

УДК 620.22:51-74

DOI <https://doi.org/10.32782/3041-2080/2025-3-16>

## ДОСЛІДЖЕННЯ МІНЛИВОСТІ ФАЗ СТРУКТУРИ МЕТАЛУ ЗВАРНОГО З'ЄДНАННЯ

**Клочко Оксана Юрїївна,**

доктор технічних наук, професор,  
професор кафедри сервісної інженерії та технології матеріалів у машинобудуванні  
Державного біотехнологічного університету  
ORCID ID: 0000-0003-3623-6587

**Воронов Олександр Сергійович,**

студент  
Державного біотехнологічного університету  
ORCID ID: 0009-0009-2284-4152

**Дерябкіна Євгенія Станіславівна,**

кандидат технічних наук, доцент,  
доцент кафедри сервісної інженерії та технології матеріалів у машинобудуванні  
Державного біотехнологічного університету  
ORCID ID: 0000-0002-5531-0124

У статті розроблено новий спосіб оцінити деградацію через визначення ступеня неоднорідності структури металу зварних з'єднань, яка виникає під час виробництва та тривалої експлуатації відповідального обладнання, що призначено для роботи в складних умовах високих тисків та температур, на прикладі деталей паропроводів, виготовлених зі сталі 15X1M1Ф. Основу запропонованого способу становить методика дослідження металографічного зображення з використанням оптико-математичного аналізу. Ураховуючи складну будову таких структур, у статті як критерій для оцінки сформованої неоднорідності металу зварного з'єднання запропоновано новий параметр – мінливість фаз, що визначає мікроліквіацію в ній хімічних елементів та утворення дефектів кристалічної будови (дислокації) з вивільненням компонентів, що їх декорують. Для оцінки мінливості в границях як одного зерна, так і окремих фаз досліджено зображення мікроструктур різних ділянок металу зварного з'єднання: зварного шва, зони термічного впливу та основного металу. Виявлення закономірностей щодо деградації структури зварних з'єднань, здійснювали шляхом розрахунку кореляційних залежностей, ураховуючи значення, отримані під час побудови гістограм розподілу поєднань умовних кольорів (груп фаз) і їх мінливості. Це дало змогу попередньо оцінити ступінь неоднорідності фазового складу зварних з'єднань, ураховуючи значний розкид концентрації компонентів усередині ідентифікованих фаз близького за концентрацією компонентів складу. Розроблений підхід щодо оцінки причини і характеру деградаційних процесів структури різних ділянок металу зварного з'єднання може бути ефективно використано при розробленні нових комплексних технологій виробництва та відновлення теплоенергетичного обладнання, що дасть змогу продовжити термін його експлуатації, сприяти підвищенню економічності, зниженню витрат на ремонт та експлуатацію.

**Ключові слова:** деградація металу, зварні з'єднання, мінливість фаз, неоднорідність структури, металографічне зображення.

### **Klochko Oksana, Voronov Oleksandr, Deryabkina Evgeniya. Research on variability of phases in structure of metal of welded joint**

The work has developed a new method of assessment of degradation, by determining the degree of heterogeneity of the structure of metal of welded joints, which occurs in the production and prolonged operation of responsible equipment, which is intended for work in difficult conditions of high pressures and temperatures, on the example. The basis of the proposed method is the method of research of metallographic image using optical and mathematical analysis. Given the complex structure of such structures, in the work as a criterion for the evaluation of the formed heterogeneity of the metal of the welded connection, a new parameter is proposed – the variability of phases. To evaluate variability, both in the boundaries of one grain and separate phases, the image of microstructures of different areas of weld metal is investigated: areas of weld, thermal exposure and main metal. The identification of patterns on the degradation of the structure of welded joints was carried out by calculating correlation dependencies, taking into account the values obtained in the construction of histograms of distribution of combinations of conditional colors (phase groups) and their variability. The developed approach to assess the cause and nature of degradation processes of different sections of welded metal connection can be used effectively in the development of new complex production technologies and restoration of thermal power equipment, which will allow to extend its life, to promote economy, reduction of costs for repair and operation.

**Key words:** metal degradation, welded joints, phase variability, structural heterogeneity, metallographic image.

**Вступ.** Виробництво та тривала експлуатація зварних з'єднань обладнання відповідального призначення, як-от труби пароперегрівачів, паропроводів, колекторів установок високого тиску, супроводжується виникненням локальної конструкційної неоднорідності металу. Це є особливо чутливим насамперед стосовно теплоенергетичного обладнання, що працює за складних умов транспортування пару високих та надвисоких номінальних параметрів, 535...560 °С та 9,0...25,5 МПа температури та тиску відповідно [8]. Відносно таких об'єктів особливо небезпечними зонами потенційного техногенного ризику є зварні з'єднання, що відповідно до конструкційних особливостей, виробничих технологій та компенсаційних навантажень працюють в умовах додаткових операційних напружень. У зазначених умовах під час тривалої експлуатації сформована структурна неоднорідність сприяє інтенсифікації дифузійних процесів у металі зварних з'єднань, що призводить до їх деградації. З огляду на це, оцінка сформованого ступеня неоднорідності мікроструктури зварних з'єднань обладнання, яке працює тривалий термін у складних умовах, що дає змогу передбачити його експлуатаційну стійкість, є актуальною проблемою.

На розрахунковий термін експлуатації в 100 тис. год роботи, відповідно до затвердженого технічного регламенту [6], матеріал трубопроводів установок з високими й надкритичними параметрами пару повинен мати повільну повзучість (збільшуватися в діаметрі не більш ніж на 1%), що забезпечується використанням теплостійких хромомолібденованадієвих сталей 12X1MФ або 15X1M1Ф. У первинному стані такі сплави повинні мати регламентовану ферито-перлітно-бейнітну структуру: 20–35 % ділянок перліту та бейніту плюс ферит, але не менш ніж 15 % проміжного складника – фази бейніту, що гарантує високу теплостійкість. Структури з невеликою кількістю проміжної фази (здебільшого вздовж границь зерен) не рекомендовані, тому що можуть знижувати теплостійкість сплаву.

Відповідно до даних [12], найчастіше під час тривалої роботи деталей паропроводів, виготовлених зі сталі 15X1M1Ф, пошкоджуються такі зварні з'єднання, що працюють за температур 545–585 °С і тиску 20–25 МПа. Під час тривалої роботи зміни мікроструктури призводять до змін властивостей міцності та пластичності сплаву. У зазначених умовах у матеріалі зварних з'єднань відбувається суттєва інтенсифікація дифузійних процесів, пов'язаних з утворенням, рухом та взаємодією дислокацій, ліквідацією хімічних елементів [3; 8].

Відбувається безперервне накопичення пошкоджувальності, розвивається процес деградації металу зварних з'єднань через послідовне утворення дефектів, як-от пори повзучості на різних ділянках з'єднання, їх зростання та злиття в мікротріщини, що може призвести до руйнування металу. Найбільш інтенсивно утворення таких пор відбувається на ділянках часткової перекристалізації та сплавлення зони термічного впливу (далі – ЗТВ) зварних з'єднань у їх зовнішній ділянці [10]. Тріщини втомі, переважно на внутрішній поверхні зварних з'єднань, найактивніше утворюються в ділянках сплавлення, перегріву та часткової перекристалізації металу ЗТВ, рідше в металі шва та в основному металі. Відповідно [11], за тривалої експлуатації мікроструктура зварних з'єднань (ділянки металу ЗТВ, шва та основного) з різною швидкістю перетворюється у ферито-карбідну суміш, що відрізняється за своїм складом. В умовах експлуатаційних напружень та температури спостерігається дифузійний рух атомів хрому й інших легуючих елементів від центру зерен  $\alpha$ -фаз до їх границь. Одночасно з більшою швидкістю відбувається дифузія вздовж границь зерен металу, коефіцієнти таких дифузійних процесів не є постійними значеннями [1]. Найбільш надійним і релевантним параметром оцінки такої деградації мікроструктури зварних з'єднань є ступінь її неоднорідності.

У проведених дослідженнях структур хромовмісних гетерогенних сплавів виробів, що працюють у складних умовах високих температур і питомих тисків, неоднорідність розподілу хімічних елементів [2], що зумовлює різницю стехіометричного складу ідентифікованих фаз, виражали через абсолютне значення лапласіану в кожній точці металографічного зображення. Проте аналіз сформованої неоднорідності через складну будову таких структур, де морфологія, стехіометричний склад утворених у них окремих включень залежать від випадкових факторів, потребує врахування значного розкиду концентрації компонентів в ідентифікованих фазах близького складу. Тому в роботі як критерій для оцінки сформованої неоднорідності структури зварного з'єднання використано поняття **мінливості** [4], що дає змогу врахувати значний розбіг за концентрацію компонентів в ідентифікованих фазах близького за концентрацією компонентів складу.

**Методи та методики дослідження.** Одним з основних джерел інформації щодо властивостей зварних з'єднань є металографічні зображення. Математичну основу дослідження становив метод оптико-структурного аналізу оцінки

зображення через визначення зміни їх статистичних характеристик (пікселів та щільності розподілу), де координата кожного пікселя встановлює значення певного умовного кольору [5]. Дослідження неоднорідності структури металу зварених з'єднань проводили методом скінченних різниць через аналіз комбінацій поєднань умовних кольорів у заданих локальних фрагментах, відповідно до розташування обчислюваних значень, на зображенні металографічної структури, цифрованому у формат.pgm, з використанням двовимірної моделі. Досліджуване зображення розбивали на фрагменти розміром  $n \times l$  пікселя. Наприклад, для фрагмента розміром  $3 \times 3$  пікселі  $C(x, y)$ , загальна схема нумерації пікселів має вигляд:

$$C(x, y) = \begin{pmatrix} c_{i-1, j-1} & c_{i-1, j} & c_{i-1, j+1} \\ c_{i, j-1} & c_{i, j} & c_{i, j+1} \\ c_{i+1, j-1} & c_{i+1, j} & c_{i+1, j+1} \end{pmatrix}. \quad (1)$$

Як елемент матриці використовували піксель зображення  $c_{m,n}$ , що є кодом умовного кольору при оцифруванні фотографії ( $m = i - 1, i, i + 1$  – номер строки,  $n = j - 1, j, j + 1$  – номер стовпця). Обробку такої матриці виконували шляхом послідовного сканування кожного пікселя, задаючи його як середню точку  $c_{ij}$ , що міститься у фрагменті заданого розміру ( $3 \times 3$ ). Як критерій для оцінки ступеня неоднорідності зварних з'єднань у роботі використовували поняття **мінливості фази**, тобто мікроліквацію в ній хімічних елементів сплаву та утворення дефектів кристалічної будови (дислокації) з вивільненням компонентів, що їх декорують, насамперед вуглецю і кисню. Відповідно, за мінливість складу в одній конкретній точці фази у вибраній ділянці зображення брали співвідношення так званого показника мінливості (кількості збігів умовного кольору середньої точки з кольорами довколишніх її ( $n \times m$ ) – 1 точок, або пікселів) до кількості точок в аналізованих ділянках. Також для кожної обраної ділянки розраховували кількісне співвідношення ідентифікованих фаз. Статистичний аналіз отриманих даних для оцінки ступеня неоднорідності структури в локальних зонах, що визначають розкид концентрацій компонентів у фазах, проводили, використовуючи розподіл Пірсона. За розрахованими значеннями будували гістограми кольорів та мінливості.

**Результати.** Для оцінки мінливості фаз у металі зварних з'єднань, що має місце у границях як одного зерна, так й окремих фаз, у роботі досліджено зображення 40 мікроструктур різних ділянок зварного з'єднання обладнання

паропроводу, виготовленого зі сталі 15X1M1Ф: металу шва, метал ЗТВ та основний метал.

За результатами попередніх досліджень гетерогенних структур хромовмісних залізовуглецевих сплавів [11], весь діапазон кольорів, одержуваних при цифровій обробці зображень, від 0 до 255 півтонів сірого розділено на 16 дискретних інтервалів – номерів умовного кольору. Отримані значення згруповано відповідно за трьома групами структурних складників: фаз фериту з різним ступенем пошкоджуваності та насиченням вуглецем; бейніту й аустеніту та карбідних фаз. Кожній умовній групі відповідає такий інтервал кольорів: 1–6 (кольори 255–154) – перша група фаз фериту; 7–8 (кольори 153–120) та 9–10 (кольори 119–102) – друга група фаз бейніту (перехідної фази між феритом і цементитом) й аустеніту відповідно; 11–16 (кольори 85–0) – третя група карбідних фаз: від 11 до 12 – карбідні фази цементитного типу різного ступеня легування, від 13 до 16 – спецкарбіди всіх типів і нестехіометричного складу, що виділяються в різний період деградації металу. Тобто всі ідентифіковані структури поділені на три групи, включно із 16 кольорами: групи фериту, бейніту / аустеніту та карбідів.

Виявлення закономірностей щодо деградації структури зварних з'єднань, здійснювали шляхом побудови кореляційних залежностей, враховуючи різні чинники, а саме значення, що були отримані при побудові гістограм розподілу поєднань умовних кольорів (груп фаз) і мінливості. Це дало змогу попередньо оцінити ступінь неоднорідності фазового складу зварних з'єднань.

На підставі виявлених сполучень умовних кольорів отримано кореляційну модель їх взаємозв'язку у вихідному стані й після напрацювання, що перевищувало розрахункове, яка відображає вплив дифузійних процесів під час тривалої експлуатації на структуру досліджуваного зварного з'єднання. Визначено коефіцієнти множинної кореляції ( $R_{mn}$ ) і значущість факторів цієї моделі, наприклад, для мікроструктури металу зварного шва (сплав СВ08ХМФА) зварного з'єднання зі сталі 15X1M1Ф (табл. 1).

Установлено, що при напрацюванні, термін якого перевищує розрахунковий майже вдвічі, структура зварних з'єднань поступово, з різною швидкістю в різних ділянках, перетворюється в феритно-карбідну суміш, що відрізняється за хімічним складом та будовою карбідної фази. Так, найбільш значущими факторами у вихідному стані (див. табл. 1, структура № 1) є кольори фериту – 1, 2 (нелегованого) та 5, 6

Таблиця 1

**Гістограми розподілу та значущість умовних кольорів у кореляційних моделях зображень структур металу в зонах зварного шва ( $R_{mn} = 0.98$ ): вихідна структура (№ 1), після тривалої експлуатації (№ 4)**

Номер умовного інтервалу / кольору																№
16	15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	
0	17	34	51	68	85	102	119	136	153	170	187	204	221	238	255	
карбідні фази						аустеніт			бейніт			фази фериту				
Гістограма розподілу умовного кольору, %																
16.3	5.2	8.2	7.8	2.7	0.8	3.6	1.2	10.5	11.0	3.2	4.9	5.7	3.2	1.4	14.3	1
14.5	12.2	7.6	12.2	8.7	4.9	3.3	2.8	5.1	6.7	3.3	1.9	3.1	2.3	5.7	5.7	4
Значущість параметра																
05.9	06.9	00.0	00.3	01.2	00.4	04.5	00.7	04.7	05.6	02.1	02.8	01.0	00.6	06.1	09.0	1
05.2	04.8	00.0	02.2	04.1	06.3	00.1	00.0	02.5	03.5	09.3	07.3	01.0	01.2	06.3	03.1	4

(різного ступеня легування); фази 7–10 – проміжні бейніту та аустеніту (з різним хімічним складом) відповідно; карбідні фази цементитного типу – 15 та 16. Отримані результати відповідають регламентованому складу структури таких виробів.

У деформованій структурі зварного з'єднання після тривалого терміну експлуатації спостерігали суттєві зміни (див. табл. 1, структура № 1) як у фазовому складі (зміна типу карбідів, розпад аустеніту), так і в локальних фрагментах фаз (зміна в складі феритних та карбідних фаз, зменшення кількості бейнітного складника внаслідок дифузії вуглецю та легуючих елементів), частковий розпад фаз аустеніту. Зафіксовано зменшення кількісне та значущого складника карбідів цементитного типу  $M_3C$  (умовні кольори 16 та 14) та нелінійне зростання – спецкарбідів  $M_7C_3$  та  $M_{23}C_6$  (кольори 11–13), що підтверджується даними рентгеноструктурного аналізу [9]. Установлено, що досліджена мікроструктура різних ділянок металу зварних з'єднань містить фази, що відрізняються за хімічним складом і сформовані на різних етапах експлуатації виробу.

Аналіз змін залежності умовних кольорів, що описують фази сплаву, у первинному стані та після тривалого терміну експлуатації показав, що між локальними фрагментами фаз спостерігаються значні зміни і в кількісному складі. Установлено, що гістограми мінливості за зміною умовних кольорів, показують високі коефіцієнти кореляції, але для уточнення необхідно розглядати також зміни поєднань умовних кольорів у виявлених групах фаз. Тому кореляційний аналіз проводили відносно ідентифікованих трьох груп фаз, тому обробку зображення проводили відповідно до триколірних інтервалів. Під час оцінки кожного пікселя зображення відбувалося послідовне сканування всіх довколишніх у матриці розміром  $3 \times 3$ . Для такої розмірності

схема нумерації точок навколо обраної  $c_1$  відповідає (1), де  $m = n = 3$ , тому мінливість усереднені такого фрагмента обчислювали як співвідношення цього показника до кожного з дев'яти елементів. У результаті отримували гістограми збігів кольорів у точках  $c_2, \dots, c_9$  відносно середньої –  $c_1$ . З огляду на задані умови розподілу всіх умовних кольорів, виявлених на зображенні, усередині кожного з фрагментів  $3 \times 3$  можуть перебувати тільки 7 комбінацій таких кольорів, які позначені як 1, 2, 3. Після визначення співвідношення для кожної середньої точки  $c_1$  відповідного номера з отриманих поєднань фаз було введено матрицю номерів поєднань фаз (табл. 2).

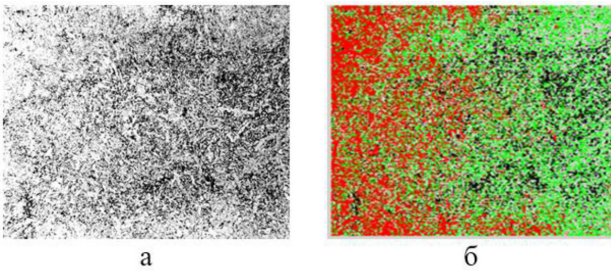
Таблиця 2

**Комбінації можливих поєднань кольорів груп фаз усередині кожного фрагмента зображення  $3 \times 3$  пікселі**

№ поєднання фаз	Можливі поєднання кольорів груп фаз для 9 пікселів
1	кольори групи фаз фериту
2	кольори групи фаз аустеніту та / або бейніту
3	кольори групи карбідних фаз
4	кольори груп фаз фериту + бейніту / аустеніту
5	кольори груп фаз фериту + карбідів
6	кольори груп фаз бейніту / аустеніту + карбідів
7	кольори груп фаз фериту + бейніту / аустеніту + карбідів

Гістограми кількісного співвідношення виявлених фаз розраховували за таким алгоритмом. Кількість кольорів першої групи фаз по черзі підсумовували з кількістю кольорів другої і третьої груп. Потім кількість кожної з груп ділили на цю суму й множили на 100 %. Як приклад, для зображення структури металу шва (сплав СВ08ХМФА) зварного з'єднання зі сталі 15Х1М1Ф, рис. 1, а,

побудовано гістограму розподілу умовних кольорів (груп фаз), рис. 1, б, де ідентифіковані групи фаз закодовано різними кольорами: фази фериту – чорний (умовні кольори 1, 4); зелений – бейніт та аустеніт (умовні кольори 8 та 10); жовтий – спеціальні карбіди відповідно до даних [8], типу  $M_7C_3$  та  $M_{23}C_{63}$  (умовний колір 16); червоний – карбіди цементитного типу (колір – 11). Отримані значення дають змогу попередньо оцінити ступінь неоднорідності фазового складу сплаву й значно зменшити час розрахунків, тоді як для більш поглибленої оцінки необхідно розглядати всі поєднання умовних кольорів, що входять у ці групи фаз.



**Рис. 1. Мікроструктура металу шва (сплав СВ08ХМФА) зварного з'єднання зі сталі 15Х1М1Ф: а) вихідна фотографія,  $\times 100$ ; б) гістограма розподілу умовних кольорів (груп фаз)**

Для цього за результатами проведених досліджень побудовано відповідності виявлених під час аналізу номерів поєднань груп фаз (див. табл. 2), що входять у них, інтервалів умовних кольорів усередині кожного фрагмента зображення розміром  $3 \times 3$  пікселі. Під час оцінки мінливості для кожної аналізованої ділянки отримували 3 (по числу груп фаз) або 16 (по числу інтервалів умовних кольорів фаз)

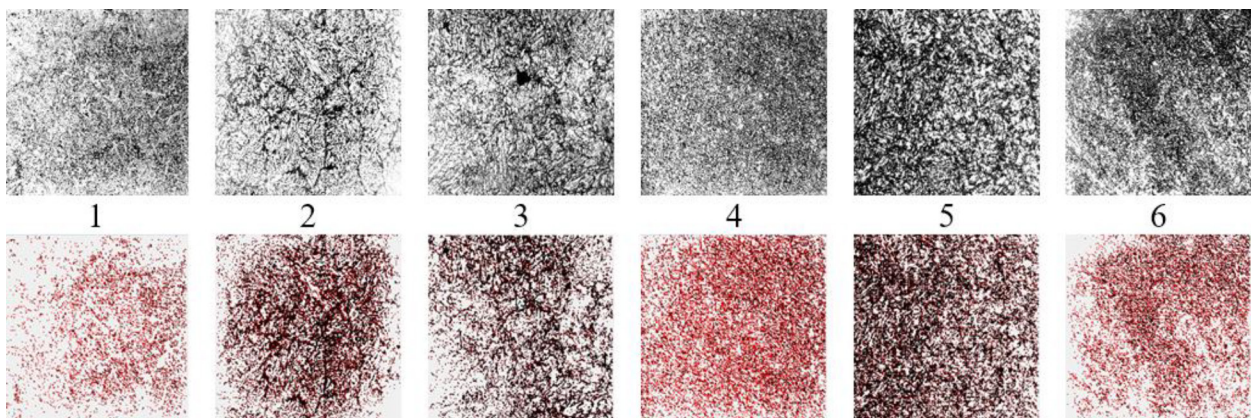
гістограм по 9 чисел (за кількістю пікселів). Обходячи вибраний фрагмент відповідно до схеми (1), залежно від числа збігів з довколишніми вісьмома точками, додавали одиницю до того з 9 чисел, якому випадку відповідала ситуація, та отримували показники мінливості. Після повного обходу фрагмента кожне з отриманих значень ділили на загальне число пікселів, що підлягали аналізу, і знаходили середню мінливість у кожній точці цієї фази. Далі формально за програмою складали число збігів у кожному стовпцю, а потім кожен його елемент поділили на суму показників мінливості (імовірність збігів кольору). Середнє значення мінливості (математичне очікування), знаходили за формулою:

$$\bar{x} = \sum_{k=1}^n kp_k, \quad (2)$$

де  $p_k$  – показник мінливості,  $n = 9$  – число пікселів,  $k$  – номер пікселя.

Так, обчислювали мінливість для кожної фази. Оскільки розподіл збігів розглядається по площі фотографії, то для такого завдання застосували розподіл Пірсона. Відповідно до зазначеного алгоритму були побудовані гістограми мінливості. Це дало змогу оцінити сформовану неоднорідність мікроструктур зварних з'єднань, що виникла при виробництві (під час зварювального нагріву) та тривалої експлуатації обладнання, показуючи розбіг ідентифікованих поєднань груп фаз усередині кожного з фрагментів зображень розміром  $3 \times 3$  пікселі для досліджуваної вибірки із 40 фотографій структур зварних з'єднань.

На рис. 2 наведено приклади графічного представлення розрахованих гістограм мінливості для різних ділянок металу зварного



**Рис. 2. Графічне представлення мінливості різних ділянок металу зварного з'єднання зі сталі 15Х1М1Ф, де структури: 2, 3, 5 – часткової перекристалізації ЗТВ; 1, 4 – зварного шва (сплав СВ08ХМФА); 6 – основного металу. Верхній рядок – фотографії мікроструктур,  $\times 100$ ; нижній – гістограми. Зображення 1, 4, 6 – первинний стан, інші – після експлуатації**

з'єднання у первинному стані та після тривалої експлуатації: часткової перекристалізації ЗТВ, рис. 2, структури 2, 3, 5; зварного шва, рис. 2, структури 1, 4; основного металу, рис. 2, структура 6. Зображення гістограм мінливості закодовано безперервним кольором від найтемніших (чорних) до більш світлих (червоних) тонів. Найбільш темні відтінки (див. рис. 2) мають ділянки з вищим ступенем неоднорідності структури на зображенні. Можна побачити, що найнижчі значення ступеня неоднорідності мають зображення структур металу у вихідному стані (1, 4, 6), що відповідає отриманим результатам досліджень.

**Висновки.** Розроблено новий спосіб оцінки деградації металу зварних з'єднань відповідального обладнання, призначеного для роботи в складних умовах високих тисків та температур,

із теплостійких сталей перлітного класу через визначення ступеня неоднорідності структури, що виникає при виробництві та тривалій експлуатації. Виявлення закономірностей здійснювали шляхом побудови кореляційних залежностей, ураховуючи значення, отримані під час розрахунків гістограм розподілу поєднань умовних кольорів (груп фаз) і їх мінливості. Це дало змогу попередньо оцінити ступінь неоднорідності фазового складу, що відображає вплив дифузійних процесів під час тривалої експлуатації на досліджувану структуру. Розроблений підхід щодо оцінки причини й характеру деградаційних процесів структури металу різних ділянок зварного з'єднання може бути ефективно використано при розробленні нових комплексних технологій виробництва та відновлення обладнання відповідального призначення.

#### ЛІТЕРАТУРА:

1. Векслер Е.Я., Чайковський В.М. Оцінка пошкодженості та прогнозування залишкового ресурсу металу паропроводів високого тиску після тривалої експлуатації. *Енергетика та електрифікація*. 1994. № 4. С. 9–14.
2. Дерябкіна Є.С. Аналіз основ зміцнення низьколегованих сталей та вибір зварювальних матеріалів для багатодугового зварювання під флюсом труб зі сталі 17Г1С-У. *Машинобудування*. 2017. № 19. С. 133–138.
3. Дмитрик В.В., Соболев О.В. та ін. Особливості деградації металу зварних з'єднань паропроводів. *Автомат. Зварювання*. 2015. № 7. С. 12–17.
4. Дмитрик В.В., Сиренко Т.А. До механізму дифузії хрому та молібдену в металі зварних з'єднань паропроводів. *Автоматичне зварювання*. 2012. № 10. С. 22–26.
5. Сиротюк А.М., Каптії О.В., Дмит І.М. та ін. Експертна система оцінювання ризику руйнування конструктивних елементів трубопроводів теплоенергетичної системи. *Методи та прилади контролю якості*. 2013. № 2(31). С. 126–136.
6. Скобло Т.С., Клочко О.Ю. та ін. Патент № 120043 України. Спосіб виявлення неоднорідності фаз у високовуглецевих сплавах. Опубл. 25.10.17, Бюл. № 20.
7. Скобло Т.С., Клочко О.Ю. та ін. Теоретичні та експериментальні основи прогнозування структуроутворення, властивостей високовуглецевих сплавів : Монографія. Харків : Діса плюс, 2019. 278 с.
8. СОУ-Н МЕВ 40.1-00130044-602/56:2011. Норми часу на ремонт основного й допоміжного енергетичного обладнання. Методичні рекомендації. ДП «Львівське конструкторське бюро», 2011.
9. Технічний регламент обладнання, що працює під тиском. Постанова Кабінету Міністрів України від 16 січня 2019 р. № 27, 2019.
10. Kovrizhnykh A. M., Baryshnikov V. D. et al. Long-term strength of metals and creep equations based on the Coulomb-Mohr criterion. *J. Appl. Mech. Tech. Phy.* 2007. 48. 871–877. <https://doi.org/10.1007/s10808-007-0111-y>
11. Skoblo T. S., Klochko O. Y. et al. Signs of Degradation of Carbide Phases in Chromium-Nickel Cast Iron at the Operating Temperatures of Forming Rolls. *Mater Sci.* 2021. 56, 771–778. <https://doi.org/10.1007/s11003-021-00494-6>
12. Skoblo T. S., Klochko O. Yu. et al. New approaches in study of inhomogeneity of heterogeneous structures. *Metallofizika i Noveishie Tekhnologii*. 2018. 40(2). 255–280. DOI: 10.15407/mfint.40.02.255

#### REFERENCES:

1. Veksler, E. Ya., & Chaikovskiy, V. M. (1994). Otsinka poshkodzhenosti ta prohnozuvannia zalyshkovoho resursu metalu paroprovodiv vysokoho tysku pislia tryvaloi ekspluatatsii [Evaluation of damaged and forecasting residual resource of high -pressure vapor lines after prolonged operation]. *Enerhetyka ta elektryfikatsiia*, 4, 9–14 [in Ukrainian].

2. Deriabkina, Ye. S. (2017). Analiz osnov zmitsnennia nyzkolehovanykh stalei ta vybir zvariuvalnykh materialiv dlia bahatoduhovoho zvariuвання pid flusom trub zi stali 17H1S-U [Analysis of the basics of strengthening low-alloy steels and selection of welding materials for multi-arc submerged arc welding of pipes made of 17G1S-U steel]. *Mashynobuduvannia*, 19, 133–138. [in Ukrainian]
3. Dmytryk, V. V., Sobol, O. V. ta insh. (2015). Osoblyvosti dehradatsii metalu zvarnykh ziednan paroprovodiv [Features of degradation of metal welded steam lines]. *Avtomat. Zvariuвання*, 7, 12–17. [in Ukrainian].
4. Dmytryk, V. V., & Syrenko, T. A. (2012). Do mekhanizmu dyfuzii khromu ta molibdenu v metali zvarnykh ziednan paroprovodiv [On the mechanism of diffusion of chromium and molybdenum in the metal of welded joints of steam pipelines]. *Avtomat. zvariuвання*, 10, 22–26 [in Ukrainian].
5. Syrotiuk, A. M., Kaptii, O. V., Dmyt I. M. ta in. (2013). Ekspertna systema otsiniuvannia ryzyku ruinuвання konstruktyvnykh elementiv truboprovodiv teploenerhetychnoi systemy [Expert system assessment of risk of destruction of structural elements of pipelines of thermal power system]. *Metody ta pryklady kontroliu*, 2(31), 126–136. [in Ukrainian].
6. Skoblo, T. S., Klochko, O. Yu. ta insh. (2017). Patent № 120043 Ukrainy. Sposib vyiavlennia neodnorodnosti faz u vysokovuhletsevykh splavakh [Method for detecting phase heterogeneity in high-carbon alloys]. Opubl. 25.10.17, Biul. № 20 [in Ukrainian].
7. Skoblo, T. S., Klochko, O. Yu. ta insh. (2019). Teoretychni ta eksperymentalni osnovy prohnozuvannia strukturoutvorennia, vlastyvopei vysokovuhletsevykh splaviv: Monohrafiia [Theoretical and experimental framework for prediction of structure formation and high-carbon doped alloys properties. *Monograph*]. Kharkiv : Disa plius. 278 s. [in Ukrainian].
8. SOU-N MEV 40.1-00130044-602/56:2011. (2011). Normy chasu na remont osnovnoho i dopomizhnoho enerhetychnoho obladdannia. Metodychni rekomendatsii [Time standards for the repair of main and auxiliary power equipment. Methodological recommendations]. DP «Lvivske konstruktorske biuro». [in Ukrainian].
9. Tekhnichniy rehlament obladdannia, shcho pratsiuie pid tyskom [Technical regulations for pressure equipment]. Postanova Kabinetu Ministriv Ukrainy vid 16 sichnia 2019 r. N 27. [in Ukrainian]
10. Kovrizhnykh, A. M., Baryshnikov, V. D. et al. (2007). Long-term strength of metals and creep equations based on the Coulomb-Mohr criterion. *J. Appl. Mech. Tech. Phy*, 48, 871–877. <https://doi.org/10.1007/s10808-007-0111-y>
11. Skoblo, T. S., Klochko, O. Y. et al. (2021). Signs of Degradation of Carbide Phases in Chromium-Nickel Cast Iron at the Operating Temperatures of Forming Rolls. *Mater Sci*, 56, 771–778. <https://doi.org/10.1007/s11003-021-00494-6>
12. Skoblo, T. S., Klochko, O. Yu. et al. (2018). New approaches in study of inhomogeneity of heterogeneous structures. *Metallofizika i Noveishie Tekhnologii*, 40(2). 255–280. DOI: <https://doi.org/10.15407/mfint.40.02.255>