



## МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОЛЕЙ И НАПРЯЖЕНИЙ В ПОЛИЭТИЛЕНОВЫХ ТРУБАХ ПРИ СВАРКЕ НАГРЕТЫМ ИНСТРУМЕНТОМ

**Н. П. НЕСТЕРЕНКО**, д-р техн. наук (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины),  
**И. К. СЕНЧЕНКОВ**, д-р физ.-мат. наук, **О. П. ЧЕРВИНКО**, канд. физ.-мат. наук  
(Ин-т механики им. С. П. Тимошенко НАН Украины),  
**М. Г. МЕНЖЕРЕС**, инж. (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Рассмотрены особенности формирования тепловых и механических полей в зоне соединения при сварке полиэтиленовых труб нагретым инструментом встык. Показано, что величина и пространственное распределение остаточных напряжений зависят не только от основных параметров режима сварки, но и от температуры окружающей среды. Для корректировки времени нагрева предложена методика расчета температурного поля в свариваемых образцах.

*Ключевые слова:* сварка нагретым инструментом, полиэтиленовые трубы, термомеханические процессы, остаточные напряжения, моделирование, температура вязкотекучего состояния, качество сварных соединений

Основным технологическим процессом, который определяет эксплуатационную надежность и темпы строительства полиэтиленовых трубопроводов, является сварка. Для соединения труб и деталей в основном применяют сварку нагретым инструментом. При этом активацию (нагрев) свариваемых поверхностей осуществляют в результате их физического контакта с нагретым инструментом. Прямой характер нагрева предопределяет прерывистость процесса, так как для соединения нагретых поверхностей необходимо удалить из зоны сварки инструмент, а затем сжать свариваемые детали. В таком процессе условно можно выделить три этапа: нагрев свариваемых поверхностей; технологическую паузу, необходимую для удаления нагретого инструмента из зоны сварки; осадку свариваемых деталей путем приложения давления и выдержку их под давлением в течение определенного времени, определяемом скоростью охлаждения и релаксационными процессами в сварном соединении [1].

Основными параметрами технологического процесса являются температура нагревателя  $\theta_n$ ; время оплавления  $t_{\text{опл}}$ , прогрева  $t_{\text{пр}}$ , технологической паузы  $t_{\text{пауз}}$  и осадки  $t_{\text{ос}}$ , давление при оплавлении  $P_{\text{опл}}$ , нагреве  $P_n$  и осадке  $P_{\text{ос}}$ . К дополнительным параметрам режима сварки относят температуру окружающей среды  $\theta_c$ , геометрию свариваемых поверхностей, теплофизические свойства материала и т. д.

От взаимосвязи и значений указанных параметров зависит не только возможность получения качественного сварного соединения, производи-

тельность технологического процесса, но и структура материала в зоне шва, которая существенно влияет на его эксплуатационные характеристики [2–4]. При этом в качестве критериев оптимизации параметров, наряду с кратковременной прочностью при растяжении или изгибе сварных образцов, используют прочность при ударном изгибе, длительную прочность, трещиностойкость, коррозионную стойкость и пр. Большое количество отмеченных критериев и соответствующих видов испытаний послужили причиной разработки множества нормалей, номограмм с рекомендациями по оптимизации основных параметров технологического процесса. При этом, как правило, приводятся усредненные значения параметров без указания функции оптимизации. Этим, видимо, и объясняется тот факт, что разработанные рекомендации противоречат или кардинально отличаются друг от друга. Термомеханические процессы, реализующиеся в зоне соединения, в основном изучали применительно к терморезисторной сварке [5, 6]. Имеющиеся теоретические разработки в области моделирования термического и механического состояния зоны шва при сварке полимеров нагретым инструментом встык в основном носят качественный характер, поскольку не учитывают зависимость механических и теплофизических характеристик материала от температуры, а также реологические процессы формирования остаточных напряжений в шве.

В настоящей работе рассмотрены вопросы математического моделирования температурных полей и напряженно-деформированного состояния полиэтиленовых труб диаметром 110 мм при их сварке нагретым инструментом встык с учетом зависимости свойств материала от температуры и предыстории процесса. Решение таких задач



позволяет проводить рациональный выбор основных параметров режима сварки нагретым инструментом полиэтиленовых труб при различных температурах окружающей среды.

В цилиндрической системе координат  $Orz\varphi$  постановка задачи об осесимметричном квазистатическом термомеханическом состоянии полиэтиленовых труб при сварке нагретым инструментом встык включает следующие соотношения: уравнения равновесия

$$\begin{aligned} \frac{\partial \sigma_{rr}}{\partial r} + \frac{1}{r}(\sigma_{rr} - \sigma_{\varphi\varphi}) + \frac{\partial \sigma_{rz}}{\partial z} &= 0, \\ \frac{\partial \sigma_{rz}}{\partial r} + \frac{1}{r}\sigma_{rz} + \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z} &= 0; \end{aligned} \quad (1)$$

уравнение теплопроводности

$$c(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[ \lambda(\theta) r \frac{\partial \theta}{\partial r} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[ \lambda(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial z} \right]; \quad (2)$$

кинематические уравнения

$$\varepsilon_{rr} = \frac{\partial u_r}{\partial r}, \quad \varepsilon_{zz} = \frac{\partial u_z}{\partial z}, \quad \varepsilon_{\varphi\varphi} = \frac{1}{r} u_r, \quad \varepsilon_{rz} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_z}{\partial r} + \frac{\partial u_r}{\partial z} \right). \quad (3)$$

Определяющие уравнения принимаются в форме Нуттинга:

$$\begin{aligned} s_{ij}(t) &= \frac{E(t, \theta)}{2[1 + \nu(\theta)]} e_{ij}(t), \quad i, j, k = r, z, \varphi, \\ \sigma_{kk}(t) &= \frac{E(t, \theta)}{3[1 - 2\nu(\theta)]} [\varepsilon_{kk}(t) - 3\alpha(\theta)(\theta - \theta_0)]. \end{aligned} \quad (4)$$

Уравнения (1)–(4) дополняются следующими граничными условиями:

при  $r = R_1, R_2$

$$-\lambda(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial r} = \gamma(r, z)(\theta - \theta_c), \quad \sigma_{rr} = 0, \quad \sigma_{rz} = 0;$$

при  $z = 0$

$$u_z = 0, \quad \sigma_{rz} = 0, \quad \theta = \theta_n, \quad 0 < t < t_{\text{опл}} + t_{\text{пр}},$$

$$\sigma_{zz} = 0, \quad \sigma_{rz} = 0, \quad -\lambda(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial r} = \gamma(r, z)(\theta - \theta_c),$$

$$t_{\text{опл}} + t_{\text{пр}} < t < t_{\text{опл}} + t_{\text{пр}} + t_{\text{пауз}},$$

$$u_z = 0, \quad \sigma_{rz} = 0, \quad \frac{\partial \theta}{\partial z} = 0, \quad t > t_{\text{опл}} + t_{\text{пр}} + t_{\text{пауз}};$$

при  $z = l$

$$-\lambda(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial z} = \gamma(r, z)(\theta - \theta_c), \quad \sigma_{zz} = \sigma_{zn}(t), \quad \sigma_{rz} = 0,$$

а также начальным условием  $\theta(r, z) = \theta_0$  при  $t = 0$ .

Здесь  $u_i, \varepsilon_{ij}, \sigma_{ij}$  — компоненты вектора перемещений, тензоров деформации и напряжения;  $s_{ij}, \varepsilon_{ij}$  — компоненты девиаторов тензоров напряже-

ний и деформаций;  $s_{ij} = \sigma_{ij} - \frac{1}{3}\sigma_{kk}\delta_{ij}$ ;  $e_{ij} = \varepsilon_{ij} - \frac{1}{3}\varepsilon_{kk}\delta_{ij}$ ;  $\delta_{ij}$  — символ Кронекера;  $E(t, \theta)$  — функция релаксации при одноосном растяжении;  $c(\theta), \lambda(\theta)$  — коэффициенты объемной теплоемкости и теплопроводности;  $\alpha(\theta)$  — коэффициент линейного теплового расширения;  $\theta_0$  — отсчетная температура;  $\gamma$  — коэффициент теплоотдачи;  $\sigma_{zn}(t)$  — напряжение торцевого поджатия труб, временная зависимость которого приведена в работе [2];  $\theta_n$  — температура нагревателя.

Экспериментальная конкретизация определяющих уравнений полиэтилена в рамках релаксационного уравнения Нуттинга при одноосном растяжении позволяет получить следующее соотношение:

$$\sigma = E_0(\theta) t^{n(\theta)} \varepsilon^{m(\theta)}. \quad (5)$$

Для обобщения соотношения (5) на случай многоосного напряженного состояния принимается, что коэффициент Пуассона  $\nu$  не зависит от времени, а зависит только от температуры ( $\nu = \nu(\theta)$ ), т. е. объемная ползучесть отсутствует. Коэффициенты  $m(\theta)$  и  $n(\theta)$  определяли путем анализа литературных данных [7]. Расчетная схема процесса приведена на рис. 1.

Задачу (1)–(4) решали методом конечных элементов. Моделирование проводили для полиэтиленовой трубы  $2R = 0,11$  м. В процессе расчетов варьировались значения температуры окружающей среды  $\theta_c = \theta_0 = -15, 0, 20, 30$  °С, а также продолжительность технологической паузы в рабочем цикле  $t_{\text{пауз}} = 3, 5, 10$  с, а температуру нагревателя принимали равной  $\theta_n = 210$  °С.

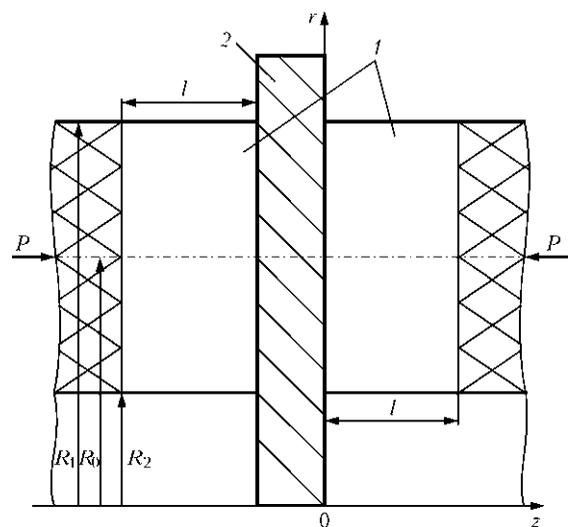


Рис. 1. Расчетная схема процесса сварки полиэтиленовых труб: 1 — исходные заготовки; 2 — нагревательный инструмент

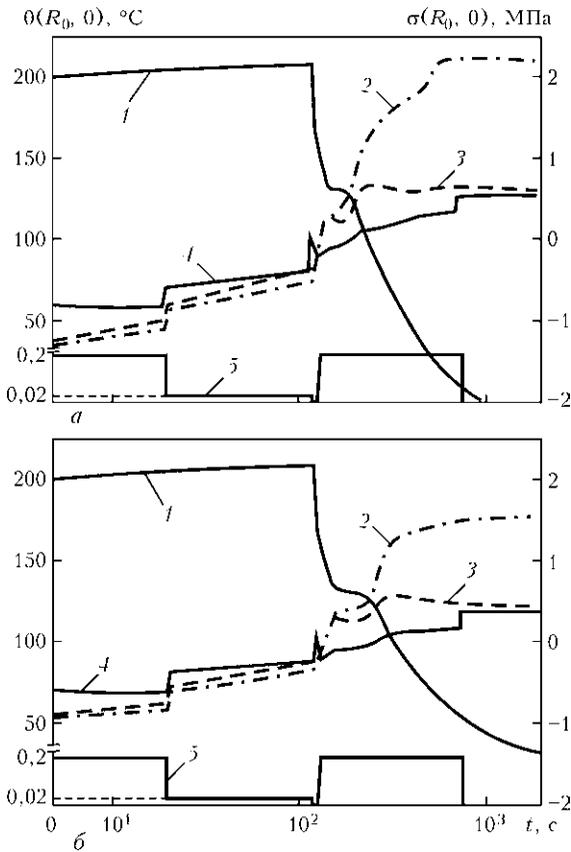


Рис. 2. Зависимость температуры и напряжений при  $\theta_c = -15$  (а) и  $30$  °С (б);  $t_{\text{пауз}} = 5$  с в точке  $z = 0$  и  $r = R_0$  для  $t = 10^3$  с: 1 —  $\theta$ ; 2 —  $\sigma_{\phi\phi}$ ; 3 —  $\sigma_{rr}$ ; 4 —  $\sigma_{zz}$ ; 5 —  $\sigma_{zn}$

На рис. 2, а показаны изменения температуры и напряжений при  $\theta_c = \theta_0 = -15$  °С,  $t_{\text{пауз}} = 5$  с в срединной точке  $r = R_0 = (R_1 + R_2)/2$  на торце трубы  $z = 0$ . Видно, что на стадии  $0 < t < t_1$ ,  $t_1 = t_{\text{опл}} + t_{\text{пр}} + t_{\text{пауз}}$ , не только осевая  $\sigma_{zz}$ , но и радиальная  $\sigma_{rr}$  и окружная  $\sigma_{\phi\phi}$  компоненты напряжений являются сжимающими: осевая — в результате поджатия, а остальные — за счет сжатия расширяющегося материала при нагреве. В процессе остывания компоненты  $\sigma_{rr}$  и  $\sigma_{\phi\phi}$  начинают возрастать и при  $t > t_1$  все компоненты становятся растягивающими, их значение превышает 2,2 МПа, что составляет более 15 % предела текучести основного материала. Осевые напряжения практически нулевые. Указанные напряжения условно можно считать остаточными, хотя они и будут очень медленно релаксировать. Расчеты, проведенные при условии  $\theta_c = \theta_0 = 30$  °С (рис. 2, б), показывают, что  $\sigma_{ij}$  не превышает 1,5 Па. Таким образом, сварка полиэтиленовых труб в условиях отрицательных температур приводит к более высоким остаточным напряжениям, что может существенно повлиять на эксплуатационные характеристики сварных соединений.

Распределения температуры и напряжений вдоль осевой координаты  $z$  в срединном по тол-

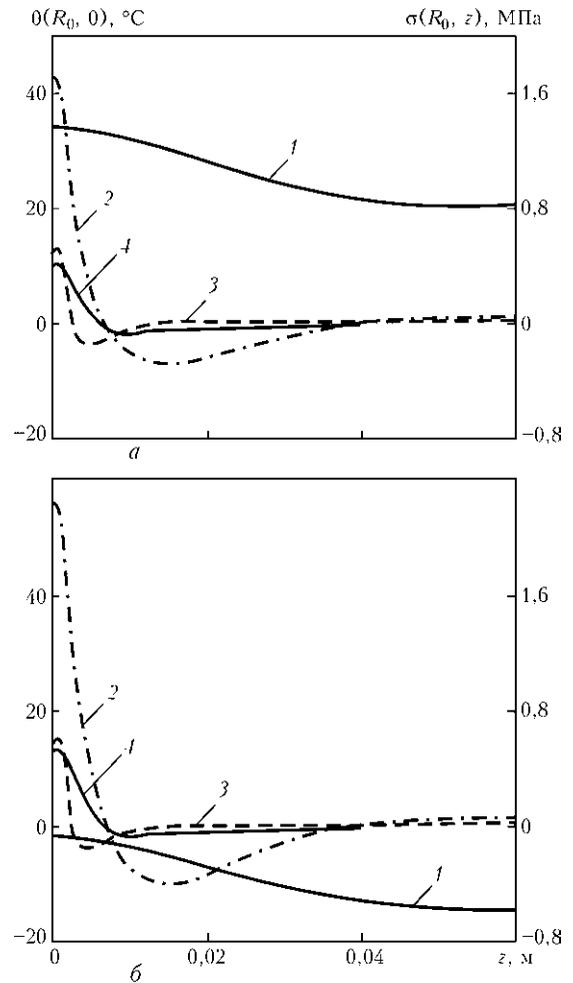


Рис. 3. Распределение остаточных напряжений вдоль оси трубы при  $\theta_c = 20$  (а) и  $-15$  °С (б);  $t_{\text{пауз}} = 5$  с для  $t = 10^3$  с (обозначения см. на рис. 2)

щине трубы сечения  $r = R_0 = 0,05$  м для момента времени  $t = 10^3$  с показаны на рис. 3. Эти данные отвечают следующим значениям параметров цикла:  $\theta_0 = \theta_c = 20$  °С (рис. 3, а),  $\theta_0 = \theta_c = -15$  °С (рис. 3, б),  $t_{\text{пауз}} = 5$  с. Выбранное время отвечает началу процесса медленной релаксации напряжений, что дают, по сути, оценку остаточным напряжениям. В данном распределении осевые напряжения практически отсутствуют, а радиальные и окружные примерно равны. При этом на поверхности сварки они растягивающие. На удалении  $z \approx 0,01$  м они становятся сжимающими (рис. 3, а). При  $z \geq 0,05$  м, т. е. на удалении от стыка на расстояние  $z \approx 5h$ ,  $h = R_1 - R_2$ , напряжения, обусловленные сваркой, исчезают. Видно, что при сварке в условиях отрицательных температур растягивающие и сжимающие напряжения больше по абсолютным значениям, чем при сварке, в условиях положительных температур (рис. 3, б).

Как указывалось выше, одним из основных технологических параметров режима сварки наг-



ретьим инструментом встык является время между окончанием нагрева и началом осадки свариваемых труб (технологическая пауза). На этом промежутке времени оплавленные кромки, находясь в контакте с воздухом, окисляются под действием кислорода и охлаждаются вследствие конвективного теплообмена и отвода тепла внутрь трубы, что существенно влияет на качество сварных соединений. От скорости охлаждения расплава зависят зарождение и рост кристаллических образований в шве, тип конечной надмолекулярной структуры и, как следствие, прочностные показатели сварного соединения. Кроме того, скорость охлаждения стыков и продолжительность технологической паузы определяют температуру и показатель текучести расплава на момент начала осадки. При нерациональном соотношении этих величин реализация реологических процессов в зоне соединения резко снижается и возможность получения сварного соединения как такового исключается. Поэтому представляет интерес рассмотрение вопросов, связанных с влиянием времени технологической паузы на температуру свариваемых поверхностей с учетом внешних температурных факторов. На рис. 4 показана зависимость температуры свариваемых торцов труб от времени технологической паузы для различных значений температуры окружающей среды  $\theta_c = \theta_0 = -15; 0; 20; 30$  °C. Видно, что на этом этапе сварочного процесса происходит интенсивное охлаждение свариваемых кромок. Так, за 10 с температура торца трубы снижается с 210 до 150 °C (при  $\theta_c = 30$  °C), а при сварке в условиях отрицательных температур ( $\theta_c = -15$  °C) — до 137 °C.

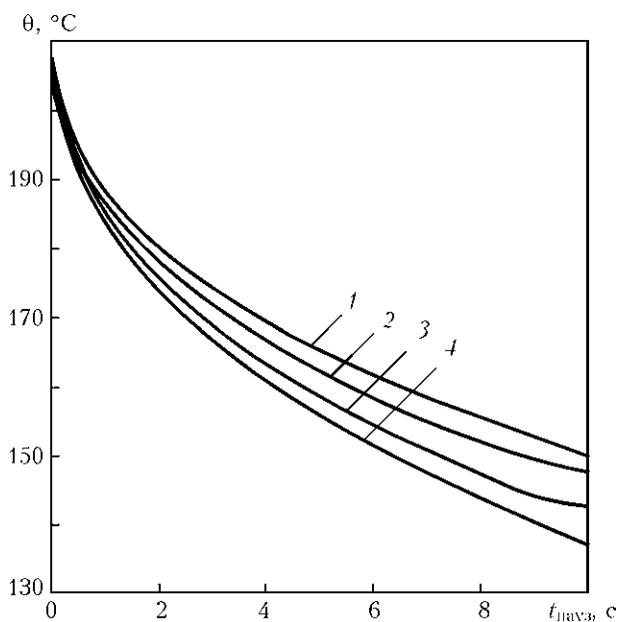


Рис. 4. Зависимость температуры торцов труб от продолжительности технологической паузы: 1 —  $\theta_0 = \theta_c = 30$ ; 2 — 20; 3 — 0; 4 —  $-15$  °C

В соответствии с нормативными документами (СНиП 3.05.02–88, Россия) при сварке труб диаметром 63...110 мм ( $\theta_c = 20$  °C) технологическая пауза не должна превышать 5 с, что обеспечивает благоприятные температурные условия для образования неразъемных соединений. Поэтому, как следует из рис. 4, при сварке труб в условиях отрицательных температур необходимо корректировать рекомендуемые для  $\theta_c = 20$  °C параметры технологического процесса. Поскольку время технологической паузы определяется временем удаления нагревателя из зоны сварки и временем, необходимым для стыковки свариваемых торцов труб, то его минимизация трудновыполнима. Более эффективным является увеличение либо температуры нагревателя, либо времени нагрева свариваемых торцов. Однако, как показывают пластмассографические исследования, повышенные температуры нагревателя может приводить к термодеструкции полимера, образованию дефектов и, как следствие, снижению прочностных характеристик сварных соединений. Поэтому, на наш взгляд, целесообразно увеличить время нагрева торцов труб при фиксированных значениях температуры нагревателя и времени технологической паузы. При этом значение глубины проплавления должно соответствовать значению, рекомендуемому для сварки труб при температуре окружающей среды 20 °C.

Для корректировки времени нагрева при сварке полиэтиленовых труб в условиях отрицательных температур можно воспользоваться графиком, приведенным на рис. 5. На нем показаны изолинии температуры вязкотекучего перехода ( $\theta_{пл} = 120$  °C) полиэтилена при температуре окружающей среды  $\theta_c = -15$  °C. Как показывают расчеты, при  $\theta_c = 20$  °C температура перехода в вязкотекучее состояние на расстоянии 0,002 м от торца трубы достигается через 80 с, а при температуре  $\theta_c = -15$  °C — через 120 с (рис. 5). Следовательно, для обеспечения регламентированных температурных условий в зоне соединения

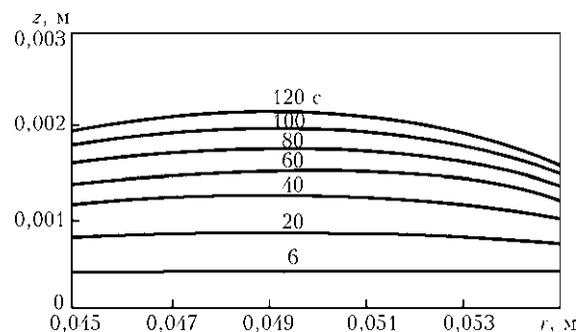


Рис. 5. Кинетика изолиний вязкотекучего перехода полимера при сварке полиэтиленовых труб ( $\theta_{пл} = 120$  °C;  $\theta_c = \theta_0 = -15$  °C)



при сварке труб при  $\theta_c = -15^\circ\text{C}$  необходимо увеличить время нагрева как минимум на 40 с. Разработанная методика позволяет построить аналогичные зависимости для произвольных значений температур окружающей среды.

Проведенные испытания сварных соединений, полученных при сварке в условиях нормативных температур воздуха ( $-15\dots+30^\circ\text{C}$ ) с корректировкой времени нагрева по предложенной методике, показали, что пластическое разрушение образцов происходит вне зоны шва. Для оценки качества сварных соединений труб использовали несколько критериев: характер разрушения образцов по СНиП 3.05.02–88 и стойкость к растрескиванию под напряжением при ускоренных испытаниях сварного соединения в растворе поверхностно-активного вещества.

Анализ результатов моделирования температурных и механических полей в зоне соединения при сварке нагретым инструментом полиэтиленовых труб в различных температурных условиях позволяет заключить:

осевая, радиальная и окружная компоненты механических напряжений на этапах оплавления, нагрева и технологической паузы являются сжимающими, а в процессе остывания стыка становятся растягивающими;

значение и пространственное распределение остаточных напряжений зависят не только от основных параметров режима сварки, но и от температуры окружающей среды;

в условиях сварки при отрицательных температурах воздуха остаточные напряжения по абсолютной величине больше, чем при сварке в ус-

ловиях положительных температур и могут достигать 15...20 % прочности основного материала; для обеспечения заданного качества сварных соединений в условиях сварки при отрицательных температурах воздуха необходимо увеличивать время нагрева свариваемых торцов труб. Для корректировки времени нагрева рекомендовано использовать разработанную методику расчета температурного поля в свариваемых образцах.

1. *Комаров Г. В.* Соединения деталей из полимерных материалов: Учеб. пособие. — СПб.: Профессия, 2006. — 592 с.
2. *Нестеренко Н. П., Сенченков И. К., Червинко О. П.* Моделирование температурных полей и напряжений при сварке нагретым инструментом пластмассовых труб в условиях отрицательных температур // Сб. докл. науч.-практ. семинара «Обеспечение эксплуатационной надежности систем трубопроводного транспорта». — Киев: ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины, 2007. — С. 111–115.
3. *Старостин Н. П., Амосова О. А.* Контактная сварка полиэтиленовых труб оплавлением при низких температурах окружающей среды // Свароч. пр-во. — 2007. — № 4. — С. 17–20.
4. *Кайгородов Г. К., Каргин В. Ю.* Влияние скорости охлаждения полиэтиленового сварного шва на его прочность // Трубопроводы и экология. — 2001. — № 2. — С. 13–14.
5. *Соколов В. А., Красников М. А.* Вопросы оценки качества сварки полиэтиленовых труб с применением муфт с закладными нагревателями // Там же. — 2004. — № 2. — С. 7–98.
6. *Математическое моделирование деформационных процессов при сварке полиэтиленовых труб / В. И. Махненко, Е. А. Великоиваненко, Г. Ф. Розынка, Е. Ш. Гисер // Автомат. сварка. — 1991. — № 4. — С. 1–6.*
7. *Пивень А. А., Гречаная Н. А., Чернобыльский И. И.* Теплофизические свойства полимерных материалов. — Киев: Вища шк., 1976. — 180 с.

The paper deals with the features of formation of thermal and mechanical fields in the joint zone in welding of polyethylene pipes by a hot tool inserted into butt. It is shown that the magnitude and spatial distribution of residual stresses depend not only on the main parameters of the welding mode, but also on ambient temperature. A procedure of calculation of the temperature field in welded samples is proposed for correction of the heating time.

Поступила в редакцию 07.07.2008

## **ПРОМЫШЛЕННОСТЬ. ИНВЕСТИЦИИ. ТЕХНОЛОГИИ (9-я национальная выставка-форум)**

**23–26.09.2009**

**г. Кривой Рог**

Подробную информацию можно получить  
по тел./факс: +38(0564) 92 32 43; 92 32 37; 409 30 30  
e-mail: of\_kratos@mg.net.ua, expo@kratos.net.ua  
http: //www.kratos.net.ua/exhibition.htm