

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

ГАРАЩЕНКО ОЛЕНА СЕРГІЇВНА

УДК 669.017+620.186.4

ДИСЕРТАЦІЯ
ВПЛИВ СТРУКТУРНО-ФАЗОВОГО СТАНУ НА
ЕКСПЛУАТАЦІЙНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ МЕТАЛУ ЗВАРНИХ
З'ЄДНАНЬ ПАРОПРОВІДІВ

Галузь знань 13 – Механічна інженерія

Спеціальність 132 – Матеріалознавство

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

О.С. Гаращенко

*Ідентичність за змістом
з іншими примірниками
дисертації засвідчую*

Вчений секретар

Юрій Зайчів
05.05.2023 p.

Науковий керівник:
Дмитрик Віталій Володимирович,
доктор технічних наук, професор

Харків – 2023

АНОТАЦІЯ

Гаращенко О.С. Вплив структурно-фазового стану на експлуатаційні характеристики металу зварних з'єднань паропроводів. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії зі спеціальності 132 – Матеріалознавство (13 – механічна інженерія). – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», МОН України, Харків, 2023.

Роботу виконано на кафедрі «Зварювання» Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» Міністерства освіти і науки України. З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» за адресою: 61002, м. Харків, вул. Кирпичова 2.

У дисертаційній роботі представлені результати дослідження змін структурно-фазового стану металу зварних з'єднань паропроводів теплових електростанцій, а також розробки практичних рекомендацій щодо удосконалення методик металографічного аналізу для подальшого уточненого визначення їх надійності та залишкового ресурсу експлуатації.

Об'єкт дослідження – структурно-фазовий стан металу зварних з'єднань паропроводів ТЕС із теплостійких сталей перлітного класу 12Х1МФ і 15Х1М1Ф.

Предмет дослідження – кількісне визначення зміни структурно-фазового стану та експлуатаційних характеристик металу зварних з'єднань паропроводів, які тривалий час експлуатуються в умовах повзучості і малоциклової втоми.

Дослідження структурно-фазового стану, властивостей і пошкоджуваності металу зварних з'єднань паропроводів виконували шляхом використання відповідних методів на зразках зварних з'єднань, які були вирізані з діючих паропроводів.

При проведенні експериментальних досліджень використовували, як стандартні методи і методики, що частково були удосконалені, так і

оригінальні.

Вивчення структури, хімічного складу і будови здійснювали з використанням методів оптичної, растрової і просвічуючої електронної мікроскопії.

Проведені дослідження металу зварних з'єднань паропроводів, що довготривало працюють в умовах повзучості і малоциклової втоми, на основі фрактального аналізу і методу січних прямих ліній, дозволили створити методичну основу для оцінки змін структурно-фазового стану, який призводить до руйнування.

Наукова новизна отриманих результатів полягає в тому, що на підставі теоретичних та експериментальних досліджень здобувачем:

- вперше встановлено відмінності фрактальних розмірностей границь структурних складових на зображеннях окремих ділянок зварних з'єднань паропроводів у залежності від часу експлуатації;

- вперше при оцінці впливу структурно-фазового стану металу зварних з'єднань на залишковий ресурс враховується геометрична складність границь виділення структурних складових, яка визначається за допомогою статистичного аналізу розподілу фрактальної розмірності, одержаної з використанням клітинного методу виміру;

- удосконалено кількісну оцінку нерівномірності розподілу структурних складових металу для виявлення особливостей змін структурно-фазового стану окремих ділянок ЗТВ, а також металу шва і основного металу в залежності від напрацювання в умовах повзучості;

- удосконалено оцінку кількості краплень перліту, їх розмірів та відстаней між ними для статистично обґрунтованого визначення структурно-фазових змін металу зварних з'єднань паропроводу з урахуванням ресурсу напрацювання;

- отримало подальший розвиток дослідження структурно-фазового стану металу зварних з'єднань паропроводів із теплостійких сталей перлітного класу 12X1MФ і 15X1M1Ф, які тривалий час (понад 280 тис. год.) експлуатуються в

умовах повзучості і малоциклової втоми на базі комплексного статистичного аналізу геометричних характеристик структурних елементів.

У результаті проведених досліджень розроблено рекомендації щодо визначення залишкового ресурсу експлуатації зварних з'єднань, які тривалий час експлуатуються в умовах повзучості.

Результати виконаних досліджень доповнили навчальні курси «Експериментальні методи у зварюванні», «Зварювання сталей і кольорових металів», що викладаються студентам у Національному Технічному Університеті «Харківський політехнічний інститут».

Результати виконання дослідження оцінено та рекомендовано до впровадження на АТ «Українські енергетичні машини».

У вступі обґрунтовано актуальність задач дослідження, наведено наукову новизну та сформовано практичне значення одержаних результатів.

У першому розділі розглянуто сучасний стан і тенденції розвитку в області дослідження зварних з'єднань паропроводів, які довготривало експлуатуються в умовах повзучості і малоциклової втоми. Також представлено хімічний склад та механічні властивості сталей, що використовуються для виготовлення елементів систем паропроводів і їх зварних з'єднань. Встановлено основні вимоги до структурного стану і властивостей конструкцій зварних з'єднань, а також особливості контролю якості зварних з'єднань стосовно надійності їх роботи і визначення залишкового ресурсу.

У другому розділі наведено методики, обладнання та матеріали, що були задіяні для дослідження і аналізу структурно-фазового стану та властивостей металу зварних з'єднань. Представлено також удосконалені методики кількісного аналізу структурних змін в металі досліджуваних зразків зварних з'єднань, вирізаних з діючих паропроводів, які проводили за допомогою оптичної і електронної мікроскопії. Наведено опис розробленої комп'ютерної програми статистичного аналізу металографічних зображень металу зварних з'єднань паропроводів.

У третьому розділі розглянуто питання щодо удосконалення кількісної

оцінки структурних змін в металі зварних з'єднань паропроводів і котлів. Представлено результати металографічного аналізу структурних змін в металі, що відбуваються в процесі тривалої експлуатації в умовах повзучості і малоциклової втоми. Дослідження виконували на зразках зварних з'єднань зі сталей 12Х1МФ і 15Х1М1Ф, що мали різний термін напрацювання. В процесі аналізу мікроструктури шліфів різних ділянок зварних з'єднань виявлено відносний вміст структурно-фазових складових і їх розподіл за координатами зображень. Виконано порівняльний аналіз статистичних характеристик розподілу і вмісту структурних складових на ділянках металу зварних з'єднань з різним терміном напрацювання. На основі фрактального аналізу розглянуто складність контурів границь структурних складових. Статистичний аналіз результатів металографічного вивчення мікрошліфів методом січних ліній дозволив одержати розподіли кількості зерен, їх розмірів та відстаней між ними. Представлено обґрунтований опис структурних змін в металі окремих ділянок зварних з'єднань.

Перлітна складова значною мірою впливає на структурно-фазові перетворення в металі зварних з'єднань паропроводів, що довготривало працюють в умовах повзучості і втоми. Тому встановлено рівень неоднорідності перлітної складової в структурі зварних з'єднань.

Виконувався фрактальний аналіз границь зерен перліту на основі зображень одержаних мірошліфів. Порівняльний аналіз фрактальних розмірностей границь структурних складових на зображеннях мікрошліфів ділянок ЗТВ, металу шва і основного металу реалізовано для різних термінів напрацювання. Дослідження та порівняльний аналіз виконували для ділянок ЗТВ, основного металу і зварного шва. В результаті вдалось обґрунтовано підтвердити можливість оцінки геометричної складності границь структурних складових в основному металі паропроводів та їх зварних з'єднань на основі аналізу статистичних характеристик розподілу їх фрактальної розмірності.

Створено узагальнені методичні основи для обґрунтованого фрактального аналізу границь структурних складових металу зварних з'єднань

шляхом визначення впливу світлості пікселів зображення (за HSV-моделлю кольору) і масштабу виміру на фрактальну розмірність. Це дозволило отримати універсальне уявлення складності контурів всіх структурних складових досліджуваного зображення мікрошліфа. Таким чином стає можливим обґрунтований вибір порогової величини яскравості кольору для вивчення меж виділення областей основної складової структури – перліту.

Підтверджено вплив терміну напрацювання паропроводу на структурні зміни, виражені збільшенням фрактальної розмірності, відповідно складності будови контурів структурних складових.

Статистичний аналіз результатів оцінки кількості зерен структурних складових та їх розмірів для мікрошліфів досліджуваного металу, отриманих методом сікучих прямих ліній, дозволив створити науково-обґрунтовану основу для досліджень структурних змін. Встановили, що для оцінки впливу ресурсу паропроводу на структурні зміни доцільно використовувати середньоквадратичні відхилення від середньої кількості зерен та їх розмірів.

У четвертому розділі наведено результати досліджень структурно-фазових змін в металі ділянок зони термічного впливу зварних з'єднань паропроводів після тривалого впливу експлуатаційних навантажень в умовах повзучості і малоциклової втоми. Виконано металографічний аналіз структурно-фазових змін в металі шва і в металі ділянок неповної перекристалізації, нормалізації, сплавлення та перегріву ЗТВ. Аналіз виконували на зразках зварних з'єднань з напрацюванням понад 280 тис. год.

Встановлено відмінності серед ділянок металу шва, перегріву, нормалізації і неповної перекристалізації шляхом порівняльного аналізу статистичних характеристик розподілу досліджених ознак (кількості структурних елементів, розмірів і відстаней між ними) та фрактального аналізу складності контурів границь зерен структурних складових ЗТВ.

Виявлено збільшення неоднорідності досліджених структурних елементів у наступній послідовності: ділянка металу шва, перегріву, нормалізації та неповної перекристалізації. Встановили, що для ділянки неповної

перекристалізації є характерною зміна структурної неоднорідності у широкому діапазоні, як від найменших, так і до найбільших відхилень від закону рівномірного розподілу.

У п'ятому розділі викладено результати досліджень впливу експлуатаційних навантажень на метал зварних з'єднань паропроводів. Розглянули особливості впливу фізико-хімічних процесів на структурно-фазові зміни, механізми повзучості і втоми, а також на експлуатаційні характеристики, пошкоджуваність і руйнування зварних з'єднань. Оцінили статистичні характеристики досліджених ознак структурно-фазового складу металу після руйнування зварних з'єднань і обґрунтували практичне використання методичних розробок по металографічному аналізу зображень металу.

Визначено допустимі значення радіусів пор, в залежності від робочої температури і прогнозованого терміну експлуатації паропроводів що, дозволило доповнити методичну базу для металографічного дослідження структурно-фазового стану металу зварних з'єднань.

Одержано статистичні характеристики кількості зерен, їх розмірів і відстаней між ними для зруйнованих зразків зварних з'єднань та визначено тенденції їх змін з ростом терміну експлуатації. Таким чином повноцінно доповнено методичну базу для прогнозування залишкового ресурсу експлуатації зварних з'єднань. Встановлено що потрібно враховувати виявлені відмінності металу шва, ділянок перегріву, нормалізації і неповної перекристалізації ЗТВ як за фрактальною розмірністю, так і за коефіцієнтом варіації досліджених ознак.

За результатами металографічного дослідження мікрошліфів зразків методом січних ліній визначено основні ознаки для прогнозування залишкового ресурсу експлуатації зварних з'єднань паропроводів.

Ключові слова: паропроводи, зварні з'єднання, теплостійка перлітна сталь, структурно-фазовий стан, перліт, ферит, зона термічного впливу, металографічний аналіз, статистичний аналіз, пошкоджуваність, повзучість, тріщина, пора.

Список публікацій здобувача

1. Garashchenko Y., Glushko A., Kobets O., Harashchenko O. Fractal analysis of structural and phase changes in the metal of welded steam pipe joints. *Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Springer, Cham, 2021. P. 31-40. DOI: 10.1007/978-3-030-77719-7_4.
2. Harashchenko O., Dmytryk V., Berezutskyi V., Syrenko T. Metallographic determination of the number and sizes of grains depending on structural and phase changes in the metal of welded steam pipe joints. *Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Springer, Cham, 2022. P. 384-392. DOI: 10.1007/978-3-031-06025-0_38.
3. Дмитрик В.В., Гаращенко Е.С., Глушко А.В., Соколова В. Н., Сыренко Т. А. Восстановительная термообработка паропроводов и их сварных соединений (обзор). *Автоматическая Сварка*, 2019. № 1. С. 18-22.
4. Гаращенко Е. С. Особенности применения теплоустойчивых сталей для паропроводов и элементов их систем. *Вісник НТУ «ХП»: Серія «Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування»*, 2019. № 3 (1328). С. 91-94.
5. Дмитрик В. В., Царюк А. К., Гаращенко О. С., Сиренко Т. О. Структурний стан та втомлювана пошкоджуваність зварних з'єднань паропроводів. *Автоматичне зварювання*, 2020. № 6. С. 17-22.
6. Гаращенко О. С., Дмитрик В. В., Сиренко Т. О. Дослідження структурно-фазового стану металу зварних з'єднань паропроводів. *Вісник НТУ «ХП»: Серія «Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування»*, 2021. № 2. С. 38-45.
7. Дмитрик В. В., Гаращенко О. С., Берднікова О. М. Визначення структурно-фазового стану зварних з'єднань із теплостійких перлітних сталей з використанням удосконаленого методу аналізу. *Автоматичне зварювання*, 2022. № 6. С. 11-16.
8. Дмитрик В. В., Гаращенко О. С., Лучка А. П. Аналіз структурно-фазового стану в металі паропроводів та їх зварних з'єднань. *Енергетика та електрифікація*. 2020. № 7. С. 52-60.

9. Гаращенко Е. С. Особенности повреждаемости сварных соединений паропроводов и элементов их систем. *Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: тези доповідей XXVII міжнародної науково-практичної конференції MicroCAD-2019*, 15-17 травня 2019р.: у 4 ч. Ч. I. / за ред. проф. Сокола Є.І. Харків: НТУ «ХПІ». С. 287.

10. Гаращенко О. С., Сиренко Т. О. Особливості пошкоджуваності металу зварних з'єднань тріщинами втоми. *XV-Міжнародна науково-технічна конференція молодих вчених та фахівців «Проблеми сучасної ядерної енергетики»*, Харків, ФТІНТ. – 2020. – С. 51.

11. Дмитрик В. В., Гаращенко О. С. Особливості застосування теплостійких сталей для паропроводів і елементів їх систем. *XV-Міжнародна науково-технічна конференція «Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування»*, Харків, НТУ «ХПІ» Тези доповідей. Видавництво «Лідер», 2020. С. 45-46.

12. Дмитрик В. В., Гаращенко О. С. Вивчення структурно-фазових змін у зварних з'єднаннях паропроводів. *Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: тези доповідей XXVIII міжнародної науково-практичної конференції MicroCAD-2020*, 28-30 жовтня 2020 р. Харків: НТУ «ХПІ». С. 270.

13. Harashchenko O., Dmytryk V., Berezutskyi V., Syrenko T. Metallographic Determination of the Number and Sizes of Grains Depending on Structural and Phase Changes in the Metal. *5th International Conference on Design, Simulation, Manufacturing: The Innovation Exchange (DSMIE-2022) JUNE 7-10, 2022: Poznan, Poland*. P. 95.

14. Гаращенко О. С. Визначення кількості та розмірів зерен в металі зварних з'єднань паропроводів в залежності від терміну експлуатації. *XV Міжнародна науково-практична конференція магістрантів та аспірантів «Теоретичні та практичні дослідження молодих науковців» (01–03 грудня 2021 року): матеріали конференції / за ред. проф. Є.І. Сокола. Харків: НТУ «ХПІ», 2021. С. 422-423.*

ANNOTATION

Harashchenko O.S. The influence of structural phase state on the operational characteristics of metal welded steam pipe joints. – Qualifying scientific work on the rights of the manuscript.

The dissertation on competition of a scientific degree of the Doctor of Philosophy on a speciality 132 – Materials Science (13 – Mechanical Engineering). – National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Ministry of Education and Science of Ukraine, Kharkiv, 2023.

The work was performed at the Department of Welding, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Ministry of Education and Science of Ukraine. The dissertation can be found in the library of the National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute" at the address: 61002, Kharkiv, str. Kirpichova 2.

The dissertation presents the results of the study of changes in the structural and phase state of the metal of welded joints of steam pipelines of thermal power plants, as well as the development of practical recommendations for improving the methods of determining their reliability and residual service life.

The object of the study is the structural and phase state of the metal of welded joints of TPP steam pipelines made of heat-resistant steels of pearlite class 12X1MΦ and 15X1M1Φ.

The subject of the study is the quantitative determination of changes in the structural phase state and operational characteristics of the metal of welded joints of steam pipelines, which are operated for a long time in conditions of creep and short-cycle fatigue.

The research on physicochemical processes, structural-phase state, properties, and damageability of the metal in welded joints of steam pipelines was carried out using appropriate methods on samples taken from operating steam pipelines. Both standard and improved techniques, as well as original methods, were used during the experimental research.

The structure, chemical composition, and structure were studied using optical,

raster, and transmission electron microscopy. The study of the metal in welded joints of steam pipelines operating for a long time under conditions of creep and short-cycle fatigue, based on fractal analysis and the method of intersecting straight lines, allowed for the creation of a methodological basis for assessing changes in the structural and phase state that lead to destruction.

The scientific novelty of the obtained results lies in the fact that, based on theoretical and experimental research, the following were achieved:

for the first time:

- the differences in the fractal dimensions of the borders of structural components on the images of individual sections of welded joints of steam pipelines depending on the time of operation were established;

- when assessing the influence of the structural-phase state of the metal of welded joints on the residual resource, the geometric complexity of the boundaries of the allocation of structural components is taken into account, which is determined using a statistical analysis of the distribution of the fractal dimension, obtained using the cellular method of measurement;

improved:

- quantitative assessment of the unevenness of the distribution of the structural components of the metal to identify the characteristics of changes in the structural and phase state of individual areas of the HAZ, as well as the weld metal and the base metal, depending on the work in creep conditions;

- estimation of the number of pearlite inclusions, their sizes and the distances between them for the statistically justified determination of the structural and phase changes of the metal of the welded joints of the steam pipeline, taking into account the service life;

received further development:

- research of the structural and phase state of the metal of welded joints of steam pipelines made of heat-resistant steels of the pearlite class 12X1MΦ and 15X1M1Φ, which are operated for a long time (over 280 thousand hours) in conditions of creep and short-cycle fatigue on the basis of a complex statistical

analysis of the geometric characteristics of structural elements.

As a result of the conducted research, recommendations were developed for determining the residual service life of welded joints operated for a long time in creep conditions.

The results of the performed research supplemented the training courses "Experimental methods in welding", and "Welding of steels and non-ferrous metals", which are taught to students at the National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute".

The results of the research were evaluated and recommended for implementation at JSC "Ukrainian Energy Machines".

The introduction substantiates the relevance of research tasks, provides scientific novelty, and forms the practical significance of the obtained results.

The first chapter presents an overview of the current state and development trends in the research of welded steam pipe joints, which operate for a long time under conditions of creep and low-cycle fatigue. The chapter also discusses the chemical composition and mechanical properties of steels used in the manufacture of steam pipe system components and their welded joints. Furthermore, the chapter establishes the main requirements for the structural condition and properties of welded joint structures, as well as their characteristics for monitoring reliability, quality, and determining residual resources.

In the second chapter, the methods, equipment, and materials used in the study and analysis of the structural phase state and metal properties of welded joints are described. Additionally, the chapter presents the improved methods of quantitative analysis of structural changes in the metal of the studied samples of welded joints cut from operating steam pipelines, which were conducted using optical and electron microscopy. The description of the developed computer program for the statistical analysis of metallographic images of metal welded joints of steam pipelines is given.

The third chapter discusses the improvement of quantitative assessment of structural changes in the metal of welded steam pipe joints and boilers. The results of the metallographic analysis of structural changes in the metal that occur during long-

term operation under conditions of creep and low-cycle fatigue are presented. The research was carried out on samples of welded joints made of 12X1MΦ and 15X1M1Φ steels with different service lives. During the analysis of the microstructure of various sections of welded joints, the relative content of structural-phase components and their distribution according to the coordinates of images were determined. A comparative analysis of the statistical characteristics of the distribution and content of structural components on welded joints' metal sections with different service lives was performed. The complexity of the boundaries contours of structural components was evaluated based on fractal analysis. The statistical analysis of the results of the metallographic study of microsections using the cutting line method made it possible to obtain distributions of the number of grains, their sizes, and distances between them. A scientifically-based description of structural changes in the metal of individual sections of welded joints is presented.

The structural and phase transformations in the metal of welded steam pipe joints that work for a long time in conditions of creep and fatigue are significantly affected by pearlite. Therefore, it is important to establish the level of inhomogeneity of pearlite in the structure of welded joints.

Fractal analysis of the pearlite grain boundaries was performed based on micro-grind images obtained. A comparative analysis of the fractal dimensions of the boundaries of structural components on the microslice images of the areas affected by the thermal zone of the weld metal and the base metal was conducted for different operating periods. The study and comparative analysis were conducted for the areas of the heat-affected zone, base metal, and weld metal. This enabled the possibility of evaluating the geometric complexity of the boundaries of structural components in the base metal of steam pipelines and their welded joints based on the analysis of statistical characteristics of the distribution of their fractal dimension to be substantiated.

Generalized methodical foundations have been developed for a well-founded fractal analysis of the boundaries of structural components of the metal of welded joints through the determination of the influence of the brightness of color (in the

HSV color model) and scale of measurement on fractal dimension. This enables a universal representation of the complexity of the contours of all structural components of the investigated micro-grind image and a well-founded choice of the threshold value for studying the boundaries of the main structural component of the structure, perlite.

The influence of the operating time of the steam pipeline on structural changes, expressed by an increase in fractal dimension and, accordingly, the complexity of the structure of the contours of structural components, has been confirmed.

Statistical analysis of the results of the assessment of the number of grains of structural components and their sizes for micro-grinds of the investigated metal, obtained by the method of intersecting straight lines, made it possible to create a scientifically substantiated basis for studying structural changes. It has been established that for evaluating the degree of influence of the operating time of the steam pipeline on structural changes, it is advisable to use the standard deviations from the average number of grains and their sizes.

The fourth chapter presents the research results on the structural and phase changes in the metal of the heat-affected zone of welded steam pipe joints after long-term exposure to operational loads under conditions of creep and low-cycle fatigue. Metallographic analysis was performed to study the structural and phase changes in the weld metal, as well as in the metal areas of incomplete recrystallization, normalization, fusion, and overheating of the thermally affected zone. The analysis was carried out on samples of welded joints that had been in service for more than 280,000 hours.

The comparative analysis of statistical characteristics of the studied features (such as the number of structural elements, their sizes, and distances between them) and the fractal analysis of the complexity of grain boundary contours of structural components of the thermally affected zone revealed differences in the areas of weld metal, overheating, normalization, and incomplete recrystallization.

An increase in the heterogeneity of the studied structural elements was revealed in the following sequence: weld metal area, overheating, normalization, and

incomplete recrystallization. It was found that the area of incomplete recrystallization is characterized by a change in structural heterogeneity in a wide range, from the smallest to the largest deviations from the law of uniform distribution.

The fifth chapter presents the results of a study on the influence of operational loads on the metal of welded steam pipe joints. The peculiarities of the influence of physical and chemical processes on structural and phase changes, mechanisms of creep and fatigue, as well as on operational characteristics, damage, and destruction of welded joints, were considered. The features and manifestations of brittle and fatigue failure processes were also revealed. The statistical characteristics of the studied features of the structural-phase composition of the metal after the destruction of welded joints were evaluated, and the practical use of methodical developments in the metallographic analysis of images of metal microslides was justified.

Permissible values of pore radii have been determined depending on the operating temperature and the expected service life of steam pipelines. This made it possible to supplement the methodological base for metallographic research of the structural phase state of the metal of welded joints.

Statistical characteristics of the number of grains, their sizes, and the distances between them were obtained for destroyed samples of welded joints, and the trends of their changes with the growth of the service life were determined. In this way, the methodical base for predicting the residual service life of welded joints has been fully supplemented.

Based on the results of the metallographic examination of the microsands of the samples by the method of intersecting lines, the main features for predicting the residual service life of welded steam pipe joints were determined.

Key words: steam pipelines, welded joints, heat-resistant pearlite steel, structural phase state, pearlite, ferrite, zone of thermal influence, metallographic analysis, statistical analysis, damageability, creep, crack, pore.

List of the applicant's publications

1. Garashchenko Y., Glushko A., Kobets O., Harashchenko O. Fractal analysis of structural and phase changes in the metal of welded steam pipe joints. *Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Springer, Cham, 2021. R. 31-40. DOI: 10.1007/978-3-030-77719-7_4.

2. Harashchenko O., Dmytryk V., Berezutskyi V., Syrenko T. Metallographic determination of the number and sizes of grains depending on structural and phase changes in the metal of welded steam pipe joints. *Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Springer, Cham, 2022. R. 384-392. DOI: 10.1007/978-3-031-06025-0_38.

3. Dmitrik V. V., Harashchenko Ye. S., Glushko A. V., Sokolova V. N., Syrenko T. A. Vosstanovitel'naya termoobrabotka paroprovodov i ikh svarnykh soyedineniy (obzor) [Restorative heat treatment of steam pipelines and their welded joints (review)]. *Avtomaticheskaya Svarka* [Automatic Welding], 2019, 1. pp.18-22.

4. Harashchenko Ye. S. Osobennosti primeneniya teploustoychivyykh staley dlya paroprovodov i elementov ikh sistem [Features of the use of heat-resistant steels for steam pipelines and elements of their systems]. *Visnik NTU «KHPÍ»: Seriya «Yenergetichní ta teplotekhnichní protsesi y ustatkuvannya»* [Bulletin of NTU "KhPI": Series "Energy and heat engineering processes and installation"], 2019. № 3 (1328). pp. 91-94.

5. Dmitrik V. V., Tsaryuk A. K., Harashchenko O. S., Sirenko T. O. Strukturniy stan ta vtomlyuvana poshkodzhuvaníst' zvarnikh z'êdnan' paroprovodív [Structural condition and fatigue damage of welded joints of steam pipelines]. *Avtomatichne zvaryuvannya* [Automatic Welding], 2020. № 6. pp. 17-22.

6. Harashchenko O. S., Dmitrik V. V., Sirenko T. O. Doslídzheniya strukturno-fazovogo stanu metalu zvarnikh z'êdnan' paroprovodív [Study of the structural and phase state of the metal of welded joints of steam pipelines]. *Visnik NTU «KHPÍ»: Seriya «Yenergetichní ta teplotekhnichní protsesi y ustatkuvannya»* [Bulletin of NTU "KhPI": Series "Energy and heat engineering processes and equipment"], 2021. № 2. pp. 38-45.

7. Dmitrik V. V., Harashchenko O. S., Berdníkova O. M. Vznachennya strukturno-fazovogo stanu zvarnikh z'êdnan' íz teplostíykikh perlítnikh staley z

vikoristannyam udoskonalenogo metodu analízu [Determination of the structural and phase state of welded joints made of heat-resistant pearlitic steels using an advanced analysis method]. *Avtomatichne zvaryuvannya* [Automatic Welding], 2022. № 6. S. 11-16.

8. Dmitrik V. V., Harashchenko O. S., Luchka A. P. Analíz strukturno-fazovogo stanu v metalí paroprovodív ta íkh zvarnikh z'êdnan' [Analysis of the structural phase state in the metal of steam pipelines and their welded joints]. *Yenergetika ta yelektrifikatsiya* [Energy and electrification]. 2020. № 7. pp. 52-60.

9. Harashchenko Ye. S. Osobennosti povrezhdayemosti svarnykh soyedineniy paroprovodov i elementov ikh system [Features of damageability of welded joints of steam pipelines and elements of their systems]. *Ínformatsiyní tekhnologii: nauka, tekhnika, tekhnologiya, osvita, zdorov'ya: tezi dopovídey XXXVII mízhnarodnoí naukovo-praktichnoí konferentsií MicroCAD-2019* [Information technologies: science, technology, technology, education, health: abstracts of reports of the XXVII international scientific and practical conference MicroCAD-2019], 15-17 travnya 2019r.: u 4 ch. CH. I. / za red. prof. Sokola Ê.I. Kharkiv: NTU «KHPI». pp. 287.

10. Harashchenko O. S., Sirenko T. O. Osoblivostí poshkodzhuvaností metalu zvarnikh z'êdnan' tríshchinami vtomi [Features of metal damage of welded joints by fatigue cracks]. *XV-Mízhnarodna naukovo-tekhníchna konferentsiya molodikh vchenikh ta fakhívtsív «Problemi suchasnoí yadernóy yenergetiki»* [XV International Scientific and Technical Conference of Young Scientists and Specialists "Problems of Modern Nuclear Energy"], Kharkiv, FTINT. 2020. pp. 51.

11. Dmitrik V. V., Harashchenko O. S. Osoblivostí zastosuvannya teplostíykikh staley dlya paroprovodív í yelementív íkh system [Features of the application of heat-resistant steels for steam pipelines and elements of their systems]. *XV-Mízhnarodna naukovo-tekhníchna konferentsiya «Yenergetichní ta teplotekhníchní protsesi y ustatkuvannya»* [XV-International Scientific and Technical Conference "Energy and Heat Engineering Processes and Equipment"], Kharkiv, NTU «KHPI» Tezi dopovídey. Vidavnitstvo «Líder», 2020. pp. 45-46.

12. Dmitrik V. V., Harashchenko O. S. Vivchennya strukturno-fazovikh zmín u zvarnikh z'êdnannyakh paroprovodív [Study of structural and phase changes in welded joints of steam pipelines]. *Ínformatsiyní tekhnologii: nauka, tekhnika,*

tekhnologíya, osvíta, zdorov'ya: tezi dopovídey XXVIII mízhnarodnoí naukovo-praktichnoí konferentsií MicroCAD-2020 [Information technologies: science, technology, technology, education, health: abstracts of reports of the XXVIII international scientific and practical conference MicroCAD-2020], 28-30 zhovtnya 2020 r. Kharkiv: NTU «KHPI». pp. 270.

13. Harashchenko O., Dmytryk V., Berezutskyi V., Syrenko T. Metallographic Determination of the Number and Sizes of Grains Depending on Structural and Phase Changes in the Metal. *5th International Conference on Design, Simulation, Manufacturing: The Innovation Exchange (DSMIE-2022) JUNE 7-10, 2022*: Poznan, Poland. P. 95.

14. Harashchenko O. S. Vznachennya kílkostí ta rozmirív zeren v metalí zvarnikh z'êdnan' paroprovodív v zalezhností víd termínu yekspluatatsií [Determination of the number and size of grains in the metal of welded joints of steam pipelines depending on the period of operation]. *XXV Mízhnarodna naukovo-praktichna konferentsiya magístrantív ta aspirantív «Teoretichní ta praktichní doslídzhennya molodikh naukovtsív» (01–03 grudnya 2021 roku): materialí konferentsií* [XV International Scientific and Practical Conference of Master's and Postgraduate Students "Theoretical and Practical Research of Young Scientists" (December 01–03, 2021): conference materials] / za red. prof. Ê.I. Sokola. Kharkív: NTU «KHPI», 2021. pp. 422-423.