

Івано–Франківський національний технічний університет нафти і газу

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

Матвієнків Олег Михайлович

УДК:622.692.4

ДИСЕРТАЦІЯ
УДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ РЕМОНТУ
ПОЛЬОВИХ МАГІСТРАЛЬНИХ ТРУБОПРОВІДІВ

05.15.13 – Трубопровідний транспорт, нафтогазосховища

Дисертація подається на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук.
Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей,
результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

_____ О.М. Матвієнків

Науковий керівник: Шлапак Любомир Степанович доктор технічних наук,
професор

Івано-Франківськ – 2017

АНОТАЦІЯ

Матвієнків О.М. Удосконалення технології ремонту польових магістральних трубопроводів. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук (доктора філософії) 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 зі збереженням цілісності захисного цинкового покриття.

Проведений аналіз проблем ремонту польових магістральних трубопроводів (ПМТП) свідчить, що найчастіше при їх експлуатації та монтажі пошкоджуються розтрубні елементи труб, що вимагає їх заміни як в польових так і трасових умовах. Існуюча технологія ремонту польових магістральних трубопроводів для приєднання розтрубних елементів до труби передбачає застосування дугового зварювання в середовищі захисних газів. Оскільки труби та розтрубні елементи даних трубопроводів для захисту їх від корозії покриті захисним цинковим покриттям, то під час приварювання розтрубних елементів до труби цинкове захисне покриття вигорає, що додатково вимагає проведення металізації цинком як самого зварного шва, так і зони термічного впливу.

На основі проведеного аналізу для ремонту польових магістральних трубопроводів запропоновано застосувати дугове паяння як альтернативу дуговому зварюванню. Це дасть змогу забезпечити корозійну стійкість швів та прилеглих до них ділянок, а також виключити із технологічного процесу трудомістку операцію дугової металізації зварних швів.

Технологія дугового паяння є відносно новою та недостатньо вивченою стосовно ремонту трубопроводів, що працюють під тиском до 7,0 МПа. Зокрема

дослідження потребують питання напружено-деформованого стану, механічних властивостей та структурних змін паяних з'єднань.

Для контролю зміни механічних властивостей, а також структурних перетворень у процесі дугового паяння та зварювання в даній роботі проводились такі дослідження та випробування: аналіз макроструктури та мікроструктури паяних з'єднань; визначення мікротвердості та твердості в перерізі паяних з'єднань; випробування зразків паяних з'єднань на розтяг; дослідження корозійної стійкості паяних з'єднань за розподілом температури в перерізі з'єднань та визначенні ширини ділянок пошкодженого покриття; теоретичні та експериментальні дослідження напружено-деформованого стану паяних з'єднань труб.

Дослідженням механічних властивостей зварних та паяних з'єднань труб ПМТП-150 встановлено, 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. Конструктивними факторами є форма оброблення кромки, величина зазору та розміри і форма паяного шва (ширина та висота його випуклості).

Встановлено, що міцність паяних з'єднань є практично на рівні основного металу та залежить від форми підготовки кромки. Так міцність зразків з обробленням кромки V – подібним є на 50% більшою від зразків з прямими кромками.

Досліджено закономірності впливу температурного циклу зварювання та паяння на характер пошкодження захисного цинкового покриття. Доведено, що при дуговому паянні труб ПМТП-150 з використанням присадкових матеріалів на основі міді забезпечується корозійна стійкість металу шва, а руйнування захисного цинкового покриття в прилеглих до шва ділянках є незначним та підпадає під дію анодного захисту.

З метою прогнозування міцності паяних з'єднань труб ПМТП-150 при навантаженні внутрішнім тиском проведено дослідження їх напружено-деформованого стану імітаційним моделюванням.

За результатами імітаційного моделювання встановлено, що на верхній стінці труби між швом та основним металом виникає небезпечна концентрація кільцевих напружень, які на 21-26 МПа перевищують максимальні кільцеві напруження в трубі. Проаналізувавши проведені дослідження необхідно зауважити, що для зменшення величини кільцевих напружень та зміни їх концентрації поблизу шва слід змінити геометрію шва та, відповідно, форму підготовки кромки труб. Це дасть змогу збільшити коефіцієнт запасу міцності паяних з'єднань та термін їх експлуатації.

Для пошуку найбільш раціональної конфігурації кромки труб було вирішено провести оцінку декількох варіантів конструкції з вибором найбільш раціональної шляхом параметричної оптимізації засобами моделювання Solid Works.

Запропонована зміна форми підготовки кромки труб шляхом параметричної оптимізації дасть змогу зменшити величину максимальних кільцевих напружень у паяних з'єднаннях від 5,6% до 6,7%. Також змінився перерозподіл напружень у перерізі з'єднань, тобто концентрація максимальних кільцевих напружень. У паяних з'єднаннях із запропонованою формою підготовки кромки максимальні кільцеві напруження рівномірно розподілились по нижній кромці труб, що дасть можливість збільшити термін їхньої експлуатації.

Для комплексної оцінки міцності та надійності паяних з'єднань труб ПМТП-150, а також для перевірки достовірності результатів імітаційного моделювання проведено експериментальні дослідження їх напружено-деформованого стану. Дані дослідження проводились на спеціально сконструйованому дослідному стенді зі ступінчастим навантаженням трубних зразків внутрішнім тиском з кроком 1,0 МПа до досягнення тиску 9,0 МПа, що перевищує робочий тиск у трубопроводі ПМТП-150 у півтора рази.

Проведені експериментальні дослідження напружено-деформованого стану паяних з'єднань труб свідчать, що запропонована зміна форми підготовки кромки дасть змогу на 21% зменшити максимальну величину кільцевих напружень порівняно зі стандартною V – подібною формою кромки. Дані дослідження також підтвердили високу достовірність результатів імітаційного моделювання - на рівні 93-95%.

За результатами 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 кромки є ефективною. Дана технологія дає змогу забезпечити міцність паяних з'єднань на рівні зі зварними та може бути рекомендованою для реалізації в технологічному процесі ремонту польових магістральних трубопроводів.

На основі результатів проведених досліджень розроблено нову технологічну схему ремонту труб польових магістральних трубопроводів дуговим паянням з використанням присадкових матеріалів на основі міді та спеціальної форми оброблення кромки. Заміна дугового зварювання в новому технологічному процесі дуговим паянням дає можливість забезпечити корозійну стійкість швів та уникнути руйнування цинкового покриття труб і таким чином виключити з технологічного процесу операцію дугової металізації швів.

Запропоноване удосконалення існуючої технології дозволить скоротити час та вартість ремонту польових магістральних трубопроводів.

Для проведення ремонтних робіт на польових магістральних трубопроводах у трасових умовах в даній роботі спроектовано пересувний трубо-ремонтний комплекс на базі всюдихідного автомобіля UNIMOG-4000. Запропоноване оснащення цього комплексу сучасним високотехнологічним та компактним обладнанням забезпечить швидке та якісне проведення ремонтних робіт на даних трубопроводах у польових умовах.

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

SUMMARY

Matviienkiv O.M. Repair technology improvement for field main pipelines. – Manuscript of qualification academic thesis.

Dissertation thesis for the degree of the Candidate of Technical Sciences (PhD) 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 of repair technology improvement for field main pipelines by means of arc brazing, which is used as an alternative to arc welding for joining sockets and the pipe and helps to preserve the integrity of zinc coating.

The performed analysis of the problems related to the repair of field main pipelines (PMTP) has shown that the sockets of pipes are usually damaged in the process of their operation and laying, this requires their replacement in field conditions. The existing repair technology of field main pipelines used to join sockets and pipe requires gas-shielded arc welding. As the pipes and sockets of the pipelines are covered by the rust proofing zinc coating, the zinc coating burns out during welding the sockets to the pipe, this requires additional zinc spraying of the welded joint and heat-affected area.

Based on the performed analysis it has been proposed to use arc brazing as an alternative to arc welding for repairing field main pipelines. It will ensure the corrosion resistance of welded joints and their adjacent areas and also exclude the time-consuming process of arc metal spraying of welded joints from the workflow process.

The technology of arc brazing is relatively new and understudied in the sphere repairing the pipelines, operating under the pressure of up to 7.0 MPa. The stress and strain state, mechanical properties and structural changes of brazed joints require additional investigation.

To control the changes of mechanical properties and structural transformations in the process of arc brazing and welding the following research and tests have been performed: the analysis of macrostructure and microstructure of brazed joints; testing the microhardness and hardness in the section of brazed joints; pull test of the samples of brazed joints; testing the corrosion resistance of brazed joints according to temperature distribution in the section of joints and defining the width of the damaged coating areas; theoretical and experimental studies of the stress and strain state of brazed pipe joints.

The study of mechanical properties of welded and brazed joints of PMTP-150 pipes has shown that the strength of brazed joints generally depends on two factors: technological and design factors. Technological factors are defined by the properties of the arc brazing process, in particular: grade of filler wire; mode parameters; content of protective gas; brazing technique. The design factors include grooving type, gap width, dimensions and form of brazed joints (width and height of their reinforcement).

It has been found out that the strength of brazed joints is almost equal to the strength of base metal. Thus, the strength of samples with V-shaped grooves is 50% higher than the strength of samples with straight edges.

The influence patterns of welding and brazing temperature cycles on the damage degree of zinc coating have been studied. It has been proved that arc brazing of PMTM-150 pipes with the use of copper-based fillers ensures the corrosion resistance of joint metal and minor destruction of zinc coating in the areas adjacent to the joint, which is anodically protected.

To predict the strength of brazed joints of PMTP-150 pipes with internal pressure load their stress and strain state has been studied by means of simulation modeling.

The results of simulation modelling have shown that there appears the dangerous concentration of circumferential stresses between the joint and base metal on the upper pipe wall. The concentration exceeds the maximum circumferential stresses in the pipe by 21-26 MPa. The performed studies have shown that the configuration of joint and form of pipe grooving should be modified to reduce the values of circumferential

stresses and change their concentration near the joint. It will help to increase the resistance coefficient of brazed joints and their service life.

Several structural variants of pipe grooving have been analyzed to find the most rational form. The most optimal variant has been chosen in the process of parametric optimization by Solid Works modeling tools.

The proposed change of pipe grooving form by means of parametric optimization will help to reduce the value of maximum circumferential stresses in brazed joints from 5.6% to 6.7%. It will lead to changes in the redistribution of stresses in the section of joints, namely the concentration of maximum circumferential stresses. In brazed joints with the proposed grooving form the maximum circumferential stresses evenly spread on the lower edge of pipes, which will help to increase their service life.

The experimental studies of the stress and strain state of brazed joints of PMTP-150 pipes have been performed to comprehensively assess their strength and efficiency and to validate the results of simulation modeling. The studies have been performed on the specially designed test facility with the step load of specimen pipes by internal pressure with the step of 1.0 MPa in order to reach the pressure of 9.0 MPa, which exceeds the operating pressure in PMTP-150 pipeline in one-and-a-half times.

The performed experimental studies of the stress and strain state of brazed pipe joints show that the proposed change of the grooving form will help to reduce the maximum value of circumferential stresses by 21% compared to the standard V-shaped grooves. The studies have proved the efficiency of simulation modeling results at the level of 93-95%.

According to the results of the theoretical and experimental studies of the stress and strain state of welded and brazed joints of MPTP-150 pipes the technology of arc brazing with the proposed grooving form turns out to be rational. This technology will ensure the strength of brazed joints equal to welded joints and its use can be recommended in the repair of field main pipelines.

The results of the performed studies have served the basis for developing the new repair flow chart for field main pipelines by arc brazing with the use of copper-

based fillers and special grooving form. The replacement of arc welding in the new technological process by arc brazing will ensure the corrosion resistance of joints, prevent the destruction of zinc pipe coating and therefore exclude the arc metal spraying from the workflow process.

The proposed improvement of the existing technology will allow reducing the expenses and repair time of field main pipelines.

The mobile pipe repair complex installed on the all-terrain vehicle UNIMOG-4000 has been designed to repair field main pipelines in field conditions. The proposed complex with modern high-technology and compact equipment will help to quickly and efficiently repair the pipelines in field conditions.

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

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Публікації в яких опубліковані основні наукові результати 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 кромки на напружено-деформований стан паяних з'єднань оцинкованих труб польових магістральних трубопроводів. *Науковий вісник ІФНТУНГ*. Івано-Франківськ. 2017. № 1 (42). С. 80-87.

Публікації, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

1. 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.

2. 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.

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

4. 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.

5. Матвієнків О.М. Вплив форми кромки 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.

ЗМІСТ

ЗМІСТ

ВСТУП	15
--------------------	----

РОЗДІЛ 1

ЛІТЕРАТУРНИЙ ОГЛЯД	20
---------------------------------	----

1.1 Досвід експлуатації та перспективи застосування польових магістральних трубопроводів	20
---	----

1.2 Характеристики польових магістральних трубопроводів.....	23
--	----

ПМТП-150.....	23
---------------	----

1.3 Збереження захисного покриття при зварюванні оцинкованих труб.....	28
--	----

1.4 Вибір напрямку досліджень.....	47
------------------------------------	----

Список використаних джерел у розділі 1	49
--	----

РОЗДІЛ 2

РОЗРОБКА МЕТОДИК ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ, ПІДГОТОВКА ЗРАЗКІВ ТА ОБЛАДНАННЯ	56
---	----

2.1 Матеріали та натурні зразки зварних з'єднань	56
--	----

2.2 Матеріали для зварювання та дугового паяння.....	58
--	----

2.3 Обладнання та режими дугового паяння та зварювання.....	60
---	----

2.4 Прилади та методи дослідження механічних властивостей зварних з'єднань	63
---	----

2.4.1 Металографічні дослідження.....	63
---------------------------------------	----

2.4.2 Вимірювання мікротвердості.....	68
---------------------------------------	----

2.4.3 Визначення механічних властивостей зварних з'єднань за показником твердості.....	69
---	----

2.4.4 Зразки та обладнання для випробувань на розтяг і згин	71
---	----

2.5 Методика вимірювання напружено-деформованого стану паяних з'єднань труб при навантаженні внутрішнім тиском	73
Висновки до другого розділу	80
Список використаних джерел у розділі 2	81

РОЗДІЛ 3

ДОСЛІДЖЕННЯ МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ТА КОРОЗІЙНОЇ СТІЙКОСТІ ЗВАРНИХ І ПАЯНИХ З'ЄДНАНЬ..... 83

3.1 Металографічні дослідження зварних і паяних з'єднань	83
3.2 Дослідження мікротвердості зварних і паяних з'єднань	86
3.3 Дослідження механічних властивостей зварних і паяних з'єднань	90
3.4 Корозійна стійкість зварних і паяних з'єднань.....	97
Висновки до третього розділу	104
Список використаних джерел у розділі 3	105

РОЗДІЛ 4

ДОСЛІДЖЕННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ

ЗВАРНИХ І ПАЯНИХ З'ЄДНАНЬ ТРУБ ВІД СТАТИЧНОГО НАВАНТАЖЕННЯ ВНУТРІШНІМ ТИСКОМ..... 107

4.1 Аналітичний розрахунок напружень та деформацій.....	107
4.2 Числовий розрахунок напружень та деформацій методом кінцевих елементів	110
4.3 Зменшення величини напружень та перерозподіл їх концентрації шляхом оптимізації форми підготовки кромки.....	117
4.4 Експериментальне дослідження розподілу напружень у стиках паяних з'єднань труб.....	125
Висновки до четвертого розділу.....	130
Список використаних джерел у розділі 4	131

РОЗДІЛ 5

РОЗРОБКА ТЕХНОЛОГІЇ РЕМОНТУ ПОЛЬОВИХ МАГІСТРАЛЬНИХ ТРУБОПРОВОДІВ У ПОЛЬОВИХ УМОВАХ.....	133
5.1 Технологія ремонту польових магістральних трубопроводів.....	133
5.2 Розробка пересувного трубо-ремонтного мобільного комплексу	137
Висновки до п'ятого розділу.....	143
Список використаних джерел у розділі 5	143
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	144
ДОДАТКИ.....	146

ВСТУП

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;
- 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 трубною 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.

- 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.

- 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 %.

- 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.

- 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 методику 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.

Апробація 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 «Машины, 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.

РОЗДІЛ 1

ЛІТЕРАТУРНИЙ ОГЛЯД

1.1 Досвід експлуатації та перспективи застосування польових магістральних трубопроводів

У 1878 році в Росії було споруджено перший збірно-розбірний трубопровід для транспортування гасу за напрямком Баку-Батумі. Цей трубопровід був унікальним на той час, оскільки мав діаметр 200 мм та довжину 883 км. Тільки з 30-х років минулого століття трубопроводи почали будувати з використанням зварювання.[1]

Також збірно-розбірні трубопроводи використовуються у військових цілях. У 1917 році вперше такий трубопровід забезпечував дизельним паливом кораблі військово-морського флоту Великобританії. [2]

У зв'язку з цим у СРСР почались роботи зі створення збірно-розбірних (польових) трубопроводів.

Важливу роль вони відіграли у забезпеченні військ паливом під час Великої Вітчизняної війни, адже мали чисельні переваги над стаціонарними: простота конструкції, невелика вага, можливість багаторазового послідовного використання на різних напрямках.

Однак значний розвиток польових магістральних трубопроводів почався вже у післявоєнний час. Починаючи з 1958 по 1980 роки було розроблено нове покоління польових магістральних трубопроводів ПМТП-100, ПМТП-150 та ПМТБ-200 з продуктивністю перекачування відповідно 70, 200 та 500 метрів кубічних за годину. [2]

Наприклад, технічні можливості металевих збірно-розбірних трубопроводів ПМПТ- 150 при умовному діаметрі 150 мм і робочому тиску 6,0 МПа дозволяють перекачувати до одного мільйона тон нафти (нафтопродуктів) у рік.

Важливу роль відіграли польові магістральні трубопроводи і під час бойових дій в Афганістані, де війська були розосереджені по всій країні, тому виникла гостра потреба у доставленні пального. Для вирішення даної проблеми було розгорнуто 1200 км польових магістральних трубопроводів. [3,4].

Польові магістральні трубопроводи широко застосовуються і закордоном. Зокрема, як зазначав у своїй роботі автор [5] військові аналітики країн НАТО наголошують на головній ролі польових магістральних трубопроводів для забезпечення паливом групи військ у різних місцях бойових дій. Прикладом є використання трубопроводів при проведенні військової операції «Буря в пустелі», де спільними зусиллями армій США та Великобританії було прокладено 410,6 км трубопроводів.

Важливими виявилися польові магістральні трубопроводи і при ліквідації наслідків техногенних катастроф та наслідків стихійних лих. Зокрема, при ліквідації наслідків аварії на ЧАЕС [4] для роботи бетонного заводу та пунктів спеціальної обробки по трубопроводах транспортувалось 3,5-4 тис. кубічних метрів води щоденно.

У зв'язку із загрозою виникнення надзвичайної ситуації через сильні ливневі дощі у весняно-літній період 2001-2005 років, виникла проблема відведення фільтрату з полігону побутових відходів Івано-Франківського міського сміттєзвалища в с. Рибне. Для уникнення катастрофи міська влада та керівництво Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу вирішило розгорнути 14 км польового трубопроводу. Провівши відповідні розрахунки [6], було розроблено документацію та в короткі терміни розгорнуто трубопровід ПМТП-150, за допомогою якого протягом 3-4 місяців було скинуто 45-50 тис. м³ фільтрату, для вивозу якого автомобільним транспортом потрібно було б 2 роки[7].

Польові трубопроводи також використовують і в різних галузях народного господарства. За даними, наведеними в роботі [8] у 1996 році, було змонтовано трубопровід ПМТП-150, «Талаганское ГНМ-Вітім» (Якутія, Росія) довжиною 110 км для перекачування нафти від родовища до нафтозховищ. За

десять років експлуатації трубопроводу об'єм перекачаної нафти склав 254 тисячі тон.

Після анексії Криму Росією на півострові виникла проблема постачання питної води, яка раніше надходила з території України. Тому було прийнято рішення розгорнути 24 лінії польових магістральних трубопроводів, загальною довжиною 124 км [9].

З'єднання трубопровідного устаткування польових магістральних трубопроводів відрізняються надійністю, швидкістю і простотою монтажу. Крім того, спеціальної траси для трубопроводу також не потрібно, оскільки труби кладуть на колоди в будь-яку пору року і незалежно від погодних умов. Швидкість монтажу складає декілька кілометрів за добу, а розмір капіталовкладень порівняно з стаціонарним трубопроводом є меншим у 3-10 разів (залежно від кліматичних умов). Відсутність земляних робіт здешевлює не лише економіку проекту, але і дозволяє дотримуватися найжорсткіших екологічних вимог. Ширина просіки для таких трубопроводів складає всього 10 метрів (п'ятдесят для стаціонарних).

Фахівці називають наступні переваги металевих збірно-розбірних трубопроводів ПМТП- 150 і ПМТ- 150, що обумовлюють ефективність їх застосування у нафтогазовій галузі при освоєнні малих і середніх родовищ:

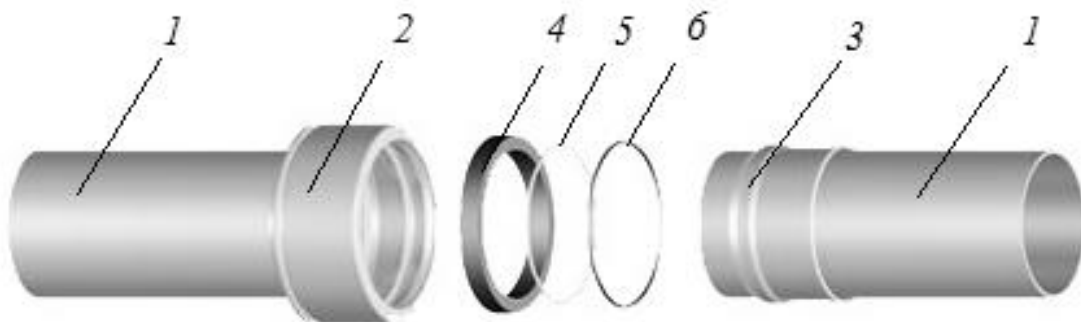
- високі темпи спорудження лінійної частини при відносно невеликих об'ємах трудовитрат;
- здатність до прокладення і експлуатації в будь-яких природно-кліматичних умовах, на місцевості з рельєфом різної складності, при мінімальному об'ємі проектно-дослідницьких та інженерних робіт, внаслідок чого до мінімуму знижується шкідлива дія будівництва на довкілля;
- наявність високоефективної і низьковитратної технології спорудження, простота підготовки обслуговуючого персоналу;
- автономність експлуатації незалежно від наявності зовнішніх джерел енергопостачання;
- висока надійність і екологічна безпека;

- модульність конструкції, можливість спорудження трубопровідних ліній різної протяжності, а також цілих трубопровідних систем різного зображення;
- низька собівартість транспортування та інші.

Враховуючи наведене, можна стверджувати, що польові трубопроводи вигідно застосовувати для систем снігоутворення, зрошення, водопостачання, пожежогасіння, відведення промислових стоків, фільтрату та інших рідин, технічного прикриття стаціонарних трубопроводів. А також під час ліквідації наслідків стихійних лих, лісових пожеж і загорянні торф'яників, забезпечення невідкладних зрошувальних робіт при засухах, відновлення водопостачання населених пунктів у зонах масових руйнувань та пожеж.

1.2 Характеристики польових магістральних трубопроводів ПМТП-150

Для з'єднання трубопроводів ПМТП-150 використовуються розтрубні з'єднання, які виконуються згідно ГОСТ 20772-81 [10] і складаються із металевої манжети та розтруба, приварених до відповідних кінців труб та трубних виробів (рис. 1.1) [11].



1 – труба; 2 – розтруб; 3 – манжета; 4 – пористе гумове кільце; 5 – металеве фіксує кільце; 6 – гумове ущільнює кільце

Рисунок 1.1 – З'єднання трубопроводу ПМТП-150

До складу конструкції з'єднання труб та трубних виробів також входять: гумове ущільнююче кільце, запірне кільце та гумова мікропориста підкладка[11]. Така конструкція з'єднання забезпечує:

- герметичність з'єднання при тиску в трубопроводі в межах від 0 до 10 МПа (98,1 кгс/см²) та вакуум до 0,068 МПа (500 мм. водяного стовпчика);
- кутову (1,3-2,0 градуси) та осьову (5-7мм) рухомість у кожному з'єднанні без порушення герметичності;
- осьове зусилля такого з'єднання на розтяг до 100 000 кгс.

Герметичність з'єднання забезпечує гумове ущільнююче кільце, яке після встановлення в розтруб при збиранні з натягом надівається на манжету. Його конструкція є такою, що при зростанні внутрішнього тиску в трубопроводі рідина, яка транспортується, підсилює вплив на внутрішню площину кільця, тим самим щільніше притискає його ущільнюючі пояски до манжет та розтрубу, забезпечуючи принцип «самоущільнення». Запірне кільце забезпечує запирання манжети в розтрубі і таким чином досягається осьова міцність з'єднання. Мікропориста гумова підкладка встановлюється під запірним кільцем, забезпечуючи тим самим співвісність запірного кільця стосовно розтруба та одночасно захищає з'єднання від попадання в його порожнину забруднень.

Основні технічні характеристики та параметри трубопроводу ПМТП-150 вказані в таблиці 1.1 [12].

Труби польових магістральних трубопроводів виготовляються з електрозварних труб (ГОСТ 10704-91), до яких з одного кінця приварюються сталеві манжети, а з другого - розтруби. Для захисту від корозії заводи-виробники виготовляють труби та трубні елементи трубопроводів ПМТП-150 з двостороннім цинковим покриттям товщиною 30 мкм, що наноситься методом гарячого цинкування за вимогами ГОСТ 9.307-89, гарантуючи їх експлуатацію протягом сімдесяти років.

Таблиця 1.1- Основні технічні характеристики і параметри трубопроводу ПМТП- 150

Параметр	Значення
Внутрішній діаметр, мм	145,6
Зовнішній діаметр, мм	152,0
Товщина стінки, мм	3,2
Маса однієї труби (6000 мм), кг	80,9
Робочий тиск, МПа	6,0
Випробувальний тиск, МПа	9,5
Тиск на розрив (руйнування), МПа	24,0
Межа текучості, не менше кг/мм ²	33
Ударна в'язкість не менше, кгс/см ² (при $t = -60^{\circ}\text{C}$)	3
Тимчасовий опір розриву, не менше кгс/мм ²	48
Рухливість: - кутова, градуси - осьова, мм	1,3...2,0 5...7
Пропускна спроможність, м ³ /доба	3000
Марка сталі	16ГС

Згідно технічних умов на робочих поверхнях манжети та розтруба (місця контакту гумового ущільнюючого кільця в процесі його монтажу та експлуатаційного положення) не допускається наявність дефектів будь-яких розмірів. На тілі труби та трубних виробів допускається не більше однієї вм'ятини глибиною не більше 2 мм та інші незначні дефекти, які не виходять за межі допуску на товщину стінки труби та знаходяться на відстані не менше 100 мм від повздовжнього та кільцевого шва.

В інструкції [12] зазначається, що під час експлуатації трубопроводів у військових діях можуть виникати наступні дефекти:

- 1) витікання палива через дрібні радіальні тріщини труб;

2) витікання палива через односторонні або наскрізні кульові осколкові пробоїни;

3) деформація або розрив тіла труби через наїзд на трубопровід гусеничних машин;

4) розрив труби по кільцевому зварному шву в місцях приварювання розтруба або манжета;

5) поломка ділянки трубопроводу внаслідок розірвання бомб, гранат, снарядів, та ін.;

б) розрив труби по повздовжньому зварному шву.

Пошкодження манжети або розтруба унеможлиблює експлуатацію таких труб.

Як показує аналіз, під час експлуатації на манжетах та розтрубах труб досить часто виникають різного роду дефекти, оскільки дані труби за період експлуатації багато разів збирають та розбирають. У даний час на військових складах накопичилась значна кількість труб з пошкодженими манжетами або розтрубами (рис. 1.2).



Рисунок 1.2 – Труби з пошкодженими манжетами та розтрубами

Відрізання пошкоджених манжетів або розтрубів, та приварювання нових дозволить продовжити експлуатацію труб та дасть можливість в майбутньому застосовувати їх для потреб народного господарства.

В Україні єдиним підприємством з виготовлення та ремонту польових магістральних трубопроводів є ДП «63-котельно-зварювальний завод» м. Івано-Франківськ.

На даному підприємстві ремонт труб ПМТ проводять за такою технологічною схемою:

- 1) відрізають пошкоджену частину труби (манжета або розтруба);
- 2) зачищають цинкове покриття труби в місці зварювання на 15-20 мм від краю труби;
- 3) складають та фіксують замінену частину з тілом труби;
- 4) приварюють замінену частину до труби дуговим зварюванням у середовищі вуглекислого газу;
- 5) контролюють зварний шов та випробовують труби гідравлічно;
- б) наносять захисне цинкове покриття на зварний шов та прилеглі до шва ділянки методом дугової металізації.

Проблеми ремонту труб ПМТП досліджували спільно Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу та ДП «63 - котельно-зварювальний завод». Зокрема, для збільшення продуктивності процесу та скорочення часу ремонту для приварювання манжетів та розтрубів до труби було запропоновано застосувати технологію дугоконтактного зварювання з магнітним керуванням дуги [13,14,15]. Враховуючи особливості форми приварюваних розтрубів та манжетів, а також можливості їх фіксування в зварювальній машині, було розроблено спеціалізовану експериментально-промислову установку для приварювання манжетів та розтрубів до труб ПМТП-150.

Застосування дугоконтактного зварювання з магнітним керуванням дуги для приварювання манжетів та розтрубів до труби має вагомні переваги порівняно з дуговим зварюванням у захисних газах:

- висока продуктивність зварювання за рахунок великої швидкості обертання дуги та швидкого розігріву зварюваних кромок;
- відсутність зварюваних матеріалів на відміну від дугових способів зварювання;
- мале споживання електроенергії порівняно зі стиковим зварюванням оплавленням;
- можливість повної автоматизації процесу зварювання;
- немає необхідності залучення зварників високої кваліфікації;
- зварні з'єднання виконані даним способом відрізняються високою якістю та стабільними механічними властивостями.

Проте заміна дугового зварювання дугоконтактним в технологічному процесі ремонту труб ПМТП не вирішує проблеми забезпечення корозійної стійкості швів та збереження захисного покриття в прилеглих до шва ділянках.

1.3 Збереження захисного покриття при зварюванні оцинкованих труб

Застосування цинкового покриття для захисту зварних конструкцій і трубопроводів від корозії є одним із найоптимальніших завдяки своїй економічності та екологічності.

Цинкові покриття мають більш від'ємний електричний потенціал, ніж залізо (на 0,2-0,3 В), а сам цинк при впливі агресивного середовища повільно розчиняється за рахунок електрохімічних реакцій, захищаючи тим самим феритну підкладку.[16]

Цинкові покриття металургійно зв'язані зі сталеву поверхнею, а за рахунок більш від'ємного потенціалу будуть захищати сталь від корозії до тих пір, поки залишається певна кількість цинку. Рівень корозії оцинкованих покриттів є лінійним, а довговічність існування покриття визначається його товщиною.

Ще однією із суттєвих переваг цинкового покриття є те, що при незначних механічних пошкодженнях (подряпини, удари) цинкове покриття може

самовідновлюватись на пошкоджених ділянках завдяки щільній оксидній плівці. Оскільки цинк є більш активним металом, ніж підкладний метал, то він першим вступає в реакцію із зовнішнім середовищем і в процесі взаємодії на поверхні цинку утворюється щільна оксидна плівка, яка попереджує подальшу корозію.

Важливою проблемою є зварювання сталей з цинковим покриттям, так як наявність покриття ускладнює процес зварювання через інтенсивне випаровування цинку під час зварювання. Пари цинку, крім шкідливої дії на здоров'я людини, також негативно впливають на процес зварювання. Адже вони перешкоджають стабільному горінню дуги і сприяють утворенню пор і тріщин у зварному шві, і руйнують захисне покриття в місці з'єднання.

Основні труднощі зварювання сталевих конструкцій з цинковим покриттям полягають у різниці температур плавлення сталі та цинку, а також випаровуванні цинку. Як відомо, залізо плавиться при температурі 1539 °С, цинк - при температурі ~420 °С, а при температурі ~906 °С він інтенсивно кипить та випаровується.

Дані з наукових джерел про зварювання матеріалів з цинковим покриттям є обмеженими. Зварювання матеріалів із захисними цинковими покриттями найбільш висвітлено в роботах таких вчених як О.П. Шатов, О.І. Стеклов, С.К. Павлюк, А.В. Лупачьов, Ю.О. Цумарєв.

Автори досліджували вплив цинкового покриття на величину ефективного потенціалу стовпа дуги, теплопровідність, динамічні властивості дуги та ін., що пов'язане із затратами частини теплової потужності дуги на розплавлення та випаровування покриття.

Оцінку залишкових явищ, що відбуваються в дуговому проміжку при зварюванні матеріалів з різними покриттями та цинковим зокрема, досліджував О.П. Шатов, у своїй праці [17]. Зокрема, він встановлював, що захисне покриття особливо інтенсивно знижує в часі залишкову провідність після вимкнення струму та додатків напруги холостого ходу джерела живлення до електродів. При товщині цинкового покриття 50-80 мкм (гаряче цинкування) залишкова провідність після $0,4 \times 10^{-3}$ с, знижується у 2 рази порівняно із залишковою

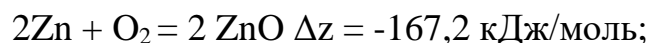
провідністю, отриманою за той же проміжок часу при зварюванні без покриття, що затрудняє застосування змінного струму в даному випадку.

Також у даній роботі встановлено, що захисні цинкові покриття знижують інерційність дуги, але при зварюванні сталі можна використовувати цинкові покриття товщиною < 200 мкм. При більшій товщині покриття спостерігається дія потужного потоку парів цинку, що призводить до переривання протікання струму та порушення стійкості дугового процесу. Результати дослідження протидії металу шва утворенню гарячих тріщин показали, що вона знижується при зварюванні сталі з цинковим покриттям. Це пов'язано з утворенням легкоплавких залізоцинкових прошарків по краях зерен.

Як уже зазначалось, при зварюванні матеріалів з цинковими покриттями в металі шва можливе інтенсивне утворення газових пор. Утворення пор при зварюванні сталей з цинковими покриттями найбільш характерне при зварюванні в середовищі захисних газів та пов'язане з порушенням газового захисту: потужні цинкові випари послаблюють дію захисного газу та призводять до попадання повітря в розплавлену зварювальну ванну.

Проблема утворення пор при зварюванні оцинкованих сталей детально досліджена в роботі [18].

При зварюванні у вуглекислому газі цинк, що є на поверхні деталей може випаровуватись, окислюватись та частково розчинятись у рідкому металі зварювальної ванни. Цинк має невелику розкисну здатність, тому як показують величини зміни ізобарного потенціалу протікання реакції при температурі зварювальної ванни ($T=1600^{\circ}\text{C}$) вище ніж у заліза:



Дослідження у даній роботі показують, що наявність цинку на поверхні сталевих зразків суттєво знижує в зоні зварювання окислення вуглецю, марганцю та кремнію, що підвищує їх вміст у металі шва. Пари цинку при тепловій дії зварювальної дуги вступають у взаємодію з вуглекислим газом:



Результатом даної реакції є утворення відновлювального газу CO та зниження загального окислювального потенціалу захисного газу.

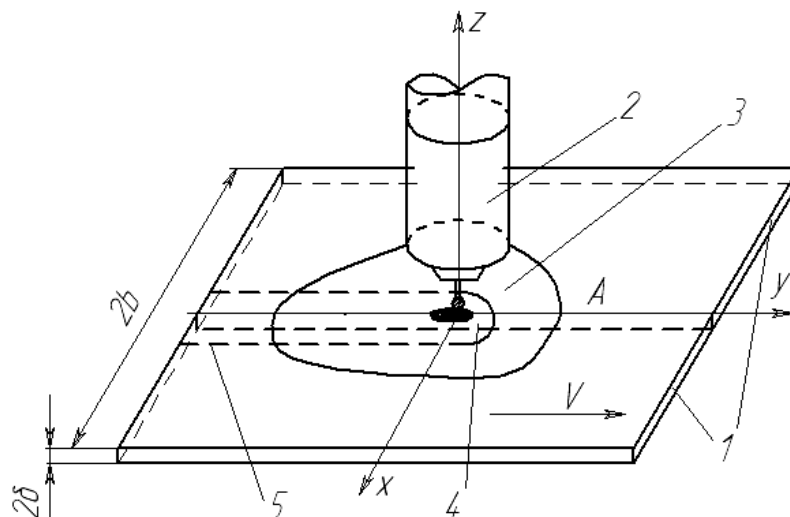
Дослідження показують, що пори в металі шва утворюються тоді, коли потік парів цинку направлений під кутом до зварювального пальника, що може утворитися при зварюванні кутових і таврових з'єднань, а також корневих швів стикових з'єднань з V – подібним обробленням кромки.

Процес дугового зварювання супроводжується інтенсивним нагріванням та плавленням зварюваних матеріалів. При зварюванні оцинкованих труб завдяки високотемпературному нагріву пошкоджується та руйнується цинкове покриття поблизу шва, а сам шов відповідно залишається незахищеним.

Ступінь пошкодження покриття у прилеглих до шва ділянках характеризується шириною їх пошкодження та товщиною цинкового покриття, яке залишилось після високотемпературного нагріву.

Зокрема в роботі [19] показана математична модель розрахунку основних факторів, що впливають на ступінь пошкодження покриття.

Для визначення розподілу температури при зварюванні та дуговому паянні двох пластин у стик автори застосували традиційну теплову модель М.М. Рикаліна. Математична модель геометрично зображена на рис. 1.3. [19]



- 1 – пластини; 2 – пальник; 3 – зона газового захисту; 4 – розплавлена ванна;
5 – межа між швом та основним металом

Рисунок 1.3 – Геометричне представлення моделі

Оскільки зварювання проводиться за один прохід, то вважається, що джерело тепла є лінійним та швидкорухомим. У даному випадку розподіл температур визначався за рівнянням:

$$\Delta T(y, t) = \frac{q}{2v\delta c\rho\sqrt{\pi at}} e^{-\frac{y^2}{4at} - bt}, \quad (1.1)$$

де $\Delta T(y, t)$ – приріст температури в точці на відстані y від точки 0 через час t від моменту внесення тепла; q – теплова потужність джерела тепла, $Вт$; V – швидкість зварювання, $м/с$; δ – товщина металу, $мм$; c – питома теплоємність тепла, $кДж/(кгК)$; ρ – густина тіла, $кг/м^3$; a – коефіцієнт теплопровідності, $м^2/с$; t – час від моменту внесення тепла, $с$; b – коефіцієнт температуровіддачі, $Дж/(м^2 с К)$.

Враховуючи те, що зварюються оцинковані листи, то вважається, що тепловий опір пластин складається із теплового опору сталі та теплових опорів цинкового покриття з двох сторін листа:

$$\frac{\delta_{ст}}{\lambda_{ст}} + \frac{2\delta_{ц}}{\lambda_{ц}} = \frac{\delta_{ст} + 2\delta_{ц}}{\lambda_{ср}}, \quad (1.2)$$

де $\lambda_{ст}$, $\lambda_{ц}$ – теплопровідність сталі та цинку; $\lambda_{ср}$ – умовна середня теплопровідність листа; $\delta_{ст}$, $\delta_{ц}$ – товщина сталі та цинку.

Масові долі компонентів сталі φ та цинку ψ пропорційні відповідним товщинам, оскільки густина цих матеріалів є приблизно однаковою:

$$\varphi = \frac{2\delta_{ц}}{\delta_{ст} + 2\delta_{ц}}; \psi = \frac{\delta_{ст}}{\delta_{ст} + 2\delta_{ц}}, \quad (1.3)$$

Середня густина цинкового листа визначена з виразу

$$\rho_{cp} = \varphi Fe + \psi Zn, \quad (1.4)$$

де φ та ψ – масові частки компонентів, сталі та цинку відповідно; Fe , Zn – в даному випадку значення відповідних властивостей.

Середній коефіцієнт температуропровідності α_{cp} розраховувався за формулою

$$\alpha_{cp} = \frac{\lambda_{cp}}{c_{cp} \cdot \rho_{cp}}, \quad (1.5)$$

де ρ_{cp} – середня густина; c_{cp} – середня теплоємність.

Прологарифмувавши рівняння (1.1), а потім продиференціювавши його, за умови $\frac{dT}{dt} = 0$, знайдено вираз для визначення максимальної температури нагріву металу в точках, розташованих по осі $\pm y$:

$$T_0 + T_{\max} = \frac{0,242q}{v\delta c\rho y_0} \left(1 - \frac{by^2}{2a}\right). \quad (1.6)$$

Величина $q/v\delta$ – питома погонна енергія (кількість енергії затраченої на утворення 1 м^2 зварного шва).

Ефективна теплова потужність визначалась як

$$q = I \cdot U \cdot \eta,$$

де I – сила зварювального струму, A ; U – напруга дуги, V ; η – ефективний тепловий ККД нагріву металу дугою.

З формули 1.1 також було визначено час перебування металу вище заданої температури:

$$t = f \frac{\left(\frac{q}{v\delta}\right)^2}{\lambda c \rho (T - T_0)^2}, \quad (1.7)$$

де f – коефіцієнт, що залежить від безрозмірної температури $\theta = \frac{T - T_0}{T_{\max} - T_0}$;

T_{\max} – максимальна температура циклу; T – задана температура; T_0 – початкова температура. Значення коефіцієнта f визначалось із номограм.

Товщину випаруваної частини цинкового покриття за час перебування при температурах плавлення та кипіння розраховували за перетвореним рівнянням Клайперона-Менделєєва.

$$m_i = (p_{\text{нас}} - p_i) \sqrt{\frac{m}{2\pi k T}}, \quad (1.8)$$

де m_i – $p_{\text{нас}}$ – тиск насиченої пари; p_i – тиск пари над випаровуваною речовиною; k – постійна Больцмана ($k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К).

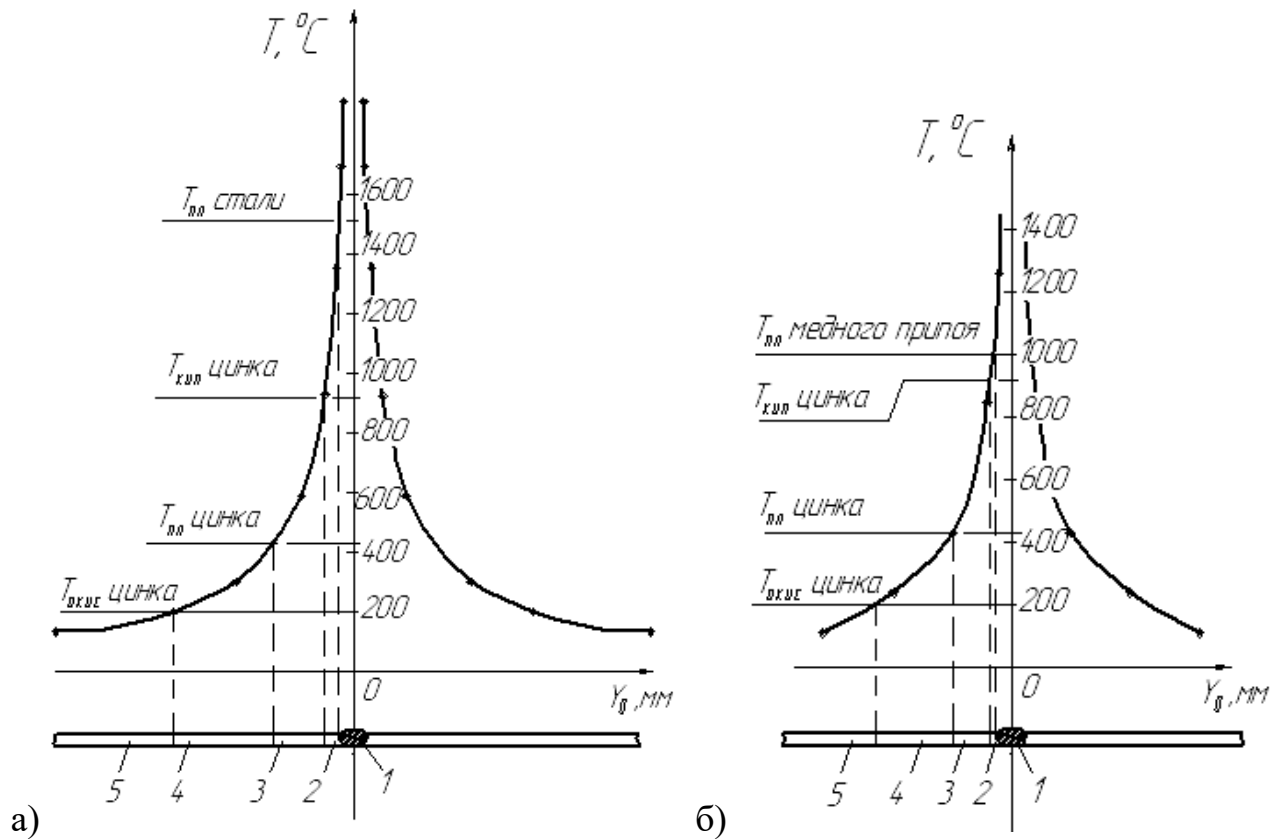
Визначення швидкості випаровування дозволило визначити товщину шару випаруваної частини покриття при умові, що за рахунок обдування потоком захисного газу пари цинку відводяться і $p_i = p_{\text{Zn}} = 0$:

$$\delta_{\text{вип}} = p_{\text{нас}} \sqrt{\frac{M}{2\pi k T N_A}} \cdot \frac{t}{\rho}, \quad (1.9)$$

де M – молярна маса випаровуваної величини; N_A – число Авогадро, ($N_A = 6,022 \cdot 10^{23}$ моль⁻¹).

За результатами розрахунків у роботі [19] наведено графіки розподілу температур нагріву при зварюванні та дуговому паянні (рис. 1.4).

Дані дослідження показують, що ступінь пошкодження захисного цинкового покриття буде залежати від термічного циклу дугового процесу та часу перебування в інтервалі критичних температур.



а – зварювання в захисному газі сталевим дротом; б – дугове паяння дротом із мідного сплаву; 1- шов; 2 – ділянка кипіння; покриття; 3 – ділянка розплавлення покриття; 4 – ділянка окислення покриття; 5 – основний метал з непошкодженим покриттям

Рисунок 1.4– Температурні умови нагріву цинкового покриття на сталі товщиною 2мм

З рисунка 1.4 бачимо, що максимальна температура прилеглої до шва ділянки при дуговому паянні на 300-400 °С менша ніж при зварюванні та перевищує температуру випаровування цинку лише на 100-200 °С.

За рахунок зменшення теплового впливу при дуговому паянні відповідно зменшується ширина пошкодженої ділянки.

Отже, як бачимо, розміри ділянок пошкодження захисного покриття залежать від температурного впливу та при дуговому паянні вони є значно меншими, ніж при зварюванні.

Також при дуговому паянні забезпечується корозійна стійкість швів, бо у якості присадкових матеріалів використовуються дроти зі сплаву на основі міді марок CuSi3 та CuAl8.

1.4 Технологія дугового паяння як альтернатива дуговому зварюванню для з'єднання оцинкованих труб

Забезпечити цілісність захисного цинкового покриття при з'єднанні оцинкованих матеріалів дуговим зварюванням неможливо через високий температурний вплив на нього.

Альтернативою електродуговому зварюванню труб з цинковим покриттям може бути метод дугового паяння, в основі якого є низьке вкладення теплоти в основний метал та плавлення тільки присадкового матеріалу [20].

У 90-х роках минулого століття було розроблено нову технологію яка отримала назву дугове паяння або MIG-паяння (arc brazing, MIG-brazing).

Термін дугове паяння виник із поєднання двох зварювальних процесів: паяння та зварювання. «Зварювання» - бо процес є подібним до зварювального з використанням зварювального устаткування, а «паяння» - тому що температура присадкового матеріалу є на 400-500 °C меншою від температури плавлення з'єднуваного матеріалу. Утворення з'єднання відбувається завдяки змочуванню та взаємній дифузії рідкого припою та основного матеріалу без його розплавлення [21].

Перехід від зварювання до дугового паяння дозволяє суттєво знизити тепловкладення і таким чином зменшити можливість пропалів та деформацій в процесі з'єднань із забезпеченням їх міцності практично на рівні з основним металом [22].

Хоч дана технологія була розроблена вже більше як двадцять років тому, вона не була реалізованою, оскільки з використанням на той час існуючого обладнання потребувала висококваліфікованих зварників, оскільки процес залежить від підтримування необхідної довжини дуги. Лише останніми роками з

появою нового обладнання з інверторними джерелами струму, а також цифровим керуванням процесу перенесення електродного металу та циклу зварювання, дугове паяння почало широко застосовуватися в автомобілебудівній та інших галузях.

Дослідженням процесу перенесення металу та керування, а також створенням відповідного обладнання з цифровим керуванням займалися такі провідні фірми як: «FRONIUS» (Австрія); «KEMPPİ» (Фінляндія); «ESAB» (Швеція); «LINCOLN ELECTRIC» (США); «EWM» (Німеччина); «CLOSS» (Німеччина) [23, 24].

Як уже зазначалось вище, технологія дугового паяння застосовується відносно недавно та її вартість обладнання є досить високою, тому в Україні вона є мало дослідженою.

При дуговому паянні відрив капель розплавленого припою відбувається за допомогою імпульсів високочастотного електромагнітного поля. Цей метод забезпечує високу стабільність маси капель припою, а їх температуру можна регулювати через затримку перенесення каплі.

Низьке тепловкладення при дуговому паянні забезпечується імпульсним перенесенням капель електродного матеріалу та використанням присадкових матеріалів зі сплавів на основі міді, які мають відносно невисоку точку плавлення (залежно від складу сплаву від 950 до 1080 °С).

Використання присадкових матеріалів на основі міді при дуговому паянні дозволить запобігти значному руйнуванню захисного цинкового покриття при з'єднанні оцинкованих матеріалів. З діаграми мідь-цинк (рис. 1.5) [25] бачимо, що через незначне перевищення температури плавлення мідних сплавів критичну температуру випаровування цинку, пошкодження цинкових покриттів у прилеглих до шва ділянках не будуть більші від 39 %, що відповідає граничній межі розчинності цинку в міді.

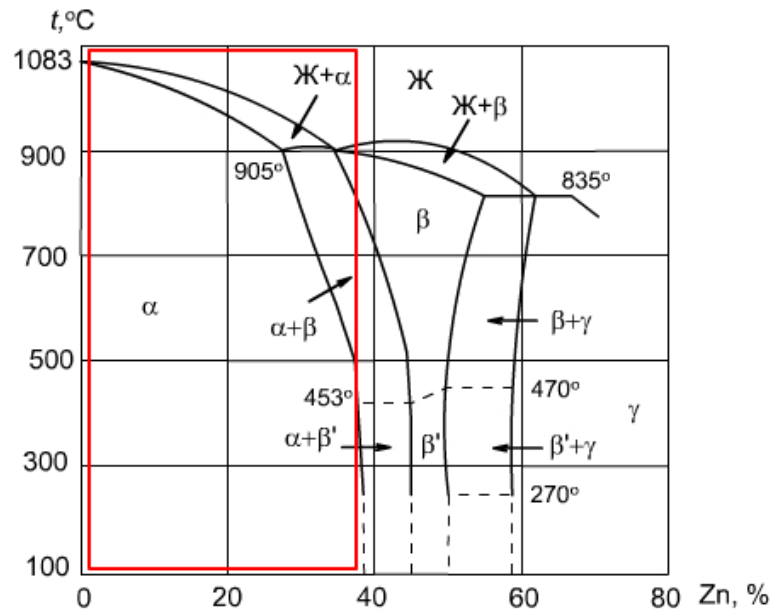


Рисунок 1.5 – Діаграма мідь – цинк

Як бачимо з діаграми, переважаючою в паяному шві буде наявність твердого розчину цинку в міді α – фази. В інтервалі високих температур α – фаза має гранецентричну ґратку та високу пластичність. Мідь з цинком також, крім α – фази утворюють ряд фаз електронного типу β, γ, ϵ . Нижче температури 905°C утворюється твердий розчин β – фази на основі електронного з'єднання Cu_5Zn_8 з об'ємцентричною ґраткою, яка є більш твердою та крихкою.

Також зі зміною структури мідного сплаву змінюються його механічні властивості, що можна побачити на графіку (рис. 1.6).

Використання сплавів на основі міді як присадки при дуговому паянні оцинкованих сталей дозволить забезпечити високу міцність паяних з'єднань, оскільки мідь має достатньо високу рідкотекучість та змочуваність і здатна проникати в основний метал.

Подібні фізико-хімічні властивості міді та заліза, будова кристалічної ґратки, атомні радіуси та ін., дозволяють отримувати високоміцні сполуки мідних сплавів зі сталлю [26]. Складністю сплавлення міді з залізом є різниця в температурах плавлення та теплофізичних властивостях (теплопровідність та теплоємність).

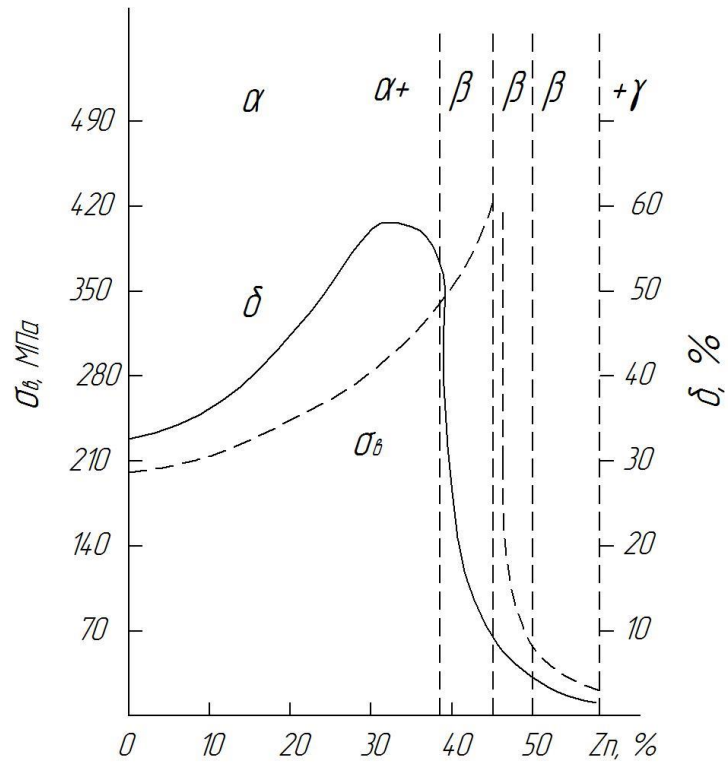


Рисунок 1.6 – Вплив цинку на механічні властивості міді

Високу сплавленість заліза з міддю можна спостерігати на діаграмі стану бінарної системи залізо-мідь (рис. 1.7) [27].

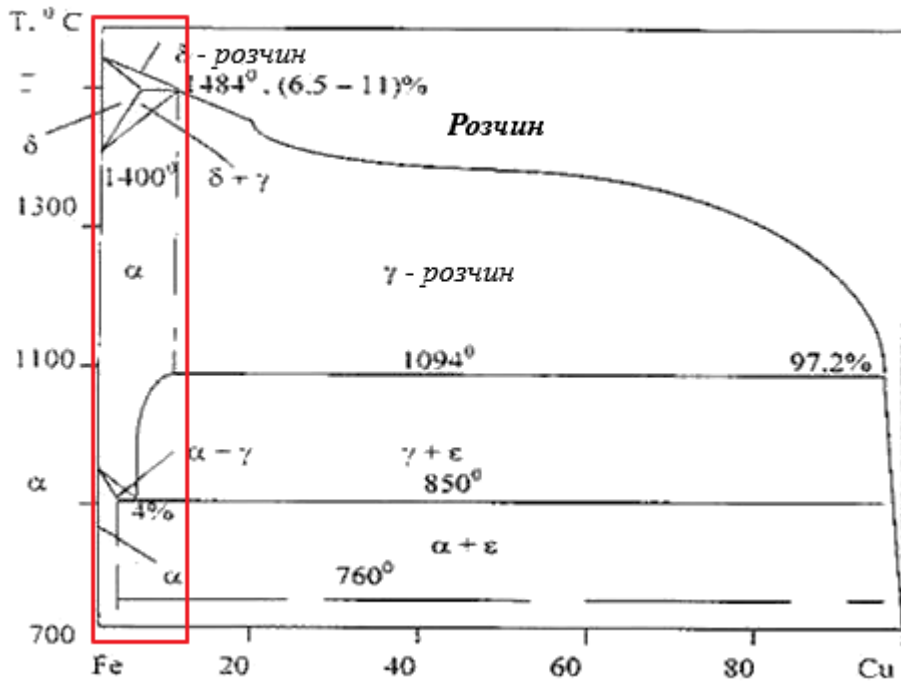


Рисунок 1.7 – Діаграма стану Fe-Cu

Оскільки чиста мідь має гранецентричну кристалічну ґратку, то її добавка розширює область γ – заліза. Як бачимо і в γ -, і в α – областях є розриви у розчинності. Розчинність міді в γ – твердому розчині є більшою, ніж у α – твердому розчині. Співвідношення в даній системі є такі ж як і в системі залізо-вуглець [27].

З діаграми стану Fe-Cu бачимо, що при температурі 1094 °C мідь розчиняє в собі 4 % заліза, а максимальна розчинність міді в α – залізі становить 6,5 % [28].

Наявність міді в твердому розчині заліза сприяє підвищенню його міцності.

Для виготовлення присадкових дротів для дугового паяння рекомендується використовувати мідні сплави: CuSi3; CuSi2Mn; CuAl8. Найбільш поширеним у практичному використанні є сплав CuSi3, бо завдяки вмісту кремнію він має високу текучість та досить легко піддається подальшій механічній обробці. Матеріали CuSi2Mn та CuAl8 є більш міцнішими ніж CuSi3, але їх механічна обробка є доволі складною, тому вони здебільшого використовуються там, де не потрібна обробка швів. Присадковий дріт CuAl8 використовується в основному для матеріалів з алюмінієвими покриттями.

Як зазначається в роботах [29, 30] хімічний склад, структура та механічні властивості паяного з'єднання визначаються процесами, що протікають на міжфазній границі взаємодії рідкого припою та поверхневих шарів основного металу. Серед фізико-хімічних факторів, що характеризують процес утворення з'єднань при дуговому паянні основними є розтікання розплавленого припою, змочування поверхні основного матеріалу та дифузійні процеси на границі припій-основний метал.

Наведені дослідження у роботі [31] показали, що збільшення кута змочування може призвести до утворення підрізів та високої концентрації напружень у місці переходу між швом та основним металом. Менший кут змочування буде зменшувати висоту шва та поперечний переріз з'єднання. Досягти балансу між оптимальними розмірами перерізу шва та кутом

змочування можна за допомогою теплового балансу, а також оптимізації складу газової суміші [32].

При паянні оцинкованих сталевих пластин товщиною 1–2 мм авторами [33] встановлено, що підвищення рівня теплового впливу при дуговому паянні призводить до інтенсифікації дифузійних процесів і, як наслідок, ріст дифузійної зони, ширина якої є ключовим параметром для оцінки рівня міцності. Аналогічні закономірності проявляються при двосторонньому дуговому паянні різнорідних матеріалів, наприклад алюмінієвих сплавів та неіржавіючої сталі [34, 35, 36], магнієвого сплаву з оцинкованою сталлю [37], однак максимальна товщина з'єднаних пластин не перевищує 2 мм. Мікроструктурні дослідження у роботі [38] також підтвердили інтенсивне збільшення дифузійної зони з'єднань з підвищенням температури до 1000 °С та часу витримки. При подальшому зростанні температури збільшення дифузійної зони є незначним.

Використання в складі захисного газу, крім аргону добавок активних газів при дуговому паянні оцинкованих сталей має позитивний вплив на якість швів. Порівняно з аргонем використання $\text{Ar}+1\% \text{O}_2$ і $\text{Ar}+18\% \text{CO}_2$ покращує змочування та дозволяє отримувати шви більш вигідної форми. Проте ці суміші забезпечують більше підведення тепла до з'єднання, що призводить до часткового плавлення основного металу та його змішування з присадковим матеріалом. А це викликає збільшення міцності з'єднань, але разом з тим додаткове тепловкладення може призвести до збільшення ширини пошкодження покриття в пришовній зоні [39]. Це також підтверджується дослідженнями у роботі [40].

Якісні з'єднання із оцинкованої сталі методом дугового паяння у даний час можливі для листів, товщина яких не перевищує 1,5 мм. Зокрема, у роботі [41] досліджено паяні з'єднання листів із низьковуглецевої TRIP сталі товщиною 1,5 мм із використанням присадки CuAl8 , які характеризуються високим рівнем мікротвердості та міцності. Рівень механічних властивостей з'єднань такого типу та, відповідно, параметри їх мікроструктури регулюються у широкому діапазоні шляхом раціонального вибору режимів дугового паяння оцинкованої

сталі, що підтверджується результатами робіт [42, 43], які отримані для листів товщиною 0,8–1,0 мм, з'єднаних із використанням присадки CuSi3 і газового середовища різного складу.

При дуговому паянні матеріалів з цинковими покриттями, випаровування цинку хоч і незначне, але впливає на стабільність протікання дугового процесу. Як показують дослідження в роботі [44] для того, щоб виключити вплив випаровування цинку на стабільність горіння дуги рекомендується застосовувати лівий спосіб переміщення пальника, бо це збільшить відстань від місця перенесення металу до місця випаровування.

Дуговим паянням з'єднуються різномірні матеріали, матеріали із захисними покриттями, та цинковими зокрема, а дана технологія останніми роками знаходить все ширше застосування в різних галузях [45]. Застосування дугового паяння як альтернативи зварюванню для з'єднання двофазних і різномірних сталей, нержавіючих сталей та металів з покриттями дозволяє забезпечити міцність паяних з'єднань, що не поступаються зварним, а також високу корозійну стійкість швів, збереження цілісності покриття в прилеглих до шва ділянках [46].

Корозійні процеси паяних з'єднань є досить складними та мало дослідженими. Особливостями корозійного процесу паяних з'єднань на відміну від зварних є те, що основний метал перебуває в області температур які є нижчими від температури плавлення металу. А також фізико-хімічні властивості металу паяного шва досить суттєво відрізняються від основного металу. Тому в паяних з'єднаннях виникають специфічні корозійні процеси.

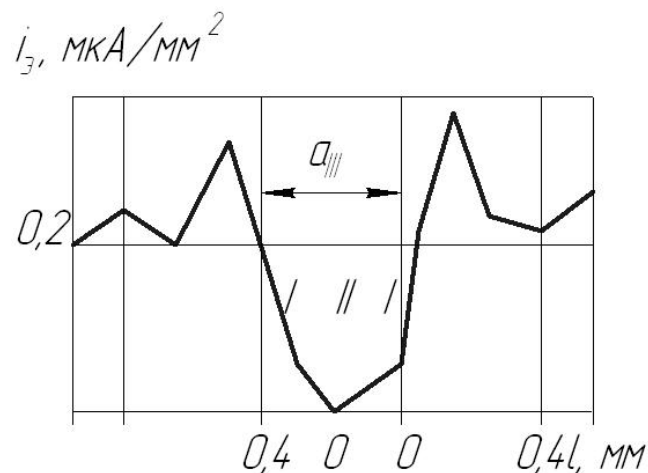
Зокрема дослідник О.І. Стеглов пропонує підхід оцінки корозійного руйнування матеріалів як поведінку паяних з'єднань в агресивних середовищах. У корозійних середовищах з низькою електропровідністю паяні з'єднання є не повністю поляризованими системами, що підтверджується дослідженнями розподілу потенціалів між елементами у роботі [47].

У реальних умовах корозії паяні з'єднання утворюють коротко замкнуті пари, що є складною гетерогенною електрохімічною системою, електродами якої

є основний метал, паяний шов, перехідні зони (дифузійна зона, зона термічного впливу). Залежно від з'єднаних матеріалів (однорідні, різнорідні), припоїв, та технології паяння виникають різні електрохімічні системи:

- бінарні (шов-основний метал);
- трьохелектродні (шов-перехідна зона-основний метал);
- п'ятиелектродні (основний метал одного структурного класу – перехідна зона – шов перехідна зона – основний метал іншого структурного класу).

Як показують дослідження в роботі [48] з наближенням до межі основного металу зі швом швидкість корозії зростає та максимально збільшується в місці термічного впливу рис. 1.8.

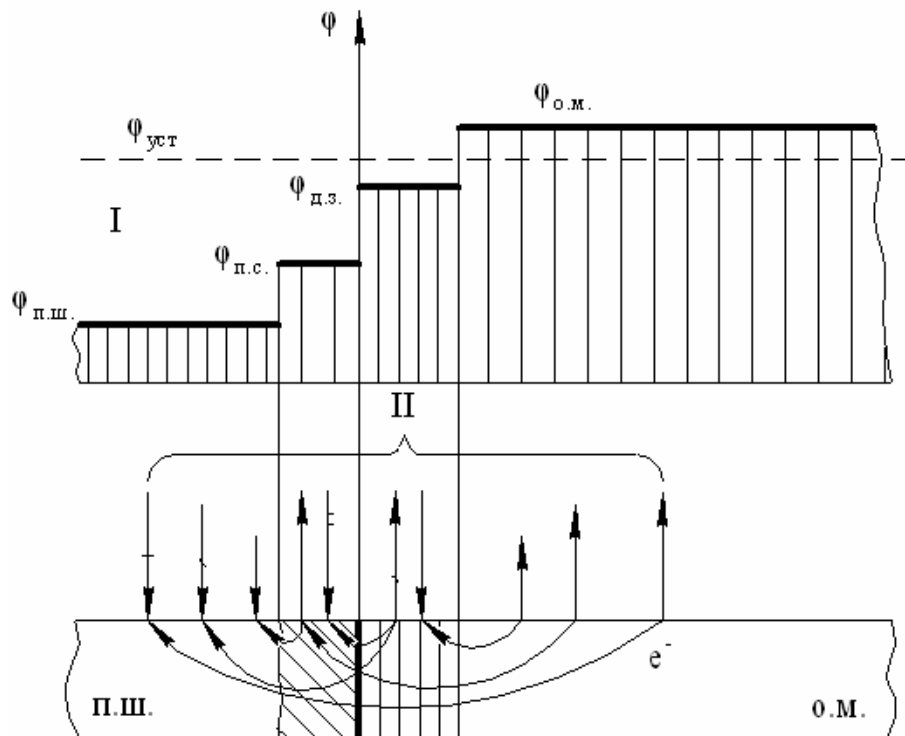


I – основний метал; II – паяний шов; $a_{ш}$ – ширина шва

Рисунок 1.8 – Графік розподілу густини струму корозійного процесу в перерізі паяного з'єднання у 3% - ному розчині NaCl

Зі збільшенням площі катоду (ширина паяного шва) пропорційно збільшується площа анода (основного металу), на якому прискорюються корозійні процеси.

Під час корозії паяного з'єднання значення його стаціонарного потенціалу встановлюється завдяки самополяризації елементів з'єднання, а його величина буде залежати від окислювально-відновного потенціалу розчину, напруги катодного процесу та площі електродів паяного з'єднання (рис. 1.9)[47].



I – схема розподілу електродних потенціалів паяного з'єднання: $\varphi_{\text{ш}}$ – шва; $\varphi_{\text{п.с.}}$ – прикристалізаційного шару; $\varphi_{\text{д.з.}}$ – дифузійної зони; $\varphi_{\text{о.м.}}$ – основного металу; $\varphi_{\text{уст}}$ – стаціонарний потенціал системи «паяний шов – основний метал»;

II – принципова схема макроелектрохімічної корозії (макропари: зона сплавлення – прикристалізаційний шар – дифузійна зона – основний метал);

п.ш. – паяний шов; о.м. – основний метал

Рисунок 1.9 – Характерні зони розподілу електродних потенціалів та корозії паяного з'єднання

Швидкість корозійного процесу різномірного з'єднання буде залежати від впливу середовища. Вона буде збільшуватись у металів з більш негативним електродним потенціалом (анод), а у металів з більш позитивним електродним потенціалом (катод) вона буде зменшуватись порівняно зі швидкістю їх корозії за відсутності контакту [49]. Паяний шов зазвичай відрізняється від основного металу величиною електродного потенціалу. Тому досить небезпечним буде, коли анодом виступатиме паяний шов або дифузійна зона. Досить мала їх площа порівняно з основним металом та підвищена густина корозійного струму приведуть до збільшення швидкості розчинення.

Тому в паяній конструкції, навіть з однорідних матеріалів неможливо повністю уникнути контактної корозії.

Також, як стверджує автор в роботі [49], збільшити швидкість корозії може величина залишкових напружень на межі паяного шва та основного металу, але це поки що є недостатньо дослідженим.

Автором Лупачовим А.В. в роботі [50] підкреслено, що загальна ширина пошкодженого покриття при дуговому зварюванні в захисному газі досягає 24 мм, та й сам шов також залишається корозійно незахищеним, а при дуговому паянні дротами на основі міді – 1...3мм з двох сторін шва.

Дослідженнями в роботі [51, 52, 53] наголошено, що корозійна стійкість з'єднань буде зберігатись, якщо ширина пошкодження цинкового покриття не перевищує зону дії анодного захисту 0,9...1,4 мм за умови, що сам шов має достатню корозійну стійкість.

За даними роботи [54] бачимо, що на корозійну стійкість з'єднань оцинкованої сталі при дуговому паянні буде впливати форма підготовки кромки, а через зменшення перерізу кутових швів буде зменшуватися погонна енергія процесу та відповідно його термічний вплив на захисне цинкове покриття.

Корозійна стійкість паяних з'єднань оцинкованих сталей детально досліджувалась у роботі [55]. Аналіз корозійної стійкості зразків з'єднань у камері соляного туману показав, що корозія почала проявлятися на прилеглих до шва ділянках через 72 години після початку випробувань. Згідно норм початок корозії повинен наступати через 80-100 годин, що свідчить про високий рівень корозійної стійкості дуго-паяних з'єднань. Висока корозійна стійкість дуго-паяних з'єднань підтверджується і у роботі [56].

Для забезпечення тривалої експлуатації паяні з'єднання, крім корозійної стійкості, повинні мати і високі показники міцності в залежності від умов роботи та виду навантажень. Міцність дуго-паяних з'єднань в першу чергу залежить від характеристик міцності припою, також від геометричних розмірів та форми шва і дифузійних процесів, що відбуватиметься при сплавленні припою з основним металом.

З'єднання виконані методом дугового паяння є рівноміцними з основним металом, що підтверджується експериментальними випробуваннями зразків на розтяг, проведеними у роботах [57, 58].

Для правильної оцінки міцності паяних з'єднань, як і конструкцій загалом, необхідно порівняти розрахункові напруження з допустимими, що визначені з урахуванням умов експлуатації.

Оскільки в паяних з'єднаннях матеріал шва та основного матеріалу мають різні деформаційні властивості, то при зовнішньому навантаженні в перехідному об'ємі «основний матеріал – шов» виникає складно - напружений стан, що потрібно враховувати при оцінці міцності.

Дифузійні прошарки, що утворюються в стикових з'єднаннях паяних швів між основним матеріалом та матеріалом шва призводять до підвищення міцності шва та зниження його пластичності.

Рівень напружень, що необхідний для руйнування паяних швів визначається співвідношенням між межею текучості основного матеріалу та шва. В стикових паяних з'єднаннях труб, з межею міцності шва меншою від межі міцності основного металу, можливе виникнення гідростатичного напруженого стану в шві. В даному випадку нормальне напруження при руйнуванні може у декілька разів перевищувати межу міцності паяного шва [59].

Як стверджує автор в роботі [49] максимальні напруження в паяному шві будуть виникати по осі паяного з'єднання та будуть збільшуватись із зменшенням розмірів шва. Розміри стикових паяних з'єднань також суттєво впливають на максимальні дотичні напруження: збільшення товщини шва у 2 рази дозволить зменшити напруження в 1,3 рази. Несуча здатність паяних з'єднань визначається також відносною товщиною твердого прошарку та механічною неоднорідністю з'єднання.

Висока концентрація напружень у місці сплавлення може призвести до відриву шва від основного матеріалу.

Вплив форми підготовки кромek деталей та геометричних розмірів паяного шва на напружено-деформований стан з'єднань, а відповідно їх несучу

здатність досліджено також у роботах [54,60]. А в роботі [61] автори стверджують, що на величину максимальних напружень в паяному з'єднанні також суттєвий вплив матимуть розміри з'єднуваних деталей: їх товщина та довжина.

Проаналізувавши механічні властивості та корозійну стійкість з'єднань, виконаних методом дугового паяння бачимо, що вони мають достатньо високу міцність та корозійну стійкість. Але проведений аналіз свідчить, що більшість досліджень проводилось для з'єднань тонких листів (до 2 мм), що з'єднувались внапуск, та дуже мало уваги приділено дослідженням стикових паяних з'єднань деталей з товщиною більше 2 мм. Також потребує більш повного дослідження напружено-деформований стан дуго-паяних з'єднань та труб зокрема.

1.4 Вибір напрямку досліджень

Спочатку польові магістральні трубопроводи використовували для перекачування нафтопродуктів для військових потреб, але в наш час вони все ширше застосовуються для потреб народного господарства.

Завдяки своїй мобільності, простоті монтажу та невеликій вазі збірно-розбірні трубопроводи мають суттєву перевагу над стаціонарними трубопроводами, оскільки прокладаються протягом короткого часу.

Проте досить часте збирання та розбирання польових магістральних трубопроводів, призводить до зношення чи пошкодження манжетів або розтрубів труб, тому такі труби приходиться виводити з експлуатації. Але дані труби можуть бути відремонтовані оскільки основна частина труби залишається цілою. Оскільки труби ПМТП для захисту від корозії покриті тонким шаром цинку, що дозволяє їх експлуатацію протягом сімдесяти років, тому доцільність їхнього ремонту є очевидною.

Високоєфективною технологією ремонту даних труб є відрізання пошкоджених манжетів або розтрубів та приварювання нових. Це продовжить термін їх експлуатації та значно зекономить кошти.

Основною проблемою, що виникає при ремонті польових магістральних трубопроводів є збереження захисного цинкового покриття в місці приєднання манжетів та розтрубів до труби дуговим зварюванням через високий температурний вплив зварювальної дуги. Досягти збереження покриття та забезпечення корозійної стійкості з'єднань можна завдяки зменшенню теплового впливу, застосувавши технологію дугового паяння присадковими матеріалами CuSi3 та CuAl8.

Аналіз наукових досліджень процесу дугового паяння показав, що дана технологія є ще не достатньо дослідженою. Зокрема, мало уваги приділено дослідженням застосування даного способу для з'єднання стикових з'єднань деталей з товщиною більше 2 мм. Також немає даних з досліджень напружено-деформованого стану паяних з'єднань.

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;
- 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.

Список використаних джерел у розділі 1

1. Промышленные нефтепроводы и газопроводы: Вчера и сегодня. URL: <http://rgk-palur.ru/magistralnye-truboprovody-istoriya-razvitiya-i-vozniknoveniya/> (дата звернення: 5.09.2012).
2. Цисевич С. В. Применение трубопроводов для обеспечения горючим боевых действий войск: история и современность. *Сборник научных статей. Учреждение образования "Гродненский гос. ун-т им. Я.Купалы"*. Гродно. 2012. С. 315-320.
3. Мельников Д.И. Уроки Афганистана. *Трубопроводный транспорт нефти*. 2009. № 12. С. 40-42.
4. Ерофеева Л. Трубопровод цвета хакки. *Трубопроводный транспорт*. 2005. № 1. С. 17–19.
5. Михайлов В.В. Основные варианты совместной работы полевого магистрального трубопровода с магистральным нефтепродуктопроводом. *Журнал научных публикаций аспирантов и докторантов*. 2013. № 3. URL: http://jurnal.org/articles/trans_1.php (дата звернення: 18.05.2014).
6. Крижанівський Є. І., Вязінцев Ю.В. Методика застосування польового магістрального трубопроводу для відкачування осадових вод природних та штучних водоймищ. *Науковий вісник ІФНТУНГ*. Івано-Франківськ. 2007. № 1. С. 106–111.
7. Сборно-разборные трубопроводы ПМТП, ПМТ. URL: <http://www.pmtp150.ru/> (дата звернення: 11.03.2012).
8. Середа В.В., Мельников Д.И., Дроздов Д.А. Использование сборно-разборных трубопроводов в системе нефтепродуктообеспечения. *Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов*. 2016. № 3. С. 29-37.
9. Для снабжения Крыма водой российская армия протянула более 100 км трубопровода. Сегодня UA. URL: <http://www.segodnya.ua/regions/krym/dlya->

snabzheniya-kryma-vodoy-rossiyskaya-armiya-protyanula-bolee-100-km-truboprovoda-621491.html (дата звернення: 3.09.2015).

10. Сборно-разборные полевые магистральные трубопроводы ПМТП-150, ПМТБ-200, ПМТ-150, ПМТ-100, СРТ-100, МСРТ-100, МСРТ-150, СРТ-200. Технические требования. URL: http://pmtп150.ru/?Tehnicheskie_usloviya:Tehnicheskie_trebovaniya (дата звернення: 25.10.2015).

11. Малі трубопроводи. URL: <http://pipeline.com.ua> (дата звернення: 11.02.2012).

12. Полевой магистральный трубопровод ПМТП-150. Техническое описание и инструкция по эксплуатации. Москва: Воениздат, 1975. 175с.

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

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

15. 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* (г. Краматорск, 2-5 октября 2012г.). Краматорск: ДГМА, 2012. С. 93-94.

16. Родионова Л.В., Суботина Ю.М. Преимущества и недостатки способа горячего оцинкования стальной полосы. Проблемы цинкования. *Russian Internet Journal of Industrial Engineering*. 2013. №2. URL: <http://industrial-engineering.ru/issues/2013/2013-2-1.pdf> (дата звернення: 29.11.2013).

17. Шатов А.П. Сварка металлических конструкций с антикоррозионными покрытиями. *Электронный научно-технический журнал. Инженерный вестник*. URL: <http://engbul.bmstu.ru/doc/514304.html> (дата звернення: 5.01.2013).

18. Шатов А.П. К вопросу образования пористости при сварке стальных конструкций с антикоррозионным цинковым покрытием. Электронный научно-технический журнал. Инженерный вестник. URL: <http://engbul.bmstu.ru/doc/760131.html> (дата звернения: 5.04.2015).

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

20. Миддельдорф К., Д. фон Хофе. Тенденции развития технологий соединения материалов. *Автоматическая сварка*. 2008. №11. С. 39–47.

21. Rozalski M., Gawrysiuk W. MIG/MAG braze-welding of galvanised steel sheets and examples of difficult to weld systems. *Welding International*. 2008. – Vol. 22, Issue 2. P. 239–244.

22. Хорунов В. Ф., Зволинский И. В., Максимова С. В. Дуговая пайка низкоуглеродистых сталей. *Автоматическая сварка*. 2013. №4. С. 23–27.

23. Лебедев В. А. Тенденции развития механизированной сварки с управляемым переносом электродного металла. *Автоматическая сварка*. 2010. №10. С. 45–53.

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

25. Колачев Б.А., Ливанов В.А., Елагин В.И. Металловедение и термическая обработка цветных металлов и сплавов: учебник для студ. высш.уч.завед. Москва: МИСиС, 2005. 432с.

26. Башкатов А. В., Плетенев В. М., Самороковский Ф. В. и др. Электронно-лучевая сварка бронзы БрХО8 со сталями ЭП288 и ЭП452.. Киев: Наукова думка. 1975. 182с.

27. Марусин М. В., Щукин В. Г., Марусин В. В. Поверхностное легирование углеродистой стали медью при высокоэнергетической

индукционной обработке. *Физика и химия обработки металлов*. 2010. №5. С. 67–70.

28. Шутов Б. А., Ерохин А. А. Об оптимальном составе металла шва при сварке плавлением меди с низкоуглеродистой сталью. *Автоматическая сварка*. 1970 № 11. С. 17-19.

29. Стреленко Н. М. Фізико-хімічна взаємодія рідкого припою та основного металу в процесі паяння. *Технологические системы*. 2014. №3. С. 41–44.

30. Зворыкина А. К., Стреленко Н. М. Особенности дуговой пайки тонколистовой оцинкованной стали. *Технологические системы*. – 2014. №4. С. 42–45.

31. Qin G., Su Y., Meng X., Fu B. Numerical simulation on MIG arc brazing-fusion welding of aluminum alloy to galvanized steel plate. *Springer-Verlag London*. 2015. doi: <https://doi.org/10.1007/s00170-014-6529-5>

32. Quintino L., Miranda R., Pimenta G. MIG Brazing of Galvanized Thin Sheet Joints for Automotive Industry. *Materials and Manufacturing Processes*. 2006. №21. С. 63–73.

33. Makwana D., Shome M., Goecke Sven-F. et al. Gas metal arc brazing of galvanized steel sheets. *Science and Technology of Welding and Joining*. 2016. Vol. 21. № 7. P. 600–606. doi: <http://dx.doi.org/10.1080/13621718.2016.1145420>

34. Zhang Y., Huang J., Cheng Z. et al. Study on MIG-TIG double-sided arc welding-brazing of aluminum and stainless steel. *Materials Letters*. 2016. Vol. 172. P. 146–148. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.matlet.2016.02.146>

35. Qin G., Su Y., Wang S. Microstructures and properties of welded joint of aluminum alloy to galvanized steel by Nd:YAG laser + MIG arc hybrid brazing-fusion welding. *Trans. Nonferrous Met. Soc. China*. 2014. Vol. 24. P. 989–995. doi: [10.1016/S1003-6326\(14\)63153-8](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(14)63153-8)

36. Quintino L., Pimenta G., Iordachescu D. et al. MIG Brazing of Galvanized Thin Sheet Joints for Automotive Industry. *Materials and Manufacturing Processes*. 2006. Vol. 21. P. 63–73. doi: [10.1081/AMP-200060621](https://doi.org/10.1081/AMP-200060621)

37. Miao Y., Wu B., Xu X. et al. Effect of Heat Input on Microstructure and Mechanical Properties of Joints Made by Bypass-Current MIG Welding– Brazing of Magnesium Alloy to Galvanized Steel. *Acta Metall* - 2014. – Vol. 27. – P. 1038–1045. doi:10.1007/s40195-014-0118-3

38. Mazar Atabakia M., Noor Wati J., Bte Idris J. Transient liquid phase diffusion bonding of stainless steel 304. *Metall. Mater. Eng.* – 2012. – Vol. 18. – P. 177–186. URL: <https://metall-mater-eng.com/index.php/home/article/.../226> (дата звернення: 12.06.2015)

39. Pfeifer T., Rykała J. Braze Welding of Zinc-coated Steel Sheets Using Variable Polarity GMA Flux-cored Welding. *Biuletyn instytutu spawalnictwa*. 2015. Vol. 5 P. 6–12. Doi:10.17729/ebis.2015.5/1

40. Piłka J., Pfeifer T., Mendakiewicz J. Influence of the shielding gas on the properties of VP MIG/MAG braze-welded joints in zinc coated steel sheets. *Biuletyn Instytutu Spawalnictwa*. 2014. Vol. 1. P. 35–41. URL: bulletin.is.gliwice.pl/download/file/fid/1016 (дата звернення: 23.10.2015)

41. Varol F., Ferik E., Ozsarac U. et al. Influence of current intensity and heat input in Metal Inert Gas-brazed joints of TRIP 800 thin zinc coated steel plates. *Materials & Design*. 2013. Vol. 52. P. 1099–1105. doi: 10.1016/j.matdes.2013.06.054

42. Iordachescu D., Quintino L., Miranda R. et al. Influence of shielding gases and process parameters on metal transfer and bead shape in MIG brazed joints of the thin zinc coated steel plates. *Materials & Design*. 2006. Vol. 27, № 5. P. 381–390. doi:10.1016/j.matdes.2004.11.010

43. Rykała J., Pfeifer T. Influence of the technological conditions of welding using the MIG/MAG method on metal transfer in the welding arc. *Welding International*. 2014. Vol. 28, № 12. P. 931-940. doi: <http://dx.doi.org/10.1080/09507116.2012.753233>

44. Vinas J., Kascak L., Abel M. et al. Mig brazed hot-dip galvanized sheets *Lebanese Science Journal*. 2010. Vol. 11, № 2. P. 75–85. URL: <http://lsj.cnrs.edu.lb/2010/10/01/j-vinas-l-kascak-m-abel-d-draganovska-and-m-gatial/> (дата звернення: 25.01.2016)

45. Darling B. Brazing: An Important Joining Option / By Creed Darling. *Welding Journal*. 2009. № 4. P41–43. URL: <https://app.aws.org/bsmc/wj0409-41.pdf> (дата звернення: 15.04.2015)

46. Фалалеев А. П. Исследование влияния технологии соединения закаленных кузовных сталей на их эксплуатационные свойства. *Вісник СевНТУ: зб. наук. пр. Вип. Серія: Механіка, енергетика, екологія*. 2012. №132. С. 39–45.

47. Сторчай, Е.И. Исследование коррозионной стойкости паяных соединений. *Сварочное производство*. 1986. № 7. С. 23–24.

48. Стеклов О.И., Лапшин Л.Н. Коррозионно-механическая стойкость паяных соединений. Москва: Машиностроение, 1981. 101 с.

49. Лучкин Р. С. Прочность и надежность паяных конструкций : электронное учебное пособие. Тольятти: Изд-во ТГУ, 2014. 163 с. URL: <https://rucont.ru/file.ashx?guid=03314ad0-4639-49ad>. (дата звернення: 12.04.2015)

50. Лупачёв А. В. Дуговая сварка и пайка оцинкованных узлов теплотрасс и их коррозионная стойкость. *Вестник плоцкого государственного университета*. 2012. № 3. С. 21–27. URL: <http://elib.psu.by:8080/handle/123456789/477> (дата звернення: 11.12.2015)

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

52. Стеклов О. И., Павлюк С. К., Лупачёв А. В. Поведение сварных и паяных соединений оцинкованных сталей в коррозионной среде. *Сварочное производство*. 2012. № 4. С. 3–11.

53. Лупачёв А. В. Обеспечение коррозионной стойкости сварных и паяных соединений оцинкованных сталей регулированием тепловложения и состава шва: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Могилев, 2012. 26 с.

54. Цумарев Ю. А., Шелег В. К. Влияние подготовки кромок на повреждаемость защитного покрытия при дуговой пайке оцинкованной стали. *Вестник плоцкого государственного университета*. 2010. № 2. С. 124–129.

55. Magda A., Codrean C. Corrosion resistance testing of the galvanized sheet metal braze welding joints. *Key Engineering Materials*. 2015. № 627. С. 189–192. doi: 10.4028/www.scientific.net/KEM.627.189.

56. Nikitin A., Schleuss L., Ossenbrink R. et al. Corrosion Behavior of Brazed Zinc-Coated Structured Sheet Metal. *International Journal of Corrosion*. 2017. doi: <https://doi.org/10.1155/2017/4768505>.

57. Kim Y., Park P., Park K. et al. Optimization of arc brazing process parameters for exhaust system parts using box-behken design of experiment. *Journal of Welding and Joining*. 2015. № 2. P. 129–137. URL: www.e-jwj.org/upload/JWJ-33-2-_23-31.pdf (дата звернення: 9.01.2016).

58. Radscheit C. Grundlagen des Lichtbogenlötens und RegelungsarbeitenAGV. 2012. URL: <http://doczz.fr/doc/1338865/28.9.2012-lichtbogenlöten>. (дата звернення: 16.01.2016).

59. Шапиро А.Е. Механические свойства некапиллярных соединений стальных трубопроводов, паянных латунными припоями. *Сварочное производство*. 1981. № 3. С. 23–25.

60. Игнатова Е. В., Цумарев Ю. А. Исследование несущей способности и разработка новых конструкций паяных соединений. *Сборник научных работ студентов Республики Беларусь "НИРС 2011"*. 2012. С. 132–136.

61. Шелег В. К., Цумарев Ю. А., Игнатова Е. В. Влияние геометрических размеров паяного нахлесточного соединения на его напряженно-деформированное состояние. *Наука и техника - Science & Technigue: международный научно-технический журнал*. 2014. №2. С. 52–56.

РОЗДІЛ 2

РОЗРОБКА МЕТОДИК ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ, ПІДГОТОВКА ЗРАЗКІВ ТА ОБЛАДНАННЯ

Польові магістральні трубопроводи експлуатуються під впливом таких факторів як внутрішній тиск, температура, статичні та динамічні навантаження, а також атмосферний вплив. Тому при розробці технології ремонту труб потрібно провести ряд випробувань зварних з'єднань з урахуванням вище названих факторів у вигляді зовнішніх навантажень.

Для визначення доцільності застосування технології та матеріалів, а також для встановлення оптимальних параметрів режиму та вибору обладнання, необхідно провести комплексні дослідження властивостей з'єднань та їх поведінки при різних навантаженнях, що є найбільш близькими до умов експлуатації.

2.1 Матеріали та натурні зразки зварних з'єднань

Труби та трубні вироби комплектів польових магістральних трубопроводів повинні відповідати вимогам ГОСТ 20772-81 та виготовляються із низьколегованих сталей марок: 16ГС, 09Г2С, 12Г2Б, 10Г2С1 згідно ГОСТ 19281-89; 10Г2 згідно ГОСТ 4543-71; 08Г2СФ, 08Г2СФБ згідно ТУ14-1-2551-78; а також спокійної сталі 10, 20 згідно ГОСТ 1050-88.

Для даних досліджень використовувались труби із трубного комплекту ПМТП-150, виготовлені зі сталі марки 16ГС. Хімічний склад та механічні властивості даної сталі наведено в таблицях 2.1 та 2.2 відповідно [1].

Таблиця 2.1 - Хімічний склад сталі 16ГС

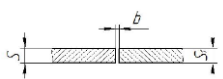
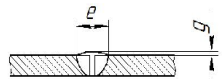
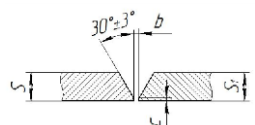
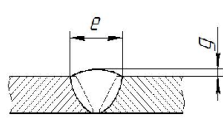
Марка сталі	Вміст елементів, %					
	C	Si	Mn	Cr	Ni	Cu
16ГС	0,12-0,18	0,40 – 0,70	0,90 – 1,20	≤ 0,30	≤ 0,30	≤ 0,30

Таблиця 2.2 - Механічні властивості матеріалу сталі 16ГС

Ударна в'язкість КСУ, Дж/см ²	Границя міцності σ_B , МПа	Границя текучості σ_T , МПа	Відносне видовження δ , %	Відносне звуження ψ , %	Твердість, НВ
60-200	450-490	265	21	немає даних	140-190

З даних труб на труборізальному верстаті вирізались заготовки довжиною 200 мм. Потім на токарному верстаті були підготовлені кромки під зварювання. Для заданого діаметру, товщини стінки, а також способів зварювання з ГОСТ 16037-80 було вибрано два типи з'єднань з відповідними геометричними параметрами зварюваних кромок та розмірами зварного шва (табл 2.3)

Таблиця 2.3 – Конструктивні елементи і розміри зварних з'єднань ГОСТ 16037-80 [2]

Умовне познач. зварн. з'єднання	Конструктивні елементи і розміри		$S=S_1$, мм	Розміри, мм							
	підготовлених кромок зварюваних деталей	зварного шва		<i>b</i>		<i>c</i>		<i>e</i>		<i>g</i>	
				Номинал.	Гран. відх	Номинал.	Гран. відх	Номинал.	Гран. відх	Номинал.	Гран. відх
C2			3,0	1,0	+0,5	-	-	4	+2	-	-
C17			3,0	1,0	+0,5	0,5	+0,5	7	+2	1,5	+1,5

За даними конструктивними розмірами виконано оброблення кромки трубних зразків для їх подальшого зварювання та паяння (рис 2.1).



а)



б)

а) - з прямими кромками та зняттям цинкового покриття в місці зварювання;

б) – з V – подібним обробленням кромок

Рисунок 2.1 – Підготовка зразків труб

2.2 Матеріали для зварювання та дугового паяння

Для виготовлення дослідних зразків для зварювання та паяння використовувались наступні присадкові матеріали: зварювальний дріт марки Св08Г2С; дроти зі сплавів на основі міді CuSi3 та CuAl8. У якості захисного середовища використовували захисний газ аргон та суміш вуглекислого газу з аргоном у співвідношенні: 82% - аргону, 18% - CO₂.

Зварювання більшості конструкційних та низьколегованих сталей в середовищі захисних газів проводилося з використанням низьколегованого обмідненого дроту марки Св08Г2С, який виготовляється за ГОСТ 2246-76. Хімічний склад даного дроту наведено в таблиці 2.4.

Механічні властивості металу шва, зварені на низьколегованих сталях дротом Св-08Г2С наведені в таблиці 2.5.

Таблиця 2.4 – Хімічний склад зварювального дроту Св-08Г2С [3]

Марка дроту	Вміст елементів, %						
	С	Mn	Si	Cr	Ni	S	P
				не більше			
Св-08Г2С	0,05-0,11	1,8-2,1	0,7-0,95	0,2	0,25	0,025	0,030

Таблиця 2.5 – Механічні властивості металу шва низьколегованих сталей

Марка електродного дроту	Границя міцності σ_b , МПа	Границя текучості σ_t , МПа	Відносне видовження δ , МПа	Відносне звуження ψ , %
Св-08Г2С	550	450	20	48

Найчастіше для дугового паяння оцинкованих сталей використовують присадковий матеріал CuSi3, який завдяки вмісту 3% кремнію в своєму складі має значну рідкотекучість наплавленого матеріалу, а також полегшує механічну обробку.

Також широко застосовують для дугового паяння присадковий матеріал CuAl8, який у порівнянні з попереднім має дещо вищу межу міцності та твердість.

Застосування матеріалів CuSi3 та CuAl8 для дугового паяння оцинкованих сталей має наступні переваги:

- 1) стійкість зварного шва до корозії (зварний шов практично не кородує);
- 2) мале розбризкування;
- 3) мінімальне вигорання цинкового покриття;
- 4) мале тепловкладення;
- 5) зварні шви легко піддаються механічній обробці;
- б) катодний захист основного металу в ділянці біля зварного шва.

Ці присадкові матеріали мають досить низьку температуру плавлення (950...1080 °С) через високий вміст міді у своєму складі.

Присадкові дроти марок CuSi3 та CuAl8 виготовляються відомими європейськими виробниками згідно стандарту ISO 24373.

Хімічний склад та механічні властивості присадкових дротів CuSi3 та CuAl8 наведено в таблицях 2.6 та 2.7 відповідно.

Таблиця 2.6 – Хімічний склад присадкових дротів CuSi3 та CuAl8 [4]

Марка дроту	Склад, %					
	Cu	Mn	Si	Al	Ni	Інші
CuSi3	все решту	0,75-0,95	2,80-2,95	немає	немає	max 0,5
CuAl8	все решту	0,10-0,30	немає	7,50-8,00	0,10-0,50	max 0,5

Таблиця 2.7 – Механічні властивості присадкових дротів CuSi3 та CuAl8 [4]

Марка дроту	Границя міцності σ_b , Н/мм ²	Границя текучості σ_t , Н/мм ²	Граничне видовження, %	Твердість по Брінеллю, НВ	Випробування на удар, Av(J)
CuSi3	350	120	40	80	60
CuAl8	430	200	40	100	100

2.3 Обладнання та режими дугового паяння та зварювання

Як показав проведений аналіз наукових джерел, досягнути забезпечення цілісності захисного цинкового покриття при ремонті труб ПМТП можливо, зменшивши тепловий вплив на деталі. Цього можна досягнути, застосувавши технологію дугового паяння з використанням сучасних зварювальних джерел з цифровим керуванням.

Цифрове керування процесом дозволяє забезпечувати стійке горіння дуги на малих струмах, а також керувати відривом каплі з торця присадкового дроту імпульсами струму. Провідна європейська компанія зварювального обладнання FRONIUS виготовляє широкий асортимент сучасного устаткування з цифровим керуванням.

Виготовлення дослідних зразків проводилось спільно з філіалом ТОВ «Фроніус Україна», м. Стрий.

Для зварювання і дугового паяння було скомпоновано установку, що складається із зварювального напівавтомата відомої австрійської фірми

«FRONIUS» системи TPS-270i, зварювального обертача та штатива для закріплення зварювального пальника напівавтомата (рис. 2.2).













Рисунок 2.2 - Зварювальна установка

Закріплення та обертання зварюваних трубних зразків зі швидкістю зварювання відбувалося за допомогою обертача, а для встановлення пальника напівавтомата в зручне для зварювання положення було використано спеціалізований штатив.

Основні параметри режиму зварювання (величина зварювального струму, напруга та швидкість подачі електродного дроту) в зварювальних системах TPS/i є запрограмованими та задаються залежно від вибраного процесу та товщини зварюваних деталей [5]. Для налаштування напівавтомата на панелі керування задається процес, вибирається відповідна товщина зварюваних кромок, марка електродного дроту та газ.

Параметри режиму, на яких проводилось зварювання та дугове паяння зразків труб наведені в таблиці 2.8

Таблиця 2.8 – Основні параметри режимів зварювання

№ зразка	Форма підготовки кромки	Марка присадкового дроту та газ	Параметри зварювання та паяння *	Вигляд шва
1 Дугове паяння		CuSi3, аргон	$d_e=1,0\text{мм};$ $I=147\text{А};$ $U=22,1\text{В};$ $V_{зв.}=45\text{см/хв};$ $V_{п.д.}=9,0\text{м/хв}.$	
2 Дугове паяння		CuSi3, аргон	Перший шар: $d_e=1,0\text{мм};$ $I=100\text{А};$ $U=18,8\text{В};$ $V_{зв.}=45\text{см/хв};$ $V_{п.д.}=5,3\text{м/хв}.$ Другий шар: $d_e=1,0\text{мм};$ $I=105\text{А};$ $U=19\text{В};$ $V_{зв.}=35\text{см/хв};$ $V_{п.д.}=5,5\text{м/хв}$	
3 Дугове паяння		CuAl8, аргон	Перший шар: $d_e=1,2\text{мм};$ $I=120\text{А};$ $U=19,4,1\text{В};$ $V_{зв.}=40\text{см/хв};$ $V_{п.д.}=3,7\text{м/хв}.$ Другий шар: $d_e=1,2\text{мм};$ $I=140\text{А};$ $U=19,9\text{В};$ $V_{зв.}=40\text{см/хв};$ $V_{п.д.}=4,4\text{м/хв}$	
4 Дугове зварювання		Св-08Г2С, Ar 82%+ CO ₂ 18%	$d_e=1,2\text{мм};$ $I=170\text{А};$ $U=20\text{В};$ $V_{зв.}=30\text{см/хв};$ $V_{п.д.}=4,0\text{м/хв}.$	
5 Дугове зварювання		Св-08Г2С, Ar 82%+ CO ₂ 18%	Перший шар: $d_e=1,2\text{мм};$ $I=150\text{А};$ $U=17,7\text{В};$ $V_{зв.}=25\text{см/хв};$ $V_{п.д.}=4,4\text{м/хв}.$ Другий шар: $d_e=1,2\text{мм};$ $I=160\text{А};$ $U=19\text{В};$ $V_{зв.}=28\text{см/хв};$ $V_{п.д.}=4,4\text{м/хв}$	

* **Примітка:** d_e – діаметр електродного дроту; I – струм зварювання та паяння; U – напруга дуго; $V_{зв.}$ – швидкість зварювання; $V_{п.д.}$ – швидкість подачі дроту.

2.4 Прилади та методи дослідження механічних властивостей зварних з'єднань

Для контролю зміни механічних властивостей і структурних перетворень зварних з'єднань при дуговому паянні та зварюванні в даній роботі проводились наступні дослідження та випробування:

1) аналіз макроструктури та мікроструктури зварних з'єднань згідно методики [6] з використанням оптичного мікроскопа;

2) вимірювання мікротвердості проводилось за методикою [7] за допомогою мікротвердоміра ПМТ-3;

3) вимірювання твердості по Роквеллу проводилось з допомогою твердоміра ТК-2 за методикою[8];

4) випробування зварних з'єднань на статичний розтяг та кут загину згідно методики [9], проводились з використанням випробувальної машини УММ-50;

5) теоретичні дослідження корозійної стійкості паяних з'єднань за розподілом температури в перерізі з'єднань та визначенні розмірів ділянок пошкодженого покриття;

б) теоретичні та експериментальні дослідження напружено-деформованого стану зварних та паяних з'єднань труб.

2.4.1 Металографічні дослідження

Металографія є одним з основних методів вивчення мікроструктури. Мікроструктуру металу вивчають при збільшенні в 30 - 1500 разів за допомогою оптичних мікроскопів на спеціально підготовлених зразках-шліфах (полірованих і протравлених). Метод заснований на різниці в протравлюванні бездефектного металу і ділянок з наявністю пор, ліквацій, неоднорідності структури і інших дефектів. Будову металу при збільшенні в 3000 - 100 000 разів вивчають за допомогою електронних мікроскопів.

Дослідження мікроструктури дозволяє встановити фазовий склад, величину зерна і міру зростання величини міжзернових границь, наявність і розміри неметалічних включень, міру сфероїдизації перліту, характер і глибину

термічної обробки, наявність міжкристалітної корозії, наявність пошкоджень (воднева корозія).

Застосування сучасних цифрових технологій дозволяє суттєво знизити трудомісткість металографічних досліджень і підвищити об'єктивність кількісних оцінок. Реєстрація зображення мікроструктури в металографічних мікроскопах при цьому здійснюється за допомогою цифрових фото- або відеокамер. Далі зображення вводиться в комп'ютер, де обробляється за допомогою спеціальної програми-аналізатора.

Із готових взірців зварних та паяних з'єднань вирізались темплети для подальших мікроструктурних досліджень. Для збереження плоско-паралельності поверхні шліфа при подальшому шліфуванні шліфів, вирізані темплети вставили в обойму та залили епоксидною смолою.

При проведенні досліджень вирізування зразків для металографії проводилось на спеціальному верстаті для вирізування металографічних зразків (Q-80Z (УРМО-80А), (рис.2.3), який забезпечує автоматичне підтримування заданої швидкості різання (в даному випадку – не більше 2,25 мм/хв) відрізним абразивним кругом та інтенсивне охолодження зразка під час різання охолоджуючою рідиною (водно-масляна емульсія) для запобігання спотворення мікроструктури металу в зоні різання.



Рисунок 2.3 – Загальний вигляд верстата УРМО – 80А для вирізування металографічних зразків

Вирізані зразки піддавалися подальшому шліфуванню і поліруванню поверхонь поперечного перерізу отриманих дуго-паяних з'єднань. При цьому дані операції не повинні деформувати і спотворювати структуру металу поверхні зразка, що повинно забезпечуватись плавним натисканням зразка всією плоскою поверхнею до абразивного матеріалу.

Процес шліфування проводився на пристрої для шліфування та полірування металографічних зразків УШПО-1 (рис.2.4) з використанням дискових абразивних вставок зернистістю від 125 мкм до 5 мкм (P100 – P2500 у відповідності з ISO-6344) і безперервною подачею охолоджуючої рідини для запобігання локального перегріву поверхні металу.



Рисунок 2.4 – Загальний вигляд пристрою УРМО – 80А для шліфування і полірування металографічних зразків

Швидкість обертання диска пристрою встановлювалась у діапазоні 600 – 700 хв^{-1} .

Промиті і просушені зразки після шліфування піддавалися поліруванню на пристрої УРМО - 80 з використанням фетрового круга, змоченого суспензією дистильованої води і дрібнодисперсного порошку оксиду алюмінію. Також при підготовці зразків використовувати абразивний матеріал пасти ГОИ (середньої і тонкої № 1 і № 2). Середня паста, зеленого кольору, давала чисту поверхню. Тонка паста використовувалася для тонкого доведення, надання дзеркального блиску. Швидкість обертання шліфувального диска пристрою не перевищувала 600 хв^{-1} .

Підготовлені шліфи з'єднань для макро- та мікроструктурних досліджень показано на рис. 2.5

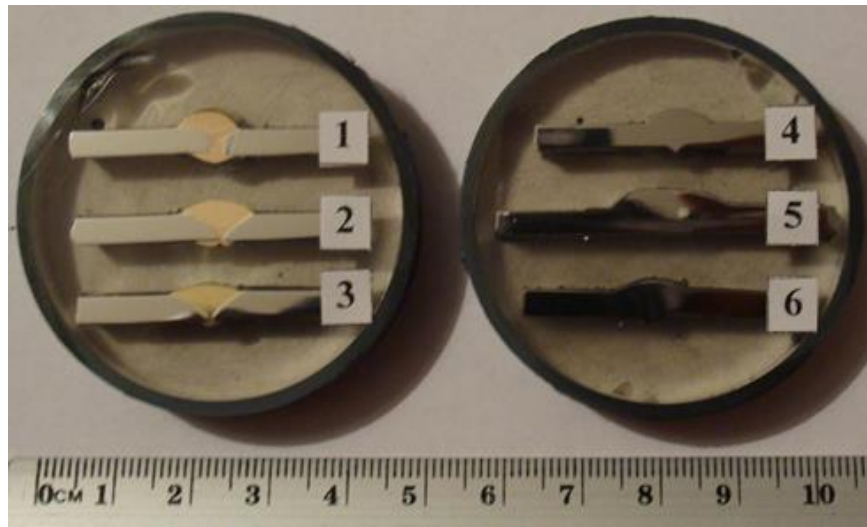


Рисунок 2.5– Шліфи паяних та зварних з'єднань

Для виявлення мікроструктури отриманих зразків з'єднань труб ПМТП-150 застосовували хімічне травлення. Для травлення, як правило, використовують слабкі спиртові розчини або слабкі водні розчини різних кислот, що зменшують швидкість травлення. Якщо в результаті шліфування і полірування на поверхні мікрошліфа утворюється плівка деформованого металу, що погано піддається травленню, то спочатку реактив діє повільно, а після видалення цієї плівки інтенсивність травлення зростає. Повторне переполірування і травлення дало можливість отримати мікрошліфи хорошої якості.

Підготовлені поверхні металографічних зразків для виявлення мікроструктури піддавались хімічному травленню 5%-ним спиртовим розчином пікринової кислоти, згідно з рекомендаціями ГОСТ 5639-82. Дану кислоту рекомендують застосовувати для травлення вуглецевих і легованих сталей, бо вона забезпечує рівномірне травлення, дає структуру з тонкими деталями, не забруднює ферит продуктами травлення, добре виявляє карбіди і перліт.

Для травлення отриманих дуго-паяних з'єднань реактив наливався у фарфорову чашку, підготовлений шліф поміщався чистою відполірованою і промитою поверхнею на декілька секунд у реактив. Відомо, що тривалість витримки повинна бути різною для різних типів структур. У даному випадку перлітні структури протравлювались швидко, а феритні більш повільно. Після травлення шліф промивався сильним струменем води, на 1 – 2 сек. поміщався в чистий спирт і висушувався паперовими серветками, після чого шліф вивчався під мікроскопом для визначення повноти травлення досліджуваної поверхні. Якщо зображення структури було нечітким, то процес травлення повторювався знову.

Фотографування проводилось при прямому освітленні із використанням плоско-паралельної пластинки, що дозволило отримувати найдрібніші деталі мікроструктури. При розгляданні зображень, а також при їх фотофіксації, для усунення поштовхів і тремтіння мікроскопа, що можуть викликати появу розмитих зображень, мікроскоп встановлювався на гумову підставку, а досліджуваний зразок фіксувався на робочому столі мікроскопа за допомогою спеціальної притискної пластини. Ретельним був процес фокусування зображення, особливо на великих кратностях збільшення, оскільки недостатня різкість деталей мікроструктури при фотографуванні посилюється і знімок може вийти нечітким і розмитим.

Мікрофотознімки були зроблені на металографічному мікроскопі ММО-1600АТ за допомогою цифрової камери КММ-5 (рис.2.6) для металографічного мікроскопа при збільшеннях 100, 200 і 400. Металографічний мікроскоп серії ММО-1600АТ застосовується в металографії для ідентифікації і аналізу структури різних металів і сплавів з діапазоном збільшення $100^x - 1600^x$ при візуальному спостереженні і $100^x - 1000^x$ при фотографуванні.

Фотографування зображень мікроструктури проводилось пошарово, виділяючи шари, що відповідають різним зонам отриманих з'єднань. Результати мікрофотографування кратністю 100^x зберігались у пам'яті ПЕОМ із спеціалізованим програмним забезпеченням для подальшого аналізу.



Рисунок 2.6 – Загальний вигляд металографічного мікроскопа ММО-1600АТ в комплекті з цифровою камерою КММ-5

Оцінку кількості, типу, співвідношення та дисперсності структурних складових проводили згідно вимог ГОСТ 5639-82 методом порівняння з еталонними шкалами.

Після дослідження мікроструктури шліфи зразків використовувались для вимірювання мікротвердості в різних ділянках зварних та паяних з'єднань, а також для узагальненого вимірювання твердості.

2.4.2 Вимірювання мікротвердості

Вимірювання мікротвердості в різних ділянках зварних швів дає можливість виявити наявність ділянок хімічної неоднорідності, неметалевих включень інтерметалідів, бо вони можуть суттєво впливати на їх властивості.

Визначення мікротвердості проводилось у відповідності з вимогами ГОСТ 9465-76 на мікротвердомірі ПМТ-3 методом відновленого відбитка [10].

Даний метод полягає у вдавлюванні в досліджувану поверхню індентора під навантаженням менше $2H$ (200 μ). В якості індентора застосовувалась алмазна пірамідка з квадратною основою та кутом при основі 136° . Вибір ділянки для

випробування мікротвердості та фіксування розмірів відбитку проводили під мікроскопом мікротвердоміра, на який закріпили цифрову камеру.

Для визначення мікротвердості у всіх зонах перерізу зварного шва відбитки накладали по осі зварюваних кромок від середини зварного шва з кроком 0,5мм (рис. 2.7).

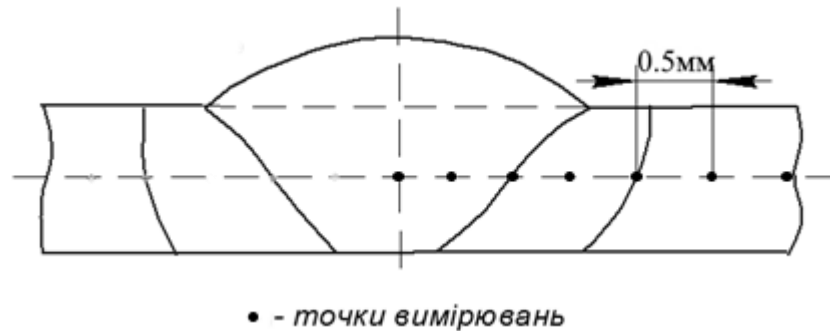


Рисунок 2.7 – Схема вимірювання мікротвердості.

Виміри розмірів відбитка проводили за знімками відбитків в графічному редакторі.

При випробуванні на мікротвердість чисельним значенням результату вимірювання є частка від ділення навантаження (P , $г$) на бічну поверхню відбитку (F , $мм^2$), припускаючи, що кути відбитку такі ж як і у самої піраміди:

$$H = \frac{P}{F} = 2 \sin \frac{\alpha}{2} \cdot \frac{P}{d^2}, \text{ кг} / \text{ мм}^2, \quad (2.1)$$

при $\alpha=136^\circ$

$$H = 1,854 \frac{P}{d^2}, \text{ кг} / \text{ мм}^2,$$

де d – довжина діагоналі відбитку в $мм$;

α – кут між гранями наконечника;

P – навантаження на піраміду в $кг$.

2.4.3 Визначення механічних властивостей зварних з'єднань за показником твердості

Твердість низьковуглецевих, низьколегованих та легованих сталей характеризує межу міцності металу. Це пов'язано з тим, що пластична

деформація, отримувана при втисканні наконечника під час вимірювання твердості, аналогічна до деформації руйнування зразка при статичному випробуванні на розтяг [11]. Тому вимірювання твердості дасть можливість охарактеризувати міцність зварних та паяних з'єднань.

Проаналізувавши статичні та динамічні методики вимірювання твердості [12], а також геометричні розміри перерізу зварних з'єднань, було вирішено застосувати методику вимірювання Роквелла по шкалі «В». Індентором використовували сталеву кульку діаметром 1,588 мм, бо вона залишає невеликі відбитки (максимальним діаметром 0,26 мм).

За рекомендаціями ГОСТ 9013-59 відстань від центру відбитка до краю кромки повинна бути не менше 1 мм, а крок між центрами відбитків - не менше 2 мм. Вимірювання твердості проводили по перерізу зварного з'єднання, по осі кромок з кроком 2 мм між точками.

Емпіричні залежності між твердістю металу та його механічними характеристиками: межею міцності та межею текучості, вперше були встановлені І. Брінеллем, а також експериментально досліджувались та відображені в роботах таких вчених як Д. Тейбор, М.С. Дрозд, М.П. Марковец, Г.П. Зайцев та інших. На основі цих досліджень було розроблено методи визначення механічних властивостей матеріалів за їх твердістю [13].

Залежність між межею міцності металу та його твердістю запропонована Брінеллем має вигляд:

$$\sigma_B = k \cdot HB, \quad (2.2)$$

де HB – твердість матеріалу за шкалою Брінелля, $МПа$;

k – коефіцієнт пропорційності рівний 0,346.

Методики визначення механічних властивостей за твердістю викладені в роботах [14, 15] і засновані на визначенні максимальної твердості та відносного числа твердості, дають практично той самий результат, що і попередня методика, яка є значно простішою.

Визначення межі міцності σ_B за результатами вимірювання твердості за Брінеллем також рекомендується дослідниками [16, 17], та встановлює коефіцієнт k , для вуглецевих та низьколегованих сталей $k=0,36$ за умови, що $HB < 1500$ МПа, та $k=0,345$ при $HB > 1500$ МПа.

За числом твердості також можна визначити орієнтовну межу текучості:

- для величин твердості $HB \geq 1500$ МПа

$$\sigma_T = 0,367 \cdot HB - 240, \quad (2.3)$$

- для величин твердості $HB < 1500$ МПа

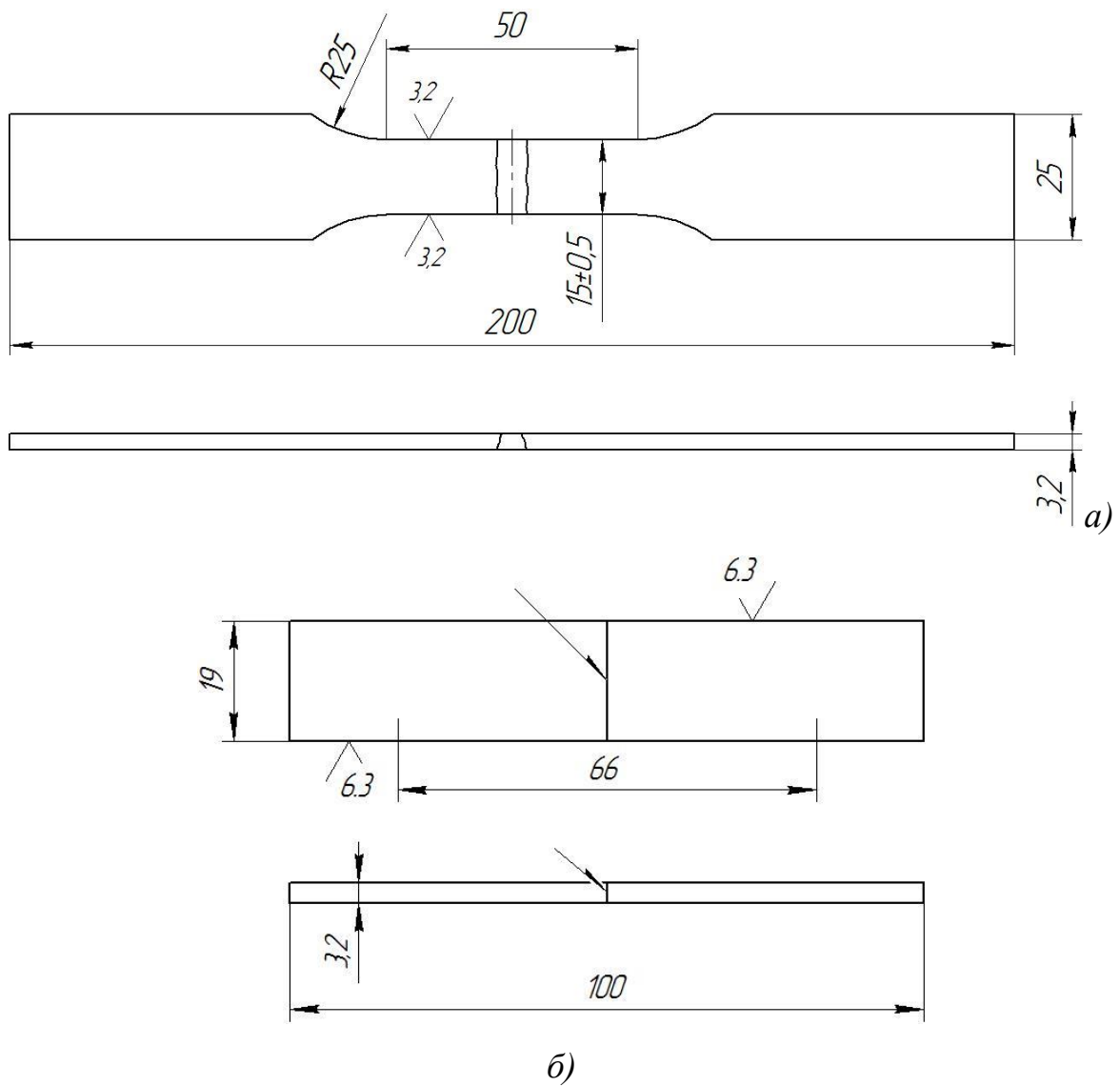
$$\sigma_T = 0,2 \cdot HB. \quad (2.4)$$

Механічні властивості, визначені за числом твердості, є узагальненими, тому для більш точного визначення властивостей зварних з'єднань потрібно провести більш детальні дослідження.

2.4.4 Зразки та обладнання для випробувань на розтяг і згин

Одними із основних і найбільш поширених методів механічних випробувань зварних з'єднань є випробування на статичний розтяг і згин. Дані випробування регламентуються ГОСТ 6996-66.

Для випробування на розтяг і згин із попередньо виготовлених натурних зразків зварних і паяних з'єднань було вирізано по три плоских зразки впоперек зварного з'єднання. Дані зразки було оброблено на фрезерному верстаті для надання їм необхідних геометричних розмірів. Розміри та форма зразків, які були використані для дослідження на розтяг і згин показані на рис. 2.8 та відповідають вимогам ГОСТ 6996-66 і ГОСТ 1497-84.



a) – зразок для випробування на розтяг; *б)* – зразок для випробування на згин

Рисунок 2.8 – Форма та геометричні розміри плоских зразків

Випробування розтягу та згину зварних та паяних з'єднань проводились на універсальній випробувальній машині УММ-50 в лабораторії механічних і хімічних характеристик металу ПРАТ «Івано-Франківський арматурний завод». Загальний вигляд випробувальної машини та процес проведення випробування показано на (рис. 2.9).



Рисунок 2.9 – Загальний вигляд універсальної випробувальної машини УММ-50

2.5 Методика вимірювання напружено-деформованого стану паяних з'єднань труб при навантаженні внутрішнім тиском

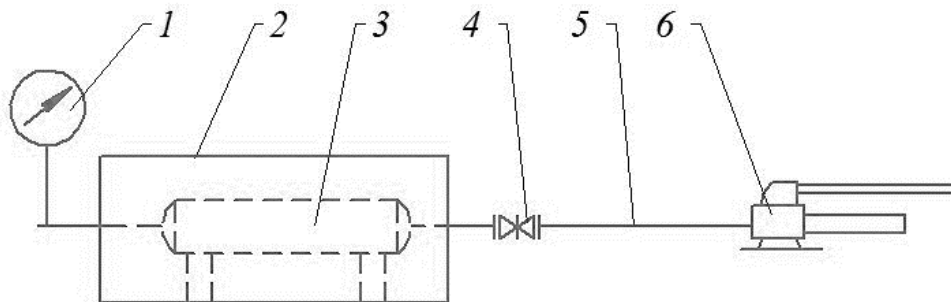
Польові магістральні трубопроводи належать до металевих конструкцій, що працюють в умовах складного напруженого стану під дією внутрішнього тиску. Тому для оцінки міцності зварних з'єднань труб ПМТП потрібно провести

випробування паяних з'єднань стиків труб під дією статичного навантаження внутрішнім тиском.

Діючі стандарти не регламентують вимог до зразків та методики випробувань складного напружено-деформованого стану, тому найбільш достовірним буде випробування зразків в умовах напруженого стану, близьких до умов експлуатації, які реалізуються при навантаженні трубчастого зразка внутрішнім тиском.

Оскільки стандартами не передбачено чітких вимог до розмірів зразків для дослідження напружено-деформованого стану під дією внутрішнього тиску, зразки в даній роботі виготовлялись за рекомендаціями, викладеними в роботі [18]: довжина розрахункової ділянки тонкостінних трубних зразків повинна бути більше трьох діаметрів труби, щоби уникнути так званого крайового ефекту.

Для навантаження зразків внутрішнім тиском було виготовлено випробувальний стенд, принципова схема якого показана на рисунку 2.10.



1 – манометр; 2 – захисний кожух; 3 – досліджуваний зразок; 4 – кран високого тиску; 5 – з'єднувальний рукав; 6 – насос

Рисунок 2.10 – Схема лабораторного стенду для випробувань внутрішнім тиском

Для визначення напружень та деформацій на стінках труб поблизу кільцевого шва було застосовано метод тензометрії, бо він є найбільш поширеним та має певні переваги: найкраще задовольняє критерій ціна-ефективність та оптимально поєднує характеристики. Тензорезистори широко застосовуються як чутливі елементи датчиків, розроблених для вимірювання сил, переміщень, моментів, тиску та ін.

Вимірювання кільцевих напружень проводилось у восьми точках перерізу стика трубних зразків (по периметру шва) наклеюванням датчиків поблизу шва в поперечному напрямку. Для цього використовували тензорезистори марки 2ПКП-15-200В, які з'єднувались за схемою півмоста Уїтстона (рис. 2.11) [19].

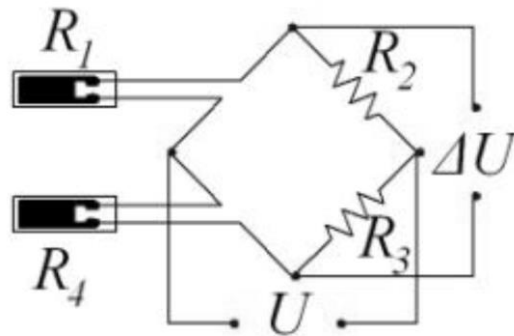


Рисунок 2.11 – Схема з'єднання тензорезисторів

На даній схемі зображений один із тензорезисторів, який є активним та приклеюється безпосередньо до зразка, що піддається деформуванню. Другий тензорезистор є пасивним і розташований поблизу першого на спеціальній діелектричній підкладці та не піддається деформації. Підготовлений зразок з тензорезисторами показано на рисунку 2.12.



Рисунок 2.12 – Підготовлений зразок з тензомостами

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» (рис. 2.13).

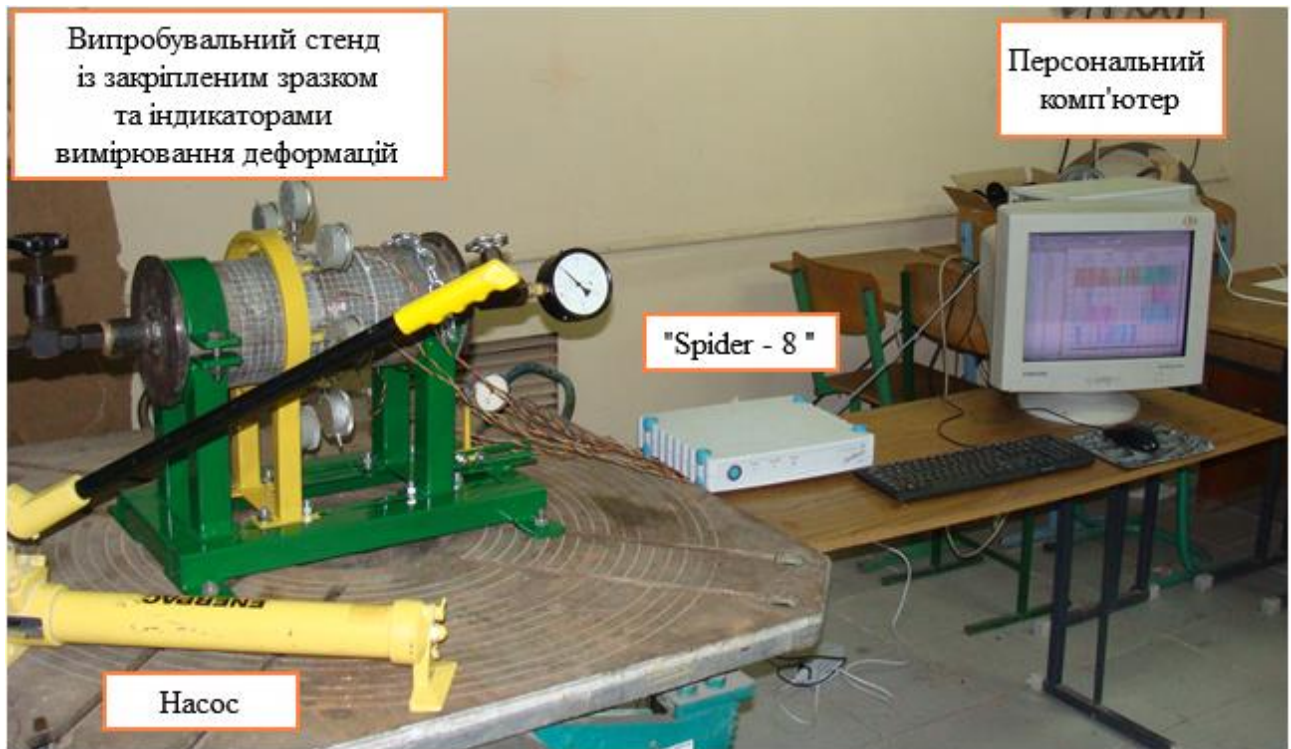


Рисунок 2.13 – Випробувальний стенд з обладнанням для вимірювання та реєстрації напружень і деформацій

Реєструючий мобільний цифровий підсилювач «SPIDER-8» фірми НВМ - це електронна вимірювальна система для електричних вимірювань механічних величин, яка обслуговує сигнали, включаючи збудження пасивних давачів, підсилення, оцифрування та зв'язок з комп'ютером. Перевагою даного приладу є його мобільність та можливість живлення від напруги 12 В, що значно розширює можливості його застосування.

Принцип роботи «SPIDER-8» полягає у визначенні співвідношення падіння напруги тензомоста до вхідної напруги – mV/V . Результати випробувань

відображені у вигляді графіка залежності показника $\mu\text{m/m}$ від часу (рис. 2.14), а також можуть зберігатись у числовому форматі для подальшого оброблення.

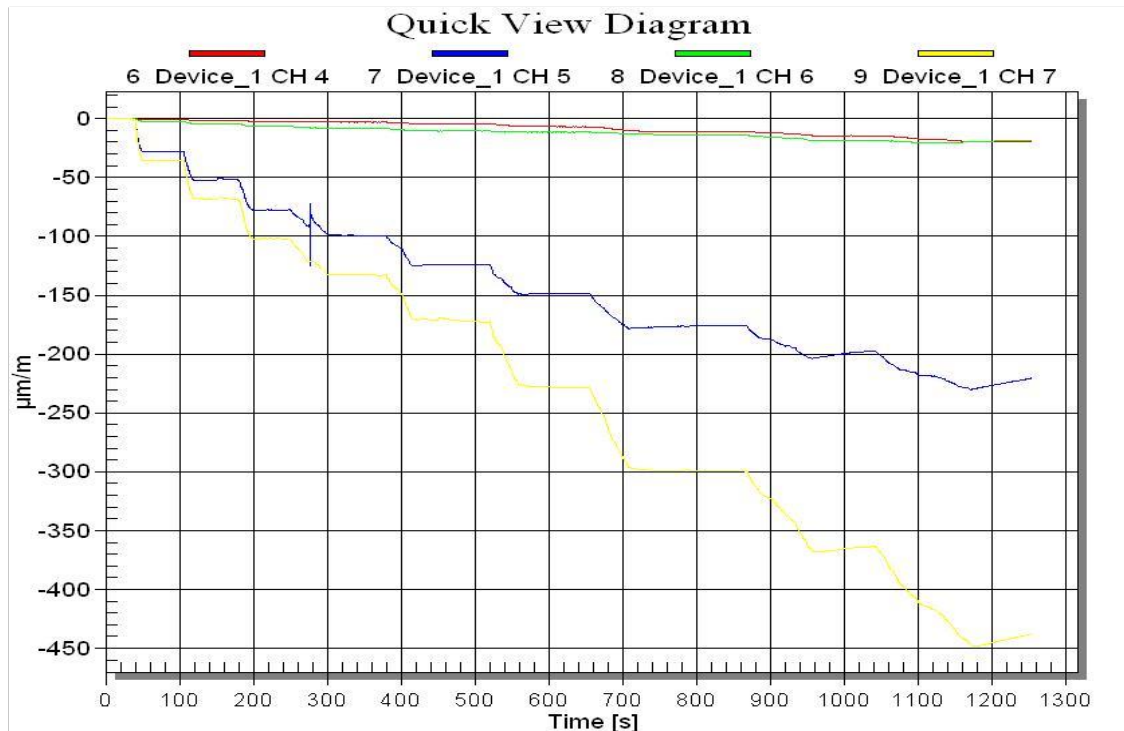
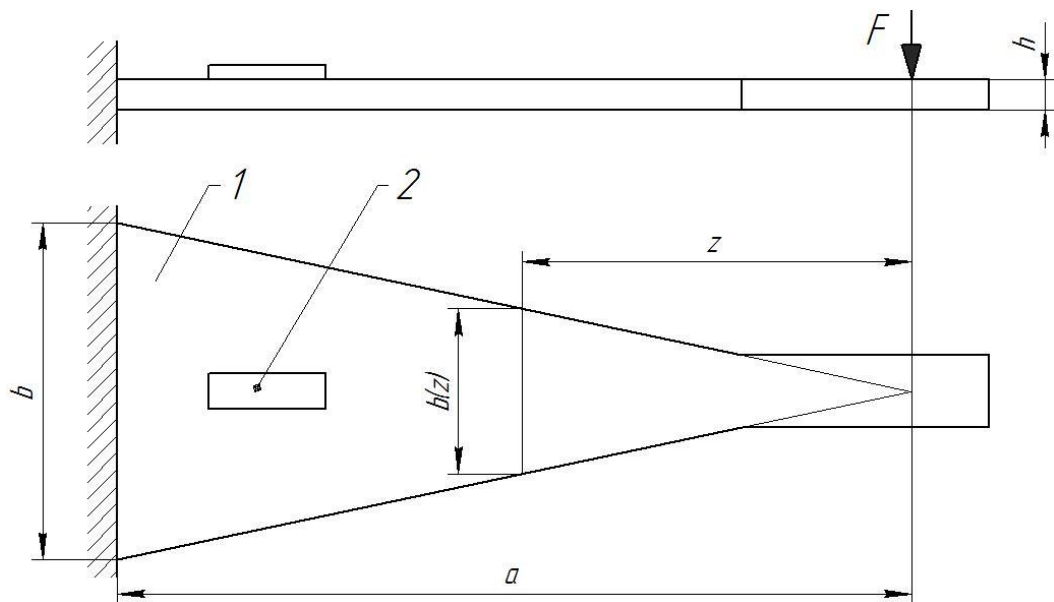


Рисунок 2.14 – Запис показів тензомостів реєструючим пристроєм «SPIDER-8»

Для визначення величини напружень потрібно провести перетворення величини $\mu\text{m/m}$ в зусилля та переміщення, тобто тарування тензорезисторів. Тарування дозволяє встановити чутливість тензометричної системи до вимірюваної величини та перевірити роботу системи у всьому діапазоні вхідної величини [20]. Еталоном деформацій була балка рівного опору, виготовлена із досліджуваної труби (рис 2.15).

Завдяки клиноподібній формі деформації по всій довжині балки залишаються однаковими. На клиноподібній частині балки наклеювались тензорезистори, а в точці перетину бокових сторін прикладалось навантаження. Дані від тензорезисторів через реєструючий пристрій «Spider-8» передавались на персональний комп'ютер.



1 – балка; 2 - тензорезистор

Рисунок 2.15 – Балка рівного опору для тарування тензорезисторів

Деформація балки від згину фіксувалась цифровим індикатором переміщень (рис. 2.16).



Рисунок 2.16 – Процес тарування тензорезисторів

Приріст напружень ($\Delta\sigma$, МПа) в балці можна виразити через навантаження та розміри поперечного перерізу балки [21]

$$\Delta\sigma = \frac{\Delta M}{W}, \quad (2.5)$$

де ΔM – приріст згинального моменту; W – момент опору балки в перерізі, де наклеєний тензодатчик

$$\Delta M = \Delta F \cdot z, \quad (2.6)$$

$$W = \frac{b \cdot h^2}{6}, \quad (2.7)$$

Підставивши 2.6 та 2.7 у формулу 2.5, отримаємо

$$\Delta\sigma = \frac{6 \cdot \Delta F \cdot z}{b \cdot h^2}.$$

Ціну поділки приладу для напружень можна виразити як співвідношення приросту напружень до середнього приросту показів реєструючого пристрою

$$c_\sigma = \frac{\Delta\sigma}{\Delta n_{сер}}. \quad (2.8)$$

Підставивши відповідні числові значення у формули 2.5-2.8 встановлено, що ціна поділки реєструючого пристрою для напружень становить $c_\sigma = 0,7$ МПа.

За результатами отриманих даних побудовано тарувальний графік функціональної залежності величини деформації від показника реєструючого приладу $\mu\text{m}/\text{m}$ (рис. 2.17).

Провівши апроксимування даних тарування поліномом першого ступеня, отримали коефіцієнт регресії 99,3%, що свідчить про лінійність показників реєструючого пристрою та їх високу точність.

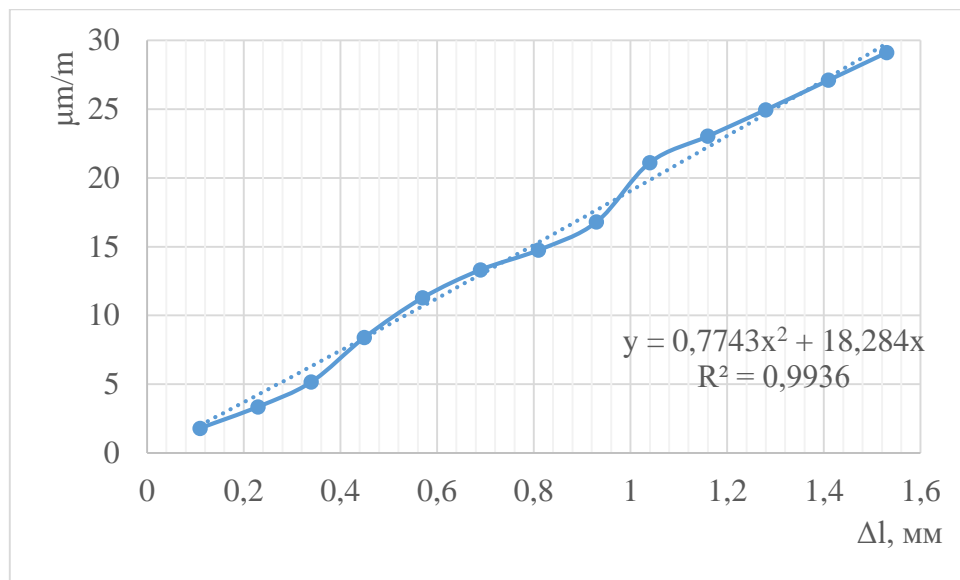


Рисунок 2.17 – Тарувальний графік

Знаючи величину відносної деформації, можна визначити ціну поділки реєструючого пристрою для деформацій

$$c_{\varepsilon} = \frac{\varepsilon}{\Delta n_{сер}}. \quad (2.9)$$

Підставивши дані у формулу 2.9, встановлено ціну поділки реєструючого пристрою для визначення деформацій $c_{\varepsilon} = 0,005$ мм.

Висновки до другого розділу

- 1) Скомпоновано та зібрано установку для дугового паяння та зварювання зразків труб польового магістрального трубопроводу ПМТП-150;
- 2) Для дослідження з'єднань оцинкованих труб дуговим паянням та зварюванням, у даній роботі проаналізовано та вибрано необхідні присадкові матеріали;
- 3) Для металографічних досліджень властивостей зварних та дуго-паяних з'єднань труб вивчено методику підготовки зразків та проведення досліджень;
- 4) Освоєно методику підготовки зразків та проведення дослідження міцності зварних та паяних з'єднань оцинкованих труб;

5) Розроблено дослідний стенд та освоєно методику тензометричного дослідження напружено-деформованого стану зварних та паяних з'єднань труб при їх навантаженні внутрішнім тиском;

б) Відпрацьовано методику тарування показів реєструючого пристрою «Spider-8» для визначення напружень та деформацій.

Список використаних джерел у розділі 2

1. Зубченко А.С., Колосков М.М., Каширский Ю.В. и др. Марочник сталей и сплавов: справочник / под ред. Зубченко А.С. Москва: Машиностроение, 2003. 782 с.

2. ГОСТ 16037-80 Соединения сварные стальных трубопроводов. [Введен 1981-01-07]. Москва: Издательство стандартов, 1999. 23 с.

3. Костін О.М. Зварювальні матеріали: навчальний посібник. Миколаїв: НУК, 2004. 225 с.

4. Cusi3 MIG wires - non ferrous. URL: www.ambler.lv/.../28b7758fc2ef8de2f510fbdd4db6865c.pd... (дата звернення: 11.05.2015).

5. Комплект импульсно-дуговой сварки для сварочной системы MIG/MAG TPS/i. / Информация от ООО Фрониус Украина. *Автоматическая сварка*. 2014. № 11. С. 59–60.

6. Россошинский А. А. Металлография сварных швов. Киев: Машгиз, 1961. 205 с.

7. ГОСТ 9450-76 (СТ СЭВ 1195-78). Измерение микротвердости вдавливанием алмазных наконечников. [Введен 1977-01-01]. Москва: Издательство стандартов, 1993. 35 с.

8. ГОСТ 9013-59 (ИСО 6508-86) .Металлы. Метод измерения твердости по Роквеллу. [Введен. 1969-01-01]. Москва: ИПК Издательство стандартов, 2001. 13 с.

9. ГОСТ 6996-66. Механические испытания сварных соединений. [Введен 1967.01.01]. Москва: Издательство стандартов, 1991. 29с.

10. Григорович В. К. Твердость и микротвердость металлов. Москва: Наука, 1976. 230 с.
11. Дрозд М. С. Определение механических свойств металла без разрушения. Москва: Металлургия, 1965. 170 с.
12. Гудков А. А., Славский Ю.И. Методы измерения твердости металлов и сплавов. Москва: Металлургия, 1982. 162 с.
13. Стоев П. И., Мощенюк В. И., Определение механических свойств металлов и сплавов по твердости. *Вестник Харьковского научного университета им. Каразина*. 2003. С. 106–112.
14. Дрозд М. С. Определение механических свойств металлов без разрушения. Москва: Изд-во Металлургия, 1965. 171 с.
15. Марковец М. П. Определение механических свойств металлов по твердости. Москва: Машиностроение, 1979. 191 с.
16. СОУ 60.3-30019801-007:2004. Магістральні газопроводи. Неруйнівний контроль при капітальному ремонті. [Чинний від 2004-10-01]. Державна компанія «Укртрансгаз».
17. НПАОП 0.00-7.02-93. Проведение работ по оценке остаточной работоспособности технологического оборудования нефтеперерабатывающих, нефтехимических и химических производств (ДНАОП 1.3.00-8.02-93). [Введен 1993-05-19]. Киев, 1993.
18. Букеткин Б. В., Горбатовский А. А., Кисенко И. Д. и др. Экспериментальная механика. Москва: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. 136 с.
19. Мехеда В. А. Тензометрический метод измерения деформаций: учеб. Пособие. Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2011. 56 с.
20. Макаров Р. А., Ренский А. Б., Боркунский Г. Х. и др. Тензометрия в машиностроении. Справочное пособие. Москва: Машиностроение, 1975. 288 с.
21. Атапин В. Г. Сопротивление материалов. Краткий теоретический курс: учебное пособие. 2011. 204 с.

РОЗДІЛ 3

ДОСЛІДЖЕННЯ МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ТА КОРОЗІЙНОЇ СТІЙКОСТІ ЗВАРНИХ І ПАЯНИХ З'ЄДНАНЬ

Основними вимогами надійності з'єднань стиків оцинкованих труб польових магістральних трубопроводів є міцність та збереження цілісності захисного покриття. Міцність та корозійна стійкість з'єднань матеріалів із захисним цинковим покриттям залежить від багатьох факторів, але вирішальний вплив має термомодеформаційний цикл дугового процесу.

У третьому розділі показано результати досліджень механічних властивостей та корозійної стійкості з'єднань труб ПМТП-150, виконаних методами дугового паяння та зварювання.

3.1 Металографічні дослідження зварних і паяних з'єднань

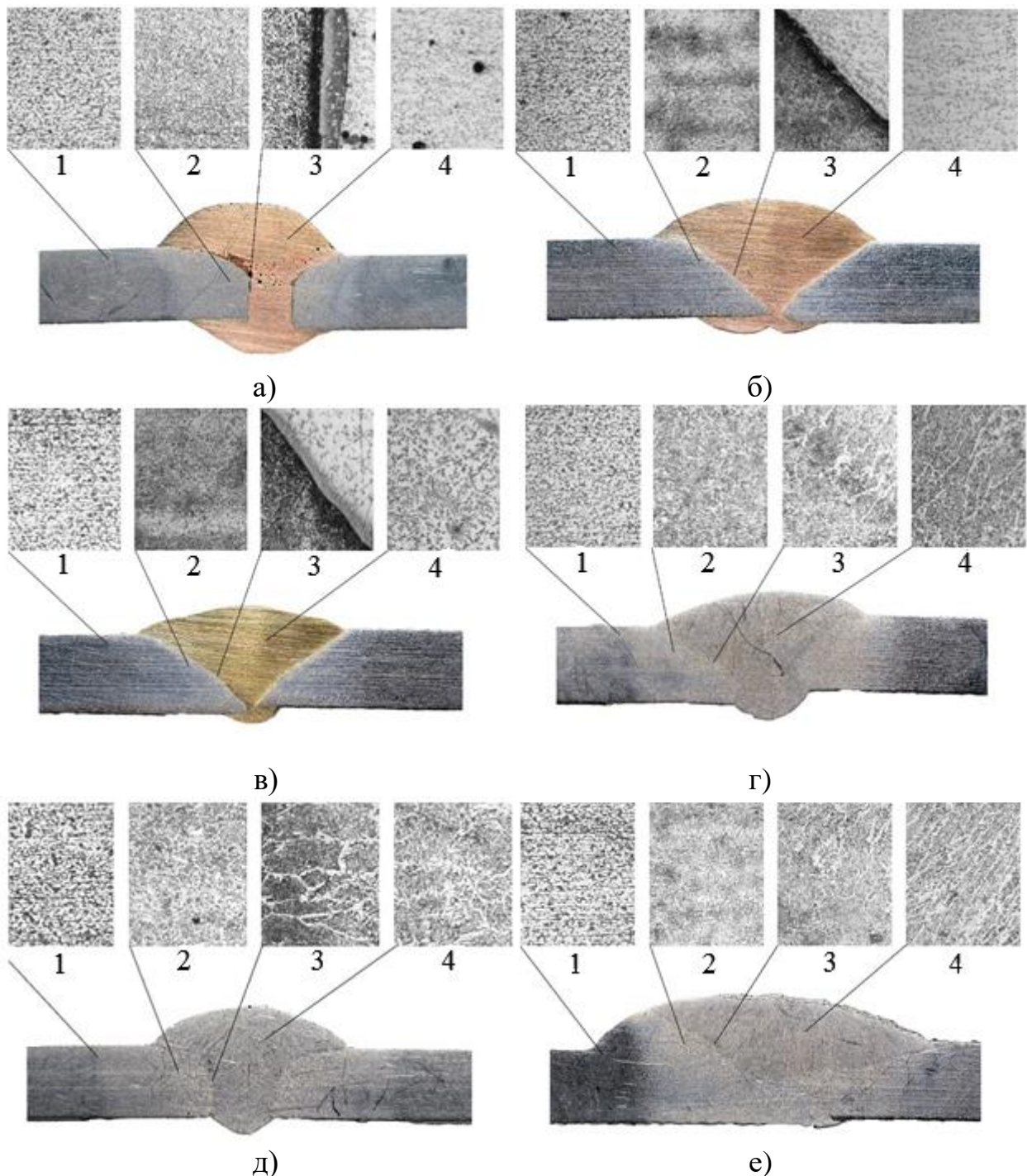
Формування з'єднань при дуговому паянні відбувається під час процесів фізико-хімічної взаємодії між рідким припоєм та основним металом. Особливостями паяних з'єднань є утворення наступних ділянок:

- 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 через термічний цикл паяння).

Проведений аналіз процесів, що відбуваються при утворенні дуго-паяних з'єднань показав, 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 оцінки рівня міцності.

Тому для оцінки міцності з'єднань труб польових магістральних трубопроводів проведено металографічні дослідження з'єднань, виконаних

методами дугового паяння та зварювання [1]. На рисунку 3.1 зображено мікроструктури різних зон паяних та зварних з'єднань при кратності збільшення у 100 разів.



а) – з прямими кромками, шов CuSi_3 ; б) – з V-подібними кромками шов CuSi_3 ;
 в) – V-подібними кромками шов CuAl_8 ; г) – зі V-подібними кромками шов
 Св-08Г2С; д) – з прямими кромками шов Св-08Г2С; е) – із заводської труби
 1 – основний метал; 2 – зона термічного впливу; 3 – лінія сплавлення; 4 – шов

Рисунок 3.1 - Макроструктура ($3\times$) та мікроструктура ($100\times$) з'єднань

Як свідчать результати мікроструктурних досліджень у паяних з'єднаннях, отриманих з використанням кремнистої бронзи CuSi3 (рис. 3.1, а,б), між основним та присадковим металом формується виражена дифузійна зона (шириною ~ 30 мкм), сформована при утворенні суміші евтектичного типу. Як бачимо, товщина дифузійної зони у всіх трьох паяних зразках є різною, оскільки дугове паяння всіх зразків проводилось з різними параметрами режиму, а відповідно і теплова потужність теж була різною.

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 (ϵ -фаза) [2]. 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. Їх форма та характер розподілу свідчать про утворення фаз на основі силіцидів заліза [3], які сприяють зміцненню наплавленого металу завдяки блокуванню руху дислокацій відповідно до механізму Орована [4], а також підвищення міцності через подрібнення розмірів зерен та прояву ефекту Холла-Петча. Наведений характер зміцнення більш виразно проявляється при дуговому паянні присадковим матеріалом із алюмінієвої бронзи (CuAl8) (рис. 3.1, в), оскільки дисперсні включення у шві - це інтерметалідні фази Fe_xAl_y , рівень фізико-механічних властивостей яких є суттєво вищим порівняно із силіцидними фазами заліза [5], а їх об'ємна концентрація у металі шва є практично у 2 рази вищою, що суттєво посилює ефективність дисперсного зміцнення [6]. При цьому дифузійна зона таких з'єднань характеризується більш дисперсною та рівномірною мікроструктурою.

Мікроструктура зразків зварних з'єднань та вирізаного із заводської труби, яке також виконане дуговим зварюванням дротом Св-08Г2С є практично однаковими. Перехід від основного металу до металу шва в зоні сплавлення свідчить про хороше перемішування розплавленого металу в зварювальній ванні. На зварному з'єднанні з V-подібним обробленням кромки та заводському (рис.

3.1, г,е) спостерігається виражена ділянка перегріву, оскільки дані з'єднання виконувались у два шари.

Також зона термічного впливу зварних з'єднань, на відміну від паяних, є набагато більшою, що є цілком закономірним та пояснюється тим, що температурний вплив при дуговому паянні є меншим, ніж при зварюванні.

Таким чином, структура та, відповідно, механічні властивості металу окремих зон і ділянок з'єднання неоднакові. Найбільш низькі механічні властивості спостерігаються в зоні термічного впливу, на межі сплавлення. Ці різні властивості з'єднань суттєво проявляються при експлуатації в умовах динамічних і циклічних навантажень.

Малі розміри зони термічного впливу та відсутність ділянки перегріву надають вагому перевагу паяним з'єднанням над зварними, але потрібні більш детальні дослідження характеристик їх міцності.

3.2 Дослідження мікротвердості зварних і паяних з'єднань

Як уже зазначалось вище, формування з'єднань при дуговому паянні відбувається під час дифузійного процесу, який в значній мірі залежить від термічного циклу зварювання та впливає на механічні властивості з'єднань.

Щоб оцінити вплив теплоти на розміри зони термічного впливу та її твердість, було проведено вимірювання мікротвердості в перерізі паяних з'єднань від центру шва (рис. 3.2 – 3.4) [7].

Графічно відображений розподіл мікротвердості в перерізі з'єднань показує, що твердість металу шва паяних з'єднань є меншою щодо основного металу, що і слід було очікувати для м'якої матриці на основі міді (рис. 3.2 – 3.3).

На межі поділу між швом основним металом паяних з'єднань спостерігається підвищення твердості, потім вона падає через присутність твердого розчину на основі Cu (ϵ -фаза) в дифузійній ділянці.

Порівнюючи мікротвердість з'єднань, виконаних дуговим паянням дротами CuSi3 і CuAl8, а також дуговим зварюванням дротом Св–08Г2С, бачимо

зростання твердості вздовж зони термічного впливу у всіх зразках. При дуговому паянні дротом CuSi3 (рис. 3.2) з V – подібним обробленням кромки вклад теплої був найменший, тому в зоні термічного впливу спостерігається більш висока твердість через низьке вклядення теплої, що призводить до швидкого охолодження та росту зерен.

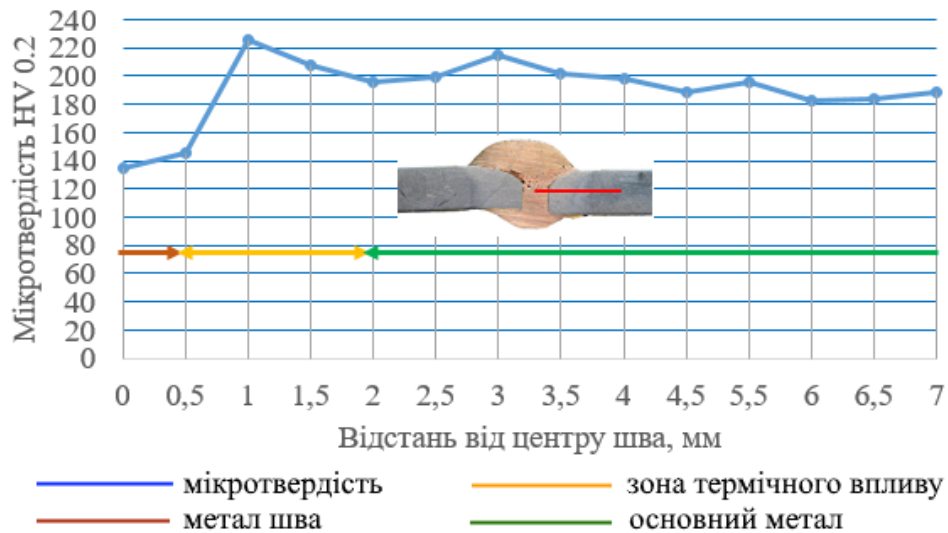


Рисунок 3.2 – Розподіл мікротвердості в перерізі паяного з'єднання з прямими кромками та матеріалом шва CuSi3

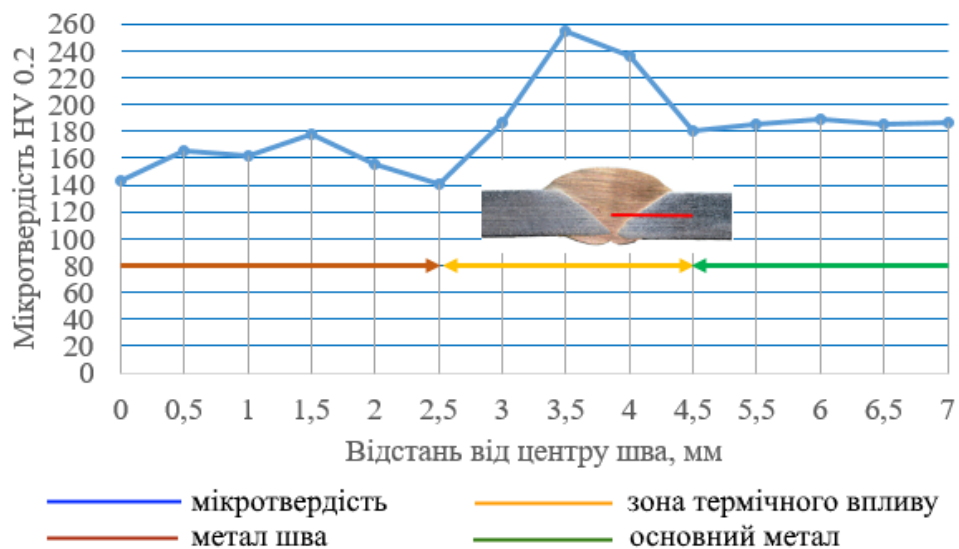


Рисунок 3.3 – Розподіл мікротвердості в перерізі паяного з'єднання з V-подібними кромками та матеріалом шва CuSi3

Аналізуючи криві мікротвердості також можна спостерігати значне зменшення розмірів зони термічного впливу при дуговому паянні.

Також слід відмітити, що твердість металу шва, виконаного присадковим матеріалом CuSi3 , є значно меншою від твердості основного металу, що свідчить про його невелику міцність. На відміну від застосування вище вказаного присадкового матеріалу, показники твердості шва, виконаного дротом CuAl8 (рис. 3.4), є на рівні з основним металом, що свідчить про рівномірність даного шва з основним металом.

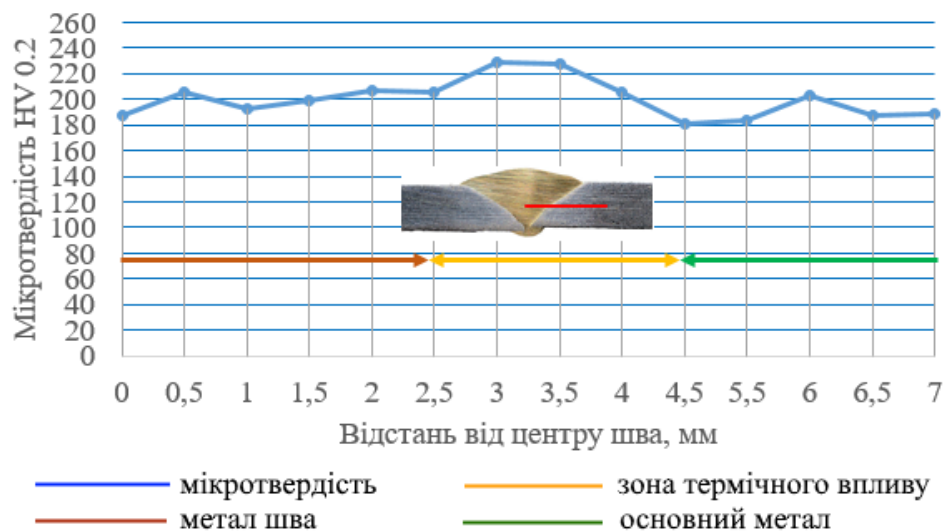


Рисунок 3.4 – Розподіл мікротвердості в перерізі паяного з'єднання з V-подібними кромками та матеріалом шва CuAl8

Вимірювання мікротвердості проводилося також і на зразках, виконаних дуговим зварюванням (рис. 3.5 – 3.7).

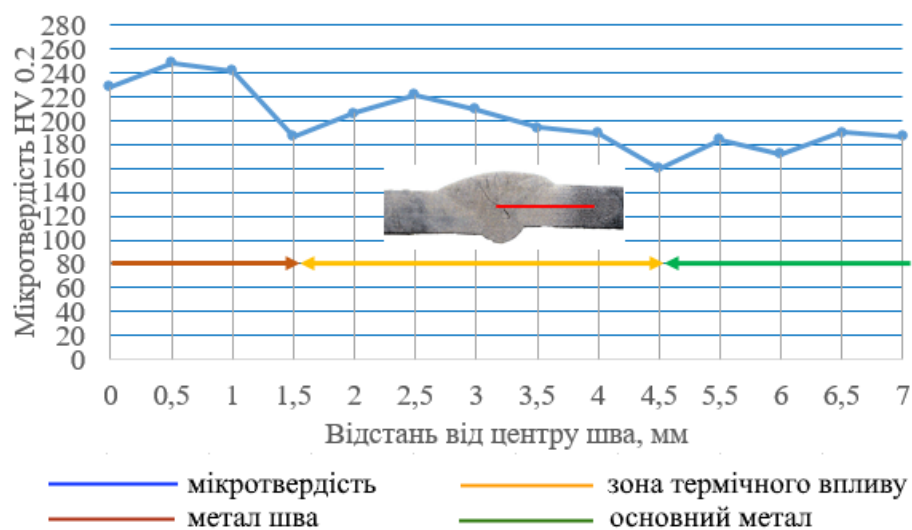


Рисунок 3.5 – Розподіл мікротвердості в перерізі зварного з'єднання V-подібними кромками та матеріалом шва Св-08Г2С

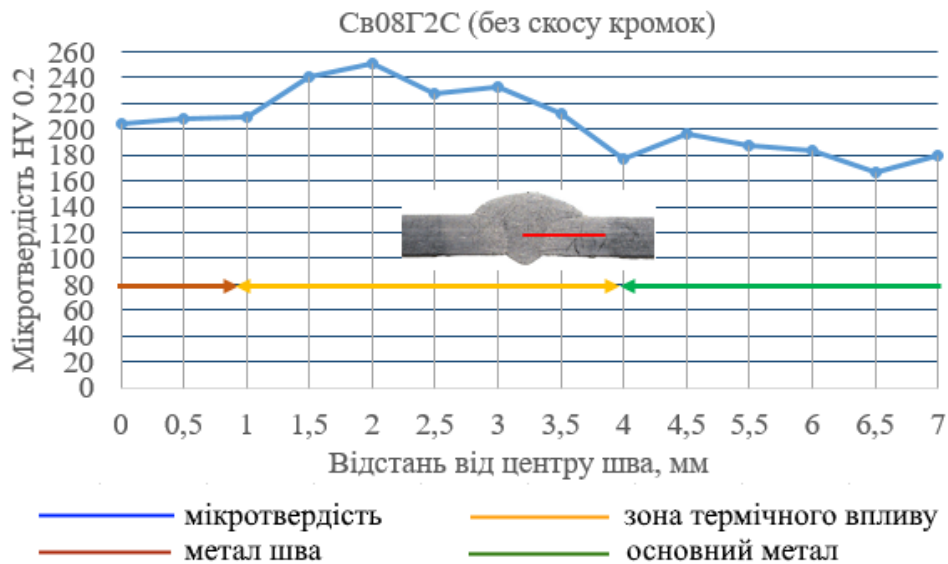


Рисунок 3.6 – Розподіл мікротвердості в перерізі зварного з'єднання з прямими кромками та матеріалом шва Св-08Г2С

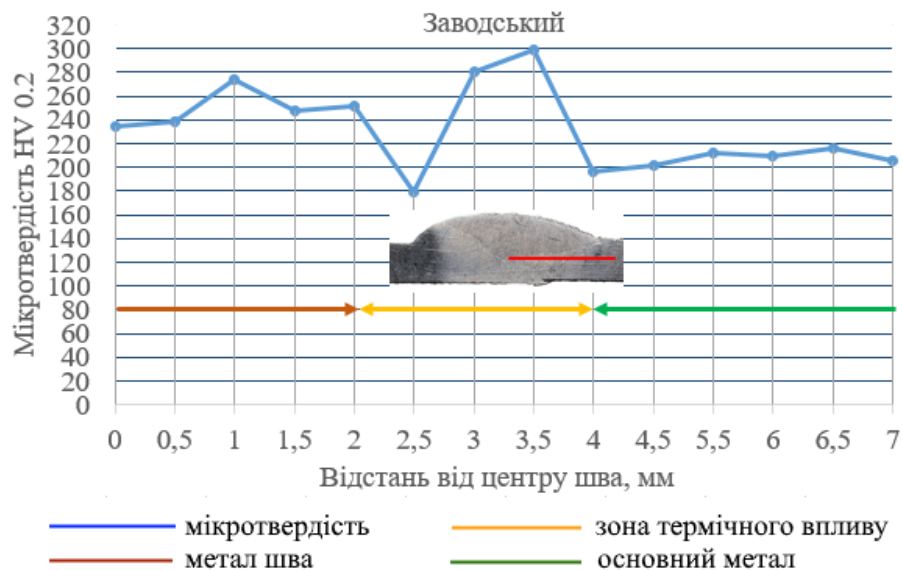


Рисунок 3.7 – Розподіл мікротвердості в перерізі з'єднання із заводської труби

З даних графіків бачимо, що розподіл величини мікротвердості в зварних швах відрізняється від паяних швів. Максимальне значення мікротвердості досягається у самих зварних швах, на відміну від паяних, а відповідно і розміри зони термічного впливу є також значно більшими. Як бачимо, ширина зони термічного впливу зварних з'єднань становить від 2 до 3 мм, а паяних від 1,5 до 2 мм.

3.3 Дослідження механічних властивостей зварних і паяних з'єднань

Застосування технології дугового паяння для приварювання манжетів та розтрубів до труб польових магістральних трубопроводів потребує дослідження механічних властивостей зварних і паяних з'єднань. Для їх дослідження використовувались зразки із труб з'єднаних дуговим паянням та зварюванням, а також зразки, виготовлені із заводської труби ПМТП-150.

Дослідження механічних властивостей проводилось експериментальним та розрахунковим методами за стандартними методиками, викладеними у другому розділі. Експериментальний метод передбачає проведення випробувань на розтяг та кут згину, а розрахунковий визначає механічні властивості з'єднань за показником твердості, вимірним у перерізі з'єднань.

Результати експериментальних випробувань зразків на розтяг та згин, проведених на випробувальній машині УММ-50, представлені в табл. 3.1 [8].

Таблиця 3.1 – Результати експериментальних випробувань

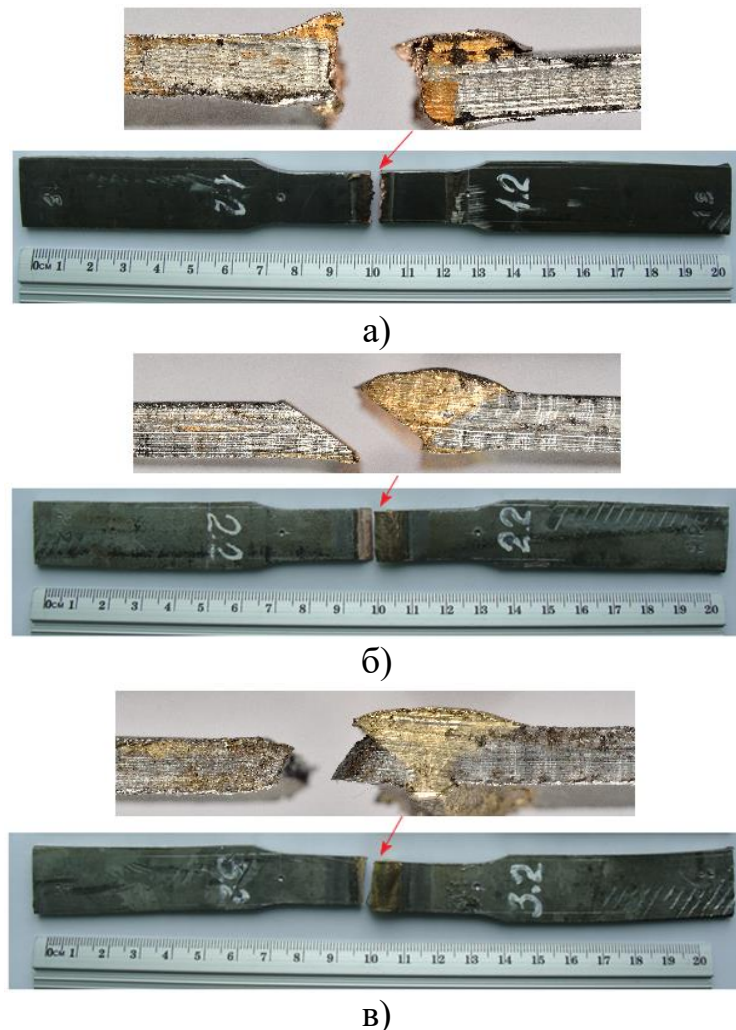
№	Метал шва	Тип з'єднання	Маркування зразка	Зусилля розтягу, кгс	Початкова розрахункова довжина, l_0 , мм	Кінцева розрахункова довжина, l_k , мм	Кут загину, град
1	CuSi3	C2	1.1	960	50	50,5	10
			1.2	1150	50	51	10
			1.3	1130	50	50	15
2	CuSi3	C17	2.1	2300	50	51	15
			2.2	2310	50	52	18
			2.3	2250	50	51,5	15
3	CuAl8	C17	3.1	2520	50	54	90
			3.2	2620	50	56	95
			3.3	2630	50	55,5	95
4	Св08Г 2С	C2	4.1	2820	50	56	150
			4.2	2770	50	56	140
			4.3	2800	50	55	135
5	Св08Г 2С	C17	5.1	2430	50	52	10
			5.2	2600	50	57	20
			5.3	2600	50	56	15
6	Заводський	-	6.1	1960	50	51	10
			6.2	2000	50	51	12
			6.3	2010	50	52	10

Аналіз результатів механічних випробувань показав, що міцність паяних з'єднань в основному залежить від двох факторів: технологічних та конструктивних.

Технологічні фактори визначаються особливостями процесу дугового паяння: використаного присадкового матеріалу, параметрів режиму, складу захисного газового середовища, способу виконання паяння.

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

Характер руйнування зразків з'єднань труб ПМТП-150, виконаних дуговим паянням та зварюванням при випробуванні на розтяг, показано на рис. 3.8 та 3.9 відповідно.



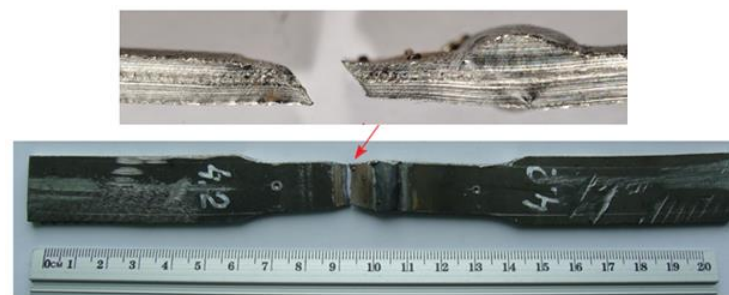
а) - шов CuSi_3 , прямі кромки: б) – шов CuSi_3 , V – подібні кромки;

в) – шов CuAl_8 , V – подібні кромки

Рисунок 3.8 – Зразки паяних з'єднань після випробувань

Як бачимо з (рис. 3.8,а) розрив зразка, виконаного присадковим дротом CuSi3 з прямими кромками, відбувався по осі шва, а зразок, виконаний тим же присадковим дротом, але з V-подібним обробленням кромки розірвався в місці сплавлення металу шва з основним металом (рис. 3.8, б), що пояснюється малими показниками міцності даного присадкового матеріалу.

Зразок, виконаний присадковим дротом CuAl8 (рис. 3.8, в), зруйнувався в так званій зоні термічного впливу, оскільки механічні властивості даного присадкового матеріалу є практично однаковими з основним металом.



а)



б)



в)

а) – шов Св-08Г2С, прямі кромки; б) – шов Св-08Г2С, V – подібні кромки;

в) – заводське з'єднання

Рисунок 3.9 - Зразки зварних з'єднань після випробувань

З (рис. 3.9 а, б) видно, що руйнування зразків, виконаних дуговим зварюванням у захисному газі присадковим дротом Св-08Г2С з прямими кромками, відбулося в місці термічної деградації основного металу, а зразка з V – подібними кромками - по основному металу.

Це пояснюється тим, що зварювання з V-подібним обробленням кромки проводилось з більшою тепловою потужністю дуги, що і викликало більшу термічну деградацію основного металу. Руйнування заводського зразка відбулося по зварному шву (рис. 3.9 в) чим це викликано пояснити важко, так як відсутня відповідна технологічна документація.

Враховуючи те, що шви зварних та паяних з'єднань на досліджуваних зразках не оброблялись та мали відхилення геометричних розмірів, то традиційне визначення показників міцності буде неточним. Тому порівняння міцності з'єднань доцільно проводити за діаграмами їх розтягу. При проведенні випробувань було записано машинні діаграми розтягу зразків, які в подальшому були оброблені в графічному редакторі та представлені на рис. 3.10.

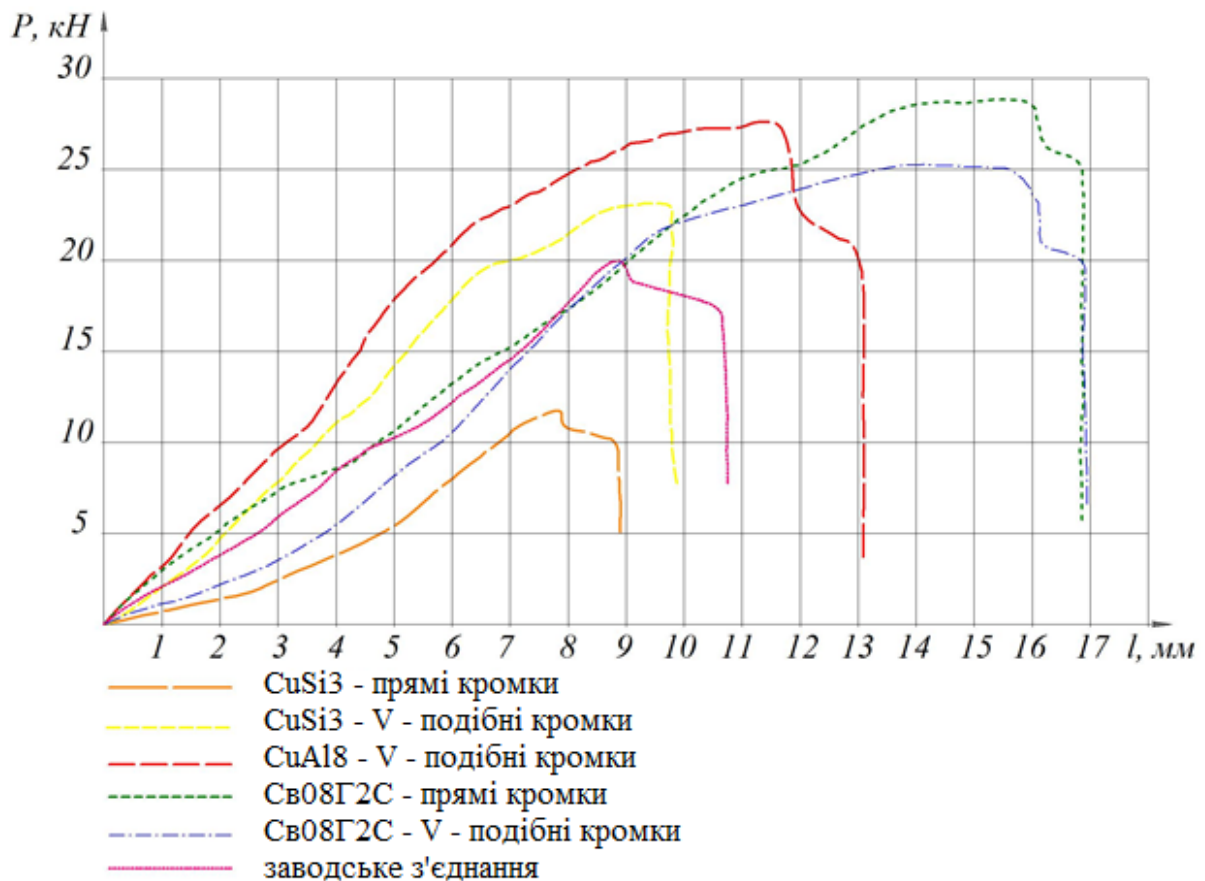


Рисунок 3.10 - Зусилля розтягу зразків паяних та зварних з'єднань

З діаграм розтягу видно, що найменше зусилля розтягу до руйнування, має зразок, виконаний присадковим дротом CuSi3, а найвище – зразок, виконаний дротом Св-08Г2С. Дещо меншим від нього є зусилля розтягу зразка, виконаного дротом CuAl8. Все це є закономірним та пояснюється показниками міцності даних присадкових матеріалів.

При дуговому MIG/MAG зварюванні, дротом Св-08Г2С термічний вплив є більшим, ніж при дуговому паянні, тому руйнування зразків відбулось у зоні термічного впливу та основного металу.

Аналізуючи діаграми розтягу зразків, бачимо, що зусилля розтягу паяного з'єднання, з матеріалом шва CuAl8, є тільки на 6% меншим від зусилля розтягу зварного з'єднання з прямими кромками, розрив якого відбувся по основному металу. Отже, можна зробити висновок, що міцність паяного з'єднання дротом CuAl8 є достатньо високою, тобто 94% міцності основного металу.

Результати експериментальних досліджень показали, що міцність паяних з'єднань залежить від міцності присадкового дроту та площі паяного шва, яка визначається формою підготовки кромки.

Як бачимо з діаграми розтягу (рис. 3.10), розривне зусилля зразків з'єднань з V-подібним обробленням кромки є на 50% більшим від з'єднань з прямими кромками. Утворення з'єднань при дуговому паянні відбувається завдяки дифузійному шару між швом та основним металом, а відповідно і міцність з'єднання буде залежати від його розмірів. Площа контакту між швом та основним металом у з'єднань зі скосом кромки є більшою від з'єднань з прямими кромками, чим і пояснюється збільшення розривного зусилля.

Визначення механічних властивостей паяних та зварних з'єднань у даній роботі також проводилося за відомою методикою (2 розділі п. 2.5.3) вимірюванням показників твердості в перерізі з'єднань. За результатами визначених показників твердості було побудовано графіки розподілу твердості в перерізі з'єднань (рис. 3.11).

Розподіл твердості в перерізі з'єднань

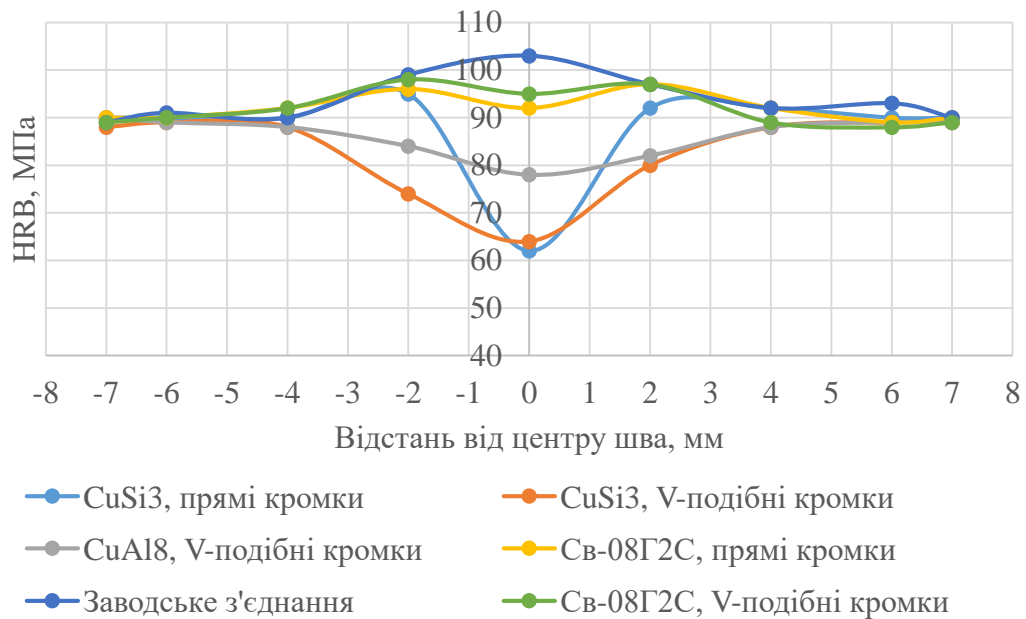


Рисунок 3.11 – Графік розподілу твердості в перерізі паяних та зварних з'єднань

На даному графіку спостерігаємо таку ж закономірність, як і на графіках розподілу мікротвердості. Твердість паяних швів є меншою від твердості основного металу, а твердість зварних швів - навпаки є вищою.

Межі міцності (σ_b , МПа), та межі текучості (σ_T , МПа), за значеннями показників твердості визначалися за формулами 2.3 та 2.4. Результати проведених розрахунків наведено в таблиці 3.2.

Для встановлення достовірності результатів, отриманих за даною методикою, порівнюємо їх із результатами випробувань зразків на розтяг. За результатами вимірювання твердості для матеріалу труби межа міцності та текучості становить $\sigma_b = 620$ МПа, $\sigma_T = 420$ МПа, а за результатами випробувань на розтяг $\sigma_b = 580$ МПа, $\sigma_T = 520$ МПа. Отже, розбіжність для межі витривалості становить 6,8%, а для межі текучості - 23%.

Характеризуючи міцність з'єднань за показниками твердості, бачимо, що межа міцності матеріалу паяних швів є меншою від міцності матеріалу труби, а саме шва CuSi3 на 40% а шва CuAl8 на 15%.

Дані результати є цілком закономірними та підтверджують результати механічних випробувань зразків на розтяг.

Таблиця 3.2 - Результати розрахунку механічних властивостей з'єднань за визначеними показниками твердості

№ з-ка	Марка зварювального дроту	Тип з'єднання	Значення твердості та міцності	Точки вимірювань								
				-7	-6	-4	-2	0	2	4	6	7
1	CuSi3	C2	HRB	90	90	90	95	62	92	92	90	90
			HB	184	184	184	209	110	194	193	184	184
			$\sigma_B, \text{МПа}$	622	622	622	706	372	656	652	651	622
			$\sigma_T, \text{МПа}$	421	421	421	511	155	457	454	414	414
2	CuSi3	C17	HRB	88	89	88	74	64	80	88	89	89
			HB	177	180	177	135	114	150	177	180	180
			$\sigma_B, \text{МПа}$	598	608	598	456	385	507	598	608	608
			$\sigma_T, \text{МПа}$	396	407	396	245	170	299	396	407	407
3	CuAl8	C17	HRB	90	89	88	84	78	82	88	89	89
			HB	184	180	177	162	144	156	177	180	180
			$\sigma_B, \text{МПа}$	622	608	598	547	486	527	598	608	608
			$\sigma_T, \text{МПа}$	424	407	396	342	277	321	396	407	407
4	Св08Г2С	C2	HRB	90	90	92	96	92	97	92	89	90
			HB	184	184	193	214	193	219	193	180	184
			$\sigma_B, \text{МПа}$	622	622	652	723	652	740	652	608	622
			$\sigma_T, \text{МПа}$	421	421	454	529	454	547	454	407	421
5	заводський	-	HRB	89	90	99	103	97	95	93	90	90
			HB	180	184	231	240	219	209	198	180	180
			$\sigma_B, \text{МПа}$	608	622	781	811	740	706	669	608	608
			$\sigma_T, \text{МПа}$	407	421	590	623	547	511	472	407	407
6	Св08Г2С	C17	HRB	89	90	92	98	95	97	89	88	89
			HB	180	184	193	225	209	219	180	177	180
			$\sigma_B, \text{МПа}$	608	622	652	760	706	740	608	598	608
			$\sigma_T, \text{МПа}$	407	421	454	569	511	547	407	396	407

Як свідчать результати проведених механічних випробувань, міцність паяних з'єднань є дещо меншою від міцності зварних з'єднань. Показники міцності паяного шва із матеріалу CuAl8 є практично однаковими з основним металом [9]. Але за отриманими результатами не можна з впевненістю вважати, що для з'єднання елементів труб польових магістральних трубопроводів технологія дугового паяння може замінити дугове зварювання. Як відомо, дані трубопроводи експлуатуються у складних умовах під дією як внутрішніх так і зовнішніх навантажень. Тому для повноти досліджень потрібно провести дослідження напружено-деформованого стану паяних з'єднань.

3.4 Корозійна стійкість зварних і паяних з'єднань

Процес зварювання та дугового паяння супроводжується нагріванням з'єднуваних кромek 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 з ростом погонної енергії дугового процесу [10].

За характером розподілу температури в навколошовній зоні, а також часом перебування покриття в інтервалі критичних температур, при яких відбувається випаровування та окислення цинку, можна визначити ступінь пошкодження покриття[11].

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. Для розрахунку теплових процесів при зварюванні труб цього недостатньо, бо дане рівняння не встановлює залежності температури від просторових координат. Тому для

розрахунку диференційного рівняння теплопровідності потрібно задати крайові умови [12].

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

У наукових джерелах наведено досить багато моделей для розв'язання задач різних технологій зварювання з урахуванням певних крайових умов [12, 13].

Враховуючи те, що в даному випадку дугове паяння та зварювання проводиться рухомим кільцевим джерелом, то для розрахунку температурного поля найбільш підходить модель описана у роботі В.А. Кархіна [14].

Розрахункова схема для кільцевого джерела у тонкостінному циліндрі зображена на (рис. 3.12) [14].

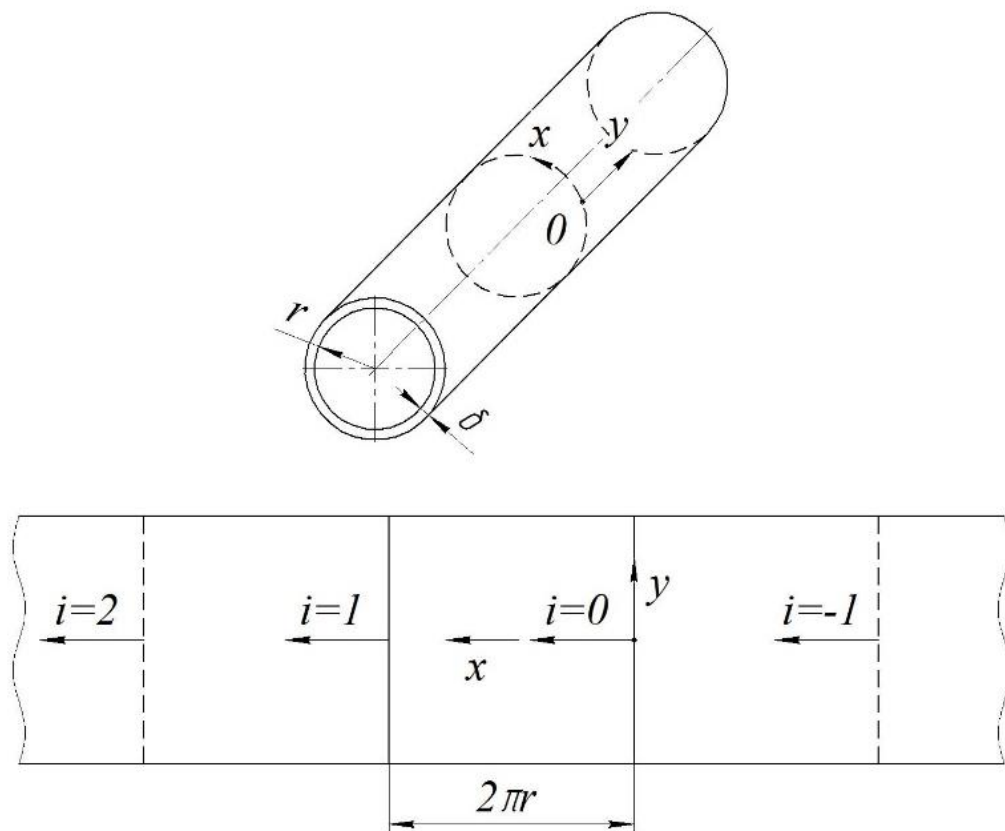


Рисунок 3.12 – Схема для розрахунку температурних полів тонкостінних циліндрів

Для лінійного рівномірно розподіленого по товщині джерела температурне поле в нескінченно довгому циліндрі у нерухомій системі координат можна розрахувати за рівнянням [14]:

$$T(x, y, t) = \sum_{i=-\infty}^{\infty} \int_0^t \frac{q/\delta}{c\rho[4\pi\alpha(t-\tau)]} \exp\left(-\frac{(x-v\tau-i2\pi r)^2 + y^2}{4\alpha(t-\tau)} - b(t-\tau)\right) d\tau; \quad (3.1)$$

де q - теплова потужність джерела, Вт;

δ - товщина стінки труби, см;

$c\rho$ - об'ємна теплоємність, Дж м⁻³К⁻¹;

α - коефіцієнт поверхневої тепловіддачі, Вт м⁻² К⁻¹;

b - коефіцієнт поверхневої температуровіддачі, с⁻¹;

t - час зварювання, с;

v - швидкість руху джерела, м с⁻¹;

r - радіус труби, см.

Теплова потужність джерела визначається за параметрами режиму паяння та зварювання (табл. 2.9) за формулою:

$$q = U \cdot I \cdot \eta; \quad (3.2)$$

де U - напруга дуги, В;

I - сила зварювального струму, А;

η - коефіцієнт корисної дії процесу нагріву (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. Результати розрахунків наведені в додатку А.

За результатами проведеного розрахунку було побудовано графік розподілу температури в поперечних площинах швів (рис. 3.13) [15].

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.

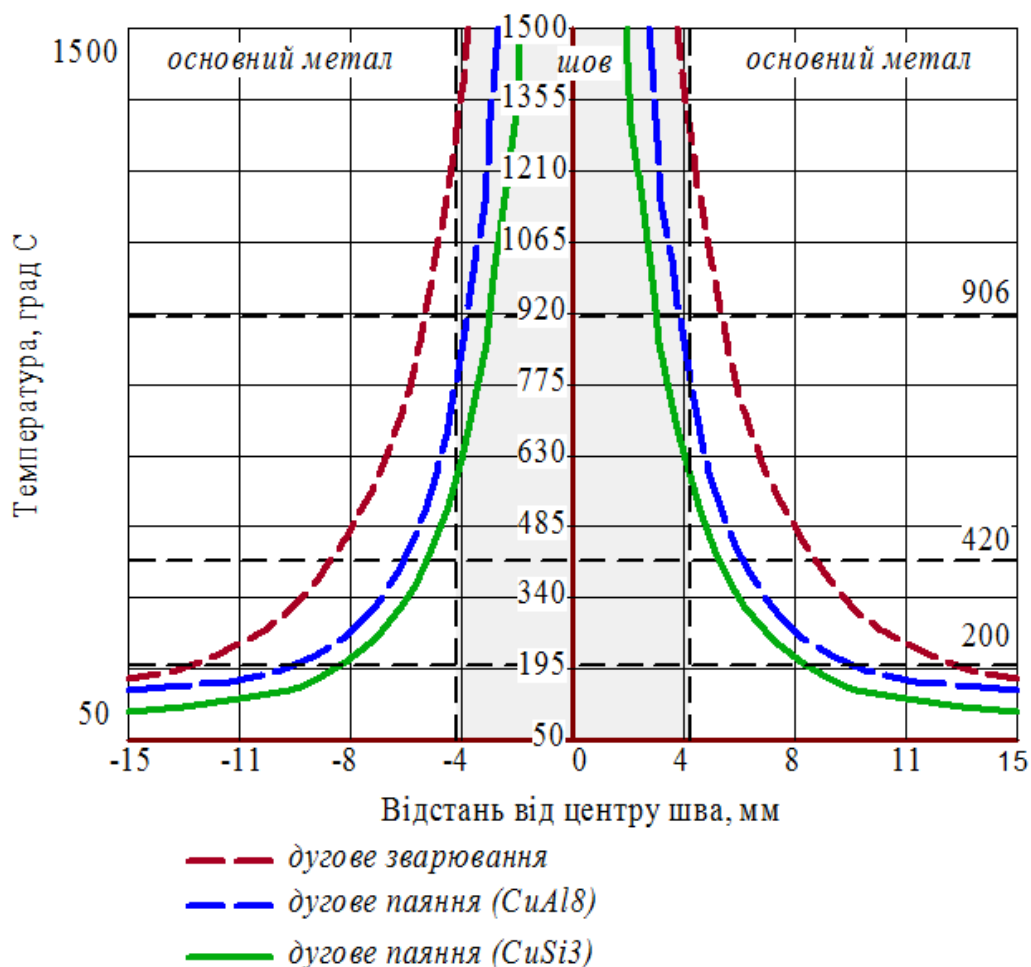
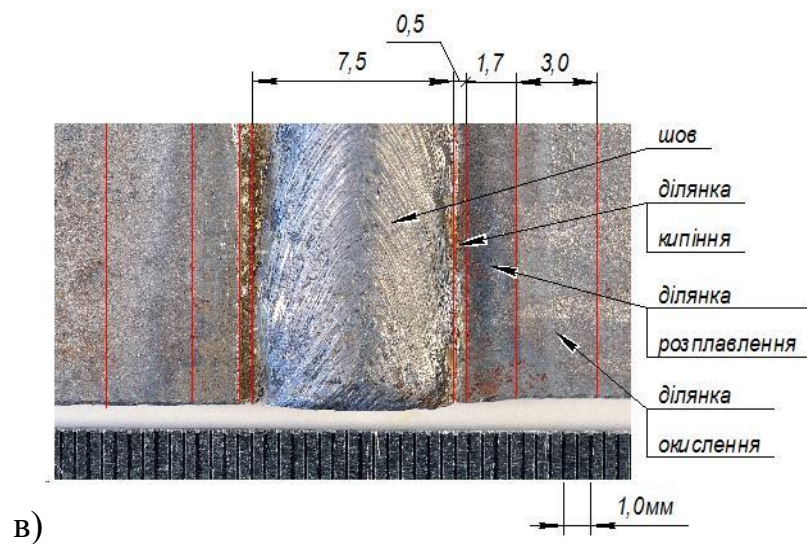
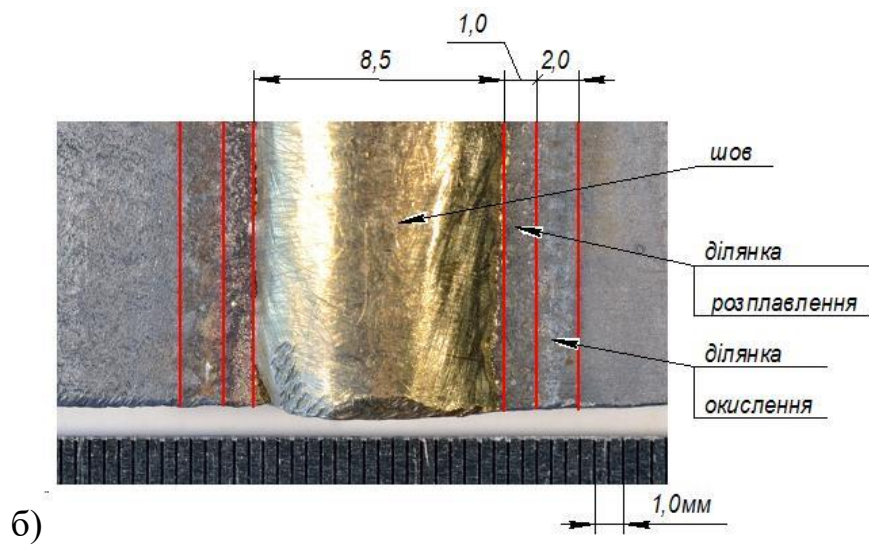
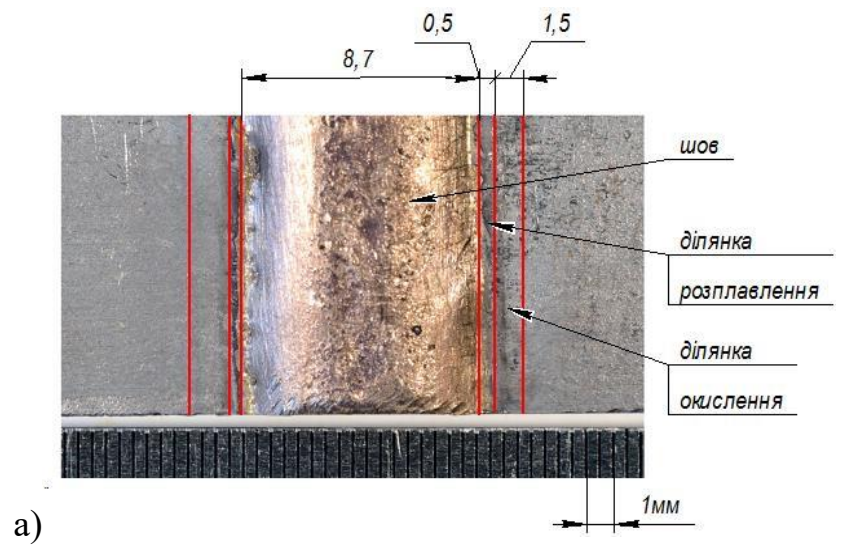


Рисунок 3.13 – Розподіл температури в поперечних площинах зварних та паяних швів

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).

Після оброблення графіка розподілу температури в графічному редакторі КОМАС 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. 3.14).



а) - паяне з'єднання, шов CuSi_3 ; б) - паяне з'єднання, шов CuAl_8 ;

в) - зварне з'єднання

Рисунок 3.14 – Зовнішні поверхні з'єднань оцинкованих труб з виділеними ділянками пошкодження цинкового покриття (трикратне збільшення)

Ділянка кипіння характеризується значним пошкодженням захисного покриття (аж до відсутності) через інтенсивне випаровування цинку, оскільки воно перебуває в інтервалі температури, що перевищує температуру кипіння цинку. Дана ділянка спостерігається тільки на зразку, виконаному дуговим зварюванням (рис. 3.14, в), а на зразках, виконаних дуговим паянням, вона відсутня. Це пояснюється тим, що при дуговому паянні застосовуються присадкові матеріали на основі міді, які мають значно нижчу температуру плавлення (~ 1100 °C), яка є меншою від температури плавлення сталі (~ 1500 °C), а, відповідно, і теплова потужність джерела буде також меншою. Як бачимо з графіка (рис. 3.13), при дуговому паянні прилеглі до шва ділянки не потрапляють до зони критичної температури (вище 906 °C).

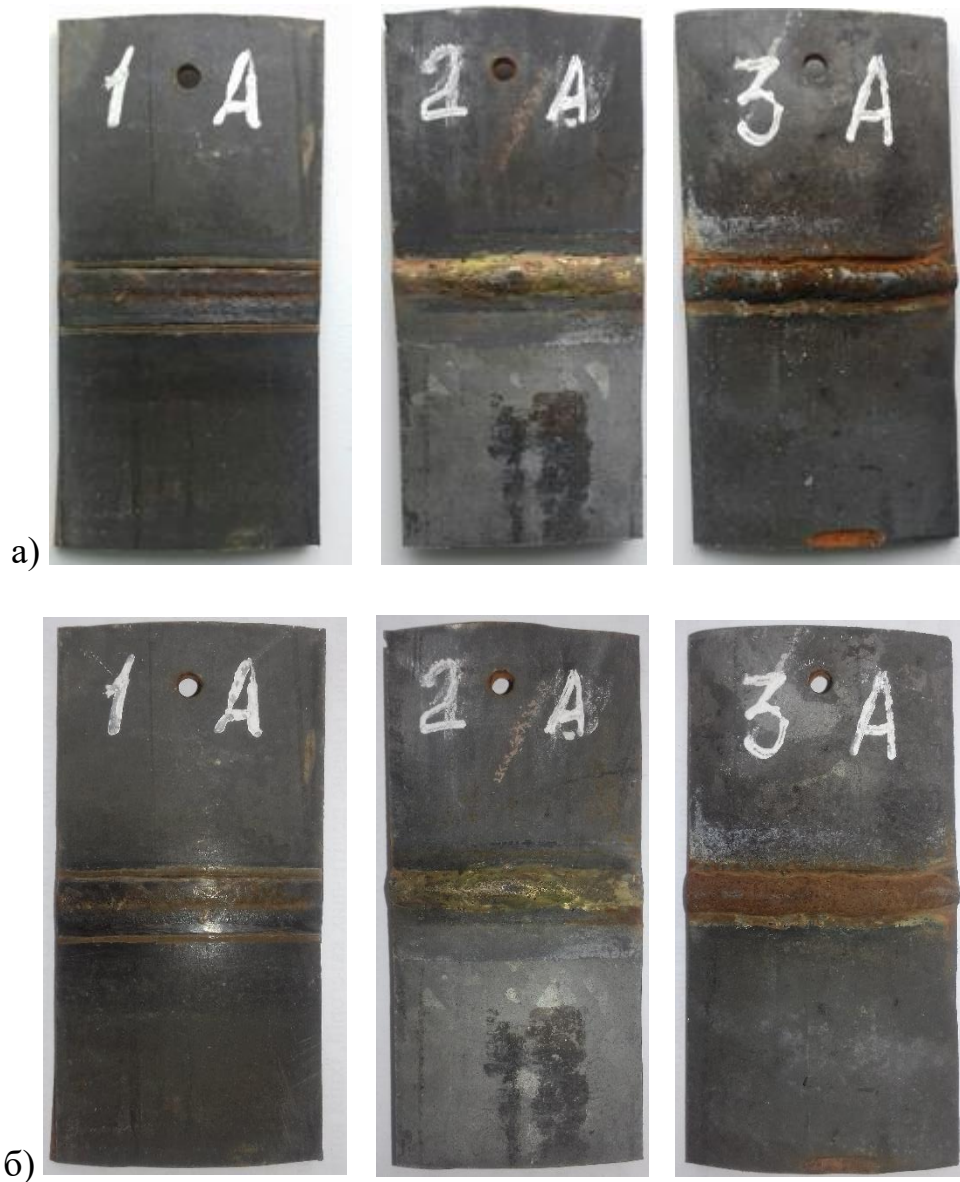
На ділянці випаровування можна спостерігати скупчення цинку з вкрапленням міді (при дуговому паянні) (рис.3.14 а, б), що створює певне потовщення покриття. Це пояснюється тим, що цинкове покриття перебуває в інтервалі температур, які перевищують температуру його розплавлення, тому на даній ділянці пошкодження 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.

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

Корозійна стійкість з'єднань оцінювалася візуальним оглядом зразків (рис.3.15) після їх взаємодії з атмосферним середовищем тривалістю 180 та 365 діб.



1А - паяне з'єднання, шов CuSi_3 ; 2А - паяне з'єднання, шов CuAl_8 ;

3А - зварне з'єднання;

а) після 180 діб; б) після 365 діб

Рисунок 3.15 - Поверхні зразків з'єднань після корозійних випробувань

На знімках поверхні з'єднань бачимо, що найбільше вражений корозією зразок, виконаний дуговим зварюванням (рис. 3.15), 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, 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.

Висновки до третього розділу

1) Формування з'єднань при дуговому паянні відбувається за рахунок дифузійного шару між швом та основним металом, а міцність з'єднань залежить від розмірів цього шару. З'єднання виконані методом дугового паяння, з використанням присадкових матеріалів на основі міді володіють високою міцністю, оскільки дисперсні включення в шві є у вигляді інтерметалідних фаз FeхAl_y, рівень фізико-механічних властивостей яких є суттєво вищим порівняно із силіцидними фазами заліза.

2) Встановлено, що міцність паяних з'єднань з використанням присадкового дроту CuAl8 є достатньо високою та становить 94% міцності основного металу. Суттєвий вплив на міцність паяних з'єднань має форма підготовки кромки. А саме міцність паяних з'єднань із V-подібною формою кромки є на 50% більшою за з'єднання із прямими кромками.

3) Проведені дослідження корозійної стійкості показали, що 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. Ділянка найбільшого пошкодження покриття при дуговому паянні має ширину, що не перевищує 1мм та підпадає під дію анодного захисту.

Список використаних джерел у розділі 3

1. 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. № 3/5. С. 51–54.
2. Liu L., Zhuang Z., Liu F. et al. Additive manufacturing of steel–bronze bimetal by shaped metal deposition: interface characteristics and tensile properties. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2013. Vol. 69. P. 2131–2137. doi:10.1007/s00170-013-5191-7.
3. Koltsov A., Bailly N., Cretteur L. Wetting and laser brazing of Zn-coated steel products by Cu–Si filler metal. *Journal of materials science*. 2010. Vol. 45. P. 2118–2125. doi: 10.1007/s10853-009-3949-y.
4. Stobrawa J., Rdzawski Z., Głuchowski W. et al. Ultrafine grained strips of precipitation hardened copper alloys. *Archives of metallurgy and materials*. 2011. Vol. 56. P. 171–179. doi: 10.2478/v10172-011-0020-1.
5. Zamanzade M., Barnoush A., Motz C. A Review on the Properties of Iron Aluminide Intermetallics. *Crystals*. 2016. Vol. 6. P. 10. doi:10.3390/cryst6010010.
6. Akkas N., Varol F., Ferik E. Investigation of mechanical properties of metal inert gas-brazed TRIP800 steel joints using different shielding gas flow rate. *Acta Physica Polonica A*. 2014. Vol. 125. P. 473–474. doi:10.12693/APhysPolA.125.473
7. Матвієнків О. М., Шлапак Л.С. Застосування MIG-паяння для з'єднання оцинкованих труб. *Машини, обладнання і матеріали для нарощування 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.
8. Матвієнків О. М. Удосконалення технології виготовлення та ремонту збірно-розбірних трубопроводів. *Технологический аудит и резервы производства*. 2016. № 4/1. С. 4–8.
9. Матвієнків О. М. 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.

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

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

12. Негода Е. Н. Тепловые процессы при сварке : учебное пособие. Владивосток: Изд-во ДВГТУ, 2008. 125 с.

13. Василик А. В., Дрогомирецький Я. А., Криль Я. А. Теплові розрахунки при зварюванні. Івано-Франківськ: Факел, 2004. 209 с.

14. Кархин В. А. Основы теплопередачи при сварке и пайке: учебное пособие. Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, 2011. 95 с.

15. Матвієнків О. М. Збереження захисного покриття при з'єднанні оцинкованих труб дуговим паянням. *Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ*. 2016. № 4 С. 7–13.

РОЗДІЛ 4

ДОСЛІДЖЕННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ЗВАРНИХ І ПАЯНИХ З'ЄДНАНЬ ТРУБ ВІД СТАТИЧНОГО НАВАНТАЖЕННЯ ВНУТРІШНІМ ТИСКОМ

Напружено-деформований стан будь-якого несучого елементу польових магістральних трубопроводів визначається характеристиками навантажень, які будуть діяти на нього. Ці навантаження будуть змінюватись залежно від параметрів перекачуваного продукту, а також від характеристик навколишнього середовища. Згідно вимог СНІП 2.05.06-85, при розрахунку магістральних трубопроводів повинні враховуватись навантаження та впливи, що виникають під час їхнього спорудження, випробування та експлуатації [1].

Міцність паяних з'єднань труб ПМТП-150 забезпечується завдяки коефіцієнту запасу міцності по межі міцності та текучості матеріалів. Тому для визначення працездатності паяних з'єднань труб у даному розділі проводиться дослідження напружено-деформованого стану під дією внутрішнього тиску.

4.1 Аналітичний розрахунок напружень та деформацій

Польові магістральні трубопроводи є наземними спорудами на які будуть діяти тривалі та короточасні навантаження. Тривалими навантаженнями є внутрішній тиск, власна вага труби та перекачуваного продукту, а короточасними - снігове та вітрове навантаження, обледеніння [2]. Враховуючи те, що діаметр труб є невеликим і короточасні навантаження будуть незначними, то у наступних розрахунках вони не враховуватимуться.

За формою та геометричними розмірами труби ПМТП-150 належать до тонкостінних циліндричних оболонок. Для розрахунку тонкостінних посудин застосовується безмоментна теорія оболонок. Основні положення цієї теорії:

- навантаження, які діють на поверхні оболонки, є перпендикулярними до них та симетричними до осі обертання;

- через малу товщину оболонки опір згину відсутній;
- напруження по товщині стінки оболонки розподілені рівномірно [3].

Згідно безмоментної теорії, напружено-деформований стан тонкостінних оболонок визначається тільки тангенціальними зусиллями та параметрами тангенціальної деформації [4]. Внутрішній тиск створюватиме на стінки труб кільцеві та повздовжні напруження (рис.4.1).

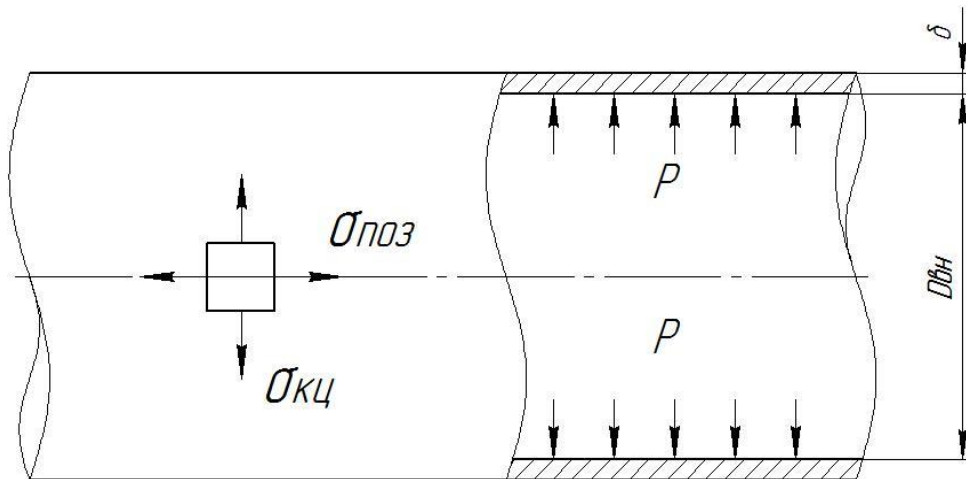


Рисунок 4.1 – Схема навантаження циліндричної тонкостінної оболонки внутрішнім тиском

Отже, за теорією безмоментної оболонки, кільцеві напруження діють тангенціально поверхні труб, та визначаються за формулою[5]:

$$\sigma_{кц} = \frac{p \cdot R}{\delta}, \quad (4.1)$$

де p – тиск у трубопроводі, МПа; R – внутрішній радіус труби, мм; δ – товщина стінки труби, мм.

Повздовжні напруження від внутрішнього тиску в трубопроводі визначаються за формулою

$$\sigma_{ноз} = \frac{p \cdot R}{2 \cdot \delta}. \quad (4.2)$$

Як бачимо з вище наведених залежностей, повздовжні напруження будуть у два рази менші від кільцевих, а, відповідно, ніякої небезпеки при експлуатації даних труб не буде. Тому в подальших дослідженнях будемо оперувати тільки кільцевими (тангенціальними) напруженнями.

Максимальний допустимий тиск визначався з умови, що еквівалентні напруження забезпечуватимуть пружно-пластичну деформацію матеріалу, що виникає при напруженнях $(0,9 \dots 1,1)\sigma_T$ [6]. Максимальний тиск визначається за формулою

$$p = \frac{2 \cdot \varphi \cdot \delta}{D + \delta} \cdot 0,9 \cdot \sigma_T, \quad (4.3)$$

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

Розрахований за формулою (4.3) максимальний тиск для даної моделі склав 9 МПа, що також відповідає максимальному випробувальному тиску для трубопроводів ПМТП-150. Величина максимального тиску 9 МПа відповідає еквівалентним напруженням у 238 МПа.

Підставивши відповідні числові значення у формулу 4.1, визначимо максимальні кільцеві напруження для трубопроводу навантаженого внутрішнім тиском 9 МПа:

$$\sigma_{кц} = \frac{9 \cdot 7,5}{0,32} = 211 \text{ МПа};$$

За вимогами СНІП 2.05.06-85, для попередження недопустимих пластичних деформацій в трубопроводі необхідно провести перевірку за умовою:

$$\sigma_{\kappa\zeta} \leq \frac{m}{0,9 \cdot k_n} R_2^H. \quad (4.4)$$

де m – коефіцієнт умов роботи трубопроводу (для нафтопроводів та продуктопроводів $m = 0,9$); k_n – коефіцієнт надійності за призначенням трубопроводу (для нафтопродуктопроводів $k_n = 1,0$); R_2^H – нормативний опір, що рівний межі плинності матеріалу труби.

Підставивши відповідні числові значення у формулу 4.4, отримаємо:

$$\sigma_{\kappa\zeta} = 211 \text{ МПа} \leq \frac{0,9}{0,9 \cdot 1} 265 = 265 \text{ МПа}.$$

Отже, умова міцності виконується, оскільки розрахункове значення максимальних кільцевих напружень не перевищує гранично допустимого.

4.2 Числовий розрахунок напружень та деформацій методом кінцевих елементів

З розвитком обчислювальної техніки для оцінки напружень та деформацій застосовується імітаційне моделювання методом кінцевих елементів з використанням САД-систем загального та спеціалізованого призначення. Серед систем загального призначення можна виділити такі: Ansys, Abaqus, Pro Engeener, Unigraphics, Solid Works, а серед спеціалізованих - Sysweld, Weld Planner.

Застосування САД-систем дозволяє мінімізувати час та матеріальні витрати, полегшити виконання необхідних робіт: розроблення технічної документації, проведення різноманітних аналізів елементів, тощо. Для дослідження напружень та деформацій, які виникатимуть біля стиків паяних з'єднань труб під дією внутрішнього тиску вибрано пакет програми загального призначення Solid Works.

Використаний алгоритм лінійного статичного розрахунку зображений на рис. 4.2 [7].

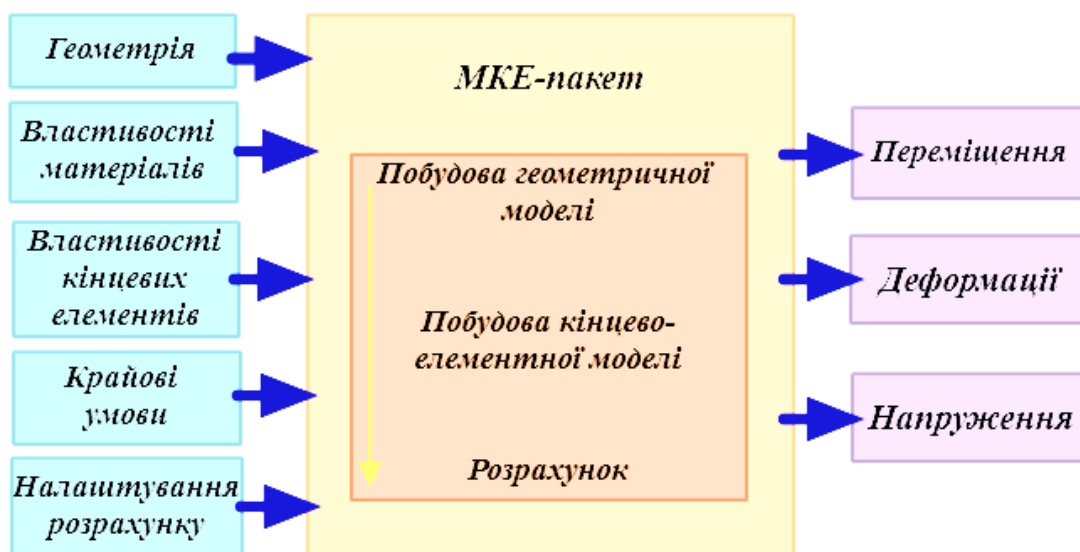


Рисунок 4.2 - Варіант реалізації кінцево-елементної моделі для виконання статичного розрахунку

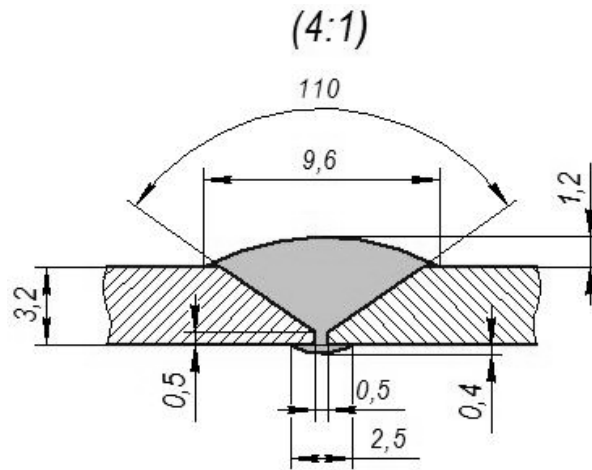
Основним завданням імітаційного моделювання є вирішення так званої механічної задачі, яка дозволить визначити розподіл напружень та деформацій.

Прогнозування міцності паяних з'єднань проводилось у програмі розрахунку напружено-деформованого стану методом кінцевих елементів (МКЕ). Для цього було розроблено комп'ютерні скінчено-елементні осиметричні моделі паяних з'єднань стиків труб діаметром 150 мм, товщиною стінки 3,2 мм. Оскільки існуючі стандарти не регламентують розміри швів та форму підготовки кромки для дугового паяння, то відповідні параметри вибирались для з'єднань труб дуговим зварюванням, тип з'єднання С17 згідно з ГОСТ 16037-80.

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 (рис.4.3).



а)



б)

а) – макрошліф паяного з'єднання (3^x); б) – ескіз з'єднання

Рисунок 4.3 – Розміри паяних з'єднань

За визначеними геометричними розмірами швів побудовано тримірну модель паяних з'єднань труб (рис. 4.4)

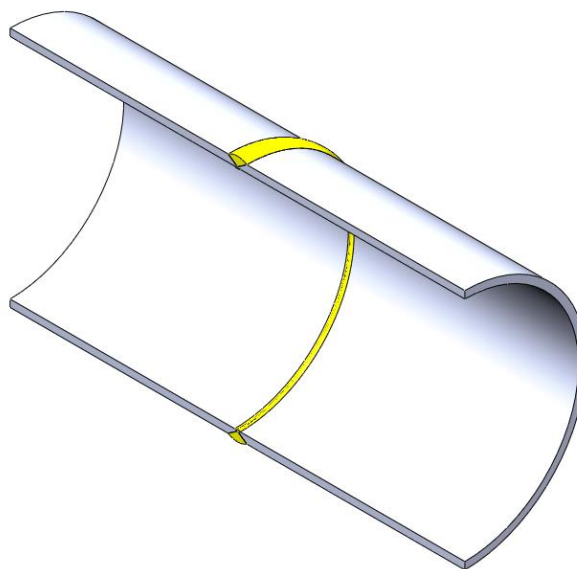


Рисунок 4.4 – Тримірна модель елементів паяного з'єднання труб

Для імітаційного моделювання труб застосовано низьколеговану сталь марки 16ГС, а для паяних швів - сплави CuSi3 та CuAl8. Характеристики даних матеріалів наведено в табл. 4.1.

Таблиця 4.1 – Основні фізичні та механічні властивості матеріалів, що використовувались при імітаційному моделюванні

Матеріал	Модуль Юнга, Па	Коефіцієнт Пуассона	Границя плинності, МПа
16ГС	$2 \cdot 10^{11}$	0,3	325
CuAl8	$1,2 \cdot 10^{11}$	0,335	200
CuSi3	$1,1 \cdot 10^{11}$	0,394	120

Граничні умови є важливим етапом при побудові кінцево-елементної моделі паяного з'єднання. Головною вимогою при цьому є їх повнота, що дозволить визначити всі невідомі величини після запуску розрахункового модуля із заданою точністю. Як уже зазначалось, основним навантаженням у трубопроводі ПМТП-150 є дія внутрішнього тиску. Тому граничною умовою моделі була дія на внутрішню поверхню елементів паяного з'єднання труб тиску величиною 9 МПа (рис. 4.5).

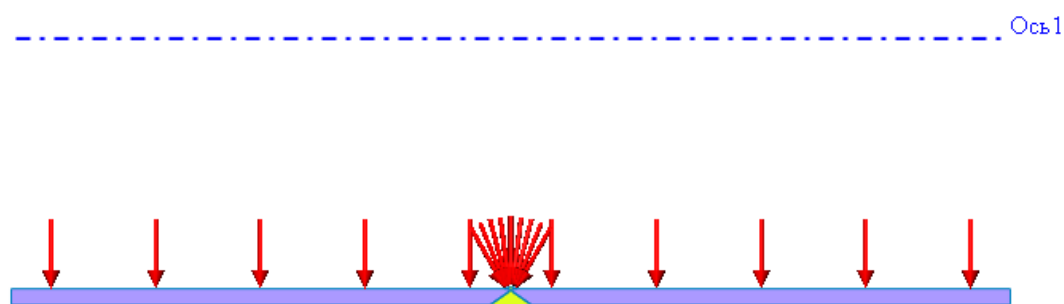


Рисунок 4.5 – Дія тиску на внутрішню поверхню елементів паяного з'єднання труб

Для імітації реальних умов роботи елементів паяних з'єднань труб використали другу граничну умову - функцію програми, що передбачає застосування умовної податливої пружини для стабілізації моделі.

Щоб отримати числову модель паяного з'єднання труб, необхідно провести поділ всіх його елементів кінцево-елементною сіткою. Сітка генерується безпосередньо на геометричній моделі та є основою для автоматичного створення матриці рівнянь.

Як відомо, розміри кінцевих елементів мають значний вплив на точність результатів, що будуть отримані у процесі імітаційного моделювання, тому побудовано сітку, яка містить у поперечному перерізі труби 6 кінцевих елементів. При створенні кінцево-елементної сітки в контекстному меню генерування сіток задавались розміри елемента та форма кривизни. На рисунку 4.6 показано зображення перерізу паяного з'єднання з сіткою кінцевих елементів.

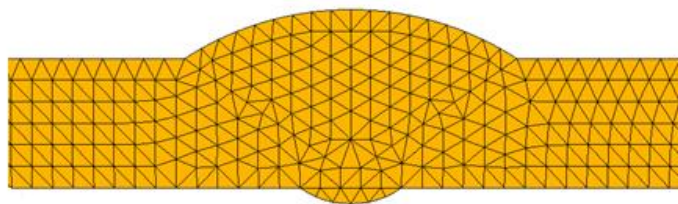


Рисунок 4.6 – Сітка кінцевих елементів

Для верифікації отриманої моделі пропонується вирішити числовим методом розглянуту вище аналітичну задачу при осиметричному навантаженні труби в програмі Solid Works Simulation. Таким чином, буде перевірена адекватність кінцево-елементної моделі, що дозволить використовувати її при вирішенні складніших завдань розрахунку паяних з'єднань.

При розрахунку на міцність тонкостінних оболонок визначальними напруженнями є кільцеві, тому для верифікації результатів, отриманих методом імітаційного моделювання та аналітичним методом, будемо оперувати саме цими напруженнями. Максимальні кільцеві напруження ділянки труби під дією розрахункового тиску за результатами кінцево-елементного моделювання становлять $\sigma_{кц} = 210$ МПа.

Для оцінки адекватності отриманої моделі порівняємо дані числового експерименту з аналітичним розрахунком. Розрахунками, проведеними раніше

(підрозділ.4.1), встановлено, що максимальне розрахункове значення кільцевих напружень ($\sigma_{кц.р}$) у стінці труби становить 211 МПа. Визначимо похибку розрахунку

$$\Delta = \frac{\sigma_{кц.р} - \sigma_{кц}}{\sigma_{кц.р}} \cdot 100\% = \frac{211 - 210}{211} \cdot 100\% = 0,5\%.$$

Таким чином, розбіжність величини кільцевих напружень прийнятої моделі та розрахованого аналітичним методом не перевищує 1%, що свідчить про високу точність моделювання та дозволяє у подальшому використовувати імітаційне моделювання для дослідження напружено-деформованого стану паяних з'єднань труб.

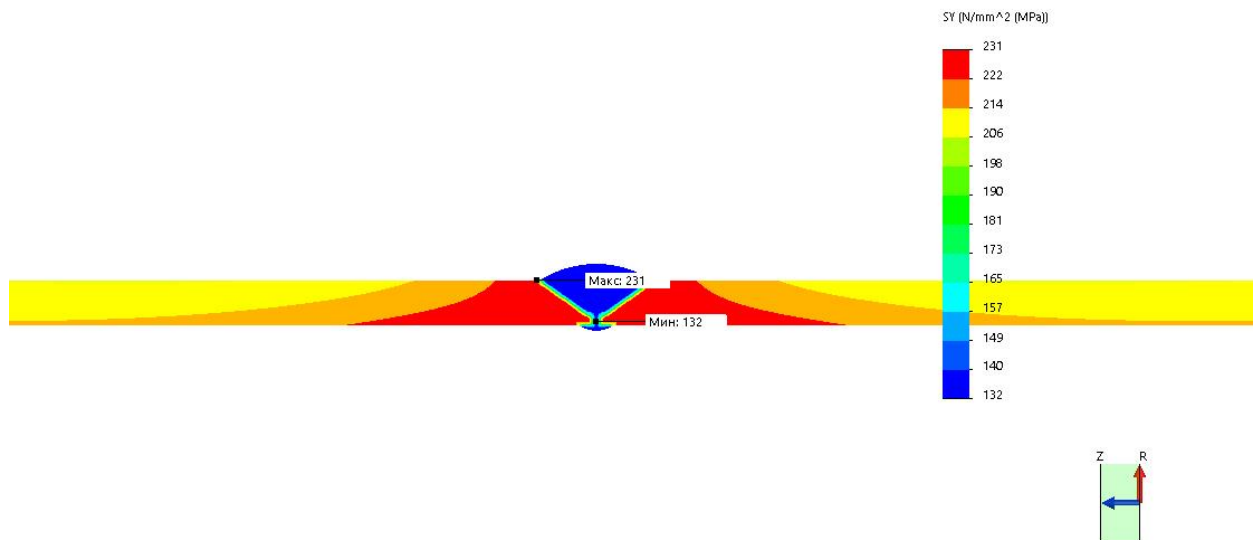
У результаті моделювання навантаження та розв'язання механічної задачі отримано напружено-деформований стан паяних з'єднань.

На основі проведених розрахунків побудовано епюри кільцевих напружень у перерізі паяних з'єднань (рис. 4.7).

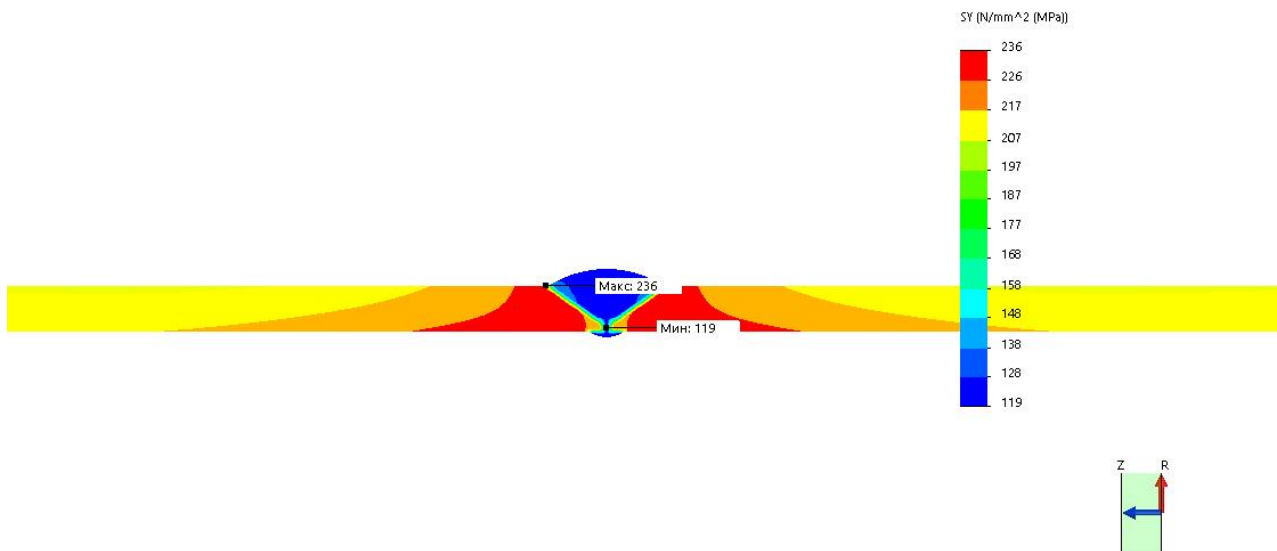
Розглянувши більш детально розподіл кільцевих напружень у зоні кільцевого шва з'єднань трубних зразків встановлено, що при використаних геометричних розмірах моделей відбувається локалізація максимальних величин напружень на переході між швом та трубою.

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

Як бачимо, величина максимальних напружень для даних матеріалів швів є майже однаковою, але розподіл напружень дещо відрізняється. Зокрема, у з'єднанні з матеріалом шва CuSi3 концентрація напружень на нижній кромці труб біля шва є меншою.



а)



б)

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

Рисунок 4.7 – Епюри розподілу кільцевих напружень у перерізі паяних з'єднань зі стандартною V-подібною формою оброблення кромки

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. 4.8).



Рисунок 4.8 – Зруйноване з'єднання труб

Результати проведених досліджень показали, 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.

4.3 Зменшення величини напружень та перерозподіл їх концентрації шляхом оптимізації форми підготовки кромки

Міцність паяних з'єднань залежить від сукупності певних факторів, тобто від 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 за допомогою зміни конструкції з'єднання та площі поперечного перерізу шва.

Для пошуку найбільш раціональної конструкції кромки труб необхідно оцінити декілька варіантів конструкції з вибором найбільш оптимальної.

Незалежно від способу реалізації математичної моделі об'єкта, для розв'язання задачі його оптимального проектування, зовсім не обов'язково знати особливості цієї реалізації, а достатньо з необхідною точністю передавати моделі вхідні параметри та зчитувати вихідні параметри [7].

Постановка задачі оптимізаційного проектування містить завдання:

- конструктивних змінних;

- цільові функції або критерії, що мінімізуються або максимізуються;
- обмеження параметрів стану досліджуваного об'єкту.

Програмні комплекси багатокритерійної оптимізації мають засоби керування математичними моделями як «чорними ящиками»: зчитувати значення цільових функцій і обмежень, генерувати нові значення конструктивних змінних та передавати їх у модель [8, 9].

Способи обміну даними між комплексом і математичними моделями можуть бути різноманітними. Для найпростіших випадків з використанням аналітичної моделі деякі комплекси дозволяють описати її безпосередньо всередині себе завдяки вбудованим редакторам мов програмування: VBScript, JavaScript, Python тощо.

Другий спосіб полягає у використанні вхідних і вихідних текстових файлів. Цей спосіб є універсальним та широко розповсюдженим, оскільки значна кількість програмних продуктів підтримує роботу з текстовими файлами.

На кожній інтеграції комплекс генерує нові занесення конструктивних змінних та записує їх у вхідний файл моделі, яка після завершення своєї роботи записує значення функцій стану у вихідний файл. Комплекс на основі інформації вихідного файлу моделі генерує наступний набір величин конструктивних змінних відповідно з реалізованими у ньому алгоритмами і увесь процес повторюється знову.

Оскільки не існує єдиного стандарту структури вхідних і вихідних файлів, у складі комплексів розробниками передбачені засоби розбирання тексту з метою ідентифікації у ньому необхідних параметрів.

Третій спосіб взаємодії базується на використанні високорівневих стандартизованих інтерфейсів (API, Application Programming Interface [10]), які передбачені у більшості сучасних інженерних програмних продуктах та забезпечують доступ зовні до своїх внутрішніх функцій. Це дозволяє запобігти використанню посередників, наприклад у форматі тих же текстових файлів і напряду зв'язати комплекс з математичною моделлю, тому даний спосіб називають прямою інтеграцією (direct integration).

Для опису процесів інтеграції та оптимізації у більшості випадків використовується концепція візуального програмування і програмування потоків даних [9], відповідно до яких користувач оперує вузлами або блоками та зв'язками між ними. Вузол – об'єкт з визначеними властивостями. Він може описувати деяку змінну, файл, зовнішню математичну модель, налаштування алгоритму оптимізації тощо.

Алгоритм проведення процесу оптимізації наведений на рис. 4.9.

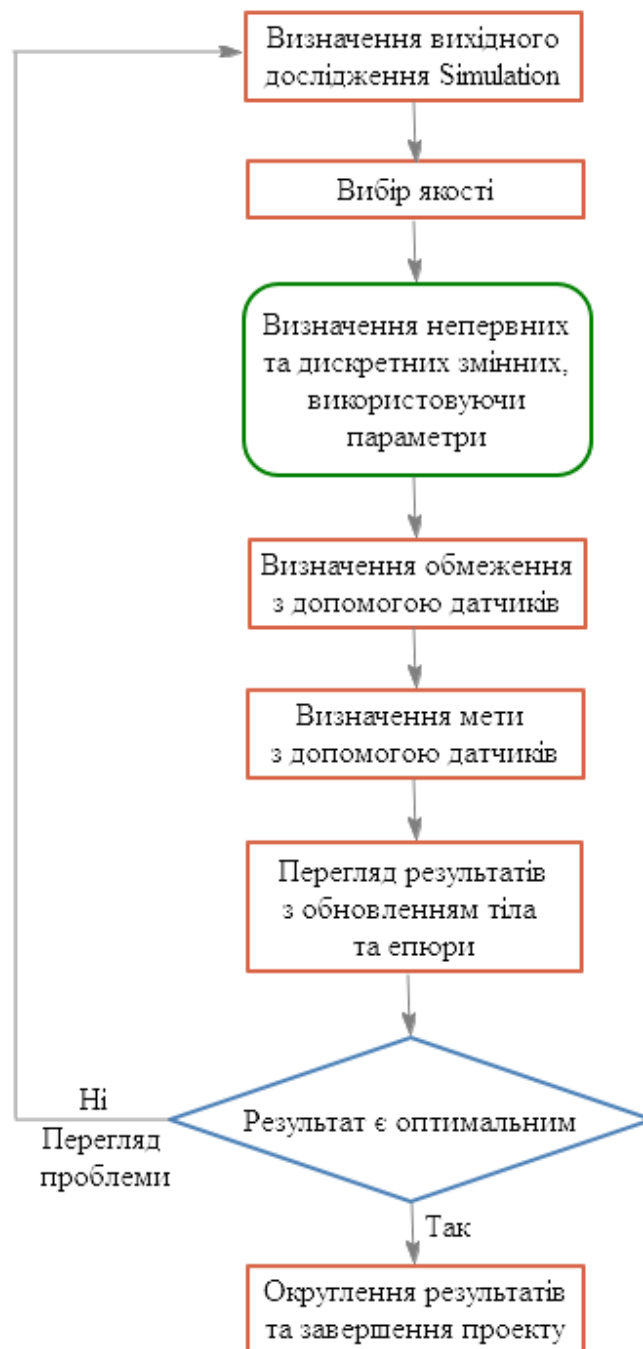


Рисунок 4.9 – Алгоритм оптимізації в SolidWorks.

Засоби моделювання Solid Works дозволяють вирішити це завдання шляхом параметричної оптимізації. Найпростішим видом оптимізації є однопараметрична оптимізація, при якій змінюється лише один параметр. Але кращих результатів можна досягнути застосувавши багатопараметричну оптимізацію змінюючи декілька параметрів.

Метою оптимізації при моделюванні навантаження трубних зразків паяних з'єднань є визначення найбільш раціональної форми підготовки кромки. Критерієм оцінювання в даному випадку є величина максимальних кільцевих напружень.

Проведення багатопараметричної оптимізації дозволить вибрати один із найбільш раціональних варіантів.

Виходячи з конструктивних та технологічних міркувань, для параметричної оптимізації було побудовано керований ескіз, що лежить в основі побудови тривимірної моделі елементів паяного з'єднання труб (рис. 4.10).

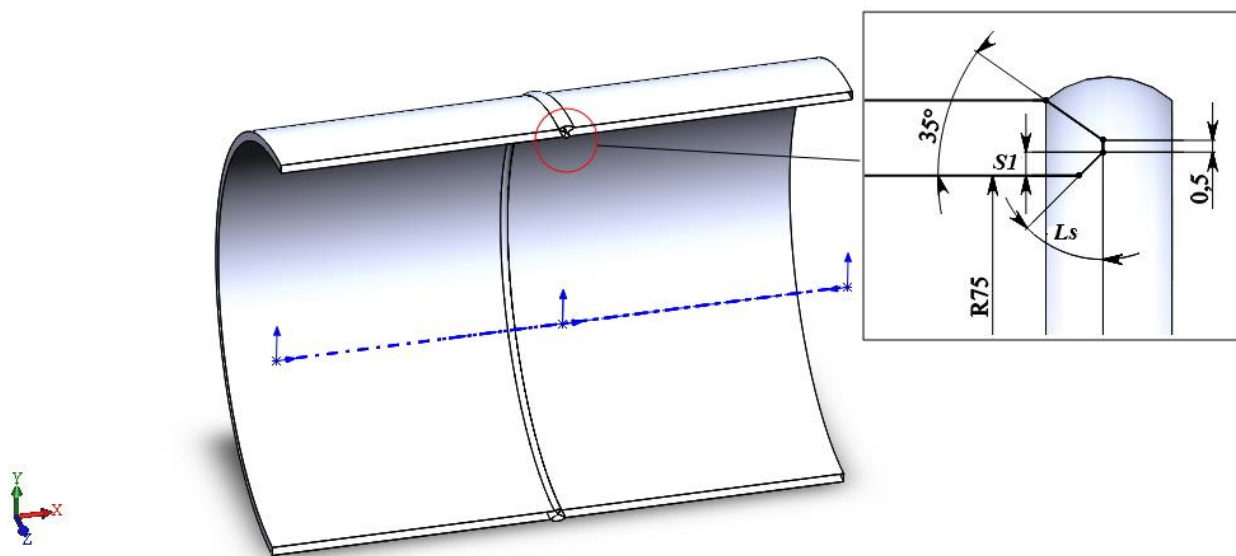


Рисунок 4.10 – Керований ескіз

Обмеженням для виконання процесу оптимізації вибрано значення мінімального коефіцієнту запасу міцності не менше 1,55, згідно вимог СНиП

2.05.06-85, а основними параметрами - кут скосу нижньої кромки та висота скосу (табл. 4.2).

Таблиця 4.2 – Змінні параметри моделі для оптимізації

№ п/п	Параметр	Позначення	Граничні значення		
			min	max	крок
1	Кут скосу нижньої кромки, °	L_s	0,1	50	5
2	Висота скосу, мм	S1	0,2	1,8	0,2

Для оболонок під дією тиску концентрація напружень на зовнішній стороні стінки біля зварного шва є найбільш небезпечною, тому основним завданням оптимізації було змінити місце концентрації максимальних напружень та зменшити їх величину.

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. 4.11.

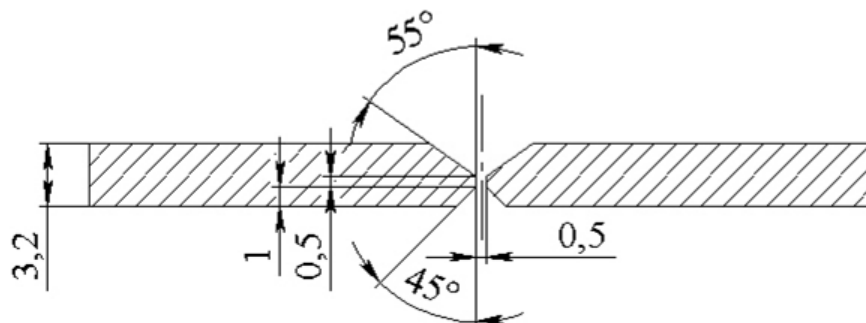
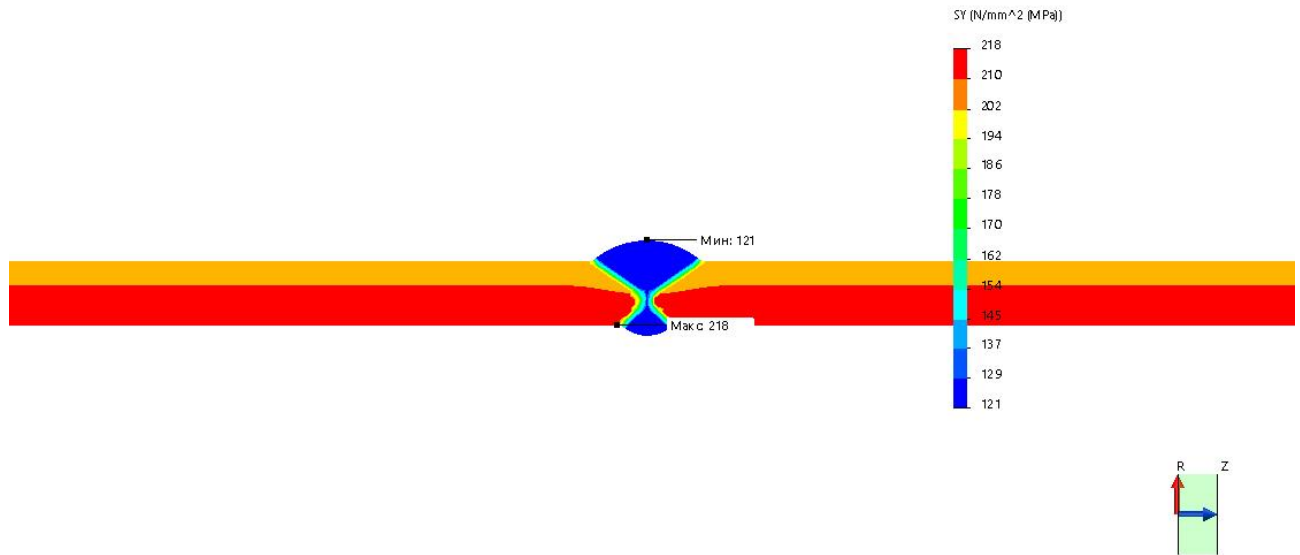
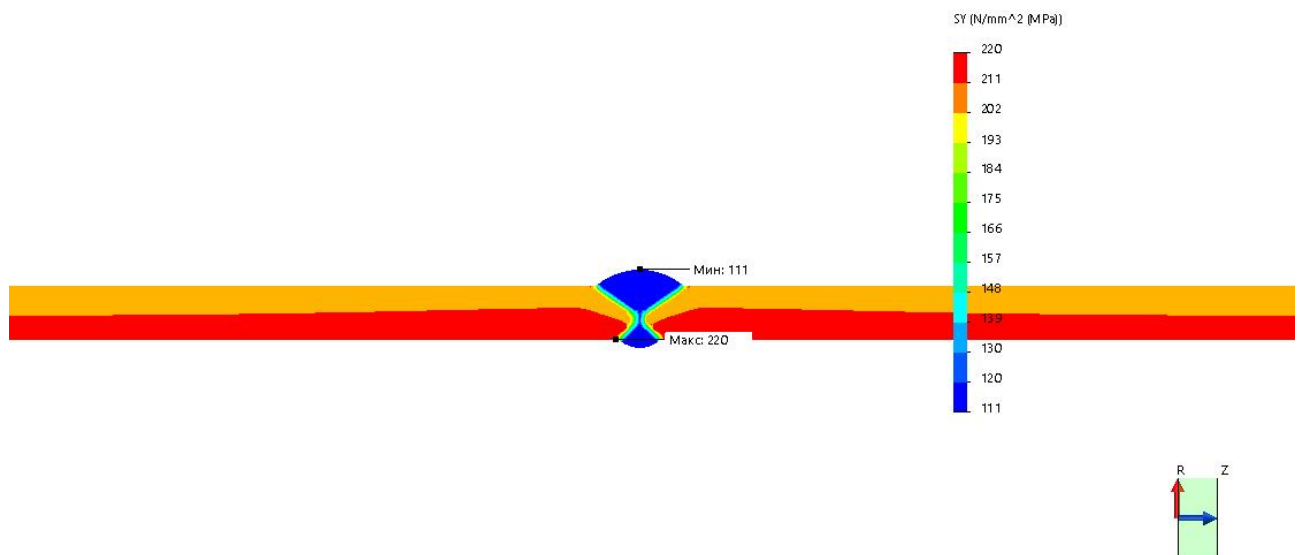


Рисунок 4.11 – Конструктивні розміри підготовки кромки за результатами оптимізації

Для запропонованої форми підготовки кромки було проведено моделювання навантаження та розв'язання механічної задачі. За результатами моделювання побудовано епюри розподілу кільцевих напружень у перерізі оптимізованих з'єднань (рис. 4.12) [11, 12].



а)



б)

а – матеріал шва CuAl8; б матеріал шва CuSi3

Рисунок 4.12 – Епюри розподілу кільцевих напружень у перерізі паяних з'єднань з оптимізованою формою кромки

Як бачимо з рис. 4.12, перерозподіл напружень у перерізі з'єднань змінився: максимальні кільцеві напруження виникають вже по нижній кромці стінки труби на відстані близько 0,7 мм від шва, а їх величина зменшилась.

Слід також відмітити, що в оптимізованому варіанті підготовки кромки вдалося зняти небезпечну концентрацію напружень на верхній кромці стінки труби між швом та основним металом, а розподіл напружень став більш рівномірним по довжині.

Розподіл кільцевих напружень по верхній та нижній кромках перерізу паяних з'єднань від центру шва показано на рисунку 4.13 та 4.14 відповідно.

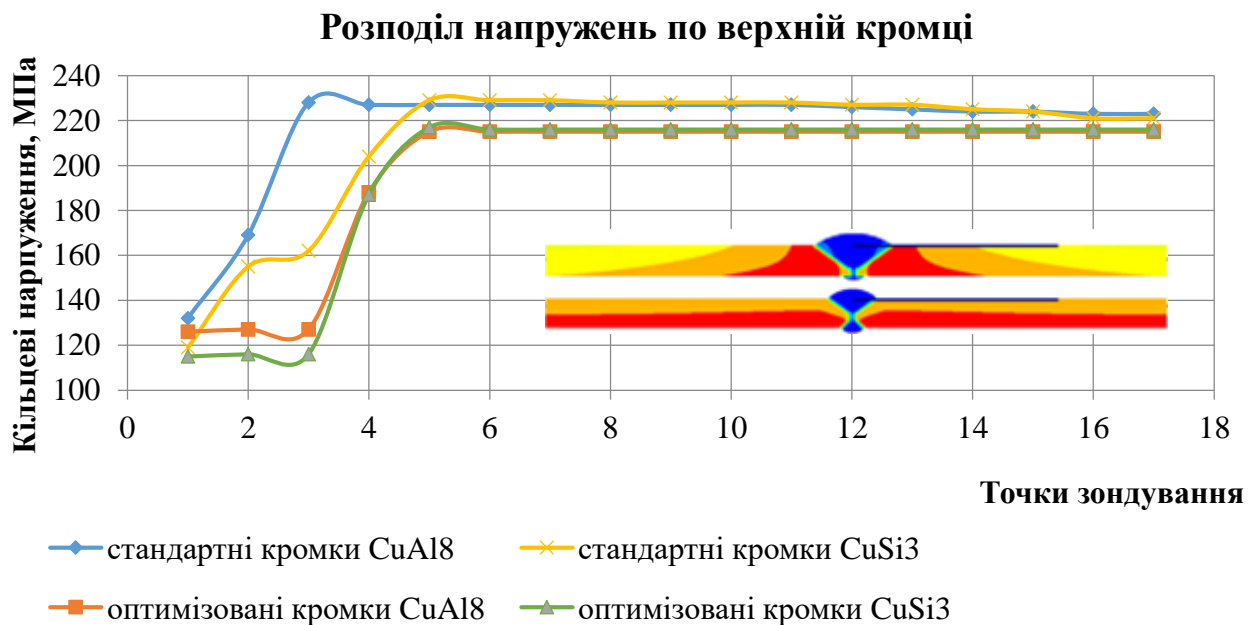


Рисунок 4.13 – Розподіл кільцевих напружень по нижній кромці перерізу з'єднань від центру шва

За рахунок проведеної оптимізації зменшилась величина кільцевих напружень не тільки в стінці труби, але і у самому шві. Також спостерігається більш плавний розподіл напружень від шва до основного металу як по верхній, так і по нижній кромках. На графіку (рис. 4.13) бачимо зменшення величини кільцевих напружень у навколошовній зоні оптимізованого з'єднання, виконаного присадковим матеріалом CuSi3.

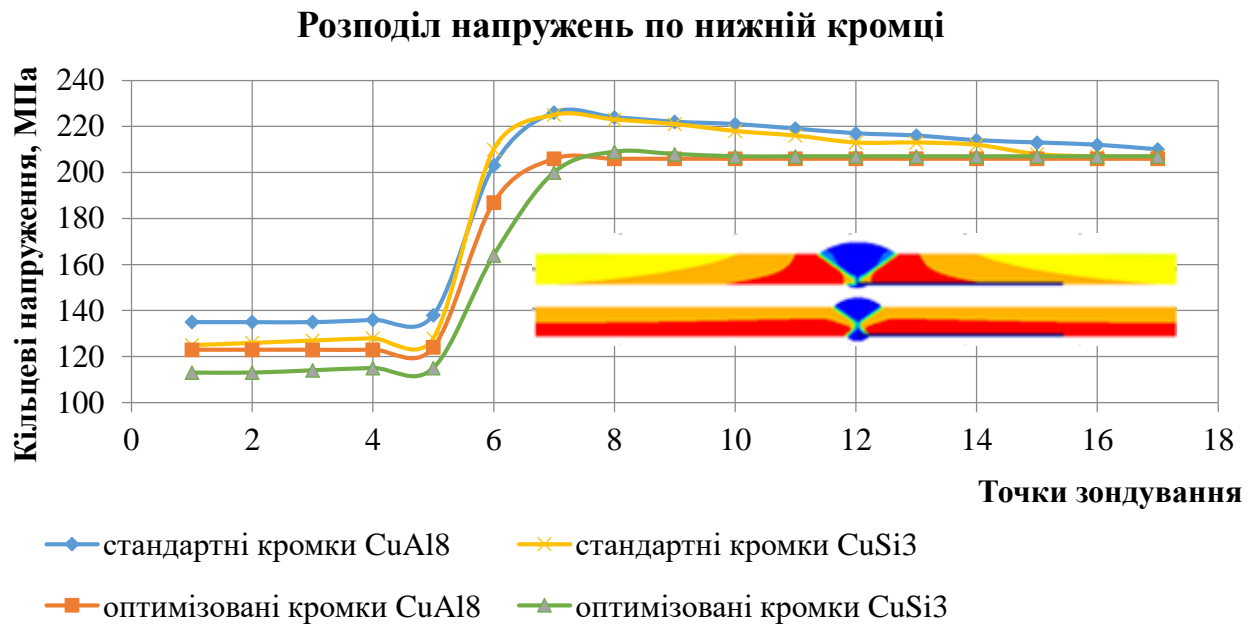


Рисунок 4.14 – Розподіл кільцевих напружень по нижній кромці перерізу з'єднань від центру шва

Результати дослідження напружень у перерізі з'єднань зі стандартною та оптимізованою формою кромки наведено на рис. 4.15.

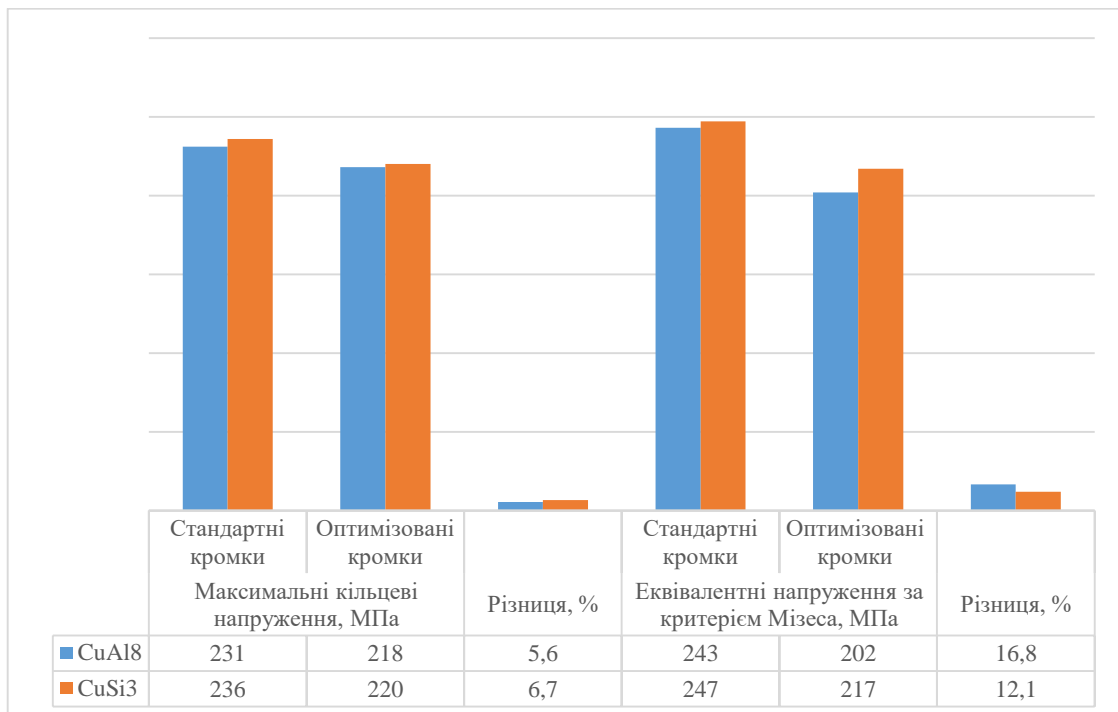


Рисунок 4.15 – Результати імітаційного моделювання напружень у перерізі паяних з'єднань

Отже, проведена оптимізація форми кромки дозволила зменшити не тільки величину кільцевих напружень, а також еквівалентних напружень за Мізесом у перерізі паяних з'єднань труб при їх навантаженні внутрішнім тиском.

4.4 Експериментальне дослідження розподілу напружень у стиках паяних з'єднань труб

Запропоноване імітаційним моделюванням зменшення величини кільцевих напружень через зміну форми підготовки кромки потребує проведення експериментальних досліджень паяних з'єднань труб в умовах моделюючих експлуатаційні.

Експериментальні дослідження напружено-деформованого стану паяних з'єднань труб при навантаженні внутрішнім тиском проводились на спеціально виготовленому стенді методом тензометрії. Методика проведення досліджень детально описана в розділі 2.

Проведене в попередньому підрозділі імітаційне моделювання показало, що при навантаженні паяних з'єднань труб внутрішнім тиском найбільша концентрація кільцевих напружень виникає в навколошовній зоні. Тому для експериментального вимірювання кільцевих напружень тензорезистори наклеювались у 8 точках у поперечному напрямку (рис. 4.16).

Під час випробування досліджуваній зразок 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.

Вимірювання деформацій труби біля шва при навантаженні внутрішнім тиском здійснювалось за показами механічних індикаторів переміщень, встановлених у 8 точках.

Для порівняння випробування проводились на зразках труб із зварним та паяними (зі стандартною та оптимізованою формою кромки) з'єднаннями.

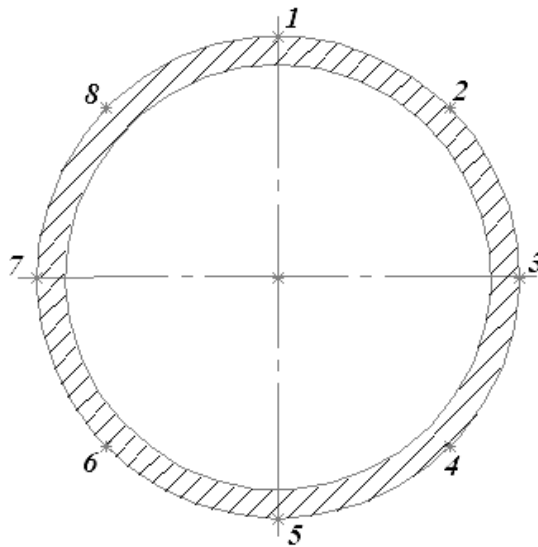


Рисунок 4.16 – Схема вимірювань напружень

Отримані з тензометричного реєструючого комплексу «SPIDER-8» дані передавались на персональний комп'ютер для їх подальшого опрацювання.

Опрацювавши отримані числові дані, було побудовано графік розподілу кільцевих напружень у навколошовній зоні зварного та паяних з'єднань труб при величині внутрішнього тиску 9 МПа (рис. 4.17).



Рисунок 4.17 – Розподіл кільцевих напружень по зовнішній стінці труби при навантаженні внутрішнім тиском

З графіка розподілу напружень (рис. 4.17) бачимо, що при максимальному тиску 9 МПа, максимальна величина кільцевих напружень є найменшою в зварному з'єднанні до 200 МПа. Максимальні кільцеві напруження в паяних з'єднаннях є вищими, ніж у зварному та відрізняються залежно від форми підготовки кромки. Зокрема, найбільшими кільцеві напруження є в паяному з'єднанні труб зі стандартною V-подібною підготовкою кромки - 263 МПа. В усіх випадках величина максимально допустимих напружень не перевищує гранично допустимого значення 265 МПа.

У з'єднанні з обробленням кромки виконаним за розмірами отриманими шляхом оптимізації, величина максимальних кільцевих напружень зменшилась до 208 МПа та є практично на рівні зі зварним з'єднанням.

За показами індикаторів переміщень було побудовано діаграми деформацій пришовної ділянки труби (рис. 4.18).

З графіку розподілу напружень та діаграми деформацій видно, що розподіл кільцевих напружень та деформацій по колу труби є несиметричним: спостерігається овальність труби через її геометричну форму.

Як уже зазначалось в розділі 1, для виготовлення труб польових магістральних трубопроводів використовуються сталеві електрозварні труби, що виготовляються за ГОСТ 10704-91.

Згідно вимог даного стандарту допускаються максимальні відхилення зовнішнього діаметру труб величиною $\pm 0,8\%$. Відповідно для досліджуваної труби діаметром 150 мм, було проведено вимірювання зовнішнього діаметру. Результати вимірювань показали, що максимальне відхилення зовнішнього діаметру труби становить 1,0 мм. Дане відхилення не перевищує допустимого значення, що становить 1,2 мм для даного діаметру труби.

Відхилення геометричних розмірів труб може впливати на збільшення локальних напружень у металі труб та створення додаткових напружень, величина яких може бути досить суттєвою, що також підтверджується дослідженнями в роботі [13].

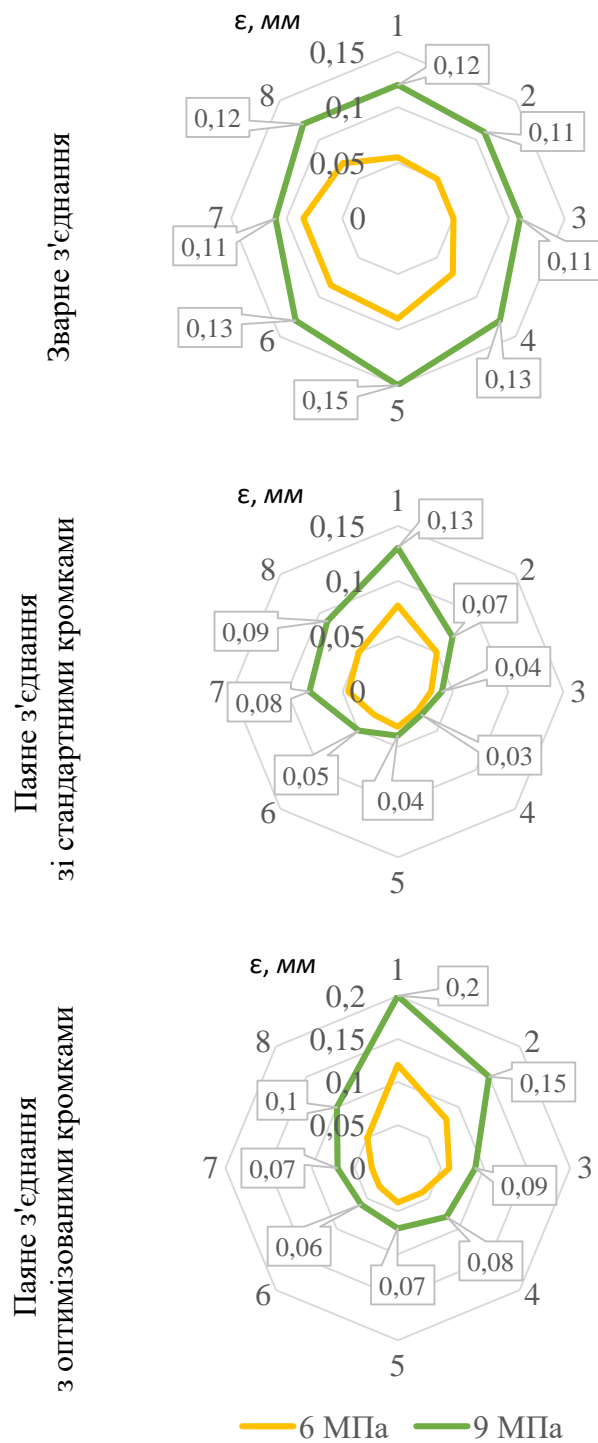


Рисунок 4.18 – Деформація в пришовній зоні труб при навантаженні внутрішнім тиском

Для порівняння результатів величини максимальних кільцевих напружень зварного та паяних з'єднань побудовано діаграму (рис. 4.19).

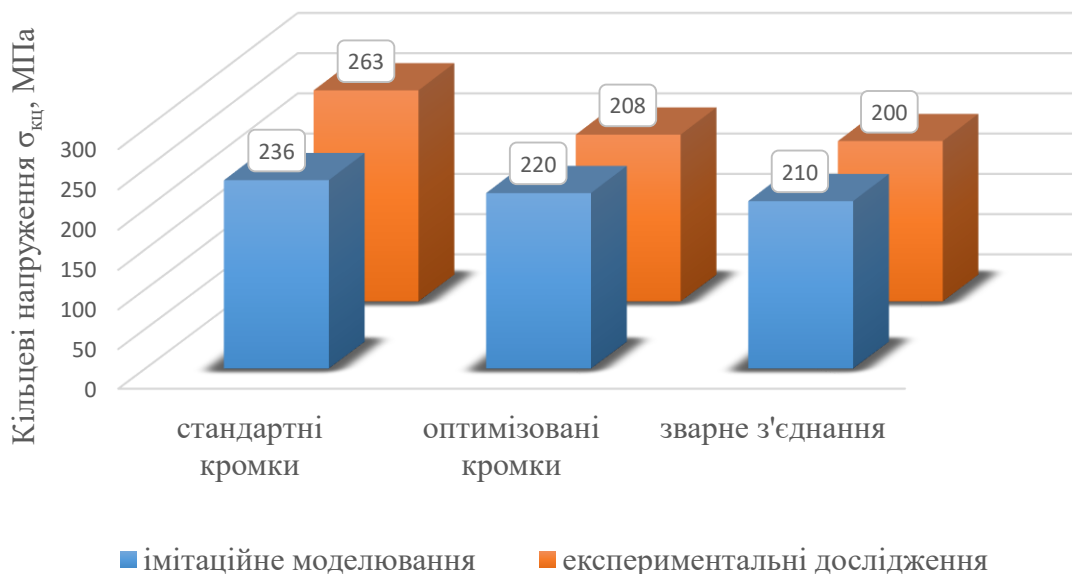


Рисунок 4.19 – Діаграма максимальних кільцевих напружень

Отже, конструкція паяного з'єднання з оптимізованою формою кромки дійсно забезпечує зниження рівня максимальних робочих кільцевих напружень. Максимальні кільцеві напруження у з'єднанні зі стандартними V-подібними кромками досягають 263 МПа, а в з'єднанні з оптимізованими кромками знизилась до 208 МПа - всього на 21%.

Результати проведеного експерименту свідчать про те, що запропонована форма підготовки кромки є ефективною та може бути рекомендованою для реалізації в технологічному процесі ремонту, а також виготовлення польових магістральних трубопроводів із застосуванням дугового паяння.

У таблиці 4.3 подано результати дослідження напружено-деформованого стану паяних з'єднань труб за результатами імітаційного моделювання та експериментальних даних.

Аналіз даних у таблиці 4.3 показує, що розбіжність значень максимальних кільцевих напружень, отриманих імітаційним моделюванням та в процесі експерименту складає від 4,7 до 6,7%. Вказані величини відповідають допустимим похибкам при оцінці напружено-деформованого стану трубопроводів.

Таблиця 4.3 – Порівняльна таблиця максимальних кільцевих напружень

Форма підготовки кромки	Максимальні кільцеві напруження $\sigma_{кц}$, МПа		Порівняння, %
	Результати імітаційного моделювання	Експериментальні дані	
Стандартна	236	263	6,7
Оптимізована	220	208	5,4
Зварне з'єднання	210	200	4,7

Висновки до четвертого розділу

1. Результати дослідження напружено-деформованого стану з'єднань труб виконаних методом дугового паяння свідчать, що на розподіл та величину напружень у перерізі з'єднань суттєво впливає форма підготовки кромки. Імітаційне моделювання методом кінцевих елементів показало, що найбільша концентрація напружень виникає на верхній кромці труб між швом та основним металом. Такий розподіл напружень є вкрай небезпечним, що і підтверджується результатами випробувань зразків на розтяг.

2. Запропонована зміна форми підготовки кромки, шляхом параметричної оптимізації дозволила 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: концентрація максимальних кільцевих напружень. В оптимізованому з'єднанні максимальні кільцеві напруження є рівномірно розподіленими по нижній кромці труб, що дасть змогу підвищити їх міцність.

3. Експериментальне дослідження напружено-деформованого стану стиків труб при навантаженні внутрішнім тиском підтвердило, що конструкція паяного з'єднання з обробленням кромки за розмірами, встановленими шляхом параметричної оптимізації, дійсно забезпечує зниження рівня максимальних робочих кільцевих напружень. Максимальні кільцеві напруження у з'єднанні з

оптимізованими кромками знизились до 208 МПа, порівняно із з'єднанням зі стандартними V-подібними кромками - 263 МПа, в цілому - на 21%.

4. Результати проведеного експерименту свідчать про те, що запропонована форма підготовки кромок є ефективною та може бути рекомендованою для реалізації в технологічному процесі ремонту, а також виготовлення польових магістральних трубопроводів із застосуванням дугового паяння.

Список використаних джерел у розділі 4

1. Ковалко М. П., Грудз В. Я., Михалків В. Б. та ін. Трубопровідний транспорт газу. Київ: Агентство з раціонального використання енергії, 2002. 600 с.

2. Бородавкин П. П., Березин В. Л. Сооружение магистральных трубопроводов. Москва: Недра, 1978. 407 с.

3. Амосов А.А. Техническая теория тонких упругих оболочек: монография. Москва: Издательство АСВ, 2009. 304 с.

4. Новожилов В. В. Теория тонких оболочек. Ленинград : Гос. со- юз. изд-во судостр. промышленности, 1962. 431 с.

5. Погорелов В. И. Строительная механика тонкостенных конструкций. Санкт-Петербург: БХВ-Петербург, 2007. 528 с.

6. Лейбо А. Н. Справочник механика нефтеперерабатывающего завода: справочное пособие. Москва: Наука, 1963. 840 с.

7. Царицынский А. А. Обзор существующих программных продуктов многокритериальной оптимизации объектов аэрокосмической техники. *Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов*. 2015. Вып. 4. С. 112-123. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Pptvk_2015_4_12 (дата звернення: 26.02.2016).

8. Кривошеев И.А., Хохлова Ю.А., Завьялов Р.А. «Черный ящик» как основа решателя задач оптимизации ГТД. *Молодой ученый*. 2011. №10. С. 76–81.

9. IOSO – новейшая стратегия оптимизации. *Сигма Технология*. URL: <http://www.iosotech.com/ru/products.htm> (дата звернення: 12.03.2016).

10. API: Матеріал из Википедии – свободной энциклопедии. URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/API>. (дата звернення: 15.03.2016).

11. 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. С. 80-87.

12. 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.

13. Охрімчук С. О., Руденко С. М., Бабельський Р. М. Огляд можливих причин виникнення тріщин на двошовних трубах. *Трубопровідний транспорт*. 2011. № 4. С. 22–25.

РОЗДІЛ 5

РОЗРОБКА ТЕХНОЛОГІЇ РЕМОНТУ ПОЛЬОВИХ МАГІСТРАЛЬНИХ ТРУБОПРОВІДІВ У ПОЛЬОВИХ УМОВАХ

Ремонт пошкоджених труб проводять на спеціалізованих заводах, або в умовах напівстаціонарних польових ремонтних баз. При застосуванні даних трубопроводів під час військових дій, транспортування пошкоджених труб та доставка нових до місця аварії є не завжди можливим та потребує додаткових затрат.

Проведені в даній роботі дослідження показали, що для ремонту труб польових магістральних трубопроводів успішно може бути застосована технологія дугового паяння. Для скорочення часу проведення ремонтних робіт доцільно було б розробити пересувний трубо-ремонтний мобільний комплекс.

5.1 Технологія ремонту польових магістральних трубопроводів

Як уже зазначалось у першому розділі, найбільш характерними пошкодженнями при експлуатації польових магістральних трубопроводів є пошкодження манжетів або розтрубів труб, при тому, що тіло труби залишається непошкодженим або навпаки. В умовах військових дій пошкоджені труби замінюють та доставляють на ремонтні бази або заводи для проведення їх ремонту.

Ремонтують пошкоджені труби відрізанням пошкоджених елементів та приварюванням на їх місце інших. Труби польових магістральних трубопроводів для захисту їх від корозії є оцинкованими, що створює певні труднощі при їх ремонті, а саме зварюванні. Для того, щоб цинкове покриття не перешкоджало процесу зварювання, а також, щоб запобігти появі пор та інших дефектів у металі шва перед зварюванням на прилеглих до місця зварювання поверхнях цинкове покриття зачищають на ширину 10-15 мм механічним способом.

При ремонті труб ПМТП на ремонтних підприємствах для приварювання манжетів або розтрубів до труби застосовують механізоване зварювання в середовищі захисних газів, оскільки цей спосіб є простим та високо продуктивним. Але після зварювання метал шва та попередньо зачищені ділянки біля шва залишаються незахищеними від корозії, тому потрібно проводити додатковий захист цих поверхонь.

При виготовленні труб польових магістральних трубопроводів цинкове покриття наноситься методом гарячого цинкування. При проведенні ремонтних робіт для відновлення незахищених поверхонь немає технологічних можливостей застосувати гаряче цинкування, тому зазвичай для нанесення цинкового покриття застосовують метод дугової металізації. Але при дуговій металізації не завжди вдається отримати рівномірний шар покриття і це також потребує додаткових затрат.

Провівши аналіз проблем зварювання оцинкованих сталей було встановлено, що сучасна технологія дугового паяння може бути альтернативою дуговому зварюванню та дозволить забезпечити корозійну стійкість шва і зберегти цілісність захисного покриття у прилеглих до шва ділянках.

На основі проведених досліджень та отриманих експериментальних результатів було розроблено технологію ремонту труб польових магістральних трубопроводів із застосуванням методу дугового паяння.

Технологічний процес ремонту труб ПМТП передбачає проведення ряду операцій, що відображені на схемі (рис. 5.1). Запропонований технологічний процес, на відміну від існуючого, виключає досить затратну та трудомістку операцію дугової металізації шва на прилеглих ділянках, що свідчить про збільшення його продуктивності та зменшення собівартості.

Провівши відповідні дослідження в розділі 4, було встановлено найбільш раціональну форму підготовки кромки труб та розміри шва, що забезпечить відповідну міцність та дозволить зменшити концентрацію напружень у стикових з'єднаннях при дуговому паянні.

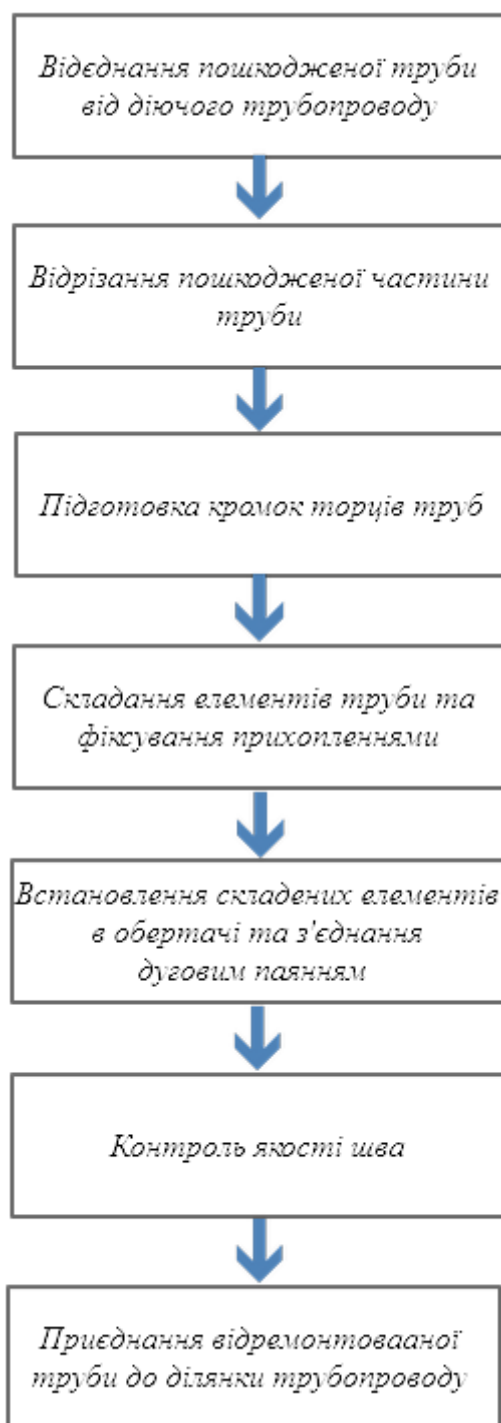
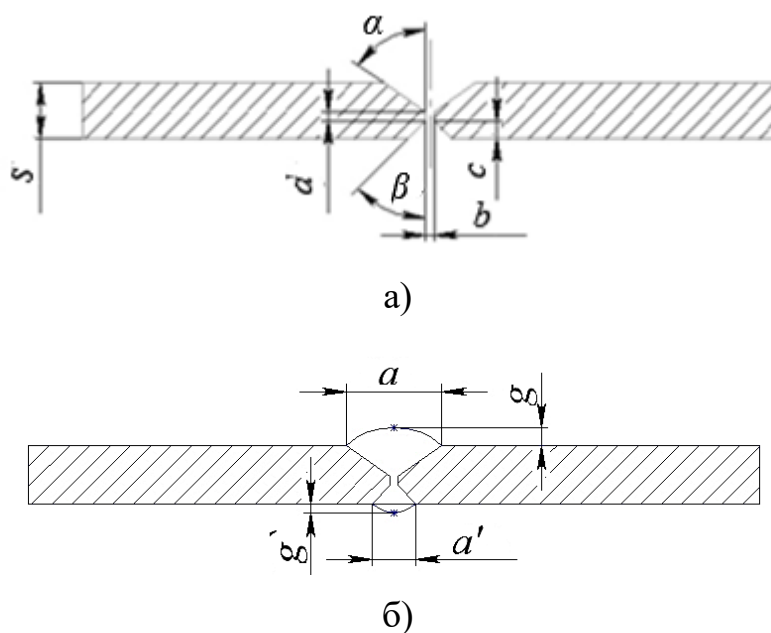


Рисунок 5.1 – Схема удосконаленого технологічного процесу ремонту труб польових магістральних трубопроводів

Оптимізована форма краєк та відповідні геометричні розміри шва показано на рис. 5.2, а їх розміри наведено в таблиці 5.1.



а) – форма та розміри підготовки кромки; б) – форма та розміри шва

Рисунок 5.2 – Форма та розміри підготовки кромки і шва

Таблиця 5.1 – Розміри та форма кромки і швів для стикових дуго-паяних з'єднань

Товщина стінки S , мм	b , мм	c , мм	d , мм	α , °	β , °	a , мм	a' , мм	g , мм	g' , мм
2-4	0,5	1,0	0,5	55 ± 5	45 ± 5	8 ± 1	$2,5 \pm 0,5$	$1 \pm 0,5$	$1 \pm 0,5$

Проведені дослідження свідчать, що для того, щоб запобігти пошкодженню захисного цинкового покриття на прилеглих до шва ділянках потрібно зменшити тепловий вплив. Для забезпечення цієї вимоги, а також для заповнення розроблення кромки дугове паяння необхідно проводити у два проходи.

За результатами експериментальних досліджень було встановлено найбільш оптимальні параметри режиму дугового паяння труб ПМТП-150.

Рекомендовані параметри режимів дугового паяння наведено в таблиці 5.2.

Таблиця 5.2 – Рекомендовані параметри режиму дугового паяння

Марка присадкового дроту	Діаметр дроту, мм	Захисне Середовище	Шар шва	Струм I, A	Напруга дуги U, A	Швидкість паяння $V, \text{см/хв}$	Швидкість подачі дроту $V_{п.д}, \text{м/хв}$
CuSi3, CuAl8	1,0	аргон	1	70	16	18	4,0
			2	105	19	35	5,5

5.2 Розробка пересувного трубо-ремонтного мобільного комплексу

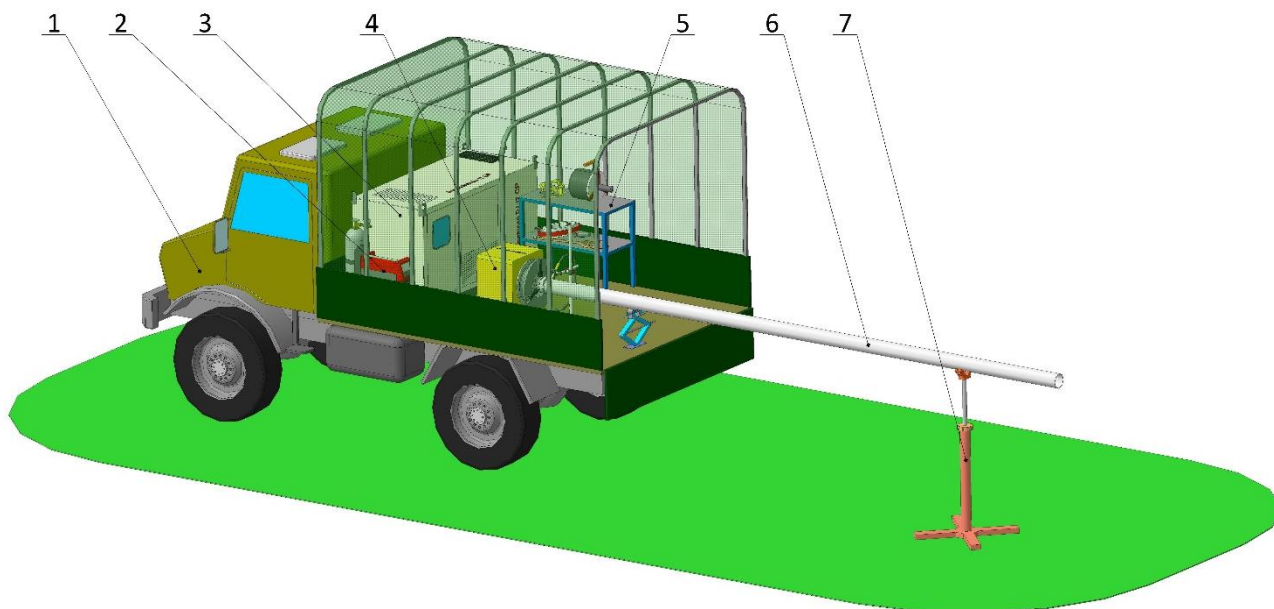
Як уже зазначалось в розділі 1 основне призначення польових магістральних трубопроводів є забезпечення військ паливом. Також, як показав досвід експлуатації, основні пошкодження польових магістральних трубопроводів виникають під час військових дій, тому виникає гостра потреба в їх ремонті. У таких ситуаціях не завжди є можливість доставити нові труби до місця аварії для заміни, тому доцільним є проведення ремонтних робіт безпосередньо на місці аварії. Але для вирішення даного завдання необхідно до місця аварії доставити певний комплект необхідного зварювального та допоміжного обладнання а також забезпечити його автономне живлення.

На даний час наша військова та цивільна промисловість не випускає спеціалізованих пересувних ремонтних комплексів, тому в даній роботі пропонується розробка такого мобільного комплексу.

Для забезпечення високої прохідності трубо-ремонтного комплексу було вирішено його змонтувати на базі шасі всюдихідного автомобіля Unimog-4000. Даний автомобіль випускається ще з 1944р. німецьким концерном Мерседес Бенц та є досить відомим у світі завдяки своїм винятковим позашляховим якостям, компактності та маневреності [1]. Позашляховики серії Unimog є основним автомобілем німецького Бундесверу, а також застосовуються у цивільних галузях як тягачі, снігозбирачі лісовози та ін..

На платформі автомобіля Unimog-4000 змонтовано комплекс обладнання, що дозволить проводити відрізання пошкодженої частини труби, виконувати оброблення кромки, складання елементів труб, їх фіксацію та дугове паяння.

Запропонований макет пересувного ремонтного комплексу зображено на рисунку 5.3.



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

Рисунок 5.3 – Пересувний трубо-ремонтний комплекс

Технологічний процес ремонту на пересувному ремонтному комплексі (рис. 5.3) починається із встановлення пошкодженої труби 6 на регульованих роликів опорах 7, де відрізають пошкоджену частину труби за допомогою компактного труборіза марки СС221. Після відрізання пошкодженої частини потрібно кромкам труби, до якої буде приєднуватись замінений елемент надати спеціальної форми, згідно вимог технологічного процесу. Для цього використовується спеціальний компактний трубний кромкоріз ПРО 10 ПБ. Підготовлені елементи труби складаються і центруються за допомогою

центратора та фіксуються накладанням прихоплень. Складена конструкція труби встановлюється а фіксується в поворотному столі 4 FRONIUS AKE 50-150, який буде забезпечувати її обертання при паянні.

Дугове паяння проводиться із використанням зварювального напівавтомата 2 FRONIUS TPS-270i. Для живлення всього технологічного обладнання в кузові автомобіля встановлено трьохфазний дизельний генератор 3 Dagakrian DJ 17CP потужністю 12 кВт.

Дане обладнання є досить компактним та задовольняє вимоги технологічного процесу.

Зокрема, для відрізання пошкодженої частини труби було обрано труборіз марки CC221 (рис. 5.4) [2].



Рисунок 5.4 – Труборіз CC221

Труборіз CC221, призначений для якісного різання без грату труб із зовнішнім діаметром від 59 до 225 мм, з товщиною стінки від 0,7 до 15 мм. Превагами даної моделі є компактні розміри, невелика вага та висока точність різки з максимальним відхиленням до 0,25 мм.

Удосконалений технологічний процес ремонту труб дуговим паянням передбачає виконання спеціального оброблення кромки із двостороннім скосом. Тому для виконання даної операції на базі ремонтного комплексу було обрано компактний трубний кромкоріз ПРО 10 ПБ (рис. 5.5) [3], який призначений для оброблення кромки труб діаметром від 40 до 273 мм.



Рисунок 5.5 – Кромкоріз ПРО 10 ПБ

Даний кромкоріз дозволяє одночасно проводити зняття фасок із зовнішньої та внутрішньої сторони труби, а також проводити торцювання. Завдяки компактним розмірам та малій вазі встановлювати кромкоріз на трубі та проводити роботи можна одному оператору. Кріплення даного агрегату здійснюється шляхом затискання на внутрішній поверхні труби за допомогою самоцентрованих кулачків. Кромкоріз ПРО 10 ПБ може комплектуватись як електричним так і пневматичним приводом.

Основною операцією технології ремонту труб є з'єднання елементів труб методом дугового паяння. Тому для проведення дугового паяння було обрано сучасний зварювальний напівавтомат з керованим перенесенням металу відомої австрійської фірми FRONIUS серії TPSi, найкомпактнішу модель даної серії TPS-270i (рис. 5.6).



Рисунок 5.6 – Зварювальний напівавтомат FRONIUS TPS-270i

Зварювальні напівавтомати серії TPS/i - це новітнє обладнання зі швидкістю обміну даними між компонентами системи 100 Mb/c. Керування зварювальними параметрами здійснюється через сенсорний екран.

Головна відмінність даної системи від аналогів у своєму класі - це технологія керованого переносу металу Steel Transfer Technology. Вона дозволяє застосовувати в синергетичному режимі (налаштування по товщині металу), крім традиційних зварювальних технологій, спеціалізовані процеси як для робіт з тонколистовим металом із зазорами, так і для зварювання великих товщин зануреною дугою.

Функціональні можливості джерела живлення забезпечують найкращу якість зварювання в складних просторових положеннях, де традиційні апарати не здатні забезпечити достатнього провару та стабільності горіння дуги.

Високошвидкісна шина даних Speed Net у джерелах серії TPS/і підтримує необхідну дискретність сигналів для відслідковування фаз переходу металу у всьому діапазоні режимів роботи апарата.

Низькоінерційний привід механізму подачі дроту дозволяє зварювальній системі реагувати на зміни у фазах переходу металу не тільки напругою, але і подачею дроту.

Апарат TPS-270і оснащений вбудованим 4-х роликовим приводом, а для м'якого алюмінієвого дроту додатково пропонується планетарний привід PD-Drive. Цифрове керування швидкістю двигуна забезпечує точність та відтворюваність безперервного регулювання швидкості подачі дроту в діапазоні від 0 до 22 м/хв. Технічні характеристики зварювального напівавтомата TPS-270і наведені в таблиці 5.3 [4]

Таблиця 5.3 - Технічні характеристики зварювального напівавтомата TPS-270і

Параметр	Значення
Напруга мережі, В	380-460
Тип джерела живлення	Інверторний
Діапазон зварювального струму, А	3-270
Напруга холостого ходу, В	66
Робоча напруга, В	14,2-27,5
Система керування	Цифрова мікропроцесорна
Інтерфейс	Графічний
Механізм подачі дроту	Вбудований 4-х роликовий
Керування	Ручка-кнопка
Габаритні розміри (д x ш x в), мм	687 x 276 x 445
Вага, кг	32,7

Отже, розроблений пересувний трубно-ремонтний комплекс, на базі всюдихідного автомобіля Unimog-4000 укомплектовано сучасним високотехнологічним та водночас компактним обладнанням, що дозволить

швидко та якісно проводити ремонт пошкоджених труб безпосередньо на місці аварії.

Висновки до п'ятого розділу

1. На основі отриманих експериментальних даних, запропоновано удосконалену схему технологічного процесу ремонту та виготовлення труб польових магістральних трубопроводів.

2. В удосконаленому технологічному процесі запропоновано замінити дугове зварювання дуговим паянням. Це дозволить забезпечити міцність паяних з'єднань на рівні зі зварними та виключити операцію корозійного захисту швів та прилеглих ділянок дуговою металізацією і скоротити час та вартість ремонту.

3. 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.

Список використаних джерел у розділі 5

1. Unimog U 3000 / U 4000 / U 5000. URL: <http://mercedes-benz.com.ua/trucksd/models/unimog/offroad.html> (дата звернення: 09.10.2016).

2. Труборез СС221 (59 -225 мм) URL: <https://qz.dp.ua/p117226572-truborez-ss221-225.html>. (дата звернення: 12.10.2016).

3. Машина для сняття фаски с труб ПРО 10 ПБ. URL: <http://stankidarom.ru/mashina-dlya-snyatiya-faski-s-trub-pro-10-pb> (дата звернення: 12.10.2016).

4. FRONIUS УКРАИНА URL: http://www.fronius.com/cps/rde/xchg/SID-DD82EC17-570044F3/fronius_ukraine/hs.xsl/2510_2787.htm#.VqVBilkTBC1. (дата звернення: 08.10.2016).

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 «БЗ котельно-зварювальний завод».

ДОДАТКИ

ДОДАТОК А

Розрахунок температурного поля при дуговому паянні та зварюванні

$$I_1 := 10\text{e} \quad U_1 := 19 \quad c_p := 3.7\text{e} \quad h := 0.3\text{e} \quad \alpha := 0.00\text{e}$$

$$I_2 := 14\text{e} \quad U_2 := 19.4 \quad \eta := 0.7 \quad a := 0.08\text{e}$$

$$I_3 := 16\text{e} \quad U_3 := 19 \quad b := 2 \cdot \frac{\alpha}{c_p \cdot h} \quad b = 9.947 \times 10^{-3}$$

$$v_1 := 0.5\text{e} \quad v_2 := 0.6\text{e} \quad v_3 := 0.4\text{e}$$

$$q_1 := I_1 \cdot U_1 \cdot \eta$$

$$q_2 := I_2 \cdot U_2 \cdot \eta$$

$$q_3 := I_3 \cdot U_3 \cdot \eta$$

$$q_1 = 1.397 \times 10^3 \quad t_1 := 162.4$$

$$q_2 = 1.901 \times 10^3 \quad t_2 := 142.8$$

$$q_3 = 2.128 \times 10^3 \quad t_3 := 204.8$$

$$r := 7.5 \quad 2 \cdot \pi \cdot r = 47.124$$

$$y := -1.5, -1.4, \dots, 1.5 \quad x := C$$

$$T1(y) = \sum_{i=-100}^{100} \int_0^{t_1} \frac{\frac{q_1}{h}}{c\rho \cdot [4 \cdot \pi \cdot a \cdot (t_1 - \tau)]} \cdot \exp \left[\frac{-(x - v_1 \cdot \tau - i \cdot 2 \cdot \pi \cdot r)^2 - y^2}{4 \cdot a \cdot (t_1 - \tau)} - b \cdot (t_1 - \tau) \right] d\tau$$

$$T2(y) = \sum_{i=-100}^{100} \int_0^{t_2} \frac{\frac{q_2}{h}}{c\rho \cdot [4 \cdot \pi \cdot a \cdot (t_2 - \tau)]} \cdot \exp \left[\frac{-(x - v_2 \cdot \tau - i \cdot 2 \cdot \pi \cdot r)^2 - y^2}{4 \cdot a \cdot (t_2 - \tau)} - b \cdot (t_2 - \tau) \right] d\tau$$

$$T3(y) = \sum_{i=-100}^{100} \int_0^{t_3} \frac{\frac{q_3}{h}}{c\rho \cdot [4 \cdot \pi \cdot a \cdot (t_3 - \tau)]} \cdot \exp \left[\frac{-(x - v_3 \cdot \tau - i \cdot 2 \cdot \pi \cdot r)^2 - y^2}{4 \cdot a \cdot (t_3 - \tau)} - b \cdot (t_3 - \tau) \right] d\tau$$

$$f(y) := 110$$

$$f2(y) := 200$$

$$\begin{array}{cccc}
 y = \begin{pmatrix} -1.5 \\ -1.4 \\ -1.3 \\ -1.2 \\ -1.1 \\ -1 \\ -0.9 \\ -0.8 \\ -0.7 \\ -0.6 \\ -0.5 \\ -0.4 \\ -0.3 \\ -0.2 \\ -0.1 \\ 1.332 \times 10^{-15} \\ 0.1 \\ 0.2 \\ 0.3 \\ 0.4 \\ 0.5 \\ 0.6 \\ 0.7 \\ 0.8 \\ 0.9 \\ 1 \\ 1.1 \\ 1.2 \\ 1.3 \\ 1.4 \\ 1.5 \end{pmatrix} &
 TI(y) = \begin{pmatrix} 109.091 \\ 112.681 \\ 117.407 \\ 123.846 \\ 132.866 \\ 145.784 \\ 164.623 \\ 192.549 \\ 234.478 \\ 298.503 \\ 398.025 \\ 556.479 \\ 817.716 \\ 1.273 \times 10^3 \\ 2.138 \times 10^3 \\ 3.329 \times 10^3 \\ 2.138 \times 10^3 \\ 1.273 \times 10^3 \\ 817.716 \\ 556.479 \\ 398.025 \\ 298.503 \\ 234.478 \\ 192.549 \\ 164.623 \\ 145.784 \\ 132.866 \\ 123.846 \\ 117.407 \\ 112.681 \\ 109.091 \end{pmatrix} &
 T2(y) = \begin{pmatrix} 150.194 \\ 154.104 \\ 159.146 \\ 165.992 \\ 175.705 \\ 189.972 \\ 211.498 \\ 244.678 \\ 296.762 \\ 379.998 \\ 515.75 \\ 743.122 \\ 1.14 \times 10^3 \\ 1.882 \times 10^3 \\ 3.518 \times 10^3 \\ 2.135 \times 10^4 \\ 3.518 \times 10^3 \\ 1.882 \times 10^3 \\ 1.14 \times 10^3 \\ 743.122 \\ 515.75 \\ 379.998 \\ 296.762 \\ 244.678 \\ 211.498 \\ 189.972 \\ 175.705 \\ 165.992 \\ 159.146 \\ 154.104 \\ 150.194 \end{pmatrix} &
 T3(y) = \begin{pmatrix} 171.889 \\ 183.676 \\ 199.323 \\ 220.352 \\ 248.913 \\ 288.081 \\ 342.35 \\ 418.147 \\ 525.399 \\ 679.209 \\ 903.802 \\ 1.24 \times 10^3 \\ 1.764 \times 10^3 \\ 2.635 \times 10^3 \\ 4.281 \times 10^3 \\ 7.111 \times 10^3 \\ 4.281 \times 10^3 \\ 2.635 \times 10^3 \\ 1.764 \times 10^3 \\ 1.24 \times 10^3 \\ 903.802 \\ 679.209 \\ 525.399 \\ 418.147 \\ 342.35 \\ 288.081 \\ 248.913 \\ 220.352 \\ 199.323 \\ 183.676 \\ 171.889 \end{pmatrix}
 \end{array}$$

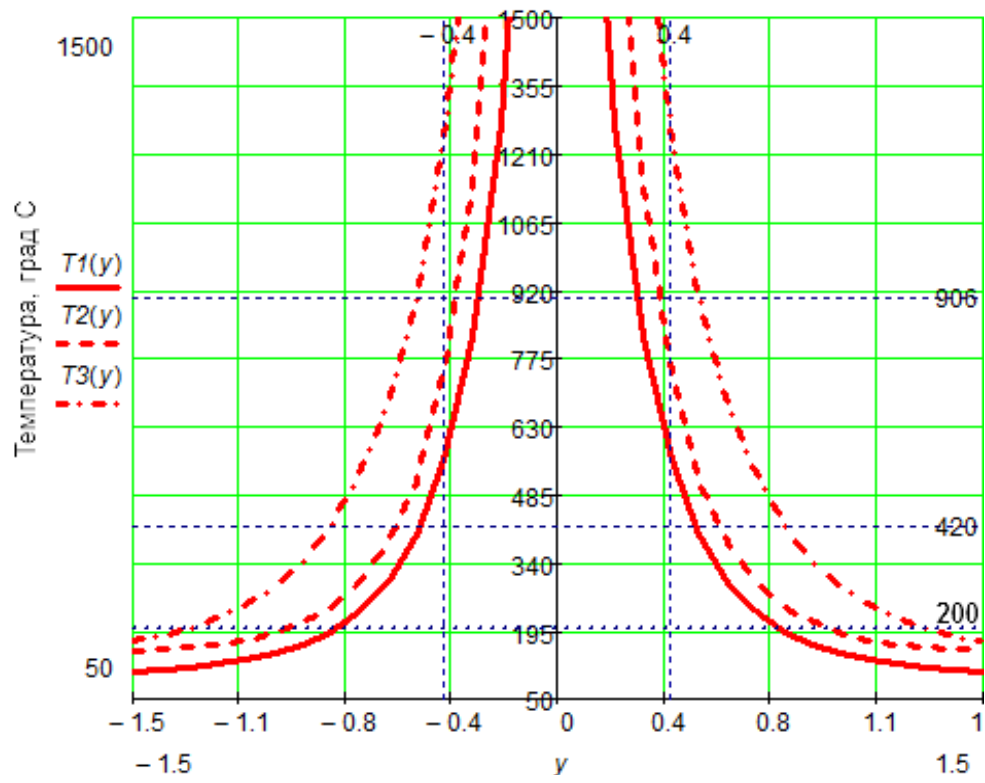


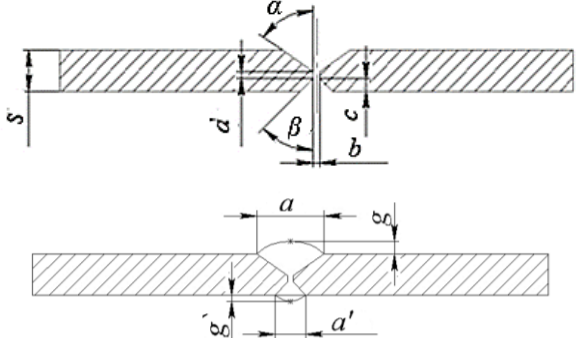
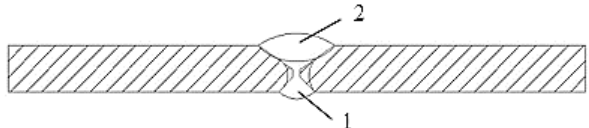
Рисунок А.1 – Розподіл температури в перерізі з'єднань

ДОДАТОК Б

Карта технологічного процесу приєднання розтрубних елементів до труб
ПМТП-150 дуговим паянням

Спосіб з'єднання: дугове паяння (MIG-brazing)	Основний матеріал (марка): 16ГС
Тип шва: стиковий	Типорозмір, мм: діаметр – 150 товщина стінки – 3,2
Вид з'єднання: С (стикове одностороннє)	Вимоги до прихоплень: три прихоплення довжиною 10-15мм (виконати дуговим паянням)
Положення шва: РА (нижнє)	
Матеріали для дугового паяння: - присадковий дріт CuSi3, CuAl8 ISO 24373 - захисний газ аргон	Обладнання для дугового паяння: FRONIUS TPS-270i

Ескізи з'єднання

Конструктивні розміри підготовки кромки та шва					Порядок накладання швів				
									
Товщина стінки S, мм	b, мм	c, мм	d, мм	$\alpha, ^\circ$	$\beta, ^\circ$	a, мм	a', мм	g, мм	g', мм
2-4	0,5	1,0	0,5	55±5	45±5	8±1	2,5±0,5	1,5±0,5	1±0,5

Технологічні параметри дугового паяння

Шар шва	Діаметр дроту, мм	Струм I, А	Напруга дуги U, А	Швидкість Паяння V, см/хв	Швидкість подачі дроту V _{н.д.} , м/хв
Кореневий та прихоплення	1,0	70	16	18	4,0
Заповнюючий	1,0	105	19	35	5,5

ДОДАТОК В

Список опублікованих праць за темою дисертації

Публікації в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

7. 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.

8. 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.

9. 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**)

10. 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**)

11. 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.

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

Публікації, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

6. 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.

7. 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.

8. Матвієнків О. М., Шлапак Л.С. Застосування MIG-паяння для з'єднання оцинкованих труб. *Машины, обладнання і матеріали для нарощування 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.

9. 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.

10. Матвієнків О.М. Вплив форми кромки 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.