

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

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

Кваліфікаційна наукова праця
на правах рукопису

Чень Сінлей

УДК 669.017+620.186.4

ДИСЕРТАЦІЯ

**НАДІЙНІСТЬ ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ ПАРОПРОВОДІВ
І РОТОРІВ ТУРБІН АЕС І ТЕС**

Спеціальність G8 – Матеріалознавство

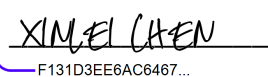
Галузь знань G – Інженерія, виробництво та будівництво

Подается на здобуття наукового ступеня доктора філософії

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

Чень Сінлей

Signed by:


F131D3EE6AC6467...

6/15/2026

Науковий керівник:

Дмитрик Віталій Володимирович,
доктор технічних наук, професор
кафедри зварювання НТУ «ХП»

Харків – 2026

АНОТАЦІЯ

Чень Сінлей. Надійність зварних з'єднань паропроводів і роторів турбін АЕС і ТЕС. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю G8 – Матеріалознавство (G – Інженерія, виробництво та будівництво). – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут» Міністерства освіти і науки України, м. Харків, 2026.

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.

Об'єкт дослідження: надійність зварних з'єднань паропроводів і роторів турбін АЕС і ТЕС.

Предмет дослідження: структурно-фазовий стан, фізико-механічні властивості і пошкоджуваність зварних з'єднань паропроводів; структура і механічні властивості зварних з'єднань роторів зі сталі 25X2НМФА та комбінованих зварних з'єднань роторів зі сталей 25X2НМФА і 20X3МВФА.

Дисертацію присвячено проведенню комплексних досліджень структурно-фазового стану і фізико-механічних властивостей зварних з'єднань паропроводів, які довготривало, понад 280 тис. год працюють в умовах повзучості і втоми. Також присвячено дослідженню вихідної структури зварних з'єднань роторів зі сталі 25X2НМФА і комбінованих зварних з'єднань роторів турбін АЕС і ТЕС, які виготовлені за удосконаленою технологією.

Обґрунтували, що структурно-фазовий стан зварних з'єднань паропроводів, які працюють понад 280 тис. год в умовах повзучості і втоми є головним фактором, який визначає надійність їх роботи. Дослідження особливостей структурно-фазового стану надало можливість виявити стійкість металу зварних з'єднань проти утворення його пошкоджуваності в умовах

зростаючих робочих навантажень. Запропонували ряд нових і удосконалених методів контролю якості металу зварних з'єднань, впровадження яких дозволить внести уточнення в надійність їх роботи.

Обґрунтували залежність фізико-механічних властивостей зварних з'єднань паропроводів і роторів турбін від їх структурно-фазового стану, що доцільно для підвищення оцінки надійності їх роботи.

При проведенні досліджень були задіяні сучасні методи аналізу і обладнання а також метод моделювання температурного режиму, в який внесли відповідні уточнення.

У вступі обґрунтована актуальність роботи, наведена її мета і задачі дослідження, показано зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами, наведені основні задачі дослідження, а також методи і методики, що використовувалися, наукова новизна та сформульовано практичне значення отриманих результатів.

У першому розділі, шляхом огляду відповідних результатів досліджень вітчизняних і зарубіжних вчених, обґрунтували перспективність вирішення задач спрямованих на досягнення мети роботи.

У другому розділі надається опис обладнання, матеріалів, а також методів і методик, задіяних в дослідженнях. Структурно-фазовий стан зварних з'єднань досліджували шляхом використання методів оптичної і електронної мікроскопії, а також поверхневого мікрозондового аналізу. Для дослідження механізму пошкоджуваності використовували удосконалені методики визначення пор повзучості і тріщин втоми.

Третій розділ присвячений дослідженню пошкоджуваності зварних з'єднань паропроводів стосовно їх напрацювання в умовах повзучості і втоми понад 280 тис. год.

Четвертий розділ містить результати визначення надійності і залишкового ресурсу довготривало, понад 280 тис. год працюючих паропроводів.

П'ятий розділ присвячений теоретичному і практичному обґрунтуванню

підвищення експлуатаційних характеристик зварних з'єднань роторів парових турбін АЕС і ТЕС.

У висновках узагальнено основні результати наукового дослідження отримані в процесі розв'язання поставлених у дисертаційній роботі наукових завдань. Сформульовано основні наукові та практичні результати роботи.

За результатами досліджень отримано такі наукові результати:

– отримали подальший розвиток дослідження впливу структурно-фазового стану на пошкоджуваність металу зварних з'єднань паропроводів, які відпрацювали в умовах повзучості і втоми понад 280 тис. год.;

– виявлено особливості формування ферито-карбідної суміші в структурі зварних з'єднань паропроводів стосовно їх напрацювання понад 280 тис. год.;

– удосконалена технологія виготовлення зварних з'єднань паропроводів і роторів турбін ТЕС і АЕС, що дозволило отримувати зварні з'єднання з підвищеною якістю їх вихідної структури.

Практичне значення отриманих результатів полягає в тому, що результати досліджень, які наведені в дисертаційній роботі використовуються для підвищення надійності і визначення ресурсу зварних з'єднань паропроводів і роторів турбін АЕС і ТЕС. До результатів, які мають практичну цінність можна віднести:

– результати досліджень структурно-фазового стану металу зварних з'єднань паропроводів, які працюють в умовах повзучості і втоми понад 280 тис. год. Дані результати надають можливість визначити надійність їх роботи, а також їх залишковий ресурс;

– отримання зварних з'єднань паропроводів і роторів турбін з підвищеними якісними показниками їх вихідної структури вперше надало можливість підвищити надійність роботи зварних з'єднань в умовах збільшення робочих навантажень;

– удосконалення технології зварювання роторів і паропроводів дозволило вперше отримати зварні з'єднання, механічні властивості яких є вищими від аналогічних механічних властивостей зварних з'єднань, виготовлених за

штатними технологіями;

– виявлення особливостей структурно-фазових змін в металі зварних з'єднань паропроводів стосовно їх напрацювання в умовах повзучості і втоми понад 280 тис. год, надало можливість використовувати заходи, які гальмують проходження таких змін, що доцільно для підвищення надійності зварних з'єднань;

– результати виконаних досліджень доповнили навчальні курси «Фізико-хімічні процеси в зварних з'єднаннях», «Металогія зварних з'єднань», «Основи наукових досліджень», «Металознавство і термічна обробка зварних з'єднань», які викладаються у Національному технічному університеті «Харківський політехнічний інститут». Матеріали досліджень знайшли використання в лекціях, дипломних і курсових проектах;

– результати досліджень рекомендовано до впровадження на ТЕЦ-5, ТЕЦ-3, ТЕЦ (м. Зміїв), АТ «Українські енергетичні машини», а також в навчальний процес НТУ «ХПІ».

Ключові слова: структурно-фазовий стан, зварні з'єднання, паропроводи, ротори, ресурс, пошкоджуваність, повзучість, фізико-механічні властивості, втома, карбіди, аустніт, перліт, надійність, бейніт.

ABSTRACT

Chen Xinlei. Reliability of welded joints of steam lines and turbine rotors of NPP and TPP. – Qualifying scientific work as a manuscript.

Thesis for the degree of Doctor of Philosophy in the G8 specialty – Materials science (G – Engineering, manufacturing, and construction). – National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute» of the Ministry of Education and Science of Ukraine, Kharkiv, 2023.

The work was performed at the Welding department of the National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute» of the Ministry of Education and Science of Ukraine. The text of the thesis paper may be found in the library of the National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute» at: 61002, Kharkiv, Kyrpychova str., 2.

Object of study: reliability of welded joints of steam lines and turbine rotors at NPPs and TPPs.

Subject of research: structural-phase state, physical and mechanical properties and damageability of welded joints of steam lines; structure and mechanical properties of welded joints of 25H2NMFA steel rotors and combined welded joints of 25H2NMFA and 20H3MVFA steel rotors.

The dissertation is devoted to comprehensive studies of the structural-phase state and physical and mechanical properties of welded joints of steam pipelines that operate for a long time, more than 280 thousand hours, under creep and fatigue conditions. The paper also investigates the initial structure of welded joints of 25X2HMΦA steel rotors and combined welded joints of NPP and TPP turbine rotors made using advanced technology.

It has been substantiated that the structural-phase state of welded joints of steam pipelines operating for more than 280 thousand hours under creep and fatigue conditions is the main factor determining the reliability of their operation. The study of the structural-phase state features made it possible to identify the resistance of welded joints metal against the formation of its damage under increasing operating

loads. A number of new and improved methods for quality control of welded joint metal have been proposed, the implementation of which will allow for refinements in the reliability of their operation.

The dependence of the physical and mechanical properties of welded joints of steam lines and turbine rotors on their structural and phase state was substantiated, which is advisable for improving the assessment of their reliability.

Modern methods of analysis and equipment, as well as the method of temperature modelling, were used in the research, which was updated accordingly.

The introduction substantiates the relevance of the work, presents its purpose and objectives, shows the connection of the work with scientific programmes, plans, topics, presents the main objectives of the study, as well as the methods and techniques used, the scientific novelty and formulates the practical significance of the results obtained.

In the first chapter, by reviewing the relevant research results of domestic and foreign scientists, the prospects for solving the tasks aimed at achieving the goal of the work are substantiated.

The second chapter describes the equipment, materials, methods and techniques used in the research. The structural and phase state of welded joints was investigated using optical and electron microscopy, as well as surface microprobe analysis. Advanced methods for determining creep pores and fatigue cracks were used to study the damage mechanism.

The third chapter is devoted to the study of damage to welded joints of steam pipelines in relation to their operating time under creep and fatigue conditions of more than 280 thousand hours.

The fourth chapter contains the results of determining the reliability and residual life of long-term (over 280 thousand hours) operating steam pipelines.

The fifth chapter is devoted to the theoretical and practical justification of improving the performance of welded joints of steam turbine rotors at NPPs and TPPs.

The conclusions summarise the main findings of the research obtained in the course of addressing the research objectives set out in the thesis. The main scientific

and practical findings of the work are outlined.

The research yielded the following scientific results:

- further research was conducted into the influence of the structural-phase state on the damage susceptibility of the metal in welded joints of steam pipes that have operated under creep and fatigue conditions for over 280,000 hours;

- the characteristics of the formation of a ferrite-carbide mixture in the structure of welded joints of steam pipes were identified in relation to their operating life of over 280,000 hours;

- the manufacturing technology for welded joints in steam pipes and turbine rotors for thermal power stations and nuclear power stations has been improved, enabling the production of welded joints with an enhanced quality of their initial structure.

The practical significance of the results obtained lies in the fact that the research findings presented in the thesis are used to improve the reliability and determine the service life of welded joints in steam pipes and turbine rotors for nuclear and thermal power stations. The results of practical value include:

- research findings on the microstructural and phase state of the metal in welded joints of steam pipes operating under creep and fatigue conditions for over 280,000 hours. These results make it possible to determine the reliability of their operation, as well as their remaining service life;

- the production of welded joints for steam pipes and turbine rotors with improved quality characteristics of their initial structure has, for the first time, made it possible to enhance the reliability of welded joints under conditions of increased operational loads;

- improvements in the welding technology for rotors and steam pipes have, for the first time, enabled the production of welded joints whose mechanical properties exceed those of welded joints manufactured using standard technologies;

- the identification of the characteristics of structural and phase changes in the metal of steam pipe welded joints in relation to their service life under creep and fatigue conditions exceeding 280,000 hours has made it possible to implement measures that

inhibit the progression of such changes, which is beneficial for improving the reliability of welded joints;

– the results of the research conducted have supplemented the courses ‘Physico-chemical processes in welded joints’, ‘Metallography of welded joints’, ‘Fundamentals of scientific research’, ‘Metallurgy and Heat Treatment of Welded Joints’, which are taught at the National Technical University ‘Kharkiv Polytechnic Institute’. The research materials have been utilised in lectures, dissertations and coursework;

– the research results have been recommended for implementation at TPP-5, TPP-3, TPP (Zmiiv), JSC ‘Ukrainian Energy Machines’, as well as in the teaching process at NTU ‘KhPI’.

Keywords: structural and phase state, welded joints, steam lines, rotors, service life, damage, creep, physical and mechanical properties, fatigue, carbides, austenite, pearlite, reliability, bainite.

Список публікацій здобувача

Наукові праці, які відображають основні наукові результати дисертації:

1. Chen Xinlei. Improving the output quality of steam turbine welded rotors for nuclear power plants / Dmitrik V. V., Chen Xinlei, Kasianenko I. V., Ustyuzhyn I. B. // Problems of atomic science and technology. – 2025. – №2(156). – P. 91–96. (A) <https://doi.org/10.46813/2025-156-091>

2. Chen Xinlei. Features of damage to welded joints of steam pipelines during long-term operation / Dmytryk V. V., Balytskyi O. I., Chen X. L., Kasyanenko I. V. // Strength of materials. – 2025. – Vol. 57. – Iss. 3. – P. 479–486. (A) DOI: 10.1007/s11223-025-00781-6

3. Chen Xinlei. Effects of structural and phase state on the damageability of welded joints in long-term operated steam pipes / Dmytryk V. V., Poznyakov V. D., Chen X. L., Kasyanenko I. V. & Pogribnyi M. A. // Strength of materials. – 2026. – Vol. 58. – P. 76–83. (A) <https://doi.org/10.1007/s11223-026-00871-z>

Статті у періодичних наукових виданнях, що увійшли до переліку наукових фахових видань України:

4. Чень Сінґлей Проблема оцінки надійності і залишкового ресурсу довготривало працюючих зварних з'єднань паропроводів ТЕС / Дмитрик В. В., Чень Сінґлей, О. П. Усатий, І. В. Касьяненко // Вісник НТУ "ХПІ": Серія "Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування". – 2024. – № 2. – С. 31–36. (Б) doi: 10.20998/2078-774X.2024.02.03

5. Чень Сінґлей Вплив структурно-фазового стану на пошкоджуваність зварних з'єднань довготривало експлуатованих паропроводів / Дмитрик В. В., Позняков В. Д., Чень С. Л., Касьяненко І. В., Погрібний М. А. // Проблеми міцності. – 2026. – № 1. – С. 93-102. (А)

6. Chen Xinlei. Features of damage to welded joints of steam pipelines during long-term operation / Dmytryk V. V., Balytskyi O. I., Chen X. L., Kasyanenko I. V. // Strength of materials. – 2025. – Vol. 57. – Iss. 3. – P. 479–486. (A) DOI: 10.1007/s11223-025-00781-6

7. Чень Сінълей Підвищення якісних характеристик зварного з'єднання комбінованого ротора // Дмитрик В. В., Чень Сінълей, Касьяненко І. В., Гаращенко О. С., Платухін О. Л. // Автоматичне зварювання. – 2026. – № 1. – С. 58–63. (Б) <https://doi.org/10.37434/as2026.01.07>

8. Chen Xinlei. Increasing the reliability of welded joints of steam pipelines under creep and fatigue conditions / Dmitrik V., Xinlei C. and Kasianenko I. // Journal of mineral and material science (JMMS). – 2025. – Vol. 6. – Iss. 1. DOI: 10.54026/JMMS/1106

9. Chen Xinlei. Structure and damageability of welded joints made of heatresistant steels / Dmitrik V., Xinlei C. and Kasianenko I. // Journal of mineral and material science (JMMS). – 2025. – Vol. 6. – Iss. 2. DOI: 10.54026/JMMS/1111

Опубліковані праці, апробаційного характеру:

10. Чень Сінълей Підвищення якості вихідної структури зварних роторів парових турбін АЕС / Дмитрик В. В., Лей Сінъ, Касьяненко І. В. // XXI міжнародна конференція з фізики радіаційних явищ і радіаційного матеріалознавства. Тези доповідей 23-25 вересня 2024 р., Харків, Україна. – С. 120–121.

11. Чень Сінълей Особливості використання нових теплостійких сталей для об'єктів ТЕС і їх зварних з'єднань / Чень Сінълей, Дмитрик В. В., Касьяненко І. В. // XVIII Міжнародна науково-практична конференція магістрантів та аспірантів «Теоретичні та практичні дослідження молодих вчених» (19–22 листопада 2024 року): матеріали конференції / за ред. проф. Є.І. Сокола. – Харків : НТУ «ХПІ», 2024. – С. 772–773.

12. Чень Сінълей Підвищення фізико-механічних властивостей зварних з'єднань роторів турбін АЕС / Дмитрик В. В., Чень Сінълей // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: тези доповідей XXXIII міжнародної науково-практичної конференції MicroCAD-2025, 14-17 травня 2025 р. / за ред. проф. Сокола Є.І. – Харків: НТУ «ХПІ». – С. 377.

13. Chen Xinlei. Improving the output quality of steam turbine welded rotors for nuclear power plants / Dmitrik V. V., Xinlei Chen, Kasianenko I. V. // Наукові праці

XXIII конференції з фізики високих енергій та ядерної фізики, [08-10 квітня 2025 р., м. Харків] / НАН України, Нац. наук. центр "Харків. фіз.-техн. ін-т", Ін-т фізики високих енергій і ядер. фізики. – Харків : ННЦ ХФТІ, 2025. – С. 184–186.

14. Чень Сінълей Зменшення вихідної структурної неоднорідності зварних з'єднань із теплостійких сталей / Дмитрик В. В., Чень Сінълей, Касьяненко І. В. // Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем (КЗЯТПС – 2025) : матеріали тез доповідей XV Міжнародної науково-практичної конференції (м. Чернігів, 22–23 травня 2025 р.) : у 2 т. / Національний університет «Чернігівська політехніка» [та ін.] ; відп. за вип.: Приступа Анатолій Леонідович [та ін.]. – Чернігів: НУ «Чернігівська політехніка», 2025. – Т. 2. – С. 121.

15. Чень Сінълей Оцінка надійності зварних з'єднань паропроводів, довготривало працюючих в умовах повзучості / Дмитрик В. В., Касьяненко І. В., Чень Сінълей // Зварювання та споріднені технології для відновлення України: Тези допов. конф. під ред. О.Т. Зельніченка. Київ: ТОВ «Видавничий дім «ПАТОН», 2025. – С. 18–20.

16. Чень Сінълей Оцінка надійності і ресурсу зварних з'єднань паропроводів довготривало працюючих в умовах повзучості / Дмитрик В. В., Касьяненко І. В., Чень Сінълей // Збірник матеріалів п'ятої міжнародної конференції «Інноваційні технології та інжиніринг у зварюванні PolyWeld – 2025». – Київ : КПІ імені Ігоря Сікорського, 2025. – 220 с. – С. 23–25.