

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ  
ІНСТИТУТ ЕЛЕКТРОЗВАРЮВАННЯ ІМ. Є.О. ПАТОНА

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ  
ІНСТИТУТ ЕЛЕКТРОЗВАРЮВАННЯ ІМ. Є.О. ПАТОНА

Кваліфікаційна наукова  
праця на правах рукопису

УДК: 621.791.461

**КОВАЛЬЧУК МАКСИМ ОЛЕКСАНДРОВИЧ**

**ДИСЕРТАЦІЯ**

**СТРУКТУРОУТВОРЕННЯ ТА ВЛАСТИВОСТІ ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ  
РІЗНОТИПНИХ ПОЛІЕТИЛЕНІВ І РОЗРОБКА ТЕХНОЛОГІЇ РЕМОНТУ  
ПОЛІЕТИЛЕНОВИХ ТРУБОПРОВОДІВ**

Спеціальність – 132 Матеріалознавство

Галузь знань – 13 Механічна інженерія

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело \_\_\_\_\_ М.О. Ковальчук

Науковий керівник: Юрженко Максим Володимирович, чл.-кор. НАН України  
д.т.н., професор,

Науковий керівник: Демченко Валерій Леонідович, д.х.н., старший дослідник

Київ – 2024

## 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,  $\Delta=9...10^{\circ}\text{C}$  у момент з'єднання торців на початку стискання труб при  $t=78$  с, і  $\Delta=7...8^{\circ}\text{C}$  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 грату у зварному з'єднанні. Розрахунковим шляхом визначено, що для зварювання ПЕ-63 та ПЕ-100 ця умова забезпечується при розташуванні ізолінії, яка відповідає температурі максимуму теплоємності ( $138^{\circ}\text{C}$ ), 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 repair.

**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  $\Delta=9...10^{\circ}\text{C}$  at the end of the heating process at  $t=75\text{ s}$ ,  $\Delta=8...9^{\circ}\text{C}$  at the moment of joining of the ends at the beginning of pipe compression at  $t=78\text{ s}$ , and  $\Delta=5...6^{\circ}\text{C}$  after cooling at  $t=200\text{ s}$ ;

- 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  $t=75\text{ s}$ ,  $\Delta=9...10^{\circ}\text{C}$  at the moment of joining of the ends at the beginning of pipe compression at  $t=78\text{ s}$ , and  $\Delta=7...8^{\circ}\text{C}$  after cooling at  $t=200\text{ s}$ .

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°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 dissertation is presented, the author's publications, which outline the main content of the dissertation work are 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. Pogrebnjak, 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. **М. 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. **M. 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* (сmt. 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*)

## ЗМІСТ

<b>Перелік умовних позначень, символів, одиниць вимірювання, скорочень.....</b>	<b>18</b>
<b>Вступ.....</b>	<b>19</b>
<b>Розділ 1. Огляд літератури.....</b>	<b>25</b>
1.1. Структура та властивості полімерних матеріалів.....	25
1.1.1. Відомості про полімери та їх класифікація.....	25
1.1.2. Хімічна будова і структура полімерів.....	26
1.2. Особливості структури та властивості поліетиленових матеріалів	28
1.2.1. Класифікації поліетиленів.....	28
1.2.2. Хімічна будова, структура та властивості поліетилену.....	30
1.3. Особливості технічних поліетиленів для виробництва поліетиленових труб.....	31
1.4. Особливості поліетиленових труб, що використовуються для будівництва напірних трубопроводів та методи їх з'єднання.....	32
1.5. Особливості зварювання труб із різнотипної поліетиленової сировини.....	39
1.6. Перспективи застосування поліетиленових матеріалів.....	42
1.6.1. Дослідження з використання водню як альтернативного палива та його вплив на технічні полімери.....	42
1.6.2. Наявні дослідження з вивчення впливу водню на поліетиленові матеріали .....	45
Висновки до розділу 1.....	49
<b>Розділ 2. Матеріали та методи дослідження.....</b>	<b>51</b>
2.1. Характеристика матеріалів дослідження.....	51
2.2. Методи дослідження.....	52
Висновки до розділу 2.....	57

<b>Розділ 3. Особливості структури та властивості технічних поліетиленів різних марок.....</b>	<b>58</b>
3.1. Моделювання температурних полів при тепловому зварюванні труб із різнотипних поліетиленів. Прогнозування оптимальних параметрів зварювання.....	58
3.2. Морфологічні особливості зварних з'єднань полімерних труб, виготовлених з технічних марок поліетилену ПЕ-63, ПЕ-80 та ПЕ-100	75
3.3. Структура та термомеханічні властивості зварних з'єднань труб з різнотипних поліетиленів, які перебували під дією факторів робочого середовища.....	79
3.4. Теплофізичні та експлуатаційні характеристики технічних поліетиленів та зварних з'єднань на їх основі.....	83
3.5. Розробка методики короткострокового випробування зварних стикових з'єднань труб із різнотипних поліетиленів для оцінки їх довговічності.....	88
Висновки до розділу 3.....	102
<b>Розділ 4. Розробка та випробування двозонного нагрівального інструменту.....</b>	<b>104</b>
4.1. Математичне моделювання температурних полів при тепловому зварюванні двозонним нагрівальним інструментом труб із різнотипних поліетиленів.....	104
4.2. Розробка та випробування двозонного нагрівального інструменту для зварювання труб із різнотипних поліетиленів при ремонті трубопроводів із пластмас.....	113
Висновки до розділу 4.....	118
<b>Розділ 5. Експериментальні роботи зі зварювання двозонним нагрівальним інструментом.....</b>	<b>119</b>
5.1. Експериментальні роботи зі зварювання для випробування двозонного нагрівального інструменту.....	119



5.2. Розробка технологічних рекомендацій щодо використання дослідного зразка нагрівального інструменту в складі універсального устаткування для зварювання поліетиленових труб.....	124
Висновки до розділу 5.....	128
<b>Загальні висновки.....</b>	<b>129</b>
<b>Список використаних джерел.....</b>	<b>132</b>

## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ ВИМІРЮВАННЯ, СКОРОЧЕНЬ

ААС	адсорбційно-активне середовище
ДБН	державні будівельні норми
ДСК	диференціальна сканувальна калориметрія
ЗСЗ	зварне стикове з'єднання
ПАР	поверхнево-активна речовина
ПЕ	поліетилен
ПЕ-63, ПЕ-80, ПЕ-100	технічні (трубні) марки поліетилену
ПЕВГ	поліетилен високої густини
ПЕВТ	поліетилен високого тиску
ПЕНГ	поліетилен низької густини
ПЕНТ	поліетилен низького тиску
ПЕСТ	поліетилен середнього тиску
ТГА	термогравіметричний аналіз
ТМА	термомеханічний аналіз
HDPE	поліетилен високої густини
MRS	мінімальна довготривала міцність
$T_{\delta}$	температура початку термоокислювальної деструкції
$T_{\delta \text{ макс.}}$	температура максимуму інтенсивності термоокислювальної деструкції
$T_{пл}$	температура плавлення
$\Delta H$	ентальпія плавлення
$\chi_{кр}$	ступінь кристалічності

## ВСТУП

**Актуальність теми.** Останім часом проблема ремонту поліетиленових трубопроводів є досить актуальною. Дана проблема виникає тому, що на початку широкомасштабного будівництва та впровадження трубопроводів з пластмас різного призначення, в тому числі газопроводів, використовували труби з композитного поліетилену марки ПЕ-63. У 2000-их роках на заміну композитного поліетилену марки ПЕ-63 прийшли композитні поліетилені марок ПЕ-80 та ПЕ-100, а труби та з'єднувальні деталі з поліетилену марки ПЕ-63 поступово припинили використовувати. Однак, при ремонті та реконструкції існуючих трубопроводів, які виготовлені з композитного поліетилену типу ПЕ-63, виникає проблема зварювання різнотипних марок поліетиленів та небезпека руйнування їх зварних з'єднань з часом. Оскільки майже 100% труб та з'єднувальних деталей, що сьогодні використовуються для будівництва трубопроводів з пластмас в даний час виготовляються з композитного поліетилену ПЕ-80 або ПЕ-100. Наведені марки трубних поліетиленів та виготовлені з них з'єднувальні деталі мають різні фізико-механічні властивості, а тому потребують спеціальних технологічних параметрів процесу їх зварювання. Існуюча інформація про можливості зварювання труб та деталей з поліетиленових композитів різних типів, надійність та довговічність їх зварних з'єднань суттєво суперечлива та обмежена.

Отже, проведення експериментальних досліджень зі стикового зварювання різнотипних поліетиленів, аналіз структури та властивостей отриманих зварних з'єднань, а також розробка спеціальних технологій зварювання та методів прогнозування якості зварних з'єднань є актуальними проблемами, що потребують вирішення найближчим часом, особливо це стосується таких об'єктів підвищеної небезпеки, як поліетиленові газопроводи.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дисертаційна робота виконувалась у відділі зварювання пластмас Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України згідно з планами науково-

дослідних програм, зокрема: «Розробка технологій зварювання труб, листів та плівок із полімерних композиційних матеріалів, створення нового зварювального обладнання з використанням сучасних способів керування та дозування енергії.» (2016–2019 рр., номер державної реєстрації 0116U004220).

**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.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні **завдання**:

1. Провести математичне моделювання температурних полів при зварюванні однозонним нагрітим інструментом встик труб із різнотипних поліетиленів.
2. Дослідити особливості структури та термомеханічні властивості зварних з'єднань, сформованих шляхом зварювання різнотипних поліетиленів однозонним нагрітим інструментом встик.
3. Провести дослідження теплофізичних властивостей технічних поліетиленів.
4. Виконати дослідження морфології та експлуатаційних характеристик зварних з'єднань.
5. Розробити метод випробування стійкості до тріщин зразків стикових зварних з'єднань поліетиленових труб під дією постійного локального навантаження.
6. Провести математичне моделювання температурних полів при зварюванні двозонним нагрітим інструментом встик.
7. Розробити двозонний нагрівальний інструмент для зварювання полімерних труб із різнотипних поліетиленів з можливістю автономного регулювання температури на кожній з двох робочих поверхонь.

**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 ПЕ-63/ПЕ-80 та ПЕ-63/ПЕ-100, сформовані шляхом стикового зварювання однозонним та двозонним нагрівальним інструментом.

**Методи дослідження.** Для досягнення мети в роботі були використані стандартизовані методи досліджень: візуальний контроль зразків труб у відповідності до EN 13100-1:2017, структуру зразків вивчали методом ширококутового розсіювання рентгенівських променів, морфологію досліджуваних зразків вивчали за допомогою оптичної поляризаційної мікроскопії, теплофізичні та термомеханічні властивості досліджуваних матеріалів вивчали методами диференційної сканувальної калориметрії (ДСК), термогравіметричного та термомеханічного аналізу, експлуатаційні характеристики зразків вивчали шляхом механічних випробувань на одинісний розтяг.

**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,  $\Delta=9...10^{\circ}\text{C}$  у момент з'єднання торців на початку стискання труб при  $t=78$  с, і  $\Delta=7...8^{\circ}\text{C}$  після охолодження при  $t=200$  с.

2. Вперше 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. 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. 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 грату у зварному з'єднанні. Розрахунковим шляхом визначено, що для зварювання ПЕ-63 та ПЕ-100 ця умова забезпечується при розташуванні ізолінії, яка відповідає температурі максимуму теплоємності ( $138^{\circ}\text{C}$ ), 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.

**Особистий внесок здобувача.** Дисертація є самостійною науковою працею, в якій основні положення, результати та висновки, що виносяться на захист, отримані здобувачем особисто. Вибір тематики, постановка мети та завдань дослідження здійснено здобувачем спільно з науковими керівниками д.т.н. Юрженко М.В. та д.х.н. Демченко В.Л.

У проведенні експериментальних досліджень та інтерпретації результатів брали участь Гохфельд В.Л. (допомога у проведенні експериментів згідно методики прогнозування тривалості надійної експлуатації зварних з'єднань труб із різнотипних поліетиленів), Кондратенко В.Ю. (узагальнення результатів міцнісних випробувань на стійкість труб до внутрішнього тиску).

**Апробація результатів роботи.** Основні результати дисертаційної роботи були представлені на міжнародних та вітчизняних конференціях, серед яких: 9<sup>th</sup> International conference of young scientists on welding and related technologies, 19–22 травня 2021 р., м. Київ, Україна; International research and practice conference: Nanotechnology and nanomaterials «NANO-2017», 23–26 серпня 2017 р., м. Чернівці, Україна. Міжнародна науково-практична конференція «Розвиток інноваційної діяльності в галузі технічних та фізико-математичних наук», 22–24 вересня 2016 р., м. Миколаїв, Україна; Nanotechnology and nanomaterials «NANO-2016», 24–27 серпня 2016 р., м. Львів, Україна; VI International research and practice conference «Nanotechnology and nanomaterials» (NANO-2018), 27–30 August 2018, Kyiv, Ukraine; 2018 IEEE International conference «Nanomaterials: Application and Properties» (NAP-2018), 9–14 September 2018, Zatoka, Ukraine; The 4<sup>th</sup> IPW young professionals international conference YPIC-2018, 29–31, August 2018, Metz, France.

**Публікації.** Основний зміст дисертаційної роботи викладено в 14 наукових працях, які включають 1 розділ у монографії, 7 статей у наукових фахових виданнях (3 включені до міжнародної наукометричної бази даних

Scopus), 6 тез доповідей на міжнародних та вітчизняних наукових та науково-практичних конференціях.

**Структура та обсяг дисертації.** Дисертація складається з анотації українською та англійською мовами, вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел. Загальний обсяг роботи становить 142 сторінки і містить 71 рисунок, 13 таблиць і список з 128 використаних літературних джерел.



## РОЗДІЛ 1

### ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ

#### 1.1 Структура та властивості полімерних матеріалів

##### 1.1.1 Відомості про полімери та їх класифікація

До полімерів відносять речовини, молекули яких складаються із багатократно повторюючих структурних одиниць [1].

Полімери, за походженням поділяють на:

- а) *синтетичні*, які синтезують із низькомолекулярних сполук (мономерів) [1-3];
- б) *природні*, які синтезують із природних матеріалів (целюлоза, крохмаль, білки, нуклеїнові кислоти, пектинові речовини та ін.) [1];
- в) *штучні*, які синтезують шляхом хімічної модифікації природних полімерів [1-3].

Полімери побудовані з макромолекул, до складу яких входять до сотень тисяч атомів, тому такі матеріали мають велику відносну молекулярну масу. Лінійні макромолекули являють собою атомні угруповання, в яких певні ланки, що утворилися в процесі полімеризації з молекул низькомолекулярних сполук (мономерів), багаторазово повторюються [1, 2].

За характером зв'язку між макромолекулами полімери поділяються на [4]:

- термопласти (зв'язок між макромолекулами здійснюється за допомогою сил Ван-дер-Ваальса);
- реактопласти (зв'язок між макромолекулами здійснюється за допомогою хімічних зв'язків).

Полімерні матеріали можуть знаходитися в трьох релаксаційних станах – склоподібному, високоеластичному і в'язкотекучому. Різниця між ними проявляється не тільки в інтенсивності теплового руху структурних елементів, а й в характері деформацій. Так, зовнішня механічна дія на полімер, що перебуває у високоеластичному стані зумовлює пружні деформації а у в'язкотекучому – необоротні, пластичні деформації [2].

### 1.1.2 Хімічна будова і структура полімерів

Полімери характеризуються наявністю у них довгих ланцюгових молекул, які складаються з послідовно з'єднаних ланок, в котрих окремі атоми з'єднані між собою доволі міцними валентними хімічними зв'язками [2].

За хімічною будовою основного ланцюга полімери поділяють на [5]:

- *гомоланцюгові* – ланцюг побудовано з однакових атомів (поліетилен, полівінілхлорид тощо);

- *гетероланцюгові* – головний ланцюг складається з різних атомів, які в свою чергу можуть містити у головному ланцюгу атоми вуглецю, або не містять у головному ланцюгу атоми вуглецю (елементоорганічні полімери).

Специфічні властивості полімерів як в конденсованому твердому стані, так і в розчинах, обумовлені будовою їх макромолекул [4]. В загальному випадку макромолекули можуть бути лінійними, розгалуженими, східчастими і сітчастими (зшитими). Макромолекули з лінійною хімічною будовою (поліетилен, полівінілхлорид, целюлоза, натуральний каучук та ін.) являють собою довгі ниткоподібні ланцюги з дуже великим ступенем асиметрії, їхній поперечний розмір у тисячу і більше разів менший від довжини. Макромолекули з розгалуженою структурою – це ланцюги з бічними відгалуженнями. Щоб отримати такі макромолекули в процесі синтезу до лінійної макромолекули одного складу можна «прищепити» бічні ланцюги іншого складу. Такі розгалужені полімери називають прищепленими. Розгалужені полімери за довжиною бічних ланцюгів поділяють на коротко та довголанцюгові, а за характером взаємного їх розміщення – на статистичні, гребнеподібні та зіркоподібні [6].

#### *Фазові переходи полімерів*

При фазових переходах відбуваються зміни температури, тиску або інших зовнішніх термодинамічних параметрів; вони можуть супроводжуватись стрибкоподібними змінами термодинамічних і структурних характеристик

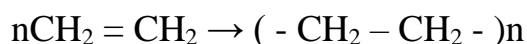
полімерної системи [7].

Полімери можуть знаходитися в кристалічному, рідкому, рідкокристалічному фазовому стані. У кристалічному фазовому стані наявний трансляційний порядок в розміщенні частин макромолекули, що утворює кристалографічну комірку, в рідкому – тільки ближній порядок. Рідкокристалічний фазовий стан є проміжним між кристалічним і рідким. В рідкокристалічному фазовому стані макромолекули розміщені паралельно одна відносно одної і мають ближній орієнтаційний порядок [8].

Для більшості полімерів характерні фазові переходи першого і другого роду. При фазовому переході першого роду густина і енергія полімерної системи змінюється стрибкоподібно. Прикладами такого фазового переходу може бути кристалізація, плавлення, переходи між рідкокристалічними і аморфними станами. При фазовому переході другого роду стрибкоподібно змінюються такі параметри як теплоємність та об'ємний коефіцієнт теплового розширення [7].

#### *Макромолекулярні характеристики синтетичних полімерів*

Як правило макромолекули синтетичних полімерів формуються в результаті полімеризації (процес отримання високомолекулярних сполук, при якому макромолекула утворюється шляхом послідовного приєднання молекул одного або декількох низькомолекулярних речовин до розширюючого активного центру) або поліконденсацією (процес утворення полімерів або поліфункціональних з'єднань, що супроводжуються виділенням супутніх низькомолекулярних речовин (води, спирту, галогеноводню і т.д.)) [9]. Найпростішим прикладом полімеризації є утворення поліетилену з етилену:



**етилен**

**поліетилен**

де  $n$  – ступінь полімеризації.

Синтетичні полімери також мають інші характеристики [10]:

- *конфігураційні ознаки* – розгалуженість або сітчатість структури.

- *за будовою основного ланцюга* – гомоланцюгові полімери (ланцюг складається з однакових атомів), гетероланцюгові (ланцюг – складається з атомів двох або більше видів).
- *полярність* – визначається будовою як основною ланцюга, так і бокових груп. Прикладом полярних полімерів є поліелектроліти.
- *дифільність* або *амфифільність*, тобто здатність одних частин макромолекули віддавати перевагу, наприклад, полярному оточенню, а інших – неполярному. Дифільність більш характерна для полімерів, що мають два або більше типів ланок.
- *полідисперсність* – тобто існування деякого статичного розподілу макромолекул по ступенях полімеризації (для гомополімерів) і по складу (для сополімерів).

## **1.2 Особливості структури та властивості поліетиленових матеріалів.**

### **1.2.1 Класифікації поліетиленів.**

Розвиток виробництва поліетилену почався ще з 1920-х років. В 1931р. співробітниками компанії «Imperial Chemical Industries» був отриманий низькомолекулярний парафіноподібний продукт, який містив у своїй будові складову, аналогічну до мономерної ланки сучасного поліетилену. Як результат в 1936 році було винайдено поліетилен низької щільності.

Поліетилен – термопластичний полімер, який являється органічним з'єднанням в основі якого знаходяться молекули етилену ( $\text{CH}_2$ ) з'єднані між собою за допомогою ковалентних зв'язків вуглецю [11-13]. Поліетилен отримують шляхом полімеризації продукту горіння нафти етилену. В чистому вигляді поліетилен являє собою масу білого кольору або навіть прозорого (для тонких листів). Він має хороші морозостійкі, діелектричні, амортизуючі та термічні властивості. Адгезія поліетилену надзвичайно низька.

В залежності від умов полімеризації, розрізняють три види поліетилену [14]:

- 1) Поліетилен високого тиску (ПЕВТ, або низької густини ПЕНГ);

- 2) Поліетилен середнього тиску ПЕСТ;
- 3) Поліетилен низького тиску (ПЕНТ, або високої густини ПЕВГ).

Отримання поліетилену [15]:

1) ПЕВТ утворюється при наступних умовах:

- 1.1) Температура 200 – 260 °C;
- 1.2) Тиск 150 – 300 МПа;
- 1.3) Наявність ініціатора (кисень або органічний пероксид).

Реакція протікає по радикальному механізму. Отриманий по цьому методу поліетилен має середню молекулярну вагу 80000 – 500000 і ступінь кристалічності 50-60 %.

2) ПЕСТ утворюється при наступних умовах:

- 2.1) Температура 100 – 120 °C;
- 2.2) Тиск 3 – 4 МПа;
- 2.3) Наявність каталізатора (каталізатори Циглера – Натта, наприклад, суміш  $TiCl_4$  та  $AlR_3$ ).

Отриманий по цьому методу поліетилен має середню молекулярну вагу 300000 – 400000, ступінь кристалічності 80-90 %.

3) ПЕНТ утворюється при наступних умовах:

- 3.1) Температура 120 – 150 °C;
- 3.2) Тиск нижче 0,1 – 2 МПа;
- 3.3) Наявність каталізатора (каталізатори Циглера – Натта, наприклад, суміш  $TiCl_4$  та  $AlR_3$ ).

Полімеризація проходить в суспензії по іонно-координаційному механізму. Отриманий по цьому методу поліетилен має середню молекулярну вагу 80000 – 300000, ступінь кристалічності 75 – 85 %.

Потрібно мати на увазі, що назви поліетилен «низького тиску» та «середнього тиску» мають відносне значення. Так, поліетилен, отриманий за допомогою 2 та 3 методу, має однакову густину та молекулярну вагу. Тиск в процесі полімеризації при низькому та середньому тиску в ряді випадків однаковий.

### 1.2.2 Хімічна будова, структура та властивості поліетилену.

Основні хімічні властивості поліетилену [3]:

- горить блакитним вогнем зі слабким світлом;
- запах горіння поліетилену схожий з запахом горіння парафіну;
- стійкий до впливу води;
- не реагує з лугами будь якої концентрації, розчинами нейтральних, кислих та основних солей, органічними та неорганічними кислотами;
- при кімнатній температурі нерозчинний і не набухає ні в одному звідомих розчинювачів;
- з часом підвергається деструкції з утворенням поперечних міжланкових зв'язків, що призводить до підвищенню крихкості на фоні невеликого збільшення міцності.

Поліетилен (крім надвисокомолекулярного) придатний до усіх відомих для термопластичних полімерів методів переробки: екструзії, екструзії з роздувом, лиття під тиском, пневматичного формування і т.д. Крім того, вироби з поліетилену також придатні до вторинної переробки та його подальшого використання [16].

Відомо, що асортимент пластмас значно розширюється з використанням кополімерів, а також шляхом отримання полімерних композицій методом компаундування, наприклад, поліетилену з іншими полімерами (поліпропіленом, поліізобутеном, каучуками тощо). На основі поліетилену та інших поліолефінів можуть бути отримані багаточисельні модифікації – привиті кополімери з активними групами, які покращують адгезію поліолефінів до металів, або знижують їх горючість тощо. Наприклад, одна з добре відомих модифікацій – отримання так званого «зшитого» поліетилену ПЕ – Х. Суть «зшивки» полягає в тому, що молекули в ланцюгу з'єднуються не тільки послідовно, але також утворюються бокові зв'язки, які з'єднують ланцюги між собою, за рахунок чого суттєво змінюються фізичні і хімічні властивості виробів. Розрізняють 4 види «зшитого» поліетилену (за методом виробництва) [17, 18]: пероксидний,

силовий, радіаційний, азотний.

### **1.3 Особливості технічних поліетиленів для виробництва поліетиленових труб**

Раніше для систем подачі води, газу та каналізації використовувалися виключно металеві трубопроводи. Однак в останні десятиліття простежується безумовна тенденція по заміні їх на полімерні, в першу чергу поліетиленові труби. На практиці це обумовлено їх значно кращими експлуатаційними характеристиками [19]:

- строк експлуатації поліетиленових труб більший у порівнянні з їх металевими, чавунними, бетонними аналогами. Так, більшість виробників заявляють строк гарантійної експлуатації 50 років;
- не піддаються корозії при контакті з водою та більшістю агресивних середовищ;
- токсично та бактеріологічно безпечні;
- в 3 – 4 рази легші за металеві та чавунні аналоги;
- полімерні труби діаметром 20 – 110 мм випускаються бухтами по 50-1000 метрів, що значно підвищує зручність та швидкість монтажу трубопроводів.
- стикове зварювання полімерних труб значно менш затратне, простіше та займає менше часу у порівнянні з металевими аналогами.
- при з'єднанні труб з поліетилену можуть використовуватися спеціальні терморезисторні фітинги, за рахунок яких суттєво спрощується та пришвидшується процес будівництва трубопроводу.
- за необхідності легко утилізуються та перероблюються;
- прості в обслуговуванні, легко замінюються та ремонтуються.

Також, в певних випадках, низька шорсткість внутрішньої поверхні полімерних труб дозволяє застосовувати труби меншого діаметру при збереженні пропускної здатності трубопроводу.

Поліетилен – термопластичний полімер, який сьогодні найбільш широко

застосовується для виготовлення полімерних труб [20, 21]. Адгезійні властивості поліетилену зазвичай низькі [20].

До трубних марок поліетилену, тобто марок технічного поліетилену з якого виготовляють поліетиленові труби, відносяться [22-24]:

ПЕ-63 – марка технічного поліетилену, який є лінійним гомополімером і вже не використовується для виготовлення поліетиленових труб по причині їх низької мінімальної довготривалої міцності MRS (Minimum Required Strength) – напруги, яка виражається в мегапаскалях (МПа) і визначається як залежність стійкості до внутрішнього тиску від часу його впливу на основі стандартного методу екстраполяції на питомий термін його впливу. Випробування проводяться на трубних зразках, які знаходяться певний час під дією внутрішнього тиску, який, в свою чергу викликає в стінці труби напругу заданого значення. Далі за зменшення міцності в часі та її екстраполяції на 50 років визначають величину MRS (рис. 1.1).

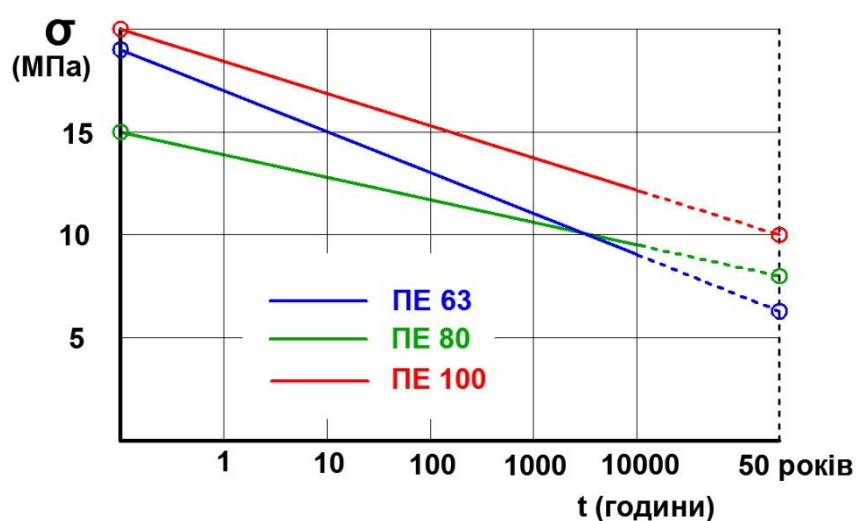


Рисунок 1.1 – Регресійні прямі для визначення MRS для 3-х типів поліетиленів

При довготривалій експлуатації під дією тиску міцність труб знижується і відбувається їх розтріскування і руйнування. Руйнування виникає у вигляді мікротріщин, на яких надалі концентруються напруження і які повільно ростуть до повного руйнування труби.

ПЕ-80 – має невисоку ступінь кристалічності, підвищену ударну в'язкість



та стійкість до повільних тріщин у порівнянні з ПЕ-63. Має більш «розпушену» структуру матеріалу за рахунок штучно утворених коротких бічних молекулярних груп.

ПЕ-100 – поліетилен з бімодальним молекулярно-масовим розподілом. Має дві окремі групи макромолекулярних ланцюгів: короткі лінійні та довгі «розпушені» за рахунок вмісту мономеру гексену. Як видно з даних табл. 1.1 використання ПЕ-100 для виробництва труб великих діаметрів дозволяє в окремих випадках майже в 2 рази скоротити матеріаловмісність труб, зменшуючи товщину стінок труб без втрати їх міцності.

Таблиця 1.1 – Характеристики труб з різних типів поліетилену

Характеристики труб	ПЕ-63	ПЕ-80	ПЕ-100
SDR*	11	13,6	17
Зовнішній діаметр, мм	900	900	800
Внутрішній діаметр, мм	736,4	767,8	705,2
Товщина стінки, мм	81,8	66,1	47,4
Матеріаловмісність, кг/м	221,2	162,7	107,5

\* SDR (StandardDimensionRatio) – унікальна система позначення труб, яка визначає відношення номінального зовнішнього діаметру труби до номінальної товщини її стінки. На практиці, показник SDR– стандартний параметр, приймаючий значення відповідно до таблиці [23].

#### **1.4 Особливості поліетиленових труб, що використовуються для будівництва напірних трубопроводів та методи їх з'єднання**

Активне будівництво полімерних трубопроводів розпочалося ще у 70-ті роки минулого століття [11]. В даний час домінуюче положення при будівництві напірних трубопроводів для транспортування холодної води, природного газу та для каналізації займають поліетиленові труби. Сировиною для виготовлення таких труб є поліетилен високої щільності (англійська аббревіатура – HDPE).

Формування HDPE, який ще називають поліетиленом низького тиску, відбувається при тиску 4 – 10 МПа та температурі 80 – 100°C у присутності каталізатору. В результаті отримують лінійні ланцюги поліетилену різної довжини з невеликою кількістю коротких бокових відгалужень [25]. Матеріал має щільність у межах 0,926 – 0,965 г/см<sup>3</sup> та показник текучості розплаву у діапазоні 0,2 – 20 г/10 хв. Оскільки HDPE складається з лінійних молекул різної довжини це – напівкристалічний полімер зі ступенем кристалічності 60 – 80%.

Перші промислові технології синтезу поліетилену низького тиску дозволяли отримувати лінійний гомополімер, що складається тільки з етиленових ділянок. Такий полімер добре кристалізується, його щільність може досягати максимальних значень у 0,965 г/см<sup>3</sup>, що зумовлює високий модуль пружності та межу текучості цього матеріалу, його меншу повзучість. Саме з поліетилену цього типу, що пізніше отримав позначення ПЕ-63, у 1960-х роках почали виготовляти перші газові труби [26]. Такі труби мали гарну стійкість до короткотривалого підвищеного внутрішнього тиску, але їх недоліком є схильність до раптового крихкого руйнування під дією довготривалого відносно невеликого робочого тиску. Тому в ті ж роки розпочались роботи з покращення характеристик поліетиленової сировини.

Недоліком ПЕ-63 була надмірна щільність матеріалу, тому слід було на молекулярному рівні дещо оптимізувати структуру полімеру за рахунок штучно утворених коротких бічних ланцюгів макромолекул. Згодом було розроблено технологічну схему сумісної полімеризації етилену з невеликою кількістю комономеру гексену зі структурною формулою C<sub>2</sub>-C<sub>4</sub>. Отриманий тип HDPE мав меншу щільність, нижчу кристалічність та підвищену стійкість до повільних тріщин і ударну в'язкість. Цей полімер був позначений ПЕ-80 та став активно застосовуватись для виробництва поліетиленових труб. Зазвичай ПЕ-80 має широкий молекулярно-масовий розподіл, отже добре переробляється екструзією. Однак, зменшена щільність зумовила і суттєвий недолік цього типу поліетилену у порівнянні з ПЕ-63 – зменшену короткотривалу механічну міцність [27].

Отже, необхідним було подальше удосконалення технічних властивостей поліетиленової сировини. На початку 2000-х років було розроблено технологію виробництва бімодальних поліетиленів, які ще називають поліетиленами 3-го покоління. Бімодальний полімер отримують шляхом послідовного поетапного процесу, де на кожному етапі синтезується фракція поліетилену з власним молекулярно-масовим розподілом (ММР). Особливість отримання бімодального поліетилену – полімеризація на мікрочастках каталізатору, де пошарово утворюється спочатку низькомолекулярна, а потім високомолекулярна фракція полімеру. В результаті досягається рівномірний об'ємний розподіл бімодальних фракцій у кінцевому матеріалі [28].

Поліетилен з бімодальним молекулярно-масовим розподілом отримав позначення ПЕ-100 та об'єднував у собі переваги ПЕ-63 та ПЕ-80. Цей полімер має 2 чітко виражені групи молекулярних ланцюгів: коротких лінійних майже без бокових відгалужено по типу ПЕ-63 та довгих, «розпушених» за рахунок комономеру гексену по типу ПЕ-80. За рахунок більш щільної упаковки молекул, при однаковому вмісті комономеру щільність ПЕ-100 приблизно на 1% більша у порівнянні з ПЕ-80 [29, 30].

Будь-який напірний трубопровід, зокрема поліетиленовий, знаходиться під тиском внутрішнього середовища, тому в процесі експлуатації в трубі виникають специфічні напруження. Поліетиленова напірна труба піддається двом видам руйнування – пластичному при дії короткочасного високого напруження та крихкому при довготривалому робочому навантаженні. Основний параметр міцності поліетилену – межа текучості, яка визначає його стійкість до пластичного руйнування. При пластичному руйнуванні у найслабшій ділянці труби відбувається її розширення, зменшення товщини стінки, потім досягнення межі текучості, що закінчується руйнуванням [30].

При довготривалому навантаженні у кристалічній зоні полімерного матеріалу виникає мікротріщина, яка починає поступово рости під дією концентрованого напруження у цій області. Цей процес повільний через опір руйнуванню фібрил – мікроскопічних волокон, які являють собою пучок з

десятків довгих полімерних молекул аморфної фракції. Фібрили руйнуються тільки по пластичному механізму, тому вони зменшують концентрацію напружень на кінці тріщини [31].

Поліетилен ПЕ-100 через особливості своєї молекулярної будови виявляється більш стійким як до коротких так і до тривалих навантажень у порівнянні з ПЕ-63 та ПЕ-80. У бімодальному ПЕ-100 обидві групи макромолекул сприяють зростанню стійкості матеріалу до утворення тріщин. Короткі молекулярні ланцюжки утворюють кристаліти, які мають високу стійкість до напружень, довгі макромолекули зв'язують кристаліти між собою та блокують зростання тріщин [29].

Критерієм міцності полімерного матеріалу, що враховує особливості роботи під навантаженням напірних трубопроводів було згідно з ISO 12162 [32] обрано величину мінімальної тривалої міцності (англійською Minimum Required Strength MRS, МПа) на строк експлуатації 50 років. При випробуванні труби зазвичай визначають величину кільцевого напруження в стінці, оскільки поздовжнє напруження вдвічі менше. Значення MRS розраховується за результатами випробувань зразків труб на стійкість до постійного внутрішнього тиску відповідно до ISO 1167 [33, 34]. Визначені величини напруження при руйнуванні екстраполюють за спеціальними нормативами [35, 36] на 50 років експлуатації за допомогою лінійної регресійної моделі.

На території Радянського Союзу поліетилен високої щільності HDPE (поліетилен високого тиску) виробляли у відповідності з ГОСТ 16338 [37]. Для потреб промисловості поліетиленову сировину випускали у вигляді композиції з додаванням до базових марок термо-, світлостабілізаторів, барвників та інших домішок. З газофазного поліетилену 273-79 зі щільністю  $0,957 - 0,964 \text{ г/см}^3$  та значенням ПТР  $0,3 - 0,55 \text{ г/10 хв}$  почали виготовляти перші напірні труби. Окремий ГОСТ 18599-80 [38], що було розроблено пізніше обумовлював технічні вимоги до напірних поліетиленових труб для транспортування води, а також інших рідких або газоподібних речовин. На території України активне

будівництво поліетиленових трубопроводів, зокрема експериментальних газопроводів почалось з 80-тих років минулого століття [39].

Протягом 90-х років у світі були розроблені перші міжнародні стандарти, що регламентують виробництво поліетиленових труб для подачі горючих газів. Зокрема, в росії було розроблено норматив ГОСТ Р 50838 «Трубы из полиэтилена для газопроводов» [40], що регламентував вимоги до труб зовнішнім діаметром від 20 до 225 мм зі значеннями SDR 11 та 17,6. У 2001 році в росії було задіяно нову редакцію ГОСТ 18599 «Трубы напорные из полиэтилена», де вже використовувалось поняття MRS, як характеристика міцності поліетилену.

В Україні було розроблено спеціальний стандарт ДСТУ Б В.2.7 – 73 – 98 [41], що регламентував технічні вимоги до поліетиленових газопровідних труб. Норматив передбачав виготовлення труб з композицій поліетилену типу ПЕ-80 або ПЕ-100. У 2008 році в Україні було введено в дію стандарт ДСТУ Б В.2.7 – 151 [42], що регламентує вимоги до поліетиленових труб для подачі холодної води. Труби можуть виготовлятися з композицій поліетилену 3-х типів – ПЕ-63, ПЕ-80 та ПЕ-100.

В Україні досі немає власного виробництва поліетилену високої щільності, для виробництва вітчизняних поліетиленових труб використовують імпорتنі поліетиленові композиції. Після появи на світовому ринку поліетилену 3-го покоління ПЕ-100, постійно спостерігається тенденція до збільшення споживання цього продукту. Хоча поліетилен ПЕ-80 на 20% дорожчий за ПЕ-63, а ПЕ-100 – на 25% дорожчий за ПЕ-80, сучасні виробники труб зазвичай віддають перевагу композиціям на базі ПЕ-100, як більш міцному та технологічному матеріалу. Визначено, що труби з ПЕ-100 мають при усіх інших однакових параметрах у 1,5 – 2 рази меншу матеріаломісткість, особливо при великих зовнішніх діаметрах [43].

Слід відзначити, що з'єднання поліетиленових труб є найбільш відповідальною задачею усього складного технологічного ланцюга будівництва або ремонту технологічного трубопроводу. У більшості випадків такі з'єднання

виконуються за допомогою різних способів зварювання. З іншого боку, за останні 30 років в Україні було побудовано багато поліетиленових трубопроводів з використанням поліетилену різних типів (ПЕ-63, ПЕ-80 та ПЕ-100), фізичні властивості яких суттєво відрізняються між собою. Тому з'єднання поліетиленових труб із поліетилену різних типів між собою є актуальною та досі не вирішеною науково-технічною задачею [44].

Поліетиленові труби для подачі холодної води в Україні, згідно з нормативом, можна з'єднувати між собою зварюванням нагрітим інструментом встик, врозтруб, терморезисторним зварюванням, а також механічно за допомогою спеціальних затискних деталей [45]. Поліетиленові труби для газопроводів Норматив дозволяє з'єднувати між собою зварювання – нагрітим інструментом встик та терморезисторним зварюванням [46]. Серед усіх трьох згаданих вище способів зварювання поліетиленових труб, спосіб зварювання нагрітим інструментом є найбільш універсальним способом з'єднання поліетиленових труб і може застосовуватися для більшості типорозмірів труб, за винятком тонкостінних, з товщиною стінки менше 5 мм.

При виборі параметрів процесу зварювання поліетиленових труб необхідно враховувати особливості теплофізичних властивостей основного матеріалу, а також наявність та кількість домішок. Зокрема матеріал труб, які вже перебували в експлуатації, може мати сторонні домішки, що з'явилися в результаті адсорбції з навколишнього середовища. Коли необхідно зварювати труби з поліетиленів різних типів, зазвичай виникає потреба технологічно нівелювати деяку несумісність різнотипних матеріалів [47].

Дуже часто будівельники помилково вважають поліетилени різних градацій як подібні та рівноцінні, хоча вони суттєво відрізняються між собою хімічною будовою та фізичними властивостями. Експериментально підтверджено, що довготривала якість зварних з'єднань поліетиленових труб, що працюють під навантаженням, залежить від мікро- та макромолекулярної структури матеріалу. Так, довготривала стійкість стикових зварних з'єднань поліетиленових труб до крихкого руйнування залежить від концентрації

комономера поліетиленової сировини.

Основним кількісним параметром, що характеризує в'язкість розплавленого поліетилену є показник текучості розплаву, який, згідно з нормативами, визначається при температурі 190 °С. Деякі нормативні документи дозволяють зварювати між собою різнотипні поліетилену, якщо вони мають близькі значення в'язкості розплаву, яка оцінюється за величиною ПТР. Однак задача оптимізації процесу зварювання гетерогенних поліетиленових труб є складною та потребує проведення додаткових досліджень та відповідної адаптації зварювального обладнання [48-50].

При зварюванні матеріалів із різнотипних поліетиленів виникає задача визначення їх механічної міцності та прогнозування довготривалої експлуатації. Багаторічний досвід експлуатації поліетиленових трубопроводів довів неефективність контролю якості стикових зварних з'єднань неруйнівними ультразвуковим та рентгенівським методами. Ці методи дозволяють виявити у поліетиленових стиках тільки великі порожнини та сторонні включення, тобто нехарактерні дефекти. Тому єдиним доступним в даному випадку, неруйнівним методом визначення якості зварних з'єднань залишається зовнішній візуальний та вимірювальний контроль. Актуальною задачею залишається розробка методів прогнозування довготривалої міцності зварних з'єднань різнотипних поліетиленових труб на базі неруйнівних методів контролю [51].

### **1.5 Особливості зварювання труб із різнотипної поліетиленової сировини.**

Починаючи з 1980-х років в Україні будували поліетиленові трубопроводи різного призначення з використанням поліетилену 3-х типів: ПЕ 63, ПЕ 80 та ПЕ 100 (рис. 1.1). Фізичні властивості поліетилену різних типів суттєво різняться між собою, також досить велика різниця між параметрами може бути і у поліетиленової сировини одного типу для різних виробників та різних партій. Сьогодні будівельні компанії виявили проблему, що при ремонті та реконструкції трубопроводів з пластмас необхідно зварювати труби із ПЕ-63,

які експлуатувалися довгий час з трубами із поліетиленів марок ПЕ-80 та ПЕ-100 [51, 52].

Процес зварювання термопластичних полімерів полягає в активації поверхонь з'єднуваних деталей. Залежно від способу зварювання ці поверхні або відразу перебувають у контакті (зварювання струмом високої частоти або надвисокими частотами), або приводяться в контакт після активації (зварювання нагрітим інструментом, газом, ІЧ-випроміненням тощо) чи одночасно з активацією (зварювання тертям, УЗ-зварювання) [53].

В процесі утворення зварних з'єднань (при охолодженні) відбувається формування надмолекулярних структур у зварному з'єднанні, а також розвиток полів власних напружень та їх релаксація [54-56]. Ці конкуруючі процеси визначають кінцеві властивості зварного з'єднання.

Технологічне завдання зварювання полягає в тому, щоб максимально наблизити зварне з'єднання за структурою та властивостями до вихідного – основного матеріалу [57].

Під час формування зварного з'єднання з термопластичних полімерів відбувається ціла низка фізико-хімічних перетворень полімерів: змінюється плинність розплаву, відбувається орієнтаційна кристалізація, перекристалізація, рекристалізація та навіть часткова деструкція, внаслідок чого формується неоднорідна структура зварного з'єднання [58, 59].

Якість стикового зварного з'єднання поліетиленових труб визначається теплофізичними та реологічними процесами в зоні зварювання. При зварюванні нагрітим інструментом характерною особливістю є потужна течія розплавленого матеріалу, який в процесі осадження витискається із середини зварного з'єднання назовні в грат. Кінетичні закономірності цього процесу залежать від основних параметрів зварювання та від властивостей поліетиленової композиції. Міцність зварних з'єднань, зазвичай, визначають за результатом механічних випробувань. Ефективним неруйнівним методом визначення якості зварних з'єднань поліетиленових труб є вимірювальний контроль параметрів зовнішнього грату. Для кожного номінального розміру поліетиленової труби



встановлюється допустимий діапазон розмірів валиків грату. Основні розміри (рис. 1.2) – це загальна ширина грату  $B$ , як сума розмірів окремих валиків  $b_1$  та  $b_2$ , та висота грату  $h$ . У якісному зварному з'єднанні розміри валиків грату не повинні відрізнятись більше, ніж на 40%. Практика зварювання труб із поліетиленів різних типів показала, що в цьому випадку розміри валиків відрізняються у рази (рис. 1.3), що вважається недопустимим дефектом зварного з'єднання.

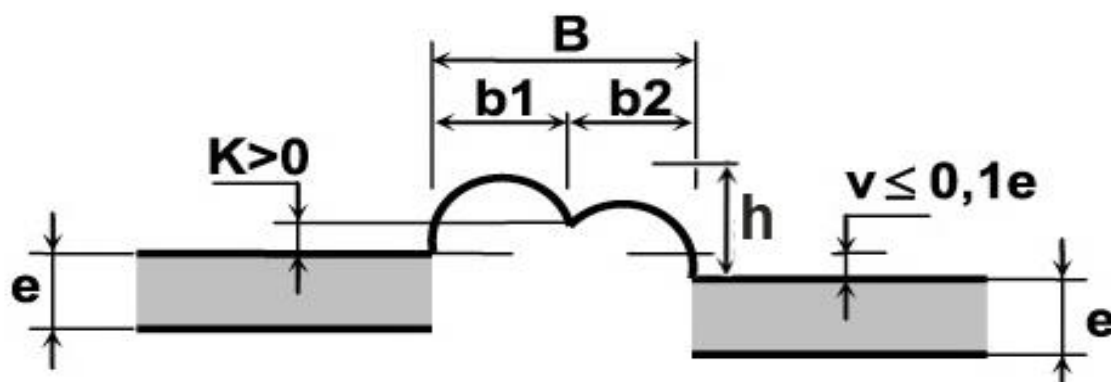


Рисунок 1.2 – Основні розміри валиків грату стикового зварного з'єднання поліетиленових труб



Рисунок 1.3 – Дефектне зварне з'єднання труб із поліетиленів технічних марок ПЕ-80 та ПЕ-63

## 1.6 Перспективи застосування поліетиленових матеріалів

### 1.6.1 Дослідження з використання водню як альтернативного палива та його вплив на технічні полімери

Існуючі екологічні тренди із заміщення природного газу як основного виду палива для промисловості та побутових споживачів ставлять нові виклики для полімерного матеріалознавства [60]. Наразі нафта, вугілля та газ є головними видами палива, саме з них людство отримує до 80 % усієї енергії. Основою цих видів палива є вуглець, а при згорянні утворюється вуглекислий газ ( $\text{CO}_2$ ), чадний газ/оксид вуглецю ( $\text{CO}$ ), оксиди сірки ( $\text{SO}_x$ ), оксиди азоту ( $\text{NO}_x$ ), токсичні метали та попіл (табл.1.2) [61-64].

Таблиця 1.2 – Глобальні викиди  $\text{CO}_2$  різними секторами промисловості [62].

Regions	CO <sub>2</sub> emission by sector					Total CO <sub>2</sub>
	Electricity	Industry	Transport	Other	Residential	
China	3136.9 (47.9)	2174.5 (33.2)	456.9 (7.0)	496.2 (7.6)	285.9 (4.4)	6550.4
USA	2403.4 (42.9)	633.1 (11.3)	1691.6 (30.2)	535.1 (9.6)	332.7 (5.9)	5595.9
Latin America	215.9 (20.2)	279.6 (26.2)	361.8 (33.9)	147.9 (13.8)	63.0 (5.9)	1068.2
Europe	1063.9 (33.0)	514.3 (16.0)	850.5 (26.4)	391.4 (12.1)	402.8 (12.5)	3222.9
OECD	4992.0 (39.5)	1819.1 (14.4)	3386.5 (26.8)	1447.7 (11.5)	984.4 (7.8)	12,629.7
World total	11,987.9 (40.8)	5943.6 (20.2)	6604.7 (22.5)	2940.2 (10.0)	1905.1 (6.5)	29,381.5

Спалюванням цих видів палива людство збільшило концентрацію парникових газів в атмосфері, за рахунок чого посилився парниковий ефект, що є одним з основних чинників глобальних змін клімату [65-68]. За висновками Міжурядової групи експертів з питань змін клімату Рамкової конвенції про зміни клімату ООН (United Nations Framework Convention on Climate Change — UNFCCC), така зміна є загрозою для цивілізації та біорізноманіття. В той же час, проголошена Євросоюзом наприкінці 2019 р. програма GreenDeal має на меті перетворення Європи до 2050 р. на перший «кліматично нейтральний» континент планети. Мається на увазі, що протягом кількох десятиліть на Європейському континенті відбудеться повна декарбонізація в енергетиці шляхом відмови від використання викопних енергоносіїв (вугілля, нафти і природного газу) і заміна їх на відновлювані джерела енергії. Україну включено у перелік 12 майбутніх стратегічних або ключових енергетичних партнерів

Євросоюзу. За цією амбіційною програмою очікується, що в майбутньому вона буде партнером із виробництва, транспортування та зберігання на базі наявної інфраструктури більш екологічних газів [69, 70].

Порівняно із транспортуванням електроенергії, використання водню у газових мережах має такі переваги:

1. Газова інфраструктура здатна транспортувати енергію на великі відстані з дуже низькими втратами (0,7% проти 2–6% для електроенергії).

2. Паливний газ у існуючих мережах може транспортувати дуже великі кількості енергії за короткий проміжок часу (на порядок більші, ніж електричні мережі).

3. Газові мережі (ГМ) мають велику гнучкість споживання енергії завдяки зміні тиску.

4. Газова інфраструктура має великі міжсезонні сховища, що також дасть змогу балансувати виробництво та споживання енергії ВДЕ.

5. ГМ покривають значну частину Європи, міські та промислові райони, а їх розташування під землею не створює будь яких незручностей.

Чистий, екологічний, сучасний: все це – про "зелений" водень. Саме його вважають паливом майбутнього та роблять на нього ставки дедалі більше країн [71].

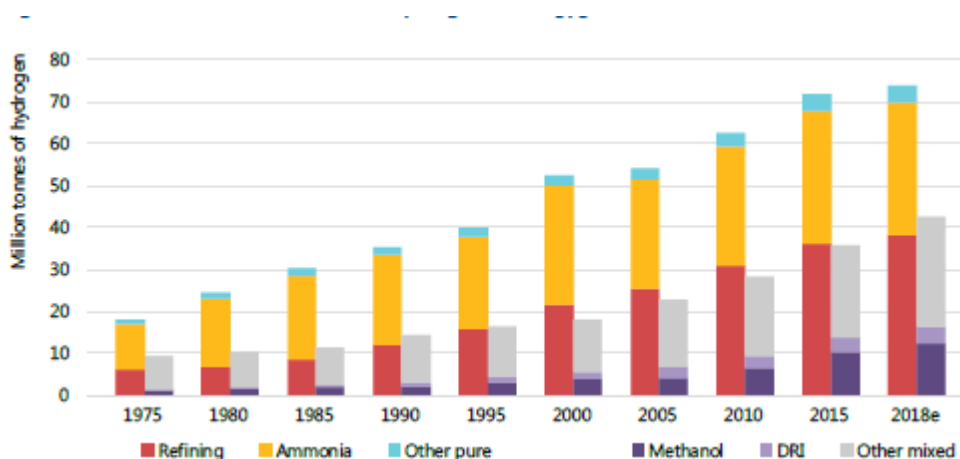


Рисунок 1.4 – Річний світовий попит на водень з 1975 року. Статистичні данні представлені Японією на саміті G20 в 2019 р. [71].

Водень, як паливо може замінити традиційні енергоносії [72-74]. І це все не в далекому майбутньому, а вже зараз. У світі спостерігається тренд на водень. Дана тенденція зумовлена забрудненням, що виникає при використанні традиційних видів палива, яке, в свою чергу, впливає не тільки на навколишнє середовище, а також може становити небезпеку для здоров'я та добробуту людей [75-77]. Франція, Японія, Австралія, Норвегія, Німеччина, Португалія, Іспанія, США, Чилі та Фінляндія – ось лише невеликий список держав, які вже взяли собі за мету стимулювати видобуток водню та використання його як екологічного палива. Приєдналася до них і Україна.

Японія розглядає водень як головний носій чистої енергії. Більше того, країна ставить за мету бути світовим лідером в темпах впровадження водневих технологій. Адже перші водневі програми було розпочато японцями ще у 70-х роках минулого століття, а першу «дорожню карту» з цього питання Японія затвердила в 2014 році. Своєрідним символом екологічних цілей країни стала Олімпіада-2020, яка відбулася у Токіо. У боротьбі за майбутнє з нульовим вуглецевим слідом Японія і МОК (Міжнародний олімпійський комітет) вирішили просувати ідею використання водню та водневого перетворення світової економіки. Головним символом цих перетворень став водневий факел Олімпіади-2020. Використане для нього водневе паливо було вироблене за допомогою "зеленої" сонячної енергії у префектурі Фукусіма [78].

В свою чергу, що стосується європейських країн, Федеральний міністр транспорту Німеччини весною 2021 р. заявив «Ми робимо Німеччину водневою країною», а згодом стало відомо, що німецький уряд інвестує 8 млрд євро у 62 масштабні водневі проєкти. Обрані ініціативи охоплюють повний ланцюжок від виробництва водню до його промислового застосування (в металургії та хімічній промисловості) [79].

В той же час, Австралійський уряд ще у 2020р. затвердив місцеву водневу стратегію. Стратегія включає понад пів сотні напрямів – починаючи від наукових досліджень і закінчуючи прискоренням комерціалізації та розвитком

експортного потенціалу. Ставиться за мету використання водню у транспорті, у промисловості, пристосування газотранспортних мереж тощо [79].

Американський уряд планує здійснити перехід до масового виробництва «зеленого» водню до 2030 року. Вже зараз країна формує світовий попит на водне автомобільне паливо. Вже майже 30 000 спеціалізованих машин на водні використовуються в американському логістичному секторі. Наразі місцевим лідером у використанні водневих технологій є Каліфорнія. Промисловці відпрацьовують нову технологію виробництва «зеленого» водню із пластику й переробленого паперу. Наразі вважається, що винахід дозволить скоротити викиди вуглецю, навіть якщо порівняти з воднем, виробленим за допомогою електролізу та відновлюваних джерел енергії. Крім того, на початку липня 2021р. Міністерство енергетики США оголосило про виділення 52,5 млн. доларів для фінансування 31 проєкту з розвитку технологій чистого водню наступного покоління. Йдеться про низку ініціатив щодо усунення технічних прогалин у технологіях виробництва, зберігання, розподілу та використання нового енергоносія [79].

### **1.6.2 Наявні дослідження з вивчення впливу водню на поліетиленові матеріали**

Відомо, що водень є важливим інструментом декарбонізації та кліматичної політики не тільки в країнах Європи, а й в Україні. Основними джерелами викидів метану в Україні є сектори енергетики (66%), відходів (16%) та сільського господарства (13%). Найбільше викидів метану в Україні продукує енергетичний сектор – 66% від загального обсягу. З них 49% – нафтогазовий сегмент, 17% – вугільний (рис. 1.5) [80, 81].

В Україні, питання можливості транспортування водню та його сумішей з природним газом досліджується більше трьох років [82]. Перші результати випробувань існуючих газорозподільних мереж України на герметичність при їх заповненні воднем показали як потенційні проблеми, пов'язані з поганою герметичністю існуючих газопроводів, так і можливі шляхи їх вирішення [83, 84].

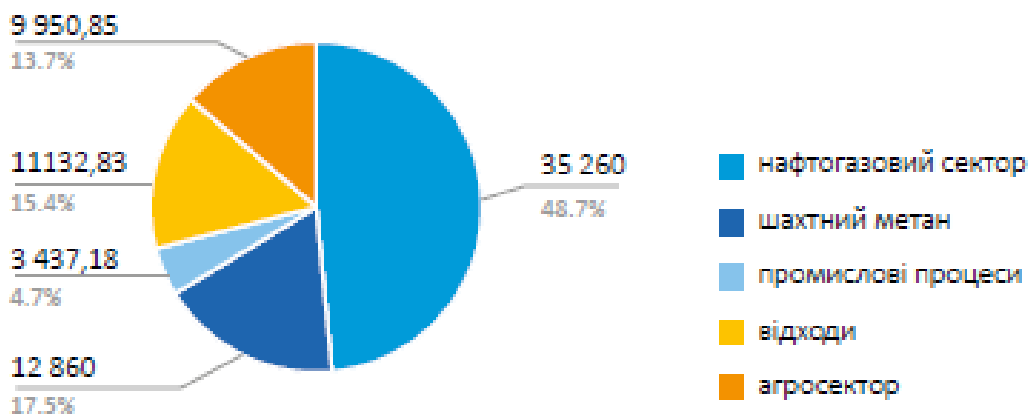


Рисунок 1.5 – Структура викидів метану в Україні станом на 2019 р., кілотонн CO<sub>2</sub> [80].

Дослідним шляхом була встановлена найбільш оптимальна суміш, яку можна використовувати в умовах України. Автор зазначає, що саме 20%-ва концентрація водню в суміші з природним газом (20%Н<sub>2</sub>/80%СН<sub>4</sub>) поки що є найбільш оптимальною сумішшю для нинішньої моделі газорозподільної системи України [85].

Станом на 2022 р. до досліджень можливості використання водню в Україні залучені наступні наукові установи: Інститут газу НАН України, Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України [70, 86-88], Інститут вугільних енерготехнологій НАН України, Інститут енергетики і систем управління, Національний університет Львівська політехніка, Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенко НАН України, Державне підприємство «Івано-Франківськстандартметрологія». До цих досліджень також долучились представники п'яти операторів газорозподільних мереж: АТ «Івано-Франківськгаз», АТ «Волиньгаз», АТ «Харківгаз», АТ «Дніпропетровськгаз», АТ «Житомиргаз» [89].

Не зважаючи на те, що в Україні даний напрям знаходиться ще на етапі зародження, вітчизняними науковцями, в рамках співробітництва України із Європейською Комісією, вже були проведені дослідження впливу водню та його сумішей з природним газом на метрологічні характеристики побутових

лічильників газу [90, 91]. Для проведення досліджень був побудований дослідний стенд, а розроблена методика включала в себе як статичні, так і динамічні випробування [92] згідно ДСТУ EN 1359 [93]. На основі отриманих даних автори зазначають, що критична зміна метрологічних характеристик не виявлена, наявна несуттєва зміна характеристик під дією впливу водневого середовища може бути спричинена або власне середовищем (чистим воднем або сумішами), або конструктивними елементами лічильників газу, оскільки практично для всіх лічильників отримані значення похибок мають схожий характер, то можна з високою ймовірністю констатувати, що основний вплив спричиняє водневе середовище.

Загалом, питання використання водню та його сумішей як альтернативного виду палива не є новим. Ще у 1983р. Науковцями відділу механічної інженерії Університету Торонто опублікована стаття [94] мотивацією для якої стали рекомендації спеціального парламентського комітету з альтернативної енергетики Канади [95]. В статті наводяться основні переваги водню як над використанням електроенергії, так і над існуючими видами палива. Зокрема, зазначається теоретична можливість та можливі рішення для зберігання водню, що значно обмежені у випадку прямого використання електроенергії [94, 96].

Французькими колегами, в роботі [97] було встановлено, що міцнісні характеристики поліетилену марки ПЕ-100 під впливом водню не зазнали змін. В ході експерименту, типові лопатки для проведення механічних досліджень на одновісний розтяг поміщували в спеціальну камеру, в якій знаходився чистий водень під тиском 30 бар та досліджували їх значення міцності. Для порівняння, ті самі лопатки досліджували в атмосфері стиснутого повітря при тиску 30 бар.

Іншим колективом французьких науковців в розрізі дослідження можливості транспортування водню, досліджувався вплив водню та його сумішей з природним газом на поліетилен високої щільності (HDPE), поліаміди (PA11 та PAHM) та багатошарові системи на основі етиленвінілового спирту [98]. В даній роботі, тестування проникності воднем наведених матеріалів

свідчать про переваги використання досліджуваних поліамідів. В той же час, проникність водню для PA11 та РАНМ знаходиться в одному діапазоні з проникністю метану через РЕ. Науковцями досліджено вплив температури, тиску та складу газової суміші на проникність водню. Виявлено, що проникність водню зростає зі збільшенням температури, але не залежить від тиску. Досліджено вплив старіння матеріалів у середовищі водню, що дозволяє визначити їхню довговічність та стабільність в подібних системах з плином часу.

Цим же колективом французьких науковців [99] досліджувалась можливість транспортування поліетиленовими трубопроводами марки ПЕ-100 чистого водню та його суміші з природним газом у пропорції 20%CH<sub>4</sub>/80%H<sub>2</sub>. В ході експериментів, впливу водню та його сумішей піддавали не лише відрізок поліетиленової труби, а й поліетиленові мембрани та плівки. Встановлено, що зміна проникності поліетилену в діапазоні температур 10-85°C представлена законом Арреніуса (Arrhenius law). Окремим пунктом досліджень було вивчення процесів старіння поліетилену в водневому середовищі, в ході якого не виявлено змін бар'єрних властивостей ПЕ-100. Варто зазначити, що вивчався вплив водню та його сумішей виключно на «новий» матеріал, що попередньо не був в експлуатації в діючих газорозподільних мережах.



## ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 1

1. В останні десятиліття простежується тенденція по заміні металевих трубопроводів на полімерні, в першу чергу, поліетиленові труби, що на практиці обумовлено їх значно кращими експлуатаційними характеристиками.

2. Поліетилен – термопластичний полімер, який сьогодні найбільш широко застосовується для виготовлення полімерних труб. Поліетилен (крім надвисокомолекулярного) придатний до усіх відомих для термопластичних полімерів методів переробки: екструзії, екструзії з роздувом, лиття під тиском, пневматичного формування і т.д. Крім того, вироби з поліетилену також придатні до вторинної переробки та його подальшого використання. До трубних марок поліетилену, тобто марок технічного поліетилену з якого виготовляють поліетиленові труби, відносяться ПЕ-63, ПЕ-80, ПЕ-100.

3. Технологічне завдання процесу зварювання полімерних труб полягає в тому, щоб максимально наблизити зварне з'єднання за структурою та властивостями до основного матеріалу. Під час формування зварного з'єднання з термопластичних полімерів відбувається ціла низка фізико-хімічних перетворень полімерів: змінюється плинність розплаву, відбувається орієнтаційна кристалізація, перекристалізація, рекристалізація та навіть часткова деструкція, внаслідок чого формується неоднорідна структура зварного з'єднання. Якість стикового зварного з'єднання поліетиленових труб визначається впливом теплофізичних та реологічних процесівна структуроутворенняв зоні зварювання. При зварюванні нагрітим інструментом характерною особливістю є потужна течія розплавленого матеріалу, який в процесі осадження витискається із середини зварного з'єднання назовні в грат. Кінетичні закономірності цього процесу залежать від основних параметрів зварювання та від властивостей поліетиленової композиції.

4. При зварюванні матеріалів із різнотипних поліетиленів виникає задача визначення їх механічної міцності та прогнозування довготривалої експлуатації. Багаторічний досвід експлуатації поліетиленових трубопроводів довів неефективність контролю якості стикових зварних з'єднань неруйнівними ультразвуковим та

рентгенівським методами. Ці методи дозволяють виявити у поліетиленових стиках тільки великі порожнини та сторонні включення, тобто нехарактерні дефекти.

5. У світі спостерігається поява досліджень щодо транспортування водню за допомогою полімерних труб. Дана тенденція зумовлена забрудненням, що виникає при використанні традиційних видів палива, яке, в свою чергу, впливає не тільки на навколишнє середовище, а також може становити небезпеку для здоров'я та добробуту людей. В Україні, питання можливості транспортування водню та його сумішей з природним газом досліджується більше трьох років.

Отже, подальшим завданням, вирішення якого може дати суттєвий прогрес в даній області є дослідження процесів структуроутворення та вивчення властивостей зварних з'єднань на основі різномісних поліетиленів, а саме ПЕ-63/ПЕ-80 та ПЕ-63/ПЕ-100, розробка технології ефективного ремонту та реконструкції трубопроводів із застарілих типів поліетиленів для продовження їх експлуатаційного ресурсу, а також розробка методів прогнозування довготривалої міцності зварних з'єднань різномісних поліетиленових труб на базі неруйнівних методів контролю.

## РОЗДІЛ 2

### МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ

#### 2.1 Характеристика матеріалів дослідження

Для виконання зварювальних робіт використовували полімерні труби із номінальним зовнішнім діаметром 63 мм та товщиною стінки 5,8 мм, виготовлені з трьох марок технічного поліетилену (HDPE) з різною мінімальною тривалою міцністю MRS, а саме ПЕ-63 (густина  $0,940 \text{ г/см}^3$ , MRS 6,3 за ГОСТ 16338 [37], ГОСТ Р 50838 «Трубы из полиэтилена для газопроводов» [40]), ПЕ-80 (густина  $0,941 \text{ г/см}^3$ , MRS 8 МПа) і ПЕ-100 (густина  $0,954 \text{ г/см}^3$ , MRS 10 МПа) [41, 42].

Дослідні роботи по зварюванню полімерних труб проводили традиційним для виготовлення трубопроводів з пластмас способом – зварювання нагрітим інструментом «встик» за традиційною технологічною картою (рис. 2.1) на промисловій установці для зварювання САТ-1 виробництва дослідного заводу зварювального обладнання Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України.

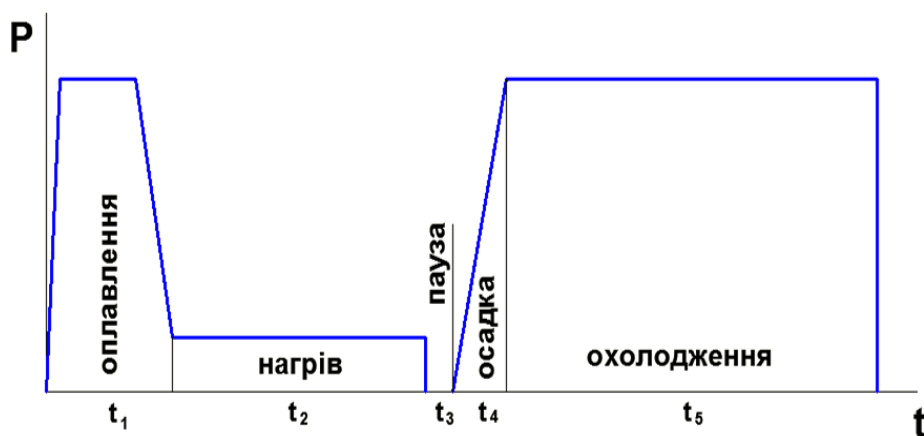


Рисунок 2.1 – Технологічна карта традиційного процесу зварювання нагрітим інструментом встик

Параметри режиму зварювання встановлювали згідно з вимогами

Нормативу [100] – температура нагрітого інструменту  $210^{\circ}\text{C}$ , час прогріву 60 с, технологічна пауза – 3 с, тиск осадження 0,2 МПа, час охолодження під тиском становив 6 хв. Після зварювання зварне з'єднання охолоджувався неконтрольовано до температури навколишнього середовища.

Дослідні зварні з'єднання однотипних та різнотипних полімерних труб у різних комбінаціях закладали у експериментальне середовище – у землю на глибину 10 см та на поверхню ґрунту. Дослідження зварних з'єднань проводили через 1 та 2 роки після закладання їх у землю.

## 2.2 Методи дослідження

Структурні дослідження матеріалів поліетиленових труб у повздовжньому напрямку до основної вісі труби досліджували методом ширококутового розсіювання рентгенівських променів на відбиття за допомогою рентгенівського дифрактометра XRD-7000 (Shimadzu, Японія) за рентгенооптичною схемою по Бреггу–Брентано на відбиття первинного пучка досліджуваним зразком, з використанням  $\text{CuK}_{\alpha}$  - випромінювання ( $\lambda = 1,54 \text{ \AA}$ ) і графітового монохроматора (рис. 2.2).



Рисунок 2.2 – Рентгенівський дифрактометр ShimadzuXRD-7000 (а) та його робоча вимірювальна комірка (б)

Дослідження проведено методом автоматичного покрокового сканування в режимі 30 кВ, 30 мА у інтервалі кутів розсіювання ( $2\theta$ ) від 3,0 до 40 градусів за часу експозиції 5 с [101, 102]. Температура проведення досліджень становила  $20 \pm 2$  °С. Для структурних досліджень зразки вирізали як показано на рис. 2.3.

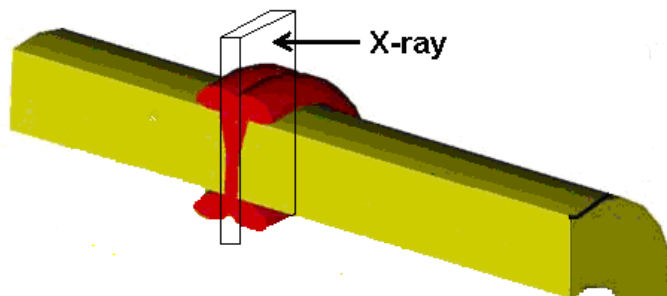


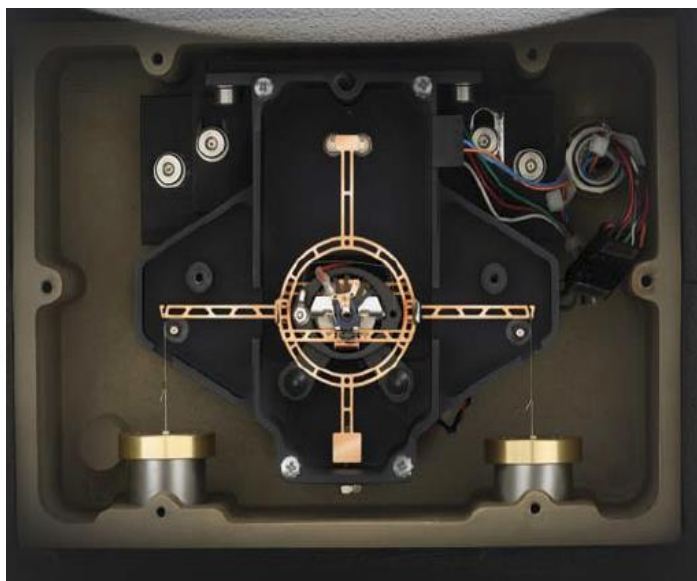
Рисунок 2.3 – Модель зварного з'єднання поліетиленових труб

Морфологію зварних з'єднань полімерних труб досліджували за допомогою оптичного поляризаційного мікроскопу Versamet-2. Для цього зі зварних з'єднань полімерних труб за допомогою мікротома LKB вирізали шліфи товщиною 100 мкм, які надалі для контрасту морфології безпосередньо зварного з'єднання проходили термообробку при температурі 120–140 °С протягом 30-60 с згідно [49, 50].

Термічну стабільність і термоокислювальну деструкцію матеріалів поліетиленових труб досліджували методом термогравіметричного аналізу (ТГА) на приладі TGA Q50 виробництва компанії TA Instruments (США) в атмосфері повітря в діапазоні температур від 20 °С до 700 °С з постійною швидкістю нагрівання 20 °С/хв (рис. 2.4, а). Точність вимірювань за температурою становила  $\pm 0,01$  °С, за втратою ваги  $\pm 0,0001$  мг. Прилад TGA Q50 сертифіковано компанією TA Instruments (США) у відповідності до міжнародного стандарту ISO 9001:2000. Для проведення досліджень вирізали зразки вагою 6...10 мг кожний та поміщали у платиновий вимірювальний стакан (рис. 2.4, б) та проводили дослідження (рис. 2.4, в). Детальний опис роботи приладу та методів досліджень приведено в [103].



а)



б)



в)

Рисунок 2.4 – Прилад TA Instruments TGA Q50 для термогравіметричного аналізу (а), платинова кювета зі зразком (б), вимірювальна стакан приладу TA Instruments TGA Q50 (в)

Вивчення теплофізичних властивостей матеріалів поліетиленових труб проводили методом диференціальної сканувальної калориметрії (ДСК) на приладі DSC Q2000 виробництва компанії TA Instruments (США) в інертній

атмосфері азоту в діапазоні температур від 40 °С до 450 °С з постійною швидкістю нагрівання 20 °С/хв. (рис. 2.5, а). Точність вимірювань по температурі була  $\pm 0,01$  °С, по тепловому потоку  $\pm 0,01$  Дж/г. Прилад DSC Q2000 сертифіковано компанією TA Instruments (США) у відповідності до міжнародного стандарту ISO 9001:2000. Зважування зразків для розрахунку теплоємності матеріалів проводили на електронних вагах ANG50C (Польща) з точністю 0,0001 г. Після зважування зразки поміщали в алюмінієву кювету (рис. 2.5, б-в), яку вміщували в вимірювальну комірку приладу DSC Q2000 (рис. 2.5, г), та проводили дослідження. Детальний опис роботи приладу та методів досліджень приведено в [103].



Рисунок 2.5 – Диференціальний сканувальний калориметр DSC Q2000 (а), алюмінієва кювета (б) та її підготовка до вимірювань (в), вимірювальна комірка приладу DSC Q2000 (г).



Термомеханічну поведінку досліджуваних полімерних систем вивчали за допомогою приладу ТМА Q400 ЕМ виробництва компанії TA Instruments (США), сертифікованого згідно з міжнародним стандартом ISO 9001:2000, в атмосфері сухого повітря в режимі температурної модуляції 5 °С зі швидкістю нагрівання 5 °С/хв у температурному діапазоні від 30 до 250 °С. Використовували індентор циліндричної форми з плавленого кварцу діаметром  $2,1 \pm 0,1$  мм. Встановлене навантаження індентора на зразок було 0,1 МПа. Точність вимірювання температури становила  $\pm 0,01$  °С, деформації  $\pm 0,01$  мкм.

Перед початком механічних та гідравлічних випробувань матеріалів було проведено візуальний контроль зразків труб у відповідності до EN 13100-1:2017 [46].

Механічні дослідження зразків поліетиленових труб при одновісному розтягуванні проводили на випробувальній машині AGS-10kNX (Shimadzu, Японія) з лінійною швидкістю 50 мм/хв (рис. 2.6) у відповідності до вимог EN 12814:2018 [104].

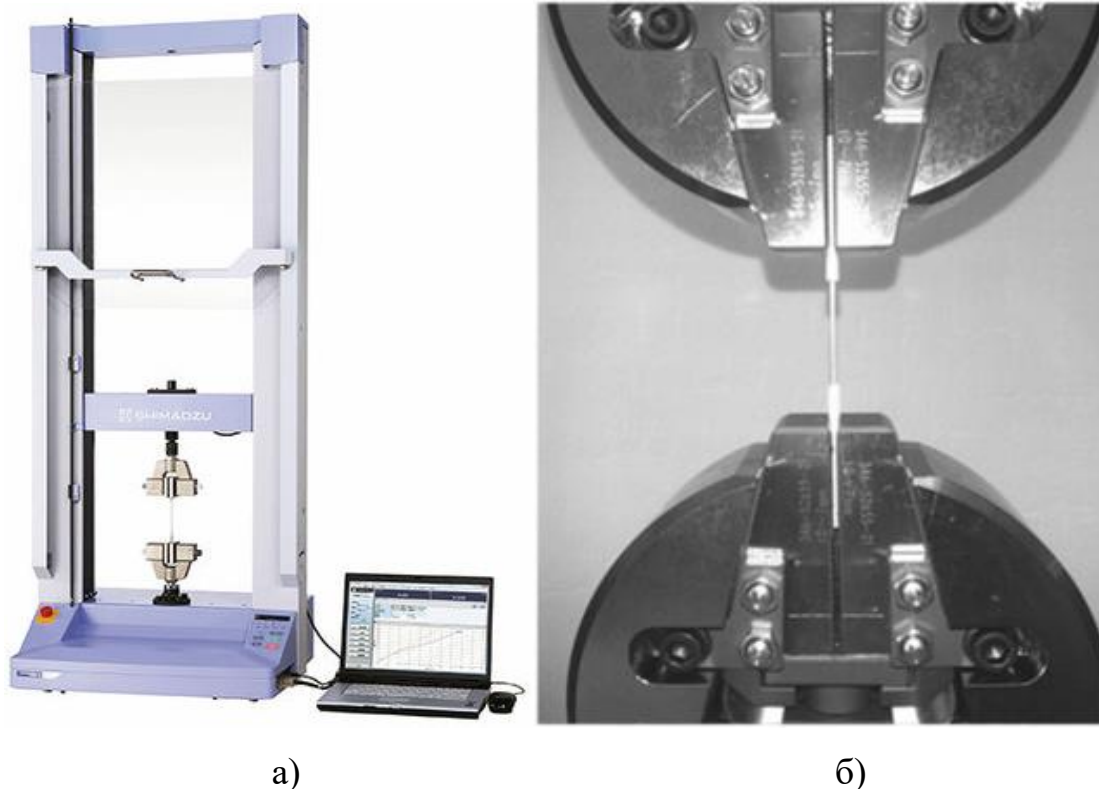


Рисунок 2.6 – Загальний вигляд (а) та робоча зона (б) випробувальної машини Shimadzu AGS-10kNX.



## ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 2

1. Для досліджень було обрано модельні об'єкти – зварні з'єднання різнотипних поліетиленів ПЕ-63/ПЕ-80 та ПЕ-63/ПЕ-100, формування яких проводили традиційним для виготовлення трубопроводів з пластмас способом – зварювання нагрітим інструментом «встик» за традиційною технологічною картою на промисловій установці для зварювання САТ-1 виробництва дослідного заводу зварювального обладнання Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України.

2. Дослідні зварні з'єднання однотипних та різнотипних полімерних труб у різних комбінаціях закладали у експериментальне середовище – у землю на глибину 10 см та на поверхню ґрунту. Дослідження зварних з'єднань проводили через 1 та 2 роки після закладання їх у землю.

3. Для дослідження залучено набір сучасних експериментальних методів: рентгенографія (метод ширококутового розсіювання рентгенівських променів), оптична мікроскопія, ІЧ-спектроскопія, теплофізичні, термомеханічні, фізико-механічні та інші методи, що дало змогу об'єктивно і всебічно вивчити структуру та властивості обраних матеріалів.

## РОЗДІЛ 3

### ОСОБЛИВОСТІ СТРУКТУРИ ТА ВЛАСТИВОСТІ ТЕХНІЧНИХ ПОЛІЕТИЛЕНІВ РІЗНИХ МАРОК

#### **3.1 Моделювання температурних полів при тепловому зварюванні труб із різнотипних поліетиленів. Прогнозування оптимальних параметрів зварювання.**

Проблема математичного моделювання температурних полів при тепловому зварюванні полімерних труб є досить складною та має декілька аспектів:

- формулювання та конкретизація визначних рівнянь матеріалу, що враховує залежність властивостей матеріалу від температури та структурні перетворення, передісторію процесу і нелінійні фактори;
- побудова математичної моделі технологічного процесу;
- розробка ефективних методів чисельної реалізації відповідних крайових задач.

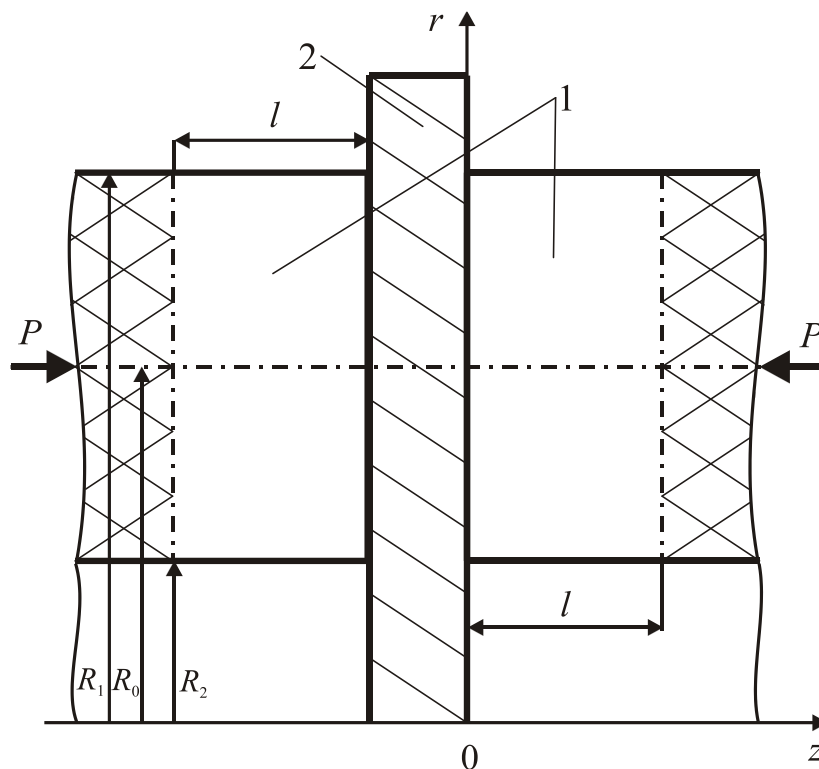
Визначальні рівняння для полімерів повинні описувати поведінку матеріалу в твердому стані та в стані розплаву. При цьому вони повинні враховувати залежність різних характеристик від температури. Нарешті, вони повинні імплементуватись в обчислювальні схеми чисельного рішення відповідних задач термомеханіки. Усім вказаним вимогам задовольняють моделі Максвеловського типу, що в тій або іншій ступені враховують кінетику процесів в'язкої течії розплаву полімеру, повзучість та релаксації напружень.

Визначальні рівняння є основною складовою математичної постановки задачі термомеханіки. Універсальні рівняння механічного та теплового балансу, що доповнюють їх а також кінематичні рівняння не викликають ніяких додаткових проблем у формулюванні задачі.

Для аналізу процесів зварювання в полімерних тілах, які часто мають досить складну форму, та матеріал яких демонструє температурно-залежну поведінку та нелінійні властивості, необхідне використання чисельних методів.

Найбільш ефективним серед них є метод кінцевих елементів [103].

Технологічна схема розташування труб при їх зварюванні нагрітим інструментом встик, який зазвичай використовується для будівництва полімерних трубопроводів, на етапі прогріву та розрахункова система координат показані на рис. 3.1.



1 – стінки труб, що зварюються;

2 – нагрітий інструмент;

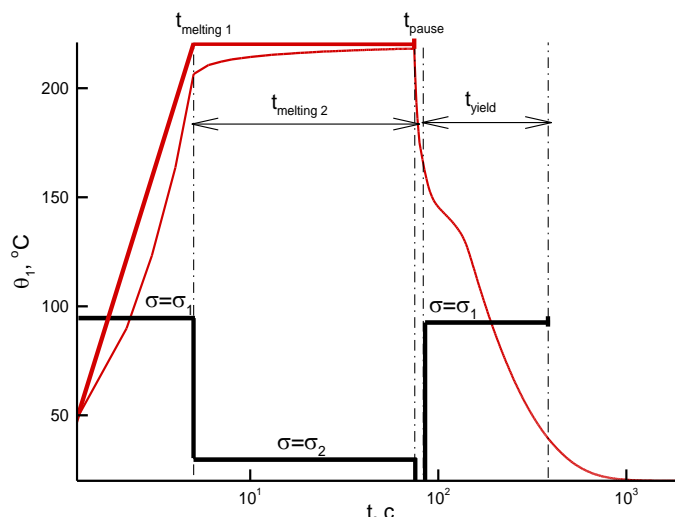
$P$  – зусилля осадження;

$R_1, R_2$  – зовнішній та внутрішній діаметри труб відповідно

Рисунок 3.1 – Схема процесу зварювання поліетиленових труб

Рис. 3.2 ілюструє основні етапи термічного циклу в процесі зварювання труб. Були прийняті такі значення часових параметрів циклу зварювання:

- 1) попередній прогрів  $t_{\text{melting1}} = 5$  с.
- 2) основний прогрів  $t_{\text{melting2}} = 70$  с.
- 3) технологічна пауза  $t_{\text{pause}} = 3$  с.
- 4) охолодження стику  $t_{\text{yield}} = 300$  с.



товста червона лінія – температура нагрівача;

товста чорна лінія – тиск на торці;

тонка червона лінія – температура середньої точки торця труб, що зварюються

Рисунок 3.2 – Зміни параметрів в процесі зварювання полімерних труб

Технологічний процес стикового зварювання нагрітим інструментом труб із термопластів складається з двох основних етапів: оплавлення торців та їх осадження. Кожен з цих етапів зварювання характеризується власними процесами тепломасопереносу та напружено-деформованим станом, які мають суттєвий вплив на якість зварного з'єднання. Математичне описання цих процесів допоможе визначити раціональні режими стикового зварювання труб із різнотипних поліетиленів.

При стиковому зварюванні труб в циліндричній системі координат  $Orz\phi$  постановка задачі про вісесиметричний квазістатичний термомеханічний стан труб при зварюванні містить наступні співвідношення [106]:

рівняння рівноваги:

$$\frac{\partial \sigma_{rr}}{\partial r} + \frac{1}{r}(\sigma_{rr} - \sigma_{\phi\phi}) + \frac{\partial \sigma_{rz}}{\partial z} = 0 \quad (3.1)$$

$$\frac{\partial \sigma_{rz}}{\partial r} + \frac{1}{r}\sigma_{rz} + \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z} = 0$$

рівняння теплопровідності:

$$c(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[ \lambda(\theta) r \frac{\partial \theta}{\partial r} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[ \lambda(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial z} \right] \quad (3.2)$$

$$\theta = \theta_0 \quad \text{при} \quad t = t_0$$

кінематичні рівняння:

$$\varepsilon_{rr} = \frac{\partial u_r}{\partial r}, \quad \varepsilon_{zz} = \frac{\partial u_z}{\partial z}, \quad \varepsilon_{\varphi\varphi} = \frac{1}{r} u_r, \quad \varepsilon_{rz} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_z}{\partial r} + \frac{\partial u_r}{\partial z} \right) \quad (3.3)$$

визначальні (реологічні) рівняння:

$$s_{ij} = 2G(e_{ij} - e_{ij}^v) \quad (3.4)$$

$$\sigma_{kk} = 3K(\varepsilon_{kk} - 3\alpha(\theta - \theta_0)) \quad (3.5)$$

$$\dot{e}_{ij} = s_{ij} / 2\eta, \quad i, j, k \leftrightarrow r, z, \varphi \quad (3.6)$$

$G$  і  $K$  – модулі зсуву та об'ємного стискання,  $\eta$  – кінематична в'язкість, при чому:

$$G = G(\theta), \quad K = K(\theta), \quad \eta = \eta(\theta, \gamma) \quad (3.7)$$

де  $\gamma$  – інтенсивність швидкості деформації зсуву,  $\gamma = [(\dot{\gamma}_{ij} \dot{\gamma}_{ij}) / 2]^{1/2}$ ;

$\dot{\gamma}_{ij} = \dot{e}_{ij} / 2$ ;  $u_i, \varepsilon_{ij}, \sigma_{ij}$  – компоненти вектору переміщень, тензорів

деформації та напруження,  $s_{ij}, e_{ij}$  – компоненти девіаторів тензорів напружень

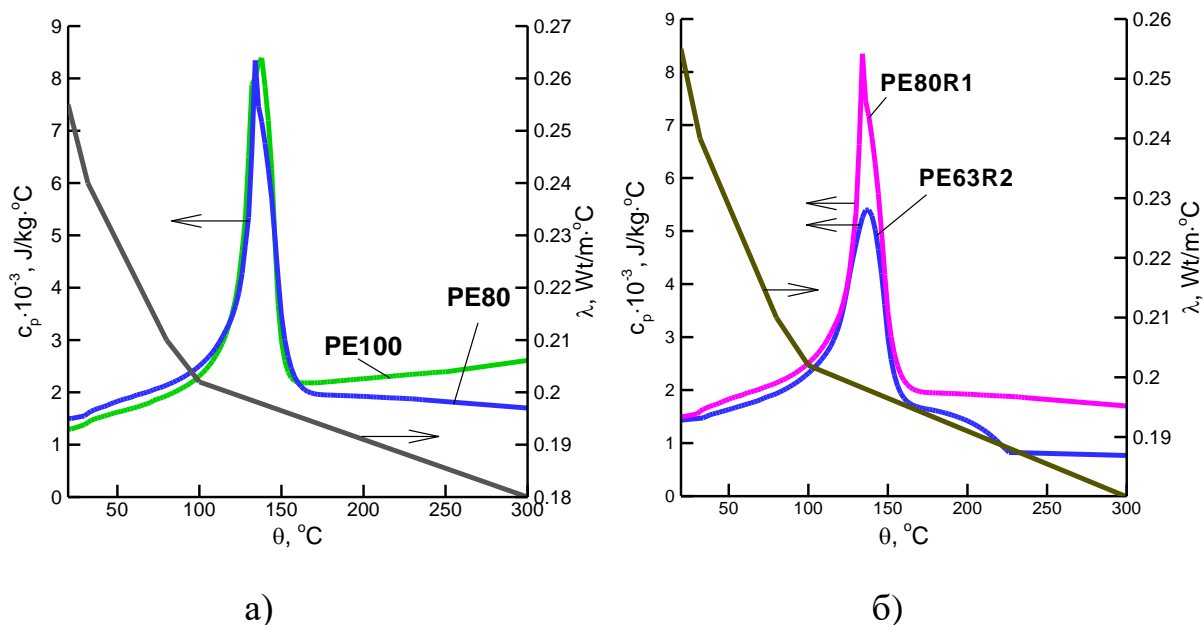
та деформацій,  $s_{ij} = \sigma_{ij} - \frac{1}{3} \sigma_{kk} \delta_{ij}$ ,  $e_{ij} = \varepsilon_{ij} - \frac{1}{3} \varepsilon_{kk} \delta_{ij}$ ,  $\delta_{ij}$  – символ Кронекера;

$c(\theta), \lambda(\theta)$  – коефіцієнти об'ємної теплоємності та теплопровідності;

$\alpha(\theta)$  – коефіцієнт лінійного теплового розширення;  $\theta_0$  – початкова температура.

Внутрішня і зовнішня бічні поверхні труби  $r_1 \leq r \leq r_2, 0 \leq z \leq l$  вільні від навантаження та обмінюються теплом з навколишнім середовищем, що має температуру  $\theta_0$  по закону Ньютона. Температура на торцях труби змінюється у відповідності з режимом зварювання.

Для рішення математичної задачі використовували фізико-механічні властивості матеріалів, що зварюються. Теплофізичні характеристики технічних поліетиленів ПЕ-63, ПЕ-80, ПЕ-100, що приведені в роботах [107, 108], представлені на рис. 3.3.



а – ПЕ-80/ПЕ-100;

б – ПЕ-80/ПЕ-63

Рисунок 3.3 – Порівняльні графіки залежності коефіцієнтів теплоємності та теплопровідності поліетиленів від температури

Задача про термомеханічний стан деталей при зварюванні вирішується чисельно за допомогою методу кінцевих елементів. Використовується підхід, викладений в роботі [109]. Лагранжеве варіаційне формулювання задачі для вісесиметричного стану в циліндричній системі координат  $Orz\varphi$  має вигляд:

$$\begin{aligned} \delta I = \int_F [\bar{\lambda} \left( \frac{\partial \theta}{\partial r} \delta \left( \frac{\partial \theta}{\partial r} \right) + \frac{\partial \theta}{\partial z} \delta \left( \frac{\partial \theta}{\partial z} \right) \right) + (\bar{c}_v \dot{\theta} - Q) \delta \theta] r dr dz + \\ + \int_S (-q + \gamma(\theta - \theta_c) + c_0 c(\theta^4 - \theta_c^4)) \delta \theta r dS = 0 \end{aligned} \quad (3.8)$$

$$\delta \Phi = \int_F (\sigma_{rr} \delta \varepsilon_{rr} + \sigma_{zz} \delta \varepsilon_{zz} + \sigma_{\phi\phi} \delta \varepsilon_{\phi\phi} + 2\sigma_{rz} \varepsilon_{rz}) r dr dz - \int_S (t_{nr} \delta u_r + t_{nz} \delta u_z) r dS = 0 \quad (3.9)$$

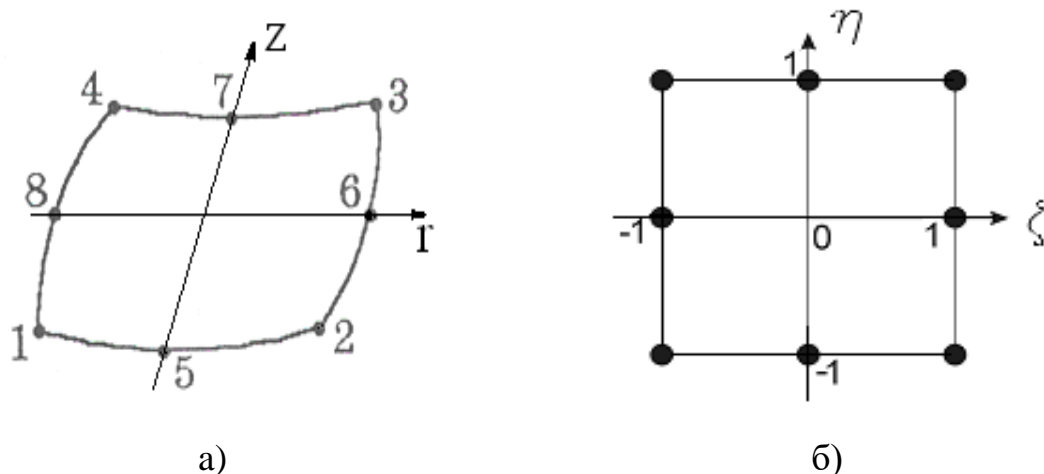
де  $\delta I$  – варіація функціоналу для задачі теплопровідності,  $\delta \Phi$  – варіація функціоналу для задачі механічної рівноваги,  $t_{nr}$  і  $t_{nz}$  – компоненти вектору напружень на контурі,  $t_{ni} = \sigma_{ij} n_j$ ,  $u_r, u_z$  – радіальна та осьова компоненти вектору переміщень.

Компоненти напружень в (3.9) визначаються рівняннями (3.4) та (3.5). Інтегрування ведеться по площині меридіонального перерізу  $F$  та його контуру  $S$ .

При вирішенні варіаційної задачі з метою підвищення ефективності обчислень, а також для більш точного описання криволінійних границь тіла застосовується восьмивузловий ізопараметричний чотирикутовий елемент (рис. 3.4). Такий кінцевий елемент є найбільш ефективним з точки зору точності та затрат машинного часу.

Запропонований вибір вузлових точок дозволяє апроксимувати конфігурацію тіла та невідомі функції в кожному кінцевому елементі поліномами другого ступеню, що забезпечує сумісність криволінійних ізопараметричних елементів, тобто безперервність на границях між суміжними елементами.

З умови стаціонарності функціоналу  $\delta \Phi = 0$  вузлові значення компонент вектору переміщення отримуємо з рішення системи лінійних алгебраїчних рівнянь. Отримана система рівнянь вирішується за допомогою методу Гаусса, у підсумку визначаються компоненти вектору переміщень у вузлах кінцево-елементної сітки. По знайденим значенням переміщень визначаються компоненти тензору деформацій. Потім за відомими деформаціями  $\varepsilon_{ij}$  обчислюються напруження за рівнянням закону Гука (3.4) і (3.5).



а – система координат  $\{r, z\}$ ;

б – система координат  $\{\zeta, \eta\}$

Рисунок 3.4 – Восьмивузловий ізопараметричний чотирикутний елемент:

1÷8 – вузли

З умови стаціонарності функціоналу  $\delta I = 0$  для визначення вузлових значень температури  $\theta_i$  отримуємо систему лінійних диференціальних рівнянь першого порядку по часу. Їх точність залежить від кількості кінцевих елементів. Необхідна щільність сітки елементів визначається спрощеним способом, шляхом рішення однієї і тієї ж самої задачі при різній кількості кінцевих елементів та співставленням результатів.

Блок-схема рішення задачі представлена на рис 3.5.

Кінцево-елементна розбивка області зварювання торців ПЕ труб нагрітим інструментом представлена на рис. 3.6. В якості температури плавлення поліетилену прийнято значення  $\theta = 130^\circ \text{C}$ . Насичене значення температури нагрівача складає  $208^\circ \text{C}$ .



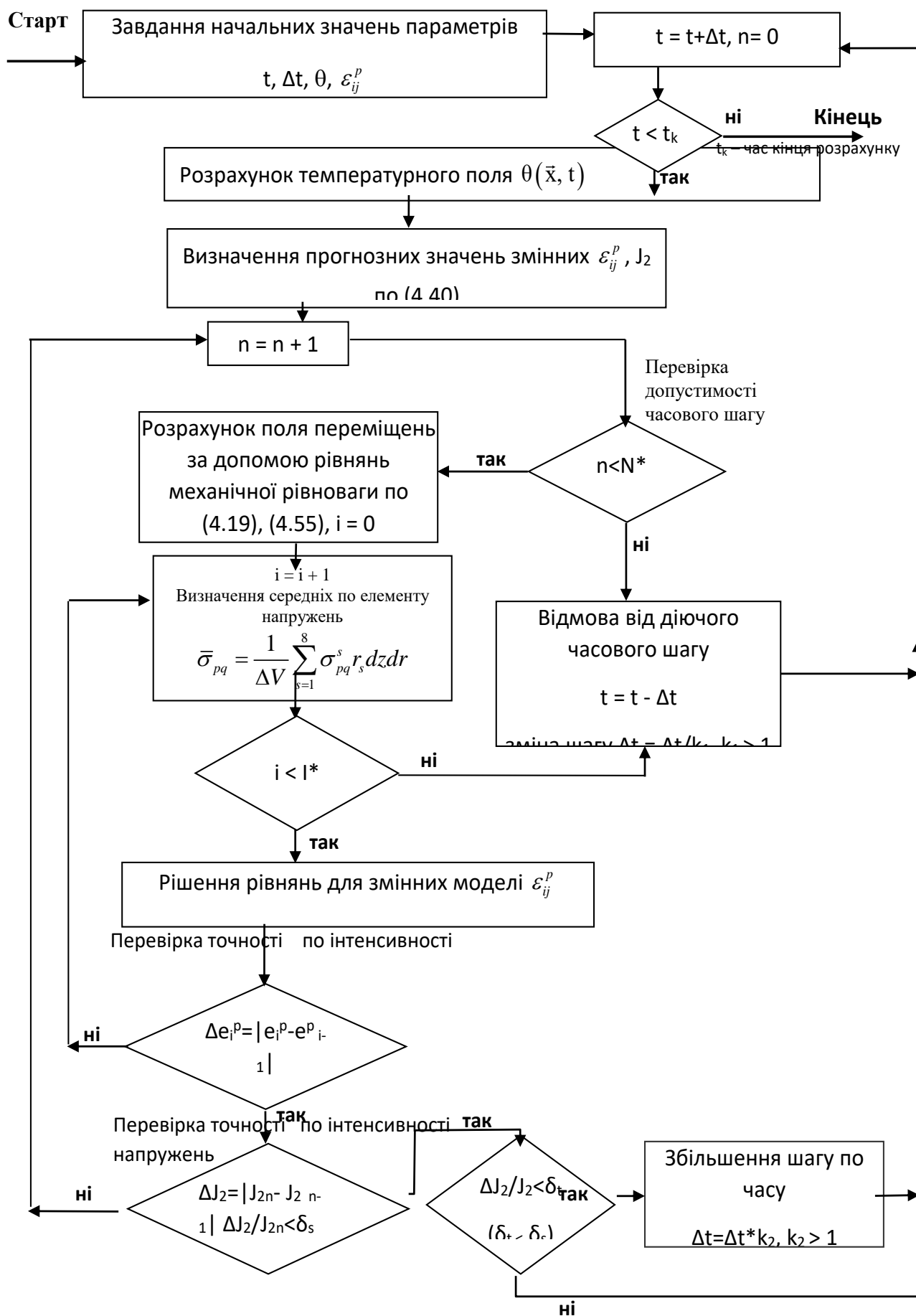


Рисунок 3.5 – Алгоритм рішення задачі

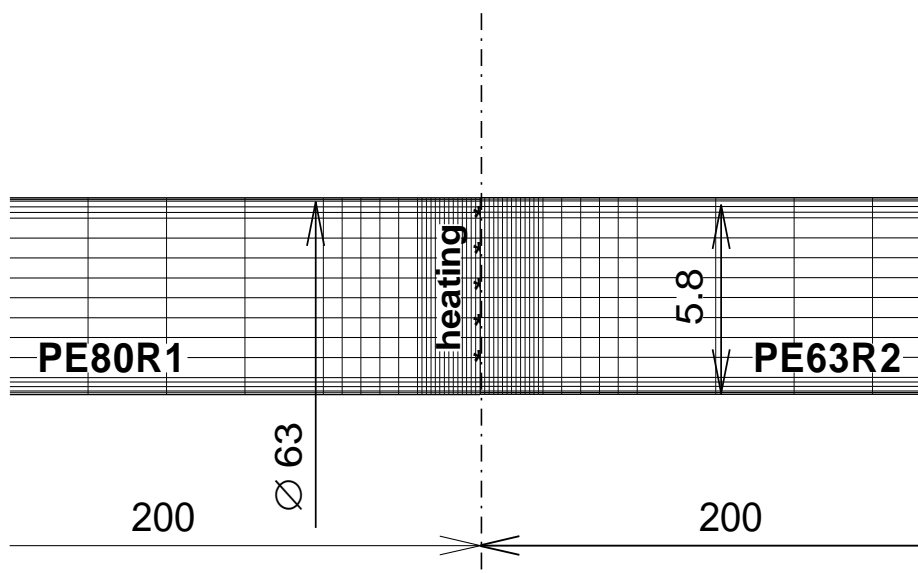


Рисунок 3.6 – Кінцево-елементна розбивка області зварювання різнотипних поліетиленових труб для комбінації ПЕ-80/ПЕ-63

Схеми розподілу температури при стиковому зварюванні труб у комбінації поліетиленів ПЕ-80/ПЕ-63 приведені на рис. 3.7 та 3.8.

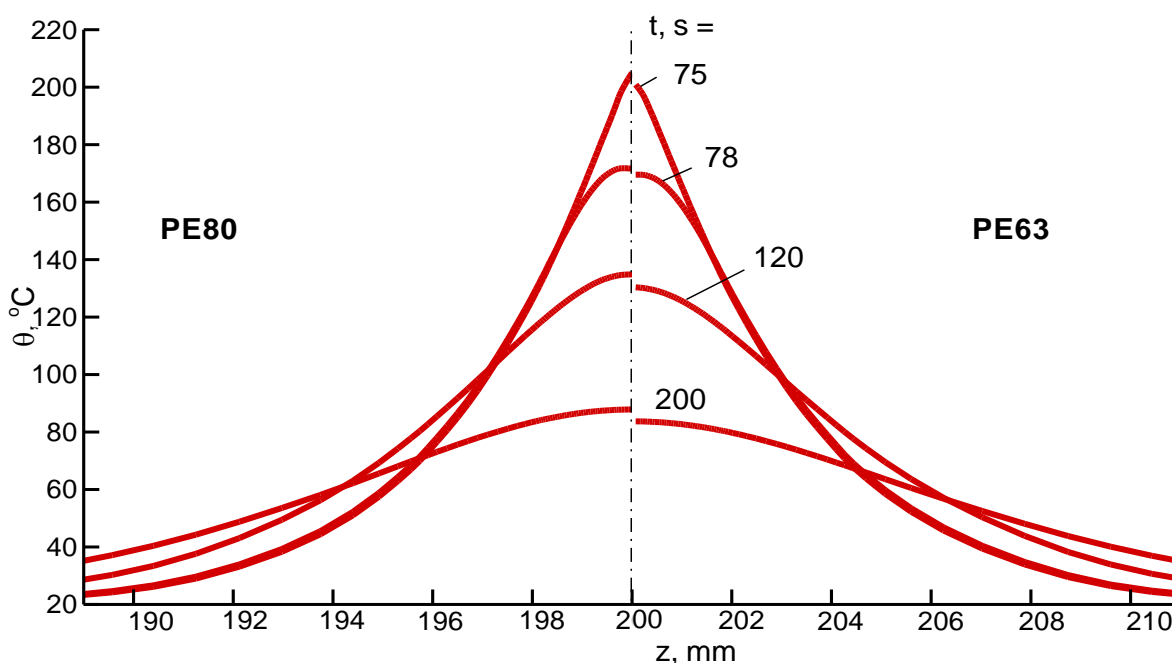
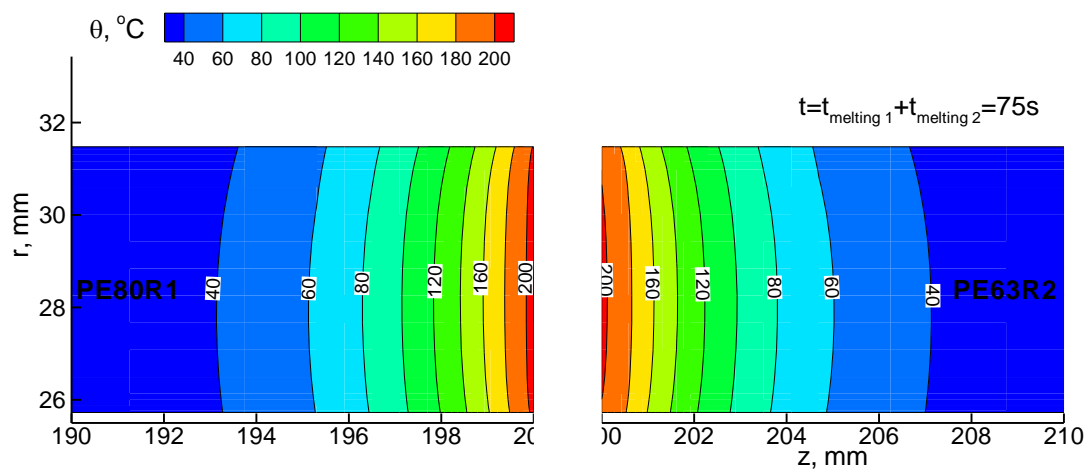
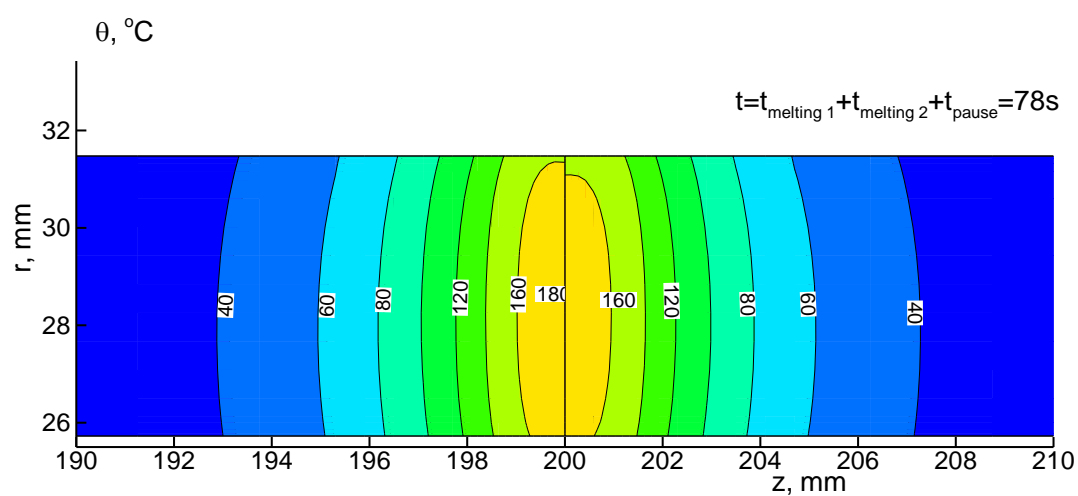


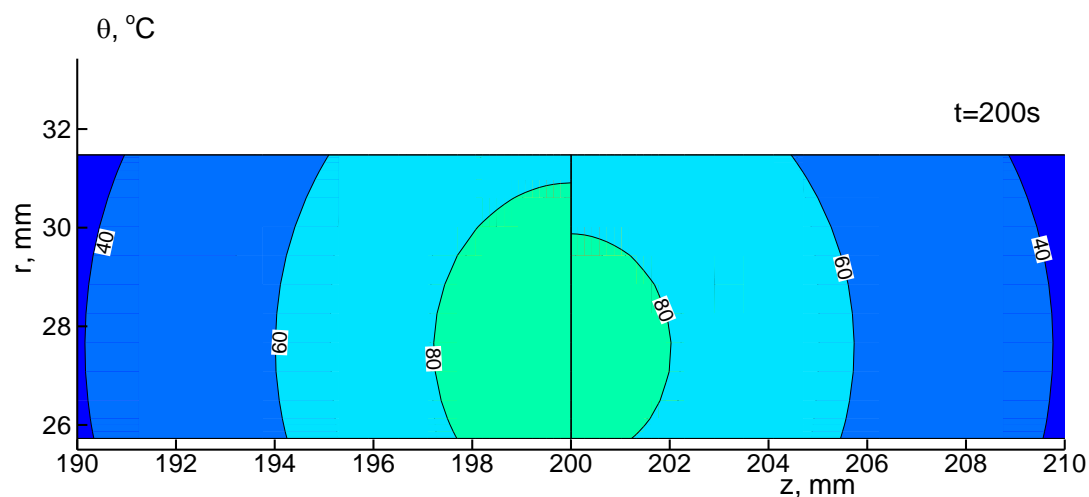
Рисунок 3.7 – Розподіл температури по  $z$  вздовж серединної лінії  $r = (r_1 + r_2)/2$  для різних часових моментів при стиковому зварюванні труб ПЕ-80/ПЕ-63



a)



б)



в)

Рисунок 3.8 – Ізолінії температурного поля у різні часові моменти при стиковому зварюванні труб ПЕ-80/ПЕ-63

Схеми розподілу температури при стиковому зварюванні труб у комбінації поліетиленів ПЕ-63/ПЕ-100 приведені на рис. 3.9 та 3.10.

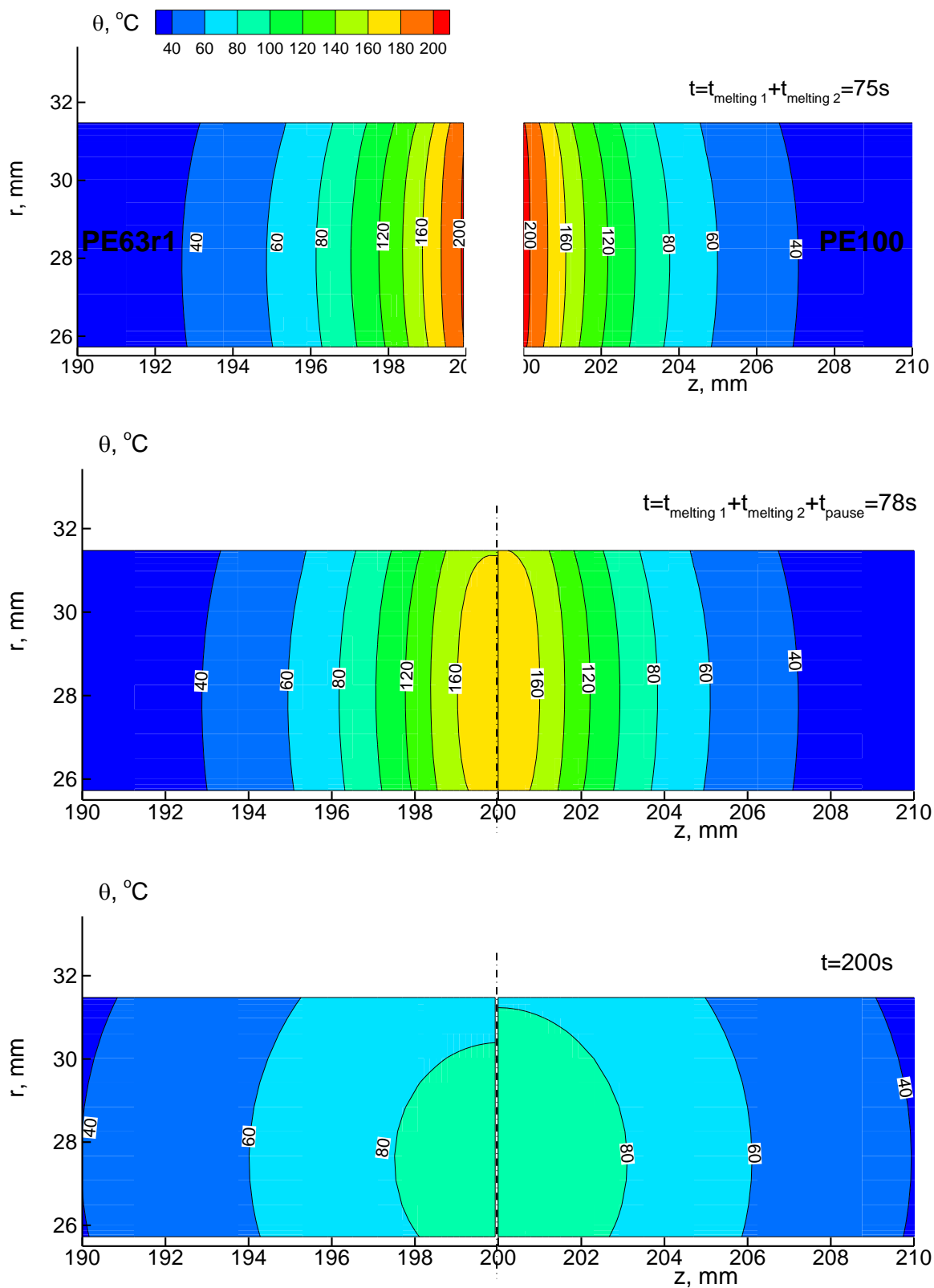


Рисунок 3.9 – Ізолінії температурного поля у різні часові моменти при стиковому зварюванні труб ПЕ-63/ПЕ-100

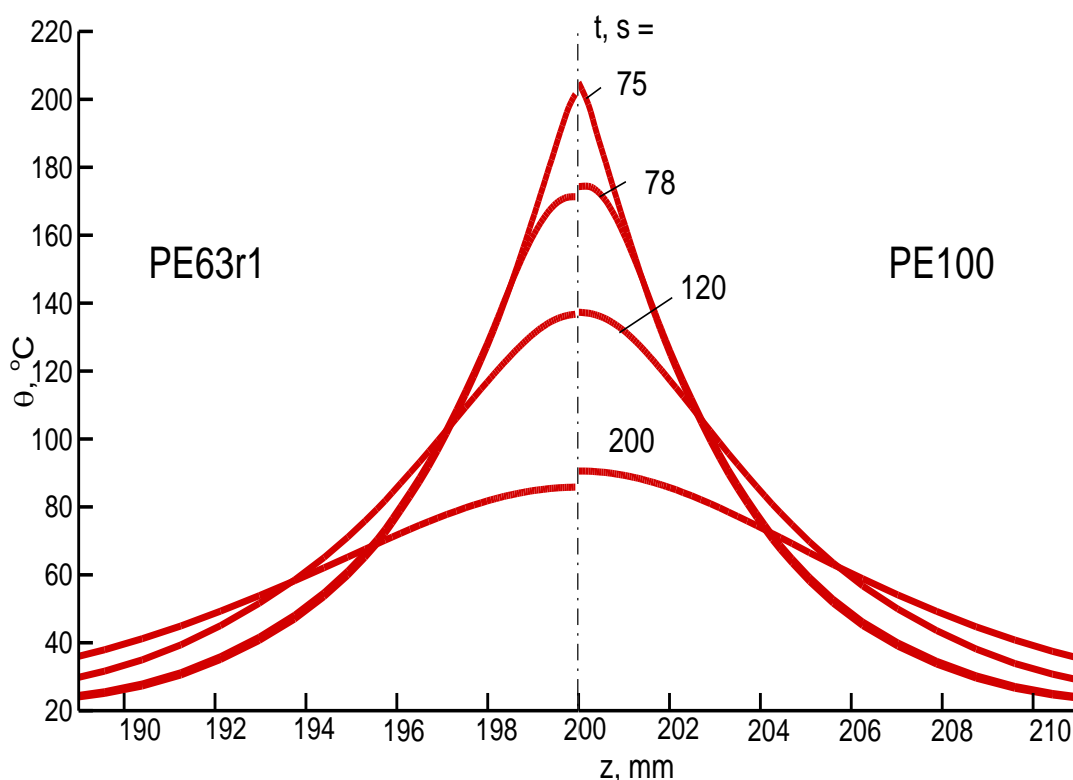


Рисунок 3.10 – Розподіл температури по  $z$  вздовж серединної лінії  $r = (r_1 + r_2)/2$  для різних часових моментів при стиковому зварюванні труб ПЕ-63/ПЕ-100

На рис. 3.8 та 3.9 показані ізолінії температурного поля в три моменти процесу стикового зварювання: а) на початку технологічної паузи  $t=75$ с, б) в момент з'єднання торців та початку стискання труб при осадженні, в) приблизно на середині тривалості охолодження. Видно, що через відмінності у теплофізичних властивостях поліетиленів по різні боки стику труб формуються нерівномірні температурні поля. Наприклад, при зварюванні комбінації ПЕ-63/ПЕ-80 в трубі із ПЕ-63 температура вище, ніж у трубі із ПЕ-80 через більшу величину теплопровідності. Поступове вирівнювання температури в серединній боковій поверхні труби  $(r_1 + r_2)/2$  показано на рис. 3.7 та 3.10.

На рис. 3.11 показано, як збільшується товщина розплавленого шару на торці труби з часом нагрівання.

В сучасних реаліях тема прогнозування довготривалої міцності труб

розкриталише частково, оскільки методики й методи визначення довготривалої міцності зварного з'єднання не оптимізовані для конкретних задач. Це призводить до збільшення собівартості дослідження, збільшення кількості експериментів та варіацій параметрів зварювання.

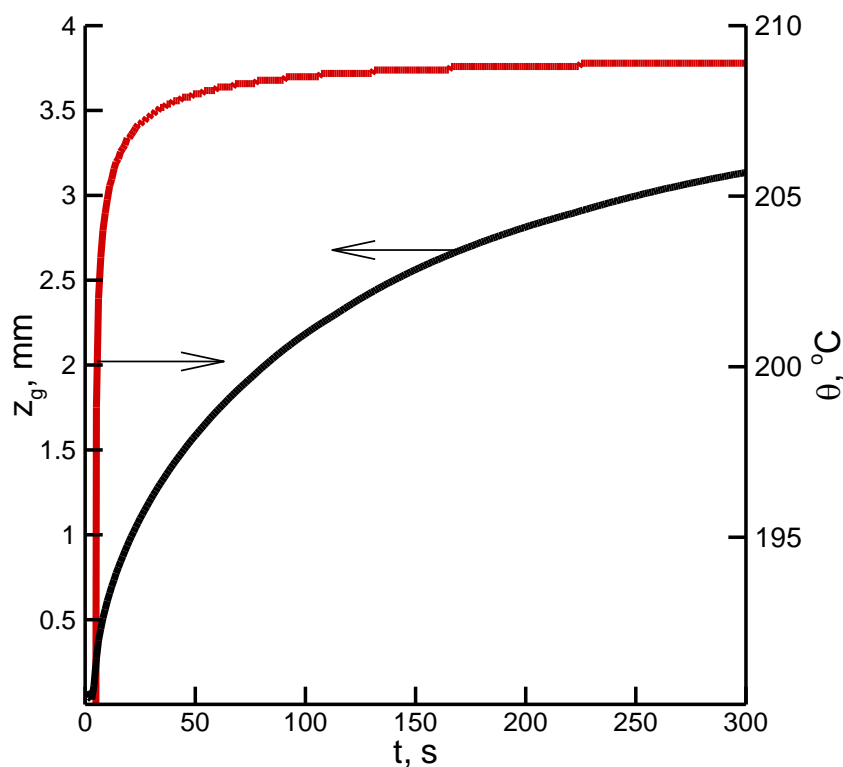


Рисунок 3.11 – Зміна з часом межі області розплаву (ізолінія  $\theta = \theta_{\text{плав}}$ ) при нагріві торців труб

В процесі роботи прогнозування впливу параметрів зварювання на міцність зварного з'єднання, отриманого за допомогою зварювання нагрітим інструментом встик нами пропонується використати метод Тагучі, який дозволить отримати точні дані без збільшення кількості експериментів та собівартості методики [110]. Сам метод широко застосовується для оптимізації якості та надійності матеріалів за рахунок оптимізації вхідних параметрів при меншій тривалості та вартості експериментів [111-114].

Суть методу Тагучі полягає в використанні спеціальної конструкції ортогональних масивів для визначення повного спектру параметрів при мінімальній кількості експериментів. Метод Тагучі рекомендує до

використання певне співвідношення: сигнал-до-шуму ( $S/N$ , signal-to-noise). Зазвичай лише три категорії визначальних характеристик використовуються для аналізу співвідношення  $S/N$ :

- Верхня межа допуску (більше-краще):

$$\frac{S}{N} = 10 \log \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{\gamma_i^2} \right) \quad (3.10)$$

- Номінальне:

$$\frac{S}{N} = 10 \log \left( \frac{\bar{\gamma}}{s_{\gamma}^2} \right); \quad (3.11)$$

- Нижня межа допуску (менше-краще):

$$\frac{S}{N} = 10 \log \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \gamma_i^2 \right) \quad (3.12)$$

де  $\bar{\gamma}$  – середнє значення результатів випробувань,  $s_{\gamma}^2$  – варіація  $\gamma$ ,  $n$  – кількість випробувань,  $\gamma_i$  – значення отриманого результату випробування для  $i$ -ого випробування.

Рівняння (3.11) зазвичай використовується для вирішення певних специфічних задач, рівняння (3.10) – для вирішення оптимізованих задач, коли вихідні параметри (значення результатів випробувань) найбільші, рівняння (3.12) – для вирішення оптимізованих задач, коли вихідні параметри найменші. Незалежно від категорії вихідних параметрів, найбільше співвідношення  $S/N$  відноситься до кращих їх значень, а тому оптимізований рівень вхідних параметрів (в нашому випадку параметрів процесу зварювання) відноситься до найбільшого співвідношення  $S/N$  [115, 116].

Для прикладу наведемо вирішення уявної задачі оптимізації параметрів зварювання нагрітим інструментом встик шляхом адаптованого методу Тагучі. На відміну від інших методів прогнозування для аналізу в матрицю входять лише три вхідні параметри: температура нагрівального інструменту (А), величина усадки (В) та час нагріву (С), по три значення кожного з цих параметрів (табл. 3.1).

Таблиця 3.1 – Параметри зварювання та їх значення

Параметр зварювання	Символ	Розмірність	Рівень 1	Рівень 2	Рівень 3
Температура нагрітого інструменту	A	°C	270	280	290
Величина усадки	B	мм	0,70	1,25	2,00
Час нагріву	C	с	15	20	25

Після варіації цих параметрів між собою, кількість експериментів зводиться до 9 (табл. 3.2.)

Таблиця 3.2 – Ортогональний масив параметрів зварювання та їх значень

Номер експерименту	Вхідні параметри (параметри зварювання)		
	A	B	C
	Температура нагрітого інструменту	Величина усадки	Час нагріву
№	°C	мм	с
1	270	0,70	15
2	270	1,25	20
3	270	2,00	25
4	280	0,70	15
5	280	1,25	20
6	280	2,00	25
7	290	0,70	15
8	290	1,25	20
9	290	2,00	25



Шляхом випробувань на розтяг визначаються значення міцності для кожного зразка, ефективність його зварювання (за відношенням міцності отриманих з'єднань до середнього арифметичного значення міцності основного матеріалу) та співвідношення  $S/N$  (табл. 3.3).

Таблиця 3.3 – Результати механічних випробувань та розрахунків

Номер експерименту	Вхідні параметри			Вихідні параметри		
	А	В	С			
	Температура нагрітого інструменту	Величина усадки	Час нагріву	Міцність з'єднання	Ефективність зварювання	Розрахункове співвідношення $S/N$
№	°C	мм	с	МПа	%	дБ
1	270	0,70	15	8,33	15,9	17,79
2	270	1,25	20	14,50	27,6	23,16
3	270	2,00	25	11,66	22,2	21,30
4	280	0,70	15	9,74	18,6	19,47
5	280	1,25	20	14,01	26,7	22,92
6	280	2,00	25	10,47	19,9	20,12
7	290	0,70	15	14,64	27,9	23,21
8	290	1,25	20	15,93	30,3	23,87
9	290	2,00	25	15,75	30,0	23,93

Відповідно до отриманих результатів міцностей зварних з'єднань (табл. 3.4) за значеннями співвідношення  $S/N$  (табл. 3.5) окремо визначаються оптимальні значення усіх параметрів зварювання (табл. 3.6).

Таблиця 3.4 – Вихідні значення результатів механічних випробувань

Символ	Параметр зварювання	Середні значення результатів механічних випробувань				
		Рівень 1	Рівень 2	Рівень 3	Макс.	Мін.
A	Температура нагрітого інструменту	11,50	11,41	15,44	15,44	11,41
B	Величина усадки	10,90	14,81	12,63	14,81	10,90
C	Час нагріву	11,58	13,33	13,44	13,44	11,58

Таблиця 3.5 – Вихідні значення співвідношень S/N (більше-краще)

Символ	Параметр зварювання	Співвідношення S/N				
		Рівень 1	Рівень 2	Рівень 3	Макс.	Мін.
A	Температура нагрітого інструменту	20,75	20,84	23,67	23,67	20,75
B	Величина усадки	20,16	23,32	21,78	23,32	20,16
C	Час нагріву	20,59	22,19	22,48	22,48	20,59

Таблиця 3.6 – Оптимізовані параметри зварювання та їх значення

Символ	Параметр зварювання	Оптимізовані параметри зварювання		
		Рівень		
A	Температура нагрітого інструменту	3	290 °C	A <sub>3</sub> B <sub>2</sub> C <sub>3</sub>
B	Величина усадки	2	1,25 мм	
C	Час нагріву	3	25 с	

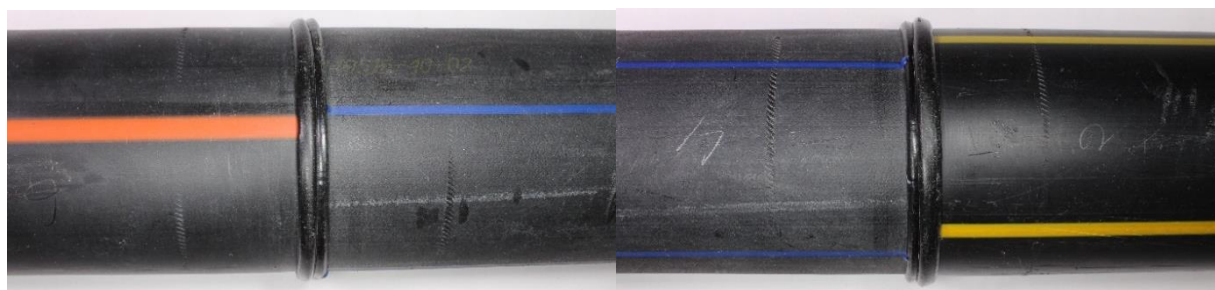
Таким чином, за умови, наприклад, зварювання з використанням параметрів A2B3C2 міцність зварного з'єднання матиме значення 11,81 МПа з ефективністю 22,5%, а з використанням оптимальних параметрів зварювання A3B2C3 міцність зварного з'єднання буде 18,13 МПа, ефективність зварювання – 34,5%, тобто на 70 % вище.

### **3.2 Морфологічні особливості зварних з'єднань полімерних труб, виготовлених з технічних марок поліетилену ПЕ-63, ПЕ-80 та ПЕ-100**

Для прогнозування поведінки поліетиленових труб та їх зварних з'єднань у часі було сформовано ряд дослідних зварних з'єднань із різнотипних технічних поліетиленів та поміщено їх в експериментальні середовища: в землю (рис. 3.12) та на поверхню ґрунту (рис. 3.13). За результатами проведених зварювальних робіт виявлено значну різницю у формі та об'ємі зварного грату у зварних з'єднаннях різнотипних поліетиленів (рис. 3.12 та 3.13, а та б) у порівнянні зі зварними з'єднаннями однотипних поліетиленів (рис. 3.12 та 3.13, в та г). Важливо зазначити, що згідно діючих норм [46] грат подібної форми є характерним для неякісних зварних з'єднань, а саме зварне з'єднання вважається непридатним для використання. Згідно діючих норм у якісного зварного з'єднання валики грату з обох сторін площини зварювання повинні мати однакову форму та об'єм, як це видно у зварних з'єднань труб з однотипних поліетиленів (рис. 3.13). У випадку зварних з'єднань труб з різнотипних поліетиленів спостерігається нерівномірно розподілений грат з обох сторін від площини зварювання, а тому такі зварні з'єднання можуть вважатися неякісними. Пояснення у різниці форми та об'єму грату для таких зварних з'єднань може бути пов'язано з їх теплофізичними характеристиками.

З часом (1 рік після поміщення зразків у експериментальне середовище – землю) проведено дослідження морфології зварних з'єднань. Шліфи зварних з'єднань труб з однотипних та різнотипних поліетиленів представлені на рис. 3.14 (зразки з ґрунту) та рис. 3.15 (зразки з поверхні ґрунту). Видно, що зварні з'єднання з однотипних поліетиленів (рис. 3.15 та 3.16, а та б) мають

рівномірний зварний грат з обох сторін площини зварювання. З іншого боку, зварні з'єднання труб з різнотипних поліетиленів мають нерівномірний зварювальний грат відносно площини зварювання, при чому грат зі сторони ПЕ-63 менший, що, ймовірно, також пов'язано з його відмінними від ПЕ-80 та ПЕ-100 теплофізичними характеристиками. небезпечним показником для зварних з'єднань є наявна лінія розділення в площині зварювання, яка спостерігається на шліфах зварних з'єднань труб з різнотипних поліетиленів та є першим свідченням недостатнього прогріву при зварюванні та появи непроварених ділянок (рис. 3.16).



а) ПЕ-100/ПЕ-63

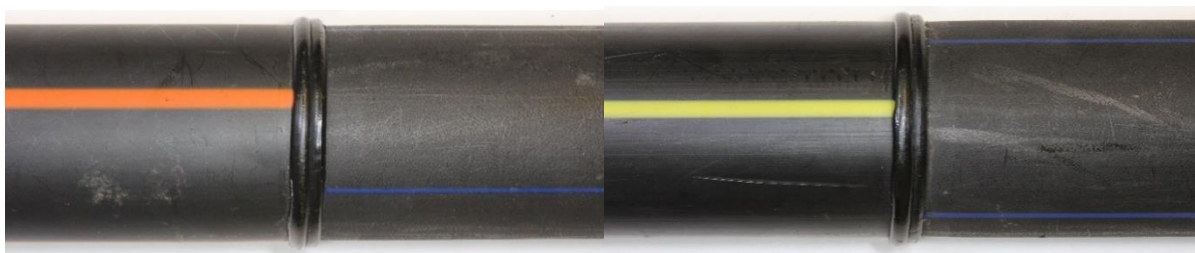
б) ПЕ-63/ПЕ-80



в) ПЕ-63/ПЕ-63

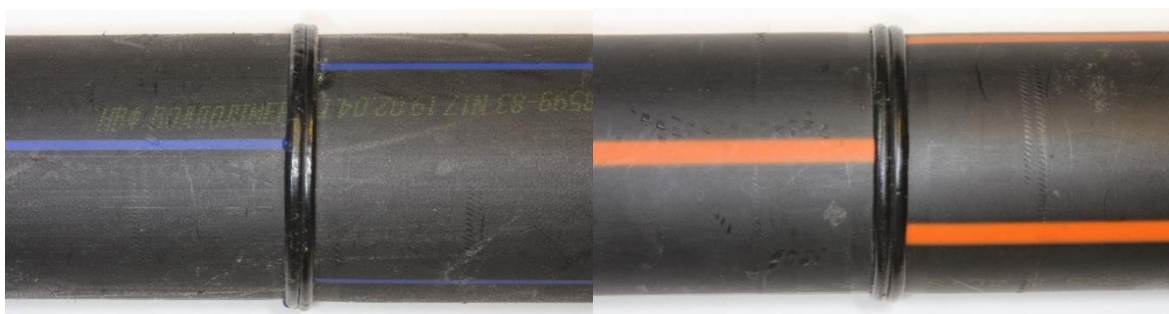
г) ПЕ-100/ПЕ-100

Рисунок 3.12 – Зварні з'єднання полімерних труб з різнотипних та однотипних поліетиленів після експериментального середовища (грунт)



а) ПЕ-100/ПЕ-63

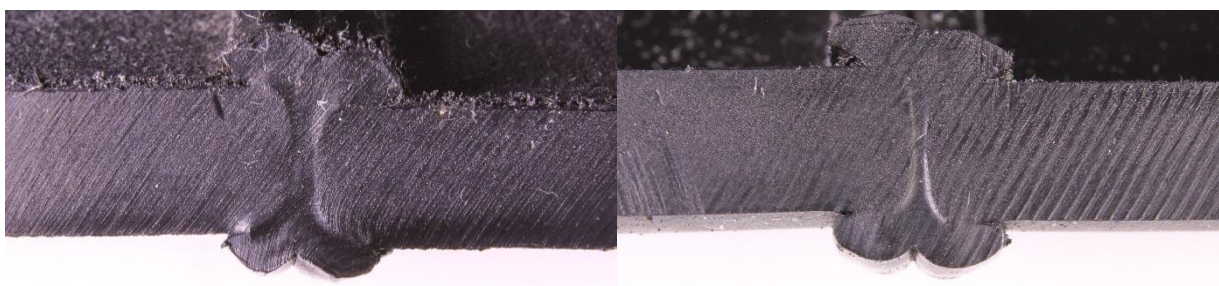
б) ПЕ-80/ПЕ-63



в) ПЕ-63/ПЕ-63

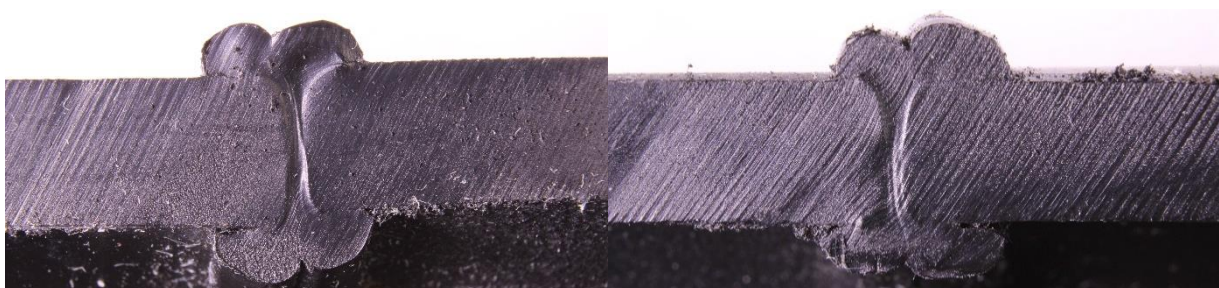
г) ПЕ-100/ПЕ-100

Рисунок 3.13 – Зварні з'єднання полімерних труб з різнотипних та однотипних поліетиленів після експериментального середовища (повітря)



а) ПЕ-63/ПЕ-63

б) ПЕ-100/ПЕ-100



в) ПЕ-100/ПЕ-63

г) ПЕ-63/ПЕ-80

Рисунок 3.14 – Морфологія зварних з'єднань полімерних труб з різнотипних та однотипних поліетиленів після експериментального середовища (грунт)



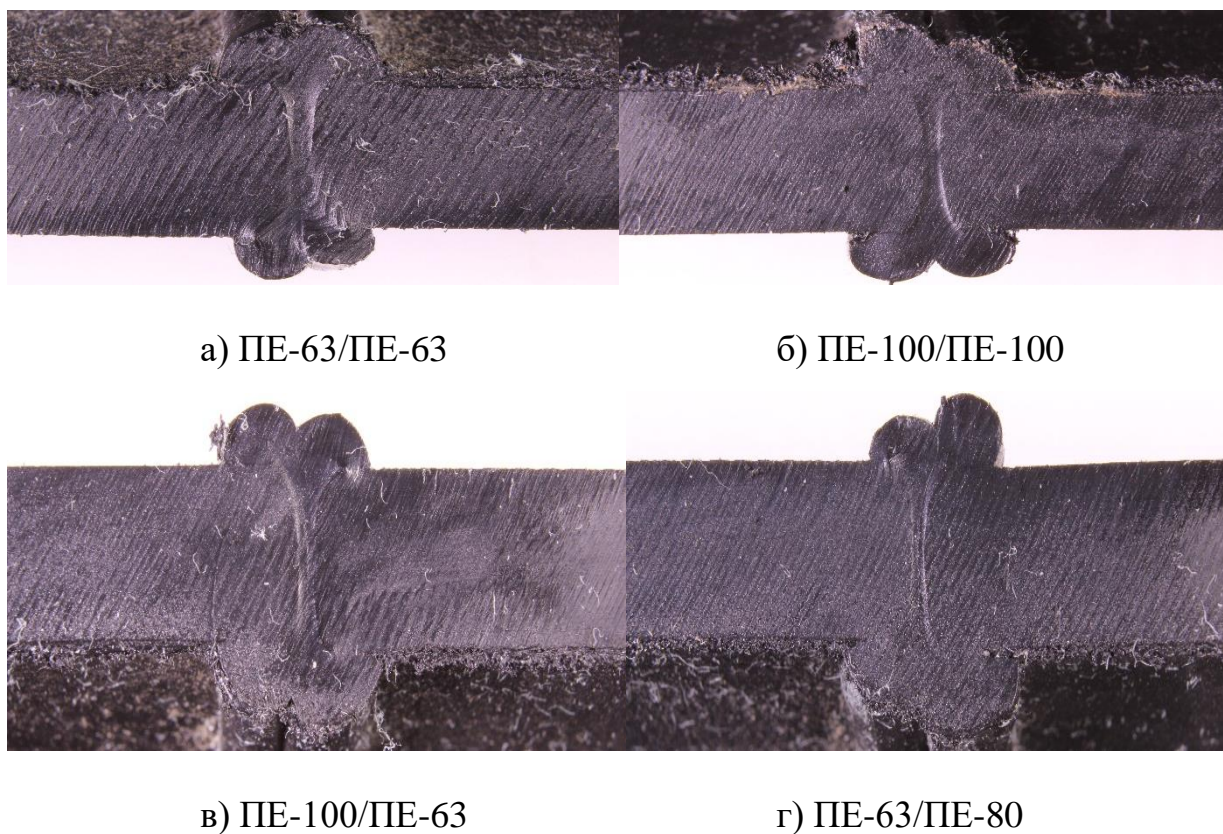


Рисунок 3.15 – Морфологія зварних з'єднань полімерних труб з різнотипних та однотипних поліетиленів після експериментального середовища (повітря)



Рисунок 3.16 – Приклад традиційного непровару по лінії розділення в площині зварювання при недостатньому прогріві

### 3.3 Структура та термомеханічні властивості зварних з'єднань труб з різнотипних поліетиленів, які перебували під дією факторів робочого середовища.

Як раніше було наведено, при стиковому зварюванні різнотипних поліетиленів за традиційною технологією, має місце різниця в розмірі валиків зварного з'єднання. Згідно діючих нормативних документів, такі з'єднання є недопустимими. З метою більш детального встановлення чинників, що впливають на різницю в розмірі валиків зварного грату, її уникнення та більш чіткого вивчення процесу зварювання різнотипних поліетиленів були проведені структурні та термомеханічні дослідження, результати яких представлено нижче.

Аналіз ширококутових рентгенівських дифрактограм зразків зварних з'єднань ПЕ-63/ПЕ-100, які знаходились на повітрі та у землі (протягом 1 року) показав, що всі вони мають аморфно-кристалічну структуру, на що вказує присутність дифракційних максимумів при  $2\theta_{max} = 21,2^\circ$  та  $23,6^\circ$  на фоні уявного аморфного гало з вершиною при  $2\theta_{max} \approx 21,0^\circ$  (рис. 3.17).

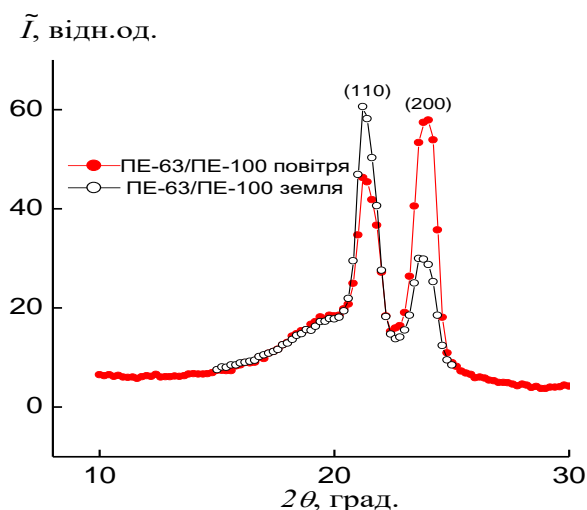


Рисунок 3.17 – Ширококутові рентгенівські дифрактограми зварних з'єднань поліетиленів ПЕ-63/ПЕ-100, які знаходились на повітрі та у землі

Примітно, що для зварних з'єднань ПЕ-63/ПЕ-100, які знаходились на повітрі під дією ультрафіолетового випромінювання суттєво змінюється структура. На це вказує зміна інтенсивності дифракційних максимумів в площинах (110) та (200).

Із аналізу ширококутових рентгенівських дифрактограм зразків зварних з'єднань ПЕ-63/ПЕ-63 та ПЕ-63/ПЕ-80, які знаходились на повітрі та у землі суттєвих змін в їх структурній організації не виявлено (рис. 3.18 та рис. 3.19).

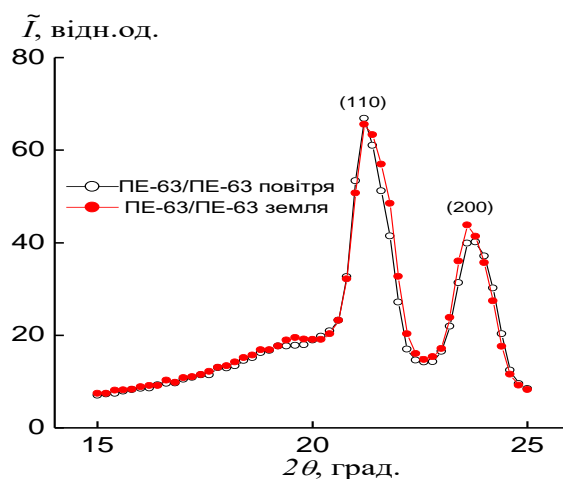


Рисунок 3.18 – Ширококутові рентгенівські дифрактограми зварних з'єднань поліетиленів ПЕ-63/ПЕ-63, які знаходились на повітрі та у землі

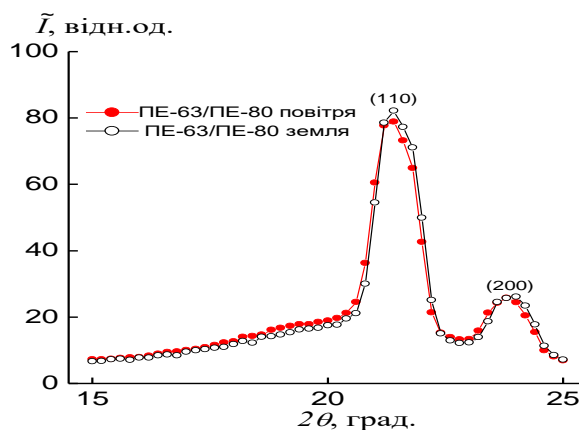
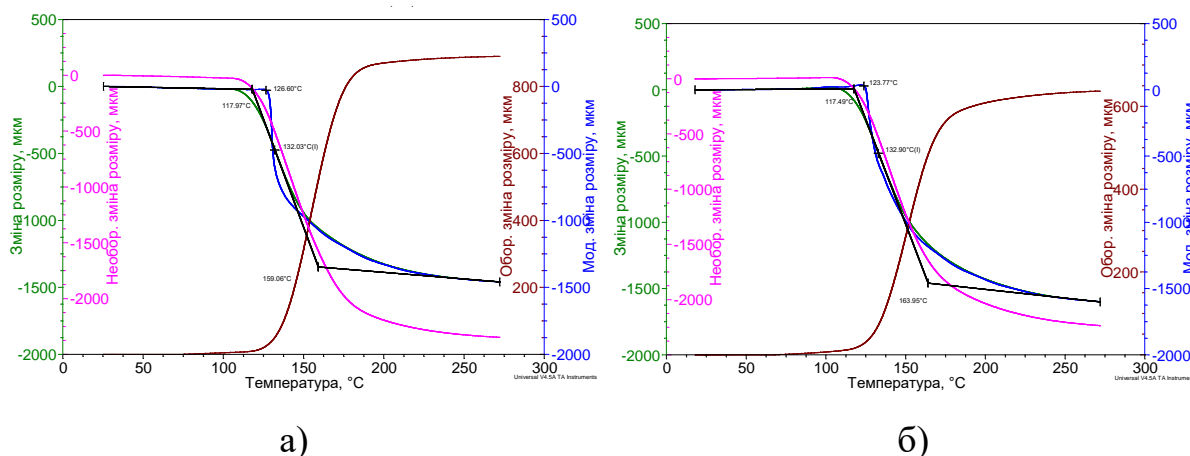


Рисунок 3.19 – Ширококутові рентгенівські дифрактограми зварних з'єднань поліетиленів ПЕ-63/ПЕ-80, які знаходились на повітрі та у землі



На рис. 3.20 та 3.21 відповідно представлені термомеханічні криві зразків зварних з'єднань ПЕ-63/ПЕ-80 та ПЕ-63/ПЕ-100, які протягом двох років перебували під дією факторів робочого середовища, а саме у землі та на поверхні ґрунту.

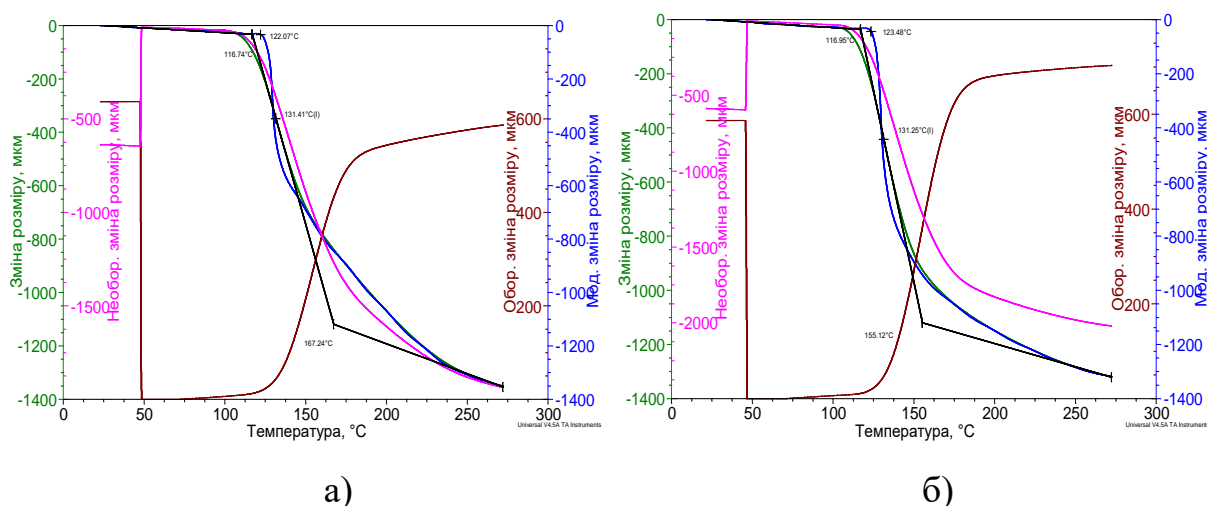
Для більш детального аналізу на рис. 3.22 та 3.23 приведені криві модульованої зміни розміру зразків зварних з'єднань ПЕ-63/ПЕ-80 та ПЕ-63/ПЕ-100, відповідно, які перебували під дією факторів робочого середовища зі зміною температури.



а – зразки зварних з'єднань, які перебували в землі;

б – зразки зварних з'єднань, які перебували на поверхні ґрунту

Рисунок 3.20 – Термомеханічні криві зразків зварних з'єднань ПЕ-63/ПЕ-80, які перебували під дією факторів робочого середовища



а – зразки зварних з'єднань, які перебували в землі;

б – зразки зварних з'єднань, які перебували на поверхні

Рисунок 3.21 – Термомеханічні криві зразків зварних з'єднань ПЕ-63/ПЕ-100, які перебували під дією факторів робочого середовища

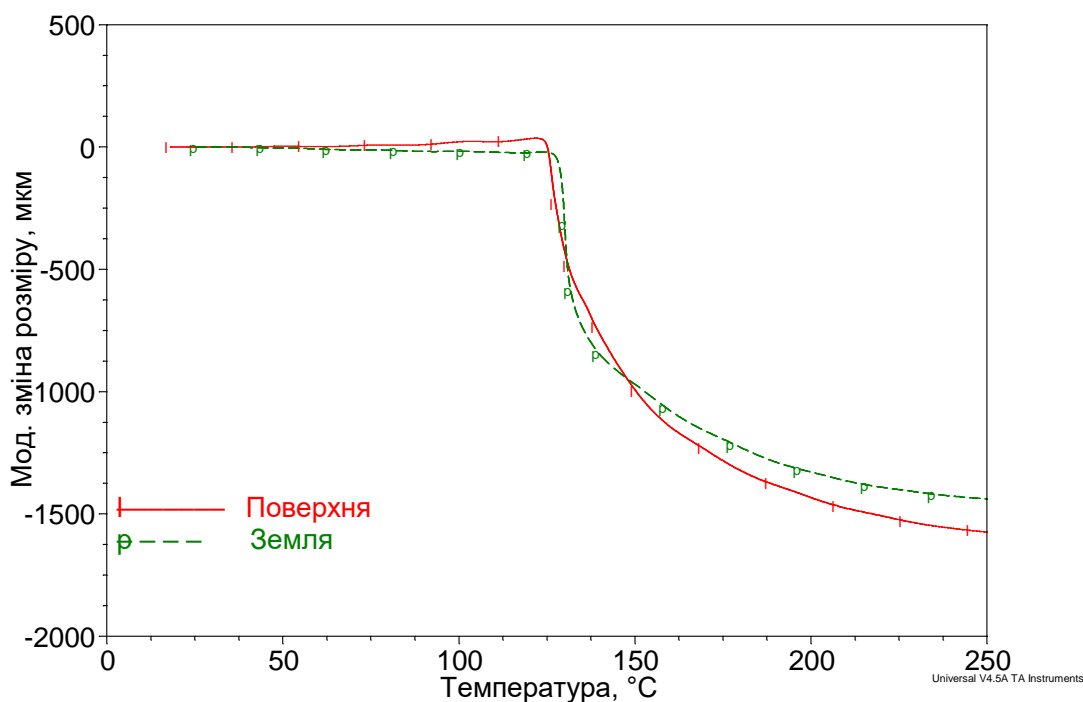


Рисунок 3.22 – Модульована зміна розміру зразків зварних з'єднань ПЕ-63/ПЕ-80, які перебували під дією факторів робочого середовища зі зміною температури

Аналіз термомеханічної поведінки досліджуваних зразків показав, що за виключенням зростання величини термічного розширення до початку плавлення кристалічної фази зразка зварного з'єднання ПЕ-63/ПЕ-80, який перебував на поверхні, та дещо різкого процесу плавлення кристалічної фази зразка зварного з'єднання ПЕ-63/ПЕ-80, який перебував у землі, суттєвої різниці між поведінкою термомеханічних кривих обох зразків не спостерігається (рис. 3.20, 3.22). Ймовірно це пояснюється відсутністю суттєвих змін у структурі обох зварних з'єднань, як це було проаналізовано з рис. 3.19.

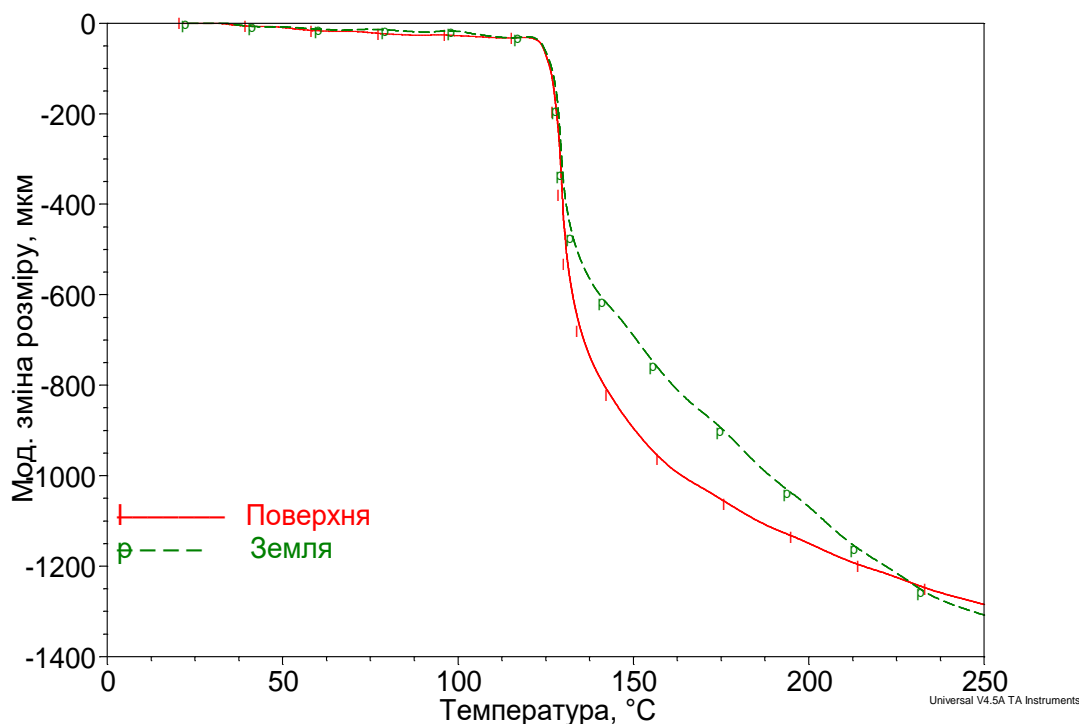


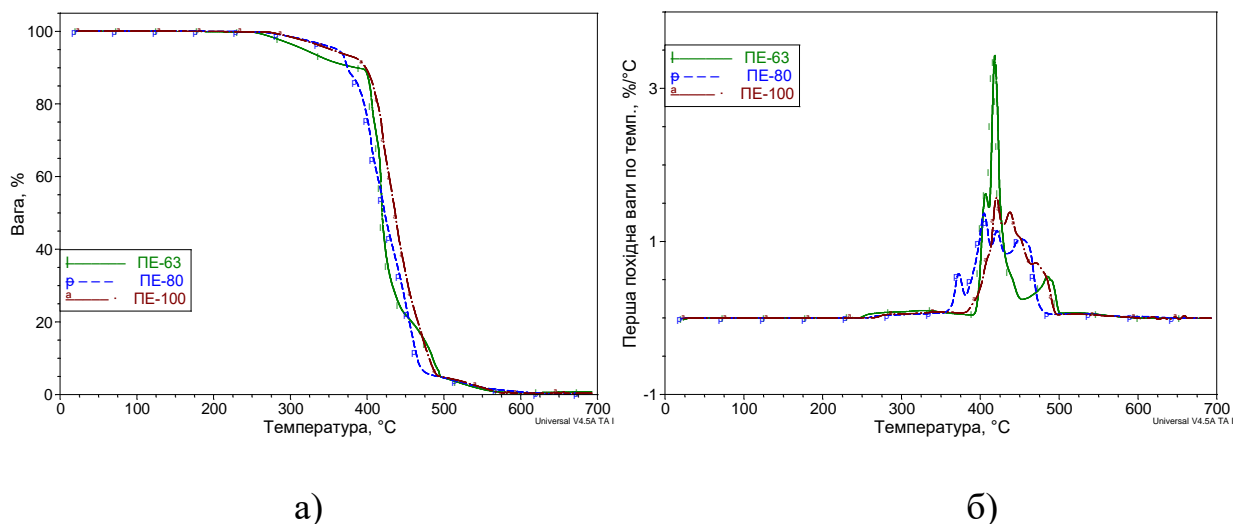
Рисунок 3.23 – Модульована зміна розміру зразків зварних з'єднань ПЕ-63/ПЕ-100, які перебували під дією факторів робочого середовища зі зміною температури

Зовсім інша картина спостерігається для зразків зварних з'єднань ПЕ-63/ПЕ-100. Криві модульованої зміни розміру зразків зварних з'єднань ПЕ-63/ПЕ-100, які перебували під дією факторів робочого середовища, а саме на поверхні землі та в землі від зміни температури мають суттєву різницю в області плавлення кристалічної фази поліетиленів (рис. 3.21, 3.23). Це безумовно може бути пояснено зміною у структурі кристалічної фази поліетиленів в зварному з'єднанні, що підтверджується результатами рентгеноструктурних досліджень, які приведені на рис. 3.17.

#### 3.4 Теплофізичні та експлуатаційні характеристики технічних поліетиленів та зварних з'єднань на їх основі

На рис. 3.24,а представлені криві термогравіметричного аналізу зразків поліетилену технічних марок ПЕ-63, ПЕ-80 та ПЕ-100, які були вирізані з відповідних труб. Видно, що за характером кривих теплофізичні властивості

поліетиленів подібні, однак для ПЕ-63 температура початку термоокислювальної деструкції лежить нижче у порівнянні з ПЕ-80 та ПЕ-100 (табл. 3.7). При цьому з рис. 3.24,б видно, що швидкість термоокислювальної деструкції поліетилену ПЕ-63 набагато вища у ПЕ-63 з температурою максимуму інтенсивності  $T_{d \text{ макс.}} \approx 418^\circ\text{C}$  порівняно з ПЕ-80 та ПЕ-100 з температурами максимумів інтенсивності  $T_{d \text{ макс.}} \approx 420^\circ\text{C}$  та  $T_{d \text{ макс.}} \approx 450^\circ\text{C}$ , відповідно.



а) криві ТГА;

б) криві ДТГА

Рисунок 3.24 – ТГА та ДТГА криві зразків трубних марок поліетилену ПЕ-63, ПЕ-80 та ПЕ-100

Таблиця 3.7 – Характеристичні температури термоокислювальної деструкції зразків трубних поліетиленів ПЕ-63, ПЕ-80 та ПЕ-100

Зразок	$T_d$ , °C	$T_{d \text{ макс.}}$ , °C
ПЕ-63	252	418
ПЕ-80	264	420
ПЕ-100	274	450

На рис. 3.25 приведені криві диференційної сканувальної калориметрії зразків трубних марок поліетилену ПЕ-63, ПЕ-80 та ПЕ-100 при першому (рис. 3.25, а) та другому (рис. 3.25, б) нагріві. При першому нагріві в області 250 °C на кривих видно екзотермічні процеси, які відсутні при другому нагріві, що може бути пов'язано з тепловою релаксацією напружень, які залишилися у полімері після формування труб,

або з дополімеризацією поліетиленів. Ймовірно, що при другому нагріві зміна характеру максимумів ендотермічних процесів в області температур 130-140 °С, яким відповідає плавлення поліетиленів, зсув їх температур та зменшення ентальпії пояснюються перебігом цих процесів при першому нагріві. Однак, необхідно зазначити, що як при першому, так і при другому нагріві криві та значення їх характеристичних температур певним чином відрізняються для усіх трьох марок технічних поліетиленів (табл. 3.8). Схожа поведінка у відмінності значень для трьох марок поліетиленів спостерігається і на кривих теплопровідності (рис. 3.26, а). З кривих видно, що теплопровідність поліетиленів як за ізотермічними значеннями, так і зі зміною температур можуть відрізнятися у декілька разів, що, безумовно, не може не впливати на процеси плавлення при їх зварюванні, особливо, різних типів поліетиленів. Підтвердженням цьому є характер кривих повзучості та релаксації напруження зразків поліетиленів трьох марок при різних температурах (рис. 3.26, б).

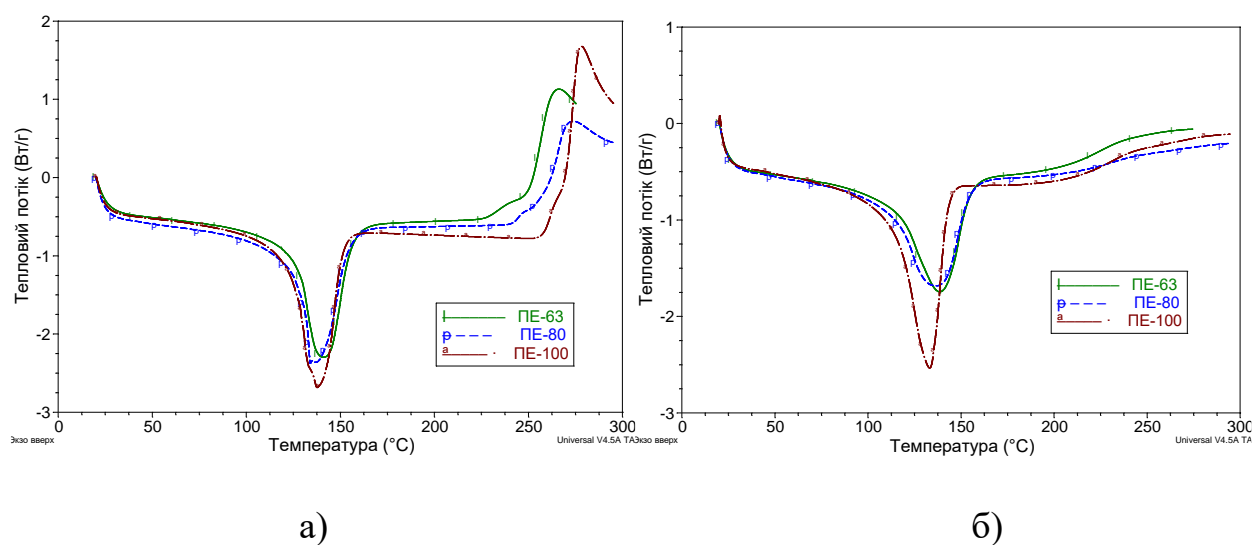
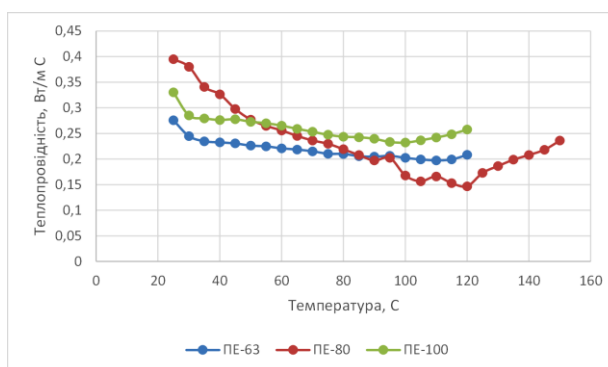


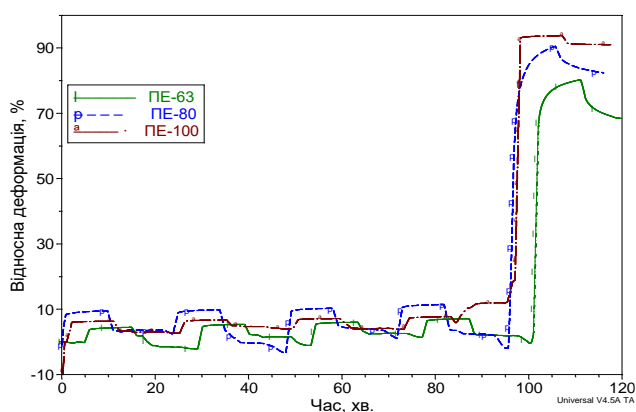
Рисунок 3.25 – ДСК криві зразків трубних марок поліетилену ПЕ-63, ПЕ-80 та ПЕ-100 при першому (а) та другому (б) нагріві

Таблиця 3.8 – Характеристичні теплофізичні параметри плавлення зразків трубних поліетиленів ПЕ-63, ПЕ-80 та ПЕ-100

Зразок	$T_{пл}, ^\circ\text{C}$	$\Delta H, \text{Дж/г}$
1-ий нагрів		
ПЕ-63	141,3	112
ПЕ-80	136,9	116,1
ПЕ-100	137,6	120,9
2-ий нагрів		
ПЕ-63	138,9	93,5
ПЕ-80	137,5	95,6
ПЕ-100	133	112,3



а)



б)

Рисунок 3.26 – Залежність теплопровідності (а) та деформаційна поведінка (б) зразків поліетиленів ПЕ-63, ПЕ-80 та ПЕ-100 від температури

Якщо при температурах набагато нижчих за температуру плавлення індивідуальних поліетиленів ізотермічні криві деформації поліетиленів при повзучості та релаксації напруження подібні, то з наближенням до температури

плавлення їх поведінка відрізняється суттєво. Для зразка поліетилену ПЕ-63 значення деформації є найменшими, що, ймовірно, пов'язано з його високою в'язкістю, в той час як, наприклад, зразок ПЕ-100 деформується як вже низьков'язкий розплав.

Таким чином, виходячи з результатів теплофізичних досліджень можна говорити, що поліетилені різних технічних марок відрізняються за своїми характеристиками. Особливо це стосується поліетилену ПЕ-63 та нових марок ПЕ-80 та ПЕ-100. Ці відмінності, безумовно, необхідно враховувати під час зварювання труб із цих різних типів поліетиленів при ремонті трубопроводів з пластмас, однак технологічна карта традиційного способу зварювання полімерних труб нагрітим інструментом встик ці особливості не враховує.

Були проведені механічні випробування на одновісний розтяг зварних з'єднань, які успішно пройшли випробування. В таблиці 3.9 приведені результати механічних випробувань зразків зварних з'єднань ПЕ-63/ПЕ-63, ПЕ-63/ПЕ-80 та ПЕ-63/ПЕ-100, які перебували під дією факторів робочого середовища, а саме в землі та на поверхні ґрунту 1 та 2 роки відповідно. Видно, що найменшу механічну міцність мають зварні з'єднання ПЕ-63/ПЕ-80 незалежно від робочого середовища.

Таблиця 3.9 – Зміна механічної міцності зразків зварних з'єднань у часі

Зразок	ПЕ-63 1 рік / <b>2 роки</b>	ПЕ-80 1 рік / <b>2 роки</b>	ПЕ-100 1 рік / 2 роки
Земля			
ПЕ-63	19,38 / <b>19,68</b>	18,76 / <b>18,03</b>	19,69 / <b>18,79</b>
Повітря			
ПЕ-63	19,23 / <b>19,48</b>	17,84 / <b>16,5</b>	19,53 / <b>19,55</b>

Довготривалу зміну міцності та якості зварних з'єднань, які перебували у землі та на поверхні ґрунту важко передбачити, а методи їх прогнозування та розробка технології з підвищення якості таких типів

зварних з'єднань потребують додаткових міждисциплінарних науково-дослідних робіт.

Треба зазначити, що зварювання нагрітим інструментом, в тому числі і труб, є одним з найнадійніших способів зварювання та дозволяє забезпечити зварне з'єднання із значним запасом міцності до механічних навантажень. Тому для перевірки якості відповідальних зварних з'єднань, наприклад, при будівництві газопроводів, використовують гідравлічні методи випробувань на внутрішній тиск. Зазвичай неякісні зварні з'єднання, подібні до рис. 3.12 такі випробування не проходять.

### **3.5 Розробка методики короткострокового випробування зварних стикових з'єднань труб із різнотипних поліетиленів для оцінки їх довговічності.**

Існуючі методи тестування з оцінки міцності і довговічності виробів з поліетилену можуть бути класифіковані за схемою навантаження зразків при дослідженнях. Розрізняють випробування на постійне навантаження, релаксаційні випробування при постійній деформації та спеціальні випробування при навантаженні на режимах, що імітують напружено деформований стан під час експлуатації [117].

Основним експрес-методом контролю якості зварних стикових з'єднань (ЗСЗ) є випробування зразків-лопаток на осьовий розтяг. Критерієм для визначення якості ЗСЗ є характер руйнування зразка [118, 119].

Існує три типи руйнувань:

- тип 1 – спостерігається після формування "шийки" – типового звуження площі поперечного перерізу зразка при розтягуванні в одній з половин досліджуваного зразка. Руйнування настає, як правило, після досягнення 50% відносного подовження і характеризує високу пластичність. Лінія розриву проходить по основному матеріалу і не переходить зварного з'єднання.



- тип 11 – має місце при досягненні границі текучості на початку формування "шийки". Руйнування відбувається за невеликих значень величини подовження, як правило, не менше 20 і не більше ніж 50% та характеризує низьку пластичність. Лінія розриву перетинає зварне з'єднання, але руйнування носить в'язкий характер.

- тип 111 – відбувається до досягнення границі текучості і до початку утворення "шийки". Руйнування виникає, коли подовження зразка, зазвичай не більше 20%, і характеризується як крихке. Лінія розриву проходить крізь зварне з'єднання.

Результати випробувань вважаються позитивними, якщо при тестуванні на осьовий розтяг не менше як 80% зразків мають пластичний характер руйнування 1 типу, а решта 20% зразків може мати руйнування 11 типу. Руйнування типу 111 не допускається, оскільки воно свідчить про наявність прихованих дефектів у зварних з'єднаннях у формі подовжених або місцевих несплавлень і не характеризує матеріал з позицій зварюваності. З огляду на той факт, що руйнування зразків відбувається по основному матеріалу з утворенням шийки за механізмом примусової еластичності, цей метод фактично оцінює якість поліетилену і не дозволяє прогнозувати надійність ЗСЗ.

Порівняльну експериментальну оцінку довговічності (тривалої міцності) зразків-лопаток ЗСЗ та основного матеріалу труб з поліетиленів проводять за результатами випробувань на тривалий розтяг за підвищених температур у середовищі поверхнево-активної речовини (ПАР). Для проведення випробувань необхідно застосування спеціального стенду (рис. 3.27), який дозволяє створити та підтримувати у зразках постійну статичну силу розтягу протягом тривалого часу.

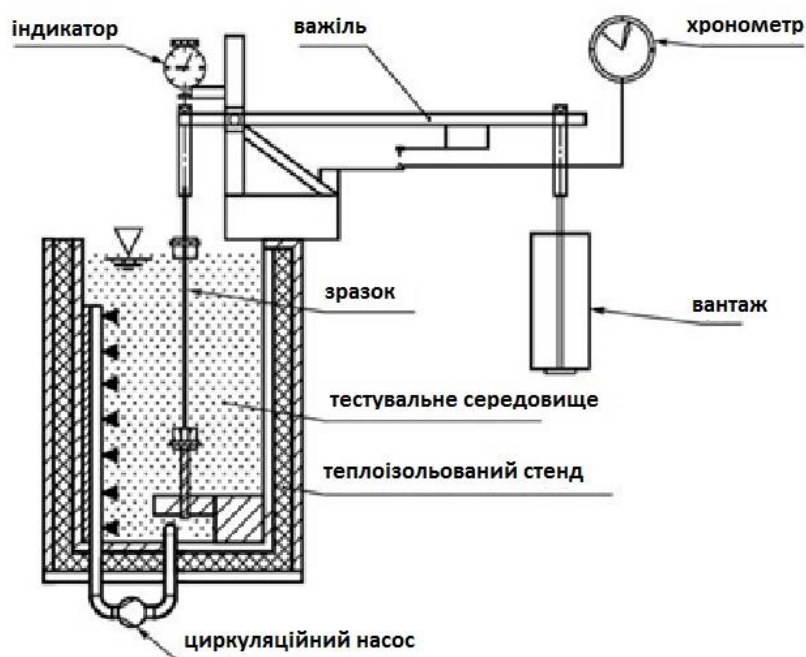
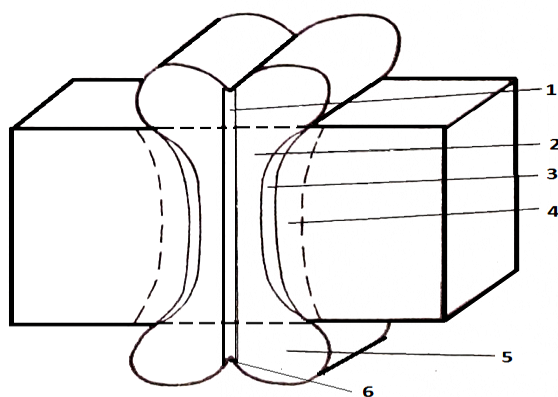


Рисунок 3.27 – Стенд для випробувань на повзучість при розтягуванні

Раніше було показано [120], що при випробуванні зварних зразків поліетиленів високої густини на повзучість, розтріскування відбувається в зоні термічного впливу при напруженнях не менше 4 МПа (рис. 3.28).



1 – зона сплавлення;

2 – сферолітна зона;

3 – зона біля межі проплавлення;

4 – зона термічного впливу (ЗТВ);

5 – грат;

6 – гратова западина [121]

Рисунок 3.28 – Основні зони ЗСЗ полімерів.

Методи випробувань при постійному тиску використовувались в процесі промислового освоєння поліетилену трубних марок з метою експрес оцінки повзучості трубних зразків в умовах складного напруженого стану [121].

Найпростішим способом створення постійної деформації є запресовка дорну в трубний зразок. Розмір дорну визначається обраною радіальною деформацією  $\varepsilon$ .

$$\varepsilon = \frac{D-d}{d} \geq \varepsilon_t \quad (5.13)$$

де  $D$  і  $d$  – відповідно зовнішній і внутрішній діаметри трубного зразку;  $\varepsilon_t$  – деформація, що відповідає ізотермічній межі текучості.

При цьому створення складного напруженого стану суттєво обмежує деформацію повзучості, що більшою мірою відповідає характеру роботи трубопроводу за умов експлуатації. Випробування базуються на основі характерної для поліетиленів схильності до релаксаційного руйнування.

При дослідженні процесу релаксації напружень зразок піддається деформації до заданого значення  $\varepsilon_0$ , після чого деформація залишається постійною, а напруження, які необхідні для підтримування цієї деформації, зменшуються з часом. Як результат визначається залежність напружень  $\sigma$  від часу  $t$  при  $\varepsilon_0 = \text{const}$  і оцінюється довговічність виробу [117].

Аналіз експериментальних результатів оцінки міцності зварних з'єднань в конструкціях з полімерних матеріалів продемонстрував, що створення концентрованої залишкової деформації повинно здійснюватися таким чином, щоб максимальні напруження були переважно зосереджені у зоні сплавлення зварного з'єднання. Ця умова може бути реалізована при використанні методу, описаного у міжнародному стандарті ISO 22088-4:2006 «Пластмаси. Визначення опору розтріскуванню під дією навколишнього середовища (ESC). Частина 4. Метод вдавлювання куль або штифтів». Суть методу полягає в тому, що постійна деформація створюється вдавлюванням загостреного циліндричного штифта в отвір меншого діаметру, що просвердлено у зразку певних розмірів. Рекомендований діаметр отвору – 3.0 мм, діаметри штифту – 3.2; 3.5; 4.0; 5.0; 6.0 мм.

Постійна деформація, що виникає при вдавлюванні штифту, приводить до зародження мікротріщин по периметру отвору, які з часом проростають до видимих величин. Для прискорення випробувань зразки занурюють у хімічне середовище і витримують при температурі 80-95 °С. Після певного часу вплив розтріскування визначається візуальним оглядом.

Аналіз розглянутих методик випробувань зразків дозволив рекомендувати до використання при оцінюванні довговічності ЗСЗ труб з ПЕ різних типів методику ISO 22088-4:2006. Слід зауважити, що метод розроблений для порівняльної оцінки опору розтріскуванню різних полімерних матеріалів і може бути використаний з метою одержання даних для корегування режимів зварювання та інженерних розрахунків довговічності зварних конструкцій. При цьому форма і розміри зразків для порівняльних випробувань повинні відповідати вимогам стандарту на матеріал або стандарту на метод випробування.

Дослідження виконувалися на трубах з поліетилену трубних марок ПЕ-63, ПЕ-80 та ПЕ-100, що зварені встик за традиційною технологією з одностороннім нагрівальним інструментом на промисловій установці для зварювання САТ-1 та витримані в робочому середовищі – повітрі або землі протягом 2 років. Основні технологічні параметри традиційного зварювального процесу: температура нагрівального інструменту – 210 °С, час прогрівання – 60 с, технологічна пауза – 3 с, тиск оплавлення, осадки і охолодження – 0,2 МПа, час охолодження під тиском – 600 с.

З кожного зварного з'єднання вирізані зразки у вигляді смуги завширшки 20 мм і завдовжки 120 мм з розташуванням зварного з'єднання у центрі. З боку зовнішнього грату у центрі гратової западини висвердлювався отвір діаметром 3 мм. Штифти з латуні виточувалися з каліброваних стрижнів діаметром 4,0; 5,0; 6,0 мм з утворенням паралельної частини довжиною 30... 50 мм і конусу (1:5) з утворенням вхідного діаметру 1...2 мм.

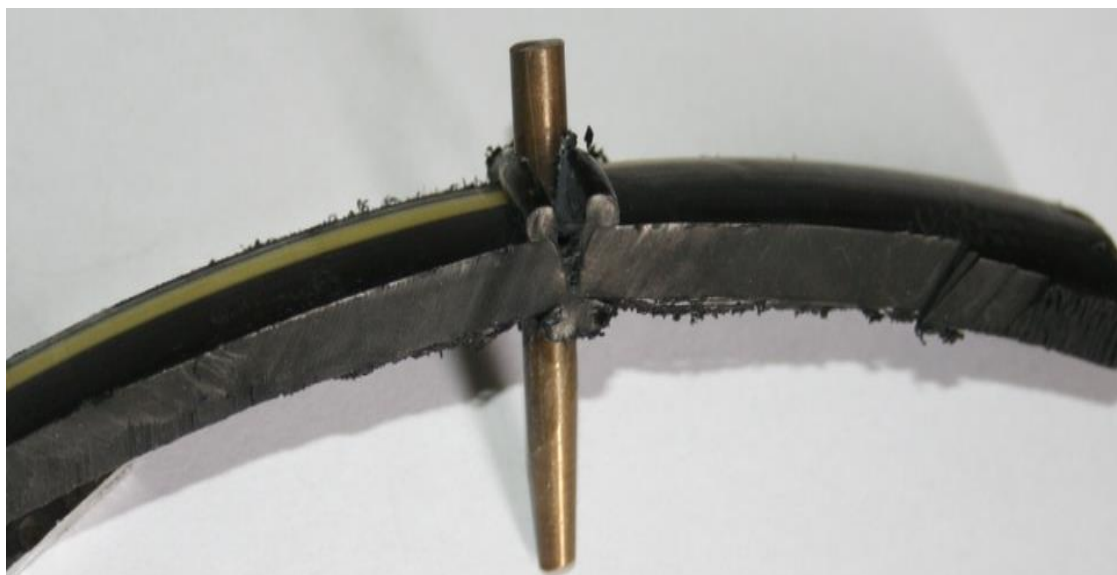


Рисунок 3.29 – Створення в ЗСЗ постійної деформації при вдавлюванні штифта в отвір

Вдавлювання штифтів в отвір зразка виконувалося за допомогою центратора (рис. 3.29) зварювальної установки. Попереднє змочування штифта обраною для випробувань рідиною не проводилося оскільки утворення граничного шару може порушити повторюваність результатів.

З огляду на те що, що при механічних випробуваннях зварених зразків не зареєстрований процес шийкоутворення, початкова деформація здійснювалася вдавлюванням штифта діаметром 4 мм. Через 1 годину після вдавлювання проводиться візуальний огляд і реєстрація тріщин по периметру отвору. За відсутності видимих тріщини деформування здійснювалося стрижнем діаметром 5 мм.

Як ємність для випробувань з адсорбційно активним середовищем (ААС) використовували ексікатор з притертою кришкою і кутовим термометром. Нагрівання ААС в ексікаторі здійснювалось у термошафі, що забезпечує постійність температури в інтервалі  $90 \pm 5$  °C (рис. 3.30).

Під час короткострокових випробувань відбувалося занурення зразків в ААС на час  $60 \pm 5$  хвилин. Потім зразки висувували на повітрі. При візуальному огляді (збільшення  $\times 5$ ) реєстрували стадію появи і повільного

розвитку тріщин.

Під час довгострокових випробувань зразки витримували в ААС при температурі  $90 \pm 5$  °С до повного руйнування при виході тріщини на бічну поверхню зразка.



Рисунок 3.30 – Проведення випробувань ЗСЗ при постійній деформації у ємності з ААС при температурі 95 °С

Як середовище для випробувань згідно рекомендацій використовували дистильовану воду з 2% ПАР ОП-10. В процесі випробувань була проведена фіксація напрямку розвитку тріщин і час до руйнування зразка. Експериментальні результати випробувань наведені у таблиці 3.10.

У роботі [48] наведено результати довгострокових випробувань ЗСЗ в режимі квазікрихкого розтріскування.

Як стверджується, крихке руйнування якісних ЗСЗ під час довгострокових випробувань (а також при експлуатації) залишає неушкодженою площину зварювання і відбувається у вигляді зростання підгратових тріщин.

Таблиця 3.10 – Результати випробувань зразків ЗСЗ поліетиленових труб різних типів при дії постійної деформації в ААС

З'єднання поліетиленових труб у різному поєднанні		Реєстрація довжини тріщини, мм				Час до руйнування з виходом тріщини на бічну поверхню, години	
		Після початкового деформування штифтом		Після короткострокових випробувань у ПАР			
		Ø4,0*	Ø5,0*	Ø4,0	Ø5,0	Ø5,0	Ø6,0
1	2	3	4	5	6	7	8
ПЕ-63 + ПЕ-63	П**	2	–	5	–	14	–
	З**	0	3	–	5	18	–
ПЕ-63 + ПЕ-80	П	0	2	0	3	17	–
	З	0	2	0	3	18	–
ПЕ-63 + ПЕ-100	П	0	0	0	0	–	30
	З	0	0	0	0	–	30
ПЕ-80 + ПЕ-80	П	0	0	0	0	–	50
	З	0	0	0	0	–	50
ПЕ-100 + ПЕ-100	П	0	0	0	0	Руйнування відсутнє	
	З	0	0	0	0		

\* – діаметр штифта; \*\* – середовище зберігання (П – повітря, З – земля)

Зародження підгратових тріщин відбувається в зоні межі проплавлення полімеру завдяки параболічній формі межі розплаву. Робота [120] присвячена пластмасографічному дослідженню структури основних зон ЗСЗ, механізму їх утворення, а також розглядає вплив структури цих зон на якість ЗСЗ. Підтверджені випадки зародження та поширення підгратових тріщин під час механічних випробувань ЗСЗ в умовах дії ПАР. Передбачається, що це пов'язано з наявністю в зоні 3 (рис. 3.29) значних залишкових напружень, що виникли при зварюванні, і які не можуть релаксувати, як це відбувається у сферолітній зоні. Це припущення підтверджує можливість впливу зварювальних параметрів процесу на якість ЗСЗ.

Основним недоліком методики тривалих випробувань при постійному навантаженні (рис. 3.27) є деформування зразка не миттєво, оскільки напруження встигають частково релаксувати за час навантаження. При цьому змінюється швидкість релаксації напружень [122]. В процесі випробувань миттєво створити деформацію практично неможливо, однак вдавлення штифта в отвір максимально відповідає цій вимозі.

Створення постійної деформації змінює хід процесу зародження та поширення тріщин в ЗСЗ. Під час початкового деформування і короткострокового випробування ЗСЗ мікротріщини з'являються в гратовій западині зварного з'єднання (рис. 3.31).

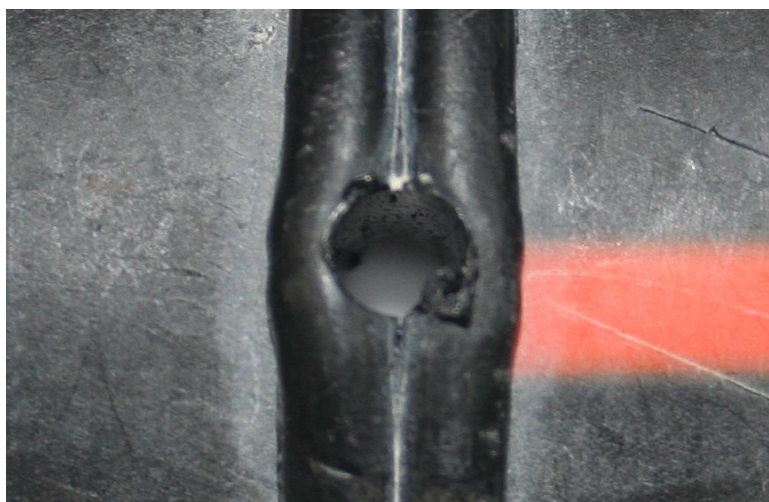


Рисунок 3.31– Зародження мікротріщини у гратовій западині після не тривалих випробувань у ПАР



Як показали експериментальні дослідження в ЗСЗ ПЕ-63/ПЕ-80 для виникнення тріщини ступінь деформації повинен збільшуватись. В ЗСЗ ПЕ-63/ПЕ-100 утворення тріщини відбувається під гратом і проявляється при виході на бічну поверхню (рис. 3.32). В ЗСЗ ПЕ-63/ПЕ-63 макротріщина формується в зоні зварного з'єднання і переходить через сферолітну зону 2 у зони 3 і 4 (рис. 3.28).

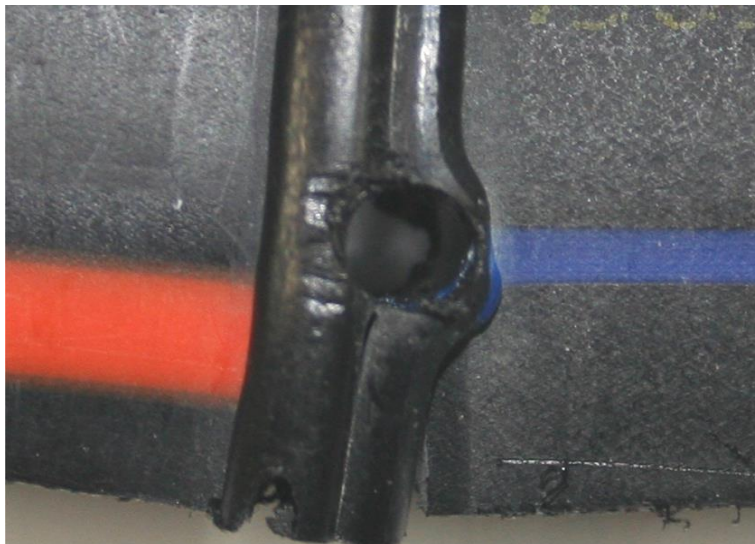


Рисунок 3.32 – Утворення підгратових тріщин у ПЕ-63

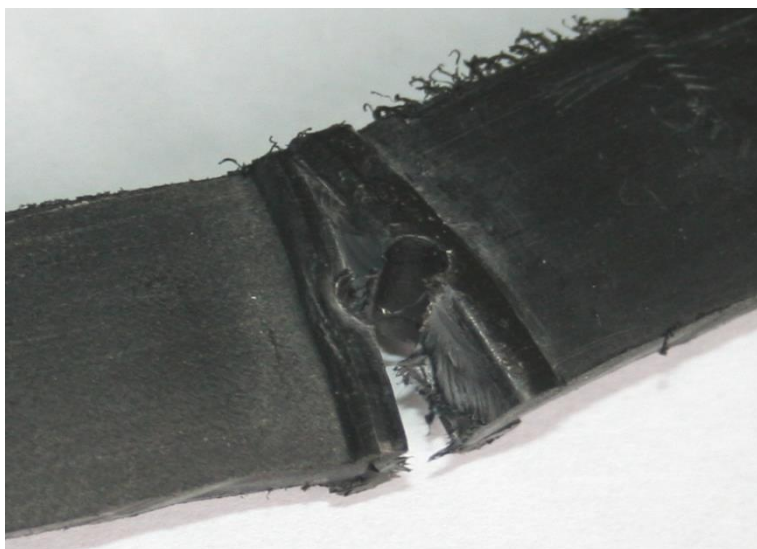


Рисунок 3.33 – Макротріщина у ЗСЗ ПЕ-63/ПЕ-63

В ЗСЗ ПЕ-63/ПЕ-80 і ПЕ-63/ПЕ-100 тріщини утворюються по ПЕ-63 від зовнішнього і внутрішнього гратів і розгалужуються як у зону термічного впливу, так і в зону поблизу межі проплавлення (рис. 3.34).

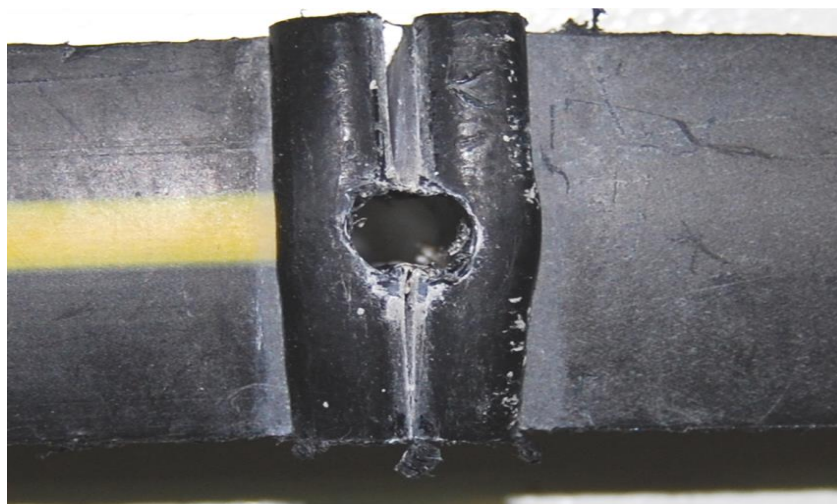


Рисунок 3.34 – Макротріщина у ЗСЗ ПЕ-63/ПЕ-80

Оцінку впливу технологічних режимів зварювання на якість ЗСЗ проводили шляхом зварювання труб ПЕ-63/ПЕ-80 на установці САТ-1 з використанням двозонного нагрівального інструменту. Встановлено, що в одержаних з використанням однозонного нагрівального інструменту ЗСЗ тріщини зароджуються у гратовій западині і їх довжина досягає значень 7-8 мм при деформуванні штифтом 4 мм. В процесі тривалих випробувань під дією постійної деформації у ПАР за температури 95 °С тріщини проросли на всю ширину зразка. Руйнування відбулося по ПЕ-63 у зоні біля межі проплавлення після 13 годин випробувань (рис. 3.35).

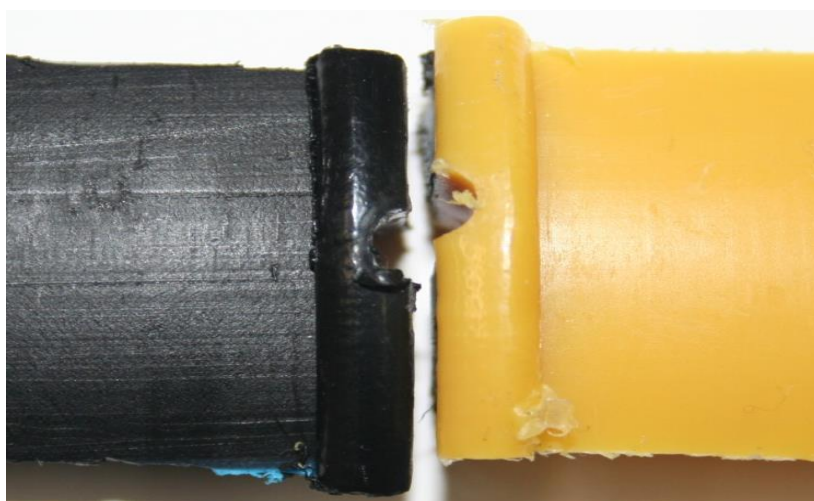


Рисунок 3.35 – Руйнування ЗСЗ ПЕ-63/ПЕ-80 після 13 годин випробувань у ПАР за температури 95 °С при використанні однозонного нагрівального інструменту

У ЗСЗ, що зварені з використанням двозонного нагрівального інструменту, мікротріщини зароджувались у ґратовій западині і поширювались у тіло зразка ПЕ-63 по лінії сплавлення з виходом у зоні термічного впливу (рис. 3.36). Руйнування з виходом макротріщини на бічну поверхню відбулося після 25 годин випробувань у ПАР за температури 95 °С.

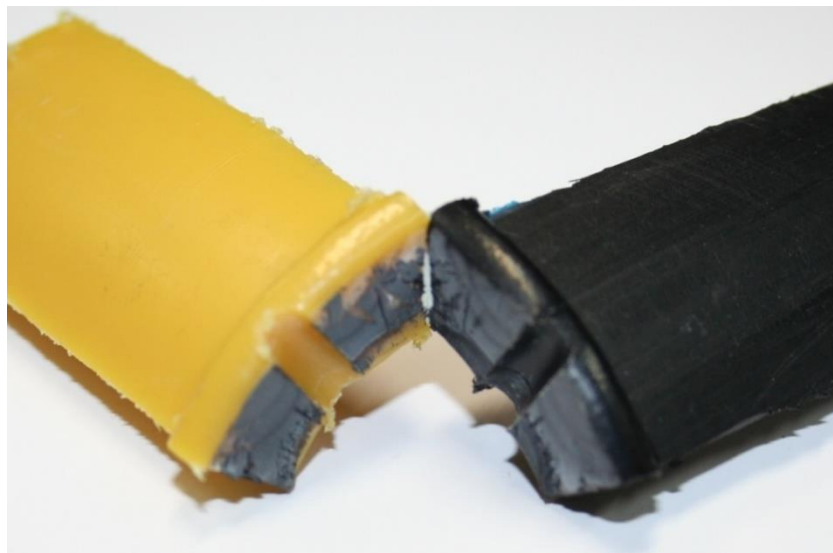


Рисунок 3.36 – Руйнування ЗСЗ ПЕ-63/ПЕ-80 після 25 годин випробувань у ПАР за температури 95 °С при використанні двозонного нагрівального інструменту

При дослідженні структури мікротріщин і характеру руйнування ЗСЗ у процесі релаксаційних випробувань при постійній деформації у ААС використовувались два способи:

1. Метод оптичної мікроскопії з реєстрацією як повільних, так і швидких стадій утворення і розвитку тріщин;
2. Метод фрактографії з наступним дослідженням методом оптичної мікроскопії.

Для пояснення характеру процесів тріщиноутворення в роботі використано теорію про двоступеневий хід руйнування – на початку процесу формування тріщини з «тяжами», що складаються з мікрофібрил, а потім за рахунок послідовного розриву та розшарування (рис. 3.37) [123].

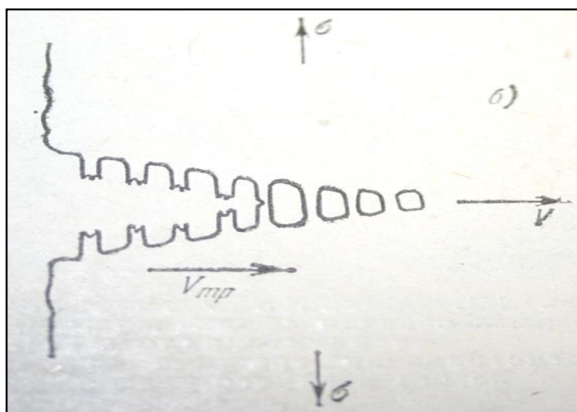
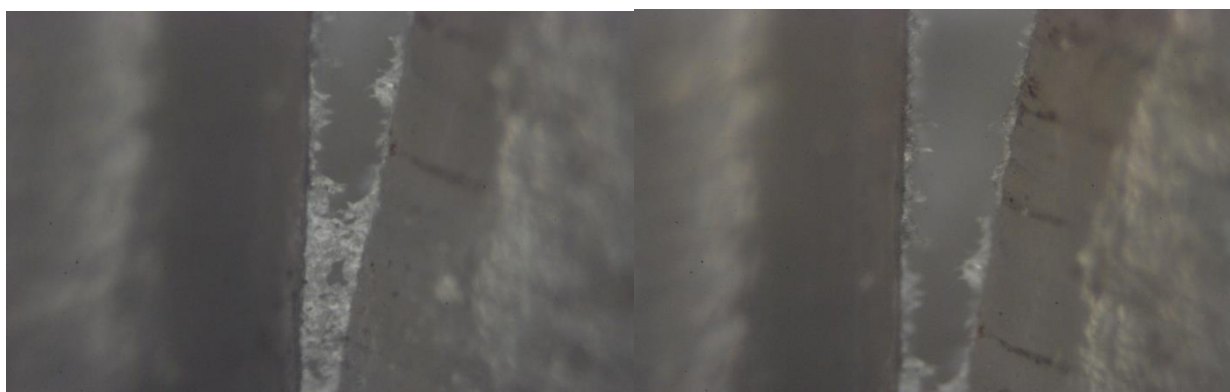


Рисунок 3.37 – Схема будови і проростання мікроскопічної тріщини у навантажених полімерах [123]

На рис. 3.38 показана тріщина у ЗСЗ ПЕ-63 після проходження не тривалих випробувань у ПАР. У гирлі тріщини спостерігаються мікрофібрили у стані перед руйнування. Ці тріщинки зростають назустріч макротріщині, і їх злиття приводить до появи характерних поверхонь, подібних до конусів. На рис. 3.39 наведено зруйновані поверхні ПЕ-63 до і після травлення.

Одержані результати підтверджують той факт, що релаксацийне руйнування полімерів відбувається при зародженні і розвитку локалізованих зон пластичності під дією механічних навантажень. Ці локалізовані зони (крейзи) зароджуються на хаотично розташованих у об'ємі дефектах, включеннях тощо.



а)

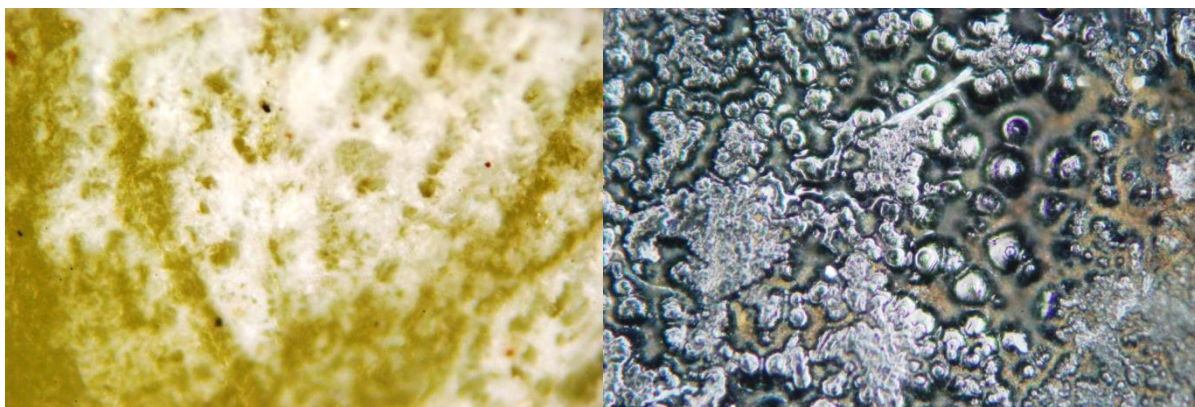
б)

а) зона розширення з тяжами;

б) тріщина після розриву тяжей

Рисунок 3.38 – Тріщина у ЗСЗ ПЕ-63 після не тривалих випробувань у ПАР.





а)

б)

а) до травлення;

б) після травлення

Рисунок 3.39 – Поверхні руйнування ЗСЗ ПЕ-63.

Розроблена методика дозволяє оцінювати якість ЗСЗ труб з ПЕ різних трубних марок, може бути рекомендована для оптимізації режимів зварювання нагрітим інструментом при виконанні ремонтних робіт на трубопроводах з пластмас.

### ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 3

1. В роботі на основі попередніх досліджень розроблена методика розрахунку термічних процесів при зварюванні нагрітим інструментом встик полімерних труб з різнотипних поліетиленів. Отримані результати математичних розрахунків температурних полів при зварюванні поліетиленових труб з ПЕ-63 та ПЕ-80. Розраховано час вирівнювання температури і кінетику в зоні розплаву в залежності від часу нагріву.

2. Запропоновано адаптований метод Тагучі для прогнозування оптимальних значень параметрів процесу зварювання нагрітим інструментом встик труб з пластмас для отримання якісних зварних з'єднань при зменшенні часу, кількості та собівартості експериментів.

3. Проведено експериментальні роботи по зварюванню зразків труб з різнотипних поліетиленів ПЕ-63, ПЕ-80 та ПЕ-100. Дослідні зразки зварних з'єднань труб з різнотипних технічних поліетиленів розміщено у підземній та наземній зонах робочого середовища на довготривалий час для забезпечення впливу на них кліматичних факторів.

4. Проведено морфологічні дослідження отриманих зварних з'єднань. Виявлено, що за характером зварного ґрату та наявністю лінії розділу у площині зварювання зварні з'єднання труб з різнотипних поліетиленів вони не відповідають умовам діючих норм.

5. Методами рентгеноструктурного та термомеханічного аналізу показано, що з часом зварні з'єднання з різнотипних поліетиленів зазнають структурних змін, що спричинює зміни їх термомеханічних та експлуатаційних властивостей. Виявлено, що найбільших змін в структурі та термомеханічних властивостях зазнають зварні з'єднання ПЕ-63/ПЕ-100, при цьому найбільші зміни в механічній міцності характерні для зварних з'єднань ПЕ-63/ПЕ-80.

6. Проведено комплексні дослідження теплофізичних властивостей технічних поліетиленів різних марок, а саме ПЕ-63, з якого довготривалий час виготовляли труби для будівництва газо- та водопроводів, та ПЕ-80 і ПЕ-100,

які виробляють та використовуються сьогодні. Виявлено суттєві для процесу зварювання відмінності у їх теплофізичних характеристиках, які мають бути враховані при ремонті полімерних трубопроводів.

7. Встановлено, що при зварюванні різнотипних поліетиленів за традиційною технологією має місце різниця розмірів зварного грату, яка не допускається згідно діючих нормативних документів. На основі результатів проведених досліджень встановлено, що дана поведінка зумовлена різними теплофізичними характеристиками матеріалів.

8. За результатами досліджень зроблено висновок, що для забезпечення гарантованої якості зварних з'єднань труб із різнотипних поліетиленів та подовження терміну експлуатації трубопроводів з них традиційний спосіб їх зварювання нагрітим інструментом потребує модернізації з розробкою підходів, які б враховували особливості теплофізичних властивостей самих полімерних матеріалів.

9. Для визначення довговічності зварних з'єднань труб із різнотипних поліетиленів розроблено методику їх випробувань на ріст тріщин під дією постійного навантаження в ПАР. Розроблена методика може бути рекомендована для оптимізації режимів зварювання полімерів різних типів.

## РОЗДІЛ 4

### РОЗРОБКА ТА ВИПРОБУВАННЯ ДВОЗОННОГО НАГРІВАЛЬНОГО ІНСТРУМЕНТУ

#### **4.1 Математичне моделювання температурних полів при тепловому зварюванні двозонним нагрівальним інструментом труб із різнотипних поліетиленів.**

На практиці іноді виникає необхідність зварювати поліетиленові труби з різними фізико-механічними характеристиками. Тому використання традиційного нагрівального інструменту, що має однакову температуру робочих поверхонь, призводить до різного ступеня розігріву кожної з труб. При цьому недостатній нагрів або перегрів матеріалу деталей, що зварюються, тобто різний ступінь активації поверхонь нагріву, погіршує якість зварного з'єднання.

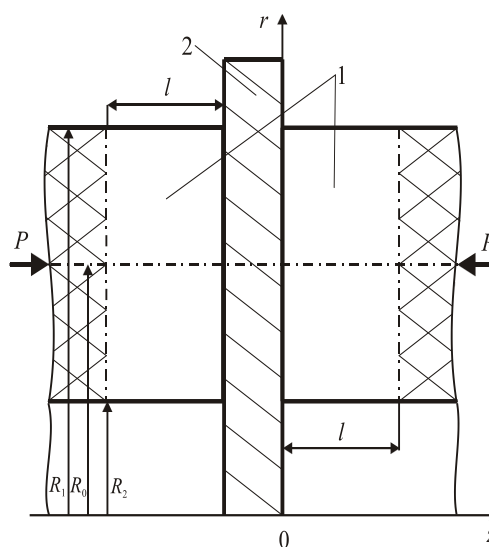
В попередньому розділі наведені причини, що викликають різницю в розмірі зварного грату, серед яких, в тому числі, різниця в теплофізичних характеристиках матеріалів. З метою усунення різниці в розмірі валиків зварного грату, вирішено розробити двозонний нагрівальний інструмент, який дозволить як уникнути цієї різниці, так і покращити якісні характеристики стикового зварного з'єднання різнотипних поліетиленів.

В даному розділі розглядається математична модель теплового процесу зварювання полімерних труб нагрівачем, що розділений на дві окремі секції, що дозволяє забезпечити різну інтенсивність нагріву торців кожної з труб, що зварюються. Головна ідея термічного циклу зварювання різнорідних труб полягає у тому, що кожна з секцій інструменту створює такий тепловий потік крізь торці труб, який забезпечує розплавлення однакового об'єму матеріалу, необхідного для формування симетричного грату у зварному з'єднанні.

Технологічна схема зварювання полімерних труб нагрітим інструментом показана на рис. 4.1.



Технологічний процес стикового зварювання нагрітим інструментом труб із термопластів складається з двох основних етапів – оплавлення торців та осадження. Кожен з цих етапів процесу характеризується окремим характером тепломасопереносу та напружено-деформованого стану, які в значній мірі визначають якість зварного з'єднання. Рішення цих задач дозволить перейти до визначення раціональних режимів зварювання труб із термопластів.

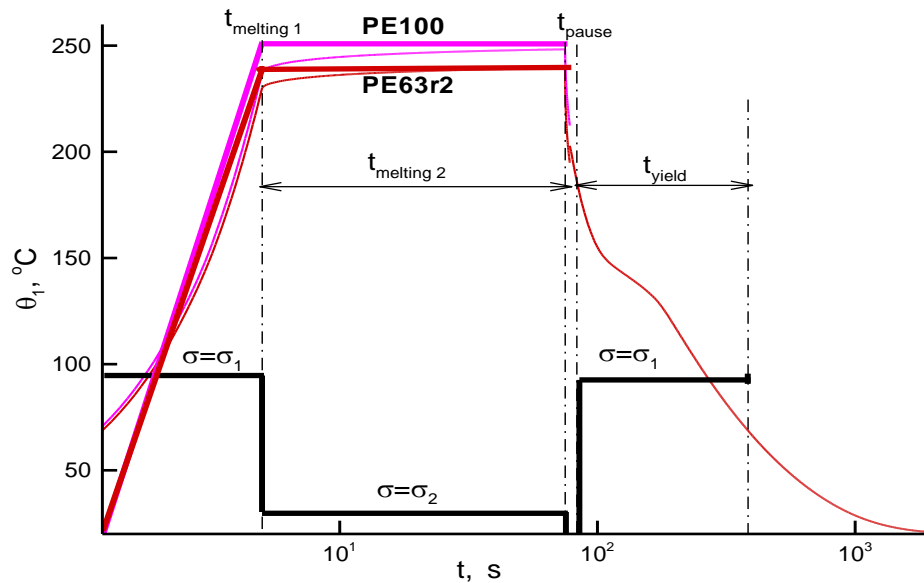


1 – труби, що зварюються;

2 – двозонний нагрівальний інструмент

Рисунок 4.1 – Схема процесу зварювання поліетиленових труб.

Рис. 4.2 ілюструє тривалість основних етапів осьового підтискання труб в процесі термічного циклу.



товсті червона та рожева лінії – температура нагрівача;

товста чорна лінія – тиск на торці;

червона та рожева тонкі лінії – температура середніх точок торців на етапах прогріву та осадження

Рисунок 4.2 – Режим зварювання.

При математичному моделюванні термомеханічних процесів при зварюванні полімерних труб в циліндричній системі координат  $Orz\varphi$  постановка задачі про вісесиметричний квазістатичний термомеханічний стан труб при зварюванні включає наступні співвідношення [106, 109]:

рівняння рівноваги

$$\frac{\partial \sigma_{rr}}{\partial r} + \frac{1}{r}(\sigma_{rr} - \sigma_{\varphi\varphi}) + \frac{\partial \sigma_{rz}}{\partial z} = 0 \quad (4.1)$$

$$\frac{\partial \sigma_{rz}}{\partial r} + \frac{1}{r}\sigma_{rz} + \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z} = 0$$

рівняння теплопровідності

$$c(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[ \lambda(\theta) r \frac{\partial \theta}{\partial r} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[ \lambda(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial z} \right] \quad (4.2)$$

$$\theta = \theta_0 \text{ при } t = t_0$$

кінематичні рівняння

$$\varepsilon_{rr} = \frac{\partial u_r}{\partial r}, \quad \varepsilon_{zz} = \frac{\partial u_z}{\partial z}, \quad \varepsilon_{\varphi\varphi} = \frac{1}{r} u_r, \quad \varepsilon_{rz} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_z}{\partial r} + \frac{\partial u_r}{\partial z} \right) \quad (4.3)$$

визначальні (реологічні) рівняння

$$s_{ij} = 2G(e_{ij} - e_{ij}^v) \quad (4.4)$$

$$\sigma_{kk} = 3K(\varepsilon_{kk} - 3\alpha(\theta - \theta_0)) \quad (4.5)$$

$$\dot{e}_{ij} = s_{ij} / 2\eta, \quad i, j, k \leftrightarrow r, z, \varphi \quad (4.6)$$

де  $G$  та  $K$  - модулі зсуву та об'ємного стискання,  $\eta$  - кінематична в'язкість, причому:

$$G = G(\theta), \quad K = K(\theta), \quad \eta = \eta(\theta, \gamma) \quad (4.7)$$

$\gamma$  - інтенсивність швидкості деформації зсуву,  $\gamma = [(\dot{\gamma}_{ij}\dot{\gamma}_{ij})/2]^{1/2}$ ;  $\dot{\gamma}_{ij} = \dot{e}_{ij}/2$ ;

$u_i, \varepsilon_{ij}, \sigma_{ij}$  - компоненти вектору переміщень, тензорів деформації та напруження,  $s_{ij}, e_{ij}$  - компоненти девіаторів тензорів напружень та деформацій,

$s_{ij} = \sigma_{ij} - \frac{1}{3}\sigma_{kk}\delta_{ij}$ ,  $e_{ij} = \varepsilon_{ij} - \frac{1}{3}\varepsilon_{kk}\delta_{ij}$ ,  $\delta_{ij}$  - символ Кронекера;  $c(\theta), \lambda(\theta)$  - коефіцієнти об'ємної теплоємності і теплопровідності;  $\alpha(\theta)$  - коефіцієнт лінійного теплового розширення;  $\theta_0$  - відрахункова температура.

Внутрішня та зовнішня бокові поверхні труби  $r_1 \leq r \leq r_2, 0 \leq z \leq l$  вільні від навантаження та обмінюються теплом з навколишнім середовищем з температурою  $\theta_0$  по закону Ньютона. Навантаження та температура на торцях труби змінюються у відповідності до режиму зварювання.

Теплофізичні характеристики матеріалів, приведені в роботах [107, 108, 124] та представлені нарис. 4.3.

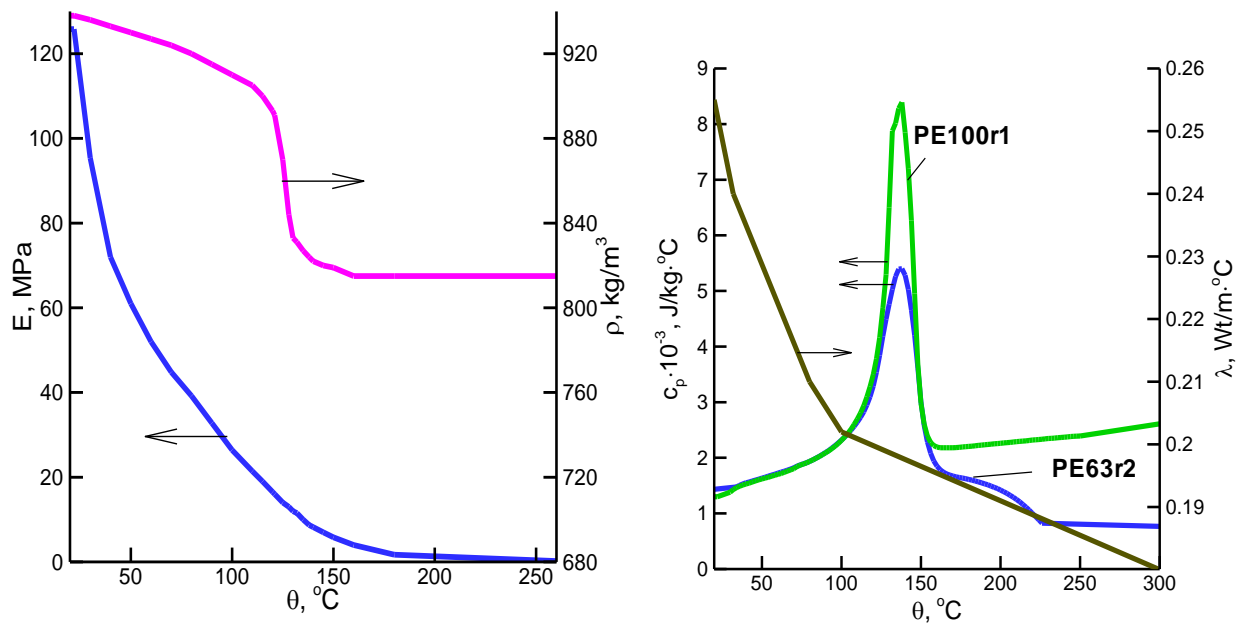


Рисунок 4.3 – Фізико-механічні властивості поліетиленів ПЕ-100 та ПЕ-63

Задача про термодинамічний стан деталей при зварюванні вирішується чисельно за допомогою методу кінцевих елементів. Використовується підхід, викладений у роботі [107]. Лагранжеве варіаційне формулювання задачі для вісесиметричного стану в циліндричній системі координат  $\theta r z \varphi$  має вигляд:

$$\delta I = \int_F [\bar{\lambda} \left( \frac{\partial \theta}{\partial r} \delta \left( \frac{\partial \theta}{\partial r} \right) + \frac{\partial \theta}{\partial z} \delta \left( \frac{\partial \theta}{\partial z} \right) \right) + (\bar{c}_v \dot{\theta} - Q) \delta \theta] r dr dz + \int_S (-q + \gamma(\theta - \theta_c) + c_0 c(\theta^4 - \theta_c^4)) \delta \theta r dS = 0 \quad (4.8)$$

$$\delta \Phi = \int_F (\sigma_{rr} \delta \varepsilon_{rr} + \sigma_{zz} \delta \varepsilon_{zz} + \sigma_{\phi\phi} \delta \varepsilon_{\phi\phi} + 2\sigma_{rz} \varepsilon_{rz}) r dr dz - \int_S (t_{nr} \delta u_r + t_{nz} \delta u_z) r dS = 0 \quad (4.9)$$

де  $\delta I$  – варіація функціоналу для задачі теплопровідності,

$\delta \Phi$  – варіація функціоналі для задачі механічної рівноваги,

$t_{nr}$  та  $t_{nz}$  – компоненти вектора напружень на контурі,  $t_{ni} = \sigma_{ij} n_j$ ,

$u_r, u_z$  – радіальна та осьова компоненти вектора переміщень.

Компоненти напружень в (4.9) визначаються рівняннями (4.4) та (4.5). Інтегрування ведеться за площею меридіонального перерізу  $F$  та його контуру  $S$ .

Для розв'язання варіаційної задачі з метою підвищення ефективності обчислення, а також для більш точного опису криволінійних меж тіла

застосовується восьмивузловий ізопараметричний чотирикутний елемент (рис. 4.4). З точки зору точності та витрат машинного часу цей кінцевий елемент є найбільш ефективним.

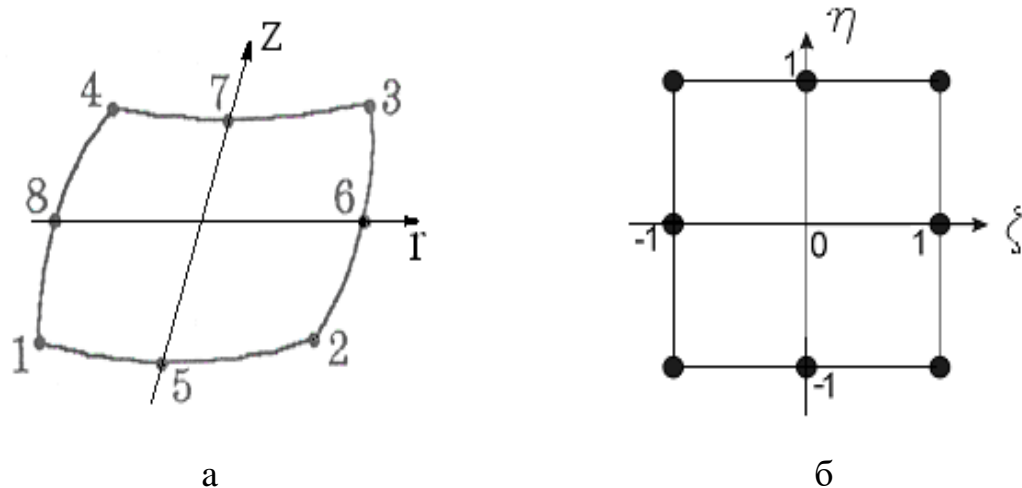


Рисунок 4.4 – Восьмивузловий ізопараметричний чотирикутний елемент в системі координат  $\{r, z\}$  (а) та системі  $\{\xi, \eta\}$  (б): 1÷8 вузли

Такий вибір вузлових точок дозволяє апроксимувати конфігурацію тіла та невідомі функції в кожному кінцевому елементі поліномами другого ступеня, що забезпечує сумісність криволінійних ізопараметричних елементів, тобто безперервність на межах між суміжними елементами.

Із умови стаціонарності функціоналу  $\delta\Phi = 0$  вузлові значення компонент вектору переміщення отримуємо із розв'язання системи лінійних алгебраїчних рівнянь. Отримана система рівнянь вирішується за допомогою методу Гауса, у підсумку визначаються компоненти вектору переміщення у вузлах кінцево-елементної сітки. За винайденими значеннями переміщень визначаються компоненти тензора деформацій. Потім по відомих деформаціям обчислюються  $\varepsilon_{ij}$  напруження за рівняннями закону Гука (4.4) та (4.5).

Із умови стаціонарності функціоналу  $\delta I = 0$  для визначення вузлових значень температури  $\theta_i$  отримуємо систему лінійних диференціальних рівнянь першого порядку за часом. Їх точність залежить від кількості кінцевих елементів. Необхідна щільність сітки елементів визначається спрощеним

способом, шляхом розв'язання однієї і тієї ж задачі при різній кількості кінцевих елементів та співставленням результатів.

Вибір параметрів режиму при використанні двозонного нагрівального інструменту залежить від фізико-механічних характеристик матеріалів труб, що зварюються, різниці їх теплових параметрів. Торці обох деталей повинні піддаватись такій дії нагрівального інструменту, яка забезпечує приблизно однаковий об'єм розплаву полімеру, що сформує симетричний грат.

Розрахуємо об'єм  $V_{\bar{a}\bar{b}}$  матеріалу однієї з труб, що витискається на внутрішню та зовнішню поверхні труби. Припускаємо, що перерізи цих частин грату однакові та мають форму кола радіусом  $R_{\bar{a}\bar{b}}$ . У підсумку маємо:

$$V_{\bar{a}\bar{b}} = V_{\bar{a}\bar{c}} + V_{\bar{a}\bar{d}} = 2\pi^2 R_{\bar{a}\bar{b}}^2 (R_{\bar{c}} + R_{\bar{d}}) \quad (4.10)$$

де  $R_{\bar{c}}$  та  $R_{\bar{d}}$  – зовнішній та внутрішній радіуси труби,  $V_{\bar{a}\bar{c}}$  та  $V_{\bar{a}\bar{d}}$  – об'єми матеріалу, що витискаються з іншої сторони для такого самого за величиною об'єму, що розташований в нагрітій частині торця та витискається в грат

$$V_{\bar{a}\bar{b}} = \pi(R_{\bar{c}}^2 - R_{\bar{d}}^2)\Delta z \quad (4.11)$$

де  $\Delta z$  – глибина проплавлення труб з торця.

З урахуванням рівнянь (2.10) та (2.11) маємо для параметру  $\Delta z$

$$\Delta z = \frac{2\pi R_{\bar{a}\bar{b}}^2}{R_{\bar{c}} - R_{\bar{d}}} = \frac{2\pi R_{\bar{a}\bar{b}}^2}{h} \quad (4.12)$$

де  $h$  – товщина труб.

Оскільки в напівкристалічних полімерів немає різкої межі твердої та рідкої фаз, величина  $\Delta z$  визначається умовно заданою температурою розплаву, яка приймається рівною температурі максимуму теплоємності.

При визначенні межі тверде тіло – розплав приймаємо, що в стані розплаву перебуває область, у якій  $\theta > \theta_{i\bar{e}}$ . Для матеріалів, що моделюються ПЕ-63 та ПЕ-100 маємо  $\theta_{i\bar{e}} = 138^\circ \text{C}$ .

Приймалися наступні значення параметрів циклу зварювання, показані на рис. 4.2:

1. попередній прогрів.....  $t_{melt1} = 5\tilde{n}$ ;

2. основний прогрів..... $t_{melt1} = 70\tilde{n}$ ;
3. час паузи..... $t_{pause} = 3\tilde{n}$ ;
4. час охолодження..... $t_{pause} = 300\tilde{n}$ .

Для радіусу ґрату  $R_{\omega} = 1.5\tilde{i} \tilde{i}$ , відповідно (2.12), маємо  $\Delta z = 2.3\tilde{i} \tilde{i}$ . Отже, із умови рівності об'ємів матеріалу, що витискаються в ґрат, маємо для ПЕ-63 та ПЕ-100 ізолінія при  $\theta_{ie} = 138^{\circ}C$  повинна бути розташована на однаковій відстані  $\Delta z = 2.3\tilde{i} \tilde{i}$  від торців. Тому режим зварювання на рис. 4.5 конкретизується наступним чином: температури секцій  $\theta_1$  та  $\theta_2$  повинні бути обрані такими, щоб забезпечити у момент часу  $t = t_{melt1} + t_{melt2} + t_{pauz}$  приведенне вище розташування ізоTERM в обох трубах.

У випадку, якщо властивості матеріалу не залежать від температури, задача є лінійною та може бути вирішена аналітично [122]. У нашому випадку задача суттєво нелінійна та може бути вирішена тільки чисельним методом.

Алгоритм розв'язання задачі наступний. На першому етапі вирішуються задачі для кожної з труб та підбираються температури секцій, необхідні для забезпечення вказаного вище розташування ізоTERM  $\theta_{ie} = 138^{\circ}C$ . Після цього труби осаджуються та охолоджуються.

У підсумку підбору для завданого часу нагріву визначаємо  $\theta_{100r1} = 250^{\circ}C$  та  $\theta_{63r2} = 241^{\circ}C$ .

Кінцево-елементна розбивка області контакту торців поліетиленових труб з нагрітим інструментом представлена на рис. 4.5.

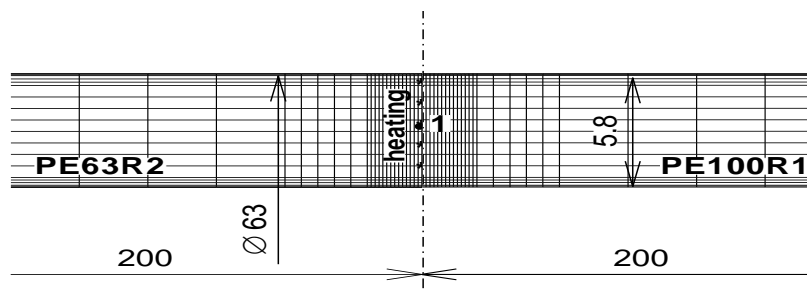


Рисунок 4.5 – Схема зварювання труб. Кінцево-елементна розбивка області

Результати розрахунку теплового процесу стикового зварювання поліетиленових труб нагрітим інструментом при зазначених параметрах приведені на рис. 4.6.

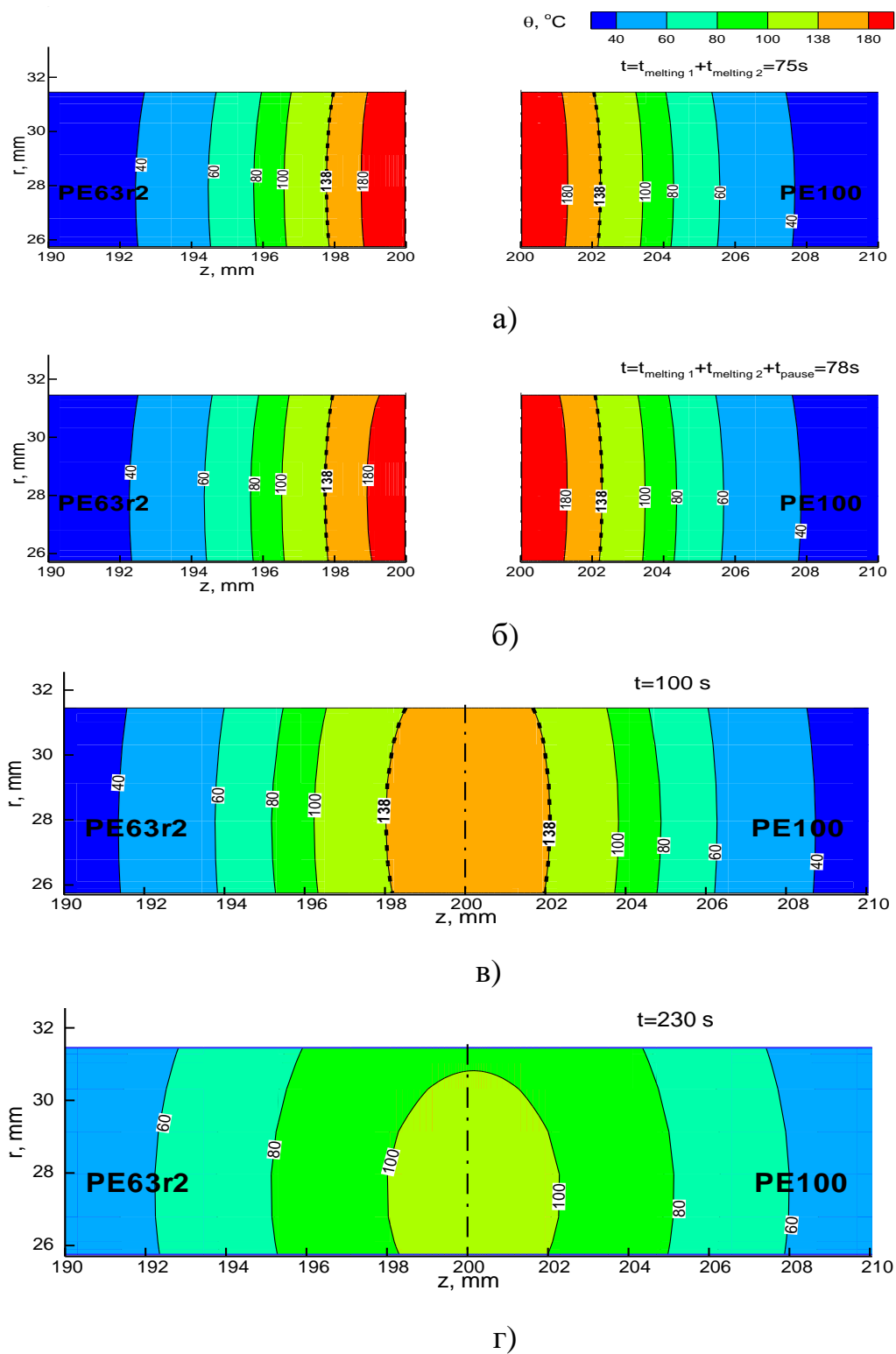


Рисунок 4.6 – Ізолінії температурного поля в різні моменти часу



На рис. 4.6, а показані ізолінії температурного поля в момент початку паузи  $t = 75$ с, на рис. 4.6, б – в момент стиковки та початку осадження труб, на рис. 4.6, в – в середині процесу охолодження, рис 4.6, г – кінець процесу зварювання. Видно, що в трубі із ПЕ-63 температура торця менша, ніж у трубі з ПЕ-100 через різну температуру робочих поверхонь нагрівача. Тим не менше, ізолінія  $\theta_{r\vartheta} = 138^\circ\text{C}$  знаходиться на однаковій відстані  $\Delta z = 2.3\text{ м}$  від торця у обох трубах.

Вирівнювання температури в середній бічній поверхні труби показано на рис. 4.7.

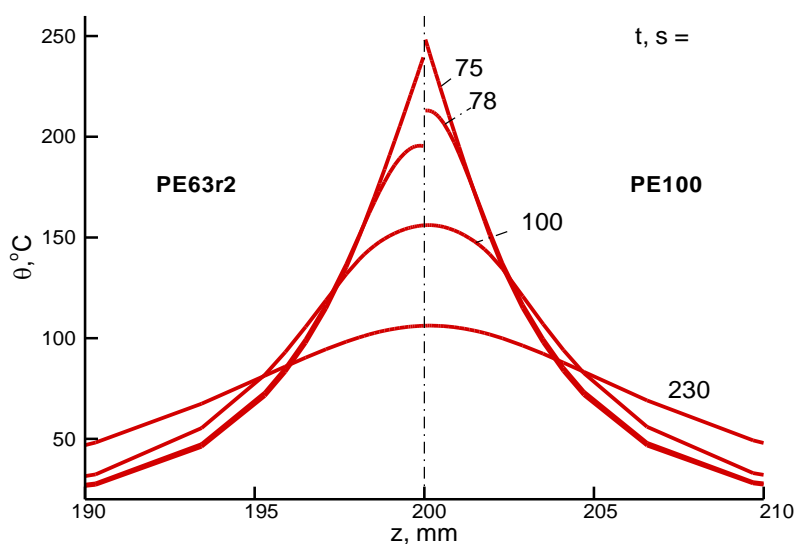


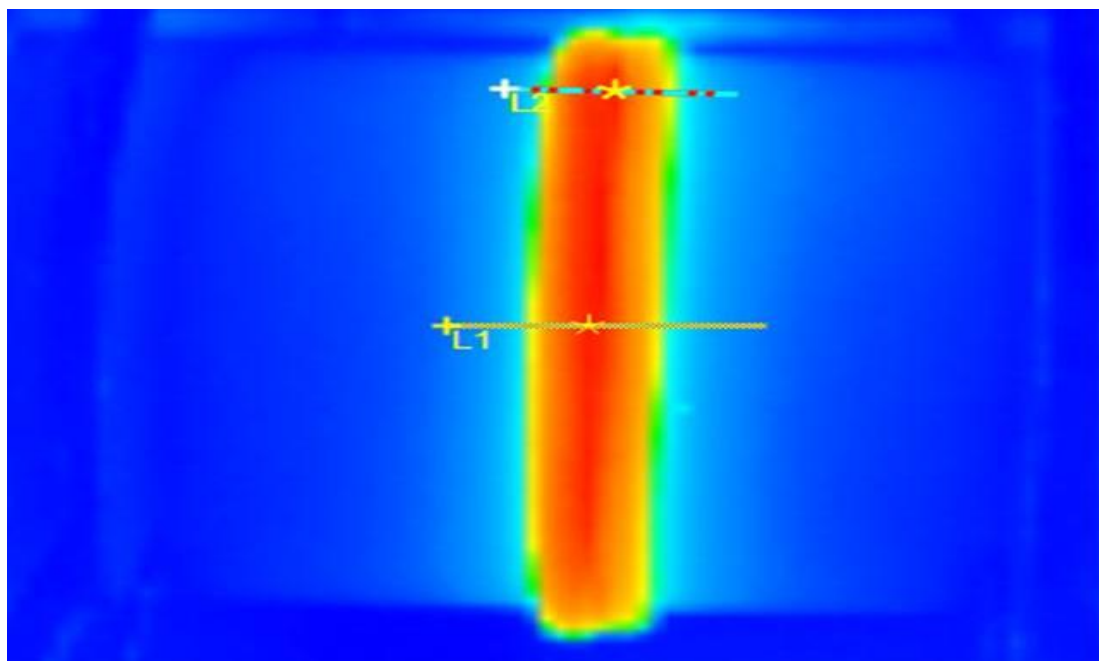
Рисунок 4.7 – Розподіл температури по осі  $z$  вздовж серединної лінії

$$r = (r_1 + r_2) / 2 \text{ для різних моментів часу}$$

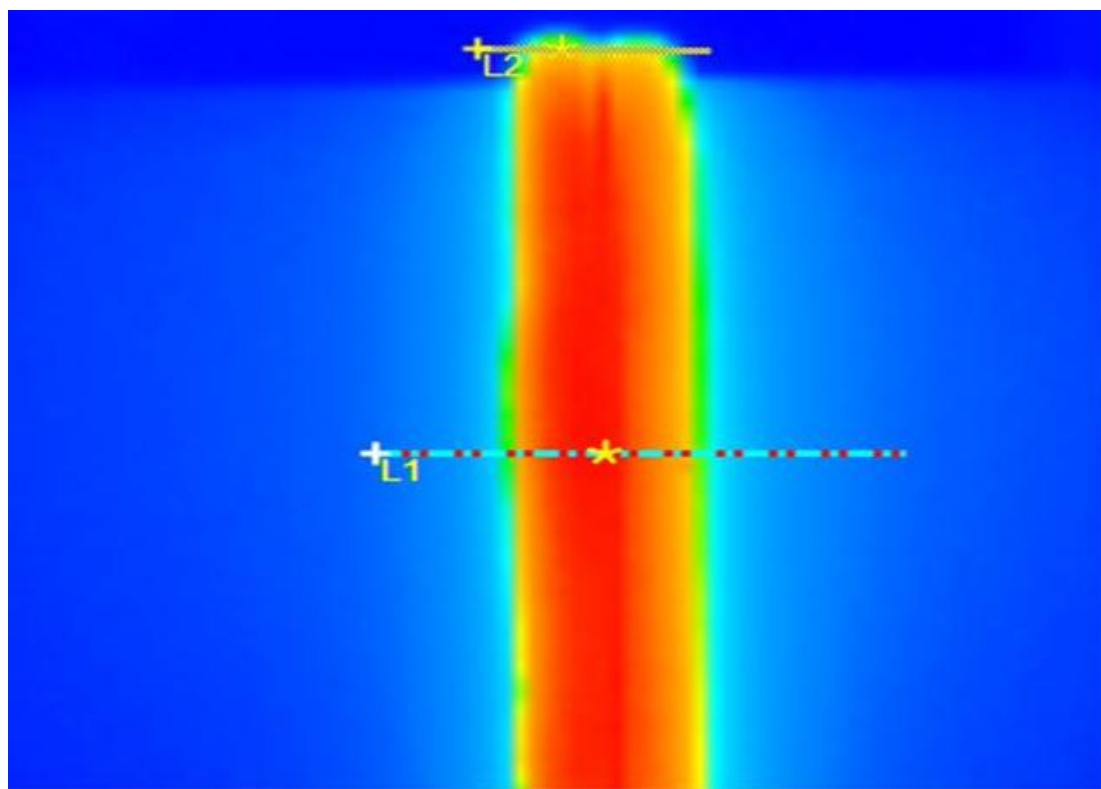
#### 4.2 Розробка та випробування двозонного нагрівального інструменту для зварювання труб із різнотипних поліетиленів при ремонті трубопроводів із пластмас

Для порівняння розподілу температури у зварних з'єднаннях, отриманих з використанням однозонного та двозонного нагрівальних інструментів на рисунках 4.8-4.10 наведені спектри розподілу температур по характеристичним

лініям L1 (середня лінія) та L2 (лінія в зоні грат). З рисунку видно, що в зварних з'єднаннях труб з ПЕ-63 та ПЕ-100, які сформовані однозонним нагрівальним інструментом (рис. 4.8, а), розподіл температури має однорідний характер, що призводить, з огляду на різні фізико-хімічні характеристики поліетиленів ПЕ-63 та ПЕ-100, до формування дефектного зварного грату у зварному з'єднанні. З іншого боку, при зварюванні труб з різнотипних поліетиленів ПЕ-63 та ПЕ-100 двозонним нагрівальним інструментом з оптимальними для кожної труби зварювальними параметрами (рис. 4.8, б), формується грат, який відповідає, згідно заявлених у нормах параметрів, якісному зварному з'єднанню. На рис 4.9. наведені фотографії двозонного нагрівального інструменту в інфрачервоному спектрі електромагнітного випромінювання. На рис. 4.10 наведені спектри розподілу температур по характеристичним лініям (середня лінія та лінія в зоні грату).



а)

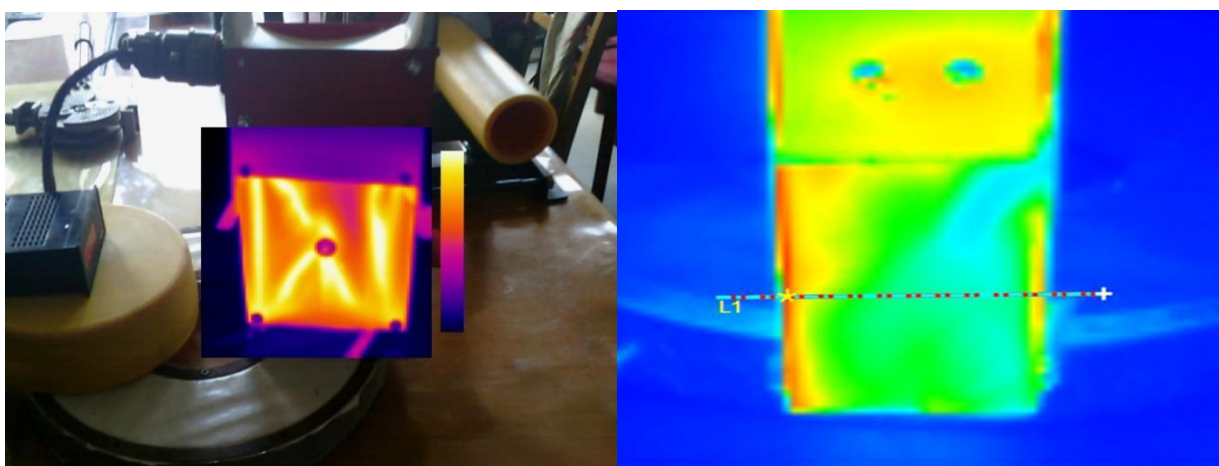


б)

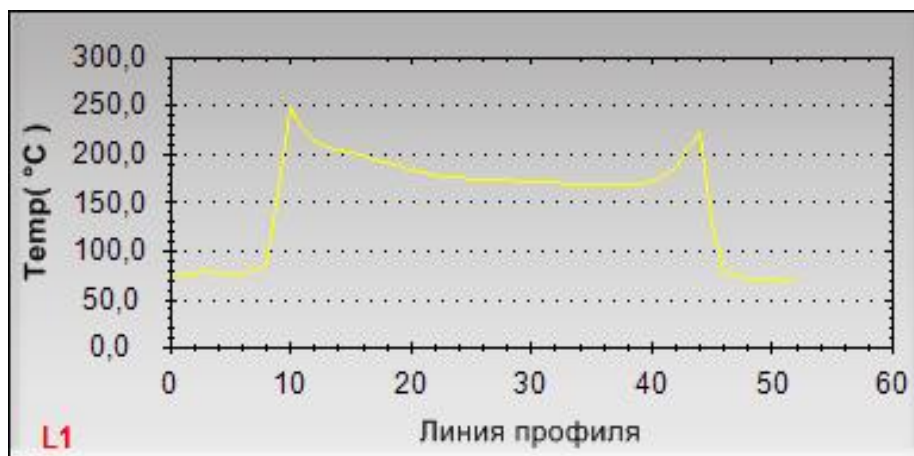
а) звареного однозонним нагрівальним інструментом;

б) звареного двозонним нагрівальним інструментом

Рисунок 4.8 – Фотографії зварних з'єднань труб з ПЕ-63 та ПЕ-100 в інфрачервоному спектрі електромагнітного випромінювання в процесі їх формування.



а)



б)

Рисунок 4.9 – Фотографії двозонного нагрівального інструменту в інфрачервоному спектрі електромагнітного випромінювання (а) та спектр розподілення температури по його поверхні (б).

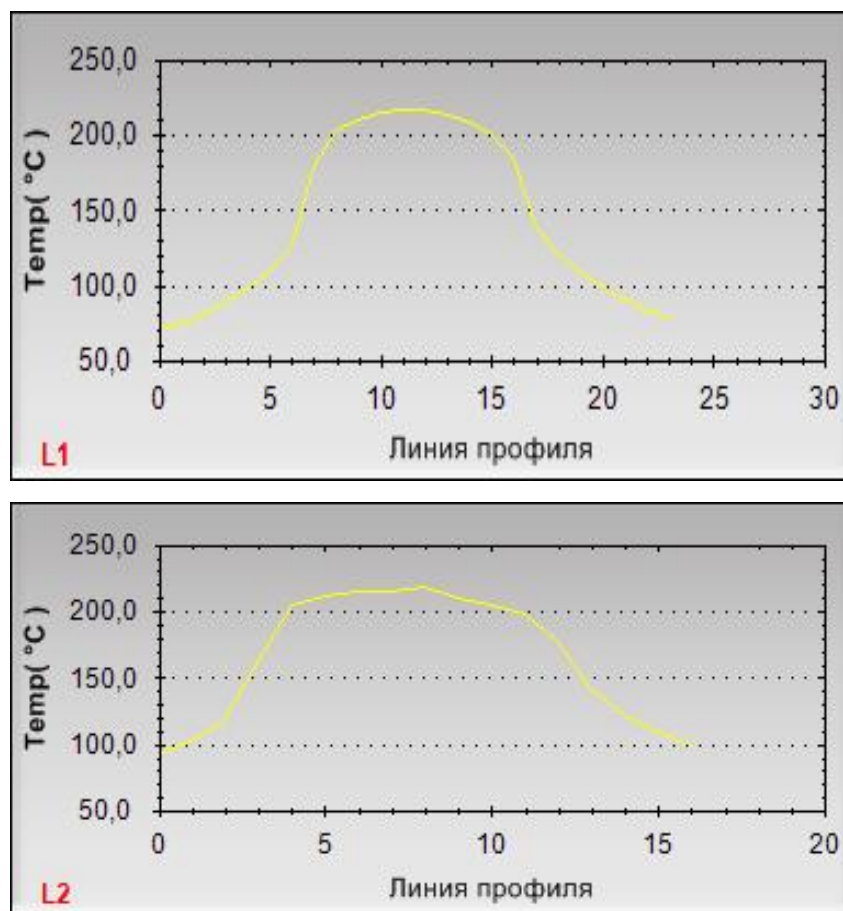


Рисунок 4.10 – Спектри розподілу температур по характеристичній лінії L1 (середня лінія).

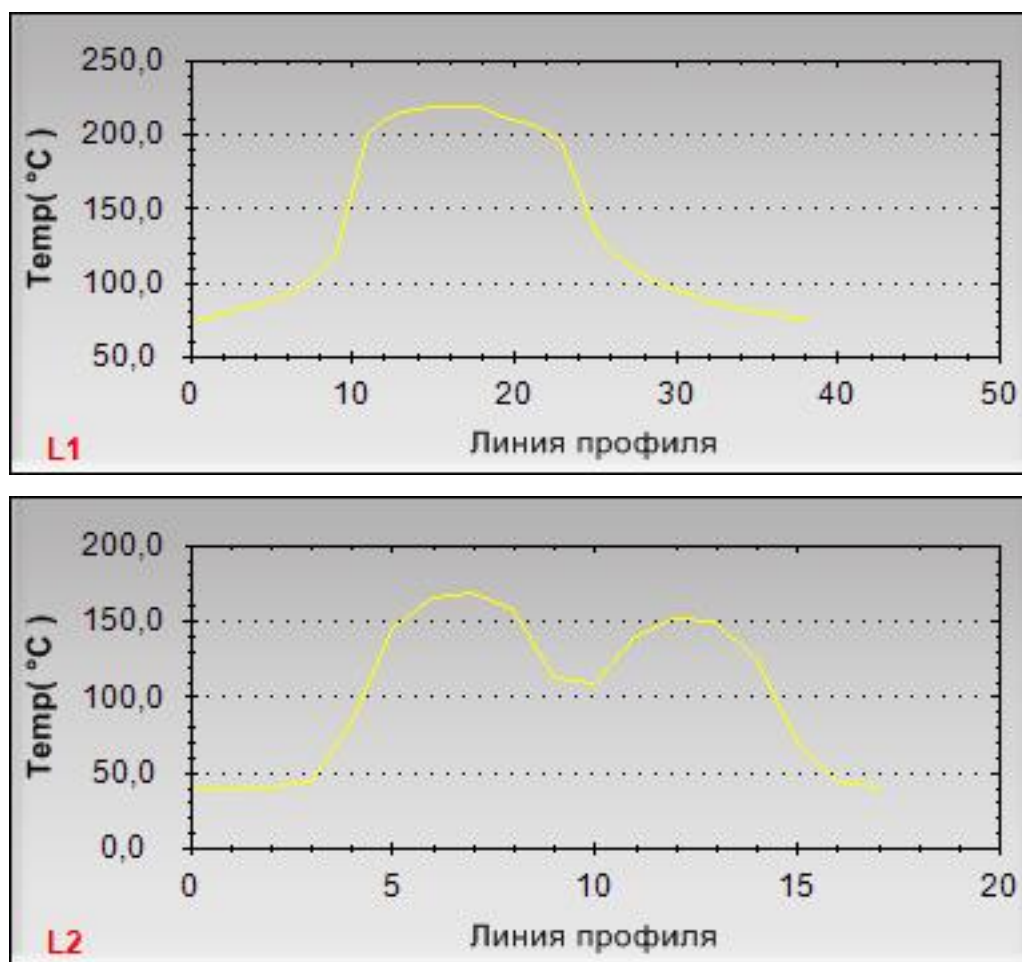


Рисунок 4.11 – Спектри розподілу температур по характеристичній лінії L2  
(лінія в зоні ґрату).

Таким чином, з наведених на рис. 4.10 та 4.11 спектрів розподілу температур можна стверджувати, що при стиковому зварюванні різнотипних поліетиленів двозонним нагрівальним інструментом, температурні потоки розподілені однаково. Це, в свою чергу, забезпечує як однакові розміри валиків зварного ґрату, так і дозволяє підвищити якість зварного з'єднання.

## ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 4

1.Методом кінцевих елементів проведено математичне моделювання теплових процесів при зварюванні різнотипних поліетиленових труб двозонним нагрівальним інструментом. Сформульовано критерій оптимальності формування зварного з'єднання із різних поліетиленів та визначено оптимальні значення температури робочої поверхні для кожного з них. Показано, що для зварювання різнотипних поліетиленів оптимальними є різні температури на поверхні нагрівального інструменту.

2. В роботі розроблено та випробувано двозонний нагрівальний інструмент для зварювання встик труб з різнотипних поліетиленів, який дозволяє встановлювати оптимальні параметри зварювання для кожної труби окремо і може використовуватись для ефективного ремонту та реконструкції трубопроводів із застарілих типів поліетиленів та подовження їх експлуатаційного ресурсу.

## РОЗДІЛ 5

### ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ РОБОТИ ЗІ ЗВАРЮВАННЯ ДВОЗОННИМ НАГРІВАЛЬНИМ ІНСТРУМЕНТОМ

#### 5.1 Експериментальні роботи зі зварювання для випробування двозонного нагрівального інструменту.

Вирішити проблему зварювання труб із різнотипних поліетиленів дозволить створений в рамках даної роботи двозонний нагрівальний інструмент для зварювання нагрітим інструментом встик труб зовнішнім діаметром до 110 мм [125-127]. Конструктивно двозонний нагрівальний інструмент розділений на дві секції, протилежні робочі поверхні мають індивідуальний нагрівач з окремим живленням та розділені теплоізоляційною прокладкою. Панель управління на джерелі живлення дозволяє регулювати температуру кожної робочої поверхні в межах 150 – 300°C та контролювати її на відповідних індикаторах. Час прогріву є спільним для обох труб, однак використання двозонного нагрівача дає можливість регулювати вкладення теплоти у кожен торець труби, налаштовуючи оптимальну температуру прогріву для різних марок поліетилену. На завершальному етапі робіт за темою роботи було проведено серію експериментальних робіт для випробування та доопрацювання дослідного зразка двозонного нагрівального інструменту.

На стандартному зварювальному обладнанні з використанням двозонного нагрівального інструменту зварювали зразки поліетиленових труб зовнішнім діаметром 63 мм, SDR 11 із поліетиленової сировини типу ПЕ-63, ПЕ-80 та ПЕ-100. Процес зварювання контролювали за допомогою тепловізора DT 980 (рис. 5.1).

На початковій стадії проведення експериментів проводили зварювання нагрітим інструментом встик за традиційною технологією. На робочих поверхнях двозонного нагрівального інструменту встановлювали однакове значення температури, у відповідності з вимогами нормативу та зварювали стики із однотипних поліетиленів трьох типів. В усіх випадках спостерігали



правильне формування зварних з'єднань з утворенням рівномірних по орбіті стику та однакових за розмірами валиків зовнішнього грату (рис. 5.2).

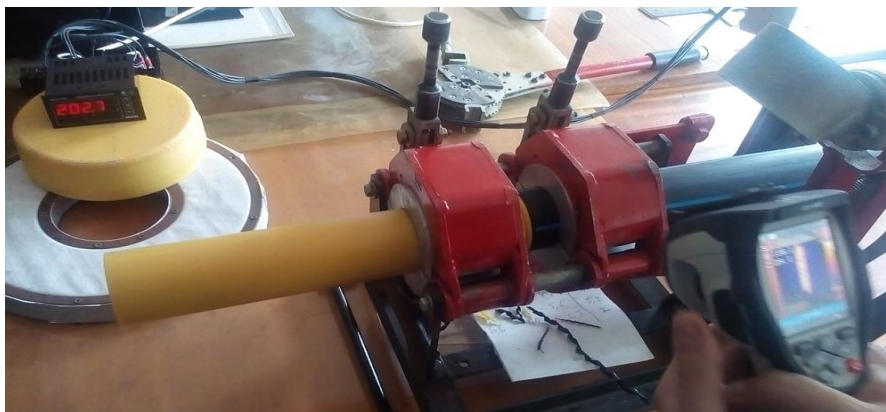
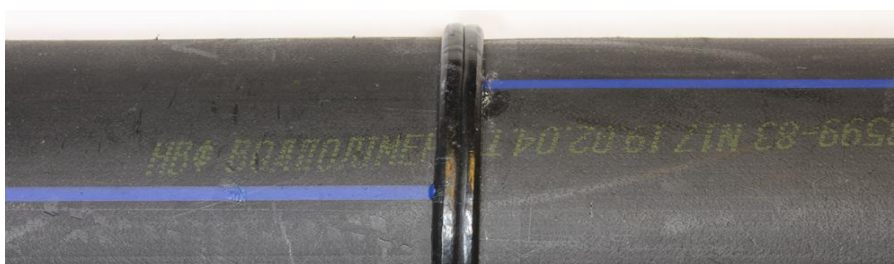
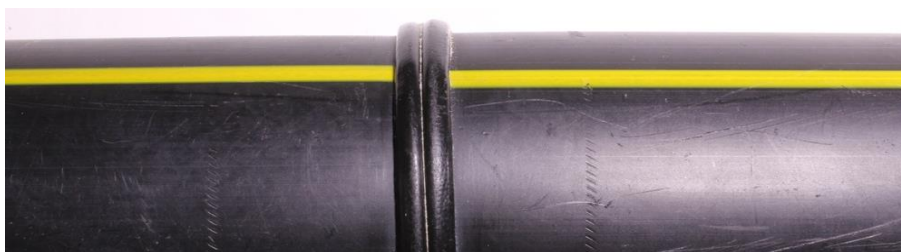


Рисунок 5.1 – Контроль охолодження стику труб із різнотипних поліетиленів за допомогою тепловізора DT 980



а)



б)



в)

Рисунок 5.2 – Стикові зварні з'єднання труб із однотипних поліетиленів ПЕ-63 (а), ПЕ-80 (б) та ПЕ-100 (в)

При зварюванні за традиційною технологією труб із різнотипних поліетиленів ПЕ-80 (з жовтими смугами) та ПЕ-63 (із синіми смугами), а також



ПЕ-100 (з помаранчевими смугами) отримували зварні з'єднання із нерівномірними валиками зовнішнього грату (рис. 5.3). В усіх випадках з боку лінійного поліетилену ПЕ-63 формуються валики грату меншого розміру. Отже, через теплофізичні властивості матеріалу, поліетилен ПЕ-63 при традиційному зварюванні недостатньо прогрівається та потребує більшого вкладення теплоти для отримання симетричного та рівномірного по орбіті стику зовнішнього грату.

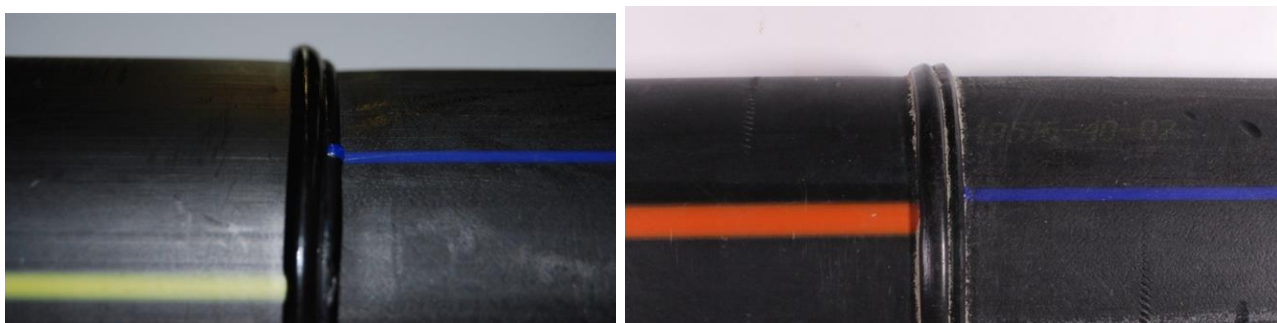


Рисунок 5.3 – Стикові з'єднання труб із різнотипних поліетиленів, зварені за традиційною технологією

На останньому етапі проводили експерименти зі зварювання різнотипних труб з встановленням підвищеної температури робочої поверхні нагрівача з боку лінійного поліетилену ПЕ-63. Серією експериментів було встановлено, що для нормального формування зварного з'єднання необхідне підвищення температури з одного боку на 20°C. В цьому випадку формується практично симетричне зварне з'єднання у комбінаціях поліетиленів ПЕ-63/ПЕ-80, та ПЕ-63/ПЕ-100 (рис. 5.4). Так само, рівномірний грат формується і на внутрішній поверхні зварного з'єднання, що свідчить про рівномірний прогрів стику по усій поверхні з'єднання.

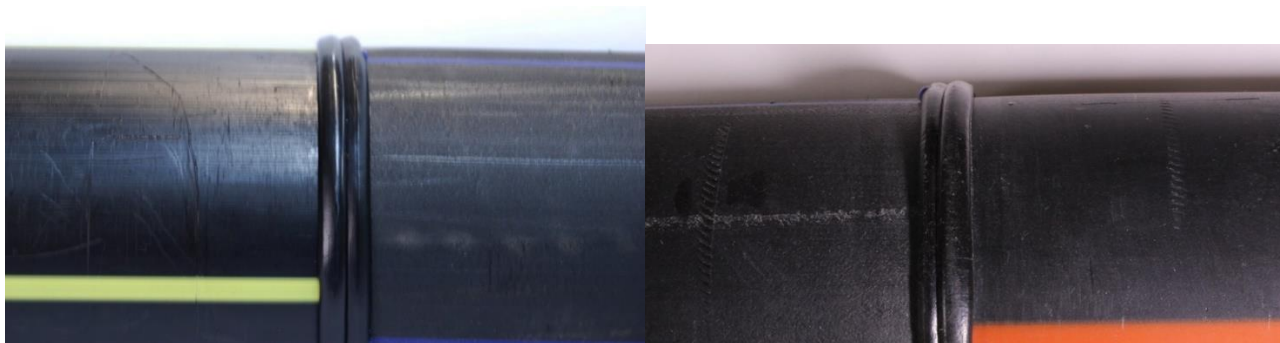


Рисунок 5.4 – Стикові з'єднання труб із різнотипних поліетиленів  
 ПЕ-80/ПЕ-63 та ПЕ-63/ПЕ-100, зварені з різною температурою робочих  
 поверхонь нагрівача

Експерименти проводили в нормальних кліматичних умовах при температурі 20-22°C. В залежності від температури навколишнього середовища абсолютне значення та різниця температур на робочих поверхнях двозонного нагрівального інструменту будуть змінюватись. Тривалість прогріву для усіх комбінацій поліетиленів, зазвичай, встановлюється згідно з вимогами Нормативу для відповідного типорозміру труб і може підбиратись індивідуально для конкретних незвичних умов зварювання.

Дослідження температурного поля в процесі зварювання показали, що незадовільне формування різнотипних зварних з'єднань відбувається через нерівномірне прогрівання полімерного матеріалу з різних боків. На рис. 5.5, а зображена теплова картина зварного з'єднання різнотипних поліетиленових труб одразу після осадження. Полімерний матеріал з правого боку не був достатньо прогрітий при контакті з нагрівальним інструментом, кількість матеріалу, який розплавився невелика. Тому при осадженні валик зовнішнього ґрату з цього боку зварного з'єднання майже не утворився. При регульованому прогріві з різною температурою на поверхнях двозонного нагрівача (рис. 5,5, б) на торцях труб з обох боків утворюється однакова кількість розплаву, при осадженні формується симетричне зварне з'єднання з однаковими розмірами валиків ґрату по усій орбіті стику.

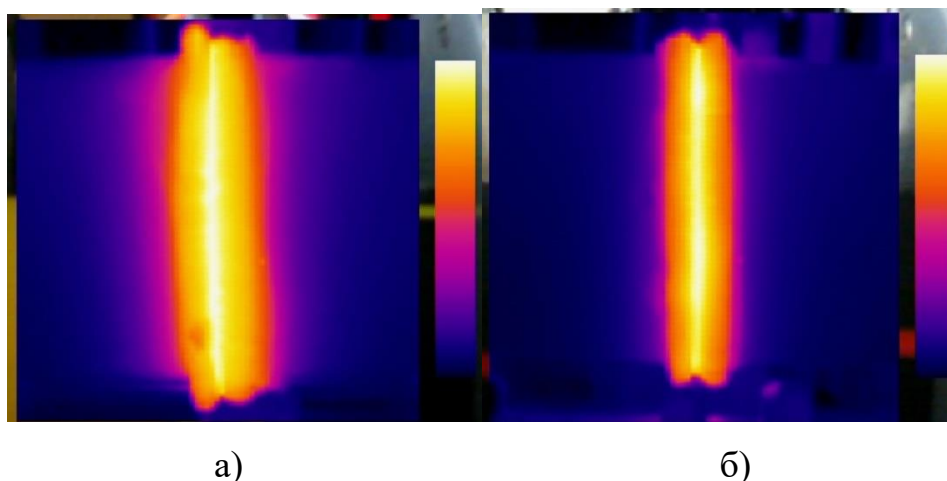


Рисунок 5.5 – Температурне поле на стику труб із різнотипних поліетиленів : а) при нерівномірному прогріванні; б) при рівномірному прогріванні.

Особливості формування стикових зварних з'єднань різнотипних поліетиленів в залежності від умов прогрівання добре видно на їх поперечних перерізах. На стику (рис. 5.6, а) нерівномірність валиків грату, очевидно, спричинена різною величиною текучості розплаву поліетилену торців труб після прогрівання. Видно різну товщину затверділого шару поліетилену з боків поверхні сплавлення, деяке викривлення зварного з'єднання в бік краще прогрітого зразка. Рівномірно прогрітийстик (рис. 5.6, б) демонструє класичну форму стикового зварного з'єднання, симетричного, тонкого посередині, з розширенням в напрямку зовнішніх і внутрішніх поверхонь труб.



Рисунок 5.6 – Поперечний переріз стику труб із різнотипних поліетиленів, зварених за різними технологіями: а) за традиційною технологією; б) за новою технологією.

## **5.2 Розробка технологічних рекомендацій щодо використання дослідного зразка нагрівального інструменту в складі універсального устаткування для зварювання поліетиленових труб.**

Остаточний висновок про механічну міцність стикового зварного з'єднання поліетиленових труб дають руйнівні випробування зразків на одновісний розтяг. В даний час в Україні припинено дію нормативів типу ГОСТ, затверджених ще у радянські часи і вводяться в дію Європейські нормативні документи. Випробування на розтяг експериментальних стикових зварних з'єднань поліетиленових труб проводили згідно вимог введеного в дію в Україні нормативу ДСТУ EN 12814-2:2018 [128]. Норматив регламентує відповідні випробування для будь-яких зварних з'єднань із пластмас.

В більшості випадків ДСТУ EN 12814-2:2018 передбачає випробування на розтяг традиційних зразків – лопаток різної величини. Але при зварюванні різнотипних поліетиленових труб результати випробувань традиційних зразків малоінформативні, оскільки з'єднуються матеріали з різними міцнісними характеристиками. При випробуваннях на розтяг різнотипних зварних з'єднань шов, як правило, лишається неушкодженим, а руйнування відбувається в частині трубного зразка з меншою механічною міцністю. Для подібних випадків у нормативі передбачено використання так званого «зразка із звуженою частиною у зварному з'єднанні» (рис. 5.7).

Зразок із звуженою частиною має плоску прямокутну форму із розташуванням зварного з'єднання у поперечному напрямку посередині. По лінії сплавлення виконують надрізи з обох боків, які звужують робочу ділянку зразка до величини 25 мм, забезпечуючи, таким чином, концентрацію навантаження при випробуванні саме на матеріалі зварного з'єднання. На лопатках зразка передбачені отвори в середніх частинах, що дає можливість надійно зафіксувати зразок в затискачах розривної машини при необхідності великих навантажень.

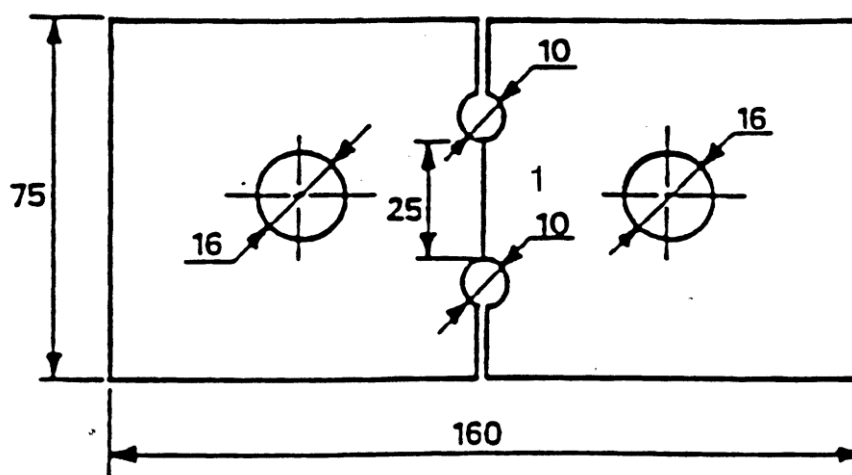


Рисунок 5.7 – Схема «зразка із звуженою частиною у зварному з'єднанні» згідно з вимогами ДСТУ EN 12814-2:2018 (1 – лінія сплавлення)

Розміри зразка, що показані на рис. 5.7 передбачені для плоских зварних з'єднань або для полімерних труб великого діаметру та зі значною товщиною стінки. В даній роботі зварювали поліетиленові труби малого діаметру (63 мм), отже, вирізати із зварних з'єднань плоскі зразки шириною 75 мм виявилось неможливим. Було вирішено використати для випробувань зразки – лопатки традиційних розмірів (загальна ширина зразка – 20 мм, ширина робочої частини – 10 мм) та виконати на них звуження робочої частини по лінії сплавлення.

Таким чином, із експериментально отриманих зварних з'єднань методом вирубування отримували зразки – лопатки традиційних розмірів, а потім фрезеруванням округлих заглиблень звужували їх по лінії сплавлення до ширини робочої частини 5 мм. На рис. 5.8 показані зразки – лопатки, виготовлені із зварних з'єднань труб із поліетилену ПЕ-80 (жовті смуги) та поліетилену ПЕ-63 (сині смуги). Зразок № 1 виготовлений із зварного з'єднання, показаного на рис. 5.3 та звареного за традиційною технологією з однаковими значеннями температури на робочих поверхнях нагрівача. Зразок № 2 отриманий із зварного з'єднання, показаного на рис. 5.4 та звареного з підвищеною температурою нагрівача з боку труби ПЕ-63. Зовнішній та внутрішній грат зварного з'єднання на зразках – лопатках не видаляли.



Рисунок 5.8 – Зразки-лопатки «із звуженою частиною у зварному з'єднанні»



Рисунок 5.9 – Характер руйнування звуженого зразка-лопатки при випробуваннях на одновісний розтяг

Руйнування зразків мало однаковий пластичний характер (рис. 5.9). «Шийка» при пластичній деформації зразка утворювалась в області лінії сплавлення та розповсюджувалась у бік менш міцного полімерного матеріалу ПЕ-80. На рис. 5.10 показано записані розривною машиною графіки зміни навантаження з часом для зразків №1 та №2.

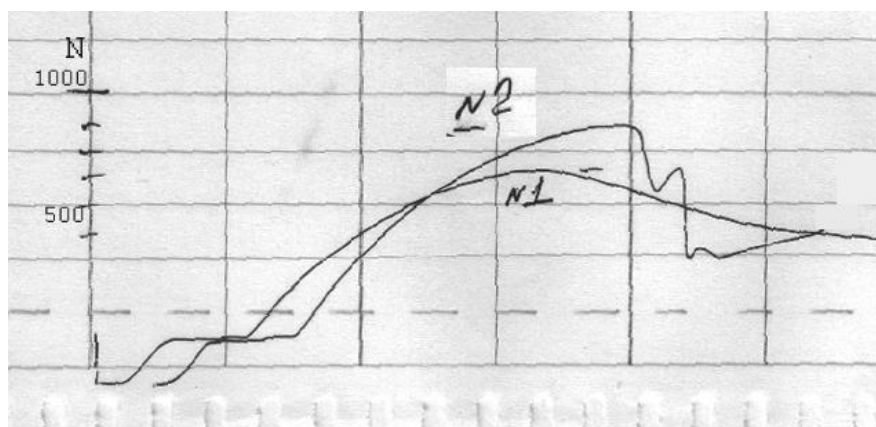


Рисунок 5.10 – Криві навантаження при випробуваннях зразків-лопаток №1 та №2 на одновісний розтяг

Максимальне навантаження при розтягуванні становило для зразка №1 – 710 Н, а для зразка №2 – 880 Н (рис. 5.10). Після відповідних розрахунків було отримано значення межі текучості полімерного матеріалу – 25,8 МПа для зразка №1 та 29,4 МПа для зразка №2. Отже, міцність зварного з'єднання різнотипних поліетиленових труб, зварених за новою технологією виявляється на 15% більшою. Оскільки випробувались зразки зі звуженого робочою частиною, в цьому випадку визначалась міцність саме матеріалу зварного з'єднання.

За результатами експериментальних досліджень було визначено рекомендовані значення температури на поверхнях двозонного нагрівального інструменту в різних умовах навколишнього середовища (таблиця 5.1). Тривалість прогріву для усіх трьох комбінацій поліетиленів слід встановлювати згідно з вимогами ДБН В.2.5-41:2009 для відповідного типорозміру труб. При відхиленнях у формуванні різнотипних зварних з'єднань тривалість прогріву слід підбирати індивідуально для конкретних умов зварювання.

За результатами випробувань двозонний нагрівальний інструмент було доопрацьовано з метою адаптації його до використання в складі традиційних установок для стикового зварювання полімерних труб. Випробування показали, що розроблений нагрівальний інструмент дозволяє отримувати якісні зварні з'єднання труб як із різнотипних, так і однотипних поліетиленів.

Таблиця 5.1 – Рекомендована температура робочих поверхонь двозонного нагрівача при зварюванні різнотипних поліетиленів

Температура навколишнього повітря °С	Комбінації типів поліетилену					
	ПЕ-63	ПЕ-80	ПЕ-63	ПЕ-100	ПЕ-80	ПЕ-100
-10 – 0	230	220	220	230	220	230
0 – +20	220	210	210	220	210	220
+20 – +45	210	200	200	210	200	210

## ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 5

1. Проведено серію експериментальних робіт по зварюванню з метою випробування дослідного зразка двозонного нагрівального інструменту для зварювання труб із різнотипних поліетиленів на традиційній зварювальній установці. Показано універсальність цього інструменту, який може бути використано як для зварювання однотипних, так і різнотипних поліетиленів.

2. Вивчено основні властивості отриманих зварних з'єднань однотипних та різнотипних поліетиленових труб. Проведено механічні випробування на одновісний розтяг зварних з'єднань. Оптимізовано параметри процесу зварювання, що забезпечують оптимальне формування та механічну міцність різнотипних стикових зварних з'єднань полімерних труб.

3. Випробувано та доопрацьовано двозонний нагрівальний інструмент для зварювання нагрітим інструментом встик труб з різнотипних поліетиленів. Розроблено технологічні рекомендації, які дозволяють встановлювати оптимальні параметри зварювання для кожної труби окремо, та забезпечити ефективний ремонт та реконструкцію трубопроводів із застарілих типів поліетиленів та подовження їх експлуатаційного ресурсу.



## ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Для попередньої оцінки впливу параметрів процесу зварювання на формування зварних з'єднань із різнотипних поліетиленів марок ПЕ-63, ПЕ-80 та ПЕ-100 та подальшої їх експлуатації в роботі проведено математичне моделювання температурних полів при тепловому зварюванні та запропоновано метод прогнозування їх експлуатаційних характеристик в залежності від параметрів зварювання. В роботі розроблена методика розрахунку термічних процесів при зварюванні нагрітим інструментом встик полімерних труб з різнотипних поліетиленів. Отримані результати математичних розрахунків температурних полів при зварюванні поліетиленових труб з ПЕ-63 та ПЕ-80. Розраховано час вирівнювання температури і кінетику в зоні розплаву в залежності від часу нагріву. Запропоновано адаптований метод Тагучі для прогнозування оптимальних значень параметрів процесу зварювання нагрітим інструментом встик труб з пластмас для отримання якісних зварних з'єднань при зменшенні часу, кількості та собівартості експериментів.

2. Методами рентгеноструктурного та термомеханічного аналізу показано, що з часом зварні з'єднання з різнотипних поліетиленів, які були отримані за традиційною технологією зазнають структурних змін, що спричинює зміни їх термомеханічних та експлуатаційних властивостей. Виявлено, що найбільших змін в структурі та термомеханічних властивостях зазнають зварні з'єднання ПЕ-63/ПЕ-100, при цьому найбільші зміни в механічній міцності характерні для зварних з'єднань ПЕ-63/ПЕ-80.

3. Проведено комплексні дослідження теплофізичних властивостей технічних поліетиленів різних марок, а саме ПЕ-63, ПЕ-80 і ПЕ-100. Виявлено суттєві для процесу зварювання відмінності у їх теплофізичних характеристиках, які мають бути враховані при ремонті полімерних трубопроводів. Проведено морфологічні та механічні дослідження зварних з'єднань поліетиленових труб у комбінаціях поліетиленів трубних марок ПЕ-63/ПЕ-80, та ПЕ-63/ПЕ-100. За результатами досліджень визначено вплив їх теплофізичних властивостей та

параметрів процесу зварювання на морфологічну структуру та якість зварних з'єднань різнотипних поліетиленів.

4. За результатами досліджень було встановлено, що для забезпечення гарантованої якості зварних з'єднань труб із різнотипних поліетиленів та подовження терміну експлуатації трубопроводів з них традиційний спосіб їх зварювання нагрітим інструментом потребує модернізації з розробкою підходів, які б враховували особливості теплофізичних властивостей самих полімерних матеріалів.

5. Для визначення довговічності зварних з'єднань труб із різнотипних поліетиленів розроблено методику їх випробувань на ріст тріщин під дією постійного навантаження в ПАР. Розроблена методика може бути рекомендована для оптимізації режимів зварювання полімерів різних типів.

6. Методом кінцевих елементів проведено математичне моделювання теплових процесів при зварюванні різнотипних труб двозонним нагрівальним інструментом. Сформульовано критерій оптимальності формування зварного з'єднання із різних поліетиленів та визначено оптимальні значення температури робочої поверхні для кожного з них. Розроблено та виготовлено двозонний нагрівальний інструмент з можливістю автономного регулювання температури на кожній з двох робочих поверхонь, призначений для зварювання полімерних труб із різнотипних поліетиленів.

7. Проведено серію експериментальних зварювальних робіт з метою випробування дослідного зразка двозонного нагрівального інструменту. Досліджено особливості формування зварних з'єднань при різних умовах зварювання. Проведено механічні випробування на розтяг полімерного матеріалу зварних з'єднань. Оптимізовано параметри процесу зварювання, що забезпечують оптимальне формування та механічну міцність різнотипних стикових зварних з'єднань труб. На основі порівняльного аналізу отриманих експериментальних даних було остаточно доопрацьовано двозонний нагрівальний інструмент для зварювання труб із різнотипних поліетиленів. Розроблено технологічні рекомендації використання дослідного зразка

нагрівального інструменту в складі універсального устаткування для зварювання труб із однотипних та різнотипних поліетиленів. В перспективні серійне виготовлення універсального обладнання з можливістю зварювання труб із різнотипних поліетиленів дозволить спростити ремонтні роботи та запобігти виникненню аварій на полімерних газо- та водопроводах.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Колупає Б.С., Ліпатов Ю.С., Бордюк М.А., Дем'янук. Вивчення полімерних матеріалів в загальноосвітній школі: Навчальний посібник. Рівне, 1993. 92 с.
2. Мельник Л.І. Хімія і фізика полімерів: Навчальний посібник. Київ: НТУУ "КПІ", 2016. 161 с.
3. Колупаєв Б.С. Физико-химия полимеров. Львів: Вища школа, 1976. 192с.
4. Скляр А.М. Вступ до хімії полімерів. Видавництво СумДПУ ім. А.С.Макаренка, 2010. 80 с.
5. Боєчко Ф.Ф. Основи хімії полімерів. Київ: Рад. шк., 1988. 198 с.
6. В. Й. Скорохода, Н. Б. Семенюк. Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2014. 340 с.
7. Тхір І. Г., Гуменецький Т. В. Фізико-хімія полімерів. Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2005. 240 с.
8. Das T. K., Prusty S. Review on Conducting Polymers and Their Applications. *Polymer-Plastics Technology and Engineering*. 2012. Vol. 51, no. 14. P. 1487–1500.
9. Л. П. Марушко. Хімія полімерів: конспект лекцій. Луцьк: «Зоря-плюс», 2021. 133 с.
10. В.С. Кравцов, О.В. Кравцов, М.В. Бурмістр. Хімія і фізика високомолекулярних сполук. Навчальний посібник. Дніпропетровськ: УДХТУ, 2002. 560 с.
11. Вознюк В. Т., Мікульонок І. О. Інтенсифікація процесу виготовлення екструдованих полімерних труб. Київ: НТУУ «КПІ» 2012. 142 с.
12. Масленнікова Л.Д., Іванов С.В., Фабуляк Ф.Г., Грушак З.В. Фізико-хімія полімерів: підручник. Київ: НАУ-друк, 2009. 312 с.
13. Курта С.А., Курганський В.С. Хімія і технологія високомолекулярних сполук: навчальний посібник. Івано-Франківськ: «Плай»

ЦІТ Прикарпат. нац. ун-ту ім. Василя Стефаника, 2010. 291 с.

14. Кузьменко М. Я., Бурмістр М. В., Кобельчук Ю. М. Технологія виробництва та перероблення високомолекулярних сполук: підручник. Дніпропетровськ: ДВНЗ «Укр. держ. хім.-технол. ун-т», 2015. 489 с.

15. І. О. Савченко, В. Г. Сиромятніков. "Промислові полімери" та "Основи технології виробництва полімерних матеріалів". *Навчальний посібник до дисципліни та практикумів для студентівхімічного факультету*. Київ: Видавничо-поліграфічний центр "Київський університет", 2012. 112 с.

16. Recent Advancements in Plastic Packaging Recycling: A Mini-Review. / Beghetto V. et al. *Materials*. 2021. Vol. 14 no. 17 4782. P. 4728. <https://doi.org/10.3390/ma14174782>

17. Шульпин Г. Эти разные полимеры. *Наука и жизнь*, 1982. № 3. С. 80–83.

18. А.Н. Шестопап, Ю.С. Васильев, Э.А. Минеев. Справочник по сварке и склеиванию пластмасс. Київ: Техніка, 1986. 192 с.

19. В. Коврига, И. Гвоздев. Применение полимерных материалов в производстве труб различного назначения. *Полимерные трубы*, 2003. № 1. С. 16–20.

20. О. В. Шунькіна, Н. І. Доманцевич. Комплексна оцінка якості труб з поліетиленових матеріалів. *Вісник Львівської комерційної академії*. Львів: Видавництво Львівської комерційної академії, 2015. № 15. С. 33–38.

21. C.Vasile, M. Pascu. Practical Guide to Polyethylene. Shawbury: Smithers RAPRA Technol. Press, 2008. 184 p.

22. Lukács J., Koncsik Z., Chován P. Integrity reconstruction of damaged transporting pipelines applying fiber reinforced polymer composite wraps. *Procedia Structural Integrity*. 2021. Vol. 31. P. 51–57.

23. М. Гориловский, И. Гвоздев. Трубная марка полиэтилена ПЭ 100. *Полимерные трубы*. 2008. № 4 (22). С. 47–50.

24. О. В. Шунькіна Аналітичний огляд ринку полімерних труб. *Вісник Львівської комерційної академії*. Львів: Видавництво ЛКА. 2013. № 13.

С. 101-104.

25. Солодка Л. М., Побігай Г. А., Бурбан А. Ф. Хімія та фізико-хімія високомолекулярних сполук: навчальний посібник. Київ: Вид. дім «Києво-Могилянська академія». 2014. 122 с

26. А.Н. Шестопал та ін. Справочник проектировщика. Проектирование, строительство и эксплуатация трубопроводов из полимерных материалов. Москва: Стройиздат, 1985. 304 с.

27. Гетьманчук Ю.П., Братичак М. М. Хімія та технологія полімерів: підручник. Львів: Бескид Біт. 2006. 496 с.

28. Лебедев В. В. Бимодальные технологии получения полиэтилена 3-го поколения (обзор). *Інтегровані технології та енергозбереження*. 2011. №4. С. 99 – 105.

29. 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.

30. В. Рыжов, Е. Калугина, Н.Бисерова, Ю.Казаков. Полиэтилены трубных марок. Структура и свойства. *Полимерные трубы*. 2011. № 4. С. 56–60.

31. А.Н.Шестопал, Ю.С.Васильев, О.В.Тарасенко, В.П.Тарногородский. Справочник по сварке и склеиванию пластмасс. Киев: Техника, 1990. 199 с.

32. ISO 12162. Thermoplastics materials for pipes and fittings for pressure applications – Classification, designation, and design coefficient.

33. ISO 1167-1. Thermoplastics pipes, fittings and assemblies for the conveyance of fluids — Determination of the resistance to internal pressure. Part 1.

34. ISO 1167-2. Thermoplastics pipes, fittings and assemblies for the conveyance of fluids — Determination of the resistance to internal pressure. Part 2.

35. ISO 9080. Plastics piping and ducting systems — Determination of the long-term hydrostatic strength of thermoplastics materials in pipe form by extrapolation.

36. Система стандартов для определения и подтверждения эксплуатационных характеристик напорных пластмассовых труб. *Polypipe.info*

URL: <http://polypipe.info/technologies-materials/662-sistema-standartov>. (дата звернення: 23.09.2023).

37. ГОСТ 16338-85. Полиэтилен низкого давления. Технические условия.

38. ГОСТ 18599-83. Трубы напорные из полиэтилена. Технические условия.

39. Технология и оборудование для сварки и склеивания пластмассовых труб в системах газо- и водоснабжения. Сб.науч.ст. Киев: ИЭС им. Е.О.Патона, 1985. – 100с.

40. ГОСТ Р 50838-95. Трубы из полиэтилена для газопроводов. Технические условия.

41. ДСТУ Б В.2.7 – 73 – 98. Труби поліетиленові для подачі горючих газів. Технічні умови.

42. ДСТУ Б В.2.7 – 151:2008. Труби поліетиленові для подачі холодної води. Технічні умови.

43. М.В. Юрженко. Аналіз виробництва та використання поліетиленових труб для будівництва трубопроводів різного призначення (огляд). *Науковий вісник НЛТУ України*. 2019. №29. С. 112–119.

44. М. Kovalchuk, М. 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. Pogrebnjak, V. Novosad. Springer Nature Singapore Pte Ltd. 2018. P. 225–233.

45. ДСТУ-Н Б В.2.5-40:2009 Проектування та монтаж мереж водопостачання та каналізації з пластикових труб.

46. ДБН В.2.5-41:2009. Газопроводи з поліетиленових труб. Проектування. будівництво.

47. Комаров Г.В. Состав и свойства полимерных материалов, влияющие на их свариваемость. *Полимерные материалы*. 2015. №9. С. 44–48.

48. В.И. Кимельблат, И.В. Волков, В.В. Глухов. Оптимизация

технологии контактной сварки встык. Учет свойств полимеров. *Полимерные трубы*. 2010. №2 (28). С. 32–36.

49. Зайцев К.И. Механизм образования соединений при контактной сварке термопластов оплавлением. *Автоматическая сварка*. 1973. №9. С. 28–30.

50. Н. І. Доманцевич, О. В. Шунькіна. Оцінка безпечності модифікованих полімерних труб для систем холодного водопостачання. *Вісник Львівської комерційної академії*. Львів: Видавництво ЛКА. 2015. № 18. С. 90-94.

51. Якість та експлуатаційні характеристики зварних з'єднань труб із різнотипних поліетиленів / М.О. Ковальчук та ін. *Автоматичне зварювання*. 2020. №1. С. 14–22.

52. 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.

53. С.В. Олексієнко, М.Г. Болотов. Зварювання пластмас. Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти 131 Прикладна механіка, освітня програма «Технології та устаткування зварювання». Чернігів: НУ «Чернігівська політехніка». 2024. 34 с.

54. К. О. Зворикін, Л. О. Зворикін. Зварювання пластмас: навч. посіб. Київ : Видво «КММ». 2013. 184 с.

55. Valeriy Demchenko, Maksym Iurzhenko, Andriy Shadrin, Anatoliy Galchun. Relaxation behavior of polyethylene welded joints. *Nanoscale Research Letters*. 2017. Vol. 12. no. 280.

56. Мікульонок І. О. Технологічні основи перероблення полімерних матеріалів: навчальний посібник. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського. 2020. 293 с.

57. Словник-довідник зі зварювання та склеювання пластмас / М. В. Юрженко та ін. Київ: Наукова думка, 2018. 368с.

58. Nanostructurization and thermal properties of polyethylenes' welds /



A. Galchun et al. *Nanoscale Research Letters*. 2015. Vol. 10, no. 1.

59. В.Л. Демченко, М.В. Юрженко. Особливості наноструктурної організації, властивості та релаксаційна поведінка зварних з'єднань поліетиленів. *Наносистеми, наноматеріали, нанотехнології: Зб. наук. пр.* Київ: ПВВІМФ, 2017. Т. 15, № 3. С. 535–546.

60. Solomon S. Climate change 2007-the physical science basis: working group I contribution to the fourth assessment report of the IPCC, 4. Cambridge University Press. 2007.

61. A. Ahmed, A. Quasem Al-Amin, A. F. Ambrose, R. Saidur. Hydrogen fuel and transport system: A sustainable and environmental future. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2016, Vol. 41no. 3.P. 1369–1380.

62. Kahraman E., CihangirOzcanlı S., Ozerdem B. An experimental study on performance and emission characteristics of a hydrogen fuelled spark ignition engine. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2007. Vol. 32, no. 12. P. 2066–2072. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2006.08.023>

63. Veziroglu T.N., Gurkan I, Padki M.M. Remediation of green house problem through replacement of fossil fuels by hydrogen. *International Journal of Hydrogen Energy*. 1989. Vol. 14. no. 4. P. 257–266.

64. Veziroglu T., Barbir F. Hydrogen, the wonder fuel. *International Journal of Hydrogen Energy*. 1992, Vol. 17. P. 391–404.

65. Timilsina G.R., Shrestha A. Transport sector CO<sub>2</sub> emissions growth in Asia: underlying factors and policy options. *Energy Policy*. 2009.Vol. 37(11).P. 4523–4539.

66. Hensher D. A. Climate change, enhanced greenhouse gas emissions and passenger transporte. What can we do to make a difference? *Transportation Research. Part D Transport and Environment*. 2008. Vol. 13. P. 95–111.

67. World energy outlook. International energy agency. 2008.

68. World energy outlook. International energy agency. 2010.

69. Вплив газових сумішей водню з метаном на експлуатаційні та теплофізичні характеристики поліетиленових труб діючих газорозподільних

мереж України / М.В. Юрженко та ін. *Енерготехнології та ресурсозбереження*. 2023. № 2. С. 96–108. <https://doi.org/10.33070/etars.2.2023.08>

70. Водень у полімерних трубах / Максим Юрженко та ін. *Нафтогазова галузь України*. 2022. №1. С. 28–31.

71. Nicoletti G., Arcuri N., Bruno R. A technical and environmental comparison between hydrogen and some fossil fuels. *Energy Conversion and Management*. 2015. Vol. 89 P. 205–213.

72. Gutiérrez F., Mendez F. Entropy generation minimization for the thermal decomposition of methane gas in hydrogen using genetic algorithms. *Energy Conversion and Management*. 2012. Vol. 55. P. 1–13.

73. Lovins AB. Reinventing the wheels. *Environmental health perspectives*. 2005. Vol. 113(4). P. A218–A219.

74. M. Zhao. The Current Status of Hydrogen Energy Industry and Application of Hydrogen Fuel Cell Vehicles. *Highlights in Science, Engineering and Technology*. 2023. Vol. 59. P. 97–102.

75. Nicoletti G., Arcuri N., Bruno R. A technical and environmental comparison between hydrogen and some fossil fuels. *Energy Conversion and Management*. 2015. Vol. 89. P. 205–213.

76. A synthesis of carbon dioxide emissions from fossil-fuel combustion / R. J. Andres et al. *Biogeosciences*. 2012. Vol. 9, no. 5. P. 1845–1871.

77. Bart J. C. J., Palmeri N., Cavallaro S. Biodiesel science and technology. Woodhead Publishing Limited, 2010.

78. Tokyo 2020 Olympic Torch Relay begins tomorrow - Olympic News. *Olympics.com*. URL: <https://olympics.com/en/news/tokyo-2020-olympic-torch-relay-begins-tomorrow>.

79. Водень як паливо – світовий тренд. Досвід яких країн і для чого може перейняти Україна. *LIGA.net* URL: <https://biz.liga.net/ua/ekonomika/tek/opinion/vodorod-kak-toplivo-mirovoy-trend-opyt-kakih-stran-i-dlya-chego-mojet-perenyat-ukraina>.

80. Уніговський Л., Гопаченко О. Сьогодення українського водневого

проекту. Скорочення викидів. *Нафтогазова галузь України*, 2022. № 1 С. 12-15.

81. Карп І.М. Водень: властивості, виробництво та особливості використання. *Енерготехнології та ресурсозбереження*, 2020. № 2. С. 4–13.

82. Казда С., Уніговський Л. Наукове супроводження експериментів транспортування сумішей водню та природного газу розподільними газопроводами. *Нафтогазова галузь України*, 2020. № 5. С. 9–14.

83. Костогриз К., Височанський І., Колесник С. Перші випробування водню в українських газових мережах. *Нафтогазова галузь України*, 2020. № 5. С. 24–30.

84. Корніленко А.Г. Використання суміші природного газу і водню як палива в комунально-побутових і промислових паливоспалювальних теплогенеруючих установках. *Нафтогазова галузь України*, 2021. № 4. С. 25–30.

85. І. Гоцик. Водень: енергоресурс майбутнього та виклик для газових мереж. *Нафтогазова галузь України*, 2022. № 1. С. 10–11.

86. Вплив газових сумішей водню з метаном на фізичну та хімічну структуру поліетиленових труб діючих газорозподільних мереж України / М.В. Юрженко та ін. *Технічна діагностика і неруйнівний контроль*, 2023. № 2. С. 41–46.

87. Вплив газових сумішей водню з метаном на фізичну та хімічну структуру поліетиленових труб з ПЕ-80. / М.В. Юрженко та ін. *Технічна діагностика і неруйнівний контроль*, 2023. №3, С. 21–25.

88. Стан та перспективи використання відновлюваного водню в Україні: вплив на промисловість та шляхи декарбонізації економіки. / Я.М. Криль та ін. *Мінеральні ресурси України*, 2023. № 2. С. 12–16.

89. Казда С. Тестування водню і плани розвитку газової інфраструктури у межах декарбонізації. *Нафтогазова галузь України*, 2022. № 1. С. 5–9.

90. Визначення впливу водню та газоводневих сумішей на метрологічні характеристики побутових лічильників газу. / Д. Сердюк та ін. *Нафтогазова галузь України*, 2022. № 1 С. 16–21.

91. Казда С., Уніговський Л. Наукове супроводження експериментів транспортування сумішей водню та природного газу розподільними газопроводами. *Нафтогазова галузь України*, 2020. № 5. С. 9–14.

92. РМУ 001 РД/М-2021 Рекомендація. Метрологія. Лічильники Газу. Методика визначення впливу чистого водню та сумішей на працездатність та метрологічні характеристики лічильників газу, які застосовуються у побутовому секторі.

93. ДСТУ EN 1359:2019 Газовілічильники. Лічильники газу мембранні (EN 1359:2017, IDT). Вид. офіц.

94. Wallace J.S., Ward C.A., Hydrogen as a fuel, *International Journal of Hydrogen Energy*, 1983. Vol. 8. P. 255–268.

95. Energy Alternatives, A Report of the Special Committee on Alternative Energy and Oil Substitution to the Parliament of Canada (May 1981).

96. H. Wiswall, J. J. Reilly, *Proceedings of the 7th Intersociety Energy Conversion Engineering Conference*, 1972. P. 1342–1348.

<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2010.04.155>

97. Hydrogen influence on the tensile properties of mono and multi-layer polymers for gas distribution / S. Castagnet et al. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2010. Vol. 35, no. 14. P. 7633–7640.

98. New Materials for Hydrogen Distribution Networks: Materials Development & Technico-Economic Benchmark / M. H. Klopffer et al. *Defect and Diffusion Forum*. 2012. Vol. 323-325. P. 407–412. URL: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/ddf.323-325.407>

99. Klopffer M.-H., Berne P., Espuche É. Development of Innovating Materials for Distributing Mixtures of Hydrogen and Natural Gas. Study of the Barrier Properties and Durability of Polymer Pipes. *Oil & Gas Science and Technology – Revue d'IFP Energies nouvelles*. 2014. Vol. 70, no. 2. P. 305–315. URL: <https://doi.org/10.2516/ogst/2014008>

100. EN 13100-1:2017 Non destructive testing of welded joints of thermoplastics semi-finished products Visual examination. Вид. офіц.

101. Ю. С. Липатов, В. В. Шилов, Ю. П. Гомза, Н. Е. Кругляк *Рентгенографические методы исследования полимеров*. Київ: Наукова думка, 1982. 296 с.
102. O. Kratky, I. Pilz, P.J. Schmitz. Absolute intensity measurement of small-angle x-ray scattering by means of a standard sample. *J. Colloid Interface Sci.*, 1966. Vol. 21, No 1. P. 24–34.
103. Menczel J.D., Prime R.B. Thermal analysis of polymers: fundamentals and applications. JohnWiley&Sons, Inc., 2009. 698 p.
104. EN 12814-4:2018 Testing of welded joints of thermoplastics semi-finished products. Вид. офіц.
105. EN ISO 1167-1:2006 Thermoplastics pipes, fittings and assemblies for the conveyance of fluids. Determination of the resistance to internal pressure General method.
106. Коваленко А.Д. Основы термоупругости. Київ: Наукова думка, 1970. 240 с.
107. А.Н. Пивень, Н.А. Гречаная, И.И. Чернобыльский. Теплофизические свойства полимерных материалов. Київ: Вища школа, 1976. 180 с.
108. Теплофизические и реологические характеристики полимеров. Справочник. Под ред. Ю.С.Липатова. Київ: Наукова думка, 1977. 244 с.
109. И.А.Мотовиловец, В.И.Козлов. Термоупругость. Київ: Наукова думка, 1987. 264 с.
110. Montgomery D.C. Design and analysis of experiments. 8<sup>th</sup> ed. New York: John Wiley and Sons, 2012. 752 p.
111. Ross P.J. Taguchi techniques for quality engineering. Singapore: McGraw-Hill, 1996. 329 p.
112. M.K. Kham, R.F. Liang, R.K. Gupta. Rheological and mechanical properties of ABS/PC blends. *Korea-Australia Rheology Journal*, 2005. №17. P.1–7.
113. Taguchi G. Introduction to quality engineering. Tokyo: Asian Productivity Organization, 1986. 191 p.
114. W.Y. Fowlkes, C.M. Creveling. Engineering methods for robust design

using Taguchi methods in technology and product development. New York: Prentice-Hall, 1995. 432p.

115. A. Ulker, U.E. Kocatufek, S. Sayer. Application of the Taguchi method for the optimization of the strength of polyamide 6 composites hot plate welds. *Materials testing*, 2015. Vol. 57. P. 531–542.

116. Phadke M.S. Quality engineering using robust design. – New York: Prentice-Hall, 1989. 333 p.

117. І. О. Мікульонок. Обладнання і процеси переробки термопластичних матеріалів з використанням вторинної сировини. Київ: ІВЦ „Видавництво «Політехніка»”. 2009. 265 с.

118. М.А.Красников, Ю.В.Пожалов, В.А.Соколов. Механика разрушения стыковых сварных соединений полиэтиленовых труб при испытаниях на растяжение статической нагрузкой. *Полимергаз*, 2011. №1. С.36–38.

119. А.И.Герасимов, Г.В.Ботвин, Е.В.Данзанова. Способы испытания сварного соединения полимерных труб. *Технические науки*, 2013. №1. С.64–76.

120. Микроструктура и качество стыковых сварных соединений полиэтилена. / В.Д.Гринюк та ін. *Автоматическая сварка*, 1990. №11. С.23-26.

121. Бокшицкий М.Н. Длительная прочность полимеров. Москва: «Химия», 1978. 308с.

122. Голуб В. П., Щодо розрахунку релаксації напружень в тонкостінних циліндричних оболонках із лінійно-в'язкопружних матеріалів. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка*. 2021. С. 29–34. <https://doi.org/10.17721/1812-5409.2021/4.3>

123. В.Р.Регель, А.И.Слущер, Э.Е.Томашевский. Кинетическая природа прочности твердых тел. «Наука», 1974. 560 с.

124. Н.П. Нестеренко, И.К. Сенченков, О.П. Червинко, М.Г. Менжерес. Моделирование температурных полей и напряжений в полиэтиленовых трубах при сварке нагретым инструментом. *Автоматическая сварка*, 2009. № 2(670). С. 11–15.

125. Звіт про НДР за проектом Р8.7 (№ держреєстрації 0116U004220)

«Розробка методів визначення безпечного терміну експлуатації і технології ремонту поліетиленових трубопроводів». Етап 1 – 2016 р.

126. Звіт про НДР за проектом Р8.7 (№ держреєстрації 0116U004220) «Розробка методів визначення безпечного терміну експлуатації і технології ремонту поліетиленових трубопроводів». Етап 2 – 2017 р.

127. Звіт про НДР за проектом Р8.7 (№ держреєстрації 0116U004220) «Розробка методів визначення безпечного терміну експлуатації і технології ремонту поліетиленових трубопроводів». Етап 3 – 2018 р.

128. ДСТУ EN 12814-2:2018 Випробування зварних з'єднань напівфабрикатів з термопластів. Частина 2: Випробування на розтяг.



## ЛІЦЕНЗІЙНИЙ ДОГОВІР № про надання невиняткової ліцензії

м.Київ

"10 " квітня 2017р.

Інститут електрозварювання ім. Є.О.Патона НАН України в особі заступника директора інституту, академіка НАН України С.І.Кучук-Яценко, який діє на підставі Статуту установи, іменованій надалі ЛІЦЕНЗІАР, з однієї сторони,

та Товариство з обмеженою відповідальністю «СВРОТРУБПЛАСТ» в особі директора І.А.Стрільця, який діє на підставі Статуту підприємства, іменоване надалі ЛІЦЕНЗІАТ, з іншого боку,

спільно іменовані далі СТОРОНИ, приймаючи до уваги, що ЛІЦЕНЗІАР:

- має патент України – заявка № u201604820 від 29.04.2016 «Спосіб зварювання встик полімерних труб без застосування механічного торцювання та без утворення внутрішнього грату, та пристрій для його реалізації»;

- має виключні майнові права на «Ноу-хау», що складає спосіб та пристрій, що вказані у патенті, а також усю технічну документацію до пристрою, що реалізує спосіб, відповідно до патенту;

- має зварювальну установку (надалі ЗВАРЮВАЛЬНА УСТАНОВКА), що реалізує «Ноу-хау».

ЛІЦЕНЗІАТ:

- має можливість для використання невиняткової ліцензії (тобто дозволу, за яким ЛІЦЕНЗІАР надає ЛІЦЕНЗІАТУ право використовувати ЗВАРЮВАЛЬНУ УСТАНОВКУ згідно п. 1.1 цього Договору, та який не виключає можливості використання ЛІЦЕНЗІАРОМ ЗВАРЮВАЛЬНОЇ УСТАНОВКИ і підписання ліцензійних договорів з третьою стороною на використання ЗВАРЮВАЛЬНОЇ УСТАНОВКИ), що йому надається ЛІЦЕНЗІАРОМ;

СТОРОНИ, висловлюючи спільне бажання про співробітництво з метою спільного освоєння внутрішнього ринку, домовилися про нижченаведене:

### 1. Предмет договору

1.1. ЛІЦЕНЗІАР надає ЛІЦЕНЗІАТУ за обумовлену далі винагороду, на термін визначений цим Договором, невиняткову ліцензію, на право використання ЗВАРЮВАЛЬНОЇ УСТАНОВКИ наступними способами:

пропонувати до оренди та продажу ЗВАРЮВАЛЬНУ УСТАНОВКУ;

за додатковими договорами з ЛІЦЕНЗІАРОМ здавати в оренду або продавати ЗВАРЮВАЛЬНУ УСТАНОВКУ.

1.2. Дія наданої невиняткової ліцензії розповсюджується винятково на територію України.

1.3. ЛІЦЕНЗІАТУ не надається право надання субліцензій на право оренди та продажу ЗВАРЮВАЛЬНОЇ УСТАНОВКИ.

### 2. Ноу-хау

- «Ноу-хау» складає: спосіб та пристрій, що вказані у патенті, а також усю технічну документацію до пристрою, що реалізує спосіб, відповідно до патенту за заявкою № u201604820 від 29.04.2016 «Спосіб зварювання встик полімерних труб без застосування механічного торцювання та без утворення внутрішнього грату, та пристрій для його реалізації», та є невід'ємною частиною ЗВАРЮВАЛЬНОЇ УСТАНОВКИ.

2.2. ЛІЦЕНЗІАР по акту передачі-приймання передає ЛІЦЕНЗІАТУ ЗВАРЮВАЛЬНУ УСТАНОВКУ протягом 10 днів після письмового запиту ЛІЦЕНЗІАТУ, складеному у довільній формі, для виконання п. 1.1. цього Договору, з подальшим її поверненням ЛІЦЕНЗІАРУ по акту



11.2. Всі зміни, доповнення, додаткові угоди до Договору мають силу, якщо вони викладені у письмовій формі у вигляді Додаткової угоди, яка скріплена підписами уповноважених представників та печатками Сторін.

11.3. Усі правовідносини, що виникають з Договору або пов'язані з ним, у тому числі пов'язані із дійсністю, укладенням, виконанням, зміною та припиненням Договору, тлумаченням його умов, визначенням наслідків недійсності або порушенням Договору, регламентуються Договором та відповідними нормами чинного законодавства України, а також застосовними до таких правовідносин звичаями ділового обороту на підставі принципів добросовісності, розумності та справедливості.

11.4. У разі дострокового розірвання Договору, Сторона-ініціатор зобов'язана повідомити про це іншу Сторону не пізніше, ніж за 15-ь календарних днів до цього. Одностороннє розірвання Договору є недійсним.

11.5. Сторони цього Договору зобов'язуються негайно, але в строк не пізніше 7-и календарних днів із дня, коли відбудеться зміна, інформувати одна одну про будь-які зміни їхнього місцезнаходження, юридичної адреси, поштових і банківських реквізитів, номерів телефонів і телефаксів, установчих документів, форми власності, зміни уповноважених посадових осіб, а також про всі інші зміни, що здатні вплинути на виконання зобов'язань Сторін за Договором. Сторони несуть повну відповідальність за правильність вказаних ними у Договорі реквізитів. У разі неповідомлення Сторони несуть ризики настання пов'язаних із ним несприятливих наслідків.

11.6. Цей Договір складений українською мовою у 2 примірниках, на 6 сторінках кожний.

## 12. Адреса, поштові та банківські реквізити сторін

### ЛІЦЕНЗІАР:

Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона Національної академії наук України  
03150, м.Київ, вулиця Казимира Малевича, будинок 11,  
код ЄДРПОУ 05416923

факс 528-04-86, E-mail: office@paton.kiev.ua

ІЕЗ ім. Є. О. Патона НАН України користується послугами «М.Е.Doc IS»; не є платником податку на прибуток.

### ЛІЦЕНЗІАТ:

ТОВ «ЄВРОТРУБПЛАСТ»

02660, м.Київ, вул. Алма-Атинська, 8

код ЄДРПОУ

тел. 501-96-20, факс 501-96-24

Є платником податку на загальних підставах.

### ЛІЦЕНЗІАР:

Заступник директора Інституту  
електрозварювання ім. Є.О. Патона  
НАН України, академік НАН України

 С.І. Кузук-Пласенко  
(підпис)  


### ЛІЦЕНЗІАТ:

Директор ТОВ «ЄВРОТРУБПЛАСТ»

 І.А. Стрілець  
(підпис)  
М.П.  
