

ПОЛУЧЕНИЕ НЕРАЗЪЕМНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ТРУБ ИЗ СТРУКТУРИРОВАННОГО ПОЛИЭТИЛЕНА

Н. Г. КОРАБ, канд. техн. наук, С. В. КАБЫШ, А. В. КОСТЕНКО, инженеры
(Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Рассмотрена возможность получения неразъемного соединения труб из структурированного полиэтилена с использованием метода косвенного нагрева. Как показали механические испытания, прочность соединения может достигать 90 % и выше прочности основного материала. Отмечена возможность автоматизации выбора режимов нагрева и эффективного использования для создания промышленной технологии соединения труб из структурированного полиэтилена.

Ключевые слова: косвенный нагрев, структурированный полиэтилен, неразъемное соединение, полимерные трубопроводы

Во многих странах, включая Украину, для трубопроводов различного назначения успешно применяют трубы из структурированного (сшитого) полиэтилена. По сравнению с большинством термопластов у данного материала выше показатели ударной вязкости при низких температурах, стойкость к медленному и быстрому распространению трещин, химическая стойкость, прочность. Для этого в материале различными способами создается трехмерная сетчатая структура, отличительной чертой которой является сильная молекулярная связь между полимерными цепочками, что значительно повышает стабильность полимера и обеспечивает повышенную плотность [1]. В настоящее время в Украине действует стандарт [2], согласно которому из структурированного полиэтилена могут изготавливаться трубы четырех видов: РЕ-Ха, РЕ-Хб, РЕ-Хс и РЕ-Хд, предназначенные для строительства и ремонта трубопроводных сетей холодного, горячего водоснабжения и отопления, транспортирующие воду с температурой 5...95 °С. Сварка этих труб с применением известных способов не позволяет получить необходимые прочностные свойства соединения [1, 3] (коэффициент прочности k не превышает 0,1...0,3 прочности материала труб). Сегодня трубопроводы из структурированного полиэтилена монтируют с помощью металлических соединительных деталей различных конструкций [4]. При этом существует ряд недостатков — высокая цена, коррозия металлических частей и возможная потеря герметичности при длительной эксплуатации. Анализ имеющихся публикаций показывает, что за рубежом ведутся работы по сварке структурированного полиэтилена [3, 5–7], но их результаты пока не имеют широкого про-

мышленного применения, что связано с различными причинами, например, сложностью изготовления соединительной детали, повышенного выделения вредных веществ из-за высокой температуры сварки и т. д.

Исходя из изложенного выше, в ИЭС им. Е. О. Патона исследована возможность получения неразъемного соединения труб из структурированного полиэтилена типа РЕ-Ха методом косвенного «непрямого» нагрева, который осуществляется путем «сплавления» соединяемых поверхностей через прослойку толщиной 0,5 мм полиэтилена высокой плотности марки ПЕ80. При этом подвод тепла к зоне «сплавления» осуществляется через одну из соединяемых поверхностей (косвенный нагрев) (рис. 1) [8–10]. Предлагаемая технология состоит из нескольких основных операций. Сначала проводится сборка соединения, затем со стороны наружной поверхности муфты 3 наружным диаметром 6,3 мм и толщиной стенки 5,8 мм, изготовленной из материала РЕ-Ха, проводится прогрев деталей 3, 2 и поверхности труб 1 на глубину $h = r + (1...1,5)$ мм до температуры порядка 170...200 °С (длительность нагрева $\tau =$

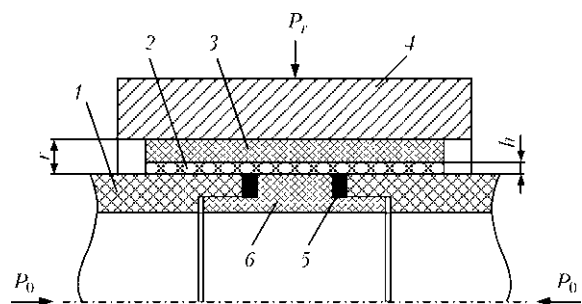


Рис. 1. Схема неразъемного соединения труб из структурированного полиэтилена, получаемого методом косвенного нагрева: 1 — соединяемые трубы; 2 — прослойка (из полиэтилена высокой плотности); 3 — наружная соединительная муфта (из структурированного полиэтилена); 4 — насадка нагревательного инструмента ($t_n = 200...300$ °С); 5 — шайба (из полиэтилена высокой плотности); 6 — направляющая вставка



= 4...11 мин). При нагреве и остывании необходимо прикладывать осевое давление $P_0 = 0,02...0,05$ МПа к соединяемым трубам и радиальное давление $P_r = 0,1...0,2$ МПа к наружной поверхности муфты 3 (давление P_0 создается системой нагружения центратора, в котором закрепляется соединение при нагреве и охлаждении, а P_r обеспечивается путем обжатия муфты 3 металлическим бандажом или специальными насадками нагревателя). По окончании нагрева проводится охлаждение в течение 15...50 мин, после чего насадки нагревателя (или бандаж) снимаются. Для обеспечения максимально возможной степени релаксации термических напряжений, вызванных образованием расплава полиэтилена высокой плотности в зоне соединения, эксплуатировать трубопровод рекомендуется через 6...20 ч после окончания нагрева. Вставка 6 служит для предотвращения перекоса и смещения торцов соединяемых труб, а кольцо 5 — для дополнительной герметизации путем их частичного расплавления и взаимодействия с торцами труб и вставки 6. Основные исследования проводили для труб наружным диаметром 50 мм с толщиной стенки 4,6 мм из структурированного полиэтилена типа РЕ-Ха.

Механические свойства соединений оценивали по результатам испытания на растяжение (рис. 2). Исходя из полученных усилий, которые выдерживали образцы перед разрушением, определяли коэффициент прочности:

$$k = \sigma / \sigma_T \quad (1)$$

где σ — максимальное растягивающее напряжение в стенке трубы, которое выдержало соединение до разрушения, МПа; σ_T — предел текучести материала соединяемых труб (для полиэтилена типа РЕ-Ха $\sigma_T = 19,6$ МПа).

Прочность соединения обеспечивается адгезионным взаимодействием между материалом прослойки в зонах ее контакта с соединяемыми деталями. Как показывают исследования физики процесса, в основе этого взаимодействия лежат силы Ван-дер-Ваальса [1,11], а первым необходимым условием его возникновения является наличие разогрева материала прослойки и соединяе-



Рис. 2. Образец, выдержавший испытание на растяжение, без разрушения соединения (на трубе рядом с муфтой «шейка» — след остаточных деформаций)

мых поверхностей до температуры плавления полиэтилена $t_{пл}$, т. е. не менее 125...130 °С. Вторым необходимым условием является наличие давления сжатия в зоне нагрева P_r , в данном случае оно возникает в результате терморасширения разогретого материала соединяемых деталей и прослойки, с этой целью соединение плотно обжимается полостью нагревателя или бандажом.

Нами исследована зависимость прочности соединения от продолжительности нагрева при различных температурах нагревательного инструмента (рис. 3). С увеличением длительности нагрева во всем интервале варьирования температур нагревателя наблюдается возрастание коэффициента прочности. При $k > 0,2$ во всех случаях зависимость $k = f(\tau)$ монотонно возрастает, достигая значения $k = 1$. Проведя линейную аппроксимацию экспериментальных данных [12] в интервале $k = 0,2, \dots, 1$, получаем зависимости $k = f(\tau) = a\tau + b$ для каждого значения температуры нагревателя t_H (кривые 1-3 на рис. 3). Пример прохождения аппроксимирующей прямой показан кривой 6. После чего, определив зависимость $a = f(t_H)$ и $b = f(t_H)$ (которые в выбранном интервале также удовлетворяют линейному закону) и подставив их в уравнение $k = f(\tau) = a\tau + b$, получаем

$$k = f(\tau, t_H) = [(0,153t_H - 20)\tau + 0,0697t_H - 25] \cdot 10^{-2} \quad (2)$$

Оценим пределы варьирования t_H , в которых уравнение (2) будет иметь смысл при описании процесса образования адгезионной прочности в соединении. Зададим следующие условия, отвечающие технологическому процессу: $k, \tau \geq 0$ и могут принимать значения $0 \leq k \leq 1, \tau_0 \leq \tau \leq \tau_m$. При этом τ_0 и τ_m определяются для каждой конкретно взятой величины t_H из зависимостей, полученных подстановкой в уравнение (2) значений $k = 0$ и $k = 1$

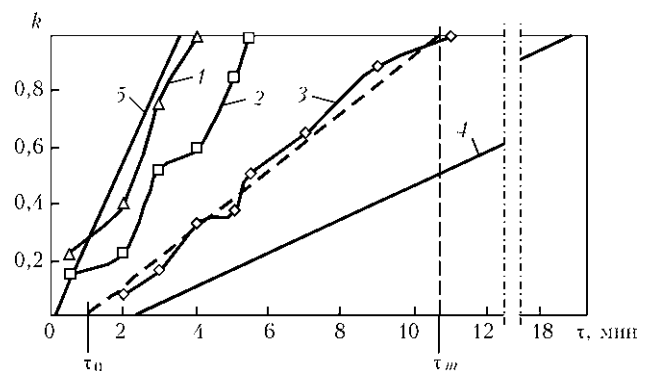


Рис. 3. Зависимость коэффициента прочности соединения от времени нагрева τ при различных значениях температуры нагревательного инструмента: 1 — $t_H = 300$; 2 — 270; 3 — 200; 4 — 320; 5 — 170 °С (кривые 4, 5 построены по расчетным данным, кривая 6 — по результатам аппроксимации)

$$\tau_0 = \frac{25 - 0,0697t_H}{0,153t_H - 20} \text{ (мин)}, \quad (3)$$

$$\tau_m = \frac{125 - 0,0697t_H}{0,153t_H - 20} \text{ (мин)}. \quad (4)$$

Для определения интервала варьирования t_H подставим в уравнение (3) значение $\tau_0 = 0$, а в уравнении (4) знаменатель приравняем нулю.

После вычислений из уравнения (3) получим $t_H = 358,7 \approx 360 \text{ }^\circ\text{C}$, а для знаменателя уравнения (4) $t_H = 130,7 \approx 130 \text{ }^\circ\text{C}$. Следовательно, уравнение (2) имеет физический смысл при $130,7 < t_H < 358,7 \text{ }^\circ\text{C}$, так как при $t_H > 358,7 \text{ }^\circ\text{C}$ $\tau < 0$, а при $t_H = 130,7 \text{ }^\circ\text{C}$ $\tau \rightarrow \infty$. Как показали измерения, температура нагревательного инструмента выше температуры в зоне его контакта с деталью в среднем на $40 \text{ }^\circ\text{C}$. Чтобы откорректировать предел варьирования t_H , нижний предел установим, приняв, что температура контакта должна быть не менее, чем $t_{\text{пл}} = 130 \text{ }^\circ\text{C}$, т. е. $t_{H, \text{min}} = t_{\text{пл}} + 40 = 130 + 40 = 170 \text{ }^\circ\text{C}$. Подобным образом определим и верхний предел, учитывая, что температура термической деструкции полиэтилена составляет $t_d = 280 \text{ }^\circ\text{C}$ [1], $t_{H, \text{max}} = t_d + 40 = 280 + 40 = 320 \text{ }^\circ\text{C}$, так как в случае превышения температуры деструкции возникает вероятность разложения (а значит, разупрочнения) материала соединительной детали в месте контакта с нагревателем. Условия, которым должно удовлетворять уравнение (2), следующие: $k, \tau \geq 0$; $t_H > 0$; $k = 0 \dots 1$, $t_H = 170 \dots 320 \text{ }^\circ\text{C}$; $\tau = \tau_0 \dots \tau_m$, где τ_0 и τ_m определяются согласно уравнениям (3) и (4) для каждого конкретно взятого значения t_H . Окончательно определив условия, для которых можно пользоваться уравнением (2), найдем его частные случаи в виде $k = f(\tau)$ для температур нагревательного элемента $t_{H, \text{max}}$ и $t_{H, \text{min}}$ (соответственно 320 и $170 \text{ }^\circ\text{C}$) и построим их в виде кривых 4, 5 (рис 3):

$$\text{для } t_H = 320 \text{ }^\circ\text{C} \quad k = f(\tau) = [28,96\tau - 2,696]10^{-2}, \quad (5)$$

$$\text{для } t_H = 170 \text{ }^\circ\text{C} \quad k = f(\tau) = [6,01\tau - 13,151]10^{-2}. \quad (6)$$

Зависимости (5) и (6) показывают, что скорость увеличения прочности тем выше, чем выше температура нагревательного инструмента, и наоборот, что подтверждается и экспериментальными данными.

Справедливо утверждение, что на начальном этапе нагрева прочность адгезионного взаимодействия соединения нулевая до наступления момента времени τ' , когда прослойка расплавлена, а в зоне ее контакта с соединяемыми поверхностями появляются области, имеющие температуру, равную или больше температуры плавления полиэтилена $t_{\text{пл}}$, когда становится возможным по-

явление адгезионного взаимодействия в зоне контакта. Допустив, что зависимость $k = f(\tau)$ является линейной при $k < 0,2$, можем считать, что $\tau' = \tau_0$, т. е. это время, необходимое для достижения температуры, равной $t_{\text{пл}}$ на поверхности контакта прослойки и труб при заданном значении t_H и r (см. рис. 1). Аналогично можно определить оптимальную для каждого заданного значения t_H продолжительность нагрева, при которой адгезионное взаимодействие наблюдается по всей площади соединяемых поверхностей (в нашем случае это точка на графике $k = f(\tau)$, отвечающая значению $k = 1$, и равная τ_m , которую также можно найти из уравнения (4)). Таким образом, при достижении по всей площади контакта прослойки с соединяемыми поверхностями длительности нагрева τ_m , достигнута температура $t \geq t_{\text{пл}}$ и прочность адгезионного взаимодействия максимальная, а дальнейший нагрев больше не влияет на увеличение прочности соединения, что подтверждается характером разрушения образцов при испытаниях на растяжение (см. рис. 2). С помощью полученных зависимостей появляется возможность автоматизировать процесс выбора режимов нагрева, что, в свою очередь, приводит к оптимальному сочетанию высоких прочностных свойств с минимальным уровнем энергозатрат.

Проведенные гидравлические испытания показали, что при температуре рабочей жидкости $95 \text{ }^\circ\text{C}$, давлении 1 МПа и продолжительности 165 ч трубные образцы не разрушились. Для определения максимальной стойкости образца и характера его возможного разрушения после испытания давление увеличили. Образец разрушился по стенке соединяемой трубы, выдержав максимальное давление $2,1 \text{ МПа}$, а участок соединения остался без видимых следов деформации или разрушений (рис. 4, 5).

Таким образом, данная работа затрагивает лишь незначительную часть того, что связано с получением неразъемных соединений для новых полимерных материалов. Изучение публикаций многих исследователей как в Украине, так и за рубежом показало, что имеется значительный интерес не только к совершенствованию применяемых технологий, но и к сварке новых видов полимеров, в том числе трудносвариваемых.

В дальнейшем следует исследовать влияние на свойства соединения таких параметров, как материал и толщина прослойки, толщина стенки соединительной детали и стенки трубы. С точки зрения предлагаемой технологии важно также исследовать другие разновидности структурированного полиэтилена: РЕ-Хс, РЕ-Хd и прежде всего РЕ-Хb, так как он отличается более высокими прочностными свойствами и начинает довольно широко применяться. Данный метод, как показано



Рис. 4. Образец соединения труб с наружным диаметром 50 мм и толщиной стенки 4,6 мм из структурированного полиэтилена марки РЕ-Ха после проведения гидравлических испытаний

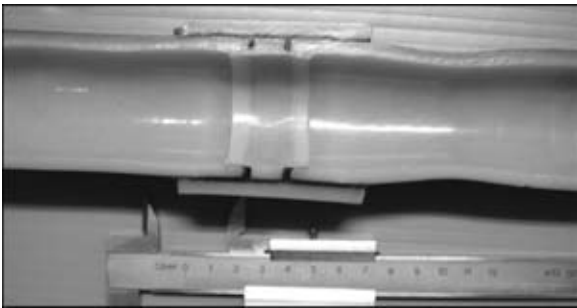


Рис. 5. Продольное сечение соединения после проведения гидравлических испытаний

выше, позволяет обеспечить максимально высокие эксплуатационные характеристики трубопроводов, при этом не требуя применения сложного, дорогостоящего оборудования. По результатам данных исследований на комплект соединительных деталей и способ получения неразъемного соединения труб из структурированного полиэтилена методом косвенного нагрева [9, 10], оформлены соответствующие патенты в Украине и России.

Выводы

1. Показана возможность получения неразъемного соединения для труб из структурированного полиэтилена термическим методом (метод косвенного нагрева).

2. Прочностные свойства полученных соединений не уступают прочности соединяемых труб

The possibility is considered of producing a permanent joint in structured polyethylene pipes by using the indirect heating method. As shown by mechanical tests, strength of the joint can reach 90 % or higher of that of the base material. Noted is the possibility of automated selection of heating conditions and their efficient utilization for development of a commercial technology for joining structured polyethylene pipes.

(для труб из структурированного полиэтилена типа РЕ-Ха).

3. На основе экспериментальных данных получена зависимость прочностных свойств соединения от основных технологических параметров, что позволяет автоматизировать процесс выбора режимов нагрева, а также сделать некоторые предположения о механизме формирования адгезионного взаимодействия в зоне контакта соединяемых поверхностей.

1. Лосев И. П., Тростянская Е. Б. Химия синтетических полимеров. — М.: Химия, 1981. — 675 с.
2. ДСТУ В.В.2.5-17-2001. Інженерне обладнання будинків і споруд. Зовнішні мережі та споруди. Труби зі структурированого поліетилену для мереж холодного, гарячого водопостачання та опалення. — К.: Держбуд України, 2001.
3. Тобиас В., Бернштайн Г. Сварка труб из РЕ-Х — сшитого полиэтилена // Полимергаз. — 2000. — № 2. — С. 28–32.
4. ДБН В.2.5-22-2002. Кодекс усталеної практики. Звід правил. Інженерне обладнання будинків та споруд. Зовнішні мережі та споруди. Зовнішні мережі гарячого водопостачання та водяного опалення з використанням труб зі структурированого поліетилену з тепловою ізоляцією зі спіненого поліетилену і захисною гофрованою поліетиленовою оболонкою. — К.: Держбуд України, 2002. — Т. 1, 2.
5. Екерт Р., Шлахтер Р., Гессель Й. Исследования сварных соединений труб и фитингов с закладным нагревательным элементом в комбинациях из ПЭ 80, ПЭ 100 и сшитого полиэтилена — РЕ-Ха // Полимергаз. — 1999. — № 4. — С. 16, 33–36.
6. Ilavsky I. J. Spajanie sietovanych polyetylenovych rur (typ PEХ-b) // Plastic materials in gas distribution: 8th Intern. gas conf. — Prague, 27–28 Febr., 2001.
7. Pat. 6 524 425 B1 US. Method for butt welding cross-linked polyethylene pipes (PE-X pipes) / W. Tobias, Halle (DE), G. Bernstein, Gruena (DE). — Оpubл. 25.02.2003.
8. Справочник по сварке и склеиванию пластмасс / А. Н. Шестопап, Ю. С. Васильев, Э. А. Минеев и др. / Под ред. А. Н. Шестопапа. — Киев: Техніка, 1986. — 192 с.
9. Пат. 77212. Комплект з'єднувальних деталей для зварювання труб з структурированого (зшитого) поліетилену та спосіб зварювання нагрітим інструментом труб зі структурированого (зшитого) поліетилену. — Оpubл. 15.11.2006.
10. Пат. РФ 2293656. Комплект соединительных деталей для сварки труб из структурированного полиэтилена и способ сварки нагретым инструментом труб из структурированного полиэтилена. — Оpubл. 20.02.2007.
11. Зайцев К. И., Мацюк Л. Н. Сварка пластмасс. — М.: Машиностроение, 1987. — 250 с.
12. Бут Э. Д. Численные методы. — Киев: Наук. думка, 1992. — 247 с.

Поступила в редакцию 17.10.2008