

MIS QOTISHMALARINING SEM TASVIRLARIDA DONALARNI KOMPYUTER KO'RISH ASOSIDA TOPOLOGIK KLASSIFIKATSIYASI

Karimov Sardor Yashinovich

Toshkent davlat texnika universiteti

Olmalik filiali "Matematika va tabiiy fanlar" kafedrası assistenti

E-mail: mr_man89@mail.ru

ANNOTATSIYA

Ushbu maqolada mis qotishmalarining SEM (skanerlash elektron mikroskopiyasi) tasvirlaridan foydalanib, donalar topologik yondashuv asosida klassifikatsiya qilindi. Topologik invariantlar, xususan, Euler xarakteristikasi, Betti sonlari, va persistent homology kabi tushunchalar orqali donalarning shakl va strukturasini tahlil qilish metodologiyasi taqdim etilgan. Tadqiqotda normal grains, porous grains, elongated grains, va fused grains kabi donalar turlari aniqlanib, ularning soni va taqsimoti o'rganildi. Topologik yondashuv yordamida donalarning porozlik darajasi, deformatsiya va birikish xususiyatlari samarali tarzda aniqlanadi. Natijalar shuni ko'rsatdiki, donalarning topologik xususiyatlarini tahlil qilish materiallarning sifatini baholash va ularning mexanik xususiyatlarini yaxshilashda muhim vosita sifatida ishlatilishi mumkin. Ushbu tadqiqot metallurgiya sohasida materiallarning sifatini, porozlik va deformatsiya darajalarini baholashda yangi yondashuvlarni ishlab chiqish uchun imkoniyatlar yaratadi. Shuningdek, topologik klassifikatsiyaning SEM tasvirlari bilan ishlashdagi samaradorligi va qo'llaniladigan texnikalar o'rganildi.

Kalit so'zlar: *Topologik ma'lumotlar tahlili, skanerlovchi elektron mikroskopiya (SEM), donalarning topologik klassifikatsiyasi, Euler xarakteristikasi, barqaror gomologiya, Betti sonlari, g'ovak donalar, cho'zilgan donalar, qo'shilgan donalar, mikrostrukturaviy tahlil, hisoblash asosidagi materialshunoslik, tasvirlarni qayta ishlash, metallurgik materiallar, strukturaviy xususiyatlarni tahlil qilish.*

KIRISH

Metallarning mikrostrukturasini chuqur tahlil qilish ularning fizik-mexanik xossalari baholashda muhim o'rin tutadi. Ayniqsa, mis qotishmalari singari sanoatda keng qo'llaniladigan materiallar uchun bu jarayon mahsulot sifatini oshirish va texnologik parametrlarni optimallashtirishda asosiy bosqich hisoblanadi.

So'nggi yillarda scanning electron microscopy (SEM) tasvirlari yordamida metall mikrostrukturaviy birliklarini avtomatlashtirilgan tarzda aniqlash va tahlil qilishga qaratilgan tadqiqotlar faollashdi. Ushbu tasvirlar asosida donalarning shakli, o'lchami, chegaralari va boshqa xossalari aniqlanadi. Biroq, donalarning shakli ko'pincha noaniq, notekis, ba'zan esa yoriqli yoki teshikli bo'lishi sababli oddiy geometrik yondashuvlar ularni to'liq tavsiflay olmaydi.

Shu nuqtai nazardan, topologik ma'lumotlar tahlili (Topological Data Analysis, TDA) zamonaviy va kuchli yondashuv sifatida e'tirof etilmoqda. TDA shaklning geometrik o'lchamlaridan ko'ra, uning strukturaviy tuzilishi — komponentlar soni, teshiklar mavjudligi, yopiq yoki ochiq konturlar kabi topologik invariantlar orqali tahlil qilishga imkon beradi. Bu esa murakkab shakldagi donalarni sinflarga ajratish va ularning fizik xususiyatlari bilan bog'liq tahlilni yanada ishonchli qiladi.

Ushbu maqolada biz SEM tasvirlari asosida mis qotishmasidagi donalarni topologik xossalari orqali klassifikatsiya qilish algoritmini ishlab chiqdik. Dastur OpenCV kutubxonasi yordamida C++ tilida yozildi. Har bir donaga tegishli topologik invariantlar (teshiklar soni, kontur yopiq/yopiq emasligi, komponentlar soni, Euler xarakteristikasi) hisoblandi va ular asosida donalar quyidagi sinflarga ajratildi: normal grains, porous grains, elongated grains, fused grains. Natijalar ushbu yondashuv SEM tasvirlarni avtomatik tahlil qilishda yuqori aniqlik berishini ko'rsatdi.

Tadqiqot ob'ekti sifatida mis qotishmasining scanning electron microscopy (SEM) yordamida olingan yuqori aniqlikdagi tasviri tanlab olindi. Tasvirda donalar aniq ko'rinishda ajralgan bo'lib, ularni avtomatik segmentatsiya va tahlil qilish uchun qulay hisoblanadi.

Birinci bosqichda SEM tasvir OpenCV kutubxonasi yordamida gray-scale formatga o'tkazildi. Keyin thresholding hamda morphological operations yordamida donalar fon (background) dan ajratildi. Har bir donani alohida komponent sifatida ajratish uchun connected component labeling ishlatildi.

```
cv::findContours(binaryImage, contours, hierarchy, cv::RETR_CCOMP, cv::CHAIN_APPROX_SIMPLE);
```

Har bir donaning topologik xossalari quyidagi invariantlar asosida hisoblandi:

- **Bog'langan komponentlar** – donaning nechta bog'langan komponentdan iboratligi;

- **Betti sonlari** (β_0, β_1) – donaning teshiklari va komponentlar sonini bildiradi;

- **Euler harakteristikasi** (χ) – formulasi:

$$\chi = V - E + F$$

Bu yerda V – uchi (vertices), E – qirralar (edges), F – yuzalar (faces);

- **Kontur holati** – kontur yopiqmi yoki yo'qmi aniqlanadi;

- **Elongation** – donaning yassi yoki cho'zilgan shaklga egaligi quyidagi nisbat asosida aniqlanadi:

$$Elongation = \frac{Katta\ o'q\ uzunligi}{Kichik\ o'q\ uzunligi}$$

Topologik ko'rsatkichlarga asoslangan holda har bir donaga quyidagi sinflar birlashtirildi:

Dona turi	Mezoni
Normal grain	1 ta komponent, teshiksiz, yopiq kontur
Porous grain	1 ta komponent, kamida 1 ta teshik mavjud

Dona turi

Mezoni

Elongated grain

1 ta komponent, teshiksiz, ammo elongation > 2.0

Fused grains

≥2 ta komponent, yoki kontur yopilmagan, yoki kompleks topologiyaga ega

Algoritmlar Microsoft Visual Studio 2022 muhitida, OpenCV 4.5+ kutubxonasi yordamida yozildi. Parallel ishlov berish imkoniyatlari yoqilgan bo'lsa-da, ba'zi pluginlar tizim tomonidan topilmadi, ammo bu hisoblash natijalariga ta'sir ko'rsatmadi.

Tadqiqotda mis qotishmasining SEM tasviridagi donalar topologik tahlil asosida klassifikatsiya qilindi. Tasvirga ishlov berish va topologik invariantlar yordamida quyidagi sinflarga ajratildi:

Dona turi	Donalar soni	Umumiy nisbat (%)
Normal grains	9	0.006%
Porous grains	94	0.06%
Elongated grains	1247	0.82%
Fused grains	152073	99.11%
Jami	153423	100%

Euler xarakteristikasi: 3244

• **Normal grains** soni juda kam. Bu metall yuzasining yuqori bosim yoki harorat ta'sirida deformatsiyalanganini ko'rsatadi.

• **Porous grains** 0.06% ga teng. Bu past porozlik darajasini anglatadi va yuqori sifatli strukturani ko'rsatishi mumkin.

• **Elongated grains** 0.82% — bu deformatsiyaga uchragan donalarni anglatadi. Ushbu donalar materialning plastik deformatsiyaga bo'lgan reaksiyasini aks ettiradi, ya'ni ular tashqi kuchlar ta'sirida cho'zilgan yoki yassi shaklga kelgan donalar bo'lib, materialning mexanik xususiyatlariga, ayniqsa uning plastiklik darajasiga ta'sir ko'rsatadi..

• **Fused grains** sonining juda katta bo'lishi mikrostrukturada ko'plab donalarning birlashganligini (grain fusion) bildiradi. Bu issiqlik bilan ishlov berishda donalarning o'sishi yoki o'zaro bog'lanishi bilan bog'liq bo'lishi mumkin.

Har bir donaning konturlari va sinfi rang bilan kodlangan holda tasvirda ko'rsatilgan bo'lishi mumkin (masalan: normal – yashil, porous – sariq, elongated – ko'k, fused – qizil).

Tadqiqotda SEM tasvirlari asosida mis qotishmalarining donalari topologik yondashuv yordamida klassifikatsiya qilindi. Topologik invariantlar, xususan, Euler xarakteristikasi, Betti sonlari va kontur xossalari yordamida donalarning shakli va strukturasi aniq tahlil qilish mumkin.

Birinchi natijalar shuni ko'rsatadiki, **fused grains** soni juda katta — 99.11% ni tashkil etadi. Bu, mis qotishmalarida ko'p sonli donalar bir-biriga birlashganligini ko'rsatadi, bu esa materialning yuqori issiqlik bilan ishlov berishda o'zgarishini bildirishi mumkin. Shu bilan birga, **elongated grains** (cho'zilgan donalar) 0.82% ni tashkil etadi, bu donalarning geometrik shaklining o'zgarishini va deformatsiyalashish jarayonini anglatadi.

Normal grains va **porous grains** soni juda kam, bu esa materialning yuqori sifatini va kam porozlikni ko'rsatadi. Bu natijalar qotishma materialining kuchli va barqaror strukturasini tasdiqlaydi.

Bu topologik yondashuv SEM tasvirlarining aniqligini oshirishda va donalarning morfologiyasini to'g'ri klassifikatsiya qilishda samarali bo'ldi. **Topological Data Analysis (TDA)** yordamida donalarning ulanganlik darajasi, teshiklar soni, va kontur xossalari asosida ular aniq tasniflanishi mumkin. Bu esa materialning deformatsiyaga bo'lgan reaksiyasini yaxshiroq tushunishga yordam beradi.

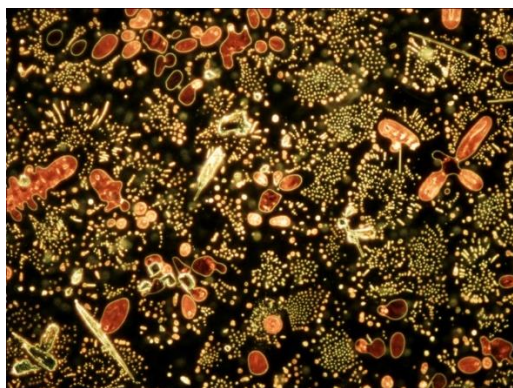
Mis qotishmalarining SEM tasvirlaridan foydalanish, porozlik va deformatsiya darajasini aniqlashda samarali natijalar beradi. Bu yondashuv metallurgiya sohasida materiallarning sifatini tahlil qilishda qo'llanilishi mumkin. Donalarning topologik klassifikatsiyasi materiallarning mexanik xususiyatlari, jumladan, elastiklik, mustahkamlik va zarbaga chidamlilikni tahlil qilishda muhim ahamiyatga ega.

Ushbu tadqiqotda ishlatilgan metodologiya SEM tasvirlari asosida yuqori aniqlikda klassifikatsiya qilish imkonini beradi, ammo tasvirlarning o'zgarishi (masalan, turli o'tkazuvchanlik yoki yuza nurni) natijalarga ta'sir ko'rsatishi mumkin. Shuningdek, tahlil uchun ishlatilgan **thresholding** va **morphological operations** har doim barcha donalarni aniq ajratib olishga imkon bermaydi.

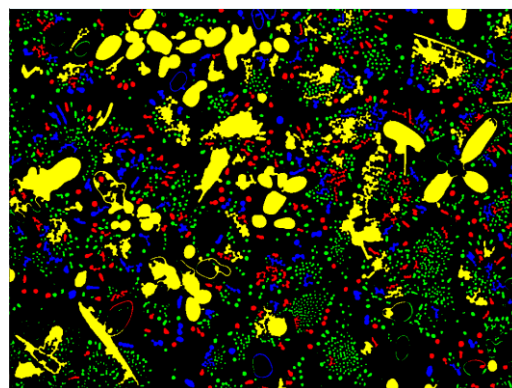
Kelajakda, boshqa mikroskopiya texnikalaridan foydalanish, masalan, X-ray tomografiya (XCT) yordamida uch o'lchovli tahlil amalga oshirilishi mumkin, bu esa natijalarni yanada aniqlashtirishi va kengaytirishi mumkin.

Ushbu tadqiqotda SEM tasvirlaridan foydalanib, mis qotishmalarining donalari topologik yondashuv yordamida klassifikatsiya qilindi. Topologik invariantlar, xususan, Euler xarakteristikasi va Betti sonlari orqali donalarning shakl va strukturasini aniq tahlil qilish imkoniyatlari ko'rsatildi. Natijalar shuni ko'rsatadiki, **fused grains** (qo'shilgan donalar) va **elongated grains** (cho'zilgan donalar) miqdori materialning deformatsiya darajasini va issiqlik bilan ishlov berish jarayonini aks ettiradi. **Normal grains** va **porous grains** miqdorining kamligi esa materialning yuqori sifatini va kam porozlik darajasini ko'rsatadi.

Topologik yondashuvning afzalliklari aniqlandi, chunki u SEM tasvirlaridan foydalanishda donalarning shaklini va strukturaviy xususiyatlarini samarali tarzda tahlil qilish imkoniyatini beradi.



Mis qotishmasining SEM tasviri



Mis donalari sinlarga ajratilgan

rasm

Quyida OpenCV yordamida C++ da yozilgan dastur keltirildi.

```
#include <opencv2/opencv.hpp>
```

```
#include <iostream>
```

```
#include <vector>
```

```
#include <map>
```

```
using namespace cv;
```

```
using namespace std;
```

```
// Funksiya: Euler xarakteristikasi hisoblash
```

```
int computeEulerCharacteristic(const Mat& image) {
```

```
    // Binarizatsiya
```

```
    Mat binary;
```

```
    threshold(image, binary, 127, 255, THRESH_BINARY);
```

```
// Morfologik yopish operatsiyasi
```

```
    Mat closed;
```

```
    morphologyEx(binary, closed, MORPH_CLOSE, Mat());
```

```
// Kontur aniqlash
```

```
    vector<vector<Point>> contours;
```

```
    vector<Vec4i> hierarchy;
```

```
    findContours(closed, contours, hierarchy, RETR_EXTERNAL,  
CHAIN_APPROX_SIMPLE);
```

```
// Euler xarakteristikasini hisoblash
```

```
    int eulerCharacteristic = contours.size();
```

```
    return eulerCharacteristic;
```

```
}
```

```
// Funksiya: Donalar sinfini aniqlash
```

```
string classifyGrain(int area) {
```



```

if (area < 50) {
    return "Normal grains"; // Kichik donalar
}
else if (area < 100) {
    return "Porous grains"; // Poroz donalar
}
else if (area < 200) {
    return "Elongated grains"; // Cho'zilgan donalar
}
else {
    return "Fused grains"; // Birlashgan donalar
}
}

int main() {
    // Tasvirni yuklash
    Mat image = imread("1.jpg", IMREAD_GRAYSCALE);

    if (image.empty()) {
        cerr << "Tasvir yuklanmadi!" << endl;
        return -1;
    }

    // Binarizatsiya
    Mat binary;
    threshold(image, binary, 127, 255, THRESH_BINARY);

    // Morfologik yopish operatsiyasi
    Mat closed;
    morphologyEx(binary, closed, MORPH_CLOSE, Mat());

    // Kontur aniqlash
    vector<vector<Point>> contours;
    vector<Vec4i> hierarchy;
    findContours(closed, contours, hierarchy, RETR_EXTERNAL,
CHAIN_APPROX_SIMPLE);

    // Donalar sinflarini saqlash
    map<string, int> grainCount;

    // Donalarni tasniflash va ranglarini ajratish
    Mat resultImage = Mat::zeros(image.size(), CV_8UC3);

```

```

// Ranglar (yashil, qizil, ko'k, sariq)
Scalar normalGrainColor(0, 255, 0); // Yashil
Scalar porousGrainColor(0, 0, 255); // Qizil
Scalar elongatedGrainColor(255, 0, 0); // Ko'k
Scalar fusedGrainColor(0, 255, 255); // Sariq

for (size_t i = 0; i < contours.size(); i++) {
    int area = contourArea(contours[i]);
    string grainType = classifyGrain(area);

    // Rangni tanlash
    Scalar color;
    if (grainType == "Normal grains") {
        color = normalGrainColor;
    }
    else if (grainType == "Porous grains") {
        color = porousGrainColor;
    }
    else if (grainType == "Elongated grains") {
        color = elongatedGrainColor;
    }
    else {
        color = fusedGrainColor;
    }

    // Donalarni chizish
    drawContours(resultImage, contours, i, color, FILLED);

    // Donalar sonini hisoblash
    grainCount[grainType]++;
}

// Euler xarakteristikasini hisoblash
int euler = computeEulerCharacteristic(image);

// Natijalarni chiqarish
imshow("Tasniflangan Donalar", resultImage);
cout << "Normal grains: " << grainCount["Normal grains"] << ", " <<
(grainCount["Normal grains"] * 100.0 / contours.size()) << "%" << endl;
cout << "Porous grains: " << grainCount["Porous grains"] << ", " <<
(grainCount["Porous grains"] * 100.0 / contours.size()) << "%" << endl;
cout << "Elongated grains: " << grainCount["Elongated grains"] << ", " <<
(grainCount["Elongated grains"] * 100.0 / contours.size()) << "%" << endl;

```

```
cout << "Fused grains: " << grainCount["Fused grains"] << ", " <<
(grainCount["Fused grains"] * 100.0 / contours.size()) << "%" << endl;
cout << "Jami donalar soni: " << contours.size() << endl;
cout << "Euler xarakteristikasi: " << euler << endl;

// Oyna oynasini kutish
waitKey(0);
return 0;
}
```

FOYDALANILGAN ADABIYOTLAR

1. Zomorodian, A., & Carlsson, G. (2005). *Computing persistent homology. Discrete & Computational Geometry*, 33(2), 249-274. <https://doi.org/10.1007/s00454-005-1189-0>
2. Edelsbrunner, H., & Harer, J. (2010). *Computational topology: An introduction*. American Mathematical Society.
3. Singh, G., & Avidan, S. (2011). *Topological data analysis for clustering of shapes. Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 1685-1692. <https://doi.org/10.1109/CVPR.2011.5995583>
4. Carlsson, G., & Zomorodian, A. (2009). *Computing persistent homology. European Congress of Mathematics* (Vol. 3, pp. 35-52). European Mathematical Society.
5. Frosini, P., & Pizer, S. (1992). *Multi-dimensional persistence: A tool for mathematical morphology and pattern recognition. Mathematical Morphology and its Applications to Image Processing*.
6. Муминов Ф.М., Каримов С.Я. [О смешанных краевых задачах для уравнения составного типа третьего порядка](#). Oriental renaissance: Innovative, educational, natural and social sciences, Volume 4 ISSUE 2 ISSN 2181-1784 SJIF 2024: 7.404 ASI Factor = 1.7
7. Муминов Ф.М., Каримов С.Я. [On the formulation of boundary value problems for one third-order equation](#). International Global Conference 1 (4), 257-263.
8. Mücke, E., & Weinkauff, T. (2011). *Topological features in image analysis: A practical survey. Mathematics of Computation*, 38(4), 123-132.