

ПЕРЕТВОРЕННЯ ГАФА У ПИТАННЯХ АНАЛІЗУ ОРІЄНТАЦІЇ СТРУКТУРНИХ КОМПОНЕНТ НА ПРИКЛАДІ СТРУКТУРИ МЕТАЛУ

Д.Ю. КОРОЛЕНКО, О.О. ШТОФЕЛЬ, В.В. ГОЛОВКО, Т.В. АВДЄЄВА

Для аналізу зображення на орієнтацію структурних компонент було застосовано Standard Hough Transform (SHT) для виявлення меж зерен на зображеннях мікроструктури та Principal Component Analysis (PCA) — для визначення орієнтації кожного окремого зерна [1]. SHT переводить зображення з x, y простору пікселів у параметризований простір ρ, θ (де ρ — відстань від початку координат до лінії, θ — кут нахилу між x і перпендикуляром):

$$\rho = x \cos \theta + y \sin \theta.$$

Для кожної точки фото і кожного θ отримуємо карту $A(\rho, \theta)$ найбільш вірогідних ліній, які «промальовують» границі повертаючи зображення у декартові координати.

Для пошуку орієнтації використовується метод PCA:

$$\{(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_n, y_n)\}.$$

Середнє положення (центр мас) контуру:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i; \quad \bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i,$$

де $\bar{x}, \bar{y}$ — середні координати, що відповідають центру мас (центроїду) контуру зерна, відносно якого далі здійснюється центрування точок для виключення впливу положення на площині.

Всі точки зсуваються відносно цього центру мас:

$$x'_i = x_i - \bar{x} \quad y'_i = y_i - \bar{y}.$$

На основі зсунених координат обчислюється коваріаційна матриця — вона відображає, наскільки зміни вздовж осі x пов'язані зі змінами вздовж осі y :

$$\sum \begin{bmatrix} Var(x') & Cov(x', y') \\ Cov(y', x') & Var(y') \end{bmatrix} = \frac{1}{n-1} \begin{bmatrix} \sum x'^2 & \sum x' y' \\ \sum x' y' & \sum y'^2 \end{bmatrix},$$

де $Var(x')$ і $Var(y')$ – це дисперсії по кожній осі, $Cov(x', y')$ – коваріація, що показує, наскільки зміни по X і Y «узгоджені». Після побудови коваріаційної матриці Σ виконується її власний розклад:

$$\det(\Sigma - \lambda I) = 0,$$

де I – одинична матриця, а λ – власні значення, що описують ступінь варіації даних уздовж відповідних напрямків.

Для кожного знайденого λ_i обчислюється відповідний власний вектор v_i , який задовольняє рівняння:

$$\sum v_i = \lambda_i v_i,$$

де v_i – власні вектори (напрямки), λ_i – власні значення (ступінь розкиду даних у цьому напрямку).

Кут орієнтації зерна визначається як кут між головною віссю v_1 , що відповідає найбільшому власному значенню λ_1 , та віссю x :

$$\theta = \arctan 2(v_{1y}, v_{1x}),$$

де v_{1y} і v_{1x} – компоненти головного вектора.

Для зручності кут нормалізується до інтервалу $[0^\circ, 360^\circ)$:

$$\theta = \theta \mod 360.$$

Даний метод [2] та отримані результати дозволяють кількісно оцінювати структурну однорідність зварного металу та потенційно замінити частину функцій EBSD-аналізу.

ЛІТЕРАТУРА

- [1] *OpenCV Development Team.* (н.д.). // OpenCV-Python Tutorials. Отримано з https://docs.opencv.org/4.x/d6/d00/tutorial_py_root.html
- [2] Shtofel, O., Holovko, V., Korolenko, D. (2025). *A computer method for studying grain misorientation in materials science problems.* // Book of Abstracts of the IXth International Materials Science Conference HighMatTech – 2025 (p. 208). Отримано з <https://umrs.org.ua/activities/conferences/hmt-2025/boa2025/>

ІЕЗ ім. Є.О. ПАТОНА НАН УКРАЇНИ
Email address: danilkorlenko@gmail.com

КПІ ім. ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО, КИЇВ, УКРАЇНА, ІЕЗ ім. Є.О. ПАТОНА НАН УКРАЇНИ
Email address: o.shtof@gmail.com

ІЕЗ ім. Є.О. ПАТОНА НАН УКРАЇНИ
Email address: v_golovko@ukr.net

КПІ ім. ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО, КИЇВ, УКРАЇНА
Email address: avdeeva.tetyana@gmail.com