



ЗАТВЕРДЖУЮ

Директор Фізико-механічного інституту
ім. Г. В. Карпенка НАН України
академік НАН України
Зіновій НАЗАРЧУК

“10” 06 2025 р.

ВИТЯГ

із протоколу № 1 засідання наукового семінару
“Проблеми матеріалознавства та інженерії поверхні металів”
Фізико-механічного інституту ім. Г. В. Карпенка НАН України
від 04 червня 2025 р.

ПРИСУТНІ: чл.-кор. НАН України, д.т.н., проф. І. М. Дмитрах, чл.-кор. НАН України, д.т.н., проф. О. І. Звірко, д.т.н., проф. І. М. Погрелюк, д.т.н., проф. О. З. Студент, д.т.н., проф. О. П. Осташ, д.т.н. проф. Г. М. Никифорчин, д.т.н., проф. Я. Л. Іваницький, д.т.н., проф. О. Є Балицький, д.т.н., проф. М. М. Студент, д.т.н., ст.н.с. А. М. Сиротюк, д.т.н., старш. досл. Г. В. Кречковська, д.т.н., ст.н.с. С. А. Корній, д.т.н., ст. досл., В. С. Труш, д.т.н., ст.н.с. В. А. Винар, к.т.н., ст.н.с. Х. Б. Василів, к.т.н., ст. досл. М. І. Греділь, к.т.н., ст. досл. В. М. Гвоздецький, к.т.н., ст. досл. О. В. Максимів, к.т.н., ст.н.с. В. І. Кирилів, к.т.н., старш. досл. Р. В. Чепіль, к.т.н. Л. М. Свірська, к.т.н. ст. досл. С. М. Лаврись, м.н.с. П. Р. Соловей, м.н.с. Д. О. Дем'янчук, аспірант Н. Й. Сободош.

Всього на засіданні присутні 26 осіб.

З присутніх – чотирнадцять докторів наук та вісім кандидатів наук – фахівці за профілем представленої дисертації.

Головувала на засіданні – д.т.н., проф. Погрелюк Ірина Миколаївна.

СЛУХАЛИ:

Наукову доповідь аспіранта Фізико-механічного інституту ім. Г. В. Карпенка НАН України Цибайла Івана Олександровича за матеріалами дисертації «Відновлення структури і властивостей тривало експлуатованої сталі 12Х1МФ парогону ТЕС за модифікованим режимом термічного оброблення», поданої на здобуття наукового ступеня доктора філософії з галузі знань 13 – Механічна інженерія за спеціальністю 132 – Матеріалознавство.

Тему дисертаційної роботи затверджено на засіданні Вченої ради Фізико-механічного інституту ім. Г. В. Карпенка НАН України 24 грудня 2021 р., протокол № 13 та уточнено 20 лютого 2025 р., протокол № 1 у наступній редакції «Відновлення механічних властивостей тривало експлуатованої сталі 12Х1МФ парогону ТЕС за модифікованим режимом термічного оброблення».

Науковий керівник – д.т.н., ст. досл. Кречковська Галина Василівна.

Запитання та зауваження за темою дисертації ставили: д.т.н., проф. О. П. Остап, к.т.н., старш. досл. Р. В. Чепіль, чл.-кор. НАН України, д.т.н., проф. І. М. Дмитрах, д.т.н., проф. І. М. Погрелюк, д.т.н., ст. досл., В. С. Труш, д.т.н., проф. Я. Л. Іваницький, на які І. О. Цибайло дав чіткі та обґрунтовані відповіді, що свідчить про його високий фаховий рівень та глибоке знання предмету досліджень і самостійність виконання наукової роботи.

В обговоренні дисертації взяли участь: д.т.н., проф. О. П. Остап, д.т.н., проф. І. М. Погрелюк, д.т.н., проф. Г. М. Никифорчин, д.т.н., проф. О. З. Студент, які позитивно оцінили отримані автором результати, підкреслили актуальність роботи, її новизну та практичну цінність.

УХВАЛИЛИ:

ВИСНОВОК

про наукову новизну, теоретичне та практичне значення результатів дисертації аспіранта Фізико-механічного інституту ім. Г. В. Карпенка НАН України Івана Олександровича Цибайла на тему «Відновлення структури і властивостей тривало експлуатованої сталі 12Х1МФ парогону ТЕС за модифікованим режимом термічного оброблення», поданої на здобуття наукового ступеня доктора філософії з галузі знань 13 – Механічна інженерія за спеціальністю 132 – Матеріалознавство

1. Актуальність теми

Енергетичне обладнання значною мірою є зношене. Важливим завданням для галузі є оцінювання поточного технічного стану металу тривало експлуатованих елементів конструкцій ТЕС та пошук шляхів продовження їх ресурсу. Гини парогонів експлуатуються у складних температурно-силових умовах, і належать до відповідальних елементів з високим рівнем ризику для персоналу та довкілля за втрати їх цілісності. За комплексного впливу експлуатаційних чинників гини головних парогонів поступово втрачають здатність витримувати робочі навантаження через деградацію структури конструкційних сталей, виникнення розпорошеної пошкодженості та зниження їх механічних властивостей, що врешті-решт завершується їх руйнуванням. Крім того, під час тривалої експлуатації за впливу високотемпературної пари, слід враховувати негативний вплив наводнювання металу труб, яке за підвищених температур інтенсифікує дифузійний перерозподіл елементів легування і, як наслідок, структурні перетворення, що визначають фізико-механічні властивості теплотривких сталей.

Проблема відновлення властивостей теплотривких сталей не втрачає своєї актуальності. Перспективу застосування повторного термічного оброблення для відновлення структури і механічних властивостей експлуатованих сталей, важливо апробувати на гинах головних парогонів ТЕС, які максимально уразливі до впливу експлуатаційних чинників. Це передбачає обґрунтування ефективності режиму відновлювального термічного оброблення, спрямованого на покращення механічних властивостей сталі після тривалої експлуатації в розтягненій зоні гину з визначенням схильності відновленої сталі до негативного впливу водню, абсорбція якого металом

неминуча за тривалої експлуатації. Отже, дослідження матеріалознавчих аспектів деградації теплотривких сталей з аналізом закономірностей зміни їх механічних характеристик внаслідок тривалої експлуатації в глинах парогонів ТЕС та пошук шляхів подовження їхнього ресурсу залишаються актуальними завданнями сучасного матеріалознавства і з наукової, і з прикладної точок зору.

2. Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Дисертаційна робота виконувалась в рамках науково-дослідних програм з оцінювання структурно-механічного стану металу об'єктів енергетичного комплексу, які були включені до плану наукової та науково-технічної діяльності відділу діагностики корозійно-водневої деградації матеріалів Фізико-механічного інституту ім. Г. В. Карпенка НАН України в рамках бюджетних тем НАН України «Дослідження ролі водневого чинника в експлуатаційній деградації конструкційних сталей» № держреєстрації 0121U108961, 2021...2023 рр., «Дослідження закономірностей розвитку пошкоджень в тривало експлуатованих конструкційних сталях за впливу різних за природою наводнювальних середовищ» № держреєстрації 0124U000911, 2023...2026 рр. та низки госпдоговорів, в яких автор брав участь як виконавець.

3. Наукова новизна.

Для відновлення властивостей теплотривкої сталі використано режим дворазової нормалізації з наступним відпуском, і вперше обґрунтовано тривалість (150 хв) витримування зразків за вищої (1100°C) температури аустенітизації та показано недоцільність її подовження.

Встановлено, що після застосування до тривало експлуатованої сталі обґрунтованого режиму відновлювального термічного оброблення відсоток великих зерен у структурі сталі зменшився, а малих – зріс по всій товщині стінки труби, що є необхідною передумовою підвищення її опору повзучості.

Обґрунтовано правомірність застосування запропонованого режиму термічного оброблення для зменшення відсотка карбідів на межах зерен як необхідної передумови підвищення когезивної міцності між суміжними зернами у відновленій сталі.

Вперше виявлено особливість декогезії карбідів вздовж меж зерен в експлуатованій сталі від матриці у вигляді нанорозмірних відколів (до 300 нм) на дні ямок в'язкого рельєфу зламу зразка, випробуваного на розтяг. Ці фрагменти карбідів вважали доказом часткового збереження (навіть після експлуатації сталі) когезії крупних карбідів з матрицею, яка остаточно порушувалась тільки під час випроб зразка на розтяг. Навіть точково збережена когезія між ними забезпечила шляхи для дифузії елементів, необхідні для розчинення карбідів під час відновлювального термічного оброблення.

Експериментально продемонстровано підвищення механічних властивостей (твердості, міцності, пластичності та опору крихкому руйнуванню) після модифікованого режиму відновлювального термічного оброблення експлуатованої сталі в усьому перерізі стінки труби, а також їх відповідність галузевим вимогам.

Вперше показано, що додаткове наводнювання відновленої сталі хоч дещо і знизило позитивний ефект її відновлення за характеристиками міцності і пластичності, але повністю не нівелювало його. Як наслідок, навіть після наводнювання характеристики відновленої сталі продовжували відповідати регламентним вимогам, тоді як характеристики експлуатованої сталі не задовольняли їх навіть без наводнювання.

Розкрито особливості механізму руйнування експлуатованої та відновленої сталі за випроб на розтяг та виявлено фрактографічні ознаки впливу додаткового

наводнювання. Попри в'язкий характер руйнування обох варіантів сталі, наводнювання експлуатованої сталі супроводжувалось появою значної кількості кризьзеренних відколів, ініційованих дефектами (як пастами для водню) на місці великих карбідів, розташованих на стиках трьох зерен, тоді як у відновленій сталі ці відколи ініціювали лише великі неметалеві включення, відсоток яких у робочому перерізі зразка був незначним.

4. Теоретичне та практичне значення результатів дисертації.

Модифікований режим термічного оброблення запропоновано використовувати для відновлення властивостей теплотривкої сталі, тривало експлуатованої на гині головного парогону ТЕС. Для обґрунтування цього режиму використано метал з розтягнутої зони гину з максимальними ознаками деградації структури і механічних властивостей, порівняно з іншими зонами. Порівнянням структури та властивостей сталі після експлуатації та запропонованого режиму відновлювального термічного оброблення доведено суттєве усунення наслідків деградації сталі і підтверджено відповідність характеристик відновленої сталі вимогам чинних регламентних документів.

5. Використання результатів роботи.

Запропонований режим термооброблення рекомендовано для застосування у ремонтній практиці, зокрема на підприємстві ВП «Галпремерго» АТ «ДТЕК Західенерго». Отримані результати слугують основою для створення алгоритмів відновлення елементів з докритичною деградацією.

6. Особиста участь автора в отриманні наукових та практичних результатів.

Автор самостійно здійснив експериментальні дослідження, проаналізував структурні та механічні характеристики експлуатованої і відновленої сталі, сформулював висновки щодо ефективності відновлювального термооброблення. У публікаціях зі співавторами автору належать ключові положення щодо з'ясування особливостей структурних перетворень в теплотривких сталях внаслідок експлуатації; виявлення та аналіз закономірностей зміни механічних характеристик та механізмів руйнування деградованої теплотривкої сталі; аналіз режимів термічного оброблення та обґрунтування запропонованого режиму, придатного для відновлення структури та властивостей сталі, експлуатованої на ділянці гину парогону; дослідження впливу наводнювання на зміну властивостей теплотривкої сталі після експлуатації та відновлювального термічного оброблення

7. Перелік публікацій за темою дисертації із зазначенням особистого внеску здобувача.

1. Tsybailo I. O. Substantiation of modes of restorative heat treatment of heat-resistant steel of TPP steam pipeline bend. *Materials Science*. 2024. Vol. 60, No. 2. P. 103–107. DOI: 10.1007/s11003-025-00874-2 (Scopus, WoS, Q3).

2. Tsybailo I. O., Krechkovska H. V. The structural-mechanical state of 12Kh1MF steel of TPP pipeline bend after long-term operation. *Materials Science*. 2023. Vol. 59, No. 3. P. 320–327. DOI: 10.1007/s11003-024-00780-z (Scopus, WoS, Q3). *(Особистий внесок здобувача: дослідження структури і механічних властивостей теплотривкої сталі головного парогону)*.

3. Krechkovska H., Tsybailo I., Dzioba I., Student O., Pała R. Restoration of properties of heat-resistant steel after long-term operation in steam pipeline bends of TPP by heat treatment. *Metals*. 2025. Vol. 15, No. 1. Article 21. DOI: 10.3390/met15010021 (Scopus, WoS, Q2). *(Особистий внесок здобувача: дослідження та аналіз властивостей теплотривкої сталі після відновлення термічним обробленням)*.

4. Tsybailo I., Krechkovska H., Student O., Svirskа L. Structural aspects of the degradation of the bend stretched zone. *Procedia Structural Integrity*. 2024. Vol. 59. P. 307–317. DOI: 10.1016/j.prostr.2024.04.044 (Scopus). *(Особистий внесок здобувача: фрактографічний аналіз зламів та дослідження особливостей деградації структури теплозв'язаної сталі в розтягненій зоні гину парогону)*.

5. Tsybailo I. O., Svirskа L. M., Solovei P. R., Krechkovska S. R., Datsko B. M., Student O. Z. Use of electrolytic hydrogenation to visualize the damage of long-term operated heat-resistant steel of TPP steam pipelines. *Materials Science*. 2023. Vol. 58, No. 5. P. 602–608. DOI: 10.1007/s11003-023-00705-2 (Scopus, WoS, Q3). *(Особистий внесок здобувача: Аналіз механізму руйнування теплозв'язаної сталі експлуатованої у глинах за впливу електролітичного наводнювання)*.

6. Vorobel R., Student O., Ivasenko I., Maruschak P., Krechkovska H., Zvirko O., Berehulyak O., Mandziy T., Tsybailo I., Solovei P. Development of a method for computer processing of fractographic images to assess the cohesion of inclusions to the matrix in the weld metal after its operational degradation and hydrogenation. *Materialia*. 2024. Article No. 102074. DOI: 10.1016/j.mtla.2024.102074 (Scopus, WoS, Q2). *(Особистий внесок здобувача: Виділення та аналіз визначальних елементів структури теплозв'язаної сталі у вихідному стані та після експлуатації на парогонках ТЕС, вичитування й редагування)*.

7. Krechkovska H., Student O., Zvirko O., Hredil M., Svirskа L., Tsybailo I., Solovei P. Substantiation of the critical structural and mechanical state of low-alloy heat-resistant steel from steam pipelines of thermal power plant. *Engineering Failure Analysis*. 2023. Vol. 50. Article No. 107359. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2023.107359 (Scopus, WoS, Q1). *(Особистий внесок здобувача: аналіз структурних особливостей теплозв'язаної сталі після експлуатаційної деградації)*.

8. Krechkovska H., Student O., Hredil M., Tsybailo I., Holovchuk M., Shtoyko I. Visualization of fractographic signs of operational degradation of heat-resistant steel for estimating its actual structure-mechanical state. *Procedia Structural Integrity*. 2022. Vol. 42. P. 1398–1405. DOI: 10.1016/j.prostr.2022.12.178 (Scopus, WoS). *(Особистий внесок здобувача: аналіз структурно-механічного стану теплозв'язаної сталі після експлуатаційної деградації)*.

9. Krechkovska H., Tsybailo I., Student O., Svirskа L., Korniy S. Restoration of steel properties after long-term operation at bends of TPP steam pipelines by heat treatment. *Book of Abstracts. 24th European Conference on Fracture, ECF24, August 26–30, 2024, Zagreb, Croatia*. 2024. P. 405. *(Особистий внесок здобувача: отримання та аналіз результатів дослідження властивостей тривало експлуатованої теплозв'язаної сталі після відновлювальної термічної обробки)*.

10. Krechkovska H., Tsybailo I., Student O. Sensitivity to hydrogenation of steel used in the bend of a TPP steam pipeline and after its restorative heat treatment. *Proceedings of the 12th Annual Conference of Society for Structural Integrity and Life (DIVK12), November 17–19, 2024, Belgrade, Serbia*. P. 172. *(Особистий внесок здобувача: дослідження впливу наводнювання експлуатованої та відновленої термічним обробленням теплозв'язаної сталі)*.

11. Krechkovska H., Student O., Hredil M., Tsybailo I., Holovchuk M., Shtoyko I. Visualization of fractographic signs of operational degradation of heat-resistant steel for estimating its actual structure-mechanical state. *Book of Abstracts. European Conference on Fracture (ECF23), 27 June – 02 July 2022, Madeira*. 2022. P. 449. *(Особистий внесок здобувача: аналіз структурно-механічного стану теплозв'язаної сталі після експлуатаційної деградації)*.

здобувача: аналіз структурно-механічного стану теплозривкової сталі після експлуатаційної деградації).

12. Tsybailo I. O., Kurylas M. S., Zvirko O. I., Krechkovska H. V. Hydrogen influence on microstructure and properties of structural steel under operation. Тези доповідей ІІІ Всеукраїнської конференції молодих учених «Сучасне матеріалознавство. Матеріали та технології, СММТ-2021», 2021, Київ, Україна. Р. 36. (Особистий внесок здобувача: аналіз впливу наводнювання на мікроструктуру та властивості теплозривкової сталі).

13. Tsybailo I., Svirskaya L., Solovei P., Krechkovska H., Datsko B., Student O. Influence of electrolytic hydrogenation on the structural and mechanical state of heat-resistant steels. Book of Abstracts. XVI International Conference "Problems of Corrosion and Corrosion Protection of Materials" (Corrosion-2022), 15–16 November 2022, Lviv, Ukraine. Р. 34. (Особистий внесок здобувача: аналіз механізму руйнування теплозривкової сталі у вихідному стані та після експлуатації у глинах парогонів за впливу електролітичного наводнювання).

14. Студент О. З., Кречковська Г. В., Свірска Л. М., Цибайло І. О., Соловей П. Р., Кречковська С. Р. Прогнозування роботоздатності теплозривкової сталі після тривалої експлуатації на головному парогоні ТЕС. Збірник абстрактів ІХ Міжнародної науково-практичної конференції «Теоретичні і експериментальні дослідження в сучасних технологіях матеріалознавства та машинобудування, ТЕРММ-2023», 30 травня – 01 червня 2023, Луцьк, Україна. С. 61–62. (Особистий внесок здобувача: аналіз структурних змін в теплозривковій сталі після тривалої експлуатації на парогоні).

15. Krechkovska H., Shtoyko I., Tsybailo I., Solovey P., Krechkovska S. Sensitivity of characteristics of heat-resistant steel to operational degradation. Тези доповідей ІІ Міжнародної науково-практичної конференції «Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем, КЗЯТПС-2022», 26–27 травня 2022 р., Чернігів, Україна. Т. 2. Р. 32. (Особистий внесок здобувача: аналіз впливу деградації теплозривкової сталі на її мікроструктуру та властивості).

16. Krechkovska H., Student O., Tsybailo I. Visualization of damage to heat-resistant steel after long-term operation on the main steam pipeline for fractographic signs of its destruction. Abstracts of the 8th International Materials Science Conference, HighMatTech-2023, October 2–6, 2023, Kyiv, Ukraine. Р. 124. (Особистий внесок здобувача: аналіз експлуатаційної пошкодженості теплозривкової сталі за структурними показниками).

ВВАЖАТИ: дисертаційну роботу завершеною науковою працею, що містить науково-обґрунтовані результати, є актуальною, має наукову новизну, теоретичне та практичне значення. За матеріалами дисертаційної роботи опубліковано 16 наукових праць, 8 з них статті, надруковані у наукових виданнях, що входять до баз даних Scopus та Web of Science. Дисертація відповідає вимогам наказу МОН України від 12.01.2017 р. № 40 "Про затвердження вимог до оформлення дисертації" (із змінами, внесеними згідно з наказом Міністерства освіти і науки України від 31.05.2019 № 759), "Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії" (Постанова Кабінету Міністрів України від 12 січня 2022 р. № 44, зі змінами від 08 травня 2024р).

РЕКОМЕНДУВАТИ:

1. Дисертаційну роботу «Відновлення структури і властивостей тривало експлуатованої сталі 12Х1МФ парогону ТЕС за модифікованим режимом термічного оброблення», подану Іваном Олександровичем Цибайлом на здобуття ступеня доктора філософії зі спеціальності 132– матеріалознавство, до захисту.
2. Головою спеціалізованої разової вченої ради призначити:
 - **Ігоря Миколайовича Дмитраха** – доктора технічних наук, професора, член-кореспондента НАН України, завідувача відділу міцності матеріалів і конструкцій у водневоємних середовищах Фізико-механічного інституту ім. Г. В. Карпенка НАН України

Рецензентами призначити:

- **Андрія Михайловича Сиротюка** – доктора технічних наук, старшого наукового співробітника, провідного наукового співробітника відділу міцності матеріалів і конструкцій у водневоємних середовищах Фізико-механічного інституту ім. Г. В. Карпенка НАН України;
- **Христину Броніславівну Василів** – кандидата технічних наук, старшого наукового співробітника відділу корозії та протикорозійного захисту Фізико-механічного інституту ім. Г. В. Карпенка НАН України.

Опонентами призначити:

- **Дмитра Вячеславовича Лаухіна** – доктора технічних наук, професора кафедри конструювання, технічної естетики і дизайну Національного технічного університету «Дніпровська політехніка»;
- **Наталію Петрівну Зайчук** – кандидата технічних наук, доцента кафедри матеріалознавства факультету митної справи, матеріалів та технологій Луцького національного технічного університету.

Голова семінару
д.т.н., проф.



Ірина ПОГРЕЛЮК

Секретар семінару
д.т.н., ст. досл.



Василь ТРУШ