

УДК 621.01:681.3: 658.5

А.В. ПІКІЛЬНЯК, канд. техн. наук., доц., Криворізький національний університет

## РОЗРОБКА СИСТЕМИ РОЗПІЗНАВАННЯ ГРАФІТОВИХ ВКЛЮЧЕНЬ ПРИ АНАЛІЗІ МІКРОСТРУКТУРИ ЧАВУНУ

**Метою** дослідження є розробка системи автоматизованого мікроструктурного аналізу для вирішення конкретних задач. Створення планується в форматі окремих модулів під конкретні задачі матеріалознавства, що дозволить молодим науковцям, які позбавлені фінансування, вирішувати задачі, пов'язані з їх професійним спрямуванням.

Елементом **наукової новизни** є питання розробки сучасної вітчизняної системи автоматизованого мікроструктурного аналізу на етапі аналізу графітових включень у чавуні. Викладено результати проведення мікроструктурного аналізу та обробки отриманих результатів, а також перелік використаного обладнання.

У роботі сформульовано актуальність проблеми, пов'язаної з необхідністю переходу від стандартних методів мікроструктурного аналізу до сучасних, які є більш точними і потребують мінімум втручання людини. Дослідження проводились на зразках циліндричної форми. Матеріал КЧ35-10. У процесі цифрової обробки отриманих зображень використано метод Вейвлет аналізу. Для аналізу графітових включень для визначення відношення Ферит-Перліт встановлюються порогові рівні градації сірого так, щоб на нетравленому зразку можна було виявити графіт. Графітна фракція використовується для розрізнення між графітом і перлітом, тому що їх схожість в відтінках сірого робить їх практично невідмітними один від одного. Після завершення аналізу, програма автоматично обчислює відсоток графітної фракції, яка зберігається в проміжній звіті.

**Практична значимість** полягає в тому, що розроблена програма в комбінації з можливостями сучасної цифрової техніки для мікроструктурного аналізу дозволяє визначати параметри графіту точно і багаторазово. Програмний пакет розроблені відповідно до міжнародного стандарту ISO 945-1:2008. Передбачена можливість автоматичного генерування звіту, заснованого на даних аналізу.

**Результати** дослідження показали, що розроблена система є універсальною і може взаємодіяти з будь-яким оптичним обладнанням (компактні цифрові металографічні мікроскопи, аналогові мікроскопи з цифровим окуляром, професійні цифрові металографічні мікроскопи), але яке, в свою чергу задовольняє вимоги, що висуваються при мікроструктурному аналізі.

**Ключові слова:** мікроструктурний аналіз, графіт, чавун, система розпізнавання, матеріалознавство, сфероїдизація.

**Проблема і її зв'язок з практичними задачами.** У лабораторії металографії, завдання аналізу ступеня сфероїдизації графіту в чавуні, його розміру, форми і розподілу, а також відношення Ферит-Перліт, має вкрай важливе значення з точки зору контролю якості [1-5]. Так як чавун використовується у виробництві широкого спектру прецизійних виробів, верстатобудівна промисловість є яскравим прикладом того, як контроль якості чавуну грає життєво важливу роль у виготовленні деталей, що вимагають підвищеної міцності і зносостійкості: бази і корпуси, станини верстатів, зубчасті колеса.

Крім того, графіт, що міститься в чавуні допомагає погасити вібрації і шум від двигуна. Високоміцний чавун вибирають за його унікальні механічні властивості, він в свою чергу, дозволяє знизити рівень шуму і вагу, при одночасному зниженні собівартості. Метою мікроструктурного аналізу чавуну є отримання наступних важливих характеристик:

- тип графіту (форма);
- розподіл графіту;
- розмір графіту;
- ступень сфероїдизації графіту;
- процент включень графіту;
- відношення Ферит-Перліт.

**Аналіз досліджень та публікацій.** Для оцінки мікроструктури графіту в чавуні використовують міжнародний стандарт ISO 945-1:2008 [3,5,6]. Цей стандарт представлений трьома параметрами: тип (форма), розподіл і розмір графіту. Класифікація форм графітних включень, змінюється від I до VI. Тип VI вказує на кулясту форму (високоміцний чавун - графіт у вигляді куль), в той час як тип I відповідає ковкому чавуну (графіт у вигляді пластівців). Відсоток графіту, фериту і перліту відповідає величині, займаній кожною структурою в матеріалі. Визначення таких параметрів є класичним прикладом оцінки відсотка площі включень.

Історично склалося так, що більшість лабораторій контролю якості здійснюють аналіз чавуну за допомогою атласів методом порівняння [7,8,13,14]. При цьому оператор здійснює візуальну оцінку параметрів шляхом порівняння реального зображення під оптичним мікроскопом (зазвичай при 100-кратному збільшенні) з атласом мікрознімків. Оскільки чавун зазвичай аналізується за кількома параметрами, порівняння різних графіків може зайняти багато часу. Оскільки результати інтерпретуються оператором, ця методологія може привести до неточних і часто невідтворюваних результатів, між різними операторами. Крім того, оператор повинен вручну ввести свої результати в електронні таблиці або звіт, що веде за собою виникнення нових помилок.

Для сучасної лабораторії контролю якості, завданням є створення повністю автоматизованого виконання мікроструктурного аналізу чавуну і документування результатів, в повній відповідності з ISO 945-1:2008 [6] або іншим міжнародним чи вітчизняним стандартом, усуваючи будь-які потенційні неточності [9-15].

**Мета досліджень.** Метою дослідження є розробка системи автоматизованого мікроструктурного аналізу для вирішення конкретних задач. Створення планується в форматі окремих модулів під конкретні задачі матеріалознавства, що дозволить молодим науковцям, які позбавлені фінансування, вирішувати задачі, пов'язані з їх професійним спрямуванням. Це викликано потребою у придбанні професійних автоматизованих комплексів, які звичайно вирішують широкий спектр задач, але які потребують занадто великих капіталовкладень.

**Викладення матеріалу та результати.** В даному дослідженні завдяки досягненням в області цифрової мікроскопії, розроблено спеціальне програмне забезпечення в програмному пакеті Matlab на основі Вейвлет аналізу для реконструкції та подальшого аналізу зображення включень шаровидного графіту у структурі чавуну, рис. 1.



Рис. 1. Цифровий компактний мікроскоп для проведення аналізу

Матеріал КЧ35-10. Оператор може проводити аналіз отриманих зображень мікроструктури чавуну, згідно з широким спектром міжнародних стандартів. Протягом декількох натискань миші, нетравлений зразок може бути повністю проаналізовано на розмір графіту, форму, ступінь сфероїдизації і розподіл.

При розгляді питання про вибір мікроскопа для аналізу чавуну, більш важливим, ніж цифрова роздільна здатність є розмір пікселя, точніше щільність пікселів. Використовуємо

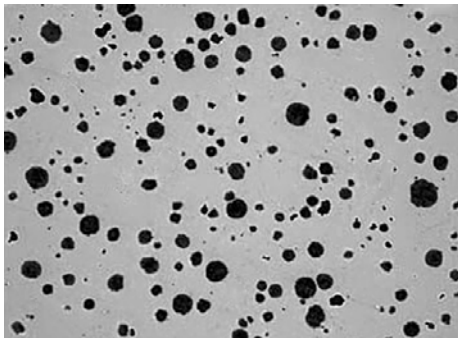
цифровий компактний мікроскоп з наступними характеристиками:

- роздільна здатність: 2.0 Мрх;
- максимальна роздільна здатність: 1600×1200 рх;
- коефіцієнт збільшення: 1X ~ 1000X (ручне);
- максимальна частота кадрів: 30 кадр/с;
- можливість створення знімків (JPEG, BMP), запис відео (AVI);
- фокус: 0-40 мм;
- інтерфейс: USB 2.0, USB 1.1;
- живлення: 5 В від USB;
- підсвітка: 8 LED;
- довжина USB-кабеля: 1.45 м;
- розміри мікроскопа (довжина і діаметр): 140 мм та 40 мм;

Цей мікроскоп має можливість здійснювати передачу зображення в градаціях сірого, що було одним з критеріїв вибору обладнання для експерименту, оскільки в розробленому програмному забезпеченні аналіз чавуну може бути належним чином виконаний тільки в режимі градацій сірого (установка порогових параметрів простіше, ніж в кольоровому режимі).

Послідовність проведення аналізу. Для здійснення аналізу може бути використаний комп'ютер з мінімальними вимогами продуктивності. В першу чергу проводиться захоплення цифрового зображення поверхні заздалегідь підготовленого мікрошліфа, а потім на основі закладених в програмному забезпеченні алгоритмів перетворення зображення здійснюють подальший аналіз.

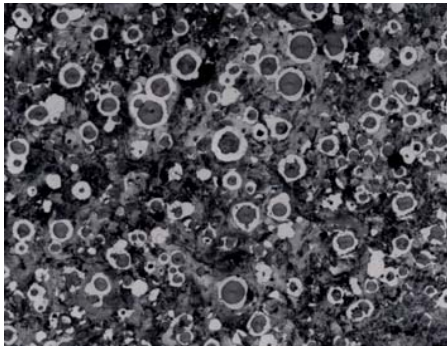
Для аналізу графітових включень встановлюються порогові рівні градації сірого так, щоб на нетравленому зразку можна було виявити графіт (рис. 2).



**Рис. 2.** Результати мікроструктурного аналізу графітових включень

Після завершення аналізу, програма автоматично обчислює відсоток графітної фракції, яка зберігається в проміжний звіт. Ця фракція буде використовуватися в подальшому при аналізі співвідношення перліт-ферит протравленого зразка. Графітна фракція використовується для розрізнення між графітом і перлітом, тому що їх схожість в відтінках сірого робить їх практично невідмінними один від одного.

Для визначення відношення Ферит-Перліт встановлюються порогові рівні градації сірого для виявлення фериту (рис. 3).

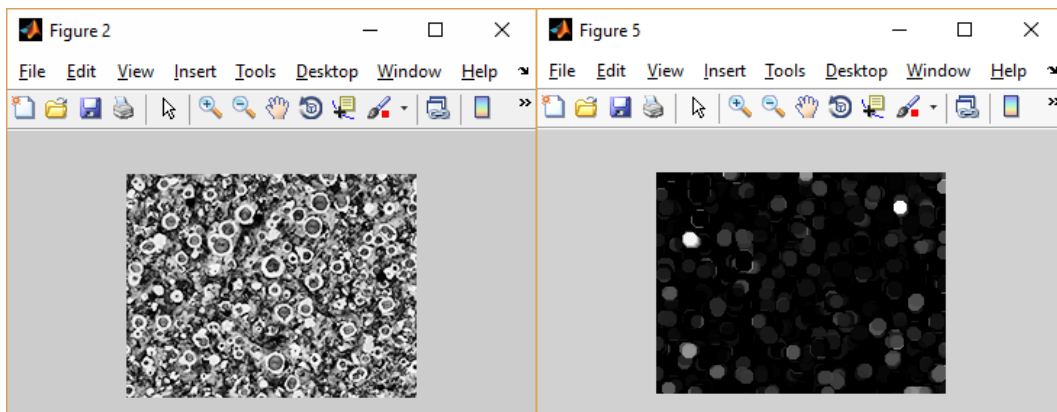


**Рис. 3.** Протравлений зразок, для визначення співвідношення ферит-перліт

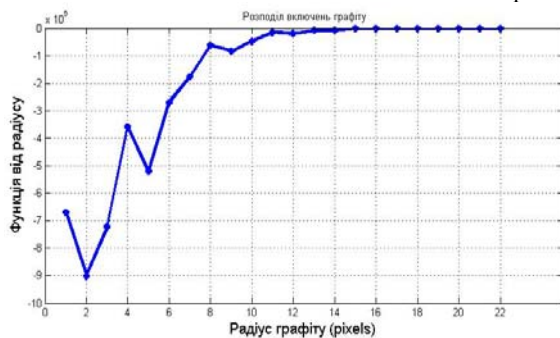
Оскільки графіт і перліт мають схожі значеннями в відтінках сірого, відсоток графіту враховується з попереднього аналізу на процентний вміст графіту. Для уникнення помилкового виявлення фериту застосовується морфологічний фільтр для виділення яскравих пустот в перліті.

Зображення аналізується відповідно до обраного стандарту (рис. 4). Після завершення аналізу, всі дані автоматично заносяться в таблицю результатів безпосередньо в програмному забезпеченні.

На підставі заздалегідь визначеного шаблону, автоматично генерується звіт, що включає результати аналізу чавуну (рис. 5). Звіти, що містять відповідні дані аналізу і пов'язані з ними зображення, також можуть бути отримані з мінімальним рівнем підготовки.



**Рис. 4.** Аналіз зображень відповідно до обраного стандарту



**Рис. 5.** Результати мікроструктурного аналізу

Відтворюваність дослідів перевірялася за критерієм Кохрена. При цьому кількість порівнюваних вибірок становило  $m=4$ , кількість дослідів в серії - 35, обсяг кожної вибірки  $n=50$ , рівень значущості був прийнятий на рівні  $p = 0,05$ .

Результати обробки експериментальних даних наведені в табл. 1.

Результати статистичної обробки експериментальних даних

Діапазон радіусів графіту	Критерій Кохрена	
	G розрахунковий	G табличний
$R_1$	0,3567	0,3720
$R_2$	0,3601	0,3720
$R_3$	0,3496	0,3720
$R_4$	0,3512	0,3720
$R_5$	0,3385	0,3720
$R_6$	0,3694	0,3720
$R_7$	0,3478	0,3720
$R_8$	0,3639	0,3720
$R_9$	0,3534	0,3720
$R_{10}$	0,3686	0,3720

Для усіх отриманих експериментальних даних, розрахункове значення критерію Кохрена менше табличних значень. Таким чином, розроблений метод і експериментальний програмно-апаратний комплекс що його реалізовує дозволяють коректно відновлювати функцію розподілу графітових включень за розмірами. Похибка відновлення функції розподілу графітових включень за розмірами.

Результати дослідження показали, що розроблена система є універсальною і придатна для роботи як з аналоговими мікроскопами з цифровим окуляром, так і з професійними цифровими металографічними мікроскопами.

**Висновок.** Розроблена програма в комбінації з можливостями сучасної цифрової техніки для мікроструктурного аналізу дозволяє визначати параметри графіту точно і багаторазово, а втручання людини зведено до мінімуму. Програмний пакет розроблений відповідно до міжнародного стандарту ISO 945-1:2008. Передбачена можливість автоматичного генерування звіту, заснованого на даних аналізу. Напрямок подальшого вдосконалення методу, є створення бази даних для архівації та швидкого і легкого пошуку зображень і пов'язаних з ними даних, а також розширення можливостей системи для охоплення більш широкого спектру матеріалів (металів, порошків, покриттів).

### Список літератури

1. Аналізатор зображень "Thixomet". Режим доступу: <http://ukrintech.com.ua/produktsiya/metallografiya/programmnoe-obespechenie/>
2. Минаев А.А., Смирнов А.Н., Лейрих И.В. Металлопродукция: сертификация, маркировка, упаковка. Учебное пособие. – Донецк: Норд-Пресс, 2006. – 291 с.
3. Богачев И.Н. Металлография чугуна. М.: Машгиз, 1952. - 360 с.4.
5. Тен Э.Б., Тухин Э.Х., Воронцов В.И., Ильюров А.Л. Прогнозирование формы графита в структуре чугуна / Э.Б. Тен, Э.Х. Тухин, В.И. Воронцов, А.Л. Ильюров // Экспресс обзор Серия 10 Промышленность отопительного и санитарно-технического оборудования. - М.:ВНИИЭСМ. 1991, №4. - С.3-10.
6. ISO 945-1:2008. Microstructure of cast irons — Part 1: Graphite classification by visual analysis.
7. Юнусов Ю.Ю., Осмаков В.Н. Исследование макро- и микроструктуры металла неразрушающим методом при помощи металлографического комплекса / Ю.Ю. Юнусов, В.Н. Осмаков // Металловедение и термическая обработка металлов, 2002, №2, - С. 36-37.
8. Яковлев А.В. Система обработки изображений шлифов металлов / А.В. Яковлев // Радиотехника, телевидение и связь. Межвуз. сборник научн. трудов. – Муром: Изд-во Муромского института (филиала) ВлГУ, 1999.
9. Мартюшев Н.В. Программные средства для автоматического металлографического анализа / Н.В. Мартюшев // Современные проблемы науки и образования. – 2012. – № 5. – С. 1-6.
10. Гонтовой С.В., Емельянов В.А. Автоматизированная компьютерная система 153 металлографического контроля качества металлов / С. В. Гонтовой, В. А. Емельянов // Радиоелектронні і комп'ютерні системи. – 2010. – № 5(46). – С. 197 – 202.
11. Стась О.М., Гаврилюк В.П. Комп'ютерні методи дослідження в металографічному аналізі / О.М. Стась, В.П. Гаврилюк // Методи дослідження та контролю якості металів. — 2000. — №1—2. — С.48—52.
12. Повстяной О.Ю., Заболотний О.В., Чміль І.І. Комп'ютерні методи дослідження в металографічному аналізі за допомогою прикладних програм / О.Ю. Повстяной, О.В. Заболотний, І.І. Чміль // Наукові нотатки. – Луцьк: ЛДТУ, 2004. – Випуск 15. – С.244-251
13. ГОСТ 1778-70 Сталь. Металлографические методы определения неметаллических включений.
14. ГОСТ Р ИСО 4967-2009 Сталь. Определение содержания неметаллических включений. Металлографический метод с использованием эталонных шкал.
15. ГОСТ 3443-87 Отливки из чугуна с различной формой графита. Методы определения структуры.

Рукопис подано до редакції 19.03.17