

ВІДГУК
офіційного опонента
на дисертаційну роботу Кречковської Галини Василівни
“Методологія оцінювання критичного стану тривало експлуа-
тованих конструкційних сталей за зміною їх структури, мікро-
механізмів та опору руйнуванню”, подану на здобуття наукового
ступеня доктора технічних наук за спеціальністю
05.02.01 – матеріалознавство

Актуальність теми дисертації

В енергетичному, транспортному та багатьох інших виробничих секторах України щораз гостріше постає проблема обґрунтування терміну безпечної експлуатації металоконструкцій після їх експлуатації за тривалого впливу кліматичних та технологічних факторів. Один із важливих аспектів втілення цієї стратегії полягає у технічному діагностуванні стану тривало експлуатованих матеріалів, які могли зазнати істотної деградації. Його реалізація стосовно конструкційних сталей стримується відсутністю обґрунтованої методології проведення експертних оцінок їх реального стану. Це матеріалознавче завдання, яке вимагає комплексного підходу з використанням як механічних випробувань тривало експлуатованих сталей, так і таких важливих інструментів експертиз як металографічні і фрактографічні дослідження. Аналізована дисертаційна робота присвячена розробленню і науковому обґрунтуванню методології оцінювання експлуатаційної деградації структурно-механічного стану конструкційних сталей за сукупного впливу на них різних експлуатаційних чинників (температурних, силових та корозійно-наводнювальних). Врахувавши викладене, вважаю, що тема дисертаційної роботи Г. В. Кречковської, яка спрямована на вирішення важливої проблеми сьогодення – визначення реального стану ряду конструкційних сталей після їх тривалої експлуатації в різних елементах відповідальних конструкцій як основи обґрунтування їх залишкового ресурсу - є безперечно актуальною.

Дисертаційна робота виконувалась у рамках ряду бюджетних тем НАН України, конкурсних тем цільової програми НАН України (Фундаментальні проблеми створення матеріалів з наперед заданими властивостями, методів їх з'єднання й обробки), НДР на замовлення Державного фонду фундаментальних досліджень МОН України, гранту НАТО (в рамках програми “Наука заради миру та безпеки”), що також засвідчує її актуальність.

Структура і зміст дисертації.

Дисертаційна робота Г. В. Кречковської складається із вступу, 7 розділів, висновків по розділах і заключних по роботі, списку із 391 найменування літератури та 3 додатків. Структура роботи відповідає вимогам

до оформлення: її загальний об'єм становить 418 сторінок з 312 сторінками основного тексту, 177 рисунками, 36 таблицями та додатками.

У *вступі* до роботи обґрунтовано актуальність обраної теми, продемонстровано її зв'язок із науковими програмами, в рамках яких вона виконувалася, сформульовано мету, визначено об'єкт, предмет та методи дослідження.

У *першому розділі* проаналізовано літературу, присвячену деградації конструкційних сталей при їх експлуатації за впливу різних температурних умов, оцінено вплив корозійно-наводнювальних агресивних середовищ на властивості сталей, порівняно різні механічні характеристики за їх чутливістю до деградації сталей. На основі цього авторка дисертації сформулювала основні завдання роботи та визначила шляхи їх досягнення.

У *другому розділі* описано сталі та конструкції, в яких вони експлуатувалися, охарактеризовано особливості використаних в роботі методик, залучених до оцінювання технічного стану тривало експлуатованих сталей, для чого проводились металографічні, фрактографічні і комплексні програми механічних досліджень.

Третій розділ присвячений результатам дослідження металографічних, фрактографічних і механічних властивостей вуглецевих сталей елементів конструкцій кінця XIX–початку ХХ сторіч. Виявлено спільну ознаку їх деградації – наявність елементів окрихчення на зламах ударних зразків у вигляді розшарувань та трансзеренного руйнування. Площу цих елементів окрихчення сталей, нормовану відносно всієї площині зламу, запропоновано використовувати як показник їх поточного стану.

У *четвертому розділі* оцінено наслідки деградації низьколегованих сталей, експлуатованих на магістральних нафто- та газопроводах. Результати структурних, механічних і фрактографічних досліджень цих сталей використано для обґрунтування правомірності оцінки степені їх деградації за фрактографічним показником - частка площині на зламах, що приходилася на елементи окрихчення (розшарування та трансзеренні відколи). Крім того розкрито негативну роль до тепер неконтрольованих дрібних корозійно-активних неметалевих включень у дочасному руйнуванні бурильних труб та запропоновано фрактографічний метод виявлення та кількісного оцінювання їх густини на одиниці площині у тому числі експлуатаційних зламів труб.

П'ятий розділ роботи присвячений атестації властивостей теплотривких сталей різних ділянок головних парогонів ТЕС, серед яких прямі ділянки і згини труб та колові зварні з'єднання. Проаналізовано сукупний вплив усіх факторів деградації, які супроводжують їх експлуатацію (тривалість, зупинки блоків, термічні напруження) на їх структурні і фрактографічні ознаки деградації та механічні властивості. Показано прямий зв'язок розмірів зерен і карбідів вздовж їх меж від реальних напружень (у тому числі термічних) у різ-

них зонах перерізу труб, які відповідальні за інтенсивність протікання повзучості металу, а, отже, і його деградації.

У *шостому розділі* встановлено причини передчасного руйнування лопаток роторів парових турбін, щодо який було застосовано різні методи поверхневого зміщення (зокрема електроіскрове легування, поверхневе лазерне гартування). Показано, що передумовою запобігання передчасному руйнуванню лопаток є структурна однорідність поверхневих шарів, зміщених за цими технологіями. Щодо тривало експлуатованої в лопатках ротора високого тиску високолегованої теплотривкої сталі 15Х11МФ, то розкрито структурні особливості її деградації, пов'язані з виділенням карбідів вздовж меж зерен і пакетів високо відпущеного мартенситу. Вважали, що внаслідок цього адгезія між суміжними зернами знижується і фрактографічно це підтверджено фрагментами міжзеренного руйнування на зламах зразків експлуатованої сталі, випробуваних на циклічну тріщиностійкість. Площу фрагментів міжзеренного руйнування на фоні трансзеренного рельєфу зламів запропоновано використовувати як фрактографічний показник деградації сталі.

У *сьомому розділі* підсумовано результати комплексного оцінювання деградації широкого спектру конструкційних сталей (вуглецевих, низьколегованих, низько- і високолегованих теплотривких), експлуатованих в різних температурних умовах (кліматично і технологічно обумовлених), за різної інтенсивності корозійно-наводнювального впливу, за різних силових схем навантаження в процесі експлуатації. На їх основі фрактографічно обґрунтовано умову досягнення експлуатованими сталями критичного стану, який є передвісником крихкого руйнування та запропоновано методологію визначення поточного структурно-механічного стану сталей.

У *додатках* до роботи представлено 8 актів щодо використання отриманих у дисертації результатів, 3 деклараційні патенти та перелік 47 публікацій Кречковської Г.В., у яких обґрунтовано основні положення новизни та наведено докази сформульованих в роботі висновків.

Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків та рекомендацій, сформульованих у дисертації.

Обґрунтованість і достовірність наукових положень, висновків та рекомендацій дисертаційної роботи Г.В. Кречковської підтверджена чітким формулюванням проблеми та шляхів її вирішення, комплексним підходом при її розв'язанні, зокрема, органічним поєднанням результатів досліджень структурного стану тривало експлуатованих конструкційних сталей різного призначення, оцінки широкого комплексу їх механічних властивостей та фрактографічних ознак, пов'язаних з їх деградацією за впливу різних експлуатаційних факторів. Основні положення, висновки та рекомендації дисертаційної

роботи не суперечать загальновизнаним матеріалознавчим підходам і принципам, а розроблена і обґрутована методологія оцінювання реального структурно-механічного стану ряду конструкційних сталей відкрила перспективу розширення меж її застосування на матеріали, експлуатовані в інших важливих галузях (авіації, річному і морському транспорті тощо).

Достовірність отриманих у роботі результатів

Достовірність наукових результатів, отриманих під час виконання дисертації, не викликає сумнівів, оскільки теоретично обґрутовані прогнози і твердження підтверджено великим обсягом різнопланових експериментальних досліджень із застосуванням сучасного інструментарію. Так, в основу наукового обґрутування методології оцінювання структурно-механічного стану конструкційних сталей покладено побудовані універсальні кореляційні залежності між втратою їх механічних властивостей та зміною ключових структурних та фрактографічних ознак їх деградації після тривалої експлуатації в кліматичних та високотемпературних умовах. Доказом достовірності отриманих в роботі результатів є також їх представлення та обговорення на авторитетних (у тому числі престижних міжнародних) наукових конференціях.

Наукова новизна отриманих в роботі результатів.

Показано, що на структурному рівні головна ознака експлуатаційної деградації металопрокату з вуглецевих (елементи об'єктів кінця XIX – початку ХХ сторіч) і низьколегованих (газо- та нафтогони) сталей, експлуатованих за кліматичних умов, пов’язана з розвитком мікропошкодженості через декогезію неметалевих включень від матриці як зародків розшарувань;

Вперше встановлені фрактографічні ознаки структурної деградації вуглецевих та низьколегованих сталей після їх тривалої експлуатації за кліматичних температур, за які прийняли розшарування вздовж напряму вальцовування та трансзеренні відколи на зламах зразків, випробуваних на ударну в’язкість. Їх кількісну оцінку запропоновано проводити за часткою площин, що припадає на мікрофрактографічні елементи окрихчення на зламах ударних зразків. В результаті, для сталей низки відповідальних елементів конструкцій побудовано універсальну залежність між введеним фрактографічним показником зміни їх стану та зниженням опору крихкому руйнуванню, а за зростанням складової трансзеренних відколів на фрактограмах зламів обґрутовано досягнення стялями критичного стану;

Вперше диференційовано відмінності за мікрофрактографічними ознаками експлуатаційної деградації різних зон зварного з’єднання нафтопроводів. Для основного металу і металу зони термічного впливу це розшарування,

а для металу шва – локальні фрагменти трансзеренного відколу. За часткою площині зламів зразків, що припадала на елементи окрихчення, побудували залежність їх зміни від втрати ударної в'язкості, яка дала перспективу для ранжування різних ділянок нафтопроводів за мірою їх деградації;

Запропоновано оригінальний кількісний структурно-фрактографічний показник експлуатаційної деградації сталей парогонів ТЕС, який полягає у визначенні відношення кількості ямок з включеннями на їх дні до всієї їх кількості на одиниці площині зламів за випробувань зразків на розтяг. З використанням цього показника доказано, що експлуатаційна деградація сталі 12Х1МФ інтенсифікується у зонах дії підвищених колових напружень у стінці труб, які спричиняють декогезію карбідів від матриці;

Вперше запропоновано спосіб оцінки критичного структурно-механічного стану теплотривкої сталі 15Х1М1Ф після тривалої експлуатації на парогонах ТЕС за відхиленням від лінійності отриманої залежності типу Холла-Петча між розміром зерна і твердістю, визначеними на поверхні труб;

Побудовано кореляційні залежності між зміною механічного показника стану металу (ефективний поріг циклічної тріщиностійкості, визначений з урахуванням ефекту закриття тріщини) і площею міжзерennих фрагментів на зламах зразків експлуатованих теплотривких сталей. На їх основі вперше фрактографічно обґрунтовано критичний стан теплотривких сталей паропроводів та лопаток роторів парових турбін, який пов'язали з початком об'єднання пошкоджень вздовж меж поодиноких зерен у міжзеренні конгломерати ще на етапі експлуатації сталей.

Значимість отриманих у роботі результатів для науки і практики

Наукове значення дисертаційної роботи полягає у розробленні науково-обґрунтованої методології визначення структурно-механічного стану тривало експлуатованих конструкційних сталей різного призначення, яка базується на комплексному дослідженні закономірностей зміни їх структурних, механічних та мікрофрактографічних показників, пошуку кореляційних зв'язків між ними та фрактографічному обґрунтуванні критичного стану деградованих сталей.

Практичне значення результатів дисертаційної роботи у тому, що вони дають можливість оптимізувати режими експлуатації відповідальних елементів конструкцій теплоенергетичного устаткування (зокрема головних паропроводів ТЕС) за швидкістю охолодження блоків та кількістю їх пусків, щоб мінімізувати вплив колових термічних напружень на інтенсивність протікання процесу повзучості у поверхневих шарах труб як передумови деградації. Ці результати вже використовують на ТЕС ДТЕК для вибору черговості обстежень паропроводів та заміни критично деградованих елементів.

За результатами фрактографічних досліджень передчасно зруйнованих лопаток роторів парових турбін ТЕС встановлено причини їх пошкодження, що використано для оптимізації шляхів контролю якості зміцнених шарів лопаток та при проведенні експертиз інших зруйнованих елементів з різних об'єктів енергетики.

Результати роботи використані на різних ТЕС ДТЕК під час експертизи пошкоджених елементів конструкцій, розроблення запобіжних заходів та для прогнозування роботоздатності неушкоджених деталей. Всім актів про використання результатів роботи, висновків та рекомендацій підтверджують це.

Повнота викладення здобувачем основних результатів

За темою дисертаційної роботи здобувачкою опубліковано 47 наукових праць, з яких 31 статтю у наукових фахових виданнях, 18 із них у виданнях, що реферуються Web of Science та Scopus., одержано 3 патенти України на корисні моделі, опубліковано 13 праць у матеріалах Міжнародних наукових та науково-практичних конференцій.

Оцінка мови, стилю та оформлення дисертації й автореферату

Загалом дисертація написана технічно грамотною мовою. Виклад матеріалу в роботі логічний і послідовний. Розділи 2–6 взаємопов’язані та цілком розкривають поставлену мету, а останній розділ 7, узагальнюючи отримані результати, фактично розкриває основні засади розробленої методології оцінювання стану тривало експлуатованих конструкційних сталей, в тому числі критичного. Тема і зміст дисертації відповідають паспорту спеціальності 05.02.01 – матеріалознавство. Оформлення як дисертаційної роботи, так і автореферату в цілому відповідає вимогам до докторських дисертацій.

Зауваження до дисертаційної роботи:

1. З рис. 27 автореферату та рис. 6.35 і рис. 6.36 дисертації слідує, що існує чітка кореляція між ефективним порогом втоми для лопаткової нержавної сталі та часткою міжзеренного руйнування на зламах зразків. Однак утромувальну здатність сталі визначає оцінка за номінальним значенням коефіцієнта інтенсивності напружень, а не отриманим з урахуванням закриття тріщини. Це потребує додаткових роз’яснень.
2. В роботі використовується показник «швидкість зниження ударної в’язкості за рік експлуатації» (рис. 10 в авторефераті та рис. 4.23 в дисертації), який корелює з часткою крихкого руйнування. Незрозуміло, наскільки цей показник швидкості може мати практичне застосування для прогнозування експлуатаційної втрати опору крихкому руйнуванню.
3. Дисерантка аргументує, що за досягнення певної площі мікророзшарувань на поверхні зламів експлуатованих сталей їх руйнування відбувається

ся за механізмом крихкого відколу. З іншого боку, збільшення площин розшарувань означає зменшення віддалі між ними і коли ця віддала стає критично малою виникають передумови для крихкого відколу. Можливо, потрібно було ввести показник «критичної віддалі між розшаруваннями» як характеристики переходу металу в закритичний стан.

4. В роботі розглядаються структурні особливості (морфологія, склад і розподіл фазових складових і видіlenь) і дефектність (поруватість, розшарування, тріщини, тощо) сталей під дією зовнішніх і внутрішніх факторів різної природи, зокрема різних за рівнями тривалих напружень, зумовлених багатьма чинниками в тому числі тривалим температурним впливом. Проте авторка не наводить власних даних щодо особливостей дислокаційної структури та її еволюції з часом експлуатації в тих чи інших умовах, що було би важливо для трактування отриманих результатів і прогнозування залишкового ресурсу сталевих конструкцій.

Крім того, у Р.6. на стор. 275 згадуються «...великі за розмірами ділянки δ -фериту» (рис. 6.2г), але якими методами його ідентифікували і яка його роль в процесах руйнування авторка не розглядає.

5. Авторкою проведено аналіз великої кількості досліджень за темою докторської роботи, але на жаль велика частина першоджерел (більше 50 %) видання до 2010 р. В той же час у підрозділі 1.4.3 дисертаційної роботи «Підходи до кількісного аналізу фрактографічних зображень» не відбито можливості застосування растрової електронно-мікроскопічної фотограметрії в матеріалознавстві (сучасні роботи проф. В. М. Мельника і А. В. Шостак) деградованих металевих об'єктів.

Масив даних щодо тривалої міцності (підрозділ 1.2.3.1 дис. роб.) можна було б узагальнити і подати в координатах Ларсона-Міллера.

6. В роботі часом зустрічаються технічні описки, невідповідності та неточності, русизми і тавтологія. Наприклад:

- В дис. р. після порядкових № переліку літературних джерел часом є, а часом немає крапок, а в посиланнях 84, 184 не вказані роки видання.

- У табл. 1.6. «Границя тривалої міцності ($105, \text{Н}/\text{мм}^2$) хромистих сталей» не розшифровані надстрічкові позначення «1», «2», «3».

- Стор.115 дис. р. «...технології плавленням сталей...уступали сучасним...» - русизм, мало би бути поступалися.

- Стор. 126 і в багатьох інших місцях вживається термін ямки, а не заглибини.

- «Металографічно показано...» стор. 230 висновки до р. 4.

- На рис. 6.23 і рис. 6.26 фото (а) і (б) тотожні, на рис. 6.30 – (г) і (д).

Зроблені вище зауваження не вплинули на загальну позитивну оцінку дисертаційної роботи.

Висновок щодо відповідності дисертації встановленим вимогам:

1. Дисертація Г. В. Кречковської "Методологія оцінювання критичного стану тривало експлуатованих конструкційних сталей за зміною їх структури, мікромеханізмів та опору руйнуванню" є завершеною науковою роботою, в якій отримано нові, важливі в науковому і прикладному значеннях результати, яка відповідає критеріям стосовно матеріалознавчого вирішення проблеми прогнозування роботоздатності конструкційних сталей тривалої експлуатації.
2. Робота відповідає вимогам пунктів 9, 10, 12, 13 «Порядку присудження наукових ступенів», затвердженого Постановою Кабінету Міністрів України № 567 від 24 липня 2013 р., щодо докторських дисертацій, а її авторка – Г. В. Кречковська заслуговує присудження її наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.02.01 – матеріалознавство.

Офіційний опонент:

ШИРОКОВ Володимир Володимирович

доктор технічних наук, професор,
професор кафедри комп'ютеризованих ком-
плексів поліграфічного та пакувального ви-
робництв Української академії друкарства
МОН України, м. Львів

В. В. Широков

Підпис доктора технічних наук, професора
В.В.Широкова засвідчує:
учений секретар УАД МОН України, канди-
дат технічних наук, доцент



З.М. Сельменська

79060 Львів, вул. Наукова, 5
Фізико-механічний інститут НАНУ
Спеціалізована вчена рада Д 35.226.02
Ученому секретарю Погрелюк І.М.