

622.692.4.07  
M33

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**  
**ІВАНО-ФРАНКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ**  
**УНІВЕРСИТЕТ НАФТИ І ГАЗУ**

**МАТВІЄНКІВ ОЛЕГ МИХАЙЛОВИЧ**



УДК:622.692.4.07

622.692.4(043)

M33

**УДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ РЕМОНТУ ПОЛЬОВИХ**  
**МАГІСТРАЛЬНИХ ТРУБОПРОВІДІВ**

Спеціальність 05.15.13 – Трубопровідний транспорт, нафтогазосховища

**АВТОРЕФЕРАТ**

дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Дисертацією є рукопис

Робота виконана в Івано-Франківському національному технічному університеті нафти і газу Міністерства освіти і науки України



**Науковий керівник:** доктор технічних наук, професор  
**Шлапак Любомир Степанович**,  
Івано-Франківський національний технічний  
університет нафти і газу, завідувач кафедри  
зварювання конструкцій та відновлення  
деталей машин

**Офіційні опоненти:** доктор технічних наук  
**Говдяк Роман Михайлович**,  
ТОВ «Інжинірингова компанія «Машекспорт»»,  
директор

кандидат технічних наук  
**Басараб Роман Миколайович**  
Філія «Магістральні нафтопроводи» Дружба»  
ПАТ «Укртранснафта», заступник директора

Захист відбудеться «01» грудня 2017 р. о 13<sup>00</sup> годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 20.052.04 в Івано-Франківському національному технічному університеті нафти і газу за адресою: 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15.

З дисертацією можна ознайомитись у науково-технічній бібліотеці Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу за адресою: 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15.

Автореферат розісланий «28» жовтня 2017 р.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради Д 20.052.04  
кандидат технічних наук, доцент

Л.Д. Пилипів



## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Швидке оснащення військ технікою на початку минулого століття викликало гостру потребу в доставці пального. Проте недостатньо розвинута інфраструктура залізничного та автомобільного транспорту не могла вирішити дану проблему. Тому для доставки пального вперше було застосовано польові магістральні трубопроводи, які успішно справляються з цим завданням і по сьогоднішній день.

Польові магістральні трубопроводи широко застосовуються також і в різних галузях народного господарства та використовуються для доставки води до зрошувальних систем, транспортування нафти від місць видобутку та ін.

Завдяки невеликій вазі, транспортабельності та швидкому монтажу дані трубопроводи добре зарекомендували себе при вирішенні багатьох техногенних катастроф, наприклад, при гасінні лісових пожеж та торф'яників, відведення водостоків.

Швидкий монтаж та демонтаж польових магістральних трубопроводів здійснюється за рахунок використання розтрубних з'єднань, які в процесі експлуатації найчастіше зазнають пошкоджень та зношуються, тому виникає проблема їх заміни. На сьогоднішній день при виготовленні та ремонті польових магістральних трубопроводів приєднання з'єднувальних елементів манжета та розтруба до тіла труби здійснюється з використанням дугового зварювання. Але застосування дугового зварювання не може забезпечити корозійну стійкість шва та навколошовної зони, оскільки труби та з'єднувальні елементи даних трубопроводів виготовляються зі сталі із захисним цинковим покриттям. Тому невід'ємною операцією виготовлення та ремонту таких труб є корозійний захист зварних з'єднань.

Дану проблему можна вирішити застосувавши сучасну технологію дугового паяння з використанням присадкових матеріалів на основі міді, які є корозійностійкими, а також мають достатньо високу міцність та пластичність. Температурний вплив дуги на деталі при дуговому паянні є на 30% нижчим, ніж при зварюванні, що зменшує руйнування захисного покриття в прилеглих до шва ділянках.

Технологія дугового паяння широко застосовується відомими світовими автовиробниками для з'єднання конструкцій автомобілів із захисними покриттями. Проте малодослідженим є застосування дугового паяння для з'єднання труб із захисним покриттям, що працюють під високим тиском.

**Мета та завдання дослідження.** Мета дисертаційної роботи полягає у розробленні технологічних основ та практичних рекомендацій ремонту польових магістральних трубопроводів дуговим паянням шляхом дослідження напружено-деформованого стану паяних з'єднань труб, їх структурно-фазового стану, впливу дугового паяння на пошкоджуваність захисного покриття.

Досягнення поставленої мети передбачає розв'язання таких завдань:

- проаналізувати проблеми з'єднання сталей із захисним цинковим покриттям та особливості технології дугового паяння;
- дослідити мікроструктуру та механічні властивості стикових паяних з'єднань труб;

*an 2674 - an 2675*

- визначити вплив дугового паяння на ступінь пошкодження захисного цинкового покриття труб;

- дослідити напружено-деформований стан паяних з'єднань труб при навантаженні внутрішнім тиском;

- розробити та обґрунтувати технологічну схему ремонту та сконструювати пересувний трубо-ремонтний комплекс.

**Об'єктом дослідження** є зона сплавлення розтрубного елемента з трубою основою.

**Предметом дослідження** є закономірності та особливості формування структури шва і напружено-деформованого стану зони сплавлення розтрубного елемента з основою труби в базових і польових умовах.

**Методи дослідження.** Поставлені завдання вирішувалися теоретичними та експериментальними методами. Експериментально досліджувались мікроструктура та механічні властивості паяних з'єднань, а розрахунковим методом досліджувалась їх корозійна стійкість. Сумісне використання математичного моделювання та експериментальних досліджень застосовано для дослідження напружено-деформованого стану паяних з'єднань. Математичним, а саме імітаційним моделюванням, проводилась оцінка напружено-деформованого стану паяних з'єднань труб при навантаженні внутрішнім тиском, а для підтвердження адекватності моделі та отриманих результатів проводились експериментальні дослідження методом тензометрії. Експерименти проводились на спеціально сконструйованому та виготовленому лабораторному стенді, що дало змогу проводити навантаження стиків труб внутрішнім тиском. Передавання та реєстрація даних від тензодавачів здійснювалася за допомогою персонального комп'ютера та 8-канального тензометричного реєструючого комплексу «SPIDER-8» з ліцензованим програмним забезпеченням «CATMAN».

### **Наукова новизна отриманих результатів.**

1. Вперше досліджено особливості дугового паяння для тонкостінних труб із захисним цинковим покриттям при виконанні ремонтних робіт у трасових умовах та встановлено, що для забезпечення корозійної стійкості зварного шва і пришовної зони, забезпечення їх рівномірності з основним металом є використання присадкових матеріалів на основі міді.

2. Вперше експериментально показано, що при стандартній формі оброблення кромки при дуговому паянні під дією внутрішнього тиску в пришовній зоні виникає концентрація кільцевих напружень, зменшення яких досягається за рахунок зміни форми та розмірів кромки. Визначені раціональні розміри та форма оброблення кромки, що дало змогу зменшити рівень концентрації кільцевих напружень у зоні зварного шва на 21 %.

3. Набуло подальшого розвитку формування структури стикових паяних з'єднань оцинкованих труб польових магістральних трубопроводів з товщиною стінки 3,2 мм. Встановлено, що міцність паяних з'єднань при дуговому паянні визначається розмірами дифузійної зони та площею контакту шва з основним металом.

4. Показано, що використання присадкового матеріалу на основі міді при дуговому паянні не тільки призводить до зменшення рівня напружень у зоні шва, але і зменшує розміри зони термічного впливу та ступінь пошкодження захисного цинкового покриття, і, як наслідок, виключає з технологічного циклу ремонту операцію оцинковування зварного з'єднання.

**Практичне значення.** Результати проведених досліджень дають можливість застосувати технологію дугового паяння для з'єднання труб із захисним цинковим покриттям зі збереженням захисного покриття та забезпеченням корозійної стійкості швів. Отримані результати підтверджують достатньо високу міцність паяних з'єднань труб, що дає можливість застосовувати метод дугового паяння для ремонту та виготовлення труб польових магістральних трубопроводів, а також інших труб із цинковим покриттям, що експлуатуються при навантаженні внутрішнім тиском.

Результати досліджень впроваджені в навчальний процес кафедри зварювання конструкцій та відновлення деталей машин. Зокрема, розроблено дослідний стенд для вимірювання напружень та деформацій в трубі при навантаженні внутрішнім тиском, який був використаний при проведенні нової лабораторної роботи з дисципліни «Напруження та деформації при зварюванні», а розроблена модель імітаційного моделювання використовується при виконанні практичних занять з дисципліни «САПР у зварюванні».

**Особистий внесок здобувача.** Завдання, поставлені у дисертаційній роботі виконано спільно з науковим керівником, а основні положення та результати досліджень за темою дисертації автором отримані самостійно. Роботи [2,4,5,7,11] опубліковані автором одноосібно. У роботі [1] автором проаналізовано сучасні дугові методи зварювання магістральних трубопроводів. У роботах [6,8,9,10] автором розроблено методика досліджень, проведено підготовку експериментальних досліджень, а також обробку експериментальних даних. Ідея та підготовка експериментів у роботі [3] належать автору. Підготовка до друку всіх робіт, окрім роботи [1], проводилась автором особисто.

**Апробация матеріалів дисертації.** Результати досліджень доповідались та обговорювались на міжнародних науково-технічних конференціях: Міжнародній науково-практичній конференції «Проблеми і перспективи транспортування нафти і газу» (м. Івано-Франківськ, 15-18 травня 2012 р.); Третій Міжнародній науково-технічній конференції «Сварочное производство в машиностроении: перспективы развития» (м. Краматорськ, 2-5 жовтня 2012 р.); Міжнародній науково-технічній конференції «Машини, обладнання і матеріали для нарощування вітчизняного видобутку та диверсифікації постачання нафти і газу» (м. Івано-Франківськ, 16-20 травня 2016 р.); IV Международной научно-технической конференции «Сварка и родственные технологии: перспективы развития» (м. Краматорск, 4-7 жовтня 2016 р.); XI Всеукраїнській науково-практичній конференції студентів, аспірантів та молодих учених «Підвищення надійності машин і обладнання» (м. Кропивницький, 20-21 квітня 2017р.).

У повному обсязі робота доповідалась та обговорювалась на розширеному науковому семінарі кафедри спорудження та ремонту газонафтопроводів та

газонафтосховищ Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу (м. Івано-Франківськ, 29 червня 2017р.).

**Публікації.** Основні результати дисертаційної роботи висвітлені в 11 працях: 6 - у вітчизняних фахових виданнях, 2 з яких входять до міжнародних наукометричних баз (1 - Scopus; 1 - Index Copernicus), 5 – у збірниках міжнародних конференцій.

**Структура та обсяг дисертації.** Дисертаційна робота складається з анотації українською та англійською мовами, вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел, що налічує 112 найменувань та 3 додатків. Основний текст роботи викладено на 132 сторінках і містить 66 рисунків та 17 таблиць.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обгрунтовано актуальність теми дисертації, сформульовано мету роботи і визначено основні завдання дисертаційної роботи, описані об'єкт і методи досліджень, висвітлено наукову новизну та практичне значення отриманих результатів, а також подано відомості про особистий внесок здобувача та апробацію роботи.

У першому розділі проаналізовано перспективи застосування польових магістральних трубопроводів (ПМТП) та умови їхньої експлуатації. Встановлено, що найчастіше при експлуатації та монтажі пошкоджуються розтрубні елементи труб, тому виникає проблема їх заміни.

Для захисту від корозії труби та розтрубні елементи ПМТП покриваються тонким шаром цинку, що створює певні труднощі при їх зварюванні, а також забезпеченні корозійного захисту шва.

Проблему зварювання матеріалів із захисним цинковим покриттям відображено в роботах таких вчених як О.П. Шатов, О.І. Стеклов, С.К. Павлюк, А.В. Лупачов, Ю.О. Цумарев.

Зокрема, зазначено, що основні труднощі зварювання сталевих конструкцій з цинковим покриттям пов'язані з різницею температур плавлення сталі та цинку, а також випаровування цинку. Як відомо, залізо плавиться при температурі 1539 °С, плавлення цинку починається при температурі ~420 °С, а при температурі ~906 °С починається його інтенсивне кипіння та випаровування. Потужні цинкові випари при зварюванні в середовищі захисних газів послаблюють дію захисного газу та призводять до попадання повітря в розплавлену зварювальну ванну.

Все це створює певні труднощі при дуговому зварюванні оцинкованих труб та призводить до утворення пор у зварному шві. Також при зварюванні оцинкованих труб внаслідок високотемпературного нагрівання відбувається пошкодження та руйнування цинкового покриття поблизу шва, а сам шов, відповідно, залишається незахищеним. Ступінь пошкодження покриття характеризується шириною пошкоджених ділянок та товщиною цинкового покриття, яке залишилось після зварювання.

Зберегти цілісність захисного цинкового покриття та забезпечити корозійну стійкість шва при з'єднанні оцинкованих матеріалів можна, застосувавши технологію дугового паяння як альтернативу дуговому зварюванню.

З появою сучасних джерел живлення з цифровим керуванням дугове паяння або MIG-паяння (arc brazing, MIG-brazing) набуло широкого застосування для з'єднання матеріалів із захисним покриттям, а також різномірних матеріалів. Дугове паяння поєднує процес дугового зварювання та паяння, а використання присадкових матеріалів зі сплавів на основі міді з температурою плавлення від 950 до 1080 °С, дає можливість суттєво знизити тепловкладення і, таким чином, зменшити руйнування захисного цинкового покриття.

Корозійна стійкість з'єднань буде зберігатись, коли ширина пошкодження цинкового покриття не перевищує зону дії анодного захисту за умови, що сам шов має достатню корозійну стійкість.

Проаналізувавши роботи вітчизняних та зарубіжних вчених необхідно зазначити, що дугове паяння оцинкованих сталей дає змогу не тільки забезпечити корозійну стійкість з'єднань, але і їх достатньо високу міцність, що відповідає рівню міцності основного матеріалу. Але більшість робіт у даному напрямку присвячено дослідженням з'єднань внапуск з товщиною деталей, що не перевищує 2мм. Тому, зважаючи на це, важливим завданням є дослідження стикових дуго-паяних з'єднань труб з товщиною стінки більше 2мм.

У другому розділі охарактеризовано матеріали, показано типи зразків, а також наведено основні методики досліджень та опис пристроїв і обладнання, що використовувались у роботі.

Для контролю зміни механічних властивостей, а також структурних перетворень зварних з'єднань під час дугового паяння та зварювання у даній роботі проводились такі дослідження та випробування:

- 1) аналіз макроструктури та мікроструктури зварних з'єднань з використанням оптичного мікроскопа;
- 2) вимірювання мікротвердості за допомогою мікротвердоміра ПМТ-3;
- 3) вимірювання твердості по Роквеллу з використанням твердоміра ТК-2;
- 4) випробування зварних з'єднань на статичний розтяг та кут згину згідно ГОСТ 6996-66 на випробувальній машині УММ-50;
- 5) теоретичні дослідження корозійної стійкості паяних з'єднань за розподілом температури в перерізі з'єднань та визначенні розмірів ділянок пошкодженого покриття;
- 6) теоретичні та експериментальні дослідження напружено-деформованого стану паяних з'єднань труб.

Вимірювання напружень та деформацій на стінках труб в околі паяного шва проводилось методом тензометрії. Для цього було сконструйовано та виготовлено спеціальний дослідний стенд для навантаження зразка внутрішнім тиском (рис. 1).

Вимірювання кільцевих напружень проводилось у восьми точках перерізу стика трубних зразків наклеюванням тензодавачів поблизу шва в поперечному напрямку. Для цього застосовували тензорезистори марки 2ПКП-15-200В, які з'єднувались за схемою півмоста Уїтстона.

Передавання та реєстрація даних від тензодавачів здійснювалося за допомогою персонального комп'ютера та 8-канального тензометричного реєструючого комплексу «SPIDER-8» з ліцензованим програмним забезпеченням «CATMAN».

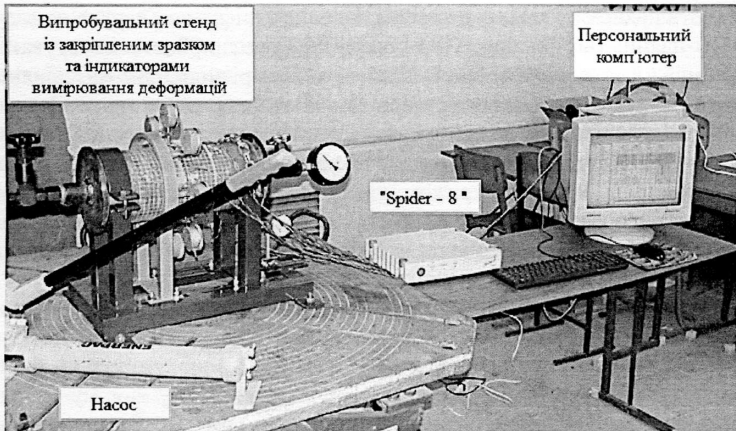


Рисунок 1 – Випробувальний стенд з обладнанням для вимірювання та рестрації напружень і деформацій

Для визначення величини напружень проводилося перетворення величини  $\mu\text{m/m}$  в зусилля та переміщення, так зване тарування тензорезисторів.

Математична обробка результатів досліджень проводилась з використанням прикладної програми Microsoft Excel.

**У третьому розділі** досліджено особливості формування стикових з'єднань труб при дуговому паянні, механічні властивості з'єднань, а також визначено ступінь пошкодження захисного цинкового покриття в прилеглих до шва ділянках.

Особливостями паяних з'єднань є утворення таких ділянок:

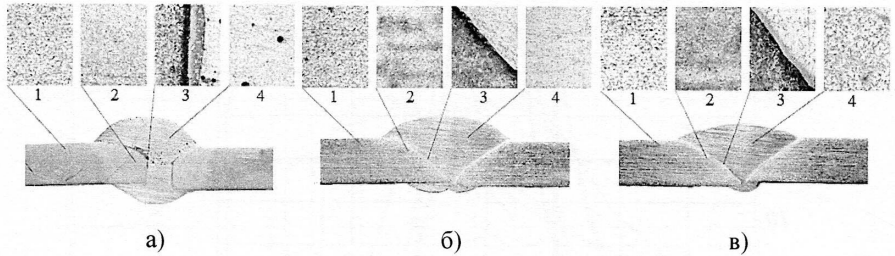
- паяний шов;
- дифузійна зона (є прилеглою до шва та утворюється внаслідок взаємної дифузії присадки (припою), основного металу та захисного газового середовища);
- зона сплавлення (поверхня між паяним швом та основним матеріалом);
- зона термічного впливу (прилегла до шва ділянка основного металу зі зміненою структурою та властивостями внаслідок термічного циклу паяння).

Проведений аналіз процесів, що відбуваються при утворенні паяних з'єднань, свідчить, що підвищення рівня теплового впливу при дуговому паянні призводить до інтенсифікації дифузійних процесів і, як наслідок, росту дифузійної зони, ширина якої є ключовим параметром для оцінювання рівня міцності.

Встановлено, що в паяних з'єднаннях, отриманих із використанням кремнистої бронзи  $\text{CuSi3}$  та алюмінієвої бронзи  $\text{CuAl8}$  (рис.2), між основним та присадковим металом формується виражена дифузійна зона (шириною  $\sim 30$  мкм), сформована через утворення суміші евтектичного типу. Виходячи із характеру взаємодії за умов близьких до рівноважних, у подвійній системі Fe-Cu вона складається із евтектичної суміші фериту та твердого розчину на основі Cu ( $\epsilon$ -фаза). Поряд із цим спостерігається інтенсивна дифузія Fe в основу наплавленого шару, внаслідок чого



при кристалізації паяного з'єднання у його структурі виділяються дрібнодисперсні (~1 мкм) фази.



а – матеріал шва CuSi3, прямі кромки; б – матеріал шва CuSi3 V-подібні кромки;  
в – матеріал шва CuAl8 V-подібні кромки;

1 – основний метал; 2 – зона термічного впливу; 3 – лінія сплавлення; 4 – шов

Рисунок 2 - Макроструктура (3<sup>x</sup>) та мікроструктура (100<sup>x</sup>) з'єднань

Встановлено, що товщина дифузійної зони у всіх трьох паяних зразках є різною та залежить від параметрів режиму, оскільки дугове паяння всіх зразків проводилось з різними параметрами, а відповідно і теплова потужність дуги теж була різною. Все це також буде впливати на механічні властивості з'єднань.

Для оцінки міцності паяних з'єднань з різним матеріалом шва та форми кромки, їх порівняння зі зварними, а також з'єднання вирізаного із заводської труби, проводились механічні випробування відповідних зразків на розрив. Враховуючи те, що шви зварних та паяних з'єднань на досліджуваних зразках не оброблялись та мали відхилення геометричних розмірів, то традиційне визначення показників міцності було б неточним. Тому порівняння міцності з'єднань проводилось за діаграмами їх розтягу. Під час проведення випробувань було записано машинні діаграми розтягу зразків, відтак були оброблені в графічному редакторі та показані на рис. 3.

Аналізуючи діаграму розтягу, встановлено, що найменше зусилля розтягу до руйнування є в зразка, виконаного присадковим матеріалом CuSi3. На відміну від зусилля розтягу паяного з'єднання, виконаного присадковим матеріалом CuAl8, є тільки на 6% меншим від зусилля розтягу зварного з'єднання, розрив якого відбувся по основному металу.

Результати експериментальних досліджень свідчать, що міцність паяних з'єднань залежить від міцності присадкового матеріалу та площі паяного шва, яка визначається формою оброблення кромки. На діаграмі розтягу можна побачити, що розривне зусилля зразків з'єднань з V-подібними кромками є на 50% більшим від аналогічного із прямими кромками.

Проаналізувавши результати механічних випробувань, необхідно зазначити, що міцність паяних з'єднань, в основному, залежить від двох факторів: технологічних та конструктивних. Технологічні фактори визначаються особливостями процесу дугового паяння, а саме: марки присадкового дроту; параметрів режиму; складу захисного газового середовища; способу виконання паяння.

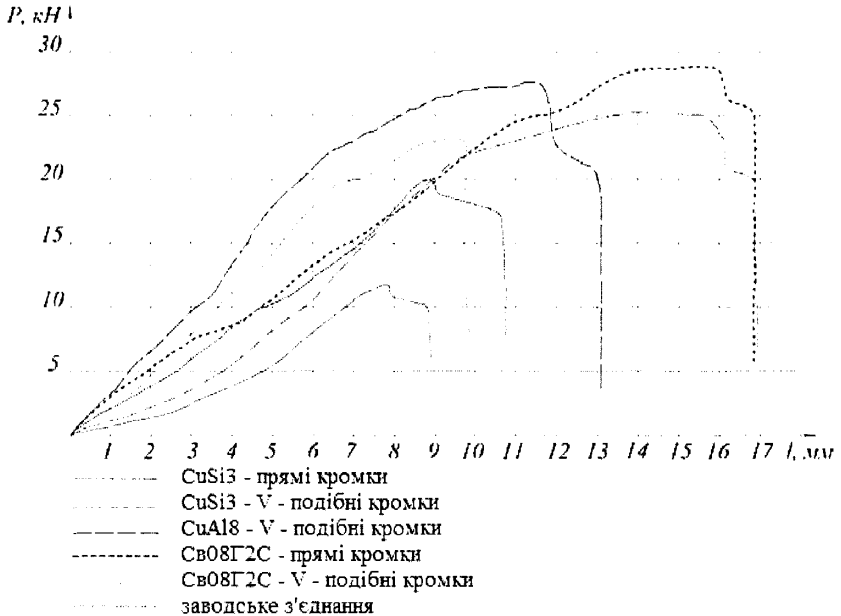


Рисунок 3 - Зусилля розтягу зразків паяних та зварних з'єднань

Конструктивними факторами є: тип оброблення кромки, величина зазору та розміри і форма паяного шва (ширина та висота його випуклості).

Процес зварювання та дугового паяння супроводжується нагріванням з'єднуваних кромки, потужним тепловим джерелом дуги. Час перебування металу при температурах, вищих від температури кипіння, плавлення та окислення, визначає ступінь пошкодження цинкового покриття. Цей час збільшується за лінійною залежністю із зростанням погонної енергії дугового процесу.

Ступінь пошкодження цинкового покриття у прилеглих до шва ділянках визначено за характером розподілу температури в навколошовній зоні, а також часом перебування покриття в інтервалі критичних температур, за яких відбувається випаровування та окислення цинку.

Для оцінки термічного впливу на метал труб при зварюванні та дуговому паянні проведено розрахунок температурного поля, яке, в свою чергу, залежить від потужності та типу джерела тепла (дуги), а також від форми тіла, на яке діє джерело. Враховуючи те, що в нашому випадку джерело є лінійним та рівномірно розподіленим по товщині, температурне поле в нескінченно довгому циліндрі у нерухомій системі координат можна розрахувати за рівнянням (В.А. Кархин «Основи теплопередачі при сварке и пайке»).

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

За результатами проведеного розрахунку побудовано графік розподілу температури в поперечних площинах швів (рис. 4).

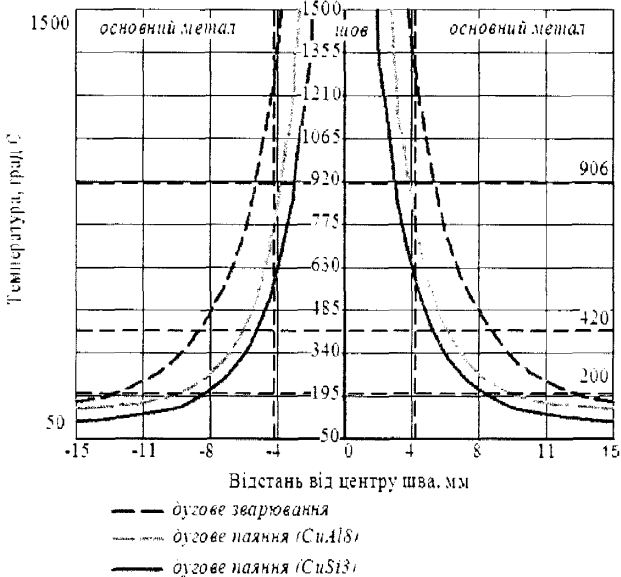


Рисунок 4 – Розподіл температури в поперечних площинах зварних та паяних швів

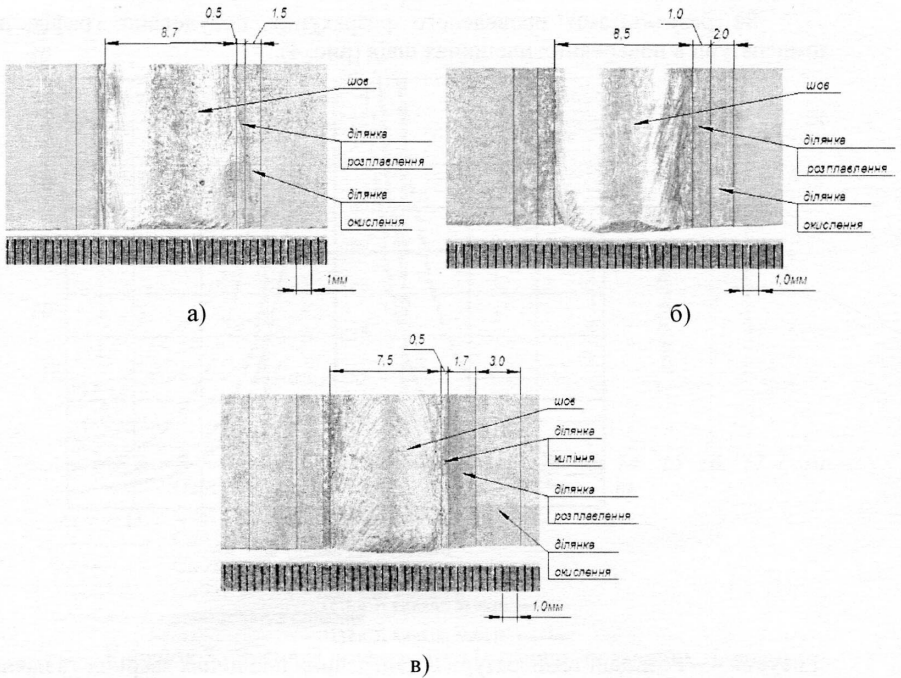
З графіка розподілу температури можна виділити три характерні ділянки пошкодження покриття:

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

При дуговому паянні прилегли до шва ділянки не потрапляють до зони критичної температури (вище 906 °C).

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. 5).

Встановлено, що при дуговому паянні за рахунок присадкових матеріалів зі сплавів на основі міді, які мають значно нижчу температуру плавлення (~ 1100 °C), що є меншою від температури плавлення сталі (~ 1500 °C), а, відповідно, і теплова потужність джерела теж є меншою, відсутня ділянка кипіння. Дана ділянка спостерігається тільки на зварному з'єднанні (рис. 5, в) та характеризується значним пошкодженням захисного покриття (аж до його відсутності) через інтенсивне випаровування цинку, бо воно перебуває в інтервалі температури, що перевищує температуру кипіння цинку, а на зразках, виконаних дуговим паянням відсутня.



а - паяне з'єднання, шов  $\text{CuSi3}$ ; б - паяне з'єднання шов  $\text{CuAl8}$ ; в - зварне з'єднання  
 Рисунок 5 - Зовнішні поверхні з'єднань оцинкованих труб з виділеними ділянками пошкодження цинкового покриття (3<sup>х</sup>)

На ділянці випаровування можна спостерігати скупчення цинку з вкрапленням міді (при дуговому паянні) (рис.5 а, б), що створює певне потовщення покриття.

Це пояснюється тим, що цинкове покриття перебуває в інтервалі температур, які перевищують температуру його плавлення, тому на даній ділянці пошкодження покриття є незначним.

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.

Даними дослідженнями також встановлено, що при дуговому паянні максимальна ширина ділянки з найбільшими пошкодженнями покриття не перевищує 1мм та потрапляє під дію анодного захисту.

**У четвертому розділі** наведено результати дослідження напружено-деформованого стану паяних з'єднань труб при навантаженні внутрішнім тиском.

Польові магістральні трубопроводи є наземними спорудами, на які будуть діяти два види навантажень: тривалі та короточасні. Тривалими навантаженнями є: внутрішній тиск, власна вага труби та перекачуваного продукту, а короточасними - снігове та вітрове навантаження, а також обледеніння. Враховуючи те, що діаметр

труб є невеликим, то короткочасні навантаження є незначними і тому вони при розрахунках та дослідженнях не враховувались.

Згідно безмоментної теорії напружено-деформований стан тонкостінних оболонок визначається тільки тангенціальними зусиллями та параметрами тангенціальної деформації, а внутрішній тиск буде створювати на стінки труб кільцеві та повздожні напруження (рис.6).

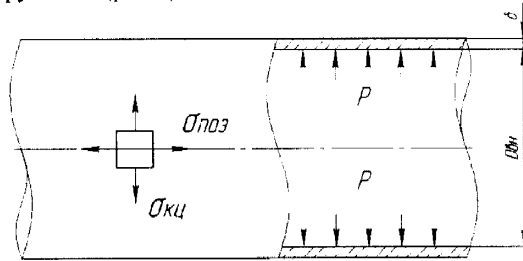


Рисунок 6 – Схема навантаження циліндричної тонкостінної оболонки внутрішнім тиском

При навантаженні труб ПМТП внутрішнім тиском максимальні кільцеві та повздожні напруження визначаються як:

$$\sigma_{\text{ки}} = \frac{p \cdot R}{\delta}, \quad (1)$$

$$\sigma_{\text{пов}} = \frac{p \cdot R}{2 \cdot \delta}. \quad (2)$$

де  $p$  – тиск в трубопроводі, МПа;  $R$  – внутрішній радіус труби, мм;  $\delta$  – товщина стінки труби, мм.

Із наведених формул встановлено, що повздожні напруження будуть у два рази менші від кільцевих та ніякої небезпеки при експлуатації даних труб не складатимуть. Тому у дослідженнях надалі враховувались тільки кільцеві (тангенціальні) напруження.

Максимальний тиск визначався з умови, що еквівалентні напруження забезпечували пружно-пластичну деформацію матеріалу, яка виникає при напруженнях  $(0,9 \dots 1) \sigma_T$ :

$$p = \frac{2 \cdot \varphi \cdot \delta}{D + \delta} \cdot 0,9 \cdot \sigma_T, \quad (3)$$

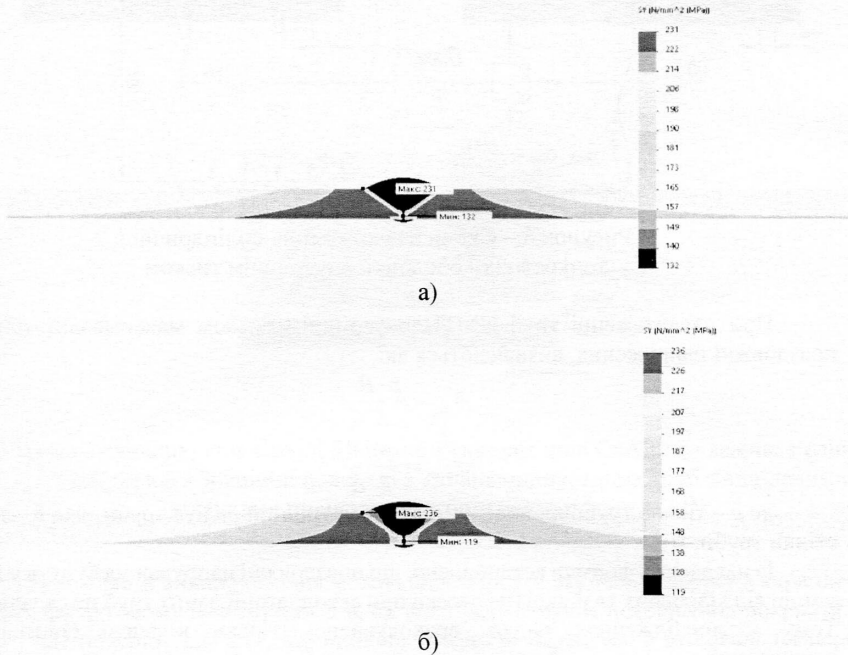
де  $\delta$  – товщина стінки труб, мм;  $\varphi$  – коефіцієнт міцності паяного шва;  $D$  – внутрішній діаметр труб, мм;  $\sigma_T$  – межа плинності сталі ( $\sigma_T = 265$  МПа для сталі 16ГС, за довідниковими даними).

Розрахований за формулою (3) максимальний тиск для труб ПМТП-150 склав 9 МПа, що також відповідає максимальному випробувальному тиску для даних трубопроводів.

З метою прогнозування міцності паяних з'єднань труб ПМТП-150 при навантаженні внутрішнім тиском застосовано імітаційне моделювання.

Для достовірності результатів моделювання з експериментальними даними, моделі з'єднань виконувались за розмірами реальних з'єднань. Для цього було виготовлено дуговим паянням макрошліфи з'єднань, за якими вимірювались геометричні розміри швів і було побудовано тримірну модель паяних з'єднань труб, в якій матеріалом труб застосовано низьколеговану сталь марки І6ГС, а матеріалом паяних швів - сплави CuSi3 та CuAl8.

У результаті моделювання навантаження та розв'язання механічної задачі отримано напружено-деформований стан дуго-паяних з'єднань (рис. 7).



а) - матеріал шва CuAl8; б) - матеріал шва- CuSi3

Рисунок 7 – Епюри розподілу кільцевих напружень в перерізі паяних з'єднань при навантаженні внутрішнім тиском 9МПа

За результатами імітаційного моделювання встановлено, що максимальна величина кільцевих напружень на верхній кромці стінки труби становить 231МПа та 236 МПа для з'єднань з матеріалом шва CuAl8 та CuSi3 відповідно, що на 21-26 МПа перевищує максимальні кільцеві напруження в трубі.

Відповідно при такому розподілі кільцевих напружень руйнування обох з'єднань відбувається в місці найбільшої їх концентрації, що також підтверджується експериментальними дослідженнями при руйнуванні зразків випробуванням на розтяг (рис. 8).



Рисунок 8 – Руйнування зразка

Проведені дослідження свідчать, що така геометрія швів не забезпечує відповідної міцності з'єднань. Для того, щоб зменшити максимальну величину кільцевих напружень та позбутися їх концентрації поблизу шва, слід змінити геометрію шва та, відповідно форму оброблення кромки труб. Це дасть змогу збільшити коефіцієнт запасу міцності паяних з'єднань та термін їх експлуатації.

Міцність паяних з'єднань залежить від сукупності певних факторів, а саме співвідношення механічних властивостей припою та основного металу, конструкції з'єднання та площі поперечного перерізу швів, а також міцності зв'язку між припоєм та основним металом. Якщо міцність припою є нижчою від міцності основного металу, то досягти рівномірності з'єднання можна, змінивши конструкцію з'єднання та площу поперечного перерізу шва.

Під дією внутрішнього тиску концентрація напружень на зовнішній стороні стінки труби біля зварного шва є найбільш небезпечною, тому було змінено форму кромки труб. Для пошуку найбільш раціональної конструкції кромки труб було проведено оцінку декількох варіантів конструкції з вибором найбільш оптимальної. Це завдання вирішено за допомогою засобів моделювання Solid Works шляхом параметричної оптимізації.

Виходячи з конструктивних та технологічних міркувань, для параметричної оптимізації побудовано керований ескіз, що лежить в основі побудови тримірної моделі елементів паяного з'єднання труб. У результаті підготовки вхідних даних для процесу оптимізації моделі елементів паяного з'єднання труб отримано 81 можливий сценарій (варіант) його конструктивних елементів.

Згідно з отриманими результатами дослідження елементів паяного з'єднання труб оптимальною є форма кромки з розмірами, вказаними на рис. 9.

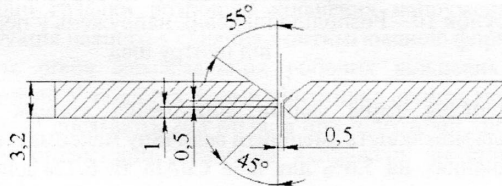
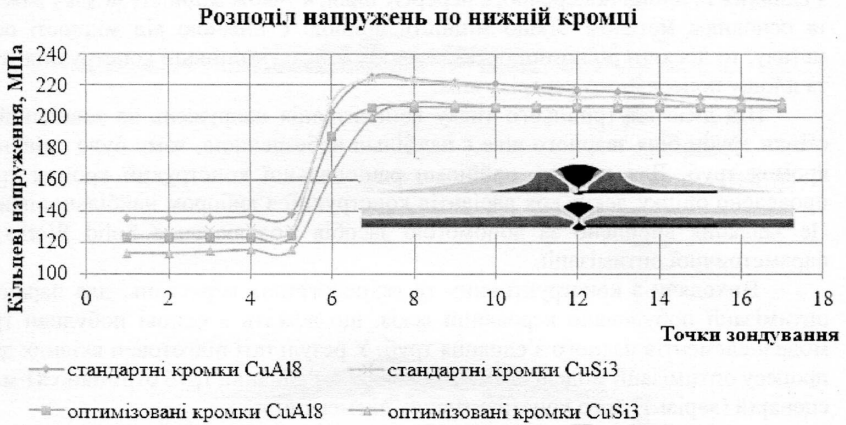


Рисунок 9 – Конструктивні розміри підготовки кромки за результатами оптимізації

Для запропонованої форми кромки було проведено моделювання навантаження та розв'язання механічної задачі. За отриманими результатами побудовано графіки розподілу кільцевих напружень у перерізі паяних з'єднань із стандартною та оптимізованою формою кромки (рис. 10).



Запропонована зміна форми оброблення кромки шляхом параметричної оптимізації дала можливість зменшити величину максимальних кільцевих напружень у паяних з'єднаннях на 5,6% для шва CuAl8 та 6,7% для CuSi3. Також змінився перерозподіл напружень у перерізі з'єднань, а саме: концентрація максимальних кільцевих напружень. В оптимізованому з'єднанні максимальні кільцеві напруження є рівномірно розподіленими по нижній кромці труб, що дасть змогу збільшити термін їхньої експлуатації.

Для комплексної оцінки напружено-деформованого стану паяних з'єднань труб ПМТП-150 та для перевірки правильності результатів імітаційного моделювання проведено експериментальні дослідження на дослідному стенді за методикою, викладеною у розділі 2.



При випробуванні досліджувані зразки ступінчасто навантажували внутрішнім тиском з кроком 1 МПа до досягнення тиску 9 МПа, що перевищує робочий тиск у трубопроводі ПМТП-150 в 1,5 рази.

Опрацювавши отримані числові дані з реєструючого комплексу «SPIDER-8», побудовано графік розподілу кільцевих напружень у навколошовній зоні зварного та паяних з'єднань труб при величині внутрішнього тиску 9 МПа (рис. 11).

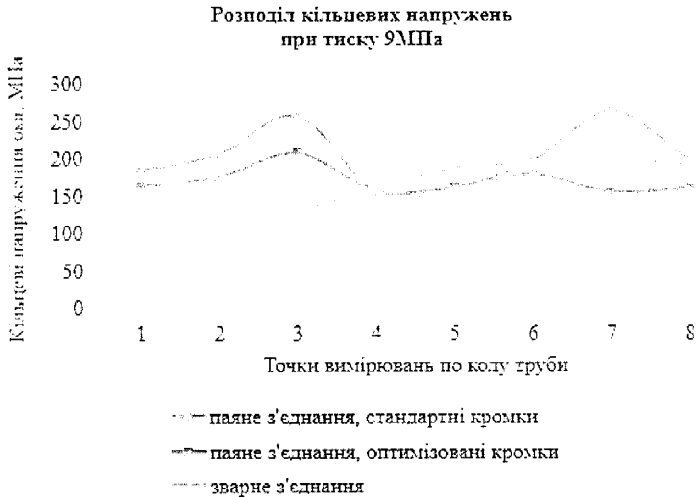


Рисунок 11 – Розподіл кільцевих напружень по зовнішній стінці труби при навантаженні внутрішнім тиском

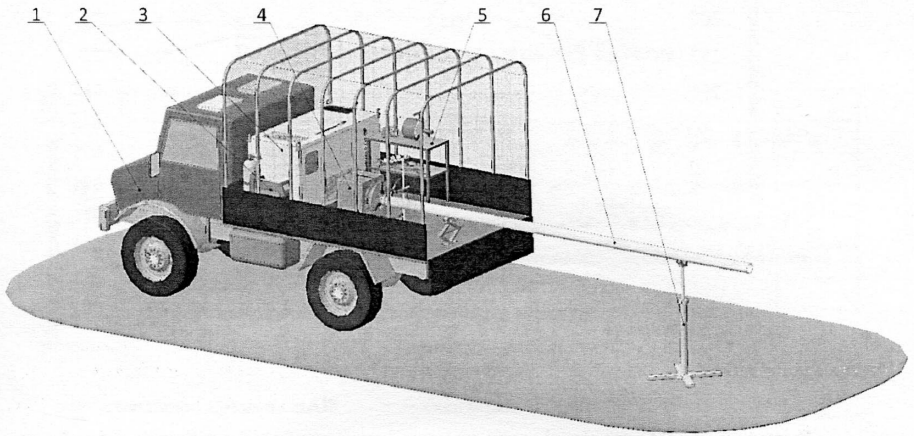
Проаналізувавши графіки розподілу кільцевих напружень, можна зробити висновок, що конструкція паяного з'єднання з оптимізованою формою кромок дійсно забезпечує зниження рівня максимальних робочих кільцевих напружень. При використанні стандартної V-подібної форми підготовки кромок максимальні кільцеві напруження у з'єднанні досягають 263 МПа, а при підготовці кромок за розмірами, отриманими шляхом оптимізації, величина напружень знизилась до 208 МПа. Різниця складає 21%.

Підсумовуючи результати проведених теоретичних та експериментальних досліджень напружено-деформованого стану зварних та паяних з'єднань труб ПМТП-150, можна зробити висновок, що технологія дугового паяння із запропонованою формою підготовки кромок є ефективною. Адже вона забезпечує міцність паяних з'єднань на рівні зі зварними та може бути рекомендованою для реалізації в технологічному процесі ремонту польових магістральних трубопроводів.

У п'ятому розділі на основі отриманих експериментальних даних удосконалено схему технологічного процесу ремонту труб польових магістральних трубопроводів.

В удосконаленому технологічному процесі запропоновано замінити дугове зварювання дуговим паянням. Це дасть змогу забезпечити достатню міцність паяних з'єднань та виключити операцію корозійного захисту швів і прилеглих ділянок дуговою металізацією, а також скоротити час та вартість ремонту.

Також для скорочення часу ремонтних робіт запропоновано проводити ремонт труб ПМТП у польових умовах. Для цього було розроблено пересувний трубо-ремонтний комплекс із сучасним високотехнологічним та компактним обладнанням на базі всюдихідного автомобіля Unimog-4000 (рис. 12).



- 1 – автомобіль Unimog-4000; 2 – зварювальний напівавтомат FRONIUS TPS-270i;  
 3- дизельний генератор Dagakrian DJ 17CP; 4 – поворотний стіл FRONIUS AKE 50-  
 150 HS125/H/V; 5 – стелаж із допоміжним обладнанням; 6 – труба ПМТП;  
 7 – роликів опора

Рисунок 12 – Пересувний трубо-ремонтний комплекс

### ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

На основі проведених досліджень вирішено важливе науково-практичне завдання, яке полягає у встановленні впливу технологічних процесів зварювання і паяння на показники міцності та напружено-деформований стан зварного шва, геометрію та властивості, а також стабільність дугового процесу. Це дало можливість розширити технологічні можливості застосування дугового паяння для ремонту польових магістральних трубопроводів із оцинкованих труб, не використовуючи металізацію шва.

Висновки і практичні результати роботи полягають у наступному.

1. Вперше на основі аналізу проблеми ремонту польових магістральних трубопроводів, виготовлених з труб із захисним цинковим покриттям досліджено особливості дугового зварювання, що дало змогу запропонувати новий концептуальний підхід до технології ремонту на основі дугового паяння.

2. Показано, що використання дугового паяння для ремонту польових магістральних трубопроводів із захисним цинковим покриттям, розрахованих на робочий тиск 6,0 МПа, дало змогу отримати якісне з'єднання. Встановлено, що використання присадкового матеріалу зі сплаву на основі міді забезпечує рівень кільцевих напружень у межах 208 МПа при максимально допустимому тиску 9,0 МПа.

3. Встановлено, що при дуговому паянні, завдяки меншому тепловому навантаженню на зварний шов, не відбувається руйнування заводського цинкового покриття, а механічні властивості паяних з'єднань труб є рівномірними з основним металом.

4. Доведено, що для зменшення рівня залишкових напружень у стикових паяних з'єднаннях оцинкованих труб, раціональною є форма оброблення кромки, встановлена шляхом параметричної оптимізації, що зменшує рівень залишкових напружень на 21% порівняно зі стандартним V – подібним обробленням кромки.

5. Для підвищення ефективності та мобільності ремонту польових магістральних трубопроводів у трасових умовах спроектовано мобільний пересувний трубо-ремонтний комплекс із сучасним обладнанням, що дасть змогу швидко виконувати ремонтні роботи в будь-яких інженерно-геологічних та природно-кліматичних умовах. Результати виконаних досліджень і розробок запропоновані для впровадження у виробництво у вигляді удосконаленої технології виготовлення та ремонту польових магістральних трубопроводів на ДП «ІФНТУНГ котельно-зварювальний завод».

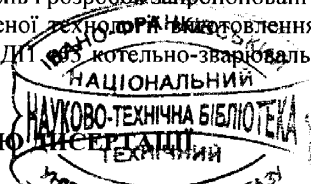
## СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Шлапак Л. С., Панчук М. В., Матвієнків О. М., та ін. Сучасні технології зварювання магістральних трубопроводів. *Науковий вісник ІФНТУНГ*. Івано-Франківськ. 2011. № 3 (29). С. 24–29.

2. Матвієнків О. М. Приварювання манжетів та розтрубів ПМТП-150 дугоконтактним зварюванням з магнітним керуванням дуги. *Вісник Донбаської державної машинобудівної академії*. Краматорськ. 2012. № 3 (28). С. 203–206.

3. Matviienkiv O., Prysyzhnyuk P., Myndiuk V. Development of the zinc coating pipe connection technology with arc soldering method using. *Eastern-European of Enterprise Technologies*. 2016. Vol. 81. № 3/5. P. 51–54. (включено до баз: **Scopus**, **Index Copernicus**)

4. Матвієнків О. М. Удосконалення технології виготовлення та ремонту збірно-розбірних трубопроводів. *Технологический аудит и резервы производства*. 2016. № 4/1(30). С. 4–8. (включено до бази: **Index Copernicus**)



5. Матвієнків О. М. Збереження захисного покриття при з'єднанні оцинкованих труб дуговим паянням. *Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ*. Івано-Франківськ. 2016. № 4 (61). С. 7–13.

6. Матвієнків О. М., Шлапак Л.С. Вплив підготовки кромок на напружено-деформований стан паяних з'єднань оцинкованих труб польових магістральних трубопроводів. *Науковий вісник ІФНТУНГ*. Івано-Франківськ. 2017. № 1 (42). С. 80-87.

7. Матвієнків О. М. Ремонт польових магістральних трубопроводів ПМТП пресовим зварюванням з магнітним керуванням дуги. *Проблеми і перспективи транспортування нафти і газу: матеріали міжнародної науково-практичної конференції*, (Івано-Франківськ, 15-18 травня 2012р.). Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2012. С. 221-223.

8. Матвієнків О. М., Шлапак Л.С. Приварювання манжетів до труб ПМТП-100, 150 дугоконтактним зварюванням з магнітним керуванням дуги. *Сварочное производство в машиностроении: перспективы развития: материалы третьей международной научно-технической конференции* (Краматорск, 2-5 октября 2012г.). Краматорск: ДГМА, 2012. С. 93-94.

9. Матвієнків О. М., Шлапак Л.С. Застосування MIG-паяння для з'єднання оцинкованих труб. *Машины, оборудования и материалы для наращивания вітчизняного видобутку та диверсифікації постачання нафти і газу: матеріали міжнародної науково-технічної конференції* (Івано-Франківськ, 16-20 травня 2016р.). Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2016. С. 234–236.

10. Матвієнків О. М., Шлапак Л.С. Дослідження механічних властивостей паяно-зварних з'єднань труб із цинковим покриттям. *Сварка и родственные технологии: перспективы развития: материалы IV международной научно-технической конференции* (Краматорск, 04-07 октября 2016 г.). Краматорск: ДГМА, 2016. С. 111-112.

11. Матвієнків О.М. Вплив форми кромок на напружено-деформований стан дуго-паяних з'єднань оцинкованих труб. Збірник тез доповідей XI всеукраїнської науково-практичної конференції студентів, аспірантів та молодих учених «Підвищення надійності машин і обладнання» (Кропивницький, 20-21 квітня 2017р.). Кропивницький: ЦНТУ, 2017. С. 49-52.

## АНОТАЦІЯ

**Матвієнків О.М. Удосконалення технології ремонту польових магістральних трубопроводів.** – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.15.13 – Трубопровідний транспорт, нафтогазосховища. – Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу. – Івано-Франківськ, 2017.

Дисертацію присвячено удосконаленню технології ремонту польових магістральних трубопроводів із застосуванням дугового паяння як альтернативи дуговому зварюванню для приєднання розтрубних елементів до труби.

Експериментальними дослідженнями встановлено, що при дуговому паянні труб ПМТП-150 з використанням присадкових матеріалів на основі міді забезпечується достатня міцність з'єднань та корозійна стійкість металу шва, а руйнування захисного цинкового покриття в прилеглих до шва ділянках є незначним та підпадає під дію анодного захисту.

Досліджено напружено-деформований стан паяних з'єднань труб ПМТП-150 при навантаженні внутрішнім тиском та визначено раціональну форму оброблення кромки, що дозволить зменшити величину кільцевих напружень у перехідній ділянці між швом і основним металом до 21%.

Розроблено нову технологічну схему ремонту труб та спроектовано пересувний трубо-ремонтний комплекс, що дозволить скоротити витрати та час ремонту.

**Ключові слова:** польовий магістральний трубопровід, дугове паяння, тепловий вплив, захисне покриття, корозійна стійкість, напружено-деформований стан, оптимізація, форма кромки.

## АННОТАЦИЯ

**Матвиенкив О.М. Усовершенствование технологии ремонта полевых магистральных трубопроводов.** – Рукопись.

Диссертация на соискание научной степени кандидата технических наук за специальностью 05.15.13 – Трубопроводный транспорт, нефтегазохранилища. – Ивано-Франковский национальный технический университет нефти и газа. – Ивано-Франковск, 2017.

Диссертацию посвящено усовершенствованию технологии ремонта полевых магистральных трубопроводов с применением дуговой пайки как альтернативы дуговой сварки для присоединения раструбных элементов к трубе.

Проведенный анализ проблем эксплуатации труб полевых магистральных трубопроводов (ПМТП) показал, что чаще всего при эксплуатации и монтаже повреждаются раструбные элементы труб, поэтому возникает проблема их замены. Существующая технология присоединения раструбных элементов к трубе не может обеспечить целостность защитного цинкового покрытия та коррозионную стойкость шва, поэтому альтернативой может стать дуговая пайка.

Исследованиями механических свойств сварных и паяных соединений труб ПМТП-150 установлено, что прочность соединений, выполненных дуговой пайкой, есть на уровне основного металла и зависит от формы разделки кромки.

Установлено закономерности влияния температурного цикла сварки и пайки на характер повреждения защитного цинкового покрытия. Доказано, что при дуговой пайке труб ПМТП-150 с использованием присадочных материалов из сплавов на основе меди обеспечивается коррозионная стойкость металла шва, а разрушение защитного цинкового покрытия в прилегающих ко шву участкам незначительно и подпадает под действие анодной защиты.

Имитационное моделирование напряженно-деформированного состояния паяных соединений труб ПМТП-150 при нагрузке внутренним давлением показало концентрацию напряжений между швом и основным металлом. Параметрической

оптимизацией определено оптимальную форму разделки кромок, что позволит уменьшить величину напряжений и изменить их перераспределение.

Проведенные экспериментальные исследования напряженно-деформированного состояния паяных соединений труб подтвердили, что за счет изменения формы разделки кромок максимальная величина кольцевых напряжений уменьшилась на 21%. Данные исследования также показали высокую достоверность моделей: на уровне 93-95%.

Разработана новая технологическая схема ремонта труб полевых магистральных трубопроводов дуговой пайкой с использованием присадочных материалов на основе меди и оптимальной формой разделки кромок. Главными преимуществами предложенной технологии является обеспечение коррозионной стойкости шва и прилегающих участков, что позволит сократить время и стоимость ремонта.

Спроектирован передвижной труборемонтный комплекс на базе вездеходного автомобиля с современным высокотехнологичным и компактным оборудованием для проведения ремонтных работ в полевых условиях.

**Ключевые слова:** полевой магистральный трубопровод, дуговая пайка, тепловое воздействие, защитное покрытие, коррозионная стойкость, напряженно-деформированное состояние, оптимизация, форма кромок.

## SUMMARY

**Matviienkiv O.M. Repair technology improvement for field main pipelines. – Manuscript.**

Dissertation thesis for the degree of the Candidate of Technical Sciences in 05.15.13 – Pipeline Transport, Oil and Gas Storages. – Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas. – Ivano-Frankivsk, 2017.

The thesis deals with the repair technology improvement for field main pipelines by means of arc brazing as an alternative to arc welding for joining sockets and the pipe.

The experimental investigations have shown that in case of arc brazing of PMTP-150 pipes with the use of copper-based fillers the joint strength is equal to the strength of the base metal, the corrosion resistance of joint metal is ensured, there is the minor destruction of zinc coating in the areas adjacent to the joint, which is anodically protected.

The stress and strain state of brazed joints of PMTP-150 pipes has been studied with internal pressure load, the rational form of grooving has been defined, which will help to reduce the circular stress by 21% in the transition area between joint and base metal.

The new pipe repair flow chart has been developed, the mobile pipe repair complex has been designed, which will help to reduce expenses and repair time.

**Key words:** field main pipeline, arc brazing, heat effect, protective coating, corrosion resistance, stress and strain state, optimization, form of grooving.