

## АНОТАЦІЯ

*Ковальчук М.О.* Структурування та властивості зварних з'єднань різнотипних поліетиленів і розробка технології ремонту поліетиленових трубопроводів. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 132 «Матеріалознавство» (13 – Механічна інженерія). – Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, м. Київ, 2024.

Метод зварювання нагрітим інструментом встик використовується для зварювання поліетиленових труб в процесі будівництва водо- та газопроводів. Стандартна технологія передбачає зварювання лише поліетиленів однакових марок. Водночас, існує необхідність ремонту «старих» трубопроводів, які створені із марок поліетиленів, які наразі не виробляються. Це передбачає зварювання різнотипних марок поліетиленів. У зв'язку з цим, актуальним є дослідження особливостей структури та властивостей зварних з'єднань труб із різнотипних поліетиленів.

Робота присвячена дослідженню структури, морфології, теплофізичних, термомеханічних та експлуатаційних властивостей зварних з'єднань різнотипних поліетиленів, сформованих шляхом зварювання однозонним нагрітим інструментом встик, а також розробленню дослідного зразка двозонного нагрівального інструменту для зварювання труб із різнотипних поліетиленів.

Були проведені дослідження впливу параметрів зварювання однозонним нагрітим інструментом встик, часу та факторів робочого середовища на структуру та властивості зварних з'єднань труб з різнотипних технічних поліетиленів. Було розроблено розрахунково-експериментальну методику прогнозування тривалості надійної експлуатації зварних з'єднань труб із різнотипних поліетиленів, розроблено та випробувано дослідний зразок двозонного нагрівального інструменту у складі традиційної зварювальної установки із функцією автономного регулювання температури

на кожній з двох робочих поверхонь для ремонту трубопроводів із різнотипних поліетиленів для подовження їх термінів експлуатації. Проведено дослідження морфології та експлуатаційних характеристик зразків різнотипних поліетиленів, сформованих двозонним нагрівальним інструментом.

**Метою роботи** є дослідження структури та властивостей зварних з'єднань різнотипних поліетиленів ПЕ-63/ПЕ-80 та ПЕ-63/ПЕ-100, сформованих шляхом зварювання однозонним нагрітим інструментом встик, а також розроблення дослідного зразка двозонного нагрівального інструменту для якісного зварювання різнотипних поліетиленів для ремонту полімерних трубопроводів.

**Об'єктом дослідження** є процеси зварювання і закономірності формування зварних з'єднань труб із різних марок поліетиленів.

**Предметом дослідження** є зварні з'єднання труб із різнотипних поліетиленів у комбінаціях ПЕ-63/ПЕ-80 та ПЕ-63/ПЕ-100, сформовані шляхом зварювання однозонним та двозонним нагрівальним інструментом.

**Наукова новизна одержаних результатів.** У роботі були проведені комплексні дослідження структури та властивостей зварних з'єднань різних марок поліетиленових труб, які були сформовані шляхом зварювання за допомогою однозонного та двозонного нагрівального інструменту.

1. Вперше розрахунковим шляхом встановлено що при зварюванні однозонним нагрівальним інструментом встик різнотипних поліетиленів ПЕ-63/ПЕ-80 і ПЕ-63/ПЕ-100 має місце нерівномірність температурних полів у зоні формування зварного з'єднання, а саме:

- при нагріванні комбінації ПЕ-63/ПЕ-80 різниця температур торців труб із ПЕ-80 і ПЕ-63 становить  $\Delta=9...10^{\circ}\text{C}$  у момент закінчення процесу нагрівання при  $t=75$  с,  $\Delta=8...9^{\circ}\text{C}$  у момент з'єднання торців на початку стискання труб при  $t=78$  с, і  $\Delta=5...6^{\circ}\text{C}$  після охолодження при  $t=200$  с;

- при нагріванні комбінації ПЕ-63/ПЕ-100 різниця температур торців труб із ПЕ-100 і ПЕ-63 становить  $\Delta=10...11^{\circ}\text{C}$  у момент закінчення процесу

нагрівання при  $t=75$  с,  $\Delta=9...10$  °С у момент з'єднання торців на початку стискання труб при  $t=78$  с, і  $\Delta=7...8$ °С після охолодження при  $t=200$  с.

2. Встановлено особливості аморфно-кристалічної структури зварних з'єднань різнотипних поліетиленів ПЕ-63/ПЕ-80 та ПЕ-63/ПЕ-100, які були отримані з використанням однозонного нагрівального інструменту та перебували в робочому середовищі протягом двох років. Виявлено зміну інтенсивностей дифракційних максимумів, які відповідають кристалографічним площинам з індексами (111) та (200) для зварних з'єднань ПЕ-63/ПЕ-100, які знаходились на повітрі та у ґрунті.

3. Вперше виявлено зміни термомеханічної та теплофізичної поведінки зварних з'єднань різнотипних поліетиленів, які були отримані з використанням однозонного нагрівального інструменту. Проаналізовано температурні переходи склування та плавлення, а також процеси термоокислювальної деструкції у зварних з'єднаннях різнотипних поліетиленів.

4. Вперше розроблено математичну модель процесу зварювання труб із різнотипних поліетиленів секційним (двозонним) нагрівальним інструментом, який створює теплові потоки різної інтенсивності крізь торці кожної з труб і забезпечує розплавлення однакового об'єму матеріалу, необхідного для формування симетричного ґрату у зварному з'єднанні. Розрахунковим шляхом визначено, що для зварювання ПЕ-63 та ПЕ-100 ця умова забезпечується при розташуванні ізоляції, яка відповідає температурі максимуму теплоємності (138°С), на однаковій відстані від торців в момент початку осадження труб.

**Практичне значення отриманих результатів.** Отримані результати та зварювальне обладнання дозволяють забезпечити можливість ремонту поліетиленових трубопроводів, виготовлених із «старих» марок поліетилену без необхідності перебудови всього трубопроводу.

Розроблена розрахунково-експериментальна методика прогнозування тривалості експлуатації зварних з'єднань труб із різнотипних поліетиленів.

Розроблено метод випробування стійкості до тріщин зразків стикових зварних з'єднань поліетиленових труб дією постійного локального навантаження.

Розроблено та випробувано двозонний нагрівальний інструмент з можливістю автономного регулювання температури на кожній з двох робочих поверхонь. Розроблено технологічні рекомендації з використання дослідного зразка двозонного нагрівального інструменту в складі універсального устаткування для зварювання труб із однотипних та різнотипних поліетиленів.

**Характеристика роботи.** У вступі висвітлено стан прикладних проблем, які виникають при стиковому зварюванні поліетиленових труб нагрітим інструментом, обґрунтовано актуальність теми, сформульовано мету та задачі дослідження, висвітлено наукову новизну та практичне значення одержаних результатів. Представлено інформацію про зв'язок роботи з науковими темами та апробацію результатів дисертації, наведено публікації автора, в яких викладено основний зміст дисертаційної роботи.

У розділі 1 проаналізовано існуючі літературні джерела, що висвітлюють сучасний стан досліджень зварювання різнотипних поліетиленів. Наведено основні характеристики полімерів, зокрема, поліетиленів. Розглянуто перспективу використання отриманих в роботі результатів для подальшої можливості ремонту трубопроводів та їх використання для транспортування водню.

У розділі 2 наведені відомості про матеріали та методи, які використовувалися в процесі виконання дисертаційної роботи.

У розділі 3 представлені результати математичного моделювання температурних полів при зварюванні зразків із різнотипних поліетиленів нагрітим інструментом встик та запропоновано метод прогнозування їх експлуатаційних характеристик в залежності від параметрів зварювання. Наведені експериментальні результати, отримані із використанням методів

рентгеноструктурного та термомеханічного аналізу. Проаналізовано структуру та термомеханічні властивості зварних з'єднань ПЕ-63/ПЕ-80 та ПЕ-63/ПЕ-100, які тривалий час (2 роки) перебували в робочому середовищі. Наведено результати досліджень морфології, теплофізичних та експлуатаційних властивостей технічних поліетиленів різних марок та їх зварних з'єднань. Виявлено суттєві відмінності у теплофізичних характеристиках зразків, які мають бути враховані при ремонті поліетиленових трубопроводів.

Розроблено метод випробування стійкості до тріщин зразків стикових зварних з'єднань поліетиленових труб дією постійного локального навантаження.

У розділі 4 методом кінцевих елементів проведено математичне моделювання теплових процесів при зварюванні різнотипних труб двозонним нагрівальним інструментом. Представлено інформацію щодо розроблення двозонного нагрівального інструменту з можливістю автономного регулювання температури на кожній з двох робочих поверхонь, який призначений для зварювання полімерних труб із різнотипних поліетиленів. Сформульовано критерій оптимальності формування зварного з'єднання із різних поліетиленів та визначено оптимальні значення температури робочої поверхні для кожного з них.

У розділі 5 наведено результати серії експериментальних зварювальних робіт з використанням дослідного зразка двозонного нагрівального інструменту. Досліджено особливості формування зварних з'єднань при різних умовах зварювання. Проведено дослідження морфології та механічні випробування зразків на розтяг. Оптимізовано параметри процесу зварювання, що забезпечують оптимальне формування та механічну міцність різнотипних стикових зварних з'єднань поліетиленових труб. На основі порівняльного аналізу отриманих експериментальних даних було остаточно допрацьовано двозонний нагрівальний інструмент для зварювання труб із різнотипних поліетиленів. Розроблено технологічні рекомендації щодо

використання дослідного зразка нагрівального інструменту в складі універсального устаткування для зварювання труб із однотипних та різнотипних поліетиленів.

**Ключові слова:** технічний поліетилен, зварювання нагрітим інструментом встик, структура, властивості, дослідний зразок нагрівального інструменту.

## ANNOTATION

Kovalchuk M.O. Structure formation and properties of welded joints of various types of polyethylene and development of polyethylene pipeline repair technology. – Qualifying scientific work on manuscript rights.

Dissertation for obtaining the scientific degree of Doctor of Philosophy in specialty 132 "Materials Science" (13 - Mechanical Engineering). - E.O.Paton Electric Welding Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, 2024.

The method of heated tool butt welding is used for welding of polyethylene pipes in the process of building water and gas pipelines. The standard technology involves welding only polyethylenes of the same brand. At the same time, there is a need to repair "old" pipelines, which are made of polyethylene brands that are not currently produced. This involves welding of various types of polyethylene. In this regard, it is relevant to study the peculiarities of the structure and properties of welded joints of pipes made of various types of polyethylene.

The work is devoted to the study of the structure, morphology, thermophysical, thermomechanical and operational properties of welded joints of different types of polyethylene, formed by butt welding with a single-zone heated tool, as well as to the development of a prototype of a two-zone heating tool for welding pipes from different types of polyethylene.

Studies on the influence of welding parameters with a single-zone heated butt tool, time and factors of the working environment on the structure and properties of welded joints of pipes made of various types of technical polyethylenes were conducted. A calculation-experimental method for predicting

the duration of reliable operation of welded joints of pipes made of various types of polyethylene was developed, a prototype of a two-zone heating tool with the function of autonomous temperature regulation on each of the two working surfaces was developed and tested as part of a traditional welding equipment for repairing pipes made of various types of polyethylene to extend their service life. A study of the morphology and operational characteristics of samples of various types of polyethylene formed by a two-zone heating tool was conducted.

**The aim of the work** is to study the structure and properties of welded joints of PE-63/PE-80 and PE-63/PE-100 polyethylenes of various types, formed by butt welding with a single-zone heated tool, as well as to develop a prototype of a two-zone heating tool for quality welding of various of polyethylenes for polymer pipelines repairment.

**The object of the study** is welding processes and patterns of formation of welded joints of pipes made of different types of polyethylene.

**The subject of the study** is the welded joints of pipes made of different types of polyethylene in PE-63/PE-80 and PE-63/PE-100 variations, formed by welding with a single-zone and two-zone heating tool.

**Scientific novelty of the obtained results.** In the work, comprehensive studies of the structure and properties of welded joints of different types of polyethylene pipes, which were formed by welding using a single-zone and two-zone heating tool, were carried out.

1. For the first time, it was established by calculation that during welding with a single-zone heating tool, of different types of polyethylene PE-63/PE-80 and PE-63/PE-100, uneven temperature fields in the zone of formation of the welded joint are taking place, namely:

- when heating the PE-63/PE-80 combination, the temperature difference between the ends of PE-80 and PE-63 pipes is  $\Delta=9\dots 10^{\circ}\text{C}$  at the end of the heating process at  $t=75$  s,  $\Delta=8\dots 9^{\circ}\text{C}$  at the moment of joining of the ends at the beginning of pipe compression at  $t=78$  s, and  $\Delta=5\dots 6^{\circ}\text{C}$  after cooling at  $t=200$  s;

- when heating the PE-63/PE-100 combination, the temperature difference between the ends of the PE-100 and PE-63 pipes is  $\Delta=10...11^{\circ}\text{C}$  at the end of the heating process at  $t=75$  s,  $\Delta=9...10^{\circ}\text{C}$  at the moment of joining of the ends at the beginning of pipe compression at  $t=78$  s, and  $\Delta=7...8^{\circ}\text{C}$  after cooling at  $t=200$  s.

2. For the first time, the features of the amorphous-crystalline structure of welded joints of different types of PE-63/PE-80 and PE-63/PE-100 polyethylenes, which were obtained using a single-zone heating tool and were in the working environment for two years, were established. A change in the intensities of the diffraction maxima corresponding to crystallographic planes with indices (111) and (200) was revealed for PE-63/PE-100 welded joints that were in air and in soil.

3. Changes in the thermomechanical and thermophysical behavior of welded joints of various types of polyethylenes, which were obtained using a single-zone heating tool, were revealed. The temperature transitions of vitrification and melting, as well as the processes of thermo-oxidative destruction in welded joints of various types of polyethylene, were analyzed.

4. A mathematical model of the process of welding of pipes made of different types of polyethylene with a sectional (two-zone) heating tool was developed, which creates heat flows of different intensity through the ends of each of the pipes and ensures the melting of the same volume of material necessary for the formation of a symmetrical grid in the welded joint. By calculation, it was determined that for welding PE-63 and PE-100, this condition is ensured when the isoline is located, which corresponds to the temperature of the maximum heat capacity ( $138^{\circ}\text{C}$ ), at the same distance from the ends at the time of the start of pipe deposition.

**Practical significance of the obtained results.** The obtained results and welding equipment make it possible to repair polyethylene pipelines made of "old" polyethylene types without the need to rebuild the entire pipeline.



A calculation-experimental method for predicting the duration of operation of welded joints of pipes made of various types of polyethylene has been developed.

A crack resistance testing method of samples of butt-welded joints of polyethylene pipes under the action of a constant local load has been developed.

A two-zone heating tool with the possibility of autonomous temperature regulation on each of the two working surfaces has been developed and tested.

Technological recommendations for the use of a pilot sample of a two-zone heating tool as part of universal equipment for welding pipes made of the same and different types of polyethylene have been developed.

**Characteristics of work.** The introduction highlights the state of applied problems that arise during butt welding of polyethylene pipes with a heated tool, substantiates the relevance of the topic, formulates the goal and objectives of the research, highlights the scientific novelty and practical significance of the obtained results. Information on the connection of the work with scientific topics and the approval of the results of the dissertationis presented, the author's publications, which outline the main content of the dissertation workare given.

Chapter 1 analyzes the existing literary sources, highlighting the current state of research on the welding of various types of polyethylene. The main characteristics of polymers, in particular, polyethylenes, are given. The prospect of using the results obtained in the work for the further possibility of pipeline repair and their use for hydrogen transportation was considered.

Chapter 2 provides information on the materials and methods used in the dissertation work.

Chapter 3 presents the results of mathematical modeling of temperature fields during welding of samples from different types of polyethylene with a heated tool, and a method of predicting their operational characteristics depending on the welding parameters is proposed. The experimental results obtained using X-ray structural and thermomechanical analysis methods are given. The structure and thermomechanical properties of PE-63/PE-80 and PE-63/PE-100 welded joints,

which were in the working environment for a long time (2 years), were analyzed. The results of studies of the morphology, thermophysical and operational properties of technical polyethylenes of various types and their welded joints are presented. Significant differences in the thermophysical characteristics of the samples were revealed, which should be taken into account when repairing polyethylene pipelines.

A crack resistance testing method of samples of butt-welded joints of polyethylene pipes under the influence of a constant local load has been developed.

In Chapter 4, mathematical modeling of thermal processes during welding of various types of pipes with a two-zone heating tool was carried out using the finite element method. Information on the development of a two-zone heating tool with the possibility of autonomous temperature regulation on each of the two working surfaces, which is intended for welding polymer pipes from various types of polyethylene is presented. The optimality criteria for the formation of a welded joint from different polyethylenes is formulated and the optimal values of the temperature of the working surface for each of them are determined.

Chapter 5 presents the results of a series of experimental welding works using a prototype of a two-zone heating tool. The peculiarities of the formation of welded joints under different welding conditions were studied. Morphological studies and mechanical tensile tests of the samples were carried out. The parameters of the welding process are optimized, which ensure optimal formation and mechanical strength of various types of butt-welded joints of polyethylene pipes. On the basis of the comparative analysis of the obtained experimental data, a two-zone heating tool for welding pipes made of various types of polyethylene was finalized. Technological recommendations for the use of a trial sample of a heating tool as part of universal equipment for welding pipes made of the same type and different types of polyethylene have been developed.

**Key words:** technical polyethylene, heated tool butt welding, structure, properties, prototype of a heating tool.

## Список публікацій здобувача

1. **M. Kovalchuk**, M. Iurzhenko, V. Demchenko, I. Senchenkov. The Investigation of the Welding Process of Different-Type Polyethylenes. *Advances in Thin Films, Nanostructured Materials and Coatings, Lecture Notes in Mechanical Engineering* / Ed. A.D. Pogrebnyak, V. Novosad. Springer Nature Singapore Pte Ltd, 2018. P. 225–233. (**Видання входить до міжнародної наукометричної бази даних SCOPUS**)

[https://doi.org/10.1007/978-981-13-6133-3\\_23](https://doi.org/10.1007/978-981-13-6133-3_23)

2. М.В. Юрженко, **М.О. Ковальчук**, В.Ю. Кондратенко, В.Л. Демченко, А.М. Пилипенко, К.Г. Гусакова, Г.В. Жук, В.С. Вербовський, О.В. Гопаченко, І.А.Гоцик. Вплив газових сумішей водню з метаном на експлуатаційні та теплофізичні характеристики поліетиленових труб діючих газорозподільних мереж України. *Енерготехнології та ресурсозбереження*. 2023. № 2.С. 96–108. (**Журнал входить до міжнародної наукометричної бази даних SCOPUS**)

<https://doi.org/10.33070/etars.2.2023.08>

3. Максим Юрженко, **Максим Ковальчук**, Володимир Кондратенко, Валерій Демченко, Андрій Пилипенко, Валерій Вербовський, Геннадій Жук, Андрій Лукашенко. Водень у полімерних трубах. *Нафтогазова галузь України*. 2022. №1. С. 28–31.

4. **М.О. Ковальчук**, М. В. Юрженко, В. Л. Демченко, М. Г. Кораб, Р. В. Колісник. Якість та експлуатаційні характеристики зварних з'єднань труб із різнотипних поліетиленів. *Автоматичне зварювання*. 2020. №1.С.14–20.

<https://doi.org/10.37434/as2020.11.03>

5. **M. Kovalchuk**, M. Iurzhenko, V. Demchenko, I. Senchenkov. The Investigation of the Welding Process of Different-Type Polyethylenes.

*Proceedings of the 2018 IEEE 8<sup>th</sup> International Conference on Nanomaterials: Applications & Properties, Part 1.* 2018. p. 01SPN48-1–01SPN48-4. (**Видання входить до міжнародної наукометричної бази даних SCOPUS**)

<https://doi.org/10.1109/NAP44020.2018>

6. Юрженко М.В., **Ковальчук М.О.**, Кондратенко В.Ю., Демченко В.Л., Гусакова К.Г., Вербовський В.С., Жук Г.В., Костогриз К.П., Гоцик І.А. Вплив газових сумішей водню з метаном на фізичну та хімічну структуру поліетиленових труб діючих газорозподільних мереж України. *Технічна діагностика та неруйнівний контроль.* 2023. № 2 С. 41–46.

<https://doi.org/10.37434/tdnk2023.02.06>

7. М.Г. Кораб, М.В. Юрженко, **М.О. Ковальчук**, Л.С. Паршутіна, О.М. Чукашкін. Дослідження структури зварних з'єднань полімерів з використанням ефекту Ребіндера. *Автоматичне зварювання.* 2023. № 2. С. 18–23.

8. Юрженко М.В., Ковальчук М.О., Кондратенко В.Ю., Демченко В.Л., Гусакова К.Г., Вербовський В.С., Жук Г.В., Костогриз К.П., Гоцик І.А. Вплив газових сумішей водню з метаном на фізичну та хімічну структуру поліетиленових труб з ПЕ-80. *Технічна діагностика та неруйнівний контроль.* 2023. № 3. С. 21–25.

<https://doi.org/10.37434/tdnk2023.03.04>

**Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:**

1. **М.О. Kovalchuk.**, Iurzhenko M.V., Shadrin A.O., Demchenko V.L., Galchun A.M., Kondratenko V.Yu., Anistratenko V.V., Menzheres M.G. Recent peculiarities and possible problems with reconstruction and renovation of polyethylene pipelines. *9<sup>th</sup> International conference of young scientists on welding and related technologies.* (м. Київ, Україна, 19–22 травня 2021 р.) Київ, 2020. (Форма участі – очна)

2. **Kovalchuk M.O.**, Iurzhenko M.V., Galchun A.N., Kondratenko V.Y., Demchenko V.L. Nanostructuring of different types of polyethylene in their compatible welded joints. *International research and practice conference: Nano-*

*technology and nanomaterials «NANO-2017»*. (м. Чернівці, Україна, 23–26 серпня 2017 р.). Чернівці, 2017. (Форма участі – очна)

3. **М.О. Ковальчук**, М.В. Юрженко, М.Г. Кораб, В.Л. Демченко. Структуризація різнотипних поліетиленів в їх сумісних зварних з'єднаннях. *Міжнародна науково-практична конференція «Розвиток інноваційної діяльності в галузі технічних та фізико-математичних наук»*. (м. Миколаїв, Україна, 22–24 вересня 2016 р.). Миколаїв, 2016. (Форма участі – очна)

4. **М.О. Kovalchuk**, M.V. Iurzhenko, M.G. Korab, V.L. Demchenko. Nanostructuring of different types of polyethylene in their compatible welded joints. *International research and practice conference: Nano-technology and nanomaterials «NANO-2016»*. (м. Львів, Україна, 24–27 серпня 2016 р.). Львів, 2016. (Форма участі – очна)

5. **М. Kovalchuk**, M. Iurzhenko, V. Demchenko, I. Senchenkov. The investigation of the welding process of different-type polyethylenes *2018 IEEE 8th International Conference on Nanomaterials: Applications & Properties* (смт. Затока, Україна, 9–14 вересня 2018). Затока, 2018 (Форма участі – очна)

6. **Kovalchuk M.**, Iurzhenko M., Demchenko V., Galchun A., Kondratenko V. Structuring of different types of polyethylene in their compatible welded joints. *IX International Conference of young scientists «Welding and related technologies. WRTYS-2017* (Київ, Україна, 23–26 травня 2017 р.) Київ, 2017. (Форма участі – очна)