

# Техніка і технології

УДК 621.791.317.5

## ЗБЕРЕЖЕННЯ ЗАХИСНОГО ПОКРИТТЯ ПРИ З'ЄДНАННІ ОЦИНКОВАНИХ ТРУБ ДУГОВИМ ПАЯННЯМ

О.М. Матвієнків

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

*З ростом попиту на труби із захисним цинковим покриттям виникає проблема їх з'єднання без пошкодження цілісності покриття. Застосування дугових методів зварювання не може цього забезпечити через високий температурний вплив зварювальної дуги та низьку температуру плавлення цинку. Альтернативою дуговому зварюванню для з'єднання оцинкованих матеріалів може стати дугове паяння.*

*У даній роботі проведено дослідження зони з'єднань труб із захисним цинковим покриттям, визначено характер та ступінь пошкодження покриття. За розрахунками розподілу температури в поперечній площині зварних та паяних швів встановлено, що при дуговому паянні, на відміну від дугового зварювання, немає випаровування цинку в прилеглих до шва ділянках.*

*Встановлено, що розміри ділянок пошкодженого покриття біля шва при дуговому паянні не перевищують дію анодного захисту.*

Ключові слова: дугове паяння, цинкові покриття, корозійна стійкість, температурне поле, корозія.

*С ростом спроса на трубопроводы с защитным цинковым покрытием возникает проблема их соединения без повреждения целостности покрытия. Применение дуговых методов сварки не может этого обеспечить из-за высокого температурного воздействия сварочной дуги и низкой температуры плавления цинка. Альтернативой дуговой сварке для соединения оцинкованных материалов может стать дуговая пайка.*

*Исследована зона соединения труб с защитным цинковым покрытием, определен характер и степень повреждения покрытия. По расчётам распределения температуры в поперечной плоскости сварных и паяных швов установлено, что при дуговой пайке в отличие от дуговой сварки, испарения цинка в примыкающих ко шву участках не наблюдается.*

*Установлено что размеры участков поврежденного покрытия вблизи шва при дуговой пайке не превышают действия анодной защиты.*

Ключевые слова: дуговая пайка, цинковые покрытия, коррозионная стойкость, температурное поле, коррозия.

*With the growing demand for pipes with the protective zinc coating the problem of their connection without damaging the coating integrity arises. The use of arc welding methods cannot provide this because of the high temperature of the welding arc and the low temperature of zinc melting. The alternative to the arc welding for connecting the galvanized materials can be arc brazing.*

*In this paper, the research of pipe connecting with the protective zinc coating has been conducted; the nature and the degree of coating damage have been defined. By calculating the temperature distribution in the rolling plane of welded and brazed joints, it has been discovered that there is no evaporation of zinc in areas adjacent to the welded joint by arc brazing unlike arc welding.*

*It has been discovered that the size of damaged coating areas near the welded joint by arc brazing does not exceed the anode protection operation.*

Keywords: arc brazing, zinc coating, corrosion resistance, temperature field, corrosion.

### Вступ

Останнім часом спостерігається тенденція до зростання попиту на металеві труби із захисним цинковим покриттям. Попри значне поширення сучасні труби із полімерних матеріа-

лів не можуть скласти конкуренції металевим трубам і оцинкованим зокрема.

Завдяки високій стійкості до тривалого впливу високих температур і здатності витримувати високий тиск сталеві труби є незамінними в будівництві різних комунікацій, а також

при транспортуванні та видобутого газу та нафти. Нанесення тонкого шару протикорозійного цинкового покриття продовжує термін експлуатації сталевих труб на десятки років.

Суттєвим недоліком, що обмежує застосування оцинкованих труб, є проблема збереження захисного покриття в місцях їх з'єднання. Найчастіше для сполучення оцинкованих труб застосовують різьбові з'єднання з використанням різноманітних фітінгів, але це є досить затратним та малопродуктивним. Використання традиційних дугових методів зварювання для труб із цинковим покриттям створює певні труднощі, пов'язані з інтенсивним випаровуванням цинку за рахунок високотемпературного впливу дуги. Все це призводить до руйнування покриття на ділянках, прилеглих до шва, та зниження їх корозійної стійкості. Проте найголовнішим недоліком є утворення великої кількості парів цинку, які є шкідливими для здоров'я зварювальників.

Застосування нових сучасних технологій зварювання для з'єднання труб із цинковим покриттям дозволить забезпечити корозійну стійкість з'єднань та покращити умови праці зварювальників.

### **Аналіз літературних даних та постановка проблеми**

Згідно з вимогами ДСТУ Б В.2.6-193:2013 протикорозійні цинкові покриття, залежно від агресивності середовища, наносять на металеві конструкції тонким шаром двома методами: гарячим цинкуванням з отриманням покриття товщиною 60-100 мкм та металізаційним розпиленням з отриманням покриття товщиною 120-150 мкм.

Захисні цинкові покриття найбільш поширені серед інших металевих покриттів завдяки вагомим їх перевагам, а саме:

- цинк має більш від'ємний потенціал, ніж залізо, завдяки чому при взаємодії з вологим атмосферним або рідким середовищем, забезпечує надійний захист від корозії;

- цинкові покриття при взаємодії з агресивним середовищем не відшаровуються, а повільно стоншуються;

- цинкові покриття є більш екологічно безпечні, порівняно з іншими видами захисних покриттів;

- труби та конструкції з цинковим покриттям можуть експлуатуватись протягом десятків років [1].

Як відомо, цинк має досить низьку температуру плавлення, порівняно зі сталлю, що створює певні труднощі при з'єднанні труб із захисним цинковим покриттям традиційними дуговими методами зварювання. Інтенсивне випаровування цинку під час зварювання перешкоджає стабільному горінню дуги та призводить до утворення пор і тріщин у зварному шві, а також спричиняє руйнування захисного покриття в місці з'єднання.

Ділянки шва з повністю або частково зруйнованим цинковим покриттям втрачають

свою антикорозійну стійкість та потребують відновлення покриття, що не завжди є технологічно можливим та потребує додаткових затрат, тим самим підвищуючи собівартість конструкцій.

Відомо, що цинкові покриття, маючи властивості протекторного (анодного) захисту щодо сталі, здатні створювати захист на певній ділянці пошкодженого до металу покриття [2]. При цьому ефективність захисту залежить від ступеня пошкодження покриття.

Проведені в роботі [3] дослідження корозійної стійкості оцинкованих сталей з пошкодженням покриття у вигляді смуг та визначення гальванічних струмів довели що існує критична ширина пошкодження покриття, при якій діє анодний захист. Встановлено, що дія анодного захисту забезпечується, якщо ширина зони пошкодження покриття не перевищує 0,9...1,4 мм за умови, що сам шов володіє достатньою корозійною стійкістю.

Зменшити ступінь руйнування цинкового покриття, а також запобігти появі дефектів у шві при зварюванні оцинкованих матеріалів можна зменшенням теплової потужності дуги до температури, що не перевищує температуру кипіння та випаровування цинку. Це можна реалізувати, застосувавши для з'єднання оцинкованих труб технологію дугового паяння (MIG-паяння), основою якої є низьке вкладення теплоти в основний метал та плавлення тільки присадкового матеріалу [4].

### **Мета роботи**

Метою даної роботи є дослідження впливу термічного циклу дугового паяння та зварювання на ступінь пошкодження захисного покриття. Визначення розмірів пошкоджених ділянок для встановлення ефективності анодної дії покриття.

### **Матеріали, обладнання та методики досліджень корозійної стійкості з'єднань**

Найбільш затребуваними в різних галузях є оцинковані труби діаметром від 15 до 159 мм з товщиною стінки від 2,8 до 4 мм. Щоб оцінити антикорозійні властивості дуго-паяних з'єднань, виготовляли натурні зразки із котушок польового магістрального трубопроводу ПМТП-150. Труби даного трубопроводу діаметром 150мм з товщиною стінки 3,2мм виготовляються із низьколегованої сталі марки 16ГС, а корозійний захист забезпечується цинковим покриттям, нанесеним методом гарячого цинкування.

Процес дугового паяння (MIG-паяння) технологічно подібний до процесу дугового зварювання в середовищі захисних газів (MIG/MAG) з тією відмінністю, що плавленню підлягає тільки присадковий дріт, а основний метал або не розплавляється, або розплавляється частково. Все це можна реалізувати при використанні спеціальних присадкових матеріалів та сучасних програмованих джерел живлення.

Таблиця 1 – Хімічний склад та механічні властивості присадкових матеріалів

Марка дроту	C, %	Mn, %	Si, %	Al, %	Ni, %	Cr, %	Cu, %	$\sigma_b$ , МПа	Відносне видовження $\delta$ , %	Ударна в'язкість KCV, Дж/см <sup>2</sup>
CuSi3	–	0,8	2,9	–	–	–	решта	350	40	60
CuAl8	–	0,2	–	8,0	0,3	–	решта	430	40	100
Св-08Г2С	0,08	2,0	0,8	–	0,2	0,2	–	550	30	70

Таблиця 2 – Параметри режиму дугового паяння та зварювання

Метод зварювання	Марка електродного дроту	Діаметр дроту, мм	Напруга на дузі $U$ , В	Зварювальний струм $I_{зв}$ , А	Швидкість зварювання $V_{зв}$ , см/хв	Швидкість подачі дроту $V_{п.д}$ , м/хв
Дугове паяння	CuSi3	1,0	19,0	105	35	5,5
Дугове паяння	CuAl8	1,2	19,4	120	40	3,7
Дугове зварювання	Св-08Г2С	1,2	19	160	28	4,0

Застосування дротів CuSi3 та CuAl8 для паяння-зварювання оцинкованих сталей має такі переваги:

- стійкість зварного шва до корозії (зварний шов майже не кородує);
- незначне розбризкування матеріалу;
- мінімальне вигорання цинкового покриття;
- легкоплавкість;
- зварні шви добре піддаються механічній обробці;
- анодний захист основного металу в околі зварного шва.

Ці присадкові матеріали мають досить низьку температуру плавлення (950...1080°C) завдяки високому вмісту міді.

Дугове зварювання та паяння проводилось з використанням присадкових дротів марок Св-08Г2С, а також CuSi3 та CuAl8.

Дроти марок CuSi3 та CuAl8 виготовляються відомими європейськими фірмами за стандартом ISO 24373, а дрiт Св-08Г2С – ГОСТ 2246-76. Характеристики даних дротів зведені в табл. 1.

Як захисне середовище для електродугового зварювання використовувалась суміш газу Ar(82 %) + CO<sub>2</sub>(18 %), а для дугового паяння – чистий аргон, тому що використання суміші аргону з активними газами при дуговому паянні збільшує зону руйнування покриття.

Використання сучасних програмованих джерел живлення для дугового паяння дозволяє за рахунок вибору параметрів основного та імпульсного струму досягнути керованого, без короткого замикання, перенесення електродного матеріалу в шов. При оптимальному виборі параметрів у момент кожного імпульсу від дрогового електрода відривається тільки одна крапля присадкового матеріалу, що майже повністю виключає розбризкування. Дослідження фірми

«Фроніус» показали, що для різних присадкових матеріалів та захисних газів необхідні різні форми імпульсу [5].

Завдяки режиму «Synergic» можна запрограмувати параметри режиму та керувати за допомогою однієї кнопки, що спрощує обслуговування джерела. Дугове паяння та зварювання зразків проводилось з використанням сучасного зварювального напівавтомата австрійської фірми «FRONIUS» системи TPS-270i, а також зварювального обертача та штатива для закріплення пальника.

Головна відмінність системи TPS-270i від аналогів у своєму класі – це технологія керованого перенесення металу Steel Transfer Technology.

Дугове паяння та зварювання трубних зразків зі скошенням кромки проводилось за два проходи з параметрами режимів, наведеними в таблиці 2.

Щоб оцінити руйнування покриття на прилеглих до шва ділянках та дослідити їх корозійну стійкість, із готових з'єднань було вирізано зразки. Оцінку руйнування покриття проводили після фотознімання поверхні зразків камерою з трикратним збільшенням. Корозійну стійкість з'єднань оцінювали за методикою, викладеною в роботі [6], при безперервному контактуванні зразків з вологою атмосферою в камері з температурою 40°C та відносною вологістю 100%.

### Результати досліджень та їх обговорення

Процес зварювання та дугового паяння супроводжується нагріванням з'єднуваних кромки, потужним тепловим джерелом дуги.

Час перебування металу при температурах, вищих температури кипіння, плавлення та окислення, визначає ступінь пошкодження цинко-

вого покриття. Цей час збільшується за лінійною залежністю зі збільшенням погонної енергії дугового процесу [7].

За характером розподілу температури в навколшовній зоні, а також часом перебування покриття в інтервалі критичних температур, при яких відбувається випаровування та окислення цинку, можна визначити ступінь пошкодження покриття [8].

Щоб оцінити термічний вплив на метал труб при зварюванні та дуговому паянні потрібно провести розрахунок температурного поля, яке, в свою чергу, буде залежати від потужності та типу джерела тепла (зварювальна дуга), а також від форми тіла, на яке буде діяти джерело.

Процес розподілу теплоти в кожній точці та будь-який момент часу описується відомим рівнянням теплопровідності Рикаліна М.М., але для розрахунку теплових процесів при зварюванні цього недостатньо, бо дане рівняння не встановлює залежності температури від просторових координат. Тому для розрахунку диференційного рівняння теплопровідності потрібно задати крайові умови [9].

При розрахунку розповсюдження теплоти такими умовами є початковий розподіл температур в тілі та умови теплообміну – закономірності обміну теплом між тілом (через його поверхні) та оточуючим середовищем.

У літературних джерелах наведено досить багато моделей для розв'язання задач різних технологій зварювання з врахуванням певних крайових умов [10,11], а в нашому випадку дугове паяння та зварювання проводиться рухомих кільцевим джерелом, то для розрахунку температурного поля найбільш підходить модель Кархіна Н.Е. [11].

Розрахункова схема для кільцевого джерела в тонкостінному циліндрі зображена на (рис.1).

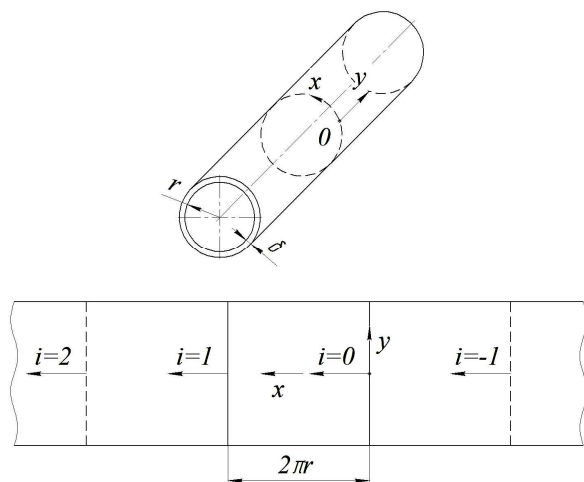


Рисунок 1 – Схема для розрахунку температурних полів тонкостінних циліндрів

Для лінійного рівномірно розподіленого по товщині джерела температурне поле в нескінченно довгому циліндрі у нерухомій системі координат можна розрахувати за рівнянням:

$$T(x, y, t) = \sum_{i=-\infty}^{\infty} \int_0^t \left\{ \frac{q/\delta}{c\rho[4\pi\alpha(t-\tau)]} \times \exp\left( -\frac{(x-v\tau-i2\pi r)^2 + y^2}{4\alpha(t-\tau)} - b(t-\tau) \right) d\tau \right\}, \quad (1)$$

де  $q$  - теплова потужність джерела, Вт;  
 $\delta$  - товщина стінки труби, см;  
 $c\rho$  - об'ємна теплоємність, Дж м<sup>-3</sup>К<sup>-1</sup>;  
 $\alpha$  - коефіцієнт поверхневої теплопровідності, Вт м<sup>-2</sup> К<sup>-1</sup>;  
 $b$  - коефіцієнт поверхневої температуровіддачі, с<sup>-1</sup>;  
 $t$  - час зварювання, с;  
 $v$  - швидкість руху джерела, м с<sup>-1</sup>;  
 $r$  - радіус труби, см.

Теплова потужність джерела визначається за параметрами режиму паяння та зварювання (табл. 2) за формулою:

$$q = U \cdot I \cdot \eta, \quad (2)$$

де  $U$  - напруга дуги, В;  
 $I$  - сила зварювального струму, А;  
 $\eta$  - коефіцієнт корисної дії процесу нагрівання (для дугового паяння та зварювання  $\eta=0,7$ ).

Розрахунок температурного поля дугового паяння та зварювання проводився з використанням системи комп'ютерної алгебри на базі стандартного пакету Mathcad.

За результатами проведеного розрахунку було побудовано графік розподілу температури в поперечних площинах швів (рис. 2).

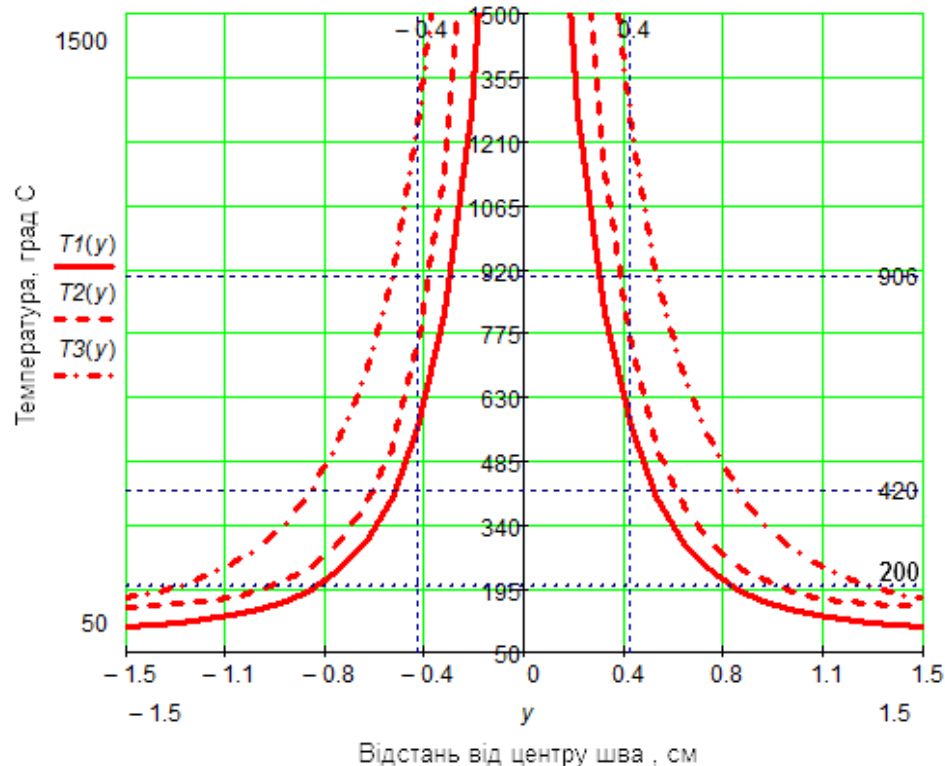
При дуговому паянні та зварюванні труб з цинковим покриттям можливе часткове або повне руйнування покриття в ділянках, прилеглих до шва, через досить низку температуру плавлення та випаровування цинку. Як відомо, окислення цинку починається при температурі 200 °С, плавлення цинку – при температурі ~420 °С, а при температурі ~906 °С починається його інтенсивне кипіння та випаровування. Перебування прилеглих до шва ділянок в інтервалі цих температур характеризує розміри та ступінь пошкодження покриття.

З графіка розподілу температури можна виділити три характерні ділянки пошкодження покриття:

- ділянка кипіння та випаровування (перебування матеріалу при температурі вище 906 °С);
- ділянка розплавлення (420–906 °С);
- ділянка окислення (200–420 °С).

Після оброблення графіка розподілу температури в графічному редакторі КОМПАС 3D було визначено розміри ділянок пошкодження покриття, а також зроблено знімки зовнішньої поверхні з'єднань, на яких виділено ділянки пошкодження покриття та їх розміри (рис. 3).

Ділянка кипіння характеризується значним пошкодженням захисного покриття (аж до відсутності) через інтенсивне випаровування цинку, бо воно перебуває в інтервалі температури, що перевищує температуру кипіння цинку. Дана ділянка спостерігається тільки на зразку, виконаному дуговим зварюванням (рис. 3в),



T1 – дугове паяння дротом CuSi3;  
 T2 – дугове паяння дротом CuAl8;  
 T3 – зварювання дротом Св-08Г2С

**Рисунок 2 – Розподіл температури в поперечних площинах зварних та паяних швів**

а на зразках, виконаних дуговим паянням, вона відсутня. Це пояснюється тим, що при дуговому паянні застосовуються електродні дроти на основі міді, які мають значно нижчу температуру плавлення (~ 1100 °С), яка є меншою від температури плавлення сталі (~ 1500 °С), а, відповідно, і теплова потужність джерела буде також меншою. Як бачимо з графіка (рис. 2), при дуговому паянні прилеглі до шва ділянки не потрапляють до зони критичної температури (вище 906 °С).

На ділянці випаровування можна спостерігати скупчення цинку з вкрапленням міді (при дуговому паянні) (рис.3а,б), що створює певне потовщення покриття. Це пояснюється тим, що цинкове покриття перебуває в інтервалі температур, які перевищують температуру його розплавлення, тому на даній ділянці пошкодження покриття є незначними.

Найменшого температурного впливу зазнає покриття на ділянці окислення, яка перебуває в інтервалі температур окислення цинку, тому на даній ділянці можна спостерігати лише незначне окислення цинкового покриття.

Ширина пошкоджених ділянок збільшується зі збільшенням потужності теплового джерела, а проведені дослідження підтверджують залежність пошкодження покриття від температури, що також показано в роботах [4, 5].

Як бачимо, при дуговому паянні ширина ділянки з найбільшими пошкодженнями покриття не перевищує 1мм та потрапляє під дію анодного захисту.

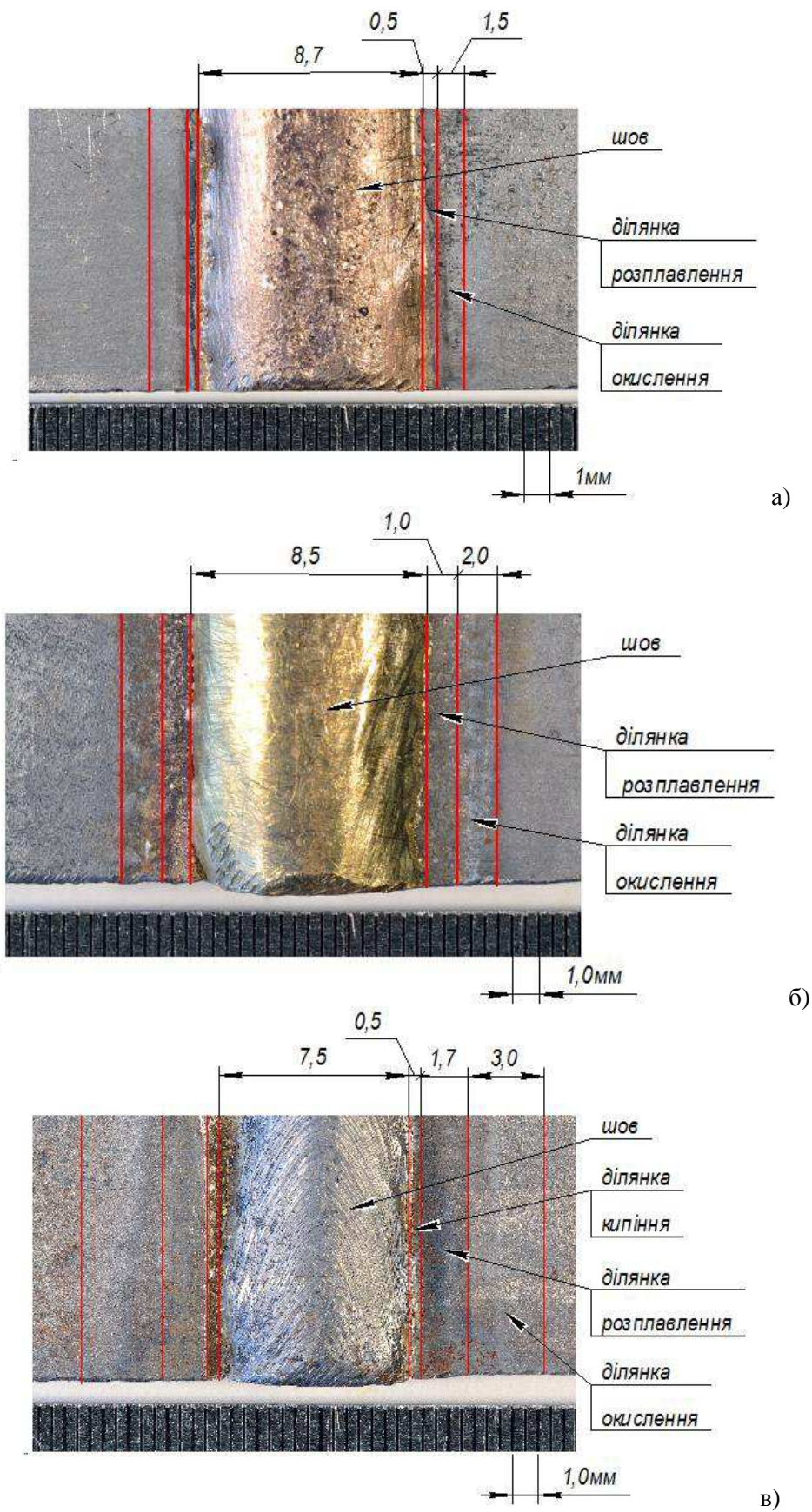
Корозійну стійкість з'єднань оцінювали візуальним оглядом зразків (рис. 3) після випробувань у камері вологості.

На знімках поверхні з'єднань бачимо, що найбільше пошкоджений корозією зразок, виконаний дуговим зварюванням (рис. 4в), на якому спостерігаються сліди корозії в так званій ділянці кипіння та випаровування цинку, а також помітна біла корозія на ділянці окислення, яка є характерною для цинкових покриттів. Зразки з'єднань дугового паяння виявилися стійкими до корозії, лише на зразку, виконаному дротом CuAl8 (рис. 4б), можна спостерігати незначні сліди білої корозії ділянки окислення.

Отже, корозійні випробування підтверджують встановлені залежності та характер руйнування покриття від температурного впливу дуги. Проведені дослідження показали, що при дуговому зварюванні труб з цинковими покриттями сам шов не є корозійностійким, а покриття в прилеглих ділянках руйнується. На відміну від дугового зварювання, застосування дугового паяння для з'єднання оцинкованих труб забезпечує корозійну стійкість швів та цілісність захисного цинкового покриття у прилеглих ділянках.

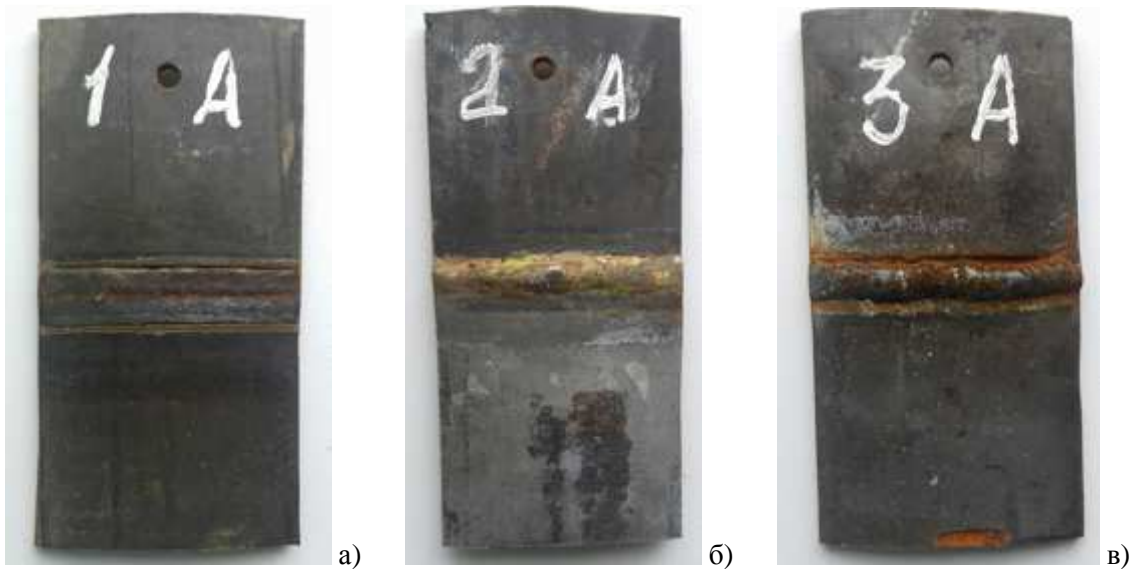
Але, як відомо, продукти транспортуються трубопроводами з робочим тиском, що може досягати 10 МПа, тому також потрібно провести дослідження напружено-деформованого стану дуго-паяних з'єднань, що може стати перспективним напрямком подальших досліджень.





а - паяне дротом CuSi3 з'єднання; б - паяне дротом CuAl8 з'єднання;  
в - зварене дротом Sv-08Г2С з'єднання

**Рисунок 3 – Зовнішні поверхні з'єднань оцинкованих труб з виділеними ділянками пошкодження цинкового покриття (трикратне збільшення)**



а - паяне дротом CuSi3з'єднання; б - паяне дротом CuAl8з'єднання;  
в - зварене дротом Sv-08Г2С з'єднання

**Рисунок 4 – Поверхні зразків з'єднань після корозійних випробувань**

### Висновки

Визначено характер пошкодження покриття у прилеглих до шва ділянках при дуговому паянні та зварюванні труб із цинковим покриттям та встановлено:

1) при дуговому паянні, на відміну від дугового зварювання, захисне покриття не випаровується, а можливе лише розплавлення цинку в прилеглих до шва ділянках за рахунок меншого температурного впливу;

2) ділянка найбільшого пошкодження покриття при дуговому паянні має ширину, що не перевищує 1мм та підпадає під дію анодного захисту;

3) корозійна стійкість з'єднань оцинкованих труб, виконаних методом дугового паяння, є набагато вищою від стійкості зварних з'єднань, а також самі шви є корозійно стійкими.

Отже, проведені дослідження та встановлені залежності пошкодження цинкового покриття від температурного впливу дуги дозволяють зробити висновки, що застосування дугового паяння для з'єднання матеріалів з цинковим покриттям дозволить зберегти цілісність покриття та забезпечити корозійну стійкість швів та прилеглих до них ділянок.

Дугове паяння можна застосовувати при виготовленні та ремонті польових магістральних трубопроводів, технологічних трубопроводів та мереж з оцинкованих труб.

### Література

1 Родионова Л. В. Преимущества и недостатки способа горячего оцинкования стальной полосы. Проблемы цинкования [Электронный ресурс] / Л. В. Родионова, Ю. М. Суботина // Russian Internet Journal of Industrial Engineering. – 2013. – Режим доступа:

<https://www.google.com.ua/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=0ahUKEwi9iu3Qk-nMAhXCWiwKHxOBB8IQFggdMAA&url=http%3A%2F%2Findust-engineering.ru%2Fissues%2F2013%2F2013-2-1.pdf&usq=AFQjCNHawUMhWUIK1WpNvfo-smUCuDjguA&sig2=5hwXXP0qGDtewJ9beE5pig&cad=rja>.

2 Семенова И. В. Коррозия и защита от коррозии / И. В. Семенова, Г. М. Флорианович, А. В. Хорошилов. – Москва: Физматлит, 2006. – 376 с.

3 Лупачёв А. В. Дуговая сварка и пайка оцинкованных узлов теплотрасс и их коррозионная стойкость [Текст] / А. В. Лупачёв // Вестник полоцкого государственного университета. – 2012. – №3. – С. 21–27. Режим доступа: <http://elib.psu.by:8080/handle/123456789/477>

4 GMA Brazing of Galvannealed Interstitial-Free Steel / B. S.Basak, T. K. Pal, M. Shome, J. Maity. // Welding journal. – 2013. February, Vol. 92, P. 29–35.

5 Бондаренко В. Л. Инверторное оборудование с частотой преобразования более 100кГц и цифровым управлением [Текст] / В. Л. Бондаренко // Сварщик. – 2007. – №6. – С. 21–23.

6 Mig brazed hot-dip galvanized sheets / [J. Vinas, L. Kascak, M. Abel] // Lebanese Science Journal. – 2010. – Vol. 11, Issue 2. – P. 75–85.

7 Варнак А. Г. Оценка антикоррозионных свойств сварного соединения труб и профилей, изготовленных из оцинкованной рулонной стали на непрерывном ТЭСА [Текст] / А. Г. Варнак, О.В.Варнак, Т. Н. Чурикова // Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия». – 2016. – №2. – С. 98–105.

8 Павлюк С. К. Закономерности процесса повреждения и разрушения цинкового покрытия на стали при сварке плавлением и дуговой пайке [Текст] / С. К. Павлюк, А. В. Лупачёв, Ю. А. Цумарев // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2008. – №2. – С. 76–84.

9 Негода Е. Н. Тепловые процессы при сварке: учеб. пособие [Текст] / Е. Н. Негода. – Дальневосточный государственный технический университет: Изд-во ДВГТУ, 2008. – 125 с.

10 Василик А. В. Теплові розрахунки при зварюванні [Текст] / А. В. Василик, Я. А. Дрогомирецький, Я. А. Криль. – Івано-Франківськ: Факел, 2004. – 209 с.

11 Кархин В. А. Основы теплопередачи при сварке и пайке: учебное пособие [Текст] / В. А. Кархин. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, 2011. – 95 с.

*Стаття надійшла до редакційної колегії*

*09.11.16*

*Рекомендована до друку*

*професором Грудзом В.Я.*

*(ІФНТУНГ, м. Івано-Франківськ)*

*канд. техн. наук Пилипченком О.В.*

*(ТОВ «МНВЦ Еліпсон ЛТД»,*

*м. Івано-Франківськ)*