

В. В. ДМИТРИК, ЧЕНЬ СІНЬЛЕЙ, О. П. УСАТИЙ, І. В. КАСЬЯНЕНКО**ПРОБЛЕМА ОЦІНКИ НАДІЙНОСТІ І ЗАЛИШКОВОГО РЕСУРСУ
ДОВГОТРИВАЛО ПРАЦЮЮЧИХ ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ ПАРОПРОВОДІВ ТЕС**

Визначення надійності зварних з'єднань паропроводів із теплостійких перлітних сталей, які тривалий час (понад 270 тис. год) експлуатуються в умовах повзучості та втоми, набуло виняткової актуальності. Метою роботи є визначення напрямку розвитку нормативних положень стосовно надійності зварних з'єднань паропроводів, які довготривало експлуатуються в умовах повзучості та втоми. Для досягнення мети задіяли відповідні методи дослідження і аналізу структурно-фазового стану, визначення хімічного складу і фізико-механічних властивостей металу зварних з'єднань, а також визначення рівня їх пошкоджуваності. Встановили, що пошкоджуваність металу зварних з'єднань значною мірою залежить від його структурно-фазового стану. Зі збільшенням напрацювання зварних з'єднань у їх вихідній структурі поступово формується, і відповідно, збільшується як її складова, ферито-карбідна суміш. Присутність такої суміші сприяє прискоренню пошкоджуваності зварних з'єднань, яка проходить за механізмами повзучості та втоми. Обґрунтували доцільність виявлення ферито-карбідної суміші у структурі зварних з'єднань шляхом використання удосконалених і розробки нових методів контролю якості. Для отримання результатів запропонували удосконалювання методів контролю якості зварних з'єднань паропроводів, які довготривало працюють в умовах повзучості і втоми. Обґрунтували, що при розробці нових і вдосконаленні штатних методів контролю якості металу зварних з'єднань, які довготривало експлуатуються в умовах повзучості та втоми, необхідно враховувати їх структурно-фазовий стан, що дозволить збільшити надійність роботи зварних з'єднань. Удосконалення відомих, а також розробка нових методів і методик контролю якості металу паропроводів і їх зварних з'єднань, дозволить підвищити оцінку їх структурно-фазового стану і наявності пошкоджуваності. Урахування отриманих результатів, стосовно нових нормативних положень, дозволить підвищити оцінку надійності подальшої експлуатації старіючих паропроводів і їх зварних з'єднань, а також визначити їх залишковий ресурс.

Ключові слова: теплостійкі сталі, надійність, ресурс, зварні з'єднання, пошкоджуваність, методи контролю якості, структура, властивості.

V. DMITRIK, CHEN XINLEI, O. USATYI, I. KASIANENKO**THE PROBLEM OF ASSESSING THE RELIABILITY AND RESIDUAL RESOURCE
OF LONG-TERM OPERATING WELDED JOINTS IN STEAM PIPELINES
OF THERMAL POWER PLANTS**

Assessing the reliability of welded joints of steam pipelines made of heat-resistant pearlitic steels that are operated for a long time (over 270 thousand hours) under creep and fatigue conditions, has become an extremely relevant issue. The purpose of this research is to determine the avenues for the development of regulatory provisions regarding the reliability of welded joints of steam pipelines that are operated for a long time under creep and fatigue conditions. To achieve the goal, appropriate methods of research and analysis were used to study the structural-&-phase state and determine the chemical composition and physical-&-mechanical properties of the metal of welded joints, as well as the level of their damageability. It was established that the damageability of the metal of welded joints depends primarily on its structural-&-phase state. With an increase in the operating time of welded joints, a ferrite-carbide mixture is gradually formed in their initial structure, and accordingly, the amount of it as its component is increased. The presence of such a mixture contributes to the damageability of welded joints, which follows creep and fatigue mechanisms. The feasibility of detecting a ferrite-carbide mixture in the structure of welded joints by using already improved techniques and developing new quality control methods has been substantiated. To obtain appropriate results, we propose improving the quality control methods for welded joints of steam pipelines that operate for a long time under creep and fatigue conditions. We substantiated that when developing new and improving standard methods for quality control of metal of welded joints that operate for a long time under creep and fatigue conditions, it is necessary to consider their structural and phase state, which will increase the reliability of the operation of welded joints. Improving the technologies already available as well as developing new methods and techniques for quality control of metal of steam pipelines and their welded joints, will allow us to improve the assessment of their structural and phase state and the presence of damages. Taking into account the results obtained in relation to new regulatory provisions will allow to increase the assessment of the reliability of further operation of aging steam pipelines and their welded joints, as well as to determine their residual resource.

Key words: heat-resistant steels, reliability, resource, welded joints, damageability, quality control methods, structure, properties.

Вступ

Надійність роботи обладнання енергоблоків ТЕС після їх напрацювання понад 270 – 290 тис. год стає все більш актуальною проблемою. Найбільшого зношування в енергоблоках зазнають зварні з'єднання паропроводів і елементів їх систем, чому сприяє наявність структурної, хімічної і механічної неоднорідності зварних з'єднань. Така неоднорідність утворилась під впливом зварювального нагрівання при виготовленні зварних з'єднань і набула додаткового розвитку в процесі їх довготривалого напрацювання в умовах повзу-

чості та втоми. Дана проблема поглиблюється тим, що на сьогодні залишається відсутньою наукова концепція визначення надійності та залишкового ресурсу зварних з'єднань паропроводів стосовно їх довготривалого напрацювання в умовах повзучості та втоми.

Діюча оцінка надійності та залишкового ресурсу зварних з'єднань паропроводів передбачає [1] – [10]:

1) Урахування рівня пошкоджуваності металу зварних з'єднань, який визначається шляхом використання оптичної та електронної мікроскопії, методів неруйнівного і руйнівного контролю та ура-

хування показників механічних властивостей.

2) Необхідність 100 % обстеження зварних з'єднань паропроводів працюючих в умовах повзучості. Стосовно контролю якості передбачається використання різних неруйнівних і руйнівних методів, проте не існує індивідуальної специфіки. Наприклад, до паропроводів свіжої пари зі сталі 15X1M1Ф блоків 300 МВт (тиск 25,5 МПа, температура 545 °С) і паропроводів промперегріву зі сталі 15X1M1Ф блоків 300 МВт (тиск 3,9 МПа, температура 545 °С) підхід практично однаковий. Зазначимо, що вищі параметри роботи паропроводів свіжої пари забезпечують відповідно більшою мірою наявність утворення феритно-карбідної суміші (рис. 1), особливо в металі їх зварних з'єднань. Таку суміш, на наш погляд, слід оцінювати як бракувальну складову в структурі зварних з'єднань. На окремих зернах фериту наявність карбідів не спостерігається. Переважно карбіди І групи зосереджуються по границях зерен α -фази.



Рис. 1 – Мікроструктура ділянки неповної перекристалізації зони термічного впливу зварного з'єднання зі сталі 12X1MФ. Ресурс 280 тис. год ($\times 360$)

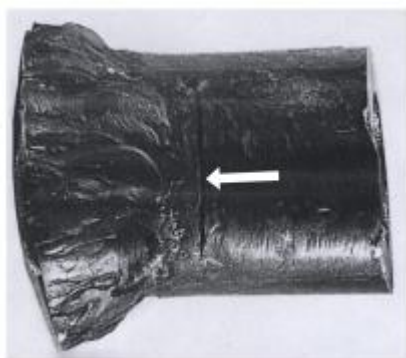


Рис. 2 – Тріщина втоми в ЗТВ зварного з'єднання зі сталі 12X1MФ (стрілка) ($\times 1,2$)

Відбувається їх коагуляція та утворення ланцюжків із карбідів. У середині зерен знаходиться порівняно невелика кількість карбідів.

У тепловій енергетиці використовують спеціальні нормативні документи (НД), які передбача-

ють періодичність контролю та визначення ресурсу роботи паропроводів, зокрема їх зварних з'єднань [1] – [10]. Водночас залишається не вирішеною задача граничного стану металу зварних з'єднань стосовно надійності їх роботи, а також оцінка їх індивідуального ресурсу.

Мета роботи

Мета роботи визначити напрямки розвитку нормативних положень стосовно надійності зварних з'єднань паропроводів, які довготривало експлуатуються в умовах повзучості та втоми.

Особливості методики та методи дослідження

Нормативні методики, що визначають працездатність енергетичного обладнання, передбачають використання широкого спектру методів контролю, у тому числі розрахунків на втому, повзучість, тріщиностійкість і корозійну стійкість [1] – [10]. Водночас практична робота зварних з'єднань в умовах спряженого впливу повзучості та втоми на їх надійність надає необхідність враховувати опір металу зварних з'єднань такому впливу. Крім цього, методи розрахунку працездатності зварних з'єднань не враховують, що деформація окремих ділянок зони їх термічного впливу може значно перевищувати 1 % як нормативно встановлену величину [11], [12]. Методики розрахунку на міцність також не передбачають вивчення спільного впливу повзучості, втоми та корозії на стійкість пошкоджуваності та руйнуванню зварних з'єднань. Технічна діагностика та дефектоскопія, що використовуються, не дозволяють належним чином визначати параметри дефектів, структурно-фазовий стан, а також напружено-деформований стан металу зварних з'єднань. Задіяні методи не враховують наявність ферито-карбідної суміші в структурі зварних з'єднань, кількість якої зростає при збільшенні терміну їх напруження. Саме наявність такої суміші сприяє прискоренню пошкоджуваності металу зварних з'єднань при їх довготривалому напруженні в умовах повзучості та втоми. Присутність ферито-карбідної суміші сприяє утворенню тріщин втоми (рис. 2), які розвиваються за крихким механізмом. У морфології поверхні злом таких зварних з'єднань переважають крихкі складові. І тому визначення наявності ферито-карбідної суміші в структурі та дослідження особливостей її утворення є доцільним стосовно надійності та ресурсу зварних з'єднань, довготривало працюючих в умовах повзучості та втоми. Таким чином, урахування структурно-фазового стану повинно бути однією із пріоритетних задач контролю якості довготривало працюючих зварних з'єднань. Технічні можливості відомих методів не дозволяють ефективно контролювати струк-

турно-фазовий стан, напруження та пластичну деформацію в металі ділянок зони термічного впливу (ЗТВ) зварних з'єднань паропроводів.

Нагальною задачею є виконання спільного контролю поверхневої зони металу зварного з'єднання і його зони, що знаходиться посередині з'єднання. Такий контроль слід виконувати на зразках, вирізаних у місцях можливої схильності до їх пошкоджуваності. Також необхідно визначати місця оптимального розміщення давачів на поверхні металу зварних з'єднань і розробити методику

контролю деформації їх металу.

При напрацюванні зварних з'єднань в умовах повзучості та втомі понад 280 тис. год їх пошкоджуваність помітно локалізується переважно на ділянках неповної перекристалізації, перегріву та сплавлення ЗТВ. Саме ці ділянки характеризуються наявністю найбільших напружень і деформацій. І тому визначення структурно-механічних властивостей зварних з'єднань паропроводів є першочерговим завданням (рис. 3).

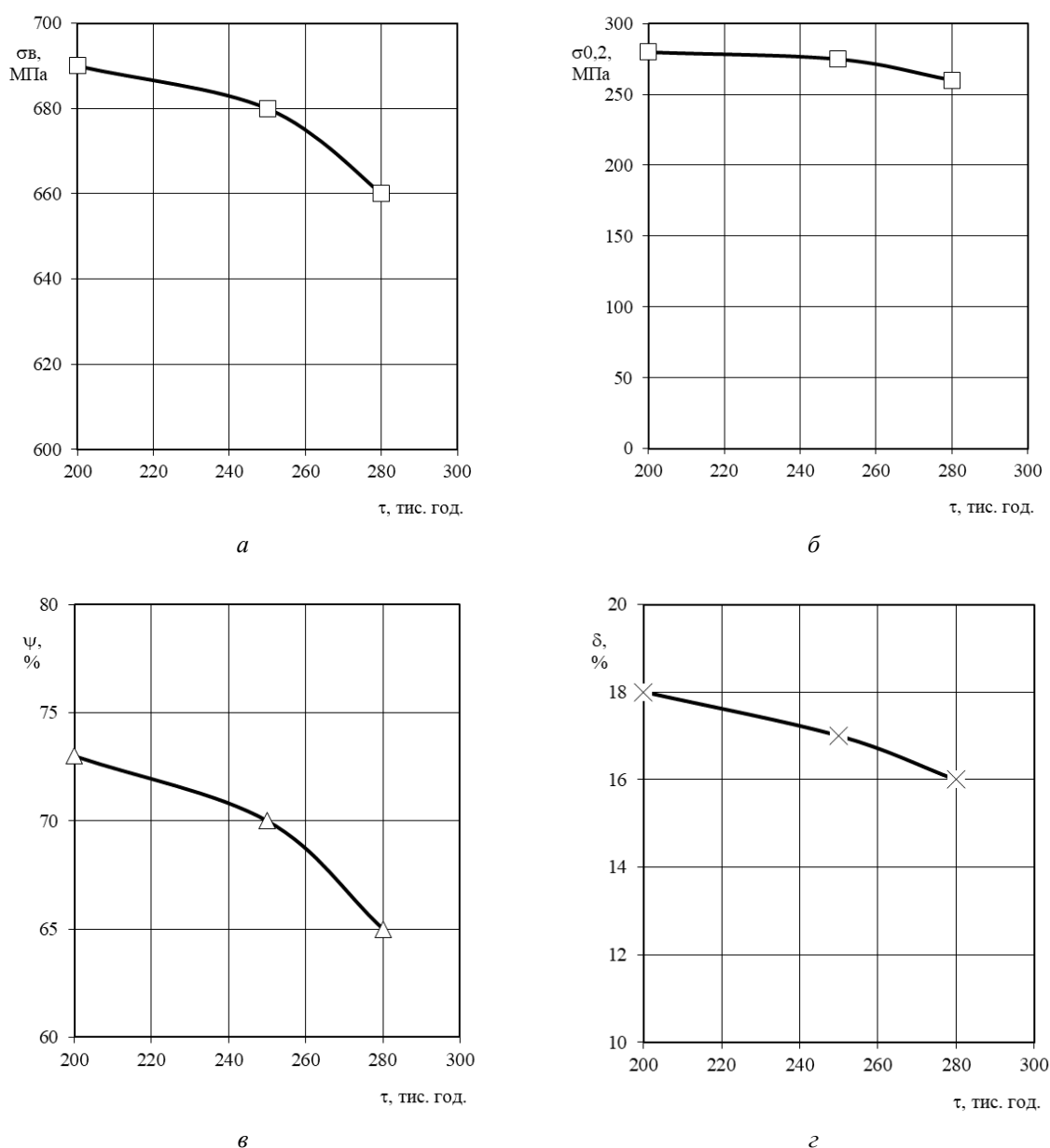


Рис. 3 – Зміна механічних властивостей зварних з'єднань паропроводу свіжого пару (ТЕЦ, м. Зміїв) зі сталі 12Х1МФ стосовно їх напрацювання при температурі 545 °С і напруженні 24 МПа:

а – межа міцності, σ_b , МПа; б – умовна межа текучості, $\sigma_{0,2}$, МПа;

в – відносне звужування ψ , %; г – відносне видовження, δ , %

Слід проводити контроль якості на конкретних зразках і потім результати узагальнювати для розповсюдження стосовно всіх інших однотипних зварних з'єднань паропроводів. Наприклад, зварних з'єднань паропроводів гострого пару або паропроводів гарячого проміжного перегріву та паропроводів у межах котла.

При виявленні дефектів (пори, тріщини) у металі зварних з'єднань і визначенні їх розмірів доцільно досліджувати структурно-фазовий стан навколо таких дефектів. Проведення даних операцій дозволить оцінити здатність дефекту розвиватися, тобто збільшуватися у розмірах. Також слід визначити міцність ділянки з наявністю дефектів. Слід обґрунтувати та розробити норми визначення присутності дефектів у металі зварних з'єднань залежно від їх структурно-фазового стану. Наявність обґрунтованих норм стосовно дефектів дозволить значно мірою уточнити надійність і точніше визначити залишковий ресурс зварних з'єднань.

Потребують удосконалення методи і методики виявлення внутрішніх дефектів у стикових, трійникових і таврових зварних з'єднаннях. Окремого вирішення потребують задачі виявлення корозійних язвин, що утворюються на внутрішній поверхні паропроводів і їх зварних з'єднань.

Таким чином, стосовно паропроводів, що довготривало працюють в умовах повзучості та втоми, особливої важливості набуло ефективне виявлення наявності дефектів, як внутрішніх, так і зовнішніх.

Використання штатної дефектоскопії не дозволяє на належному рівні контролювати присутність внутрішніх дефектів у металі зварних з'єднань паропроводів і елементів їх систем. Не є можливим також з використанням даних методів виявляти корозійні пошкодження на внутрішніх поверхнях паропроводів. Необхідність вирішення наведеної задачі наводилась і раніше [12] – [15]. Зазначимо, що ця проблема є складною і потребує обґрунтованого підходу.

Для підвищення надійності роботи зварних з'єднань доцільно виявляти наявність дефектів у їх металі на початковому стані їх утворення та розвитку. Для зварних з'єднань паропроводів, які довготривало експлуатуються понад 270 – 280 тис. год в умовах повзучості та втоми, важливість такого заходу є нагальною. Пошкоджуваність, що утворилась, стрімко переходить в руйнування, яке розвивається за крихким механізмом. Пошкоджуваності значною мірою сприяють структурно-фазові перетворення, що проходять у металі зварних з'єднань з набагато більшою швидкістю, ніж в основному металі. Отже необхідно такі перетворення контролювати, що є складною задачею. Контроль також ускладнюється тим, що ділянки ЗТВ

зварних з'єднань мають малі розміри. Наприклад, ширина ділянки сплавлення складає близько 0,10 – 0,20 мм, перегріву – 1,30 – 1,80 мм, нормалізації – 1,0 – 1,10 мм, неповної перекристалізації – 2,00 – 2,20 мм. Зазначимо, що ділянки ЗТВ мають значну структурну неоднорідність, яка загалом є відмінною від структури основного металу зварних з'єднань. Крім того, при зварюванні на підвищених режимах на ділянках сплавлення та перегріву можуть утворюватися крупні аустенітні зерна (3–4 бал, ДСТУ 8972:2019). Їх наявність сприяє прискоренню пошкоджуваності як за механізмами повзучості, так і за механізмами втоми.

Для оцінки надійності та ресурсу паропроводів та їх зварних з'єднань все більше використовуються методи контролю структурно-механічних властивостей [1] – [7], [10]. Це – вимірювання твердості, коерцитивної сили, використовуються репліки та інші методи, у тому числі комплексні, наприклад установки для спільного використання магнітографічного методу та методу кінетичного ідентифікування.

Нормативна документація України передбачає використання значної кількості стандартів неруйнівного контролю, а також контролю частково пошкоджених паропроводів [1] – [10]. Водночас у стандартах слід обґрунтувати вибір місць для вирізки відповідальних зразків. Висновок про стан металу дається за місцем вирізки зразка. Як правило, проби згідно з НД документів беруть у місцях, де вірогідність пошкоджуваності є найбільшою. Проте при виборі не враховуються ті зварні з'єднання, де структурно-фазові зміни проходять у більшому ступені, ніж в інших зварних з'єднаннях. Першочергово обстежити необхідно ті паропроводи, які працюють в умовах повзучості (тиск 25,5 МПа, температура 545 °С – 585 °С).

На сьогодні технічна діагностика та неруйнівний контроль деградації металу, а також контроль пошкоджуваності довготривало працюючих зварних з'єднань паропроводів потребує використання як удосконалених штатних методів і методик, так і нових.

Необхідно при контролі враховувати динамічну взаємодію діючих на метал паропроводів і їх зварних з'єднань полів напружень з їх власними полями. Таким чином, є можливим з більшою точністю виявляти дефекти.

Визначення надійності довготривало працюючих зварних з'єднань паропроводів доцільно обґрунтувати термодинамічними рівняннями. Такі рівняння повинні враховувати структурно-фазовий і фізичний стан металу, наявність дефектів, а також ефекти, що чинять вплив на його стан. Важливо розробити діючий метод контролю деформації ділянок ЗТВ зварних з'єднань, де концентрується зароджуваність їх пошкоджуваності.

Таким чином, надійність зварних з'єднань паропроводів із теплостійких сталей, що довготривало працюють в умовах повзучості та втоми, значною мірою залежить від інтенсивності проходження фізико-хімічних процесів в їх металі: самодифузії легувальних елементів хрому, молібдену та ванадію; переміщення дислокацій ковзанням і переповзанням; коагуляції карбідів / групи; утворення вакансій і їх поступове перетворення в пори і тріщини повзучості; утворення тріщин втоми. Отже в металі зварних з'єднань із теплостійких сталей (15X1M1Ф і 12X1МФ) наведені процеси доцільно загальмувати, а також по можливості усунути їх проходження [16] – [18].

Запропоновані методи контролю напружень повинні оцінити фактичний напружено-деформований стан кожної з ділянок ЗТВ зварного з'єднання, а також металу шва та основного металу. Тому для контролю є ефективним використання пасивних методів діагностики, наприклад методів акустичної емісії та магнітної пам'яті металу, які широко використовуються для контролю на ранній стадії напрацювання. Використання методик магнітопорошкової дефектоскопії стосовно паропроводів, як показує досвід [1] – [10], [15], є найбільш інформативним при дослідженні напружено-деформованого стану. Водночас використання цього методу стосовно ділянок ЗТВ зварних з'єднань потребує його відповідного доопрацювання. Зазначимо, що важливим є також виявлення причин утворення локальної концентрації на ділянках, які спричинені структурно-фазовими змінами, а також дефектів на ранній стадії їх розвитку.

Набутий досвід контролю якості зварних з'єднань доцільно використовувати для нових, більш теплостійких сталей, які вже впроваджуються у теплову енергетику.

Висновки

1 Обґрунтували, що при розробці нових і вдосконаленні штатних методів контролю якості металу зварних з'єднань паропроводів, які довготривало експлуатуються в умовах повзучості та втоми, необхідно враховувати їх структурно-фазовий стан, що дозволить підвищити оцінку надійності роботи зварних з'єднань.

2 Удосконалення відомих, а також розробка нових методів і методик контролю якості металу паропроводів і їх зварних з'єднань, дозволить підвищити оцінку їх структурно-фазового стану і наявності пошкоджуваності.

3 Урахування отриманих результатів, стосовно нових нормативних положень, дозволить підвищити оцінку надійності старіючих паропроводів і їх зварних з'єднань, а також визначити їх залишковий ресурс.

Список літератури

1. Контроль металу і продовження терміну експлуатації основних елементів котлів, турбін і трубопроводів теплових електростанцій. Типова інструкція : СОУ-Н МПЕ 40.1.17.401:2021. – Київ : ОЕП «ГРІФРЕ» ; Міністерство палива та енергетики України, 2021.
2. Експлуатація трубопроводів теплових електростанцій. Типова інструкція : СОУ-Н ЕЕ 39.502:2008. – [Затв. нак. № 660 МПЕ України, 24.12.08]. – Узгод. Деп. ЕЕ, Держпромгиднагляд ; Розроб. ЛьвівОРГРЕС, ДонОРГРЕС.
3. Котли, турбіни та трубопроводи ТЕС. Положення про вхідний контроль металу теплоенергетичного обладнання з тиском 9 МПа і вище : ГKD 34.25.301-96. – Чинний з 03.06.1996.
4. Посудини що працюють під тиском. Положення про технічне діагностування : СОУ-Н ЕЕ 40.304:2007. – Чинний з 13.12.2007.
5. Правила охорони праці під час експлуатації обладнання, що працює під тиском : НПАОП 0.00-1.81-18. – Чинний з 25.05.2018.
6. ДСТУ EN 10216-2:2016 Труби сталеві безшовні для роботи під тиском. Технічні умови постачання. Частина 2. Труби з нелегованих і легованих сталей з нормованими властивостями за підвищених температур (EN 10216-2:2013, IDT). – Чинний з 01.10.2017.
7. Порядок продовження терміну експлуатації підігрівників високого і низького тисків з напрацюванням понад 30 років. Положення : СОУ-Н МПЕ 40.1.17.405:2005. – Чинний з 22.11.2005.
8. Труби сталеві електрозварні. Технічні умови : ДСТУ 8943:2019. – Чинний з 01.01.2021.
9. Сталь. Металографічний метод оцінювання мікроструктури листів та стрічки : ДСТУ 8974:2019. – Чинний з 01.01.2021.
10. Сталь. Визначення вмісту неметалевих включень. Мікрографічний метод із застосуванням стандартних діаграм : ДСТУ ISO 4967:2015 (ISO 4967:2013, IDT). – Чинний з 01.01.2016.
11. Chalko L. Структурно-фазові особливості пошкоджуваності зварних з'єднань паропроводів ТЕС з теплостійких сталей (Огляд) / L. Chalko // Автоматичне зварювання. – 2024. – № 3. – С. 34–40. – DOI: <https://doi.org/10.37434/as2024.03.05>.
12. Дмитрик В. В. Структурні зміни металу зварних з'єднань тривало експлуатованих паропроводів / В. В. Дмитрик, А. В. Глушко, С. П. Ігліт // Автоматичне зварювання. – 2020. – № 2. – С. 24–28. – DOI: <https://doi.org/10.37434/as2020.02.04>.
13. Студент О. Вплив теплових змін під час експлуатації парогонів ТЕС на статичну тріщиностійкість сталі 15X1M1Ф / О. Студент, Г. Кречковська, Л. Бабій // Вісник Тернопільського національного технічного університету. – 2013. – Т. 72, № 4. – С. 199–206. – ISSN 2522-4433 (print).
14. Дубов А. А. Проблемы оценки остаточного ресурса стареющего оборудования / А. А. Дубов // Технічна діагностика та неруйнівний контроль. – 2010. – № 2. С. 49–54. – ISSN 3041-2358 (print). – ISSN 3041-2366 (on-line).
15. Дмитрик В. В. Структурний стан і пошкоджуваність металу зварних з'єднань паропроводів / В. В. Дмитрик, І. В. Касьяненко, Ю. М. Латинін // Автоматичне зварювання. – 2021. – № 9. – С. 38–42. – DOI: <https://doi.org/10.37434/as2021.09.06>.
16. Березина Т. Г. Диагностирование и прогнозирование долговечности металла теплоэнергетических установок / Т. Г. Березина, Н. В. Бугай, И. И. Трунин. – Київ : Техніка, 1991. – 120 с.
17. Дмитрик В. В. Визначення структурно-фазового стану зварних з'єднань із теплостійких перлітних сталей використанням удосконаленого методу аналізу / В. В. Дмитрик, О. С. Гаращенко, О. М. Берднікова // Автоматичне зварювання. – 2022. – № 6. – С. 11–16. – DOI: <https://doi.org/10.37434/as2022.06.02>.
18. Скульский В. Ю. Новые теплоустойчивые стали для изготовления сварных узлов тепловых энергоблоков (Обзор) /

В. Ю. Скульський, А. К. Царюк // Автоматичне зварювання.
– 2004. – №4. – С. 35–40. – ISSN 0005-111X.

References (transliterated)

1. OEP “GRIFRE” (2021), *COV-H MIE 40.1.17.401:2021: Kontrol' metalu i prodovzhennja terminu ekspluatatsii' osnovnyh elementiv kotliv, turbin i truboprovodiv teplovyh elektrostancij. Typova instrukcija* [COV-H MIE 40.1.17.401:2021: Metal control and service life extension of the main elements of boilers, turbines and pipelines of thermal power plants. Standard instruction], OEP “GRIFRE”, Kyiv, Ukraine.
2. LvivORGRES, DonORGRES (2008), *COV-H EE 39.502:2008: Ekspluatatsija truboprovodiv teplovyh elektrostancij. Typova instrukcija* [COV-H EE 39.502:2008: Operation of pipelines of thermal power plants. Standard instruction], Ukraine.
3. LvivORGRES (1996), *ГКД 34.25.301-96: Kotly, turbiny ta truboprovody TES. Polozhennja pro vhidnyj kontrol' metalu teploenergetychnogo obladnannja z tyskom 9 MPA i vyshhe* [ГКД 34.25.301-96: Boilers, turbines and pipelines of thermal power plants. Regulations on incoming inspection of metal of heat and power equipment with a pressure of 9 MPa and above], Kyiv, Ukraine.
4. LvivORGRES (2007), *COV-H EE 40.304:2007: Posudyny shho pracjujut' pid tyskom. Polozhennja pro tehniczne diagnostuvannja* [COV-H EE 40.304:2007: Pressure vessels. Regulations on technical diagnostics], Kyiv, Ukraine.
5. Ministerstvo social'noi polityky Ukrainy (2018), *ДПАОП 0.00-1.81-18: Pravyly ohorony praci pid chas ekspluatatsii' obladnannja, shho pracjuje pid tyskom* [ДПАОП 0.00-1.81-18: Rules of labor protection during the operation of equipment operating under pressure], Kyiv, Ukraine.
6. (2017), *DSTU EN 10216-2:2016 Truby stalevi bezshovni dlja roboty pid tyskom. Tehniczni umovy postachannja. Chastyna 2. Truby z nelegovanyh i legovanyh stalej z normovanyymi vlastyvjamy za pidvyshheny temperatur* [DSTU EN 10216-2:2016 Seamless steel tubes for pressure purposes. Technical delivery conditions. Part 2. Tubes made of non-alloy and alloy steels with specified elevated temperature properties (EN 10216-2:2013, IDT)], Kyiv, Ukraine.
7. LvivORGRES (2005), *COV-H MIE 40.1.17.405:2005: Porjadok prodovzhennja terminu ekspluatatsii' pidigrivnykiv vysokogo i nyz'kogo tyskiv z napracjuvannjam ponad 30 rokiv. Polozhennja* [COV-H MIE 40.1.17.405:2005: Procedure for extending the service life of high and low pressure heaters with an operating time of more than 30 years. Provisions], Kyiv, Ukraine.
8. (2019), *ДСТУ 8943:2019: Truby stalevi elektrozvarni. Tehniczni umovy* [ДСТУ 8943:2019: Electrically welded steel pipes. Technical specification], Kyiv, Ukraine.
9. (2019), *ДСТУ 8974:2019: Stal'. Metalografichnyj metod ocinjuvannja mikrostruktury lystiv ta strichky* [ДСТУ 8974:2019: Steel. Metallographic method for assessing the microstructure of sheets and strips], Kyiv, Ukraine.
10. (2015), *ДСТУ ISO 4967:2015 (ISO 4967:2013, IDT): Stal'. Vyznachennja vmistu nemetalevyh vključen'*. Mikrografichnyj metod iz zastosuvannjam standartnyh diagram [ДСТУ ISO 4967:2015 (ISO 4967:2013, IDT): Steel. Determination of the content of non-metallic inclusions. Micrographic method using standard charts], Kyiv, Ukraine.
11. Chalko, L. (2024), “Structural-phase characteristics of damage to welded joints of TPP steam pipelines from heat-resistant steels”, *Avtomaticheskaya Svarka* [Automatic Welding], no. 3, pp. 34–40, <https://doi.org/10.37434/as2024.03.05>.
12. Dmytryk, V. V., Glushko, A. V., Iglis, S. P. (2020), “Structural changes in the metal of welded joints of long-term operated steam pipelines”, *Avtomaticheskaya Svarka* [Automatic Welding], no. 2, pp. 24–28, <https://doi.org/10.37434/as2020.02.04>.
13. Student O., Krechkovska H., Babiy L. (2013), “Vplyv teplozmin pid chas ekspluatatsii' parogoniv TES na statychnu trishhynostykyt stali 15H1M1F [Shutdowns effect during operation of steam pipeline of TPP on the fracture toughness of 15Kh1M1F steel]”, *Bulletin of TNU*, vol. 72, no. 4, pp. 199–206, ISSN 2522-4433 (print).
14. Dubov, A. A. (2010), “Problemy ocenki ostatochnogo resursa starejushhego oborudovannja [Problems of assessment of the residual life of aging equipment]”, *Technical diagnostics and non-destructive testing*, no. 2, pp. 49–54, ISSN 3041-2358 (print), ISSN 3041-2366 (on-line).
15. Dmitrik V. V., Kasyanenko I. V., Latynin Y. M. (2021), “Strukturnyj stan i poskodzhuvannja metalu zvarnyh z'jednan' paroprovodiv [Structural condition and damage of metal of welded joints of steam pipelines]”, *Avtomaticheskaya Svarka* [Automatic Welding], no. 9, pp. 38–42, <https://doi.org/10.37434/as2021.09.06>.
16. Berezina T. G., Bugai N. V., Trunin I. I. (1991), *Diagnostirovanie i prognozirovanie dolgovechnosti metalla teploenergeticheskikh ustanovok* [Diagnostics and prediction of metal durability of thermal power plants], Technika, Kyiv, Ukraine.
17. Dmytryk V. V., Garashchenko O. S., Berdnikova O. M. (2022), “Vyznachennja strukturno-fazovogo stanu zvarnyh z'jednan' iz teplostykyh perlitnyh stalej vykorystannjam udoskonalenogo metodu analizu [Heat-resistant pearlitic steels using an improved analysis method]”, *Avtomaticheskaya Svarka* [Automatic Welding], no. 6, pp. 11–16, <https://doi.org/10.37434/as2022.06.02>.
18. Skul'skij V. Yu., Tsaryuk A. K. (2004), “Novye teplostojchivye stali dlja izgotovlenija zvarnyh z'jednan' teplovyh jenergoblokov (Obzor) [New heat-resistant steels for the manufacture of weldments in heat power units (Review)]”, *Avtomaticheskaya Svarka* [Automatic Welding], no. 4, pp. 35–40, ISSN 0005-111X.

Надійшло (received) 18.12.2024

Відомості про авторів / About the Authors

Дмитрик Віталій Володимирович (Dmitrik Vitaly) – доктор технічних наук, проф. кафедри Зварювання, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна; e-mail: dmitrikvitali@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1085-3811>.

Сінлей Чень (Xinlei Chen) – аспірант кафедри Зварювання, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна; e-mail: SPP659hv@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2755-7725>.

Усатий Олександр Павлович (Usaty Oleksandr) – доктор технічних наук, старший науковий співробітник; завідувач кафедри турбінобудування, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна; e-mail: alpaus@ukr.net; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8568-5007>.

Касьяненко Ігор Вікторович (Kasianenko Ihor) – доцент кафедри Комп'ютерного моделювання та інтегрованих технологій обробки тиском, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна; e-mail: igorkasyanenko@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1375-3522>.