

DOI: 10.32864/polymmattech-2019-5-1-43-52

УДК 621.791.461

СПОСОБ ПОВЫШЕНИЯ ПРОЧНОСТИ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ТРУБ ИЗ ТЕРМОПЛАСТИЧНЫХ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Н. П. СТАРОСТИН, М. А. ВАСИЛЬЕВА, О. А. АММОСОВА, Е. В. ДАНЗАНОВА⁺, Г. В. БОТВИН

ФГБУН Институт проблем нефти и газа СО РАН, ул. Октябрьская, 1, 677980, г. Якутск, Россия

Для сварки нагретым инструментом в раструб труб из термопластичных полимерных материалов предложен способ повышения прочности получаемых сварных соединений. Сущность сварки в условиях низких температур окружающего воздуха состоит в предварительном подогреве с градиентным распределением температуры в концах свариваемых труб. Исследовали динамику температурного поля при подогреве конца трубы с внутренней, а муфты с внешней поверхности сторон. С помощью расчета определили продолжительность предварительного подогрева, при которой достигается распределение температуры с меньшим градиентом на стадии кристаллизации термопластичного материала сварного шва, что обуславливает уменьшение температурных напряжений и повышение прочности соединения. С помощью полученных результатов математического моделирования провели сварку нагретым инструментом в раструб полипропиленовых труб марки PPRC, PN20 63×10,5 при различных температурах окружающего воздуха. Эффективность использования предварительного подогрева с градиентным распределением температуры при сварке исследовали с помощью оригинальной методики определения прочности, которая отличается тем, что при испытаниях разрушение образца происходит именно по месту сплавления материала сварного соединения. Результаты испытаний показали, что предварительный подогрев с градиентным распределением температуры при сварке при низких температурах окружающего воздуха позволяет повысить прочность сварных соединений на 10–12%, по сравнению с прочностью сварных соединений, полученных по действующим нормативным документам сварки труб.

Ключевые слова: сварка нагретым инструментом в раструб, полипропиленовая труба, предварительный подогрев, градиентное распределение температуры, низкие температуры окружающего воздуха, арктический климат, испытания сварных соединений.

METHOD FOR IMPROVING THE STRENGTH OF WELDED JOINTS FOR PIPES OF THERMOPLASTIC POLYMER MATERIALS

N. P. STAROSTIN, M. A. VASILEVA, O. A. AMMOSSOVA, E. V. DANZANOVA⁺, G. V. BOTVIN

Institute of Oil and Gas Problems of Siberian Branch Russian Academy of Sciences, Oktyabrskaya St., 1, 677980, Yakutsk, Russia

For welding with a heated tool in the socket of pipes from thermoplastic polymeric materials, a method has been proposed for increasing the strength of the resulting welded joints. The essence of welding in conditions of low ambient temperatures consists in preheating with a gradient temperature distribution at the ends of the pipes being welded. The dynamics of the temperature field is investigated when the end of the pipe is heated from the inside, and the coupling from the external surface of the sides. Using the calculation, the duration of preheating is determined, at which the temperature distribution is achieved with a smaller gradient at the crystallization stage of the thermoplastic material of the weld, which leads to a decrease in temperature stresses and an increase in the joint strength. Using the obtained results of mathematical modeling, welding of PPRC, PN20 63 × 10.5 polypropylene pipes with a heated tool at various ambient temperatures

⁺ Автор, с которым следует вести переписку. E-mail: Dhv4071@mail.ru

was carried out with a heated tool. The effectiveness of the use of preheating with a gradient temperature distribution during welding was investigated using an original method for determining strength, characterized in that, during testing, the destruction of the sample occurs precisely at the place of fusion of the material of the welded joint. The test results showed that preheating with a gradient temperature distribution during welding at low ambient temperatures makes it possible to increase the strength of welded joints by 10–12% compared to the strength of welded joints obtained according to the current regulatory documents for pipe welding.

Keywords: welding with a heated tool in the socket, polypropylene pipe, preheating, distribution of temperature gradient, low ambient temperatures, arctic climate, testing of welded joints.

Введение

Существующие технологии сварки изделий из полимерных материалов позволяют получать качественные сварные соединения при положительных температурах окружающего воздуха, что ограничивает монтаж полипропиленовых труб, проведение ремонта полимерных изделий на открытом воздухе при низких температурах, в условиях арктического климата.

Сварка полипропиленовых труб, широко применяемых в системах холодного и горячего водоснабжения, производится нагретым инструментом. После того как температура поверхности концов труб достигнет температуры текучести и плавления термопласта, инструмент удаляют, а соединяемые поверхности приводят в контакт и охлаждают на открытом воздухе до формирования сварного шва. Режим сварки полипропиленовых труб при допустимых температурах окружающего воздуха регламентирован нормативными документами, согласно которым в случаях необходимости проведения сварки при отрицательных температурах воздуха работы рекомендуется выполнять в укрытиях с обеспечением предварительного подогрева зоны сварки [1–2]. Поскольку полимерные материалы имеют низкую теплопроводность, в условиях низких температур предварительный подогрев можно осуществить в локальной области на концах свариваемых труб, применяя для сокращения продолжительности сварки инструмент с температурой выше температуры окружающего воздуха и ниже температуры размягчения полипропилена. При этом после предварительного подогрева необходимо охлаждение на открытом воздухе для выравнивания температуры, близкое к однородному, для обеспечения качественного сварного соединения в заданном интервале. Процесс оплавления при этом проводится согласно регламентированному режиму при сварке с предварительным подогревом и охлаждением сварного соединения в теплоизоляционной камере, обеспечивающей протекание теплового процесса в зоне термического влияния соединения по закономерностям, близким динамике температурного поля при сварке в нормальных условиях. Прочность сварного соединения соответствует прочности соединения, полученной при допустимой температуре [3].

Цель работы — исследование динамики температурного поля при сварке полипропиленовых труб в раструб при низких температурах и определение способов достижения распределения температуры с меньшей неоднородностью на стадии кристаллизации материала сварного шва, обуславливающей снижение термических напряжений в термопласте и повышение прочности сварного соединения.

Математическое моделирование предварительного подогрева

При сварке в условиях положительных допустимых температур окружающего воздуха (ОВ) уменьшить неравномерность распределения температуры достаточно сложно ввиду верхнего ограничения максимально достижимой температуры ОВ и, следовательно, температуры поверхностей свариваемых труб и муфты. При температурах ОВ ниже допустимых для успешной сварки можно осуществить предварительный неравномерный (градиентный) подогрев конца свариваемой трубы и муфты, что позволяет получить на свариваемых поверхностях температуру в допустимом для сварки интервале. Градиентный нагрев обычно применяют при производстве заготовок изделий, используя индукционные нагреватели, которые наиболее эффективны в условиях серийного и массового производства. Для нагрева поверхностей при сварке полипропиленовых труб широкое применение получили нагреватели со сменными насадками [4, 5].

Для получения градиентного распределения температуры при предварительном подогреве свариваемых труб и муфты при низких температурах ОВ, используют сменные насадки (гильзу и дорн), в которых поддерживают постоянную температуру $T_{наг}$. Нестационарное температурное поле при предварительном подогреве трубы с внутренней поверхности, а муфты с наружной поверхности (рис. 1, а) описывают уравнением теплопроводности в цилиндрических координатах:

$$C_1 \rho_1 \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \lambda_1 \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_1 \frac{\partial T}{\partial z} \right), \quad (1)$$

$$(r, z) \in D, \quad 0 < t \leq t_{gp},$$

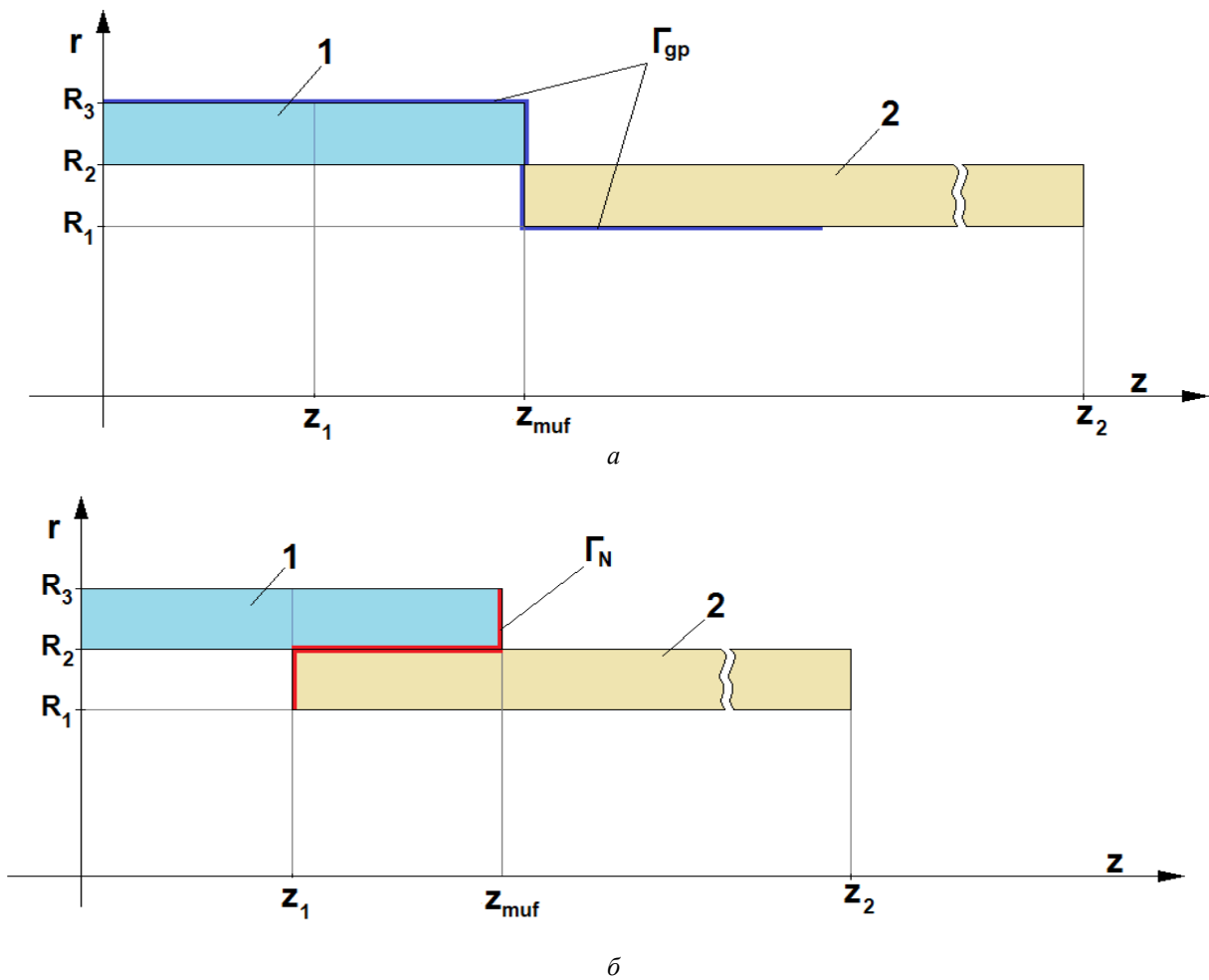


Рисунок 1 — Схема расчета градиентного подогрева (а) и раструбной сварки (б): 1 – муфта, 2 – труба
 Fig. 1 — Scheme for calculating the gradient heating (a) and socket welding (b): 1 – coupling, 2 – pipe

с начальным условием:

$$T(r, z, 0) = T_{okr}, \quad (2)$$

граничным условием на подогреваемой поверхности:

$$T(r, z, t) = T_{nag}, \quad (r, z) \in \Gamma_{gp}, \quad (3)$$

и на свободных поверхностях $G = \partial D / \Gamma_{gp}$:

$$\lambda_1 \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_G = -\alpha (T|_G - T_{okr}). \quad (4)$$

Здесь $T(r, z, t)$, °С — температура трубы в момент времени t ; $C_1(T)$, Дж/(кг·°С) — удельная теплоемкость; $\rho_1(T)$, кг/м³ — удельная плотность; $\lambda_1(T)$, Вт/(м·°С) — коэффициент теплопроводности; T_{okr} , °С — температура ОВ; T_{nag} , °С — температура нагревательного элемента; t_{gp} , с — продолжительность градиентного подогрева; r, z — цилиндрические координаты; Γ_{gp} — подогреваемые поверхности труб и муфты; z_2 , мм — длина трубы. Задачу решали численно методом конечных разностей для полипропиленовой трубы PN 20 с наружным диа-

метром $\varnothing = 63$ мм при следующих исходных данных: $R_1 = 21,0$; $R_2 = 31,5$ мм — внешний радиус трубы и внутренний радиус муфты; $R_3 = 41,5$ мм; $\lambda_1 = 0,22$ Вт/(кг·К); $\rho_1 = 862$ кг/м³; $c_1 = 1500$ Дж/(кг·К); $T_{nag} = 80$ °С; $T_{okr} = -40$ °С. В расчетах принято, что муфта подогрета сменной насадкой на длину, равной длине самой муфты $z_{muf} = 60$ мм. Глубину паза l_{paz} сменной насадки для подогрева трубы определяли следующим образом: $l_{paz} = 1,66 \cdot l_{rastr}$, где l_{rastr} — глубина раструба. Для трубы с диаметром $\varnothing = 63$ мм глубина раструба равна $l_{rastr} = 28$ мм.

На рис. 2 представлено распределение температуры в стенках трубы (а) и муфты (б) при подогреве нагревательным инструментом с температурой 80 °С в момент достижения температуры 20 °С на свариваемых поверхностях. Продолжительности градиентного подогрева $t_{gp} = 420$ с — для трубы; $t_{gp} = 360$ с — для муфты. Для одновременного начала процесса нагрева (оплавления) градиентный подогрев трубы следует начать на 60 с раньше. Абсолютная разность температур на внешних и внутренних поверхностях

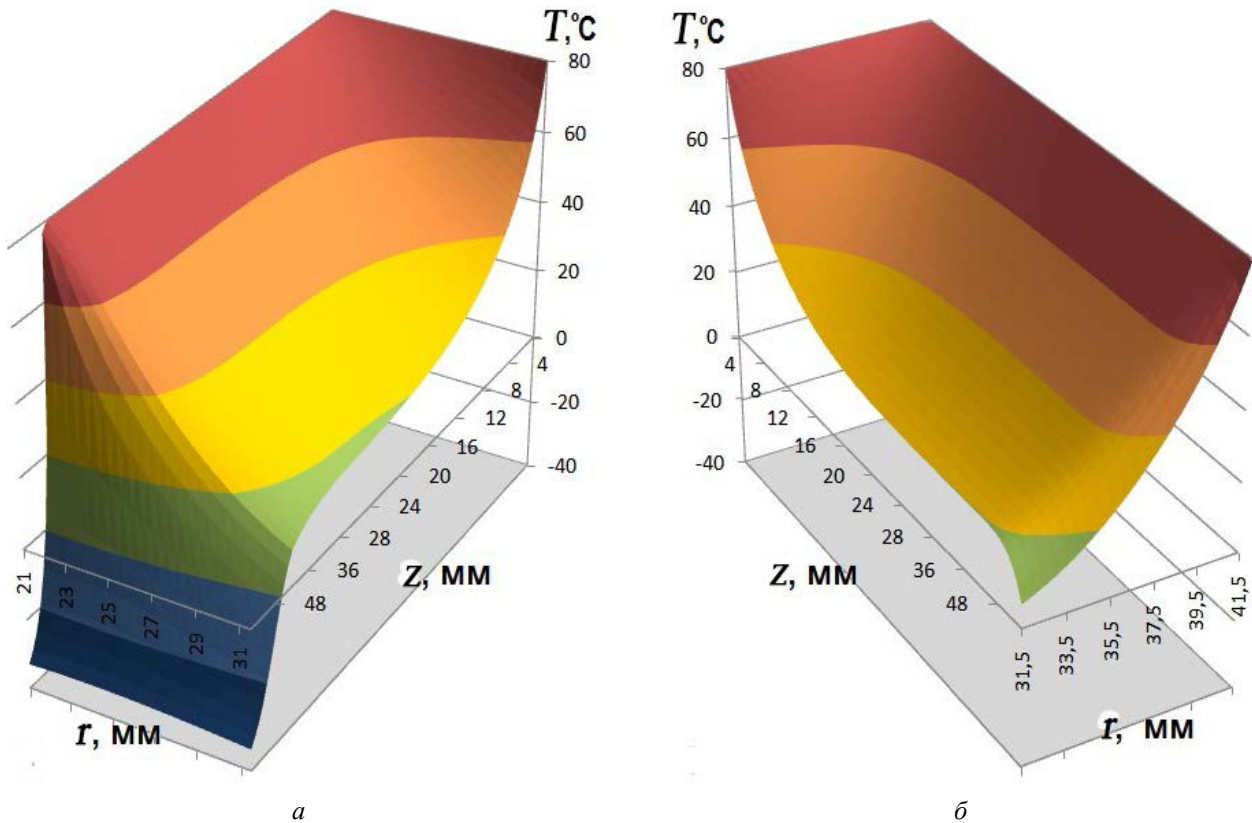


Рисунок 2 — Распределение температуры в трубе (а) и муфте (б) в момент окончания градиентного подогрева при температуре ОВ $T_{окр} = -40^\circ\text{C}$
 Fig. 2 — Temperature distribution in the pipe (a) and coupling (b) at the time of the end of the gradient heating at the ambient air temperature $T_{окр} = -40^\circ\text{C}$

муфты и трубы после подогрева составляет 60°C . Полученное градиентное распределение температуры при воздействии сменными насадками для оплавления будет способствовать получению более однородного распределения температуры на стадии охлаждения и формирования сварного шва.

Тепловой процесс сварки

При допустимых температурах ОВ сварка полипропиленовых труб в раструб осуществляется следующим образом:

- с помощью нагревательного устройства, состоящего из гильзы и дорна, с температурой 260°C проводят нагрев внутренней поверхности раструба муфты и наружной поверхности конца трубы в течение регламентированного времени;

- трубу и муфту с оплавленными поверхностями снимают с нагревателей, соединяют друг с другом и охлаждают на открытом воздухе. Время между снятием нагревателя и соединением труб составляет продолжительность технологической паузы.

При температурах воздуха ниже допустимых рекомендуется предварительно подогреть конец трубы и муфту до допустимой для сварки температуры, выдержать определенное время для выравнивания температур, провести нагрев поверхностей и соединение трубы с муфтой, как при допустимой температуре. Охлаждение сварного соединения рекомендуется проводить в

теплоизоляционной камере. Теоретически показано, что при подогреве с однородным распределением температуры и охлаждении в теплоизоляционной камере тепловой процесс протекает по закономерностям, соответствующим изменению температуры при сварке в условиях допустимых для сварки температур ОВ [6].

Согласно расчетной схеме (рис. 1, б) обозначим Ω область стенки муфты и трубы. Нестационарное температурное поле при сварке с учетом теплоты фазового превращения (кристаллизации) в интервале температур описывают уравнением [8]:

$$\left(c(T) - \rho^- L^{100\%} \frac{dX_c}{dT} \right) \frac{\partial T}{\partial t} = \text{div} (\lambda \text{grad } T), \quad (5)$$

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

с начальными и краевыми условиями, коэффициенты уравнения выражаются следующими соотношениями:

$$c(T) = \rho^+ c^+ + X_c(T) \cdot (\rho^- c^- - \rho^+ c^+), \quad (6)$$

$$\lambda(T) = \lambda^+ + X_c(T) \cdot (\lambda^- - \lambda^+),$$

c^-, ρ^-, λ^- и c^+, ρ^+, λ^+ — удельная теплоемкость (Дж/(кг·°C)), плотность (кг/м³) и теплопроводность

(Вт/(м·°C)) для твердой и жидкой фазы материала трубы соответственно, T , °C — температура; X_C — степень кристалличности; $L^{100\%}$, Дж/кг — удельная теплота фазового превращения полностью кристаллического полимера.

Степень кристалличности полипропилена определяли по формуле:

$$X_C(T) = \begin{cases} X_C^\infty, & T \leq T_S, \\ X_C^\infty - \frac{\int_{T_S}^T q(u) du}{v_T}, & T_S < T < T_L, \\ 0, & T \geq T_L, \end{cases} \quad (7)$$

где $q(T)$, Вт/г — зависимость теплового потока от температуры, отнесенная к единице массы вещества, регистрируемая дифференциальным сканирующим калориметром (ДСК); T_S, T_L , °C — температуры солидуса и ликвидуса; X_C^∞ — максимальная степень кристалличности исследуемого полимерного материала; v_T , °C/c — скорость изменения температуры. Следовательно,

$$L^{100\%} \frac{dX_C}{dT} = \begin{cases} 0, & T \leq T_S, \\ -\frac{q(T)}{v_T}, & T_S < T < T_L, \\ 0, & T \geq T_L, \end{cases} \quad (8)$$

Предлагаемый подход описания динамики температурного поля при сварке учитывает теплоту фазового превращения, используя данные ДСК и функцию степени кристалличности. При этом не решают уравнение кинетики кристаллизации полимера, как в работах [7–8]. Использование функции степени кристалличности позволило учесть, например, что полиэтилен кристаллизуется частично и доля кристаллической части не превышает максимального значения X_C^∞ . Задачу определения динамики температурного поля при раструбной сварке в различных условиях решали методом конечных разностей.

Функции теплового потока к единице массы вещества регистрировали, используя дифференциальный сканирующий калориметр (ДСК) «DSC 204 F1» («NETZSCH», Германия) при дискретных значениях температуры. В расчетах использовали непрерывные функции теплового потока при скорости изменения температуры 40 °C/мин, полученные аппроксимацией кубическим В-сплайном [9]. На рис. 3 представлены использованные в расчетах функции теплового потока при оплавлении и кристаллизации полипропилена.

Распределение температуры в трубе и муфте в начальный момент времени (t_{gp}) принимали равным

распределению температуры после завершения градиентного подогрева. В режиме нагрева на оплавляемых поверхностях и торцах трубы и муфты (Γ_N) задавали условия первого рода с температурой T_N . Условие конвективного теплообмена с ОБ с температурой T_{okr} задавали в режиме технологической паузы.

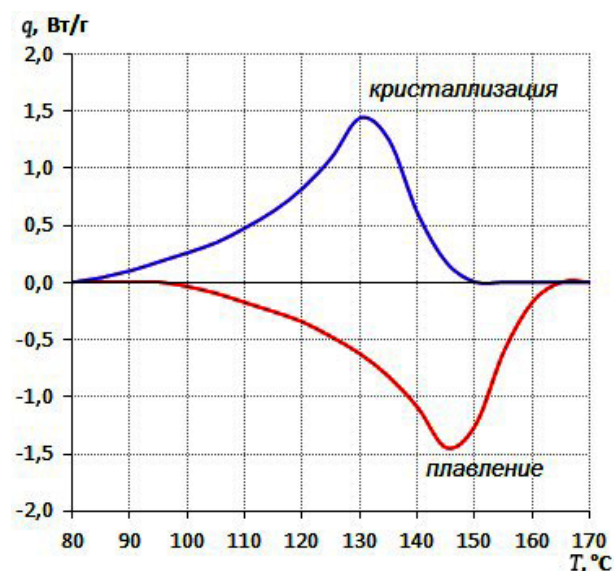


Рисунок 3 — Зависимости теплового потока при кристаллизации и плавлении полипропилена от температуры

Fig. 3 — Dependences of heat flow during crystallization and melting of polypropylene on temperature

В режиме охлаждения в зоне контакта внешней стенки трубы и внутренней поверхности муфты задавали условие идеального теплового контакта. Учитывая низкую теплопроводность полипропилена, приняли, что на некотором удалении z_2 от зоны сварки температура трубы не изменяется на протяжении всего времени протекания процесса. На внутренней поверхности трубы при нагреве, паузе и охлаждении задавали условие идеального теплового контакта с ОБ, а при $r = 0$ условие ограниченности решения.

При всех режимах на не контактирующей внутренней поверхности муфты задавали условие идеального теплового контакта с ОБ, а при $r = 0$ условие ограниченности решения. На свободных поверхностях трубы и муфты $G_2 = \partial D / \Gamma_N$ происходит конвективный теплообмен с ОБ.

Расчет теплового процесса сварки с градиентным подогревом по формулам (5, 6) проводили для полипропиленовой трубы PN20 63×10,5 при температуре ОБ минус 40 °C. Расчеты проводили при следующих данных: $R_1 = 21,0$; $R_2 = 31,5$; $R_3 = 41,5$ мм; $\lambda^- = 0,40$; $\lambda^+ = 0,20$ Вт/(кг·K); $\rho^- = 862$; $\rho^+ = 702$ кг/м³; $c^- = 1500$; $c^+ = 1900$ Дж/(кг·K). Длина области нагревательного инструмента 28 мм.

На рис. 4 как вариант решения показано изменение во времени температуры в стенке трубы на расстоянии 14 мм от торца и 0,5 мм от боковой наружной поверхности при сварке с градиентным подогревом.

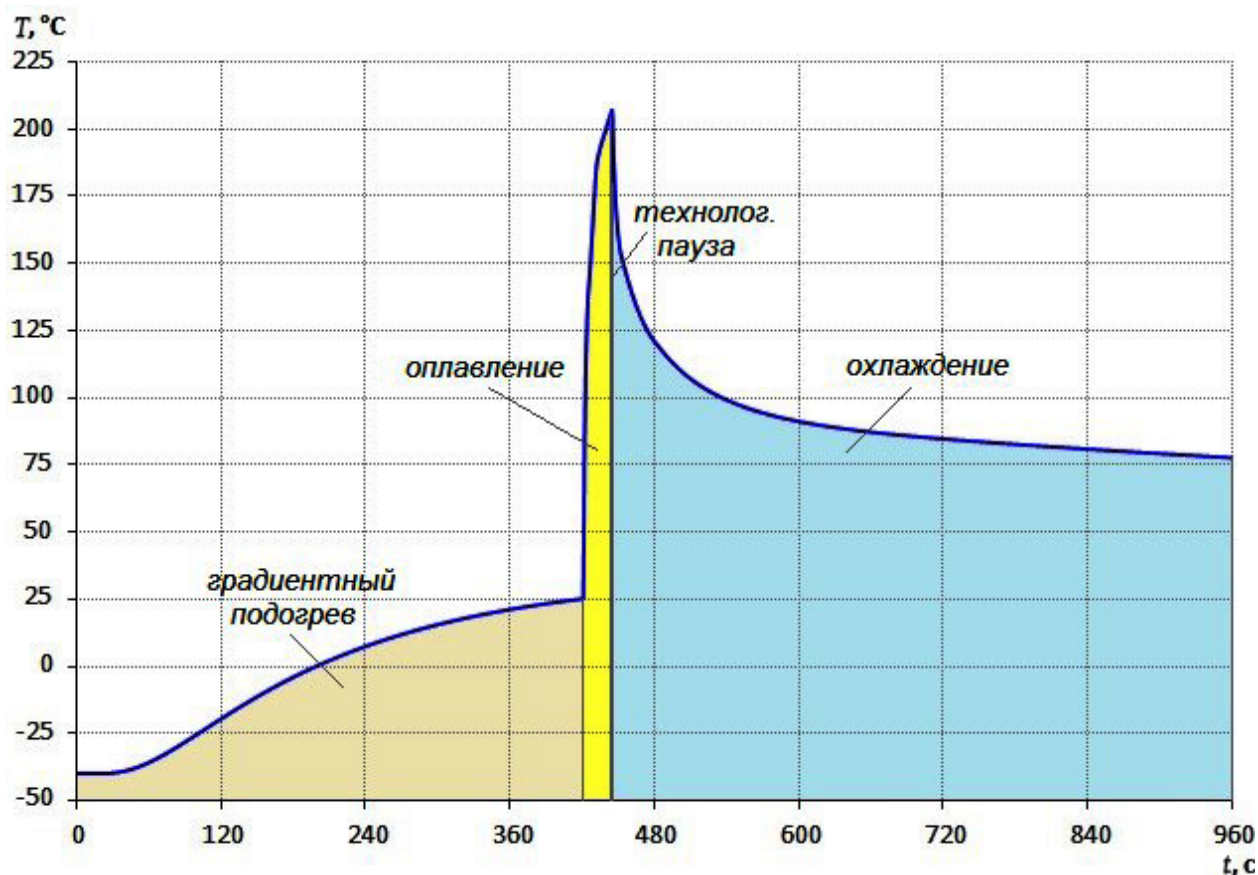


Рисунок 4 — Изменение во времени температуры в стенке трубы на расстоянии 14 мм от торца и 0,5 мм от боковой наружной поверхности при температуре окружающего воздуха -40°C

Fig. 4 — Change in time of temperature in the pipe wall at a distance of 14 mm from the end and 0.5 mm from the side outer surface at an ambient temperature -40°C

В работе [10] показано, что математическая модель с предлагаемым способом учета теплоты фазового перехода в интервале температур соответствует реальному тепловому процессу при электромужфтовой сварке полиэтиленовых труб. При сварке в раструб, в отличие от электромужфтовой сварки, после оплавления поверхностей до соединения трубы и муфты выдерживают технологическую паузу, при которой оплавленные поверхности свободно охлаждаются. При сварке полипропиленовых труб в раструб процессы оплавления и охлаждения аналогичны тепловому процессу при сварке с помощью муфт с закладным нагревателем, т. е. предлагаемая математическая модель должна его адекватно описывать. В связи с этим с помощью тепловизора исследовали процесс охлаждения при технологической паузе. Нагрев поверхности исследуемой полипропиленовой трубы осуществляли нагревательным устройством с температурой на поверхности гильзы 260°C в течение 24 с при температуре ОВ 7°C . На рис. 5 представлены термограммы оплавленной поверхности трубы в начале и конце технологической паузы продолжительностью 4 с. При технологической паузе характерно резкое снижение температуры поверхности с 209°C до 178°C , которое с достаточной для практиче-

ского использования точностью описывается соответствующей расчетной зависимостью (5).

На рис. 6, а представлены характерные кривые изменения температуры по радиусу в середине раструбного соединения, полученного сваркой при допустимой температуре ОВ 20°C (рис. 6, а) и с градиентным подогревом конца трубы и муфты с охлаждением в теплоизоляционной камере при температуре минус 40°C (рис. 6, б) в различные моменты времени. Согласно данным ДСК кристаллизация материала сварного шва начинается при температуре 150°C и завершается при 80°C на поверхности соединения трубы и муфты. Градиентный подогрев обеспечивает на стадии кристаллизации материала сварного шва более равномерное распределение температуры, чем при сварке при допустимой температуре, что обуславливает снижение остаточных температурных напряжений. При сварке без подогрева при допустимых температурных пределах в момент завершения кристаллизации разница температур на внешних и внутренних поверхностях стенок трубы и муфты составляет 45°C (рис. 6, а, кривая 3). При сварке с градиентным подогревом эта разница составляет 20°C (рис. 6, б, кривая 3). При сварке в интервале допустимых температур кристаллизация начинается через 3 с после приведения трубы и муфты в контакт и завершается примерно

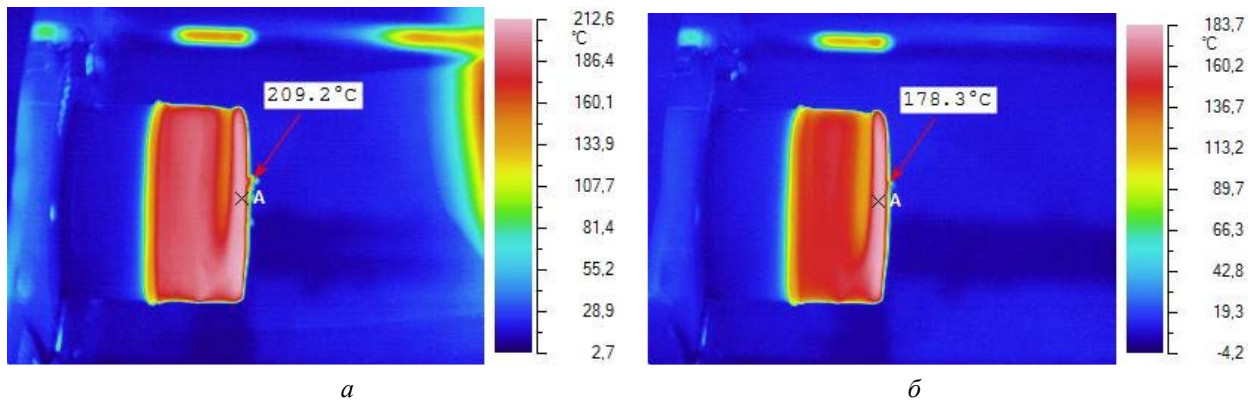


Рисунок 5 — Термограммы оплавленной поверхности трубы в начале (а) и конце технологической паузы продолжительностью 4 с (б)
 Fig. 5 — Thermograms of the melted surface of the pipe at the beginning (a) and end of the technological pause for 4 seconds (b)

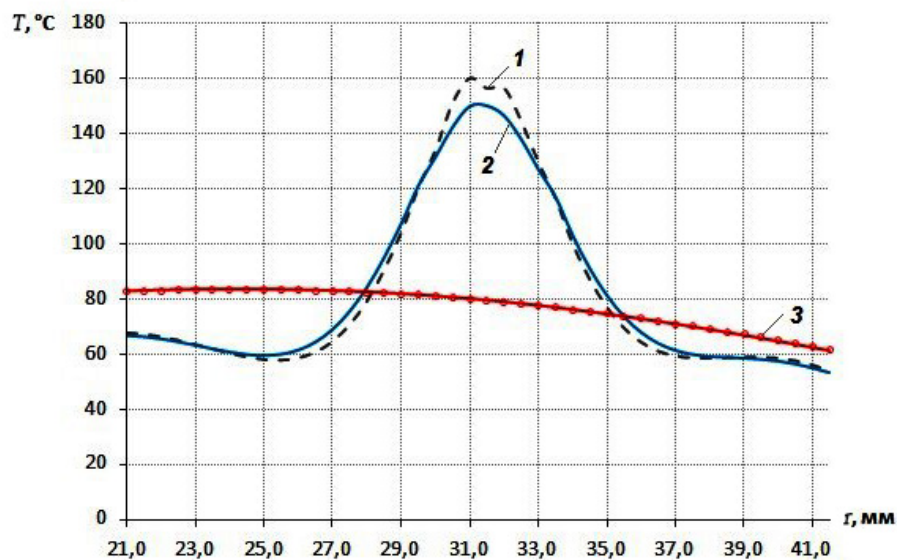
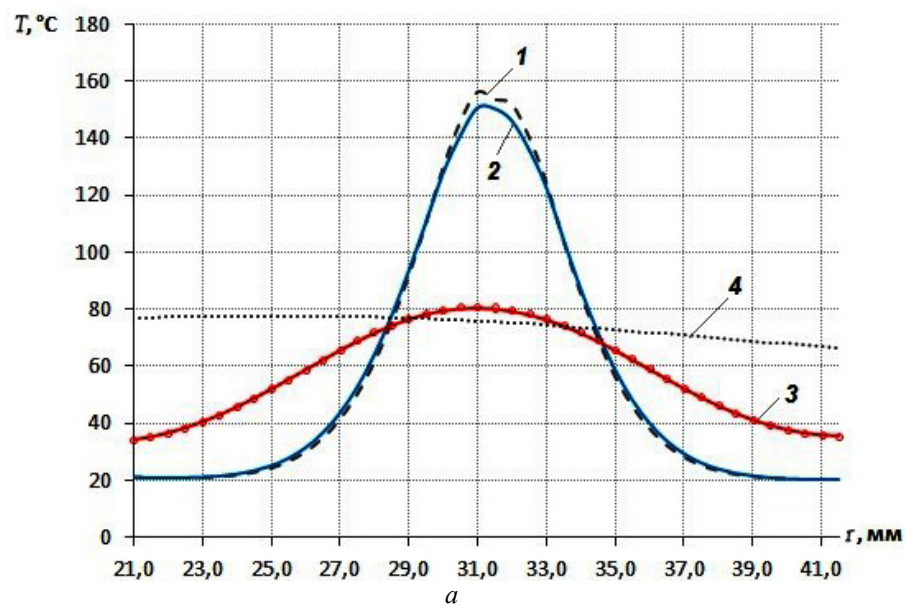


Рисунок 6 — Изменение температуры по радиусу в середине раструбного соединения полученного: а) сваркой при допустимой температуре 20 °С в различные моменты времени: 1–0 с; 2–3 с; 3–80 с; 4–6 мин при температуре воздуха 40 °С; б) градиентным подогревом конца трубы и муфты с охлаждением в теплоизоляционной камере при температуре –40 °С в различные моменты времени: 1–0 с; 2–5 с; 3–7 мин
 Fig. 6 — Temperature variation along the radius in the middle of the socket connection obtained by a) welding at a permissible temperature of 20 °С at different points in time: 1–0 s; 2–3 s; 3–80 s; 4–6 minutes at an air temperature 40 °С; б) gradient heating of the end of the pipe and coupling with cooling in the thermo enclosure at a temperature –40 °С at different points in time: 1–0 s; 2–5 s; 3–7 min

через 1,5 мин, тогда как при сварке с градиентным подогревом кристаллизация начинается через 5 с и завершается через 7 мин. Расчеты показывают, что при сварке полипропиленовых труб диаметром 63 мм при допустимых температурах в раструб при допустимой температуре $+40^{\circ}\text{C}$ с естественным охлаждением в течение регламентированного времени 6 мин температура в сварном шве становится равной 80°C (рис. 6, а, кривая 4). Следовательно, время охлаждения соответствует моменту завершения процесса кристаллизации.

При сварке рассматриваемых труб с градиентным подогревом время охлаждения незначительно превышает регламентированное и составляет 7 мин (рис. 6, б). Кроме того отметим, что в момент завершения кристаллизации материала сварного шва распределение температур по толщине стенок трубы и муфты при сварке с градиентным подогревом при низкой температуре и при допустимой температуре $0\text{В } 40^{\circ}\text{C}$ практически совпадают.

Оценка качества сварных соединений

Для оценки эффективности разработанных технологий сварки труб из термопластичных полимерных материалов проводят различные испытания для оценки качества сварных соединений [11–15]. В то же время, существующие методики испытаний сварных соединений являются малоинформативными, а в некоторых случаях объективной информации практически не дают [16–17]. Для количественной оценки прочности раструбного сварного соединения полипропиленовых труб провели испытания растяжения образцов на сдвиг по новой методике. Образцы вырезали из сваренных труб. Суть методики заключается в следующем (рис. 7):

- испытывали на растяжение стандартный образец, где исследуемое раструбное сварное соединение расположено посередине образца;
- на муфте 1 делали надрез 2, параллельный краю муфты, глубиной более оплавленной стенки муфты, но не более толщины стенки;
- на внутренней стенке трубы 3 делали надрез 4, параллельный краю трубы, глубиной более оплавленной стенки трубы, но не более толщины стенки трубы;
- расстояние между прорезями 2 и 4 рассчитывали таким образом, чтобы площадь сечения испытываемой части А раструбного сварного соединения была равной или меньше, чем площадь минимального поперечного сечения образца вне зоны раструбного соединения.

При испытаниях растяжением на сдвиг разрушение образца произойдет по сварному шву в области А, так как прочность сварного участка соединения трубы, как правило, меньше, чем прочность участка стенки основного материала.

Испытывали сварные соединения, полученные при различных режимах сварки полипропиленовых труб. Результаты испытаний приведены на рис. 8.

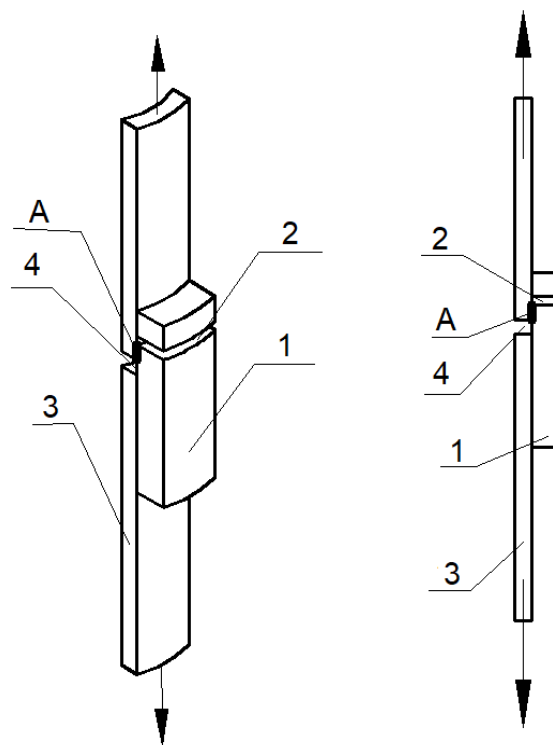


Рисунок 7 — Образец для определения прочности раструбной сварки при растяжении (направление указано стрелками)

Fig. 7 — Sample for determining the strength of socket welding under tension (the direction is indicated by arrows)

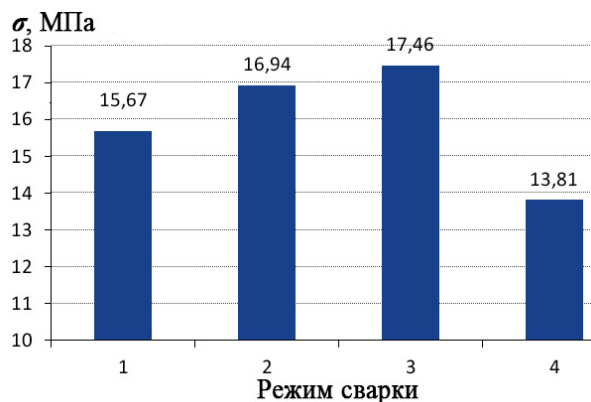


Рисунок 8 — Разрушающее напряжение образцов из сварных соединений полипропиленовых труб, полученных при различных режимах сварки: 1 – температура $0\text{В } +13^{\circ}\text{C}$, стандартная сварка; 2 – температура $0\text{В } +40^{\circ}\text{C}$, стандартная сварка; 3 – температура $0\text{В } -45^{\circ}\text{C}$, градиентный подогрев, охлаждение с теплоизоляцией; 4 – температура $0\text{В } -45^{\circ}\text{C}$, градиентный подогрев, охлаждение без теплоизоляции

Fig. 8 — Destructive stress of samples from welded joints of polypropylene pipes obtained under various modes: 1 – Ambient temperature (AT) $+13^{\circ}\text{C}$, standard welding; 2 – AT $+40^{\circ}\text{C}$, standard welding; 3 – AT -45°C , gradient heating, cooling with heat insulation; 4 – AT -45°C , gradient heating, cooling without heat insulation

Заключение

Разработана математическая модель градиентного распределения температуры в стенке трубы в процессе нагрева. Использование математической модели теплового процесса сварки полипропиленовых труб в раструб позволило разработать для моделирования

термоградиентный метод повышения прочности сварных соединений труб из кристаллизующихся термопластичных полимерных материалов при отрицательных температурах ОВ.

На примере полипропиленовых труб экспериментально показано, что предварительный градиентный подогрев труб, обеспечивающий при охлаждении уменьшение температур в сторону свариваемых поверхностей позволяет увеличить прочность сварных соединений в раструб, полученных при низких температурах ОВ на 10–12%.

Обозначения

ДСК — дифференциальный сканирующий калориметр; ОВ — окружающий воздух; $C_l(T)$, Дж/(кг·°C) — удельная теплоемкость; c^+ , Дж/(кг·°C) — удельная теплоемкость для жидкой фазы материала трубы (муфты); $L^{100\%}$, Дж/кг — удельная теплота фазового превращения полностью кристаллического полимера; l_{paz} , мм — глубина паза сменной насадки для подогрева трубы (муфты); l_{rast} , мм — глубина раструба; R_1 , мм — внутренний радиус трубы; R_2 , мм — внешний радиус трубы и внутренний радиус муфты; R_3 , мм — внешний радиус муфты; r, z — цилиндрические координаты; $q(T)$, Вт/г — зависимость теплового потока от температуры, отнесенная к единице массы вещества, регистрируемая дифференциальным сканирующим калориметром (ДСК); $T(r, z, t)$, °C — температура трубы в момент времени t ; T_L , °C — температура ликвидуса; T_N , °C — температура оплавления; T_{nag} , °C — температура нагревательного элемента; T_{okr} , °C — температура ОВ; T_s , °C — температура солидуса; t_{gp} , с — продолжительность градиентного подогрева; z_2 , мм — длина трубы; c^- , Дж/(кг·°C) — удельная теплоемкость для твердой фазы материала трубы (муфты); G_{gp} — подогреваемые поверхности труб и муфты; G_N — нагреваемые поверхности труб и муфты при оплавлении; $\lambda_1(T)$, Вт/(м·°C) — коэффициент теплопроводности; λ^- , Вт/(м·°C) — теплопроводность для твердой фазы материала трубы (муфты); λ^+ , Вт/(м·°C) — теплопроводность для жидкой фазы материала трубы (муфты); $\rho_1(T)$, кг/м³ — удельная плотность; ρ^- , кг/м³ — плотность для твердой фазы материала трубы (муфты); v_T , °C/с — скорость изменения температуры; ρ^+ , кг/м³ — плотность для жидкой фазы материала трубы (муфты); X_C — степень кристалличности; X_C^∞ — максимальная степень кристалличности исследуемого полимерного материала.

Благодарности

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

Литература

1. СП 40-101-96. Проектирование и монтаж трубопроводов из полипропилена «Рандом сополимер». Своды правил по про-

ектированию и строительству. Введ. 1996-09-04. М.: Минстрой России, 1996. 33 с.

2. СП 40-102-2000. Проектирование и монтаж трубопроводов систем водоснабжения и канализации из полимерных материалов. Общие требования. Введ. 2000-08-16. М.: Госстрой России, 2000. 34 с.
3. Starostin N. P., Vasil'eva M. A., Danzanova, E. V., Ammosova O. A. Butt welding of polyethylene pipes at low temperatures // *Welding international*, 2013, vol. 27, no. 4, pp. 318–320. doi: 10.1080/09507116.2012.715915
4. Кувалдин А. Б., Некрасова Н. С. Автоматизированный расчет процесса индукционного градиентного нагрева для кабельной промышленности // *Промышленный электрообогрев и электроотопление*. 2013. № 3. С. 34–38.
5. Мулатов А., Галуниин С., Блинов Ю., Наке Б. Численное исследование методов управления температурным полем в индукционных системах для нагрева вращением // *Вестник электроники*. 2012. Т. 41, № 3. С. 42–46.
6. Старостин Н. П., Аммосова О. А., Ботвин Г. В. Тепловой процесс сварки полипропиленовых труб в раструб при низких температурах // *Сварка и диагностика*. 2015. № 6. С. 57–61.
7. Chebbo Z, Vincent M., Boujlal A., Gueugnaut D., Tillier Y. Numerical and Experimental Study of the Electrofusion Welding Process of Polyethylene Pipes // *Polymer Engineering And Science*, 2015, vol. 55, no. 1, pp. 123–131.
8. Куликова Т. Г., Труфанов Н. А. Численное решение краевой задачи термомеханики для кристаллизующегося вязкоупругого полимера // *Вычислительная механика сплошных сред*. 2008. Т. 1, № 2. С. 38–52.
9. Стечкин С. Б., Субботин Ю. Н. Сплаины в вычислительной математике. М.: Наука, 1976. 248 с.
10. Старостин Н. П., Егорова М. П., Герасимов А. И. Динамика температурного поля при электромуфтовой сварке полиэтиленовых труб для газопроводов // *Пластические массы*. 2013. № 2. С. 27–30.
11. Rojek M., Stabik J., Muzia G. Thermography in plastics welding processes assessment // *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, 2010, vol. 41, no. 1–2, pp. 40–47.
12. Dasari A., Misra R. D. K. Microscopic aspects of surface deformation and fracture of high density polyethylene // *Materials Science and Engineering: A*, 2004, vol. 367, no. 1–2, pp. 248–260. doi: 10.1016/j.msea.2003.10.202
13. Tarek M. A. A. El-Bagory, Hossam E. M. Sallam, Maher Y. A. Younan. Effect of strain rate, thickness, welding on the J-R curve for polyethylene pipe materials // *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 2014, vol. 74, pp. 164–180. doi: 10.1016/j.tafmec.2014.09.008
14. Cazenave J., Seguela R., Sixou B., Germain Y. Short-term mechanical and structural approaches for the evaluation of polyethylene stress crack resistance // *Polymer*, 2006, vol. 47, no. 11, pp. 3904–3914. doi: 10.1016/j.polymer.2006.03.094
15. Fangjuan Qi, Lixing Huo, Yufeng Zhang and Hongyang Jing. Study on Fracture Properties of High-density Polyethylene (HDPE) Pipe // *Key Engineering Materials*, 2004, vol. 261–263, pp. 153–158. doi: 10.4028/www.scientific.net/KEM.261-263.153
16. Кимельблаг В. И. Сварка полимерных труб // *Пластик: индустрия переработки пластмасс*. 2010. № 8 (90). С. 44–47.
17. Герасимов А. И., Данзанова Е. В., Ботвин Г. В. Испытания сварных соединений полипропиленовых труб // *Вестник ВСГУТУ*. 2017. № 3 (66). С. 38–42.

References

1. SP 40-101-96. Proektirovani e montazh truboprovodov iz polipropilena «Random sopolimer». Svody pravil po proektirovaniyu i stroitel'stvu. [Code of design and construction 40-101-96. Design and installation of pipelines made of random-copolymer polypropylene]. Moscow: Minstroy Rossii Publ., 1996. 33 p.
2. SP 40-102-2000. Proektirovani e montazh truboprovodov sistem vodosnabzheniya i kanalizatsii iz polimernykh materialov. Obshchie trebovaniya. [Code of design and construction 40-102-2000. Design and installation of pipelines for water supply and

- sewage systems from polymeric materials. General requirements]. Moscow: Minstroy Rossii Publ., 2000. 34 p.
3. Starostin N. P., Vasil'eva M. A., Danzanova, E. V., Ammosova O. A. Butt welding of polyethylene pipes at low temperatures. *Welding international*, 2013, vol. 27, no. 4, pp. 318–320. doi: 10.1080/09507116.2012.715915
 4. Kuvaldin A. B., Nekrasova N. S. Avtomatizirovannyi raschet protsessa induktsionnogo gradientnogo nagreva dlya kabel'noy promyshlennosti [Automated calculation of the induction gradient heating process for the cable industry]. *Promyshlennyi elektroobogrev i elektrootoplenie* [Industrial heating and electric heating], 2013, no. 3, pp. 34–38.
 5. Mulatov A., Galunin S., Blinov Yu., Nake B. Chislennoe issledovanie metodov upravleniya temperaturnym polem v induktsionnykh sistemakh dlya nagreva vrashcheniem [Numerical research of temperature field control methods in induction heating systems by rotation]. *Vestnik elektroniki* [Herald Electronics], 2012, vol. 41, no. 3, pp. 42–46.
 6. Starostin N. P., Ammosova O. A., Botvin G. V. Teplovoy protsess svarki polipropilenovykh trub v rastrub pri nizkikh temperaturakh [Thermal welding process of polypropylene pipes in the socket at low temperatures]. *Svarka i diagnostika* [Welding and Diagnostics], 2015, no. 6, pp. 57–61.
 7. Chebbo Z, Vincent M., Boujlal A., Gueugnaut D., Tillier Y. Numerical and Experimental Study of the Electrofusion Welding Process of Polyethylene Pipes. *Polymer Engineering And Science*, 2015, vol. 55, no. 1, pp. 123–131.
 8. Kulikova T. G., Trufanov N. A. Chislennoe reshenie kraevoy zadachi termomekhaniki dlya kristallizuyushchegosya vyzkouprugogo polimera [Numerical solution of the boundary value problem of thermomechanics for a crystallizing viscoelastic polymer]. *Vychislitel'naya mekhanika sploshnykh sred* [Computational Continuum Mechanics], 2008, vol. 1, no. 2, pp. 38–52.
 9. Stechkin S. B., Subbotin Yu. N. *Splayny v vychislitel'noy matematike* [Splines in computational math]. Moscow: Nauka Publ., 1976. 248 p.
 10. Starostin N. P., Egorova M. P., Gerasimov A. I. Dinamika temperaturnogo polya pri electromuftovoy svarke polietylenovykh trub dlya gazoprovodov [Dynamics of the temperature field during the electric welding of polyethylene pipes for gas pipelines]. *Plasticheskie massy* [Plastics], 2013, no. 2, pp. 27–30.
 11. Rojek M., Stabik J., Muzia G. Thermography in plastics welding processes assessment. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, 2010, vol. 41, no. 1–2, pp. 40–47.
 12. Dasari A., Misra R. D. K. Microscopic aspects of surface deformation and fracture of high density polyethylene. *Materials Science and Engineering: A*, 2004, vol. 367, no. 1–2, pp. 248–260. doi: 10.1016/j.msea.2003.10.202
 13. Tarek M. A. A. El-Bagory, Hossam E. M. Sallam, Maher Y. A. Younan. Effekt of strain rate, thickness, welding on the J-R curve for polyethylene pipe materials. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 2014, vol. 74, pp. 164–180. doi: 10.1016/j.tafmec.2014.09.008
 14. Cazenave J., Seguela R., Sixou B., Germain Y. Short-term mechanical and structural approaches for the evaluation of polyethylene stress crack resistance. *Polymer*, 2006, vol. 47, no. 11, pp. 3904–3914. doi: 10.1016/j.polymer.2006.03.094
 15. Fangjuan Qi, Lixing Huo, Yufeng Zhang and Hongyang Jing. Study on Fracture Properties of High-density Polyethylene (HDPE) Pipe. *Key Engineering Materials*, 2004, vol. 261–263, pp. 153–158. doi: 10.4028/www.scientific.net/KEM.261-263.153
 16. Kimel'blat V. I. Svarka polimernykh trub [Welding of polymer pipes]. *Plastiks: industriya pererabotki plastmass* [Plastiks: plastics processing industry], 2010, no. 8 (90), pp. 44–47.
 17. Gerasimov A. I., Danzanova E. V., Botvin G. V. Ispytaniya svarnykh soedineniy polipropilenovykh trub [Testing of welded joints of polypropylene pipes]. *Vestnik VSGUTU* [ESSUTM Bulletin], 2017, no. 3 (66), pp. 38–42.

Поступила в редакцию 27.11.2018

© Н. П. Старостин, М. А. Васильева, О. А. Аммосова, Е. В. Данзанова, Г. В. Ботвин, 2019