

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

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

Стаття зосереджена на аналізі морфології контактної зони спайних контактів міді з використанням алгоритмів текстурної сегментації зображень та бібліотеки OpenCV. В статті 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 для 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. Текстуровано елементи ламелярної структури в сплаві зі зображень растрової електронної мікроскопії.

Ключові слова: вейвлет-перетворення, мідь, олово, растрова електронна мікроскопія, алгоритми обробки зображень, OpenCV, порошкова металургія.

1. Вступ

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

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.

Стаття зосереджена на використанні алгоритмів комп'ютерного зору для аналізу морфології та фазового складу мікрофотографій торцевих зрізів зразків контактної зони електроіскрового спікання отриманих методом растрової електронної мікроскопії (РЕМ) для попередньої обробки зображень та алгоритмів текстурної сегментації зразків та спрощення фазового аналізу та аналізу пористості.

Растрова електронна мікроскопія (REM) надає можливість отримання високоякісних зображень мікроструктур та наноматеріалів 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 використання комп'ютерного зору та бібліотеки OpenCV стає надзвичайно цінним інструментом.

OpenCV - це відкрите програмне забезпечення з великою кількістю функцій для обробки зображень та комп'ютерного зору. Використання OpenCV для аналізу мікрофотографій зразків надає можливість автоматизувати процеси обробки та аналізу, зменшуючи час, потрібний для отримання результатів, і знижуючи ймовірність помилок.

Для аналізу дефектів зразків та визначення чітких меж фаз на мікрофотографіях важливим є використання алгоритмів, що дозволяють чітко детектувати границі колірних градієнтів на REM-зображеннях.

Доцільність використання комп'ютерного зору та OpenCV у аналізі мікрофотографій є беззаперечною через їхню ефективність, точність та можливість автоматизації процесів обробки та аналізу.

В роботі проведено аналіз та розроблено нові алгоритми обробки зображень растрової електронної мікроскопії перерізів зразків на основі мідно-олов'яних сплавів.

2. Опис алгоритму текстурної сегментації зображень

Зображення зразків, отриманих методом растрової електронної мікроскопії, дозволяють закодувати інтенсивність взаємодії електронів з поверхнею зразка у вигляді зображень в градаціях сірого кольору. Як відомо, для кодування зображень в градаціях сірого необхідно один байт на піксель, що відповідає значенням градацій сірого кольору в межах від 0 до 255. Оскільки за 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. Згорткові фільтри дозволяють згладити локальні градієнти градацій сірого. Для текстурної сегментації зображень та пошуку меж фаз на мікрофотографіях зразків необхідною умовою є контраст фаз, але особливості отримання знімків засобами електронної мікроскопії забезпечують певною мірою наявність шумів зображення, що перешкоджає аналізу. Приклад зображення отриманих в режимі відбитих вторинних електронів приведено на Рис 1.

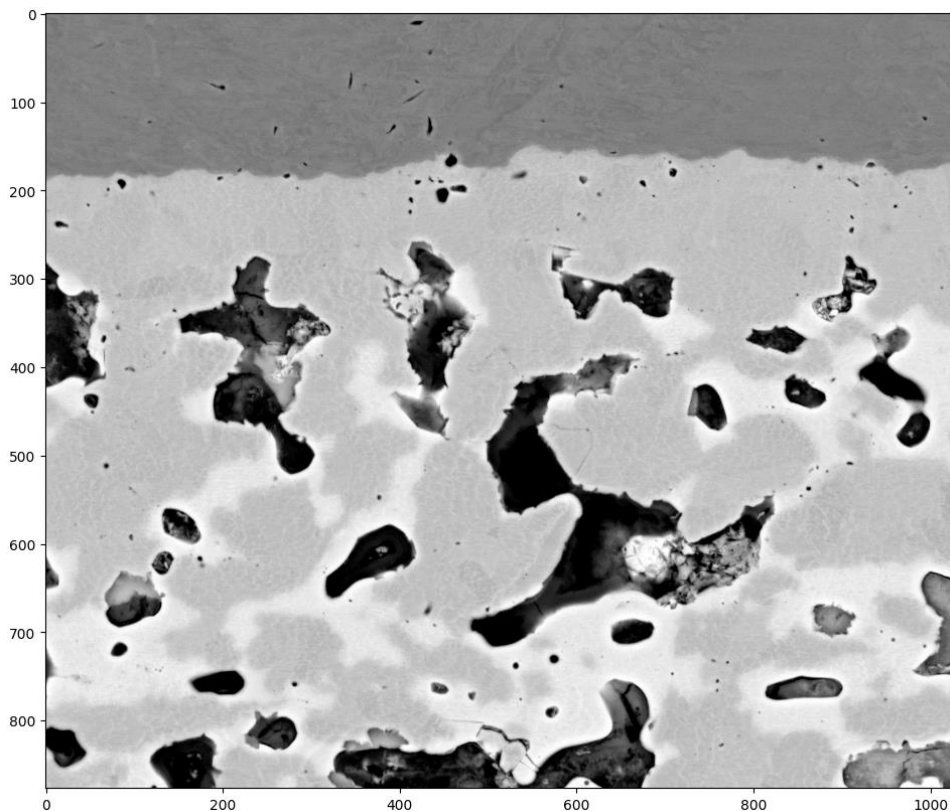


Рис. 1. РЕМ-зображення контактної зони.

Fig.1. SEM image of the contact zone.

Безпосередньо зона спікання порошкових сумішей після відпалу містить ознаки наявності певних фаз за допомогою яких і формується електричний контакт в результаті спікання порошків. Однак наявність пористої, дефектної структури на зображеннях растрової мікроскопії вносить похибку у розрахунку співвідношень площ фаз. Оскільки дефекти формують контури, 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 контактної зони від дефектів та відповідно чим було досягнуто виділення безпосередньо інтерфейсу дифузійної контактної зони.

Відфільтроване зображення з використанням фільтру Габора приведено на Рис. 2. Послідовність обробки зображень, отриманих засобами растрової електронної мікроскопії, складається з наступних кроків:

- 1) Зображення у форматі bmp завантажуються 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 коригувати) для уточнення границь фаз в певному колірному діапазоні (можна регулювати);
- 5) Для відфільтрованого зображення будується діаграма розподілу кольорів [4];

- 6) За колірною діаграмою в ручному режимі користувач вибирає діапазони кольорів для фаз за піками розподілу кольору;
- 7) Для пікселів, які входять до вибраних діапазонів кольорів колір змінюється на однорідний (з кроком в 50 градацій сірого для кожної з фаз).
- 8) Результат текстурування використовується для подальшого аналізу розподілу фаз в контактній зоні, до прикладу розрахунку площі фаз на зображенні із застосуванням масштабуючого коефіцієнта.

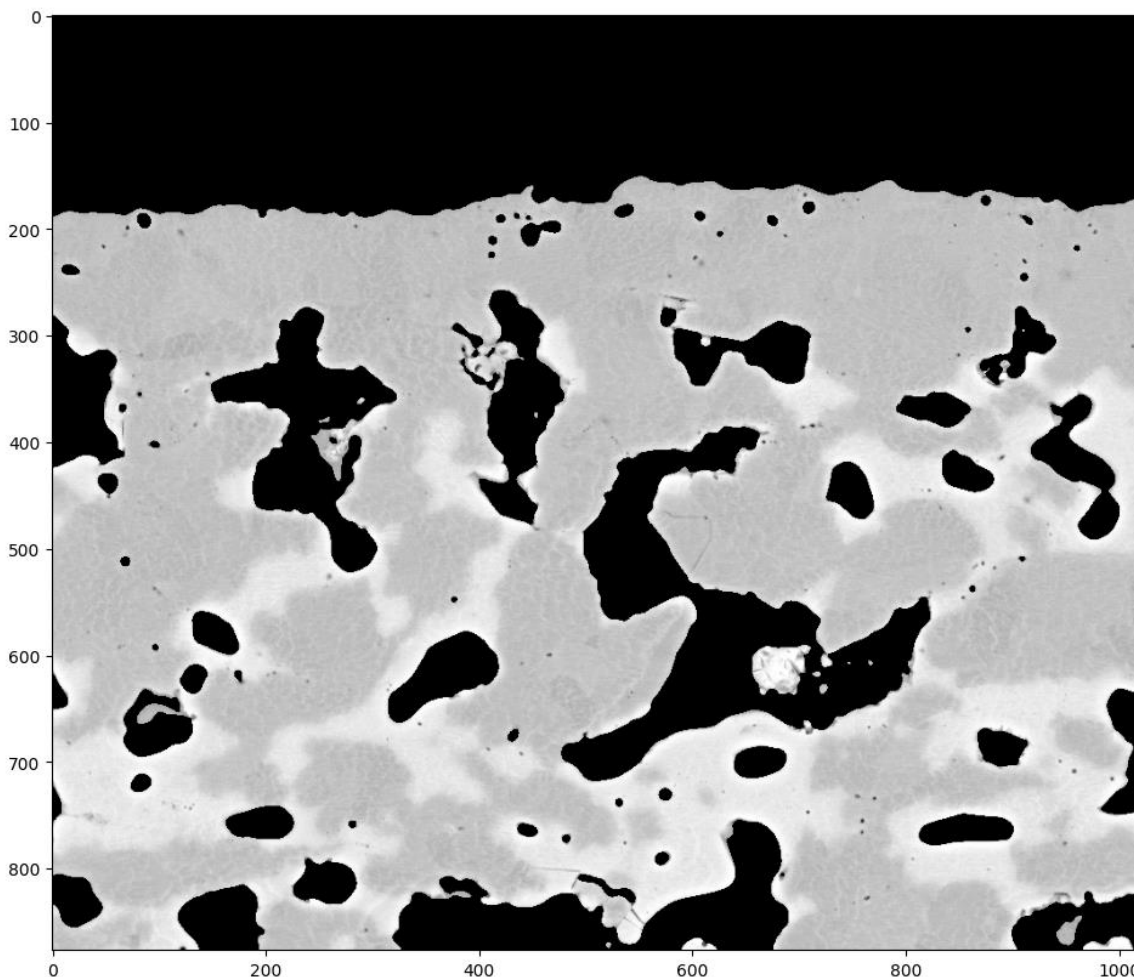


Рис.2. Результат використання фільтру Габора для для контактної дифузійної зони.

Fig. 2. The result of applying Gabor filtering to image of contact diffusion zone.

Оскільки зображення неоднорідне за кольором, необхідно побудувати колірну гістограму розподілу кольору.

За піками на гістограмі розподілу кольору можна судити про існування меж колірних діапазонів фаз, однак тепер місця, що відповідають за дефекти полірування або пористість можуть бути виключені в аналізі площі фаз контактної зони. Використовуючи діапазони кольору, які відповідають межі інтенсивності конкретної фази можна ефективно визначити площі фази в контактній зоні.

Зображення, приведені на Рис. 1. та Рис 2. цікаві з точки зору аналізу за допомогою алгоритмів комп'ютерного зору за наявності характерної для розпаду сплавів ламелярної структури, яку важко відокремити алгоритмами обробки зображень.

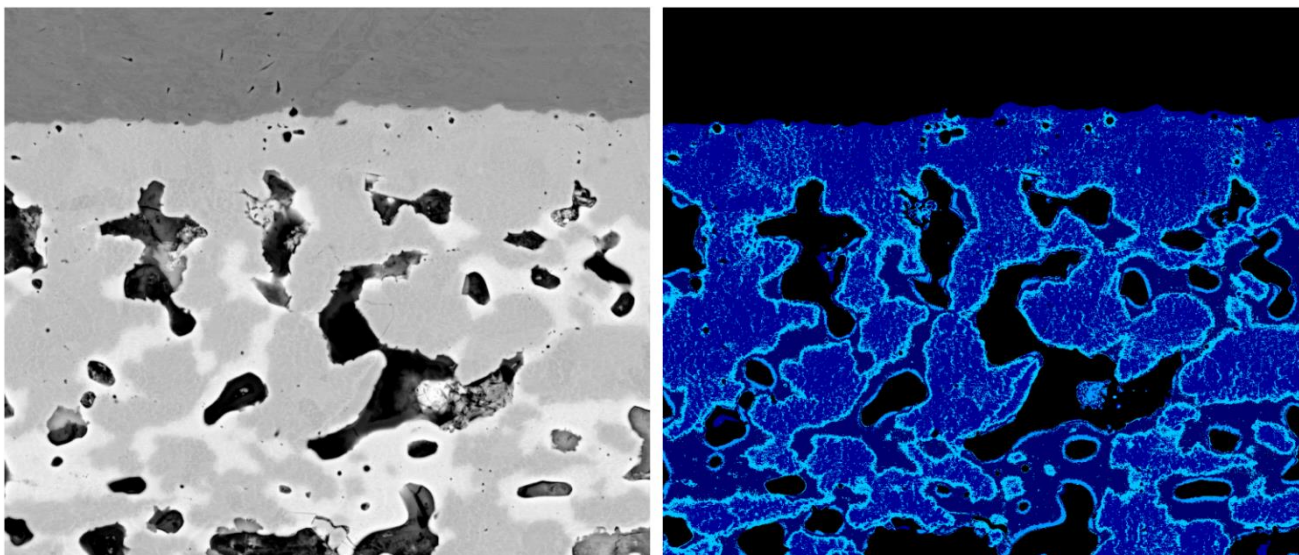


Рис.3. Початкове (зліва) та текстуроване зі зміненою колірною палітрою (справа) зображення контактної зони.

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 фільтра Габора дозволяє зменшити похибку на дефектних ділянках контактної зони завдяки застосуванню ефективного алгоритму пошуку меж де колірний градієнт різко зростає.

3. Застосування текстурної сегментації для уточнення розрахунку площ фаз

Запропонований алгоритм було застосовано для аналізу зразків виготовлених за методикою [4]. Всього було опрацьовано зображення з растрового електронного мікроскопа для 5 зразків із застосування модифікованих мідних поверхонь, що були отримані осадженням міді в різних режимах електроосадження. Попередньо всі зображення були згладжені за допомогою алгоритму фільтрації за Гаусом для забезпечення більш стабільної колірної картини в градаціях сірого кольору. Розрахунок площ фаз проводився для чотирифазних зразків, що містили наступні фази: Cu, Sn, Cu₆Sn₅, Cu₃Sn. Розрахунок площ фаз здійснювався лише для проміжних фаз Cu₆Sn₅ та 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 гистограми, 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.

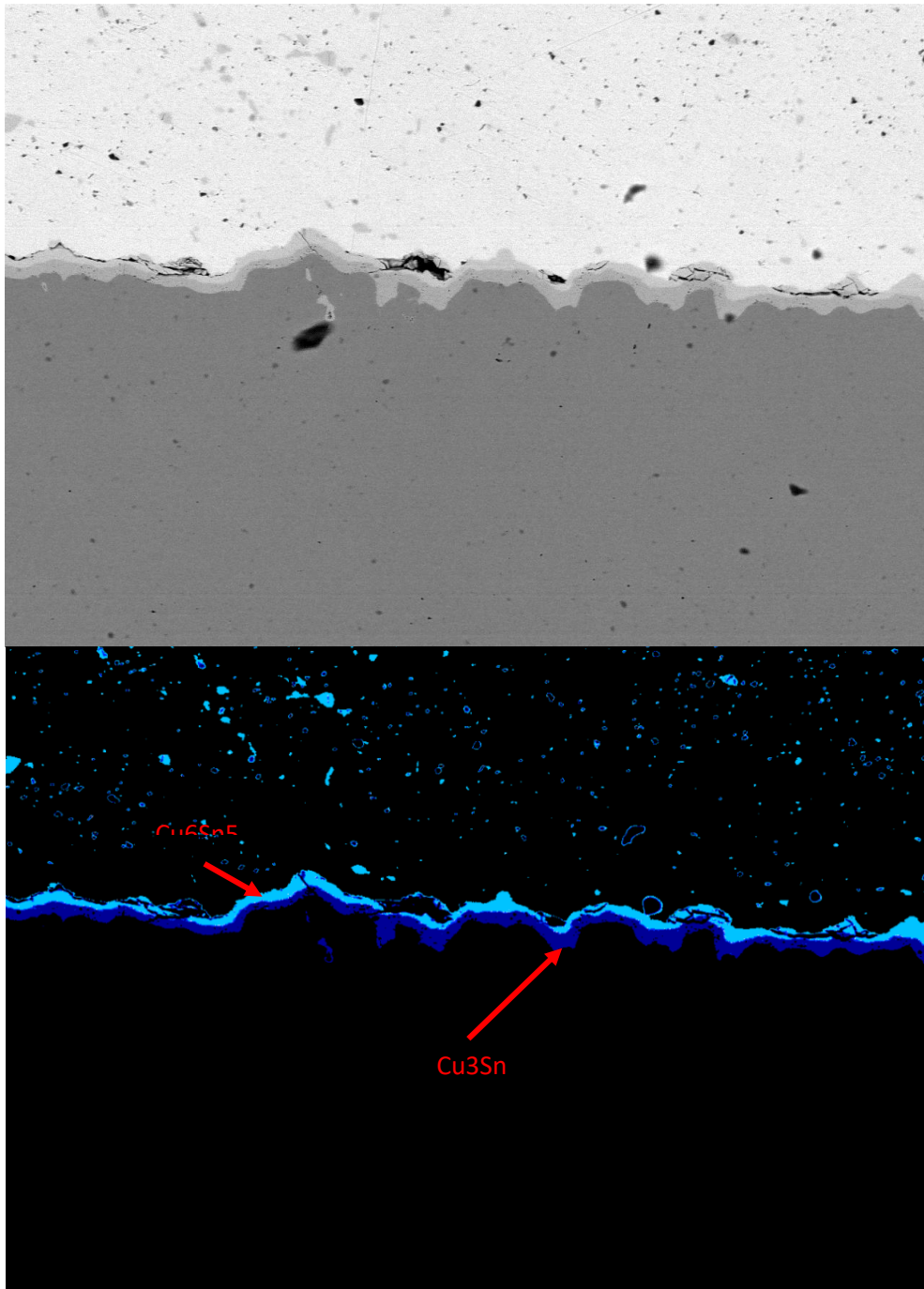


Рис.4. Початкове (зверху) та текстуроване зі зміненою колірною палітрою (знизу) зображення дифузійного інтерфейсу.

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

Для досліджених зразків приведених на Рис. 5 подані відомості про результати обробки зображень.

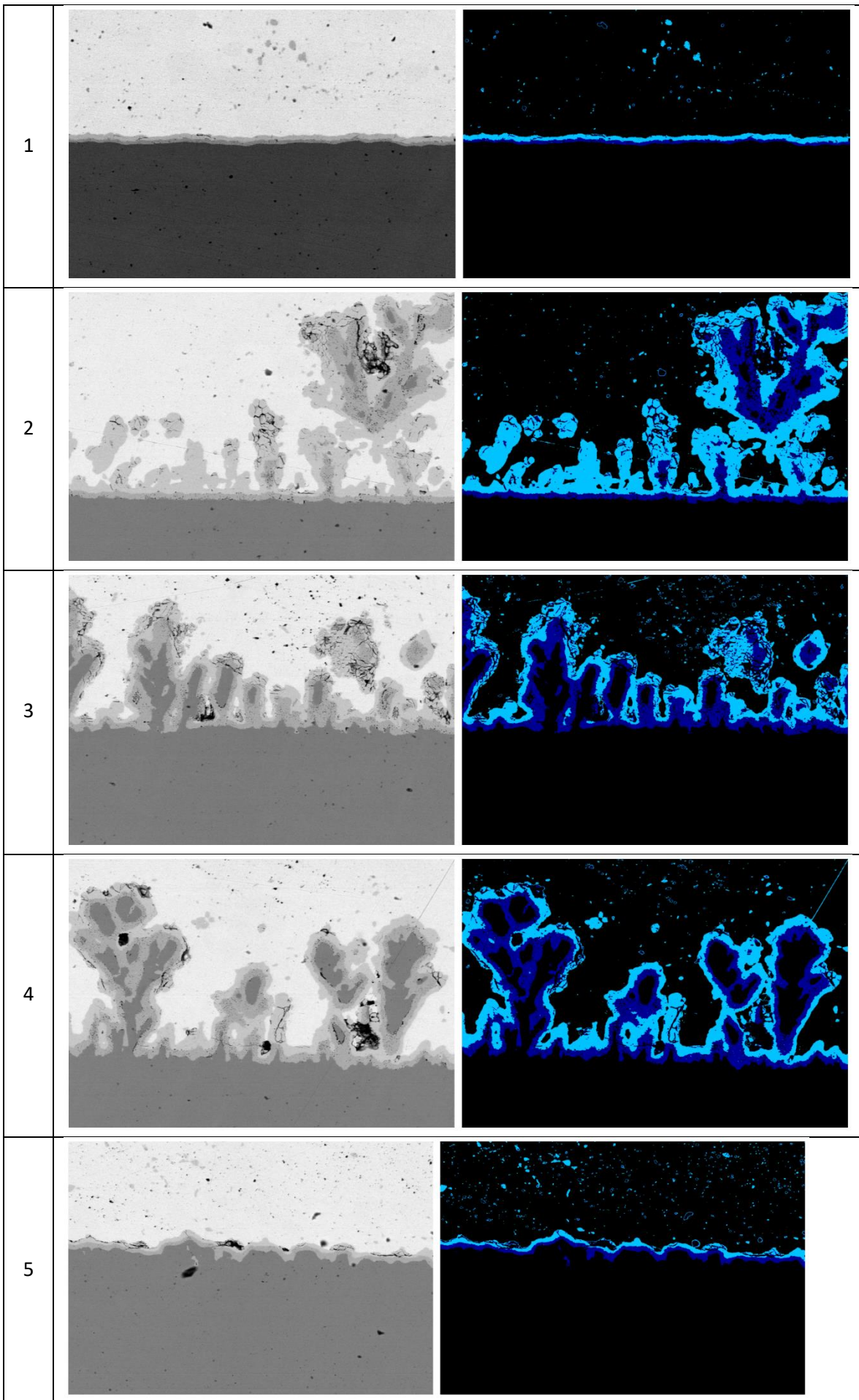


Рис. 5. Вихідне зображення та результат текстурної сегментації фрагментів зображень фаз Cu_6Sn_5 та Cu_3Sn із застосуванням фільтрації Габора.

Fig. 5. Source image and texture segmentation image result for intermediate phases Cu_6Sn_5 and Cu_3Sn by applying Gabor filtering.

Використання алгоритму текстурної сегментації фаз дозволяє ефективно розрахувати площі фаз для окремо взятих зразків, зокрема на кожному із зразків. В Таблиці 1 подано відомості про розраховані площі фаз Cu_6Sn_5 та Cu_3Sn для кожного з режимів електроосадження міді, що описані в [4].

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 Cu_6Sn_5 , мкм ²	Площа фази Cu_3Sn , мкм ²	Співвідношення площ фаз $\text{Cu}_6\text{Sn}_5/\text{Cu}_3\text{Sn}$
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

Алгоритм текстурної сегментації з використанням вейвлет-фільтру Габора дозволяє відокремити елементи зображення що являють собою дефектні ділянки та ділянки, що мають бути виключені в аналізі контактної зони.

Алгоритм текстурної сегментації дозволяє чітко визначати ділянки, де можливі незначні зміни градієнта інтенсивності кольору (градацій сірого), що дозволяє ефективно визначати малі зміни кольору, до прикладу елементи ламелярної структури.

Використання фільтру Габора дозволяє більш точно 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 є присутній градієнт градацій сірого кольору в зображеннях низької якості (зображень що містять значні перепади кольорів за наявності шуму).

5. Список використаної літератури:

- LEE, Tai Sing. Image representation using 2D Gabor wavelets // IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence. 1996. Т. 18, № 10. С. 959-971.
- Mehrotra, R., Namuduri, K. R., Ranganathan, N. Gabor filter-based edge detection // Pattern recognition. 1992. Т. 25, № 12. С. 1479-1494.
- Dolezel, M., Hejtmankova, D., Busch, C., Drahanaky, 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. №1. –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. № 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., & Drahanaky, 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. Seriiia «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. Seriiia «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 Educational 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 Educational 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