^+ — удельная теплоемкость, плотность и теплопроводность для твердой и жидкой фазы материала трубы соответственно; $L^{100\%}$ — удельная теплота фазового превращения полностью кристаллического полимера; X_C — степень кристалличности; T — температура; r, z — цилиндрические координаты; t — время; t_m — время расчета.

$$X_C(T) = \begin{cases} X_C^\infty, & T \leq T_1, \\ X_C^\infty - \frac{\int_{T_1}^T q(u) du}{L^{100\%} v_T}, & T_1 < T < T_2, \\ 0, & T \geq T_2. \end{cases} \quad (2)$$

Здесь $q(T)$ — зависимость теплового потока от температуры, отнесенная к единице массы вещества, регистрируемая дифференциальным сканирующим калориметром (ДСК); T_1, T_2 — температуры солидуса и ликвидуса; X_C^∞ — максимальная степень кристалличности исследуемого полимерного материала; v_T — скорость изменения температуры.

Дифференцируя в функции (2) интеграл по переменному верхнему пределу, имеем:

$$L^{100\%} \frac{dX_C}{dT} = \begin{cases} 0, & T \leq T_1, \\ -\frac{q(T)}{v_T}, & T_1 < T < T_2, \\ 0, & T \geq T_2. \end{cases} \quad (3)$$

Следовательно, зависимость эффективного коэффициента теплоемкости от температуры, учитывающая теплоту фазового превращения полимерного материала, определяется по данным ДСК.

Распределение температуры в трубе и муфте в начальный момент времени известно, и равно распределению в конце предварительного подогрева и выравнивания T_p :

$$T(r, z, t_p) = T_p(r, z). \quad (4)$$

В режиме нагрева на оплавливаемых поверхностях и торцах трубы и муфты задаются условия первого рода с температурой T_H :

$$T(r, z, t) = T_H, \quad (r, z) \in \Gamma_{tr} \cup \Gamma_H \cup \Gamma_{muf}. \quad (5)$$

В режиме технологической паузы на всех внешних поверхностях трубы и муфты $G = \partial D$ задается условие конвективного теплообмена:

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

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

$$\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{\Gamma_H} = \lambda(T) \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{\Gamma_H}, \quad z_{tr} < z < z_{muf},$$

$$T(r_{tr} - 0, z, t) = T(r_{tr} + 0, z, t), \quad z_{tr} < z < z_{muf}. \quad (7)$$

Учитывая низкую теплопроводность полиэтилена примем, что на некотором удалении от зоны сварки температура трубы не изменяется на протяжении всего времени протекания процесса. Таким образом, на торце трубы и муфты задаются условия:

$$T(r, l, t) = T_0, \quad T(r, 0, t) = T_0. \quad (8)$$

При всех режимах на не контактирующих внутренней и внешней поверхностях трубы и муфты $G_1 = \partial D \setminus \Gamma_H$ задается условие конвективного теплообмена:

$$\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{G_1} = -\alpha(T|_{G_1} - T_0). \quad (9)$$

Оплавление, технологическая пауза и приведение в контакт свариваемых поверхностей проводится согласно регламентируемым нормативными документами временным параметрам [6].

Расчеты проводились при следующих данных: $r_m = 25.7$, $r_{tr} = 31.5$, $r_{muf} = 40.0$, $z_{tr} = 34.0$, $z_{muf} = 60.0$, $z_1 = 134.0$ мм, $c^- = 1900$, $c^+ = 1800$ Дж/(кг·°C), $\rho^- = 954$, $\rho^+ = 700$ кг/м³, $\lambda^- = 0.38$, $\lambda^+ = 0.29$ Вт/(м·°C).

Охлаждение сварных соединений проводилось в теплоизоляционной камере. На рис. 3 приведено распределение температур в сечении вертикальной плоскостью сварного раструбного соединения трубы и муфты полученное в конце оплавления при температуре окружающего воздуха +20, -40 °C без и с предварительным подогревом. Как видно из расчетов, глубина оплавления муфты в середине раструба составила 2 и 1.2 мм при температуре окружающего воздуха +20 и -40 °C соответственно. После проведения предварительного подогрева и выравнивания глубина оплавления при нагреве становится одинаковой и составляет 2 мм.

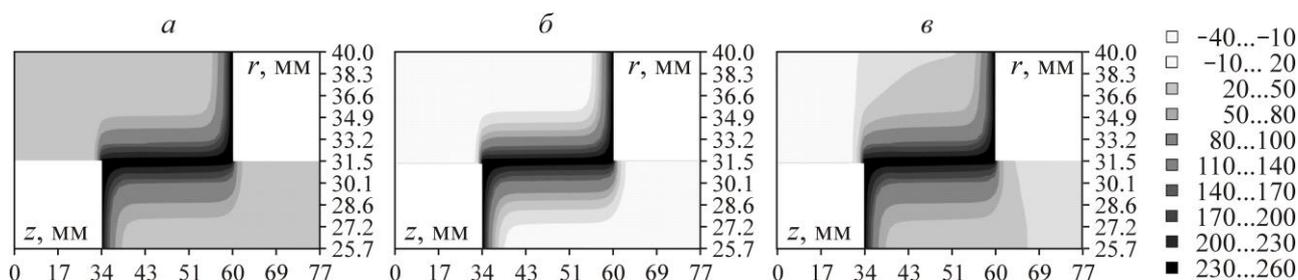


Рис. 3. Распределение температуры в стенках муфты и трубы при различных температурах окружающего воздуха: *a* — 20 °C после оплавления по регламентированному режиму; *б* — -40 °C после оплавления по регламентированному режиму; *в* — -40 °C после предварительного подогрева, охлаждения и оплавления

Исследование динамики температурного поля при охлаждении сварного раструбного соединения показало значительное увеличение темпа охлаждения при температурах воздуха ниже нормативных (рис. 4б). Для управления динамикой температурного поля на стадии охлаждения сварного соединения предлагается использование теплоизоляционной камеры с воздушной прослойкой.

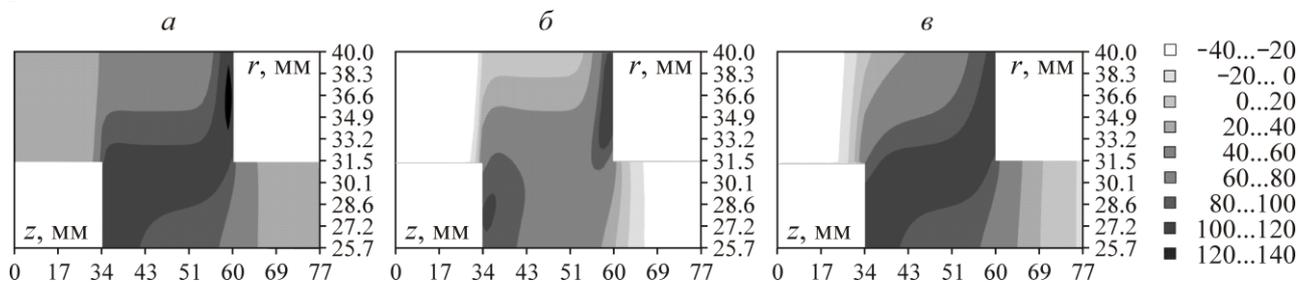


Рис. 4. Распределение температуры в стенках муфты и трубы при различных температурах окружающего воздуха: *a* — 20 °C, после оплавления по регламентированному режиму и охлаждения в течение 2 мин; *б* — -40 °C, после оплавления по регламентированному режиму и охлаждения в течение 2 мин; *в* — -40 °C, после предварительного подогрева, охлаждения, оплавления и охлаждения в теплоизоляционной камере в течение 2 мин

При охлаждении сварного соединения в теплоизоляционной камере с расчетной толщиной воздушной прослойки 2 см и стенкой камеры 1 см тепловой процесс протекает по закономерностям близким динамике температурного поля раструбной сварки при допустимых температурах (рис. 4в). При такой динамике температурного поля будет сформирована структура материала сварного шва, обеспечивающая необходимую прочность соединения.

ВЫВОДЫ

Показана возможность регулирования скорости охлаждения раструбного сварного соединения путем варьирования размерами теплоизоляционной камеры. Предлагаемые способы управления тепловым процессом при сварке полиэтиленовых труб в условиях низких температур приводят к динамике температурного поля, при которой будет сформирована структура материала сварного шва, свойственная при сварке при допустимых температурах. Технология сварки в раструб полиэтиленовых труб может применяться при строительстве систем трубопроводов из полиэтилена в горнодобывающей промышленности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. **SP 42-103-2003.** The design and construction of polyethylene gas-line pipes and the reconstruction of worn gas pipelines, Moscow, Polimergaz, FGUP TsPP, 2004, 86 pp. [СП 42-103-2003. Проектирование и строительство газопроводов из полиэтиленовых труб и реконструкция изношенных газопроводов. — М.: Полимергаз, ФГУП ЦПП, 2004. — 86 с.]
2. **Kaygorodov G. K. and Kargin V. Yu.** The influence of the cooling rate of the polyethylene weld on its strength, *Pipelines and ecology*, 2001, no. 2, pp. 13–14. (in Russian) [Кайгородов Г. К., Каргин В. Ю. Влияние скорости охлаждения полиэтиленового сварного шва на его прочность // Трубопроводы и экология. — 2001. — № 2. — С. 13–14.]
3. **Starostin N. P. and Ammosova O. A.** Simulation of the Thermal Process of Butt Welding of Polyethylene Pipes at Low Temperatures, *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2016, vol. 89, no. 3, pp. 706–713. [Старостин Н. П., Аммосова О. А. Моделирование теплового процесса сварки полиэтиленовых труб встык при низких температурах // Инженерно-физический журнал. — 2016. — Т. 89. — № 3. — С. 706–713.]
4. **Tikhonov R. S. and Botvin G. V.** Change of thermograms of working surfaces of replaceable nozzles for welding of polymer pipes in the bell at different air temperatures, *Problems of implementing the results of innovative developments: collection of articles on the results of the International Scientific and Practical Conference*, Sterlitamak, Agency of International Research, 2019, pp. 105–108. (in Russian) [Тихонов Р. С., Ботвин Г. В. Изменение термограмм рабочих поверхностей сменных насадок для сварки полимерных труб в раструб при различных температурах воздуха // Проблемы внедрения результатов инновационных разработок: сб. материалов Междунар. науч.-практ. конф. — Стерлитамак: АМИ, 2019. — С. 105–108.]
5. **Avdonin N. A.** Mathematical description of crystallization processes, Riga, Zinatnie, 1980, 180 pp. (in Russian) [Авдонин Н. А. Математическое описание процессов кристаллизации. — Рига: Зинатне, 1980. — 180 с.]
6. **SP 40-102-2000.** Design and installation of pipelines of water supply and Sewerage systems made of polymeric materials, Moscow, FGUP TsPP, 2001, 34 pp. [СП 40-102-2000. Проектирование и монтаж трубопроводов систем водоснабжения и канализации из полимерных материалов. — М.: ФГУП ЦПП, 2001. — 34 с.]