

**ВЛИЯНИЕ НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУР ВОЗДУХА
НА КРИСТАЛЛИЧНОСТЬ МАТЕРИАЛА СВАРНОГО СОЕДИНЕНИЯ
ГАЗОПРОВОДА ИЗ ПОЛИЭТИЛЕНОВЫХ ТРУБ¹**

Старостин Н.П., Герасимов А.И., Бельчусова Н.А., Аммосова О.А.

*Институт проблем нефти и газа СО РАН
e-mail: nikstar56@mail.ru*

На основе математического моделирования теплового процесса предлагается методика расчета продолжительности воздействия нагревательным инструментом при сварке газопроводов из полиэтиленовых труб при температурах воздуха, ниже регламентируемых. Исследуется степень кристалличности материалов сварного соединения, полученных при остывании в естественных условиях низких температур.

Введение. В настоящее время научно обоснована возможность применения полиэтиленовых труб в условиях холодного климата (до - 60 °С). В то же время, существующая технология сварки встык полиэтиленовых (ПЭ) труб позволяет проводить сварку при температурах окружающей среды в диапазоне от - 15 до 45 °С [1], не охватывающем низкие температуры, достигаемые в северных регионах России. Для сварки ПЭ труб при температурах атмосферного воздуха ниже регламентируемых в настоящее время предлагаются различные способы, в том числе проведение сварочных работ в отапливаемых легких конструкциях. Однако такая сварка связана с большими энергетическими непроизводительными затратами и длительными подготовительными работами, что в аварийных ситуациях при температурах окружающей среды ниже минус 30 °С может привести к выходу из строя жизнеобеспечивающей инфраструктуры целых населенных пунктов.

В связи с этим для регионов холодного климата актуальным является расширение диапазона допустимых для сварки температур воздуха в сторону понижения. В то же время недостаточно изученными остаются вопросы влияния низких температур воздуха на формирование надмолекулярной структуры материала сварного шва. Недостаточно изучены вопросы влияния остывания сварного соединения при низких температурах воздуха на структурные

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, грант №06-08-96000-р_восток_a

параметры, в частности на степень кристалличности. Основной трудностью при таком изучении является обеспечение идентичных температурных полей в сварных соединениях на этапе нагрева при условии термостатирования труб при различных температурах воздуха. Выбор режимов воздействия нагревательным инструментом, обеспечивающих заданное температурное поле, может быть проведен на основе математического моделирования теплового процесса при сварке на этапе нагрева.

Цель данной работы - на основе численного решения двумерной задачи Стефана разработать методику выбора продолжительности воздействия нагревательным инструментом при температурах окружающей среды ниже регламентированных, обеспечивающей заданное температурное поле в сварном соединении и исследование влияния условий остывания на степень кристалличности материала соединения.

Математическое моделирование теплового процесса. В большинстве научных работ, посвященных сварке полиэтиленовых труб, тепловой процесс исследуют, решая одномерную задачу Стефана [2]. При использовании такой модели недостаточно полно учитывается конвективный теплообмен с окружающей средой, температура которой изменяется в широком диапазоне, включая естественно низкие температуры регионов холодного климата до минус 60 °С. Рассмотрим схему воздействия нагревательного инструмента и кромки трубы (рис. 1). Пренебрегая конвективной теплопроводностью воздуха внутри трубы, тепловой процесс в трубе опишем двумерным уравнением теплопроводности в цилиндрических координатах:

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

$$0 < t \leq t_m; \quad 0 < r < r_2; \quad 0 < z < l,$$

где $c(T)$ - коэффициент теплоемкости; $\rho(T)$ - удельная плотность; $\lambda(T)$ - коэффициент теплопроводности; t - время; t_m - время расчета; r, z - цилиндрические координаты. Индекс $i=0$ – для воздуха внутри трубы; $i=1$ - для твердой фазы материала трубы; $i=2$ - для жидкой фазы материала трубы.

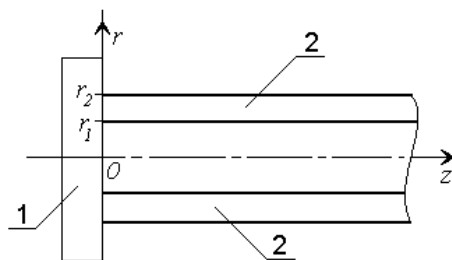


Рисунок 1. Схема нагрева при сварке:

1 – нагревательный инструмент, 2 – труба

Распределение температуры в трубе в начальный момент времени однородно и равно температуре окружающей среды (начальное условие):

$$T(r, z, 0) = T_0. \quad (2)$$

На одном торце задается температура нагревательного инструмента T_n :

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

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 другом торце трубы задается условие:

$$T(r, l, t) = T_0. \quad (4)$$

На внешней поверхности трубы происходит конвективный теплообмен с окружающей средой:

$$\lambda_1 \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=r_2} = -\alpha (T(r_2, z, t) - T_0). \quad (5)$$

При $r = 0$ условие ограниченности решения

$$\lim_{r \rightarrow 0} \lambda r \frac{\partial T}{\partial r} = 0. \quad (6)$$

На границе фазового перехода записывается условие Стефана:

$$T|_{\Phi(t)+0} = T|_{\Phi(t)-0} = T_\phi, \quad (7)$$

$$(\lambda_1 \text{grad} T - \lambda_2 \text{grad} T, \text{grad} \Phi) - L \rho \frac{\partial \Phi}{\partial t} = 0, \quad (8)$$

где $\Phi(r, z, t)$ - уравнение положения границы раздела фаз в момент времени t ; L - удельная теплота фазового перехода.

Задача (1)-(8) решалась численно методом сглаживания коэффициентов[3], т.е. она сводилась к решению следующей системы:

$$\tilde{C} \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \tilde{\lambda} \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\tilde{\lambda} \frac{\partial T}{\partial z} \right), \quad (9)$$

$$0 < t \leq t_m; \quad r_1 < r < r_2; \quad 0 < z < l,$$

$$T(r, z, 0) = T_0 \quad (10)$$

$$T(r, 0, t) = T_n \quad \text{или} \quad \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=0} = 0. \quad (11)$$

$$T(r, l, t) = T_0. \quad (12)$$

$$\tilde{\lambda} \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=r_2} = -\alpha (T(r_2, z, t) - T_0), \quad (13)$$

$$\frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=0} = 0, \quad (14)$$

где коэффициенты теплоемкости и теплопроводности определялись следующим образом:

$$\tilde{C} = \begin{cases} c_1 \rho_1, & T \leq T_\phi - \Delta, \\ 0,5(c_1 \rho_1 + c_2 \rho_2) + \frac{L \rho}{2\Delta}, & T_\phi - \Delta \leq T \leq T_\phi + \Delta, \\ c_2 \rho_2, & T \geq T_\phi + \Delta, \end{cases}$$

$$\tilde{\lambda} = \begin{cases} \lambda_1, & T \leq T_\phi - \Delta, \\ 0,5(\lambda_1 + \lambda_2), & T_\phi - \Delta \leq T \leq T_\phi + \Delta, \\ \lambda_2, & T \geq T_\phi + \Delta. \end{cases}$$

Алгоритм сквозного счета строился с использованием чисто неявных схем. Получающиеся при этом системы уравнений решались методом итераций, решения на каждой итерации находились методом прогонки[4]. Расчеты проводились при следующих данных: $r_1 = 0,0257$; $r_2 = 0,0315$ м; $l = 0,1$ м; $\lambda_1 = 0,46$; $\lambda_2 = 0,24$; $\lambda_3 = 0,0338$ Вт/(м·К); $\rho_1 = 950$; $\rho_2 = 800$; $\rho_3 = 1,2$ кг/м³; $c_1 = 2000$; $c_2 = 2400$; $c_3 = 1007$ Дж/(кг·К); $T_\phi = 128$ °С; $L = 157$ кДж/кг [5]; $\Delta = 10$ °С. Предполагается, что свариваемые трубы предварительно термостатированы при различных температурах воздуха, т.е. в начале сварки температуры в трубах равны температуре воздуха.

Рассматривался пример расчета теплового состояния при сварке полиэтиленовых труб, применяемых для газопроводных систем. При этом значения теплофизические характеристик твердой и жидкой фазы считались независимыми от температуры. Тем не менее, сглаженные коэффициенты теплоемкости и теплопроводности зависят от температуры.

Рассмотрим область, ограниченную изотермой с температурой размягчения материала и примыкающую к зоне расплава. Выбор нижней границы рассматриваемой зоны обусловлен тем, что при температурах ниже температуры размягчения в материале не происходят микроструктурные изменения и соответственно при остывании его прочностные свойства остаются неизменными. Сравнительный анализ температурных полей в рассматриваемой зоне сварного соединения при различных температурах окружающей среды показал возможность обеспечения при естественно низких температурах такого же температурного поля, какое получается при регламентируемых температурах атмосферного воздуха. На рис. 2 представлено распределение температуры по толщине стенки трубы при температуре окружающей среды - 40 °С. Распределение температуры по толщине достаточно однородно. Разница температур в середине и на свободных поверхностях составляет около 10 °С. Поэтому на этапе оплавления достаточно обеспечить совпадение зависимостей температур, например, по отрезку прямой, проходящей по середине стенки трубы. На рис. 3 показано, что совпадение температурных зависимостей при температурах окружающей среды ниже регламентируемых достигается увеличением продолжительности воздействия нагревательным инструментом.

Расчеты показали, что практическое совпадение температурных полей в рассматриваемой зоне при различных естественно низких температурах окружающей среды достигается, если обеспечить одинаковые глубины проплавления (рис. 4).

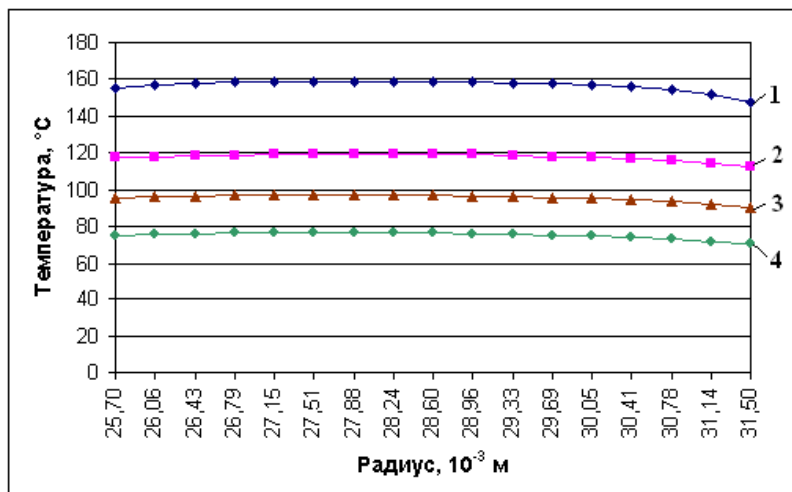


Рисунок 2. Распределение температуры на расстоянии z от нагревательного элемента по толщине стенки трубы в момент времени $t = 110$ с при температуре окружающей среды $T_0 = -40$ °С:
 1 – $z = 1$ мм; 2 – $z = 2$ мм; 3 – $z = 3$ мм; 4 – $z = 4$ мм.

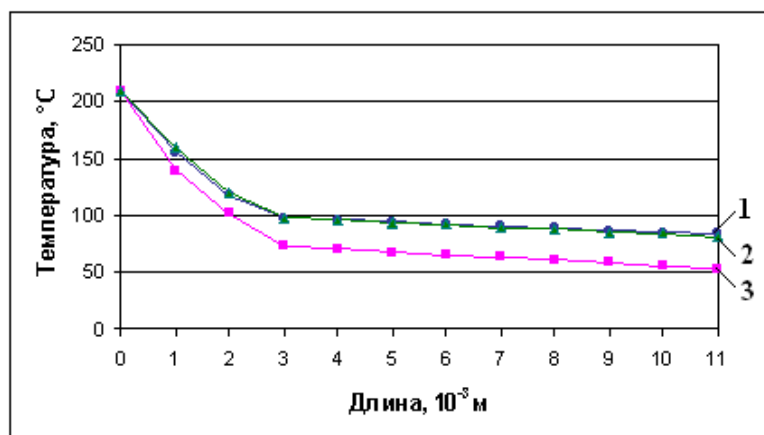


Рисунок 3. Распределение температуры по длине трубы в различные моменты времени:
 1 – $t = 55$ с при температуре окружающей среды 20 °С;
 2 – $t = 110$ с при температуре окружающей среды - 40 °С;
 3 – $t = 55$ с при температуре окружающей среды - 40 °С.

На основе этого результата предложена методика выбора режимов оплавления полиэтиленовых труб при температурах окружающей среды ниже нормативных, которая сводится к определению продолжительности воздействия нагревательным элементом, обеспечивающая глубину проплавления, соответствующую рекомендуемой продолжительности при нормальных условиях.

Например, для сварки труб из полиэтилена низкого давления ПЭ 80 SDR11 63×5,8 в нормальных условиях рекомендуемая продолжительность оплавления составляет 55 секунд. При этом расчетная глубина проплавления составит 1,63 мм. Согласно расчетам такая же глубина проплавления достигается при продолжительности оплавления равной 96 секундам при температуре окружающей среды - 40 °С. Таким образом, при сварке при температурах окружающей среды ниже нормативных продолжительность оплавления оперативно рассчитывается с помощью разработанного комплекса программ.

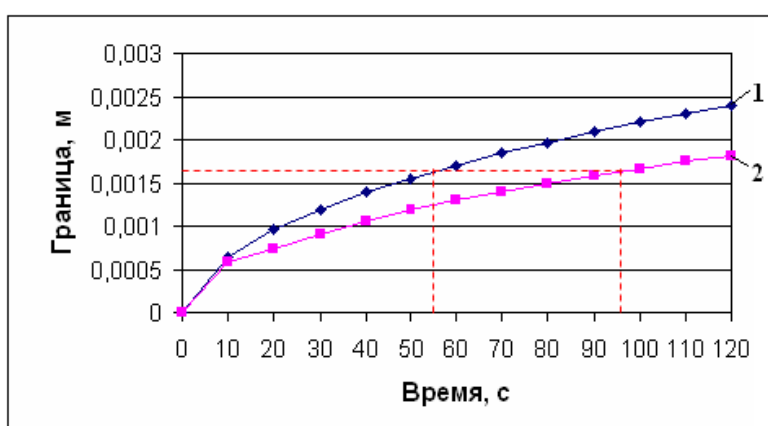


Рисунок 4. Изменение границы проплавления при различной температуре окружающей среды:

$$1 - T_0 = 20 \text{ } ^\circ\text{C}; 2 - T_0 = -40 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Исследование степени кристалличности. При оценке качества стыковых сварных соединений газопровода из полиэтиленовых труб большинство исследователей выделяют четыре основные области: зона расплава, граничная зона проплавления, зона термического влияния и исходный материал [2, 5-8]. Согласно литературным источникам, в каждой из этих областей в зависимости от технологических параметров режима сварки и температуры окружающей среды наблюдаются различия в надмолекулярной структуре [5,9]. Температура атмосферного воздуха при сварке оказывает решающее влияние на формирование кристаллической структуры зоны стыкового сварного соединения и, как следствие, на его долговременную прочность [5].

Были исследованы степени кристалличности вышеназванных четырех основных областей зоны стыкового сварного соединения по сечению трубы. Причем собственно грат не исследовался, он срезался на уровне наружной и внутренней поверхностей полиэтиленовой трубы, а сечение участка равномерно делилось на пять равных частей. Исследовались три части сечения трубы, включающие наружную и внутреннюю поверхности трубы и середину. Масса испытываемых образцов составляла от 3 до 5 мг. Испытание проводилось на универсальном калориметре DSK L63/45 со скоростью нагрева 10 град/мин, в интервале температур от комнатной до 200 °С. Степень кристалличности определялась из соотношения:

$$\alpha = \frac{\Delta H_f}{\Delta H_{f100}},$$

где ΔH_f - калориметрическая энтальпия плавления, Дж/г; $\Delta H_{f100\%} = 293$ Дж/г - энтальпия плавления полностью закристаллизованного полиэтилена [10].

Стыковая сварка полиэтиленовой трубы марки ПЭ-80 SDR11 63×5,8 проводилась согласно режимам, приведенным в таблице 1.

Таблица 1

Параметры режима сварки

Режим	Температура окружающей среды (ТОС), °С	Продолжительность оплавления, с
I	+24	55
II	-18	55
III	-30	55
IV	-30	86
V	-43	55
VI	-43	98

Продолжительность времени оплавления для конкретных температур окружающей среды была получена на основе тепловых расчетов по вышеприведенной методике, позволяющей обеспечить в зоне сварного соединения при температурах окружающего воздуха ниже нормативных, практически такое же температурное поле, что и при нормальных условиях. Дополнительно, с целью выявления влияния температуры окружающей среды на степень кристалличности разных областей сварного соединения при одинаковой длительности оплавления, время оплавления для всех температур окружающей

среды равнялось – 55 сек, согласно времени оплавления для данного типа и размера трубы при нормированных температурах.

На рис. 5 - 8 представлены степени кристалличности четырех основных областей стыкового сварного соединения полиэтиленовой трубы ПЭ-80: 1 – зона расплава, 2 – граничная зона проплавления, 3 – зона термического влияния и 4 – исходный материал по сечению трубы (внутренняя, средняя, внешняя) произведенного при температурах окружающего атмосферного воздуха: + 24, - 18, - 30, - 30 (86 сек), - 43, - 43 °С (98 сек).

При рекомендуемой нормативными документами продолжительности оплавления (55 сек) степень кристалличности зоны расплава с понижением температуры окружающей среды в целом по сечению монотонно повышается, достигая при $T = - 43$ °С атмосферного воздуха максимального значения в средней части расплава (рис. 8а). Степени кристалличности зоны термического влияния и исходного материала остаются практически без изменения во всем температурном диапазоне, в котором был произведен сварной шов. Наибольшее колебание степени кристалличности проявляет граничная зона проплавления, находящаяся между зоной расплава и твердым полимером, особенно степени кристалличности внутренней и средней частей (рис. 7а).

Степень кристалличности всех исследованных областей зоны стыкового сварного соединения, выполненного с расчетной продолжительностью оплавления, независимо от величины температуры окружающего атмосферного воздуха становится почти одинаковой (рис. 7б, 8б). Значение степени кристалличности сварного соединения, полученного при низких температурах окружающей среды, незначительно повышается по сравнению со степенью кристалличности соединения, полученного при регламентируемой температуре окружающей среды (+ 24 °С). Однородность степени кристалличности и одновременное повышение ее значения в различных областях соединения способствуют повышению кратковременной прочности.

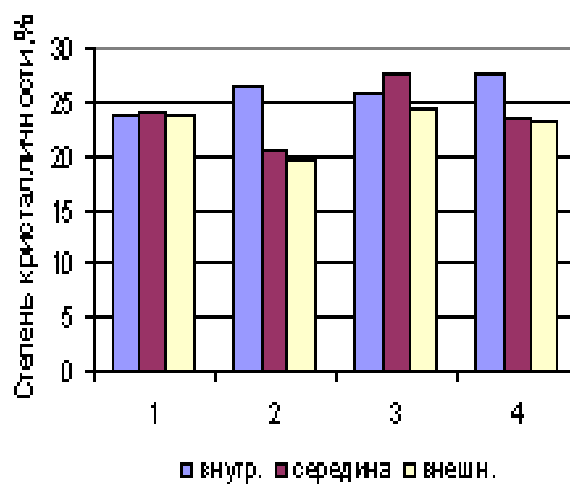


Рисунок 5. Показатели степени кристалличности на различных участках сварного соединения, сформированного при режиме сварки I (ТОС = + 24 °С)

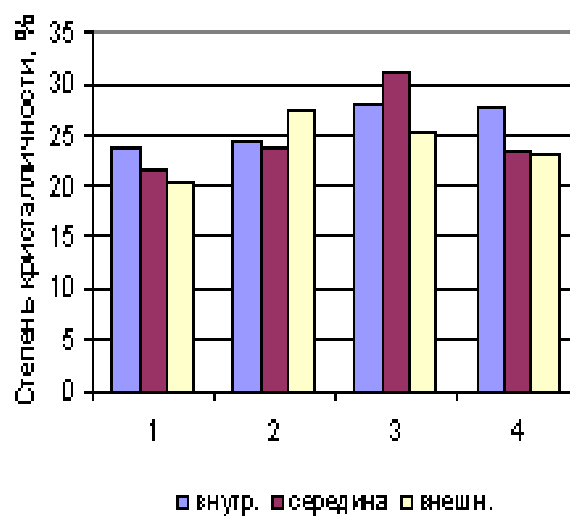


Рисунок 6. Показатели степени кристалличности на различных участках сварного соединения, сформированного при режиме II (ТОС = - 18 °С)

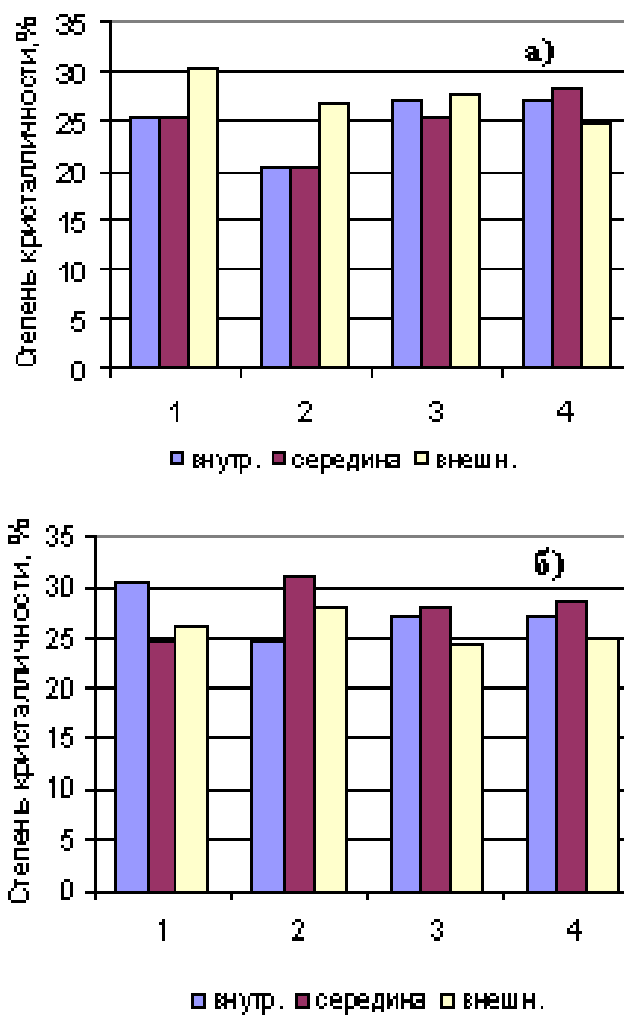


Рисунок 7. Показатели степени кристалличности на различных участках сварного соединения, сформированного при режиме III (а), режиме IV (б), ТОС= - 30 °С.

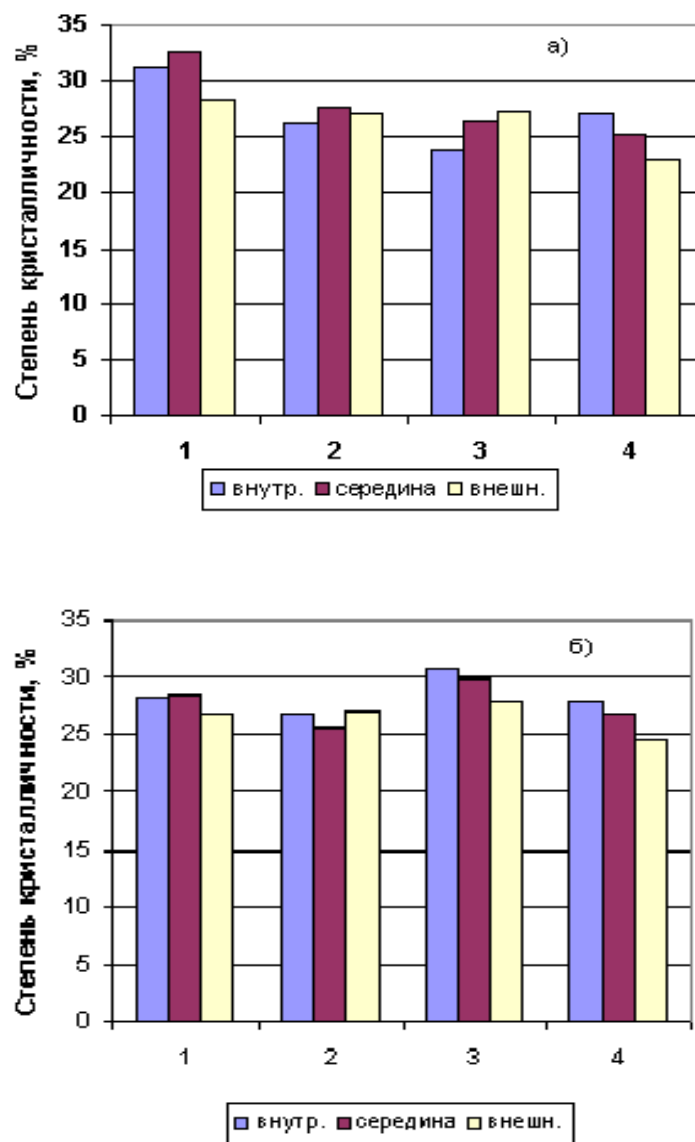


Рисунок 8. Показатели степени кристалличности на различных участках сварного соединения, сформированного при режиме V (а), режиме VI (б), ТОС = - 43 °С

Выводы. Исследование зоны стыкового сварного соединения произведенного по расчетному времени оплавления при температурах окружающей среды ниже нормативных показало однородную степень кристалличности в области сварного соединения, в отличие от зоны стыкового сварного соединения произведенного по рекомендуемой продолжительности времени оплавления при нормированных условиях. Наблюдается повышение степени кристалличности зоны стыкового сварного соединения с понижением температуры окружающей среды при производстве сварных соединений. Предложенная методика расчета продолжительности оплавления, обеспечивающая заданное температурное поле в зоне проплавления, может использоваться при сварке стыкового соединения полиэтиленовых труб для газопроводов в аварийных ситуациях при температурах ниже регламентированных.

Литература

1. СП 42-103-2003. Свод правил по проектированию и строительству. Проектирование и строительство газопроводов из полиэтиленовых труб и реконструкция изношенных газопроводов.
2. Зайцев К.И., Мацюк Л.Н., Богдашевский А.Г. и др. Сварка полимерных материалов: Справочник. – М.: Машиностроение, 1988, 312 с.
3. Самарский А.А., Моисеенко Б.Д. Экономичная схема сквозного счета для многомерной задачи Стефана // Журнал вычислительной математики и математической физики, 1965, Т. 5, № 5, с. 816-827.
4. Самарский А.А. Теория разностных схем. – М.: Наука, 1977, 656 с.
5. Кайгородов Г.К., Каргин В.Ю. Влияние скорости охлаждения полиэтиленового сварного шва на ее прочность // Трубопроводы и экология, 2001, №2, с.13-14.
6. Зайцев К.И. Дифференциальное исследование сварного стыкового соединения термопластов // Пластические массы, 1975, №4, с.67-69.
7. Кашковская Е.А., Кайгородов Г.К. Очаги разрушения сварного соединения полиэтиленовых трубопроводов // Автоматическая сварка, №8 (269), 1975, с.23-26.

8. Бабенко Ф.И., Герасимов А.А., Родионов А.К. Трещиностойкость сварных стыковых соединений полиэтиленовых труб // Материалы технологии, инструменты, 2003, Т.8, №3, с. 19-20.

9. Гринюк А.Г., Шадрин А.Г., Золотарь А.В. и др. Микроструктура и качество стыковых сварных соединений полиэтилена // Автоматическая сварка, 1990, 11 (452), с. 23-26.

10. Горилловский М.И., Калугина Е.В., Иванов А.Н., Сатдинова Ф.К. Исследование кристалличности и термостабильности в трубах, полученных из различных видов полиэтилена // Пластические массы. Структура и свойства, 2005, № 4, с. 9-12.