

Техніка і технології

УДК 621.791(01)

ОСОБЛИВОСТІ ЗВАРЮВАННЯ НЕПОВОРОТНИХ СТИКІВ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ТРУБОПРОВОДІВ

¹М.В. Панчук, ¹Л.С. Шлапак, ¹О.О. Філіпчук, ²Ю.І. Талабко

¹ ІФНТУНГ, 76019, м.Івано-Франківськ, вул. Карпатська 15; тел. (0342) 506612;
e-mail: ztk@nimg.edu.ua

² ТзОВ «Фроніус Україна», 82400, Львівська обл., м. Стрий, вул. Крива, 41Б,
тел. (0324) 577601; e-mail: sales.ukraine@fronius.com

Зварювання технологічних трубопроводів у неповоротному положенні відноситься до високих технологій, найбільш складних у реалізації. В даному випадку зварювальна ванна під час формування шва послідовно приймає характерні положення: нижнє, “на спуск”, стельове і “на підйом”. Систематична зміна умов формування зварювальної ванни під дією гравітаційних сил суттєво збільшує ймовірність виникнення різних дефектів зварних з’єднань. Питання підвищення продуктивності праці та відтворюваності якості зварних з’єднань запропоновано вирішити використанням автоматичного орбітального зварювання, що дає змогу знизити, або повністю виключити утворення дефектів та виконувати зварювання з дистанційним управлінням. В роботі описана технологія зварювання неповоротних стиків трубопроводів з аустенітних сталей та наведені характеристики використання обладнання. Розроблено технологічні параметри для зварювання трубопроводів малих діаметрів. Виконано розрахунки температурних полів, термічного циклу та геометричних розмірів зварного шва при орбітальному зварюванні.

Ключові слова: неповоротні стики, орбітальне зварювання, технологія, неплавкий електрод;

Сварка технологических трубопроводов в неповоротном положении относится к высоким технологиям, наиболее сложным в реализации. В данном случае сварочная ванна при формировании шва последовательно принимает характерные положения: нижнее, “на спуск”, потолочное и “на подъем”. Систематическое изменение условий формирования сварочной ванны под воздействием гравитационных сил существенно увеличивает вероятность появления различных дефектов сварных соединений. Вопросы повышения производительности труда и воспроизводимости качества сварных соединений предложено решить использованием автоматической орбитальной сварки, что позволяет снизить, или полностью исключить образования дефектов и проводить сварку с дистанционным управлением. В работе описана технология сварки неповоротных стыков трубопроводов из аустенитных сталей и приведены характеристики использованного оборудования. Разработаны технологические параметры сварки трубопроводов малых диаметров. Выполнены расчеты температурных полей, термического цикла и геометрических размеров сварного шва при орбитальной сварке.

Ключевые слова: неповоротные стыки, орбитальная сварка, технология, неплавкий электрод;

Welding of industrial pipelines in fixed position is referred to high technologies and is the most complicated in realization. In this case, while forming a seam, consequently, the welding bath takes up the proper positions: down, downhill, overhead and uphill. Systematic variation of conditions of welding bath forming under gravitational force considerably increases the possibility of defects precipitation of welded joints. The problems of labour productivity improvement and quality reproducibility improvement are suggested to solve by usage of automated orbital welding that allows to decrease or fully eliminate the defects precipitation and to carry the teletype control welding process. The welding technology of non-fixed cut points made from austenitic steel is described and the peculiarities of used equipment are covered in this paper. The technological parameters of the small diameters pipeline welding are developed. It is conducted the calculations of temperature fields, thermal cycles and geometrical dimensions of the weld seam under orbital welding.

Keywords: irrevocable joints, orbital welding, technology, infusible electrode

Трубопроводи є базовими елементами в технологічних лініях підприємств нафтогазової (хімічної та харчової промисловості). Складні умови їхньої роботи (високі температури і тиски, вібрації, агресивні середовища) обумовлюють високі вимоги до суцільності та корозійної стійкості з'єднань. Зазвичай труби з'єднуються між собою арматурою та технологічним обладнанням з використанням зварювання. Забезпечення надійної роботи трубопроводних систем багато в чому визначається відсутністю недопустимих дефектів на стадії монтажу та достовірністю прогнозування їх виникнення на стадії промислової експлуатації [1].

Під час виконання монтажних робіт на сучасних підприємствах проводиться зварювання десятків тисяч стиків з корозійностійких, аустенітних, низьковуглецевих та низьколегованих перлітних сталей. З'єднання значного об'єму трубопроводів виконується в неповоротному положенні. Такий спосіб відноситься до високих технологій, найбільш складних у реалізації, оскільки зварювальна ванна в процесі формування швів приймає характерні положення: нижнє, "на підйом", стельове і "на спуск".

Систематична зміна умов формування зварювальної ванни під дією гравітаційних сил суттєво збільшує ймовірність виникнення різних дефектів зварних з'єднань. Особливості виконання монтажних робіт та короткі терміни будівництва вимагають продуктивних способів зварювання з передбачуваною якістю з'єднань. Ці ж вимоги є актуальними при технічному обслуговуванні та ремонті трубопроводів. В монтажних умовах ймовірність появи дефектів зварних з'єднань визначаються умовами виконання робіт, а також кваліфікацією персоналу.

Проблеми прогнозованої високої якості зварних з'єднань стають ще більш актуальними, якщо взяти до уваги той факт, що гарантований ресурс найбільш відповідальних трубопроводів повинен досягати не менше 30, а в деяких випадках 50 років. У зв'язку з цим для стабільного відтворення якості зварних з'єднань проводяться дослідження процесу формування швів, визначення фізико-технологічних параметрів, що дозволяють ефективно керувати процесом отримання нероз'ємного з'єднання; вдосконалюються процеси зварювання та методи управління якістю з'єднань [2, 3, 4].

В даний час основними способами зварювання труб аустенітного класу є ручне дугове зварювання покритими електродами і дугове зварювання неплавким електродом в середовищі захисних газів. Особливості виконання монтажних робіт та короткі терміни будівництва вимагають продуктивних способів зварювання з передбачуваною якістю з'єднань. Ці ж вимоги актуальні при технічному обслуговуванні та ремонті трубопроводів. В монтажних умовах ймовірність появи дефектів зварних з'єднань визначаються умовами виконання робіт, а також кваліфікацією персоналу.

Ручне дугове зварювання трубопроводів передбачає використання електродів ЦЛ-11, ЦТ-15, ЗІО-8, ЕА-400/10У. Режим зварювання

залежить від положення шва в просторі та діаметра електроду. Товщина стінки труби визначає число шарів, яке необхідно накласти для заповнення стика. Досвід свідчить, що до товщини стінки труби 4-6 мм кількість заповнюючих шарів – 2, при 7-11 мм – 3, при 12-14 мм – 4. Із збільшенням товщини кожні 2-2,5 мм число шарів збільшується на 1. Стик труб діаметром менше 219 мм, незалежно від товщини стінки, виконує один зварювальник. З метою рівномірного розподілу зварювальних напружень і підтримки необхідного температурного режиму по всьому периметру стику труби діаметром більше 219 мм повинні виконувати одночасно два зварювальники.

Дугове зварювання неплавким електродом в захисних газах трубопроводів виконують ручним і автоматичним способами, з присадковим дротом і без нього. Для захисту кореневого шва від впливу повітря при аргонодуговому зварюванні перших двох шарів труби рекомендується заповнювати аргоном. Окрім захисту шва піддування аргону також сприяє кращому формуванню зворотного валика. Для зменшення витрат об'єм, який заповнюється аргоном, обмежують спеціальними заглушками, що встановлюються при збиранні труб на відстані 100-200 мм від торця стику. Пропущений для зварювання через утворену заглушками камеру об'єм аргону має бути рівним чотири-п'ятикратному об'єму камери.

Останніми роками все більшого поширення набуває імпульсне дугове зварювання неплавким електродом, яке дає змогу регулювати тепловкладення в стик за жорсткою програмою. Наявність імпульсів передбачає відмову від коливань електрода, що істотно спрощує техніку зварювання, а своєрідні умови кристалізації дають змогу отримувати сприятливу форму шва, що сприяє зменшенню кількості дефектів. Систематична зміна умов формування зварювальної ванни під дією гравітаційних сил суттєво збільшує ймовірність виникнення різних дефектів зварних з'єднань.

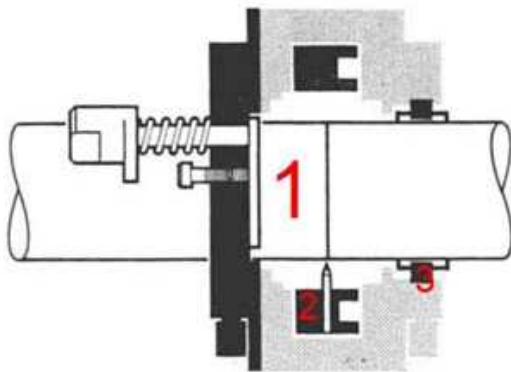
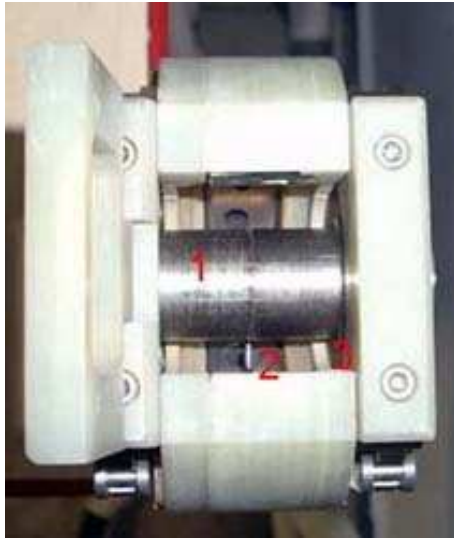
Проблеми підвищення продуктивності праці та відтворюваності якості зварних з'єднань можуть бути вирішені переходом від традиційних ручних методів дугового зварювання до автоматичного орбітального зварювання, що дасть змогу знизити або повністю позбутися утворення дефектів та виконувати зварювання з дистанційним управлінням. Орбітальним називають зварювання кільцевих швів на нерухомому виробі, коли пальником роблять кругові рухи навколо труби або резервуару по відповідній траєкторії.

Система орбітального зварювання складається із двох або трьох вузлів:

- зварювальне джерело живлення та система контролю;
- орбітальна зварювальна головка, яка скеровує пальник на виріб;
- механізм подачі присадкового дроту (за необхідністю).

Принцип роботи головок закритого типу (рис. 1) полягає в тому, що при зварюванні труби

затискаються встик за допомогою цангових вставок зварювальної головки так, щоб стик опинився напроти вольфрамового електроду. Камера головки заповнюється аргоном і ротор із затиснутим в ньому електродом переміщається по колу вздовж стику, проводячи зварювання.



1 – зварювана труба; 2 – ротор із затиснутим в ньому вольфрамовим електродом;
3 – цангова (затискна) вставка

Рисунок 1 – Загальний вигляд зварювальної головки

Роботою головки керує джерело живлення, яке дозволяє задавати значення зварювального струму залежно від просторового положення електроду і розігрівання з'єднуваних труб з тим, щоб забезпечити гарантоване проплавлення стику і уникнути перегрівання зварного з'єднання.

Зварювальний струм, як правило, – імпульсний, що дає змогу проплавити товщину стінок труб до 4.0 мм при зварюванні нержавіючих труб і до 3.5 мм при зварюванні інших матеріалів при якісному формуванні зварного шва.

Кожна зварювальна головка збережена на певний діапазон зварюваних труб. В середині цього діапазону перехід від діаметра до діаметра проводиться шляхом заміни цангових вставок. Кожна цангова вставка, що складається з двох половинок (комплект), розрахована на свій фіксований діаметр.

Орбітальне зварювання передбачає автоматизацію всього процесу: достатньо ввести чотири вихідних параметри: тип захисного газу, товщину стінки, діаметр і матеріал труби. Зміна параметрів зварювального процесу відбувається зі швидкістю 500 разів за секунду для компенсації найменших відхилень в умовах горіння дуги та формування зварювальної ванни.

Високі вимоги до якості зварного шва на трубопроводах змушують до застосування спеціальних технологій підготовки стиків під зварювання. При цьому вкрай важливим є дотримання таких вимог:

- перпендикулярність площини стику до осі труби;
- відсутність грату при різанні;
- чиста площина різця;
- точність установа зазору при збиранні стику під зварювання;
- мінімальні допуски на елементи оброблення кромки (якщо вона застосовується).

Для точного виготовлення складних конструкцій найчастіше застосовують труборізи з різцями, які працюють за принципом токарних верстатів. На таких труборізах, використовуючи різні типи різців, можна здійснювати різання, торцювання і оброблення кромки. Точну відрізку труб, таку, що виключає операцію торцювання, можна виконувати на токарних або труборізних верстатах. Проте зручніше скористатися спеціальними установками для орбітального різання труб. В цих установках різання здійснюється тонкою дисковою фрезою (пилним диском), кількість зубів якої точно відповідає товщині стінки труби.

Для якісного різання труб і зняття фасок фірма «Фроніус» випускає низку установок, одна з яких – RA 21/RA 41 (рис. 2) – використовувалась в наших експериментах.



Рисунок 2 – Заточно-відрізний верстат RA 21/RA 41

Для отримання повторюваних якісних зварних з'єднань відповідна увага повинна приділятися застосуванню вольфрамових електродів.

Як відомо, форма дуги та її властивості залежать від кута заточування вольфрамового електрода. Чим більший кут заточування, тим ширша площа дуги, тим більше вноситься тепла в деталь і тим менша глибина проплавлення.

Так само на форму дуги, стабільність її підпалювання впливає притуплення електрода. Діаметр притуплення вибирається в залежності від діаметра електрода, величини зварювального струму та товщини стінки зварювальних труб.

Фірма «Фроніус» виготовляє спеціальні комбіновані заточно-відрізні пристрої, за допомогою яких можна виконувати повторюване якісне заточування, притуплення і, за необхідності, нарізання вольфрамових електродів (рис 3).



Рисунок 3 – Пристрій для заточування вольфрамових електродів ESG plus

Невиконання вимог щодо заточування електродів призведе до порушення повторюваності у виконанні якісних зварних з'єднань.

Технологія виконання орбітального зварювання передбачає поділ периметра труби на сектори, в кожному з яких встановлюються оптимальні значення параметрів.

Довжина всього кола приймається рівною одиниці. Тоді координата кожної з точок буде частиною від одиниці (для зручності можна використовувати розбиття на градуси від 0° до 360°). У першому секторі встановлюються зварювальні параметри, виходячи з необхідності нагрівати "холодну" трубу до проплавлення. В даному випадку потрібно встановити таке поєднання струму і швидкості, щоб не відбувалося сильного провисання металу в трубу, але забезпечувалося достатнє проплавлення. У другому секторі відбувається перехід шва на стельове положення, і параметри змінюються відповідно. Третій сектор характеризується зварюванням від низу до верху, коли труба вже "гаряча", відповідно слід скорегувати швидкість і струм. Закінчення шва дуже часто є проблемним при зварюванні. Доводиться враховувати ефект автопідігріву і знижувати зварювальний струм для зменшення тепловкладення.

Для завершення шва встановлюється координата точки закінчення зварювання більша 1,000 (наприклад, -1,010). У разі застосування головки з блоком поперечних коливань і контролем довжини дуги, до зварювальних параметрів додаються: амплітуда коливань, час затримки в точці відхилення, напруга, яку необхідно підтримувати. Всі зварювальні параметри можна змінювати плавно (наприклад, плавне наростання струму на початку зварювання і гасіння при заварюванні кратера). Інтервал, в якому відбувається плавна зміна параметра, може задаватися за часом або координатами.

Для атестації технології орбітального зварювання трубопроводів з нержавіючої сталі діаметром 50 мм і товщиною стінки 2 мм проводились експерименти у виробничих умовах. Робота проводилась з використанням головки MW 50, фірми «Фроніус» (рис. 3), технічні параметри якої вказано в таблиці 1.



Рисунок 4 – Загальний вигляд головки закритого типу MW 50

Таблиця 1 – Характеристика зварювальної головки MW 50

Процес зварювання	TIG
Напруга живлення	3x380В 50 Гц
Використовувана потужність	15кВт
ККД	0,86
Ступінь захисту	IP 55
Система охолодження	4,8 Л (H ₂ O)
Зовнішній діаметр труби, мм	50
Максимальний, зварювальний струм (водяне охолодження), А	250
Зона поперечних коливань, мм	20
Амплітуда поперечних коливань, мм	7
Швидкість поперечних коливань, мм/с	1,0-12
Час витримки, с	0,1-10
Швидкість установалення дуги, мм/с	1,1
Маса, кг	6,9

Технологічні режими орбітального зварювання неплавким електродом в результаті проведення експериментів наведені в таблиці 2.

Таблиця 2 – Режим орбітального зварювання неплавким електродом

Кут між пальником і виробом, °	90
Діаметр зварюваного електрода, мм	2,4
Кількість прихоплень, шт	4
Струм прихоплень, А	50
Тривалість прихоплень, с	0,6
Витрата аргону, л/хв.	7
Попереднє піддування газу, с	30
Стартовий струм, А	85
Тривалість фази стартового струму, с	1,5
Час між запалюванням дуги і початком зварювального переміщення, с	3,5
Час зростання струму, с	0,1
Час спадання струму, с	5
Час, протягом якого відбувається зварювальне переміщення у фазі спадання струму, с	5
Струм зварювання кратера, А	3
Тривалість струму зварювання кратера, с	0,1
Час проходження газу наприкінці процесу зварювання, с	40
Швидкість зварювання, м/хв.	0,09
Тривалість струму імпульсу, с	0,1
Тривалість базового струму, с	0,5
Сегмент 0-270	
Струм імпульсу, А	119
Базовий струм, А	40
Сегмент 270-355	
Струм імпульсу, А	117
Базовий струм, А	39
Сегмент 355-370	
Струм імпульсу, А	114
Базовий струм, А	38

За отриманими результатами досліджень були розраховані: температурне поле, термічний цикл, а також геометричні розміри шва. Ізотерми та діаграма термічного циклу зображені на рисунках 5–7. Для розрахунків використовувалась математична модель на основі функції Бесселя від уявного аргументу другого роду нульового порядку. [5]. Температурне поле розглядалось в стаціонарному режимі згідно із залежністю

$$T_0(r, x) := \frac{q}{2 \cdot \pi \cdot \lambda \cdot \delta} \cdot \exp\left(\frac{-v \cdot x}{2 \cdot a}\right) \times K_0\left(r(x) \cdot \sqrt{\frac{v^2}{4 \cdot a^2} + \frac{b}{a}}\right), \quad (1)$$

де: q – ефективна теплова потужність, Дж/с;
 λ – коефіцієнт теплопровідності матеріалу, Вт/(м·°C);
 δ – товщина пластини, м;
 v – швидкість переміщення зварювального джерела, м/с;
 a – коефіцієнт температуропровідності, м²/с;

$K_0(u)$ – модифікована функція Бесселя другого роду;

$$r = \sqrt{x^2 + y^2},$$

де r – радіус-вектор;

$$b = \frac{2 \cdot a}{c \rho \cdot \delta},$$

b – коефіцієнт температуровіддачі з поверхні, с⁻¹;

α – коефіцієнт поверхневої тепловіддачі, Вт/(м²·°C);

$c\rho$ – об'ємна теплоємність матеріалу МДж/(м³·°C).

Ширина зварного шва розраховувалась за формулою

$$B := \sqrt{\frac{2 \cdot q}{\pi \cdot \lambda \cdot e \cdot c \rho \cdot v \cdot (T_{пл} - T_0)}}; \quad (2)$$

$T_{пл}$ – температура плавлення нержавіючої сталі, °C;

B – ширина шва, см;

T_0 – температура навколишнього середовища.

Кореляція розрахункових даних з дійсними складає 93%.

Експериментальний зразок трубного з'єднання з нержавіючої сталі 12X18H10 діаметром 50 мм., товщиною стінки 2 мм зображено на рисунку 5.

В даний час багато галузей промисловості висувають вимогу докладного документування процесу механізованого зварювання. Це досягається підключенням до програмованого зварювального джерела ПК з відповідним програмним забезпеченням. Зварювальні параметри заміряються кожні 0,5 секунд і виводяться в режимі реального часу. Програма дозволяє реструктуривати одночасно декілька параметрів. Після закінчення зварювального процесу програма видає звіт з графіками зареєстрованих зварювальних параметрів.

Такі звіти дозволяють легко порівняти дійсні величини зварювальних параметрів з програмованими і визначити моменти відхилення заданих величин. На графіках можуть бути показані граничні допустимі відхилення зварювальних параметрів, що уможливило отримання документу, що підтверджує виконання технічних вимог, що пред'являються до процесу зварювання.

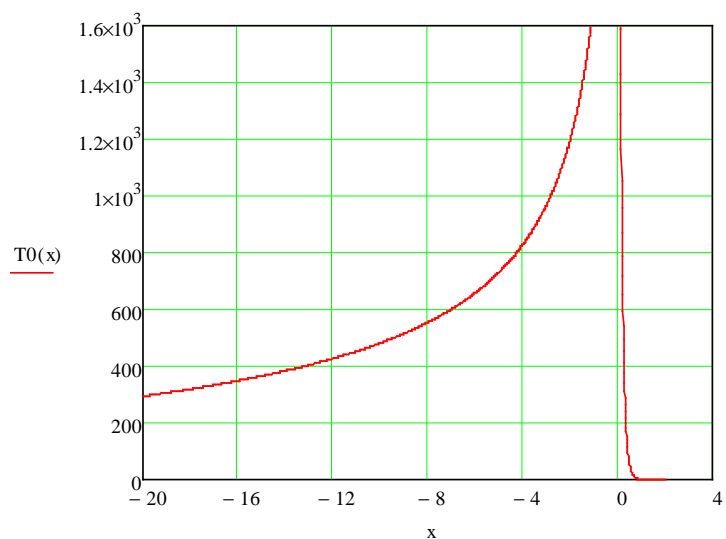


Рисунок 5 – Ізотерма вздовж осі X

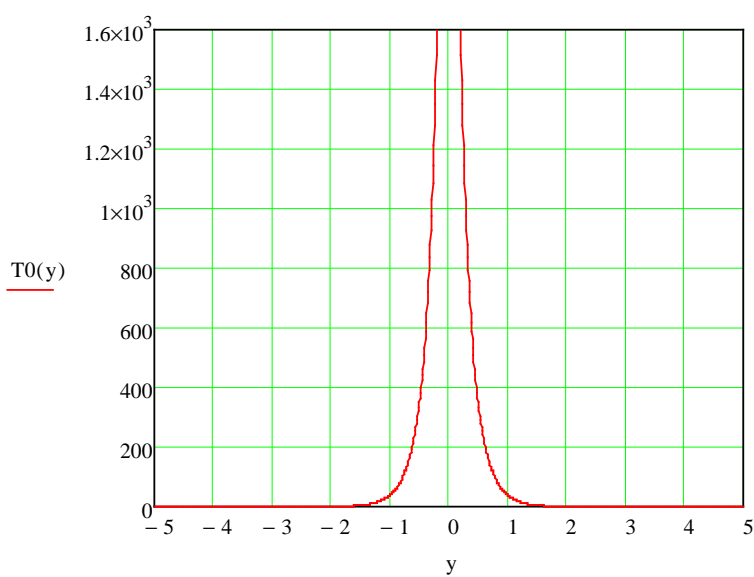


Рисунок 6 – Ізотерма вздовж осі Y

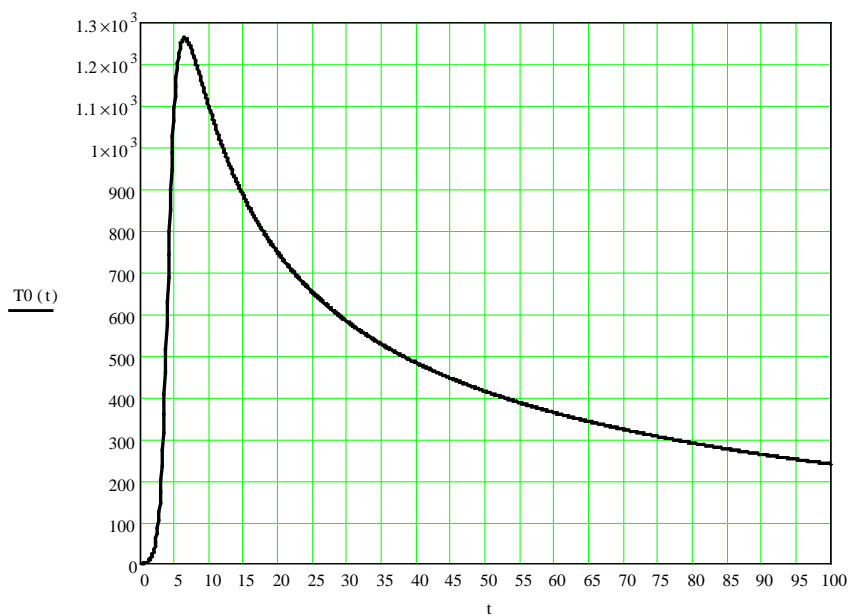


Рисунок 7 – Діаграма термічного циклу



1 – основний метал; 2 – зварний шов;
3 – зона термічного впливу

**Рисунок 8 – Експериментальний зразок
трубного з'єднання**

Висновки

В роботі проаналізовано способи зварювання неповоротних стиків технологічних трубопроводів. Проблеми підвищення продуктивності праці та відтворюваності якості зварних з'єднань можуть бути вирішені переходом від традиційних ручних методів дугового зварювання до автоматичного орбітального. За малих товщин орбітальне зварювання може виконуватись без присадкового матеріалу. Даний спосіб зварювання забезпечує отримання якісних зварних з'єднань з гарантованими механічними характеристиками та хімічним складом.

В роботі розроблено технологічні режими орбітального зварювання неплавким електродом для труб малих діаметрів з нержавіючої сталі.

На базі розрахунків температурних полів були встановлені геометричні розміри зварного шва, що тісно корелюються з дійсними.

Література

1 Прогнозирование качества сварных соединений на основе физико-математической модели процесса орбитальной сварки / С.И. Полосков, В.А. Ефремов, А.В. Маслеников // Сварочное производство. – 2005. – № 2. – С. 8-16.

2 Управление переносом капли при сварке плавящимся электродом с короткими замыканиями дугового промежутка / С.И. Полосков, Ю.С. Ищенко, В.А. Лебедев, О.Б. Гецкин // Сварочное производство. – 2000. – № 6. – С. 6-9.

3 Влияние возмущений в системе подачи электродной проволоки на качество сварных соединений / С.И. Полосков, Ю.С. Ищенко, В.А. Лебедев, О.Б. Гецкин // Сварочное производство. – 2001. – № 12. – С. 3-7.

4 Анализ технических и технологических возможностей импульсной подачи электродной проволоки в процессах дуговой сварки и наплавки / Б. Е. Патон, В.Г. Пичак, С.И. Полосков, Л.Н. Щавелев // Сварочное производство. – 2002. – № 2. – С. 24-31.

5 Василик А.В. Теплові розрахунки при зварюванні / А.В. Василик, Я.М. Драгомирецький, Я.А. Криль. – Івано-Франківськ: Факел, 2004. – 209 с.

*Стаття надійшла до редакційної колегії
05.05.11*

*Рекомендована до друку професором
Грудзом В.Я.*