ORCID: 0000-0002-4950-394X
А. Р. Гонда
аспірант, ННІ ІНФОТЕХ
Черкаський національний університет
імені Богдана Хмельницького, Черкаси, Україна,
andriy.gonda@vu.cdu.edu.ua

ORCID: 0000-0001-7015-1662
Ю. О. Ляшенко
доктор фіз.-мат. наук, професор, ННІ ІНФОТЕХ
Черкаський національний університет
імені Богдана Хмельницького, Черкаси, Україна,
lyashenko.yurij@gmail.com

DOI: 10.31651/2076-5851-2022-23-32 PACS 05.70.Fh, 05.70.Ln, 02.60.-x, 02.60.Pn

ДОСЛІДЖЕННЯ МОРФОЛОГІЇ КОНТАКТНОЇ ЗОНИ СПАЙНИХ КОНТАКТІВ МІДІ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ СЕГМЕНТАЦІЇ ЗОБРАЖЕНЬ СТРУКТУРНИХ ЕЛЕМЕНТІВ НА ОСНОВІ ВЕЙВЛЕТ ПЕРЕТВОРЕННЯ

Морфологію контактної зони спайних контактів міді проаналізовано з застосуванням алгоритмів текстурної сегментації зображень та бібліотеки OpenCV. Розглянуто основні підходи до виділення міжфазних меж засобами графічної бібліотеки OpenCV та застосування фільтра Габора для виділення контурів пор, детектування дефектів та пор на інтерфейсах, встановлення співвідношень фаз контактної зони. Удосконалено процедуру текстурування зображень для зображень растрової електронної мікроскопії. Розраховано площі фаз на інтерфейсах дифузійних зон системи Cu-Sn для зразків, що отримані за різних режимів електроосадження міді: стаціонарного, імпульсного-реверсного, стохастичного. Удосконалено процедуру аналізу площ фаз. Застосовано процедуру текстурної сегментації для зображень, амплітуда інтенсивності градацій сірого кольору в яких співрозмірна з амплітудою шуму градацій сірого кольору. На зображеннях растрової електронної мікроскопії за допомогою розроблених алгоритмів текстуровано елементи ламелярної структури в фазово неоднорідному сплаві.

Ключові слова: фазовий склад, дифузійна зона, мідь, олово, растрова електронна мікроскопія, алгоритми обробки зображень, вейвлет-перетворення, OpenCV.

1. Вступ

Однією з ключових складових сучасних технологій є забезпечення надійного з'єднання між елементами електронних пристроїв. Саме тут на перший план виходить проблема створення спайних контактів системи Cu-Sn, що є невід'ємною частиною ефективного функціонування електронних приладів [4].

Порошкова металургія та спікання металевих порошків відіграють ключову роль у виготовленні мідних контактів. Проте, вибір методу спікання суттєво впливає на якість та надійність контактної зони.

Для аналізу мікрофотографій, що отримані методом растрової електронної мікроскопії (РЕМ), розроблені алгоритми попередньої обробки зображень, алгоритми текстурної сегментації зразків та визначення характеристик пористості контактної зони [5]. В даному дослідженні розроблені алгоритми [5] удосконалені для дослідження морфології та фазового складу торцевих зрізів зразків контактної зони, що утворена в результаті електроіскрового спікання порошків міді та олова, застосовані розроблені алгоритми комп’ютерного аналізу.

Растрова електронна мікроскопія (REM) надає можливість отримання високоякісних зображень мікроструктури контактної зони з високою роздільною здатністю. Однак, обробка та аналіз цих зображень вручну може бути часо- та працезатратною процедурою, а також схильною до помилок людського сприйняття. У цьому контексті застосування алгоритмів комп'ютерного зору та бібліотеки OpenCV стає цінним інструментом стандартизованого аналізу. OpenCV - це відкрите програмне забезпечення з великою кількістю функцій для обробки зображень та комп'ютерного зору. Використання OpenCV для аналізу мікрофотографій контактної зони зразків надає можливість автоматизувати процеси обробки та аналізу, зменшуючи час, потрібний для отримання результатів, і знижуючи ймовірність помилок.

Для аналізу типу та розподілу топологічних дефектів в зразках та визначення чітких меж фаз на мікрофотографій важливим є використання алгоритмів, що дозволяють чітко детектувати границі колірного градієнту між різними фазовими неоднорідностями на РЕМ-зображеннях.

В роботі проведено аналіз існуючих та розроблено нові алгоритми обробки зображень контактної зони зразків на основі мідно-олов’яних сплавів, що отримані засобами растрової електронної мікроскопії.

2. Опис алгоритму текстурної сегментації зображень

Зображення зразків, що отримані методами растрової електронної мікроскопії, відображають інтенсивність взаємодії електронів з поверхнею зразка у вигляді зображень в градаціях сірого кольору. Як відомо, для кодування зображень в градаціях сірого можливо використати один байт на піксель, що відповідає значенням градацій сірого кольору в межах від 0 до 255. Оскільки в ході фіксації зображення електронної мікроскопії існують похибки вимірювань, отримані зображення необхідно додатково корегувати, наприклад із застосуванням згорткового фільтра Гауса, або нерізкого розмиття, що носить назву білатеральної фільтрації [1]. Згорткові фільтри дозволяють згладити локальні градієнти градацій сірого кольору. Для текстурної сегментації зображень та пошуку меж фаз на мікрофотографіях зразків необхідною умовою є наявність контрасту фаз, але особливості отримання знімків засобами електронної мікроскопії включають наявність шумів у отриманих зображеннях, що перешкоджає достовірному аналізу. Приклад зображення контактної зони, що отримано в режимі відбитих вторинних електронів, приведено на Рис 1.

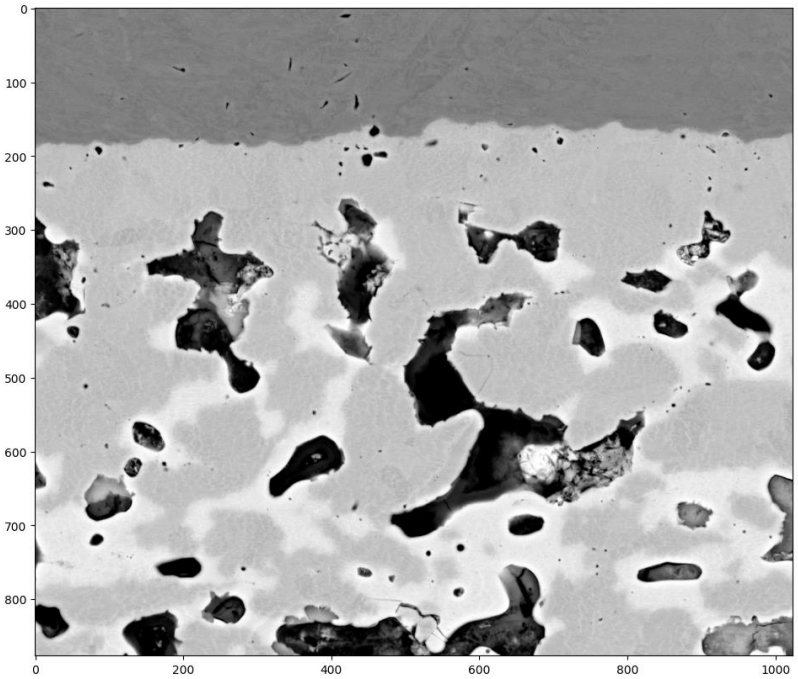


Рис. 1. РЕМ-зображення контактної дифузійної зони.
Fig.1. SEM image of the contact diffusion zone.

Безпосередньо зона спікання порошкових сумішей після відпалу містить ознаки наявності певних фаз за допомогою яких і формується електричний контакт в результаті спікання порошків. Оскільки на РЕМ зображеннях дефекти контактної дифузійної зони (пори, та конгломерати пор) можуть бути представлені як замкнені контури пікселів, які перешкоджають аналізу площ фаз, для відокремлення замкнених контурів було використано фільтр Габора, що являє собою двовимірний згортковий фільтр на основі вейвлету Габора [1]. Даний алгоритм широко використовується в аналізі оптичних дактилоскопічних сканів, де необхідне уточнення границь відбитків пальців [3]. Фільтр Габора був використаний нами для відокремлення контакної зони від дефектів контактної дифузійної зони (пор, та конгломератів пор), що дозволило покращити контраст інтерфейсів в дифузійній контакній зоні.

Отримане шляхом фільтрації зображення контактної зони з використанням фільтру Габора приведено на Рис. 2.

Тут, послідовність етапів обробки зображень, що отримані засобами растрової електронної мікроскопії, є наступною:

1) Зображення у форматі bmp завантажується у програму з файлової системи;
2) Зображення конвертується в колірний простір градацій сірого в діапазоні від 0..255, де 0 відповідає чорному кольору, 255 - білому;
3) Опціонально застосовується фільтр Гауса з розміром вікна 3x3 пікселі;
4) Оскільки зображення дифузійного профілю містить дефекти у формі пор та порожнин, які на знімках растрової електронної мікроскопії мають характерний колір близький до чорного, до зображення застосовується вейвлет-фільтр Габора (налаштування фільтру можна корегувати) для уточнення границь фаз в певному колірному діапазоні (опційно можна регулювати);

5) Для відфільтрованого зображення будується діаграма розподілу кольорів, згідно, наприклад[4];
6) За колірною діаграмою в ручному режимі користувач вибирає діапазони градацій сірого для кожної з фаз користуючись діапазоном діаграми розподілу інтенсивності градацій сірого кольору;
7) Для всіх пікселів зображення, які входять до вибраних діапазонів градацій сірого кольору, значення кольору змінюється на фіксоване (з кроком в 50 градацій сірого для кожної з фаз).
8) В результаті текстурування отримуємо кореговане зображення, що використовується для подальшого аналізу розподілу фаз в контактній зоні, до прикладу розрахунку площі фаз на зображенні із застосуванням масштабуючого коєфіцієнта.

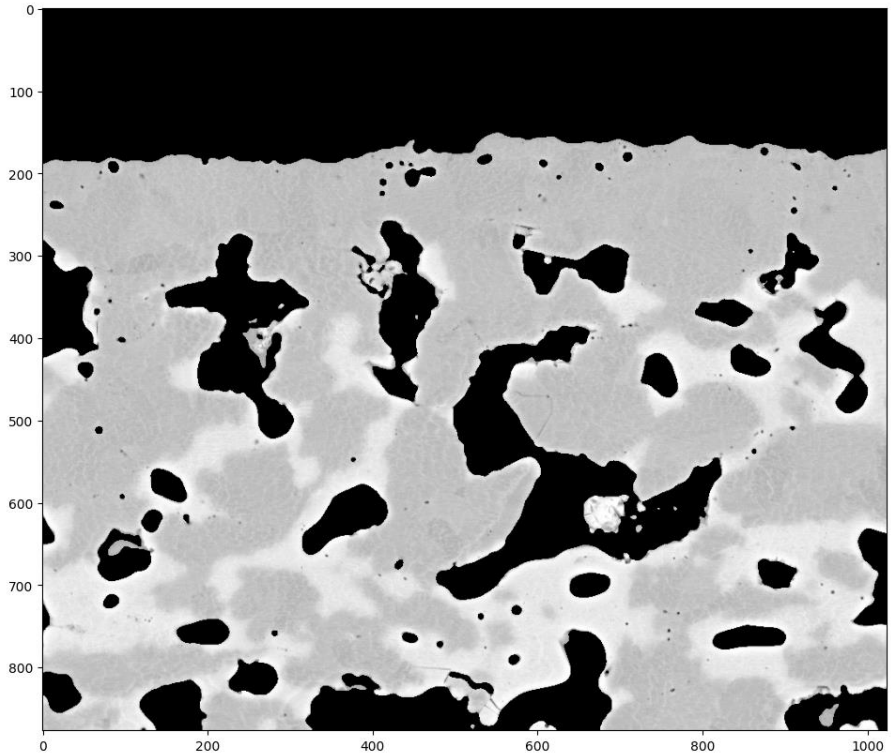


Рис.2. Результат використання фільтру Габора для зображення контакної зони з рис.1.
Fig. 2. The result of aplying Gabor filtering to image of contact zone from the fig.1.

Оскільки зображення неоднорідне за кольором, необхідно побудувати колірну гістограму розподілу градацій сірого. Тут, за відокремленими піками інтенсивності градацій сірого кольору із гістограми розподілу градацій сірого кольору, можна судити про існування діапазонів градацій сірого кольору діапазонів фаз, однак тепер місця, що відповідають за дефекти полірування або пористість можуть бути виключені з аналізу площ фаз на зображеннях контактної зони. Задаючи діапазони градацій сірого кольору, які відповідають межі інтенсивності конкретної фази, можна ефективно визначати площі фази в контактній зоні.

Зображення, приведені на Рис. 1. та Рис 2. дозволяють провести аналіз за допомогою алгоритмів комп'ютерного зору на наявність характерної для розпаду сплавів ламелярної структури, яку досить важко відокремити алгоритмами обробки зображень.

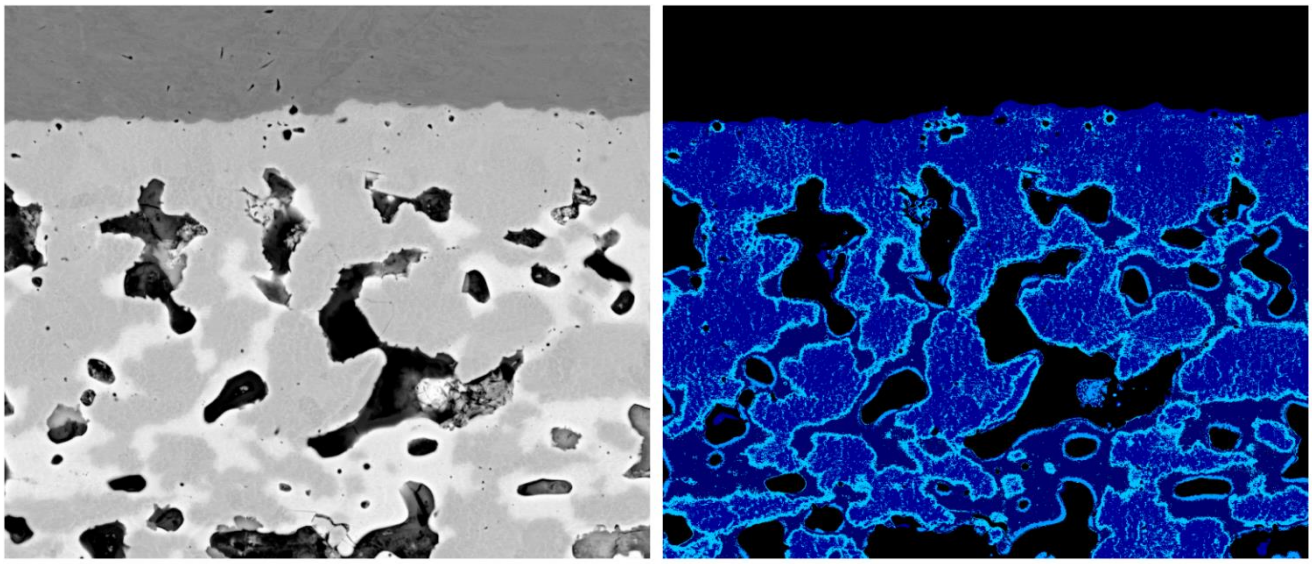


Рис.3. Початкове (зліва) та текстуроване зі зміненою колірною палітрою (справа) зображення контактної зони.

Fig. 3. Source image of contact zone (left side) and textured image (right side) with changed color palette.

Як зображено на Рис. 3., алгоритм дозволяє відокремити навіть елементи ламелярної структури сплаву, що розпадається та значно підсилити контраст відповідних ділянок. Застосування фільтру Габора дозволяє зменшити похибку на дефектних ділянках контактної зони завдяки застосуванню ефективного алгоритму пошуку меж де наявний різкий перехід між градаціями сірого кольору.

3. Застосування текстурної сегментації для уточнення розрахунку площ фаз

Запропонований алгоритм було застосовано для аналізу РЕМ зображень зразків, що виготовлені за методикою [4]. Всього було опрацьовано зображення контактних зон системи Cu-Sn для 5 зразків. Для виготовлення дифузійних зразків Cu-Sn застосовувалися модифіковані мідні пластини на які попередньо осаджувалася мідь в різних режимах електроосадження, потім здійснювався відпал дифузійних пар Cu-Sn. Попередньо всі отримані РЕМ зображення контактної зони були згладжені за допомогою алгоритму фільтрації за Гаусом для забезпечення більш стабільної колірної картини в градаціях сірого кольору. Розрахунок площ проміжних фаз Cu6Sn5 та Cu3Sn проводився для зображень контактних зон, що містили наступні фази: Cu, Sn, Cu6Sn5, Cu3Sn.

Засобами графічної бібліотеки OpenCV був застосований фільтр Габора з наступними параметрами ядра фільтрації: **frequency=0.01**, **theta=0**, **sigma_x=sigma_y=1**, **bandwidth=1, n_stds=1.**

Колірні діапазони фаз вибирались вручну згідно з алгоритмом колірної гістограми, що описані в [5].

Всі зображення попередньо були конвертовані в зображення з градаціями сірого кольору, тобто містили лише один колірний канал з межами від 0 до 255.

Результат застосування фільтрації Габора для уточнення границь дефектів показано на Рис 4.

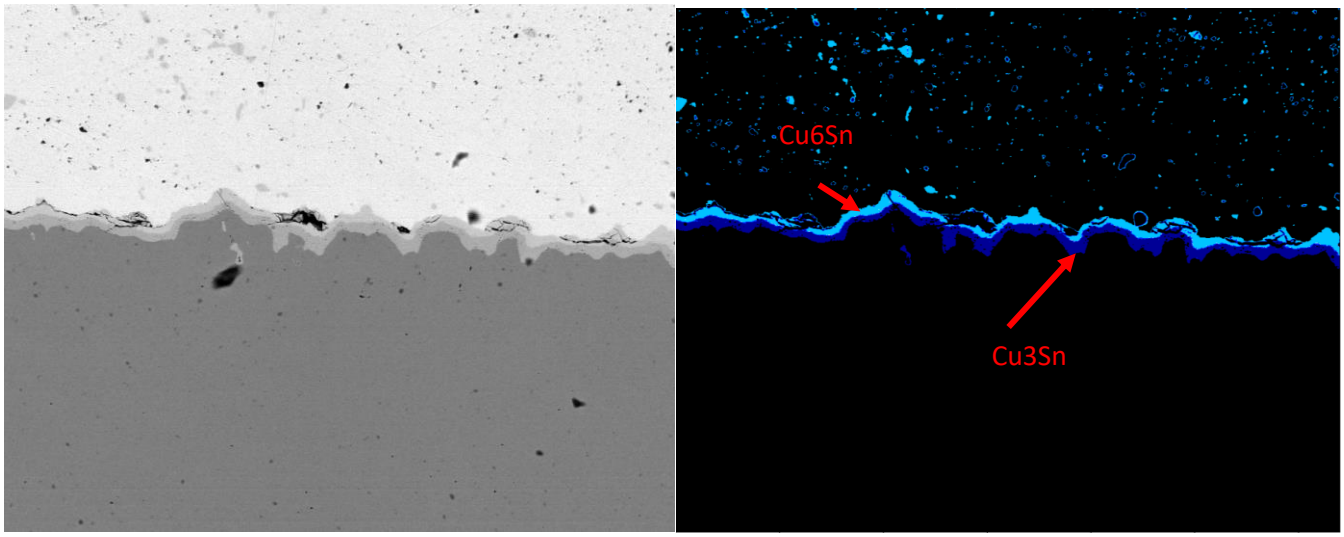
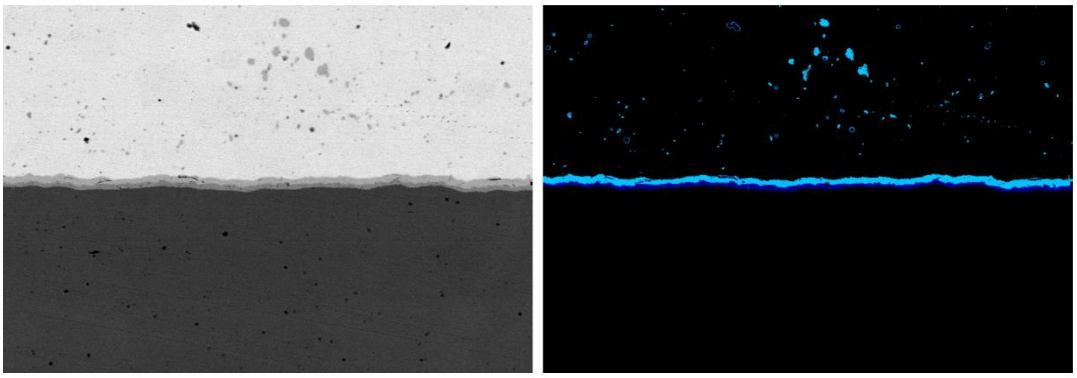


Рис.4. Початкове (зліва) та текстуроване зі зміненою колірною палітрою (праворуч) зображення дифузійного інтерфейсу.

Fig. 4. Source image of diffusion zone (left image) and textured image (right image) with changed color palette.

Використання алгоритму текстурної сегментації фаз дозволяє ефективно розрахувати площі фаз з аналізу зображень зразків. Для досліджених зразків, зображення яких приведені на Рис. 5, в Таблиці 1 подані відомості про результати обробки зображень. В Таблиці 1 подано відомості про розраховані площі фаз Cu6Sn5 та Cu3Sn в кожному з режимів електроосадження міді, що описані в [4].

Запропонований алгоритм текстурної сегментації дозволяє обробити зображення з РЕМ для розрахунку співвідношення площ фаз без урахування дефектних, неоднорідних ділянок (пор та конгломератів пор), які засобами електронної мікроскопії фіксуються на растрових зображеннях у вигляді замкнутих контурів з вираженим зменшенням інтенсивності сірого кольору. Виключення цих ділянок з аналізу дозволяє уточнити розрахунок площ фаз проміжних фаз із зображень.

1	

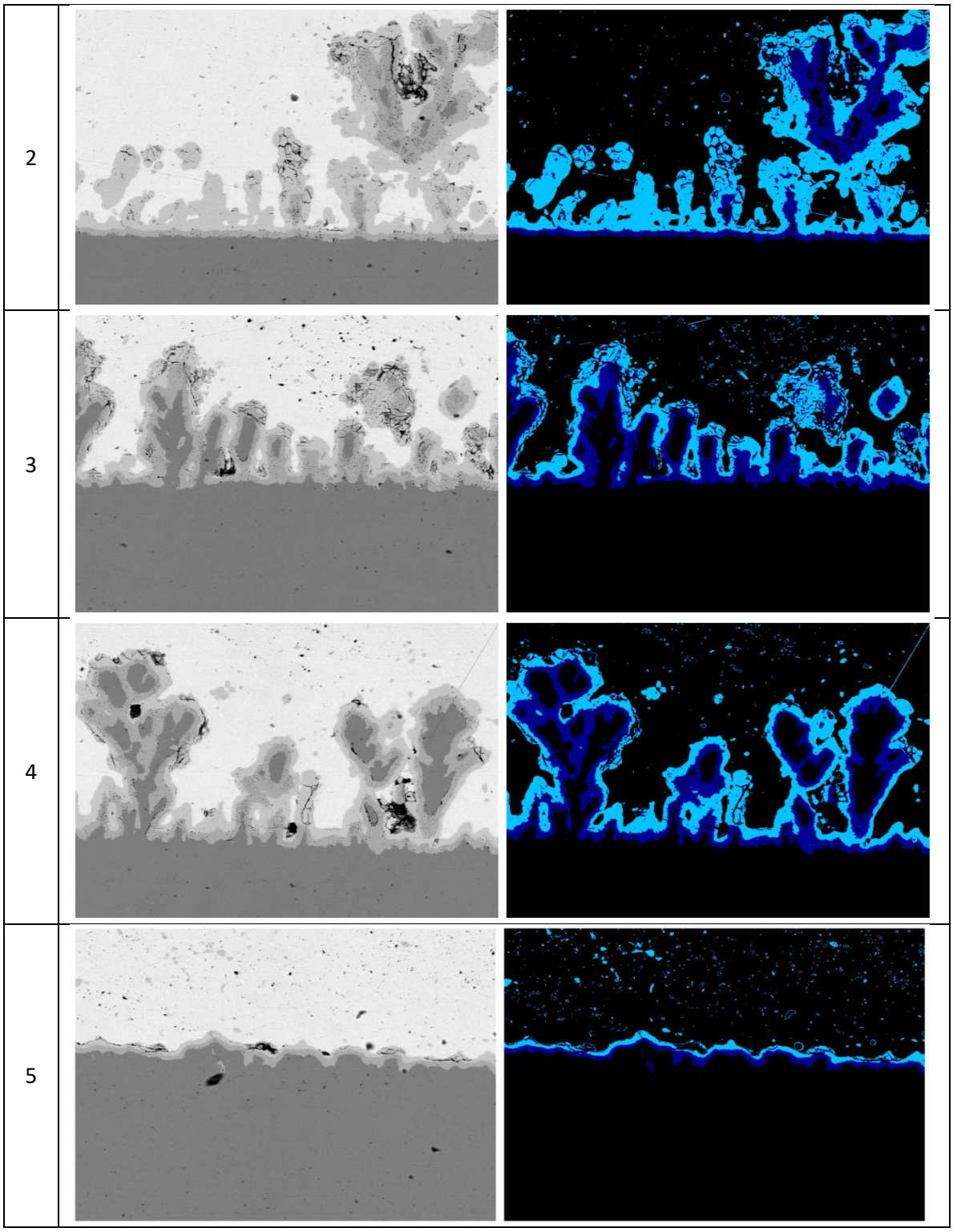


Рис. 5. Вихідне зображення та результат текстурної сегментації фрагментів зображень фаз Cu6Sn5 та Cu3Sn із застосуванням фільтрації Габора.

Fig. 5. Source image and texture segmentation image result for intermediate phases Cu6Sn5 and Cu3Sn by applying Gabor filtering.

Таблиця 1. Розраховані площі проміжних фаз на основі зображень текстурної сегментації.

Table 1. Calculated intermediate phases areas based on texture segmentation images.

№ зразка	**Площа фази Cu6Sn5, мкм^2**	**Площа фази Cu3Sn, мкм^2**	**Співвідношення площ фаз Cu6Sn5/ Cu3Sn**
1	31260	16965.33	1.84
2	314634.67	132149.33	2.38
3	166004	150484	1.1
4	201801.33	185592	1.09
5	41592	34089.33	1.22

4. Висновки

Розроблений алгоритм текстурної сегментації з використанням вейвлет-фільтру Габора дозволяє текстурувати ділянки, які притаманні дефектним структурам (пор, порожнин, конгломератів пор) та які проявляються на зображеннях РЕМ у вигляді замкнених контурів зі зниженою інтенсивністю градацій сірого кольору порівняно з середнім показником інтенсивності сірого кольору вихідного зображення.

Алгоритм текстурної сегментації дозволяє чітко визначати ділянки, де можливі незначні зміни градацій сірого кольору, що дозволяє визначати малі зміни кольору, які на зображеннях РЕМ дифузійних зразків сплавів, що розпадаються, можуть проявлятись у вигляді ламелярної структури.

Використання фільтру Габора дозволяє більш точно визначити границі різних фаз та розраховувати площі фаз навіть за умов, коли застосування згладжування за Гаусом неможливе, оскільки зображення дифузійного інтерфейсу може містити ділянки проміжних фаз співрозмірних з розміром вікна розмиття за Гаусом.

Використання білатеральної фільтрації, або розмиття за Гаусом у поєднанні з вейвлет-фільтром Габора дозволяє отримати більш чіткі зображення меж фаз та пор де присутній градієнт градацій сірого кольору в зображеннях низької якості.

5. Список використаної літератури:

1. LEE, Tai Sing. Image representation using 2D Gabor wavelets // IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence. 1996. Т. 18, № 10. С. 959-971.
2. Mehrotra, R., Namuduri, K. R., Ranganathan, N. Gabor filter-based edge detection // Pattern recognition. 1992. Т. 25, № 12. С. 1479-1494.
3. Dolezel, M., Hejtmankova, D., Busch, C., Drahansky, M. Segmentation procedure for fingerprint area detection in image based on enhanced Gabor filtering // International Journal of Bio-Science and Bio-Technology. 2010. Т. 2, № 4. С. 39-50.
4. Гонда А. Р. Фрактальна будова електроосаджених у стохастичних режимах прошарків міді та її вплив на фазоутворення в реакціях з оловом / А. Р. Гонда, В. В. Морозович, Я. Д. Король, Ю. О. Ляшенко // Вісник Черкаського університету. Серія: «Фізико-математичні науки» –2019. No1. –С. 80-95. Режим доступу: https://doi.org/10.31651/2076-5851-2019-1-80-95

5. Морозович В. В. Застосування попередньої обробки зображень із растрового електронного мікроскопа для покращення ідентифікації структурних елементів / В. В. Морозович, А. Р. Гонда, Ю. О. Ляшенко // Вісник Черкаського університету. Серія «Прикладна математика. Інформатика». –2017. No 1-2. С. 15-24. Режим доступу: http://eprints.cdu.edu.ua/id/eprint/4373
6. Bellakhdhar, F., Loukil, K., Abid, M. Face recognition approach using Gabor Wavelets, PCA and SVM // International Journal of Computer Science Issues (IJCSI). 2013. Т. 10, № 2. С. 201.
7. Qin, S., et al. Facial expression recognition based on Gabor wavelet transform and 2-channel CNN // International Journal of Wavelets, Multiresolution and Information Processing. 2020. Т. 18, № 02. С. 2050003.

6. References:

1. LEE, Tai Sing. Image representation using 2D Gabor wavelets. IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence, 1996, 18.10: 959-971.
2. Mehrotra, R., Namuduri, K. R., & Ranganathan, N. (1992). Gabor filter-based edge detection. Pattern recognition, 25(12), 1479-1494.
3. Dolezel, M., Hejtmankova, D., Busch, C., & Drahansky, M. (2010). Segmentation procedure for fingerprint area detection in image based on enhanced Gabor filtering. International Journal of Bio-Science and Bio-Technology, 2(4), 39-50.
4. Honda, A. R., Morozovych, V. V., KorolYa.K., LyashenkoYu.O. (2019). Fractal structure of electrodeposited copper in stochastic regimes and its effect on phase formation in tin reactions. Visnyk Cherkaskoho Universytetu. Seriia «Fizyko-Matematychni Nauky»(Bulletin of Cherkasy University. Series "Physics and Mathematics"), (1), 80-95. Retrieved from https://doi.org/10.31651/2076-5851-2019-1-80-95
5. Morozovych, V. V., Honda, A. R.,Lyashenko, Y. O. (2017)Application of raster electron microscope image pre-processing to improve the identification of structural elements.Visnyk Cherkaskoho Universytetu. Seriia «Prykladna matematyka. Informatyka» (Bulletin of Cherkasy University. Series " Applied Mathematics. Computer Science ") (1-2). pp. 15-24. Retrieved from http://eprints.cdu.edu.ua/id/eprint/4373
6. Bellakhdhar, Faten, Kais Loukil, and Mohamed Abid. "Face recognition approach using Gabor Wavelets, PCA and SVM." International Journal of Computer Science Issues (IJCSI) 10.2 (2013): 201.
7. Qin, Shu, et al. "Facial expression recognition based on Gabor wavelet transform and 2-channel CNN." International Journal of Wavelets, Multiresolution and Information Processing 18.02 (2020): 2050003.

A. R. Honda
PhD-student,
Educational-Scientific Institute of Informational and Eduational Technologies
The Bohdan Khmelnytsky National University of Cherkasy, Cherkasy, Ukraine
andriy.gonda@vu.cdu.edu.ua

Yu. O. Lyashenko
Doctor of physical and mathematical sciences, professor,
Educational-Scientific Institute of Informational and Eduational Technologies
The Bohdan Khmelnytsky National University of Cherkasy, Cherkasy, Ukraine,
lyashenko.yurij@gmail.com

RESEARCH OF THE MORPHOLOGY OF THE CONTACT ZONE OF COPPER WELDED CONTACTS USING IMAGES SEGMENTATION OF STRUCTURAL ELEMENTS BASED ON WAVELET TRANSFORM

The article focuses on the analysis of the morphology of the contact zone of copper junctions using image texture segmentation algorithms and the OpenCV library.

The article discusses the main approaches to the selection of interphase boundaries using the OpenCV graphics library and the use of the Gabor filter to select pore contours, detect defects and pores on interfaces, and establish contact zone phase ratios. The image processing procedure, based on Gabor filtering, was developed and tested. The phase areas at the interfaces of the diffusion zones of the Cu-Sn system were calculated for the samples obtained for different modes of copper electrodeposition: stationary, pulse-reverse, and stochastic.

The phase area analysis procedure has been improved. Attempts have been made to apply the texture segmentation procedure to images in which the amplitude of the intensity of gray gradations is proportional to the amplitude of the noise of gray gradations.

An attempt was made to texture the elements of the lamellar structure in the alloy from images of raster electron microscopy.

It was shown that the texture segmentation algorithm, which uses the Gabor wavelet filter, allows the separation of image elements representing defective areas and diffusion contact unnecessary areas. It was shown that texture segmentation algorithm allows the identification of areas where slight changes in the color intensity gradient (gradations of gray) are possible. It was shown that usage of bilateral filtering, or Gaussian blur in combination with the Gabor wavelet filter, allows a clearer picture of image boundaries where there is a gradient of gray gradations for low-quality images (images that contain significant color differences in the noise presence).

Keywords: *wavelet-transform, copper, tin, scanning electron microscopy, image processing algorithms, OpenCV, powder metallurgy.*

Одержано редакцією 20.08.2022
Прийнято до друку 27.08.2022