

# ВИЗНАЧЕННЯ СТРУКТУРНО-ФАЗОВОГО СТАНУ ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ ІЗ ТЕПЛОСТІЙКИХ ПЕРЛІТНИХ СТАЛЕЙ ВИКОРИСТАННЯМ УДОСКОНАЛЕНОГО МЕТОДУ АНАЛІЗУ

В.В. Дмитрик<sup>1</sup>, О.С. Гаращенко<sup>1</sup>, О.М. Берднікова<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», 61002, м. Харків, вул. Кирпичова, 2

<sup>2</sup>ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: [garashchenko.helena@gmail.com](mailto:garashchenko.helena@gmail.com)

Представлено результати визначення кількості та розмірів зерен структурних складових металу зварних з'єднань паропроводів. Зазначене визначення виконували шляхом використання удосконаленого методу аналізу структурно-фазового стану металу зварних з'єднань. Встановили, що в процесі довготривалого напрацювання зварних з'єднань зерна  $\alpha$ -фази збільшуються за розмірами. Структурний аналіз проводили стосовно основного металу зварних з'єднань, ділянок зони термічного впливу, а також металу шва. Встановили, що при довготривалому напрацюванні зварних з'єднань паропроводів, на ділянках їх зони термічного впливу збільшуються розміри зерен. Виявили, що частково ліквідуються границі між окремими зернами. На основі аналізу статистичних даних, при застосуванні методу січних ліній, виявили розміри зерен, а також їх форму і розподіл. Бібліогр. 9, табл. 1, рис. 7.

*Ключові слова:* зварні з'єднання паропроводів, металографічний аналіз, величина зерен, кількість зерен, розміри зерен, пікселі

**Вступ.** В металі паропроводів, довготривало працюючих в умовах повзучості та малоциклової втоми, проходять структурно-фазові зміни, що призводить до зниження їх експлуатаційних характеристик [1]. Такі зміни в більшій мірі відбуваються в металі зварних з'єднань паропроводів, чому сприяє наявність їх вихідної структурної неоднорідності. Виявлення структурно-фазових змін, а також рівня пошкоджуваності металу зварних з'єднань, є доцільним для встановлення надійної роботи та визначення залишкового ресурсу зварних з'єднань паропроводів.

Для дослідження структурно-фазового стану металу зварних з'єднань доцільно застосовувати метод січних ліній та кіл [2], який дозволяє з більшою точністю його виконувати. Наведений метод дозволяє з більшою мірою визначати кількість зерен відповідних структур, їх розміри і форму, а також забезпечує уточнення залежності механічних властивостей металу від величини зерен і дозволяє виявити, за допомогою кількісного аналізу, утворення нових зерен і зерен, які можна віднести до бракувальних. При довготривалому напрацюванні зварних з'єднань із теплостійких сталей в умовах повзучості їх вихідна структура перетворюється на феритно-карбідну суміш [1, 3, 4]. Наявність наведеної структури суттєво знижує механічні властивості металу зварних з'єднань, а також призводить до прискореного утворення пор повзучості та тріщин втоми [3–5].

**Літературний огляд.** Розвиток методів вивчення структури металу паропроводів шляхом використання комп'ютерних технологій за-

безпечує підвищення рівня кількісної оцінки їх структурно-фазового стану. Взаємозв'язок між фізико-механічними властивостями і структурно-фазовим станом вивчали і раніше [1–4]. Однак відомі методи не в повній мірі враховували властивості складових структур. Відповідно, знижувалась оцінка залежності властивостей металу від його структурно-фазового стану. Кількісна оцінка передбачає визначення середнього розміру зерен і статистичний розподіл зерен за їх розмірами, з урахуванням фазової відповідності. Наприклад, в нормативних положеннях [6] надається зв'язок механічних властивостей металу зварних з'єднань після їх термічної обробки з розмірами зерен аустеніту і фериту.

Для встановлення залежності механічних властивостей металу зварних з'єднань від їх структурного стану розробили інтегровану математичну модель [7]. Дана модель дозволяє внести уточнення в зміну мікроструктури при перетворенні аустеніту в процесі охолодження і утворення продуктів розпаду аустеніту. Моделювання структурних змін і відповідних механічних властивостей в умовах високих напружень і температур реалізували шляхом застосування методу кінцевих елементів (FE) з урахуванням кінетики фазових перетворень [8].

При довготривалій експлуатації в умовах повзучості в структурі металу паропроводів відбуваються процеси повернення та рекристалізації. Проходження таких процесів забезпечує збільшення зерен, що призводить до прискорення пошкоджуваності за механізмом утворення пор

Дмитрик В.В. – <https://orcid.org/0000-0002-1085-3811>, Гаращенко О.С. – <https://orcid.org/0000-0002-9572-6095>,

Берднікова О.М. <https://orcid.org/0000-0001-9754-9478>

© В.В. Дмитрик, О.С. Гаращенко, О.М. Берднікова, 2022

повзучості і за механізмом утворення тріщин втоми. Відповідно, визначення величин зерен і їх локальної концентрації представляється актуальним для встановлення надійної роботи зварних з'єднань паропроводів і уточнення їх залишкового ресурсу.

Метою роботи є удосконалення методу металографічного аналізу структурно-фазового стану металу зварних з'єднань із теплостійких сталей стосовно їх довготривалого напрацювання в умовах повзучості.

**Методологія досліджень.** Вирішення задачі аналізу структури зразків зварних з'єднань виконували шляхом використання запропонованої системи визначення і систематизації структурних складових.

Система дозволяє з більшою точністю визначати кількісну оцінку структури металу на основі аналізу зображень, які складаються з масиву пікселів, за RGB і HSV моделями кольору. Рішення поставленої задачі передбачало вдосконалення підсистеми (рис. 1), використання якої забезпечує:

- формування масивів пікселів з виявленням компонент кольору структур за моделями RGB і HSV;
- виконання візуалізації зображення структур;
- виявлення основних статистичних характеристик розподілення компонент кольору;
- встановлення фрактальних розмірностей за заданим діапазоном масштабів (області скейлінгу) для виміру довжини контуру;
- виконання статистичного аналізу розподілу досліджуваних ознак (виділених пікселів за ши-

риною та довжиною зображення кількості зерен і їх розмірів за лініями, що вимірюються);

– обґрунтування висновків стосовно форми візуалізації результатів аналізу у вигляді щільності розподілення або інтегральної функції ймовірності їх концентрації.

Визначення компонентів моделей кольору RGB і HSV для масиву пікселів зображення виконували шляхом визначення їх властивостей: Red, Green, Blue, Hue, Saturation, Brightness (Value).

Визначали кількість зерен і їх розміри уздовж прямих ліній, які вимірювали по граничним пікселям шляхом розгляду металографічних зображень мікрошліфів при збільшенні  $\times 320$ . Вивчали структуру зразків зварних з'єднань зі сталі 15X1M1Ф (таблиця), які вирізали з діючих паропроводів з напрацюванням 200 і 270 тис. год, а також із зразків зварних з'єднань із даної сталі (без напрацювання), які виготовляли на штатних режимах (рис. 2).

Спочатку визначали пікселі зображення стосовно складових структури металу. Враховували, що ділянки виділення елементів формуються у відповідності до заданого діапазону значень фільтру за вибраними компонентами кольору (одному або декільком) на основі RGB і HSV-моделі (рис. 3). В результаті утворюються замкнені ділянки виділення, що складаються з масиву пікселів, які відносяться до досліджуваного структурного елементу. Такі ділянки виходять внаслідок попадання величин компонент кольору пікселів в

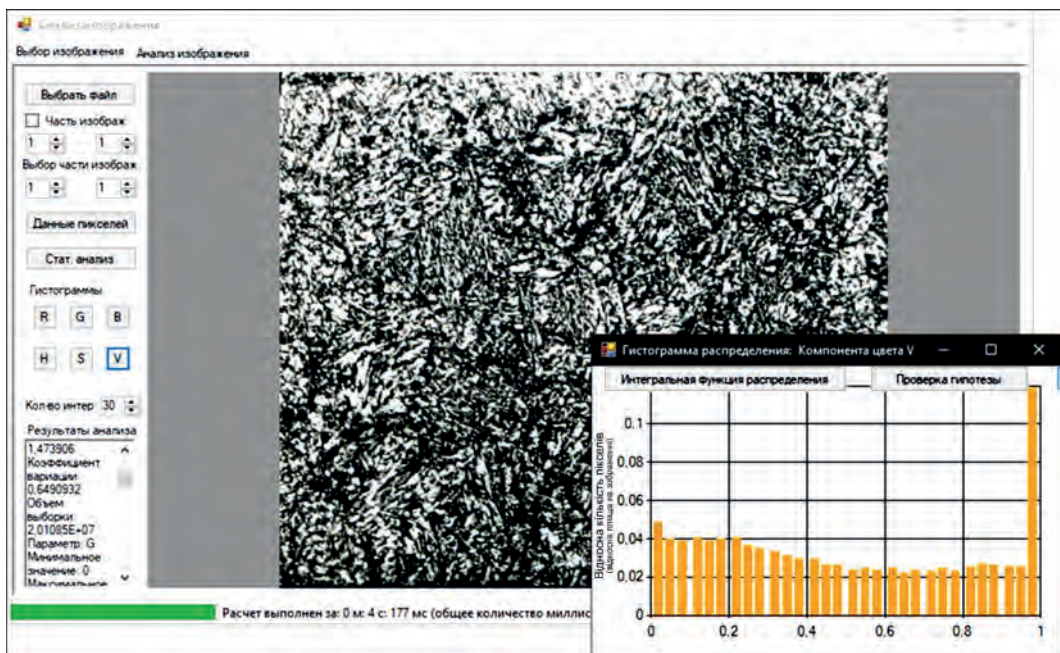


Рис. 1. Скриншот екранної форми системи статистичного аналізу зображень мікрошліфів. Вихідна структура основного металу зварного з'єднання зі сталі 15X1M1Ф,  $\times 320$

**Хімічний склад сталі 15X1M1Ф, мас. %**

C	Si	Mn	Ni	S	P	Cr	Mo	V	Cu
0,1...0,15	0,17...0,37	0,4...0,7	$\leq 0,25$	$\leq 0,025$	$\leq 0,025$	1,1...1,4	0,9...1,1	0,2...0,35	$\leq 0,025$



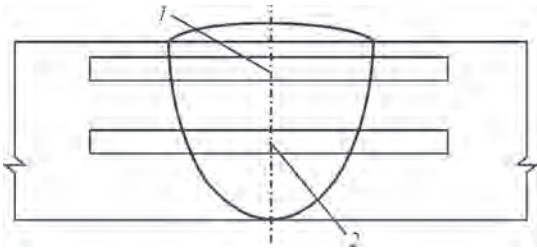


Рис. 2. Схема вирізки зразків зі зварних з'єднань у поперечному перерізі

певний діапазон. У більшості випадків ділянки виділення створюються при розгляді основної складової структури. Контуром ділянок виділення були виявлені приграничні виділені пікселі, визначальною умовою для яких було розташування невиділених пікселів. Вирішення задачі спрощувалось при розгляді двохфазної структури металу. Стандартна задача виявлення кількості зерен і їх розмірів вирішувалась з урахуванням граничних пікселів, що перетинаються вимірювальною лінією. Шляхом виявлення відстаней між граничними пікселями виявляли розміри зерен і відстань між ними.

Візуалізацію металографічного аналізу виконували шляхом виділення на зображенні мікрошліфа ділянок перліту з заміною оригінального кольору (рис. 3, а) на обраний білий колір (рис. 3, б).

Враховували рівень і поріг світлості  $V_{\max}$  (компонента яскравості  $V$  для моделі кольору HSV).

В якості порогового значення яскравості кольору в основному приймали  $V_{\max} = 0,44$ , що дозволило виділити перліт на зображенні мікрошліфа. Дана величина також розглядалась стосовно щільності розподілу величин компоненти  $V$  (яскравість) для моделі кольору HSV.

На зображенні мікрошліфа (див. рис. 3, а) перліт можна віднести до основного структурного елементу, який є близьким до бракувальних структур в металі зварних з'єднань. На рис. 3, б наведено накладені вимірювальні лінії (задано по 3 горизонтальних і вертикальних ліній з виділеними пікселями, що належать фериту).

Враховували наявність обмеження за мінімальною і максимальною кількістю вимірювальних

ліній, що є достатнім для статистично обґрунтованого визначення кількості зерен та їх розмірів. Обмеженнями для вибору кількості ліній виміру (див. рис. 3) були мінімальний розмір зображення і умова визначення граничного пікселя. З урахуванням необхідності статистичного аналізу особливостей, які досліджувались, виявляли умови врахування мінімальної кількості ліній  $N_1 > 3$ . Зображення мікрошліфів, що досліджувались, мали однакові розміри –  $1536 \times 1152$  пікселів. Відповідно сформували наступний список кількості ліній  $N_1 = \{3, 5, 7, 9, 20, 30, 40, 60\}$ .

Використання постійної кількості вимірювальних ліній  $N$  (горизонтальних і вертикальних) для всіх зображень дозволило отримати відносні значення досліджених ознак для їх наступного зіставлення. Таким чином надавали можливість виконання порівняльного аналізу кількості зерен і їх розмірів.

На рис. 4 наведено результати аналізу зображень, які отримали шляхом використання запропонованої системи, що надаються як гістограми щільності розподілів ознак.

Гістограми щільності розподілу розмірів зерен наведено в пікселях зображення. При подальшому аналізі розглядали відносні величини досліджуваних ознак по відношенню до ширини зображення. Такий підхід дозволив виконувати порівняльний аналіз незалежно від ступеню деталізації вихідного зображення. Подальший перехід до абсолютних величин є можливим з урахуванням відомого фактичного розміру ділянок.

Основною характеристикою аналізу вважали середньоарифметичну величину розмірів зерен [9]. В досліді одержаних результатів (див. рис. 4), додатково до середньоарифметичної величини також розглядали середньоквадратичний відхил значень досліджуваних ознак. Розгляд двох статистичних характеристик виявився достатнім для кількісної оцінки структурних змін у досліджуваних зразках.

**Обговорення результатів дослідження.** При вирішенні задачі враховували виявлений вплив кількості заданих ліній виміру на досліджувані ознаки. Одержані залежності (представлені на

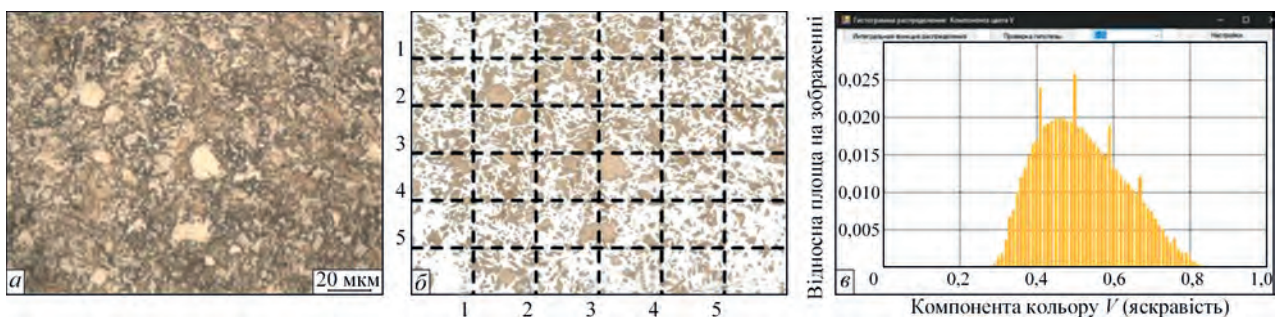


Рис. 3. Зображення мікрошліфа (а) після виділення пікселів з яскравістю до 0,52 і задання п'яти вертикальних і горизонтальних вимірювальних ліній (б) для основного металу, (в) – гістограма розподілу яскравості кольору пікселів. Зварне з'єднання зі сталі 15X1M1Ф. Ресурс 270 тис. год

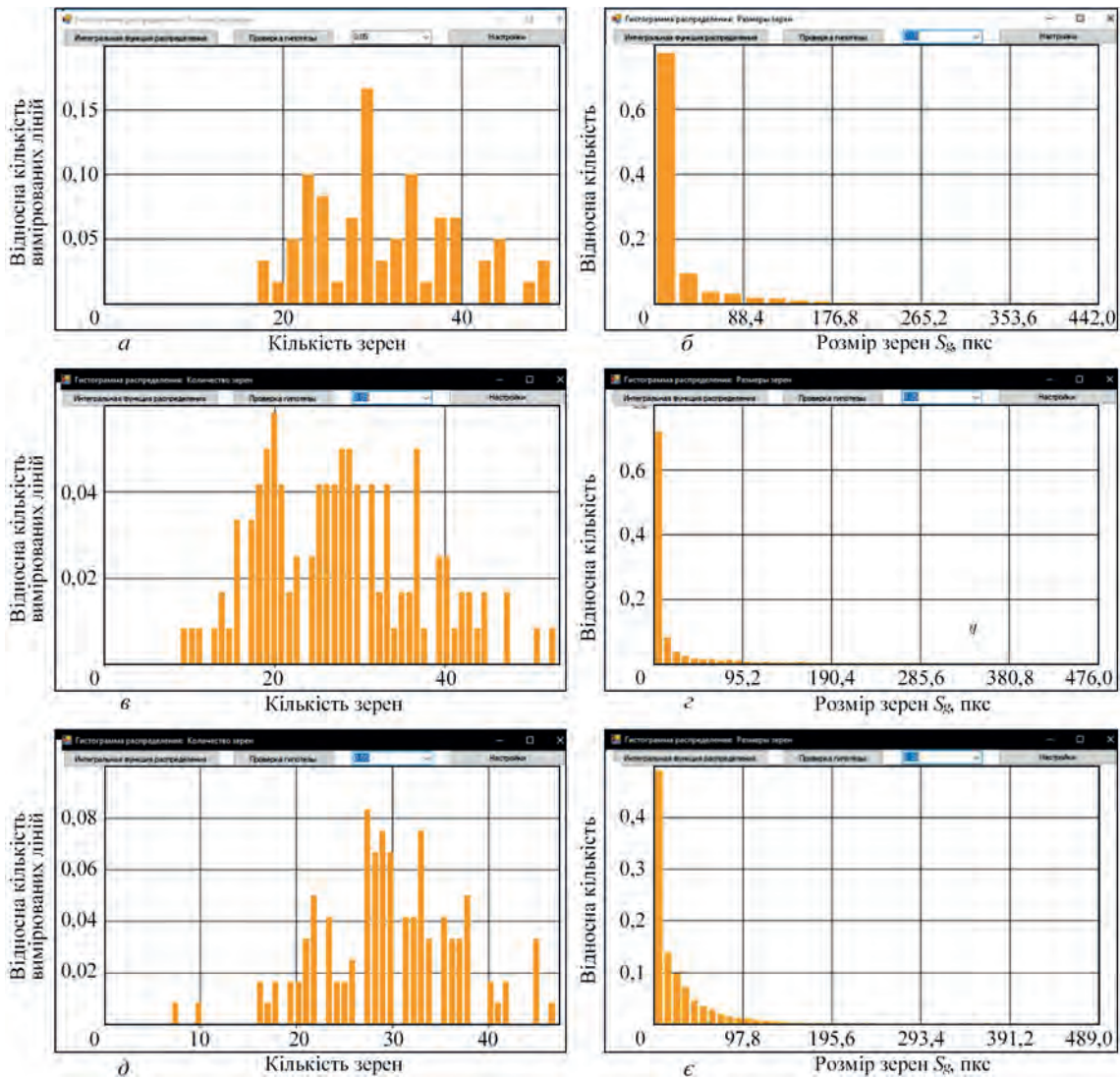


Рис. 4. Гістограми розподілу досліджуваних ознак стосовно структури металу шва (а, б), основного металу (в, з) та ЗТВ (д, е) вихідного зразка

рис. 5) враховували для всіх отриманих зображень мікрошліфів для забезпечення порівняльного аналізу. Приклади результатів розрахунку за визначенням кількості зерен і їх розмірів стосовно однієї з досліджуваних ділянок мікрошліфа зварного шва тестового зразка (див. рис. 1) наведено на рис. 5. Представлені графіки дозволяють обрати достатню кількість вимірювальних ліній для отримання статистично стійких величин досліджуваних ознак. Встановили, що кількість ліній в інтервалі 6...60 дозволяє отримати відповідні ве-

личини статистичних характеристик з достатнім рівнем точності.

Встановлені залежності (представлені на рис. 5) є загальноприйнятими, тому їх доцільно використовувати для усіх зображень мікрошліфів, що досліджуються. Отримані результати, наприклад (рис. 5), слід розглядати як зведені рекомендації. На рис. 6 представлено результати порівняльного аналізу для досліджуваних зразків. Такий аналіз виконували з використанням статистичних характеристик, що враховують серед-

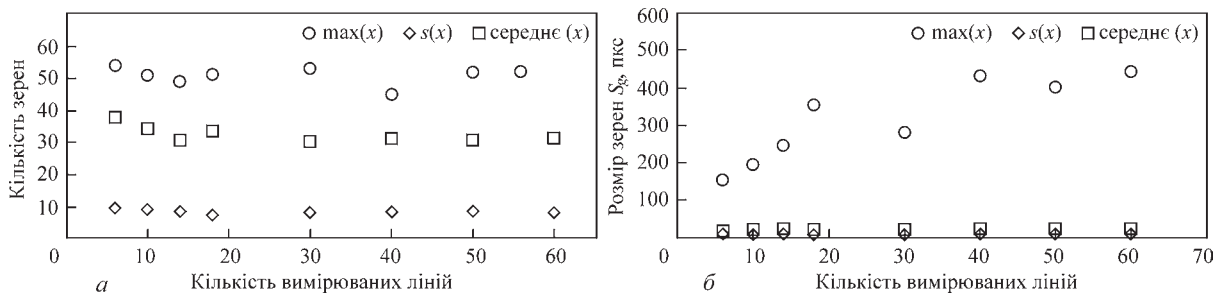


Рис. 5. Залежність статистичних характеристик визначених ознак: (а – кількість зерен; б – розміри зерен) від кількості вимірюваних ліній для зварного шва зразка без напрацювання.  $S_g$  – середня величина розмірів зерен

ню величину та середньоквадратичне відхилення визначеної кількості зерен поміж вимірюваними лініями та розмірами зерен  $\sigma\{X\}$  (для отримання результатів використовували по 5 вимірюваних ліній, як горизонтальних, так і вертикальних (див. рис. 3, б).

Графік статистичних характеристик розподілу кількості зерен (рис. 6, а) дозволив виявити суттєві тенденції і відмінні риси. Виявлено вплив напрацювання ресурсу  $T_R$  для основного металу зразків за середньоквадратичним відхиленням  $\sigma\{N_i\}$ . Наприклад, збільшення  $T_R$  призводить до тенденції зменшення  $\sigma\{N_i\}$ . Для металу шва збільшення  $T_R$  створило умови до збільшення середньоарифметичної величини  $N_i$  і середнє відхилення  $\sigma\{N_i\}$  після напрацювання 250 тис. год. Для ділянок зони термічного впливу (ЗТВ) зі збільшенням  $T_R$  несуттєво зменшуються характеристики  $N_i$  і  $\sigma\{N_i\}$ , до 83,3 і 69,3 % від первинних величин відповідно. В основному для зразків (незалежно від напрацювання ресурсу) є характерною відмінність структури основного металу від структури металу шва і ЗТВ. Така відмінність підтверджується значним середньоквадратичним відхиленням  $\sigma\{N_i\}$ . Найменші величини  $N_i$  і  $\sigma\{N_i\}$  є характерними для вихідної структури ділянок ЗТВ зразка (див. рис. 1).

На рис. 6 представлений результат статистичного аналізу розмірів зерен щодо ширини зображення. Відносно структури основного металу зразки з напрацюванням 270 тис. год.  $T_R$  мають менші величини середньоквадратичного відхилення  $\sigma\{S_i\}$  відносно вихідної структури. Для металу шва при збільшенні напрацювання  $T_R$  призводить до зменшення  $S_i$  і  $\sigma\{S_i\}$ . При цьому  $S_i$  зменшується до 59,6 %, а  $\sigma\{S_i\}$  – до 74,4 % від аналогічної величини вихідного зразка. Для зразків з довготривалим напрацюванням середньоарифметична величина  $S_i$  зменшується на 67,9 % від аналогічної вихідної величини.

Дослідження такої ознаки, як середньоарифметичні величини розмірів зерен  $S_g$  дозволило виявити загальні особливості діапазону їх змінень – 0,021...0,074 (величини вказано відносно шири-

ни зображення мікрошліфу). Встановили, що середньоквадратичне відхилення  $\sigma\{S_i\}$  має діапазон 0,016...0,037.

Удосконалення методу виявлення кількості зерен і їх величини в структурі зварних з'єднань паропроводів, які довготривало працюють в умовах повзучості, дозволило кількісно оцінити рівень утворених бракувальних структур. Дана оцінка є доцільною для визначення надійності експлуатації металу зварних з'єднань, а також для встановлення їх залишкового ресурсу.

Статистичний аналіз результатів оцінки кількості зерен і їх розмірів структур зварних з'єднань паропроводів підтвердив наявність достатньої інформативності щодо визначення особливостей їх структурних змін в умовах повзучості.

При визначенні залежності структурних змін від терміну напрацювання паропроводів використовували кореляцію з середньоквадратичним відхиленням кількості зерен, а також їх розмірів, від аналогічних показників вихідної структури зварних з'єднань.

Наведені розробки слід використовувати для створення методичних основ оцінки структурних змін, що проходять в процесі експлуатації паропроводів. При оцінці необхідно враховувати напрямки зміни статистичних характеристик досліджуваних ознак. В подальшому слід уточнювати додаткові ознаки виявлення особливостей структурних змін, які призводять до зниження надійності і зменшення залишкового ресурсу зварних з'єднань паропроводів.

В структурі зварних з'єднань паропроводів, які довготривало (понад 270 тис. год) працюють в умовах повзучості, проходить процес рекристалізації зерен  $\alpha$ -фази, що призводить до їх збільшення і сприяє утворенню пор повзучості (рис. 7). Наведений процес, в більшому ступені, ніж на інших ділянках званого з'єднання, відбувається на ділянці неповної перекристалізації ЗТВ, де нові продукти розпаду аустеніту надаються у вигляді глобуляризованого перліту (див. рис. 3). Встановили залежність утворення пор повзучості від номера зерен (ДСТУ 8972:2019) (рис. 7).

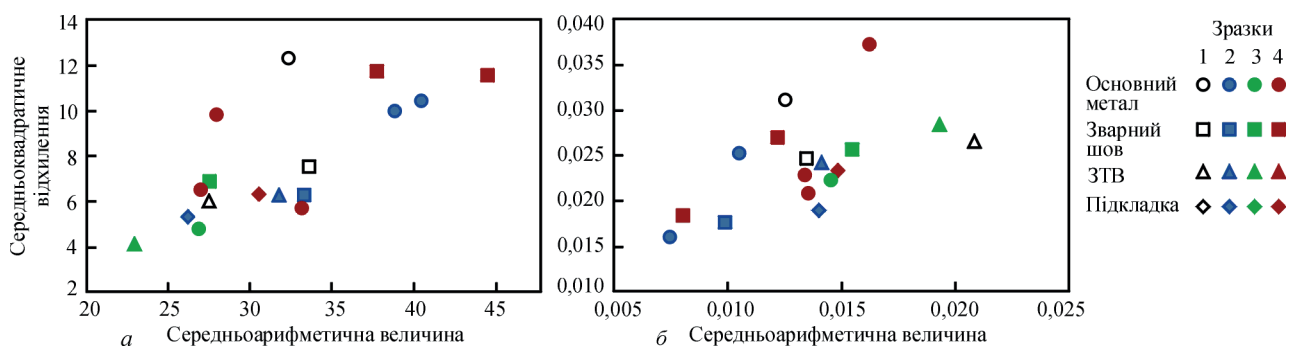


Рис. 6. Порівняльний аналіз основних статистичних характеристик структур зварних з'єднань (а – кількість зерен; б – розміри зерен)



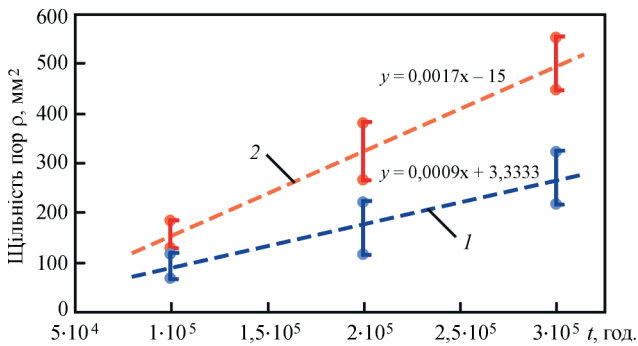


Рис. 7. Залежність утворення пор повзучості (розмір 1...5 мкм) від терміну напрацювання зварних з'єднань зі сталі 15X1M1Ф: 1 – зерна розмірів 12...14; 2 – 7...9. Ресурс 276 тис. год

Таким чином, використання наведеного методу дозволить уточнити залежність пошкоджуваності металу зварних з'єднань від їх структурного стану, і першочергово, від структур, які відносяться до бракувальних (вихідний перліт) і перекристалізований перліт ділянки неповної перекристалізації ЗТВ.

### Висновки

1. Встановили, що використання міжнародного стандарту ISO 643:2019 є доцільним для визначення структурного стану металу зварних з'єднань паропроводів, які довготривало експлуатуються в умовах повзучості.

2. Обґрунтували, що уточнення структурного стану металу зварних з'єднань, які довготривало працюють в умовах повзучості, надає можливість

з більшою точністю визначати надійність їх роботи, а також залишковий ресурс.

### Список літератури/References

- Dmytryk, V.V., Hlushko, A.V., Ihlin, S.P. (2020) Structural changes in the metal of welded joints of long-operated steam pipelines. *Avtomatychne zvaryuvannya*, 2, 1–4.
- (2020) ISO 643: 2019. *Steel – Micrographic determination of the apparent grain size*. Technical Committee: ISO/TC 17/ SC 7 – Methods of testing. 2019-12, 21.
- Dmytryk, V.V., Tsaryuk, A.K., Harashchenko, O.S., Sirenko, T.O. (2020) Structural condition and fatigue damage of welded joints of steam pipelines. *Avtomatychne zvaryuvannya*, 6, 17–21.
- Zielinski, A., Golański, G., Sroka, M. (2020) Evolution of the microstructure and mechanical properties of HR3C austenitic stainless steel after ageing for up to 30,000 h at 650–750 °C. *Materials Science and Engineering, A*, 139944. DOI: 10.1016/j.msea.2020.139944
- Golański, G., Zielinski, A., Sroka, M., Słania, J. (2020) The Effect of Service on Microstructure and Mechanical Properties of HR3C Heat-Resistant Austenitic Stainless Steel. *Materials* 13(6), 1297. DOI: 10.3390/ma13061297
- Kusiak, J., Kuziak, R. (2002) Modelling of microstructure and mechanical properties of steel using the artificial neural network. *Journal of Materials Processing Technology* 127(1), 115–121. DOI: 10.1016/s0924-0136(02)00278-9
- Sokolov, D.F., Ogoltsov, A.A., Vasilyev, A.A. et al. (2013) Modeling of Microstructure and Mechanical Properties of Hot Rolled Steels. *Materials Science Forum* 762, 116–121. DOI: 10.4028/www.scientific.net/msf.762.116
- Chen, S.-F., Bandyopadhyay, K., Basak, S. et al. (2021) Predictive integrated numerical approach for modeling spatio-temporal microstructure evolutions and grain size dependent phase transformations in steels. *International Journal of Plasticity* 139, 102952. DOI: 10.1016/j.ijplas.2021.102952
- ASTM E112-13. *Standard test methods for determining average grain size*.

## HEAT-RESISTANT PEARLITIC STEELS USING AN IMPROVED ANALYSIS METHOD

V.V. Dmytryk<sup>1</sup>, O.S. Garashchenko<sup>1</sup>, O.M. Berdnikova<sup>2</sup>

<sup>1</sup>National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», 2 Kyrpychova Str., 61002, Kharkiv

<sup>2</sup>E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine. 11 Kazymyr Malevych Str., 03150, Kyiv, Ukraine.

E-mail: garashchenko.helena@gmail.com

The paper presents the results of determination of the quantity and dimensions of grains of the structural components of steam pipeline welded joint metal. The above determination was performed using an improved method of analysis of the structural-phase state of welded joints. It was found that during long-term operation of welded joints the grains of  $\alpha$ -phase increase in size. Structural analysis was performed for base metal of welded joints, HAZ regions, as well as weld metal. It was established that at long-term operation of steam pipeline welded joints grain dimensions are increased in their HAZ regions. It was found that the boundaries between individual grains are partially eliminated. Based on analysis of statistical data, grain dimensions, as well as their shape and distribution were determined at application of the secant method. 9 Ref., 1 Tabl., 7 Fig.

*Keywords: steam pipeline welded joints, metallographic analysis, grain size, grain quantity, pixels*

Надійшла до редакції 19.05.2022

### НОВА КНИГА



Недосєка А.Я., Недосєка С.А.

Основы расчета и диагностики сварных конструкций. Глава 7. Більш складні питання теорії – К.: Видавництво «ІНДПРОМ», 2021. – 94 с., 62 рис., 3 табл.

Сьома глава підводить підсумок досліджень авторів в області застосування АЕ технології при оцінці стану конструкцій. У ній сформульовано і зосереджено основні наукові гіпотези та досягнення авторів. Наведені матеріали є складнішими в освоєнні і при використанні в розрахунках і практиці контролю потребують підвищеної уваги. Останній параграф глави присвячено прикладу практичного використання розробленої методики при діагностуванні двох великогабаритних посудин, що показав цілком задовільні результати.

Книга призначена для студентів, аспірантів і викладачів машинобудівних спеціальностей вузів, для спеціалістів, які проходять перепідготовку на курсах підвищення кваліфікації за напрямом «Технічна діагностика», а також для інженерів підприємств і організацій, які працюють у галузі контролю та діагностики конструкцій.

ISBN 966-95315-1-4