

**Н. П. СТАРОСТИН**, д-р техн. наук, **М. А. ВАСИЛЬЕВА**, канд. физ.-мат. наук,  
**Е. В. ДАНЗАНОВА**, инж., **О. А. АММОСОВА**, канд. техн. наук  
 Институт проблем нефти и газа СО РАН  
 E-mail: ipog@ipng.ysn.ru

## Стыковая сварка полиэтиленовых труб в условиях низких температур

Для снижения напряжений при сварке встык полиэтиленовых труб для газопроводов при температурах окружающего воздуха ниже нормативных предлагается предварительно подогреть свариваемые концы труб инструментом для подогрева. На основе расчетов нестационарного температурного поля в стенке трубы рекомендуется методика для определения близкого к однородному температурного распределения в интервале, допустимом для сварки.

It is suggested to preheat welded ends of the pipes by a heating device aimed at voltage reduction at polyethylene tube butt welding gas pipelines conducted at ambient temperature below the standard one. Based on the estimation of non-stationary temperature field in the tube wall, a procedure of determining temperature distribution similar to homogeneous in the welding-permissible range is offered.

**Ключевые слова:** сварка, полиэтиленовая труба, температура, продолжительность подогрева

**Key words:** welding, polyethylene tube, temperature, heating time

Согласно нормативным документам, существующая технология контактной тепловой сварки полиэтиленовых (ПЭ) труб позволяет проводить сварочные работы при температуре окружающего воздуха (ОВ) от  $-15$  до  $45$  °С. При сварке полиэтиленовых труб при температуре ОВ ниже нормативных рекомендуется проведение сварочных работ в отапливаемых легких конструкциях. Однако такая сварка связана с большими энергетическими, непроизводительными затратами и длительной подготовкой, что недопустимо в аварийных ситуациях. Актуальной проблемой является разработка методов и средств оперативной сварки полиэтиленовых труб в зимних условиях в регионах с холодным климатом, где температура ОВ достигает значений ниже  $-15$  °С.

Возможности существующей технологии контактной тепловой сварки полиэтиленовых труб используются недостаточно полно. При сварке в условиях низких температур не используется теплота, сохранившаяся при воздействии нагревательным инструментом. В Институте проблем нефти и газ СО РАН проводятся исследования возможности стыковой сварки полиэтиленовых труб при температуре ОВ ниже нормативных на основе существующей технологии. Предлагается сварку при низких температурах проводить как без предварительного подогрева, так и с предва-

рительным подогревом<sup>1</sup> [1, 2]. Стыковая сварка без предварительного подогрева подробно изложена в работах [1, 2]. Основная идея этого подхода заключается в увеличении продолжительности воздействия нагревательным инструментом для обеспечения необходимого объема расплава и использовании теплоизоляционной камеры при охлаждении. Продолжительность нагрева определяется на основе расчета нестационарного температурного поля в свариваемых трубах из условия соответствия границы проплавления значению, рекомендуемому для сварки труб при допустимой температуре окружающей среды. Размер теплоизоляционной камеры определяется расчетным путем из условия обеспечения такого же темпа охлаждения, что и при допустимых температурах окружающего воздуха. Многочисленные механические испытания показали, что кратковременная прочность такого соединения не уступает прочности соединения, полученного в условиях нормативных температур.

При ускоренных испытаниях в поверхностно-активной среде образцов, полученных при сварке при температурах ниже нормативных без предварительного подогрева и охлаждении в теплоизоляционной камере, наблюдали преждевременное

<sup>1</sup> Патент 2343331 (РФ).

разрушение по зоне сплавления. Предполагается, что причиной такого разрушения являются повышенные значения температурных напряжений вследствие неравномерного нагрева. Отметим два возможных последствия повышенных напряжений. Во-первых, известно, что прочное сварное соединение получается, если в зоне сплавления сварного соединения формируются образования сферолитной, а не ленточной структуры. При оптимальных технологических режимах сварки ленточные образования, сформированные при вытеснении расплава из зоны сплавления в грат, вследствие релаксации расплава трансформируются в сферолитные. Формирование ленточной структуры в зоне сплавления обусловлено повышением температуры кристаллизации деформируемых полимерных расплавов [3]. При определенных напряжениях и температурах ленточная структура может сохраниться вследствие ранней кристаллизации расплава даже при обеспечении скорости охлаждения, соответствующей сварке при допустимых температурах ОВ.

Во-вторых, согласно расчетам, приведенным в работе [4], напряжения, обусловленные сваркой, повышаются с понижением температуры ОВ. Максимальные напряжения возникают в зоне сплавления. При сварке без предварительного подогрева в условиях низких температур при увеличении продолжительности воздействия нагревательным инструментом и получении необходимого объема расплава свариваемые трубы подогреваются на небольшое расстояние от стыка. Неоднородность распределения температуры по длине трубы способствует повышению напряжений в зоне сплавления, которые не могут релаксировать и могут привести к зарождению и распространению в этой зоне трещин. В связи с этим можно предположить, что для получения прочного сварного соединения при температурах воздуха ниже нормативных следует подогреть до допустимой температуры трубу на некотором расстоянии от торца, обеспечить однородность распределения температуры для снижения напряжений и провести нагрев торцев по регламентированному технологическому режиму, а при охлаждении использовать теплоизоляционную камеру. Цель данной работы — исследование теплового процесса при подогреве полиэтиленовых труб при температурах воздуха ниже нормативных специальным нагревательным инструментом определенной длины.

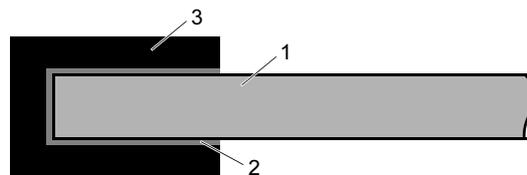


Рис. 1. Схема стенки трубы 1 с нагревателем 3 и эластичным элементом 2

Расчетная схема стенки трубы с нагревателем приведена на рис. 1. Предполагая однородность температурного поля по окружности полиэтиленовой трубы, рассмотрим отрезок его стенки длиной  $L$  с нагревателем и эластичным элементом толщиной  $L_1$ , обеспечивающей идеальный тепловой контакт соприкасающихся поверхностей. Нагреватель обеспечивает постоянную температуру  $T_H$  на внешней поверхности эластичного элемента, поэтому изменение температуры в нагревателе не рассчитывается. Значение  $T_H$  меньше температуры плавления полиэтилена. В области  $G$ , ограниченной свободными поверхностями стенки трубы и эластичного элемента, запишем уравнение теплопроводности

$$c_i \rho_i \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \lambda_i \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda_i \frac{\partial T}{\partial z} \right),$$

$$r, z \in G, \quad 0 < t \leq t_m. \quad (1)$$

На внешней границе эластичного элемента  $S$  задана постоянная температура

$$T(r, z, t)|_S = T_H, \quad 0 < t \leq t_m. \quad (2)$$

На свободных поверхностях стенки и эластичного элемента  $C$  происходит конвективный теплообмен с окружающей средой с температурой  $T_{окр}$

$$\lambda_i \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_C = -\alpha (T(r, z, t)|_C - T_{окр}), \quad 0 < t \leq t_m. \quad (3)$$

На правом конце стенки, на котором нагреватель практически не изменяет температуру стенки, зададим температуру окружающей среды

$$T(r, L + L_1, t) = T_{окр}. \quad (4)$$

В начальный момент времени в стенке трубы и эластичном элементе распределение температуры однородно и равно температуре ОВ:

$$T(r, z, 0) = T_{окр}. \quad (5)$$

Индекс  $i = 1$  — для полиэтилена, индекс  $i = 2$  — для эластичного материала. Задачу решали методом конечных разностей сведением к цепочке одномерных и использованием однородной раз-

ностной схемы со вторым порядком аппроксимации по пространственным переменным. Граничные условия (3) аппроксимировали со вторым порядком.

Моделирование предварительного подогрева проводили для трубы SDR 11 ПЭ 100 ГАЗ SDR 11 63 × 5,8 при температуре ОВ –40 °С. Расчеты выполняли при следующих данных:  $\lambda_1, \lambda_2$  — 0,38 и 0,29 Вт/(кг · К);  $\rho_1$  и  $\rho_2$  — 954 и 700 кг/м<sup>3</sup>;  $c_1$  и  $c_2$  — 1900 и 1900 Дж/(кг · К). Длина подогреваемой области нагревательного инструмента 3 см.

При подогреве инструментом через определенное время температура в стенке трубы становится равной температуре инструмента по толщине и по длине части трубы. Для удаления инструмента предварительного подогрева и приведения труб в контакт с другим нагревательным инструментом необходимо некоторое время, за которое прогретая часть остывает. Поэтому температура инструмента для подогрева специально выбирается 60 °С, что выше допустимой для сварки температуры ОВ, но ниже температуры размягчения. Продолжительность подогрева выбирается таким образом, чтобы распределение температуры стенки трубы стало неоднородным по радиальной переменной. Такой прием обеспечивает длительную паузу для более однородного распределения температуры в допустимом для сварки диапазоне. На рис. 2 приведено полученное расчетным путем изменение температуры по толщине стенки трубы на различном расстоянии от торца после подогрева в течение 30 с. Конец трубы подогревается на расстояние, не превышающее длины нагревательного инструмента (рис. 3). Поскольку торец трубы также подогрева-

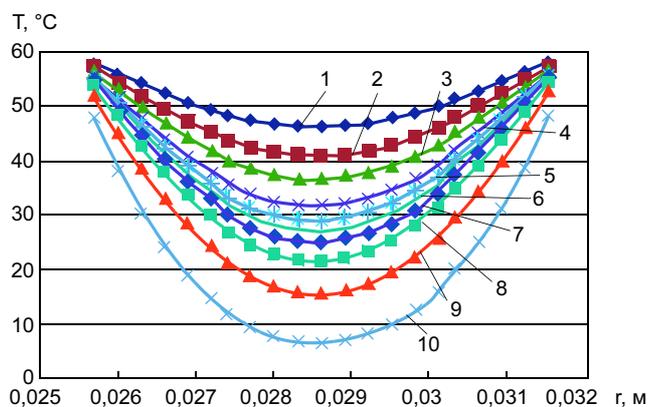


Рис. 2. Распределение температуры в стенке трубы по радиусу в момент завершения подогрева (30 с): 1–10 — соответственно расстояние от торца 0,001, 0,002, 0,003, 0,005, 0,01, 0,026, 0,027, 0,028, 0,029 и 0,03 м

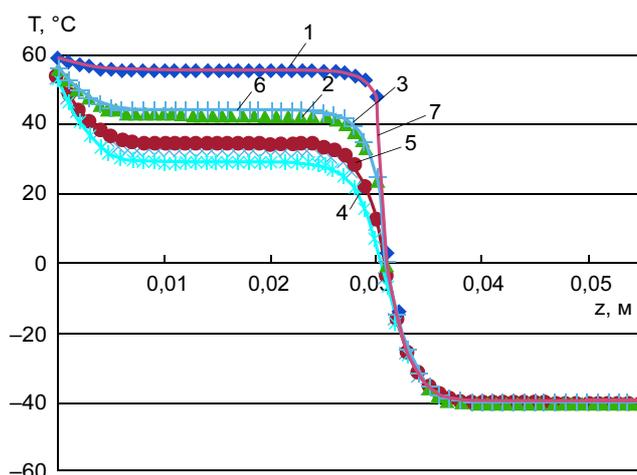


Рис. 3. Распределение температуры по длине трубы в момент завершения подогрева (30 с): 1–6 — соответственно радиус трубы 0,0257, 0,0266, 0,0274, 0,0286, 0,0298, 0,0306 и 0,0315

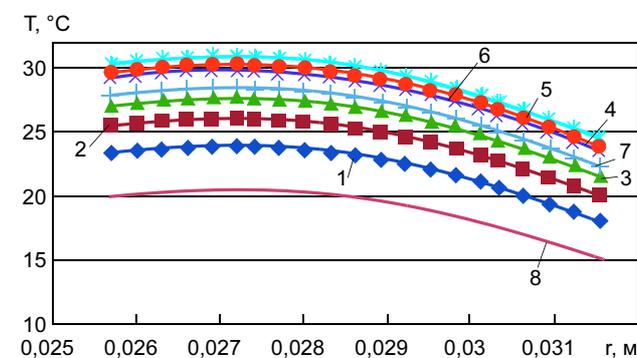


Рис. 4. Распределение температуры по длине трубы в момент завершения подогрева (30 с): 1–8 — соответственно радиус трубы 0,001, 0,002, 0,003, 0,005, 0,01, 0,015, 0,02 и 0,025 м

ется, в этой области температура близка к температуре инструмента.

В результате расчетов получена продолжительность паузы, равная 70 с. На рис. 4 приведено распределение температуры в стенке трубы в конце паузы. Оно стало более однородным и значения температуры находятся в допустимом диапазоне, что позволяет провести стыковую сварку в стандартном режиме. Незначительная неоднородность распределения температуры по длине трубы обусловлена конвективным теплообменом торца трубы с окружающей средой. За температуру ОВ при проведении сварки можно выбрать среднюю температуру в прогретой части трубы. Тогда параметры технологического режима сварки (температура рабочей поверхности нагретого инструмента, продолжительность нагрева, время нарастания давления осадки, время охлаждения) определяются по таблицам работы [6].

Охлаждение сварного соединения проводится в теплоизоляционной камере, размеры которой определяются по методике, аналогичной для сварки без подогрева [3]. Поскольку размеры камеры для рассматриваемых труб небольшие (полудлина 2 см), для снижения остаточных напряжений следует теплоизолировать внешние поверхности труб вне теплоизоляционной камеры.

## ВЫВОДЫ

1. Разработанная методика расчета нестационарного температурного поля рекомендует для получения на момент проведения сварки температурного поля в стенке полиэтиленовой трубы, близкого к однородному и допустимому для сварки.

2. Продолжительность воздействия нагревательным инструментом для подогрева рассчитывают из условия получения неоднородного по толщине стенки трубы распределения температу-

ры, максимальное значение в котором незначительно выше 45 °С по всей длине подогреваемой области, а продолжительность паузы — из условия минимальной разницы значений температур по толщине и длине подогреваемой части трубы.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Старостин Н. П., Аммосова О. А. Контактная сварка полимерных труб оплавлением при низких температурах окружающей среды. Ч. 1. Математическое моделирование теплового процесса // Сварочное производство. 2007. № 4. С. 17—20.
2. Старостин Н. П., Аммосова О. А. Контактная сварка полиэтиленовых труб оплавлением при низких температурах окружающей среды. Ч. 2. Исследование процесса охлаждения // Сварочное производство. 2008. № 9. С. 31—34.
3. Микроструктура и качество стыковых сварных соединений полиэтилена / В. Д. Гринюк, А. А. Шадрин, А. В. Золотарь и др. // Автоматическая сварка. 1990. № 11. С. 23—26.
4. Моделирование температурных полей и напряжений в полиэтиленовых трубах при сварке нагретым инструментом / Н. П. Нестеренко, И. К. Сенченков, О. П. Червинко, М. Г. Менжерес // Автоматическая сварка. 2009. № 2. С. 11—15.
6. Проектирование и строительство газопроводов из полиэтиленовых труб и реконструкция изношенных газопроводов: СП 42-103—2003. М.: Полимергаз, ФГУП ЦПП, 2004. 86 с.

---

# ЭКОНОМИКА И ОРГАНИЗАЦИЯ ПРОИЗВОДСТВА

---

УДК 330.101.542

**М. И. БУХАЛКОВ**, д-р экон. наук  
Самарский государственный технический университет  
E-mail: plan@samgtu.ru

## Разработка и оптимизация производственной программы на предприятиях машиностроения

Рассмотрены методы формирования производственной программы. Разработана модель ранжирования номенклатуры продукции. Приведены примеры расчета оптимального выпуска.

Methods of formation of the program are considered. The model of ranging of production is developed. Examples of calculation of optimum release are resulted.

**Ключевые слова:** производственная программа, методы планирования продукции, система показателей

**Key words:** program of production, methods of formation production, system of indicators

Производственная программа предприятия представляет развернутый или комплексный план производства и продажи продукции, характеризующий годовой объем, номенклатуру, качество и

сроки выпуска требуемых рынком товаров и услуг. В рыночных условиях основу плана производства на различных предприятиях составляют заключенные договоры с потребителями, имеющийся порт-