

УДК 621.791:678.029.43

М.В. ЮРЖЕНКО

Інститут електрозварювання ім.С.О.Патона НАН України, м.Київ

НОВІТНІЙ ТЕХНОЛОГІЧНИЙ ПІДХІД ЗВАРЮВАННЯ «В ЗАМКНеноМУ ОБ'ЄМІ» НАГРІТИМ ІНСТРУМЕНТОМ ВСТИК ПОЛІМЕРНИХ БАГАТОШАРОВИХ КОМПЗИТНИХ ТРУБ

При інсталяції мереж гарячого водопостачання і опалення в Україні і світі активно застосовують різні види поліпропіленових труб, зокрема багатошарові, армовані скловолокном. Основним методом з'єднання поліпропіленових труб в даний час є зварювання нагрітим інструментом врозтруб, яке передбачає використання спеціальних з'єднувальних муфт. Розтрубне зварювання дає гарні результати при з'єднанні гомогенних труб, але, у зв'язку з різними термомеханічними характеристиками матеріалів багатошарових композитних труб та особливостями цього процесу зварювання, не дозволяє отримувати рівномірні шви. Максимальна міцність з'єднання таких труб може бути досягнута при отриманні зварних швів з незмінною пошаровою структурою, аналогічної структурі основного матеріалу.

В роботі розроблено новий технологічний підхід зварювання «в замкненому об'ємі» нагрітим інструментом встик непрямим нагрівом багатошарових композитних полімерних труб, який полягає у пошаровому зварюванні шарів композитних труб без течії та змішування полімерного матеріалу шарів та формуванні безшовного зварного з'єднання. Проведено модельні зварювання встик багатошарових армованих поліпропіленових труб нагрітим інструментом з традиційним прямим та розробленим технологічним підходом з непрямим нагрівом. Порівняльний аналіз морфологічних особливостей та механічних характеристик сформованих зварних з'єднань показав, що при традиційному стиковому зварюванні формування зварного шва відбувається по армованому шару, а його наповнювач - скляні волокна не армують шов, а навпаки відіграють роль багаточисельних дефектів. В той же час пошарове зварювання за розробленим технологічним підходом дозволяє отримати структуру і механічні характеристики зварного шва ідентичні основному матеріалу, а отже досягти його рівномірності. Сформульовано технологічні рекомендації щодо використання розробленого технологічного підходу на підприємствах України відповідної галузі промисловості.

Ключові слова: полімерні багатошарові композитні труби, поліпропілен, скловолокно, пошарове зварювання нагрітим інструментом встик, технологічний підхід.

М.В. ЮРЖЕНКО

Інститут електросварки ім.Е.О.Патона НАН України, г.Київ

НОВЕЙШИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ПОДХОД СВАРКИ «В ЗАМКНУТОМ ОБЪЕМЕ» НАГРЕТЫМ ИНСТРУМЕНТОМ ВСТЫК ПОЛИМЕРНЫХ МНОГОСЛОЙНЫХ КОМПЗИТНЫХ ТРУБ

При инсталляции сетей горячего водоснабжения и отопления в Украине и мире активно используют разные виды полипропиленовых труб, в частности многослойных, армированных стекловолокном. Основным методом соединения полипропиленовых труб в данный момент является сварка нагретым инструментом вразтруб, которая предполагает использование специальных соединительных муфт. Разтрубная сварка дает хорошие результаты при соединении гомогенных труб, однако, в связи с разными термомеханическими характеристиками материалов многослойных композитных труб и особенностями этого процесса сварки, не позволяет получать равнопрочные швы. Максимальная прочность соединений таких труб может быть достигнута при получении сварных соединений с неизменной послойной структурой, аналогичной структуре основного материала.

В работе разработан новый технологический подход сварки «в замкнутом объеме» нагретым инструментом встик непрямим нагревом многослойных композитных полимерных труб, который основывается на послойной сварке слоев композитных труб без течения и смешивания полимерного материала слоев и формировании бесшовного сварного соединения. Проведены модельные сварки встик многослойных армированных полипропиленовых труб нагретым инструментом с традиционным прямым и разработанным технологическим подходом с непрямим нагревом. Сравнительный анализ морфологических особенностей и механических характеристик сформированных сварных соединений показал, что при традиционной стыковой сварке формирования сварного шва происходит по армированному слою, а его наполнитель – стеклянные волокна не армируют шов, а наоборот играют роль многочисленных дефектов. В то же время послойная сварка по разработанному технологическому подходу позволяет получать структуру и механические характеристики сварного шва идентичные

основному матеріалу, таким образом достичь его равнопрочности. Сформулированы технологические рекомендации использования разработанного технологического подхода на предприятиях Украины соответствующей сферы промышленности.

Ключевые слова: полимерные многослойные композитные трубы, полипропилен, стекловолокно, послойная сварка нагретым инструментом встык, технологический подход.

M.V. IURZHENKO

E.O.Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine, Kyiv

NOVEL TECHNOLOGICAL APPROACH TO BUTT WELDING «IN A CLOSED VOLUME» WITH THE HEATED TOOL OF POLYMERIC MULTILAYER COMPOSITE PIPES

When installing networks of hot water supply and heating in Ukraine and in the world, different types of polypropylene pipes, in particular multilayer, reinforced with fiberglass, are actively used. The main method of connecting polypropylene pipes at the moment is socket welding with a heated tool, which involves the use of special fittings. Socket welding gives good results when joining homogeneous pipes, however, due to the different thermomechanical characteristics of materials of multilayer composite pipes and features of this welding process, it does not allow to obtain equal strength joints. The maximum strength of joints of such pipes can be achieved by obtaining welded joints with a constant layer-by-layer structure, similar to the structure of the base material.

In this work, a new technological approach to butt welding “in a closed volume” with a heated tool by indirect heating of multilayer composite polymer pipes has been developed. Model butt welding of multilayer reinforced polypropylene pipes with a heated tool with a conventional direct and developed technological approach with indirect heating were carried out. A comparative analysis of the morphological features and mechanical characteristics of the formed welded joints showed that with conventional butt welding, the formation of the welded joint occurs along the reinforced layer, and its filler - glass fibers do not reinforce the weld, but even plays the role of numerous defects. At the same time, layer-by-layer welding according to the developed technological approach allows to obtain the structure and mechanical characteristics of the welded joint identical to the base material, thus achieving its equal strength. Technological recommendations are formulated for application of the developed technological approach to Ukrainian enterprises of the relevant industry.

Keywords: polymeric multilayer composite pipes, polypropylene, fiberglass, layer-by-layer butt welding with a heated tool, technological approach.

Постановка проблеми

У мережах гарячого водопостачання і опалення в Україні і світі активно застосовують різні види поліпропіленових труб зокрема багат шарові, армовані скловолокном. Основним методом з'єднання поліпропіленових композитних труб в даний час є зварювання нагрітим інструментом врозтруб, яке часто не дозволяє отримувати рівномірні шви саме для таких труб.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Поліпропілен є одним із термопластичних полімерів, який широко застосовують для виробництва напірних труб. Цей матеріал знаходиться на третьому місці у світовому об'ємі виробництва труб після ПВХ та поліетилену. Більш широкому розповсюдженню поліпропілену у трубній галузі заважає його висока вартість у порівнянні із матеріалами – лідерами ринку. За фізичними властивостями поліпропілен подібний до поліетилену, однак термостійкість його вище, що зумовлює використання цього матеріалу у трубопроводах для подачі гарячої води та опалення [1]. Основними недоліками труб з однорідного поліпропілену були висока дифузія кисню крізь цей матеріал та великий коефіцієнт лінійного розширення труб [2], що призводило до значних змін їх розмірів при коливаннях температури. Тому на певному етапі розвитку технології виготовлення поліпропіленових труб почали застосовувати їх армування алюмінієвою фольгою та рубленим скловолокном за допомогою спеціальних спінекструїційних технологій [3]. Це пояснюється можливістю варіювання їхніх властивостей за рахунок вибору складу композиційного матеріалу, встановлення порядку чергування шарів, вибору оптимальної технології та обладнання для отримання конкретного матеріалу [4, 5]. Рублені скляні волокна зазвичай мають круглу форму поперечного перерізу, хоча застосовують, також волокна трикутної, прямокутної та шестигрутної форм. Такі волокна корисні при необхідності забезпечення високого ступеню наповнення полімерного композиційного матеріалу. Окрім волокон, для наповнення композиційних матеріалів використовують, також, скляні порошки з монолітними та пустотілими гранулами [6, 7].

Для з'єднання звичайних та армованих поліпропіленових труб традиційно рекомендують використовувати зварювання нагрітим інструментом врозтруб [8]. Ця технологія сама по собі має цілий ряд суттєвих недоліків. Використання при зварюванні спеціальних фітингів – литих муфт або інших деталей із суцільного поліпропілену ускладнює та здорожує процес виконання з'єднання. Для кожного

стику фактично необхідно виконати два зварювання, під'єднавши трубу з обох боків фітингу. Крім того, оскільки при зварюванні врозтруб прогріваються досить значні площі деталей, виникає небезпека значних усадок розплавленого матеріалу муфти та труби. По поверхні сплавлення можуть утворюватися пори та більш великі порожнини, які при об'єднанні формують наскрізні несплавлення, що порушують герметичність стику [9].

Формулювання мети дослідження

Метою роботи була розробка технологічного підходу для зварювання багат шарових композитних труб з отриманням рівномірних швів з незмінною пошаровою структурою, аналогічною структурі основного матеріалу, на основі контактної теплової зварювання проплавленням [10], який ще називають пресовим зварюванням нагрітим інструментом з непрямим нагрівом [11].

Викладення основного матеріалу дослідження

Комплексні дослідження та розробку технологічного підходу проводили на зразках поліпропіленових армованих труб зовнішнім діаметром 63 мм. Використовували багат шарові композитні труби на основі поліпропілену та подрібненого скловолокна з центральним армованим шаром КОМПОЗИТ BORU PP-R / PP-R-GF / PP-R 63x10,5 SDR 6 виробництва компанії FIRAT [12], які випускаються у двох кольорових варіантах – білого та сірого кольору (рис. 1, а).

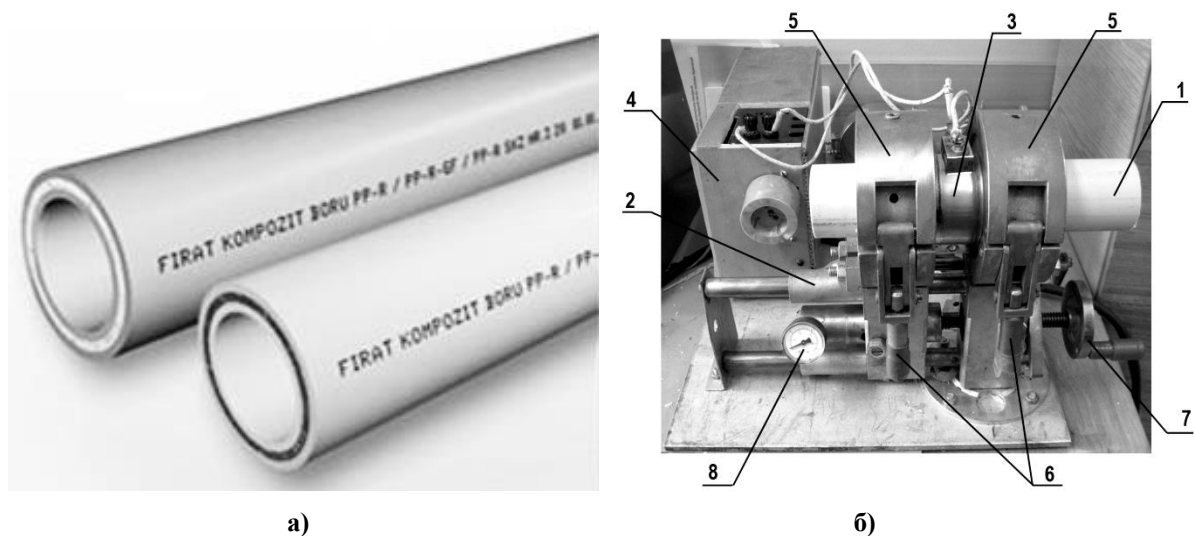


Рис. 1. Тришарові армовані скловолокном поліпропіленові труби виробництва компанії Firat (а) та установка для зварювання полімерних труб, оснащена кільцевим нагрівальним інструментом (б)

Для експериментальних робіт була використана універсальна установка на базі апарату для зварювання нагрітим інструментом встик САТ-110Р виробництва «Дослідного заводу зварювального обладнання ІЕЗ ім.С.О.Патона НАН України». Установка давала можливість виконувати зварювання труб встик за допомогою традиційного плоского нагрівального інструменту та була оснащена спеціально розробленим зовнішнім циліндричним нагрівальним інструментом з внутрішнім діаметром 63 мм з окремим джерелом живлення. На рис. 1,б показані основні складові частини зварювальної установки. Труби, що зварюються 1 закріплюються у затискачах 5 центратора 2 за допомогою ручних ексцентричних важелів 6. Зовні на стик труб одягається кільцевий нагрівальний інструмент 3, електричними дротами з'єднаний з джерелом живлення 4. Осьове переміщення зразків труб та створення необхідного зусилля осадження здійснюється вручну механічним приводом за допомогою рукоятки 7. Величина зусилля осадження визначається манометричним датчиком та фіксується за допомогою манометру 8.

Кільцевий нагрівальний інструмент виконаний у вигляді циліндричного хомута (рис. 2,а), у верхній частині якого на спеціальному кронштейні розташовані електричні клеми для під'єднання живлення. Нижня частина нагрівача є рознімною зі спеціальними металевими губками для затискання його на трубі за допомогою різьбового кріплення. Конструктивно кільцевий нагрівальний інструмент виготовлений у корпусі з тонколистової нержавіючої сталі (рис. 2,б) та являє собою електричний резистивний нагрівач, спеціально пристосований для нагрівання циліндричних поверхонь. Нагрівальним елементом служить резистивна металева стрічка компанії RESCAL - RESISTHOM 135, ізольована шаром термостійкого міканіту. Міканіт – це електроізоляційний матеріал, вироблений зі слюдяних пластин, що з'єднані між собою за допомогою силіконових смол, гліфталевих або кремнійорганічних лаків.

Кільцевий нагрівач розрахований на живлення змінною напругою 220 В, його електрична потужність розраховується пропорційно внутрішній поверхні, питома потужність складає 4 Вт/см^2 . У даному випадку використовувався нагрівач внутрішнім діаметром 63 мм, шириною 40 мм. Площа його внутрішньої поверхні складає 75 см^2 , електрична потужність – 300 Вт. Номінальна робоча температура нагрівача – $350 \text{ }^\circ\text{C}$, короткотривала температура може сягати $400 \text{ }^\circ\text{C}$.

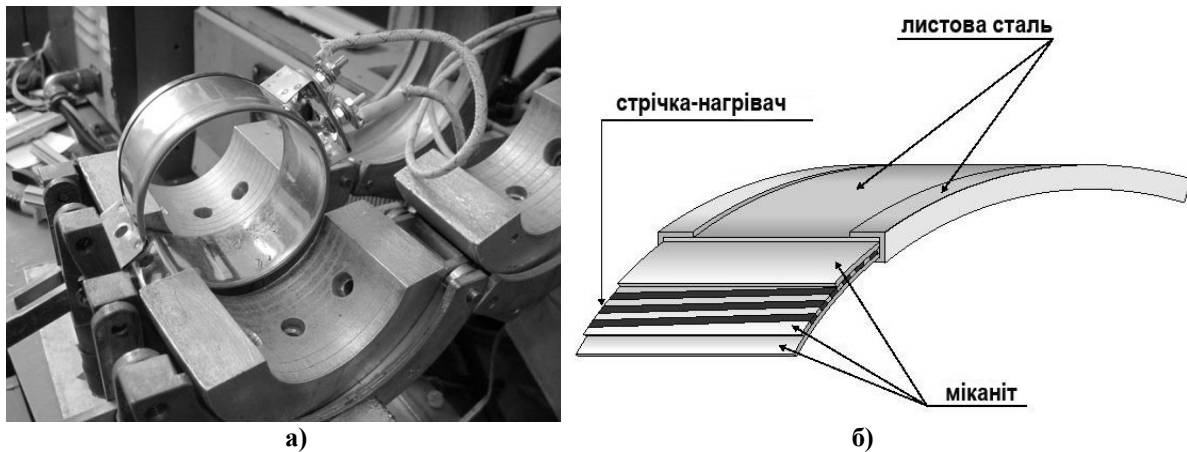


Рис. 2. Зовнішній вигляд (а) та внутрішня будова кільцевого нагрівального інструменту (б)

При перших експериментах, для подальшого порівняльного аналізу, тришарові поліпропіленові труби FIRAT KOMPOZIT 63x10,5 зварювали класичним способом за допомогою нагрітого інструмента встик з прогрівом торців труб (рис. 3,а). Використовували експериментальну установку та плоский нагрівальний інструмент. Параметри режиму зварювання встановлювали згідно з вимогами DVS 2207 – 11, що регламентує процеси зварювання нагрітим інструментом труб та плоских деталей з поліпропілену. Згідно з цим нормативом для стикового зварювання труб з товщиною стінки у діапазоні 7,0 – 12 мм встановлювали температуру нагрівального інструменту $210 \text{ }^\circ\text{C}$, величину робочого тиску при оплавленні та осадженні – 0,1 МПа, величину тиску при прогріві – 0,01 МПа, час прогріву торців труб – 210 сек, час технологічної паузи – 5 сек, час підвищення тиску осадження – 10 сек. Якість зварних з'єднань визначали вивченням мікро- та макрошліфів швів, параметрів ґрату, а також визначенням механічної міцності швів випробуванням на одновісний розтяг у відповідності з вимогами ГОСТ 11262.

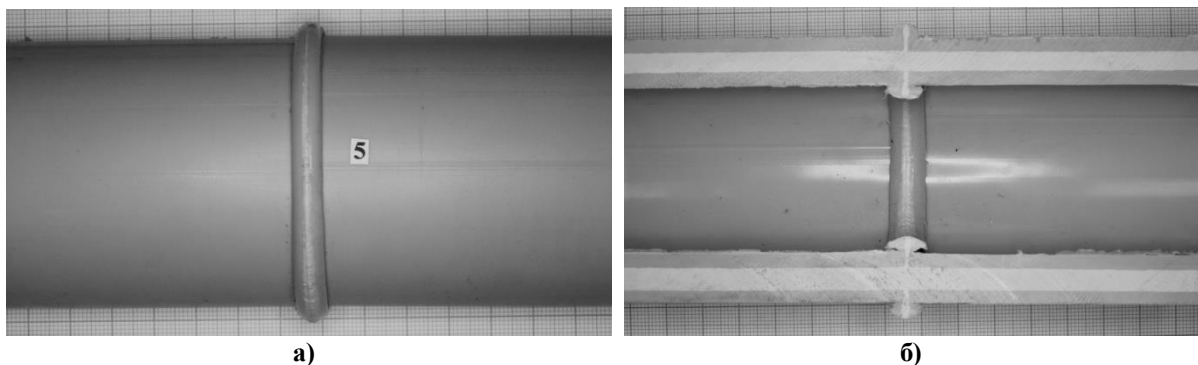


Рис. 3. Зварне з'єднання тришарових композитних труб (а), виконане нагрітим інструментом встик, та його поперечний переріз (б)

На поперечному перерізі стикового з'єднання тришарової труби видно (рис. 3,б), що по усій області сплавлення зварного шва формується шар наповненого композитного матеріалу через переміщення розплаву матеріалу внутрішнього шару з центральної зони всередині труби до її зовнішніх поверхонь при осадженні. Спеціально були проведені механічні випробування на розтяг матеріалу різних шарів труби. Для цього токарною обробкою відокремлювали зовнішній, середній та внутрішній шари труби і вирізали з них зразки – лопатки. Випробування показали, що міцність на розрив шару, наповненого скловолокном на 30% більше міцності шарів чистого поліпропілену, що пов'язано із суттєво більшою міцністю скловолокна у порівнянні із полімером. З іншого боку, скловолокно є дуже

крихким матеріалом, тому матеріал армованого шару труби руйнується за крихкою схемою, практично без відносного подовження та без утворення «шийки» на зразку, що випробовується.

У стиковому зварному шві тришарових труб утворюється потужний вертикальний шар наповненого скловолокном поліпропілену білого кольору (рис. 4, а), який займає всю зону сплавлення та перекриває собою верхній та нижній грати зварного шва. Таким чином, стикове з'єднання фактично утворюється крихким шаром композитного матеріалу зі зміненою морфологією розподілу та направленістю наповнювача – рубленого скловолокна (рис. 4, б), що негативним чином впливає на його механічну міцність.

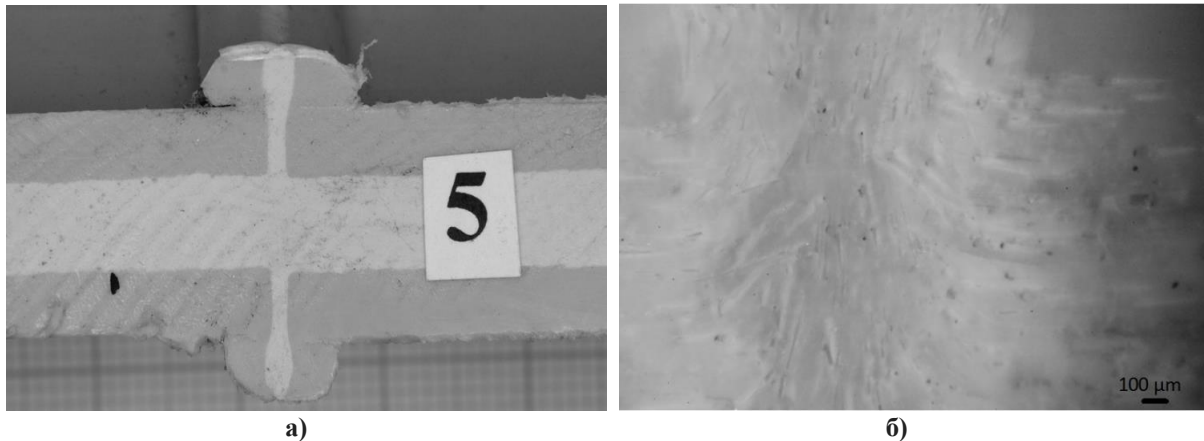


Рис. 4. Стиковий зварний шов тришарових поліпропіленових композитних труб (а) та його мікрофотографія (б), отримана за допомогою рефлексійної оптичної мікроскопії

Механічні випробування зразків на розтяг показали, що «класичне» стикове зварне з'єднання тришарових труб не забезпечує рівномірності з основним матеріалом. Руйнування зразка зварного з'єднання в процесі механічних випробувань на розтяг відбувається строго у вертикальній площині, яка проходить через шов та зварний грат, по шару наповненого матеріалу з максимальним рівнем міцності не більше 60% від рівня основного матеріалу (рис. 5,а). Такий характер руйнування подібний до відомого «дзеркального» руйнування, яке характерно для полімерних труб у випадках, якщо у площині шва не відбувається повноцінне сплавлення матеріалів двох труб, що зварюються, при цьому переорієнтований наповнювач – рублене скловолокно відіграє роль не армуючих елементів, а навпаки багаточисельних дефектів у шві.

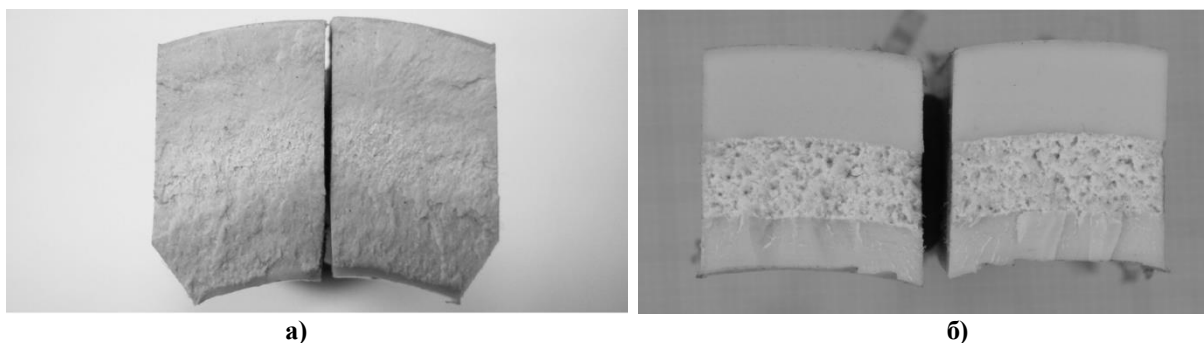


Рис. 5. Характер руйнування стикових зварних швів тришарових композитних труб, виконаних за «класичним» (а) та розробленим (б) технологічними підходами

Для отримання стикових швів з незмінним чергуванням у зоні зварювання полімерних шарів, пошаровому зварюванню «в замкненому об'ємі», було застосовано зовнішній циліндричний нагрівальний інструмент та непрямий спосіб прогріву зони шва. При зварюванні до зразків труб, що зварювалися, прикладалося невелике осьове зусилля осадження, а нагрів здійснювався циліндричним нагрівачем з зовнішньої поверхні труб та поступово досягав внутрішніх шарів. Осадження труб у цьому випадку практично не відбувалося, сплавлення відбувалося за рахунок теплового розширення полімерного матеріалу. Таким чином, в процесі зварювання фактично не мала місця інтенсивна течія розплаву від внутрішніх областей стінки труби до її поверхні, що характерно для способу зварювання труб нагрітим

інструментом встик. В процесі прогріву стику відбуваються лише невеликі локальні переміщення розплаву. У результаті утворилося стикове з'єднання з суцільним невеликим гратом на зовнішній поверхні шва (рис. 6,а). Всередині зварного з'єднання залишалася незруйнованою пошарова структура стінки труби, ідентична структурі основного матеріалу (рис. 6,б).

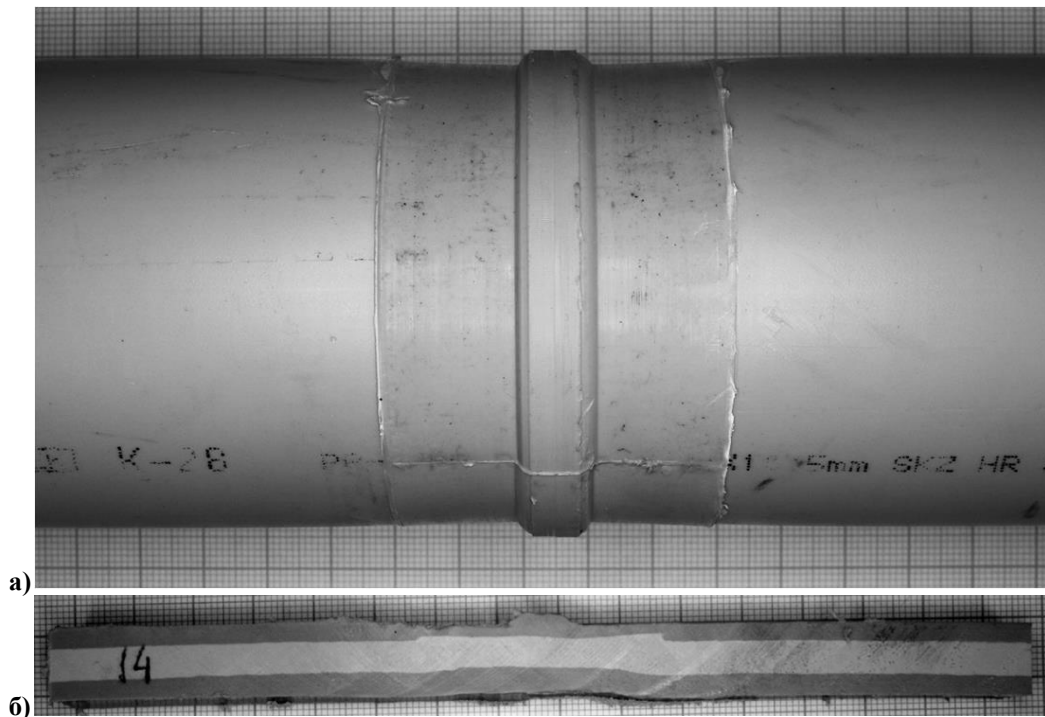


Рис. 6. Зовнішній вигляд (а) та поперечний переріз (б) зварного з'єднання тришарових полімерних композитних труб, виконаного за розробленим технологічним підходом

За результатами експериментально-дослідних робіт створені технологічні рекомендації щодо процесу підготовки та проведення зварювання за розробленим технологічним підходом. Так зразки поліпропіленових тришарових композитних труб повинні бути закріплені в центраторі таким чином, щоб у зоні стику в процесі прогріву не виникало додаткових напружень. Осьове зусилля на осадження труб прикладається тільки на час закріплення кільцевого нагрівального інструменту з метою забезпечення надійного контакту торців труб. Після закріплення нагрівача осьове зусилля знімається для запобігання надмірного переміщення полімерного матеріалу під час прогріву. Нагрівальний інструмент необхідно встановити на стик таким чином, щоб забезпечити щільне прилягання його внутрішньої поверхні до труби без щілин та зазорів. Нагрівачі великих діаметрів бажано додатково зафіксувати, щоб вони своєю вагою не деформували розігрітий матеріал в зоні зварювання.

Виконання усіх перелічених умов гарантує, що при зварюванні нагрітим інструментом встик за новим технологічним підходом полімерних тришарових композитних труб буде сформовано з'єднання з незмінною пошаровою структурою, аналогічною структурі основного матеріалу. На рис. 7,а приведено поперечний переріз такого зварного з'єднання, яке було сформовано за оптимальних параметрів зварювання та витримці усіх вищезазначених умов, та підготовлений для механічних випробувань на розтяг. Для отримання адекватних даних по міцності стінки труби на зразку було видалено підсилення, що утворюється в центрі шва. Внутрішній армований шар поліпропіленової труби практично не змінив форму на усій довжині зварного з'єднання, окрім невеликого збільшення товщини в правій частині зони прогріву.

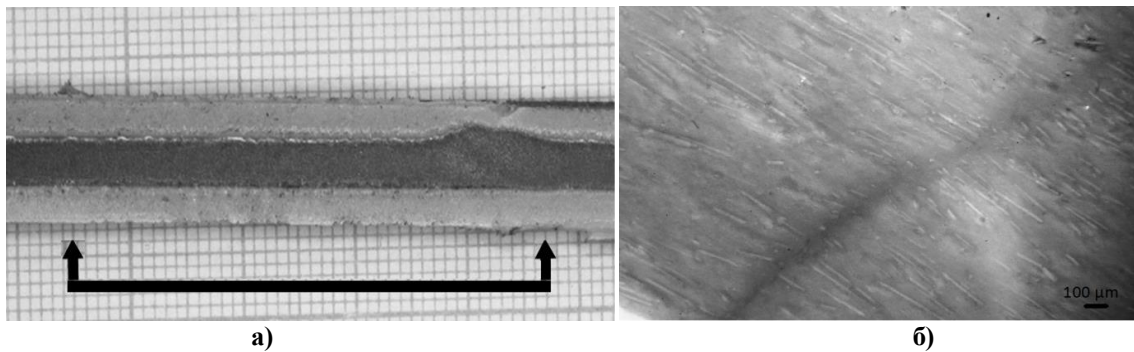


Рис. 7. Поперечний переріз оптимального зварного з'єднання поліпропіленових тришарових композитних труб (а), виконаного за розробленим технологічним підходом, та його мікрофотографія (б)

На рис. 7,б приведено мікрофотографію морфології представленого на рис. 7,а зварного шва. Легко побачити, що структура шва є ідентичною основному матеріалу, при цьому повністю зберігається орієнтація наповнювача – рубленого скловолокна. Руйнування зварного з'єднання тришарових поліпропіленових труб з незмінною пошаровою структурою відбувається по основному матеріалу (рис. 5, а), а отже зварні шви рівномірні матеріалу труби. Оскільки внутрішній шар труби армований крихкими скляними волокнами, то увесь зразок, вирізаний з тришарової стінки труби руйнується з мінімальним відносним подовженням. Матеріал армованого шару при руйнуванні світлішає поблизу лінії зламу, що викликано мікрореформаціями полімерного матеріалу при почерговому розриванні скляних поздовжніх волокон. Через це при руйнуванні внутрішнього шару поліпропілену на поверхні зламу формується нерівна губчаста структура. Поверхня руйнування матеріалу нижнього (внутрішнього) гомогенного поліпропіленового шару труби має нерівний ступінчастий характер, що відповідає крихкому зламу з декількома концентраторами напружень. Навпаки, при руйнуванні зовнішнього поліпропіленового шару утворюється рівна поверхня зламу, як результат розповсюдження однієї суцільної тріщини. Вочевидь, при одночасному навантаженні на розтяг при механічних випробуваннях, матеріал зовнішніх шарів труби пластично деформується на деяку величину, після чого напруження на внутрішньому армованому шарі сягає критичного рівня і він руйнується. Після цього за крихким механізмом руйнуються і зовнішні поліпропіленові шари.

Висновки

В роботі розроблено новий технологічний підхід зварювання «в замкненому об'ємі» нагрітим інструментом встик полімерних багатшарових композитних труб, за яким можливе їх пошарове зварювання. Проведені модельні зварювання нагрітим інструментом встик поліпропіленових тришарових композитних труб традиційним прямим нагрівом та за розробленим технологічним підходом непрямим нагрівом. Показано, що розроблений технологічний підхід є більш ефективним з точки зору структури та механічних характеристик, а, отже, і якості, зварних з'єднань у порівнянні з традиційними підходами до зварювання полімерних багатшарових композитних труб.

Список використаної літератури

1. Бухин В.Е. Полимерные материалы, используемые при строительстве трубопроводов [Текст]/ В.Е. Бухин, М.М. Фагтахов//Инженерные сети из полимерных материалов. – 2008. - № 25. - с.20-26.
2. Армированные трубы в «доспехах»: в чем их успех? Полипропиленовые армированные трубы – область применения и особенности монтажа [Электронный ресурс] Режим доступа: <http://www.arhiterm.by/information/thermplus/-lr->
3. Козлов О. В. Особенности конструкции полипропиленовых (PPR) труб, армированных стекловолокном для систем водоснабжения [Электронный ресурс] Режим доступа: http://www.vashdom.ru/articles/alterplast_1.htm
4. Комаров Г.В. Композиционные материалы: производство, применение, тенденции рынка[Текст]/ Г.В. Комаров // Полимерные материалы. – 2013. - №2. - с. 6 – 14.
5. Михайлин Ю.А. Конструкционные полимерные композиционные материалы [Текст]/ Ю.А.Михайлин. - СПб.: Изд. «Научные основы и технологии», 2-е издание. - 2013. - 822 с.
6. Полимерные композиционные материалы: структура, свойства, технология: учеб.пособие [Текст]/ под ред. А.А Берлина.- СПб.: ЦОП «Профессия», 3-е испр. изд., 2011.- 560с.

7. Европейский рынок пластиков, армированных стекловолокном в 2014 году. Продолжение тенденции роста [Текст] / Статья AVK (Немецкая профессиональная ассоциация волоконных композиционных пластиков и композитов)// Приложение к журналу МАКАПЛАС (Macplas International), декабрь 2014 – январь 2015, с. 12 – 14.
8. Трубопроводные системы внутреннего водоснабжения и отопления. Каталог изделий VAVIN Ecoplastic [Электронный ресурс] Режим доступа: https://ekoplastik.ua/downloads/instrukcia_ppr_2016.pdf
9. Кораб Н.Г., Минеев Э.А. Критические замечания по способам сварки труб из термопластичных полимерных материалов [Текст]/ Н.Г. Кораб, Э.А. Минеев// Полимерные трубы Украина. – 2007. - №1. – с. 53 – 55.
10. Волков С.С. Сварка и склеивание полимерных материалов [Текст]/ С.С. Волков. - М.: Химия, 2001.- 376 с.
11. Шестопап А.Н. Справочник по сварке и склеиванию пластмасс [Текст]/ А.Н. Шестопап, Ю.С. Васильев, О.В.Тарасенко, В.П. Тарногородский /Под общ.ред. А.Н.Шестопапа, Г.Н.Кораба. – К.: Техника, 1990. – 199 с.
12. Композитные трубы и фитинги PP-R Firat. Технические характеристики [Электронный ресурс] Режим доступа: <http://www.firat.com/ru-ru/products>