

## 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 проводилися 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 невідмінними один від одного. Після завершення аналізу, програма автоматично обчислює відсоток графітної фракції, яка зберігається в проміжний звіт.

**Практична значимість** полягає в тому, що розроблена програма в комбінації з можливостями сучасної цифрової техніки для мікроструктурного аналізу дозволяє визначити 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 висувуються при мікроструктурному аналізі.

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

doi: 10.31721/2306-5435-2017-1-102-31-35

**Проблема і її зв'язок з практичними задачами.** У лабораторії металографії, завдання аналізу ступеня сфероїзації графіту в чавуні, його розміру, форми і розподілу, а також відношення Ферит-Перліт, має край 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 сфероїзації 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), у 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 візу-

альну 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 невідтворених 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. 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 40мм;

Рис. 1. Цифровий компактний мікроскоп для проведення аналізу



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 задалегідь 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). 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 невідмітними один від одного.

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

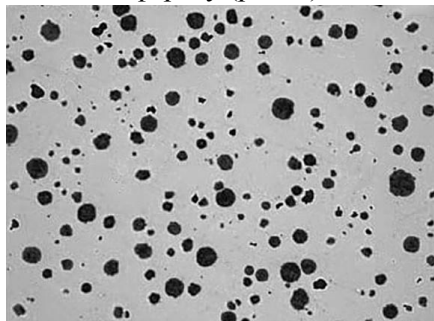


Рис. 2. Результати мікроструктурного аналізу графіт-вих включень

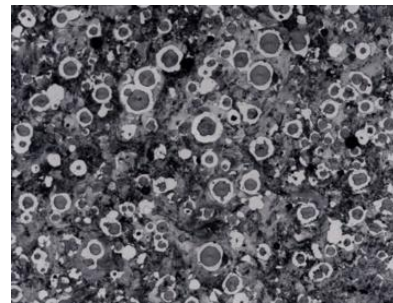


Рис. 3. Протравлений зразок, для визначення співвідношення ферит-перліт

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.

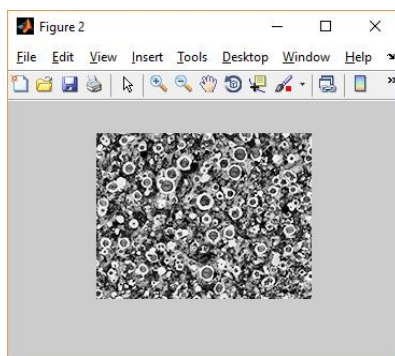


Рис. 4. Аналіз зображень відповідно до обраного стандарту

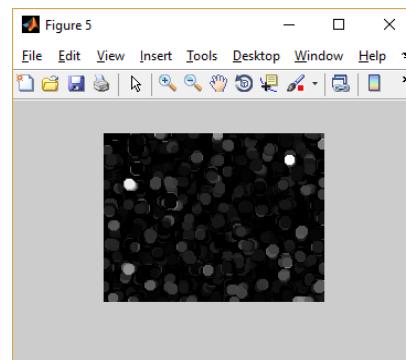
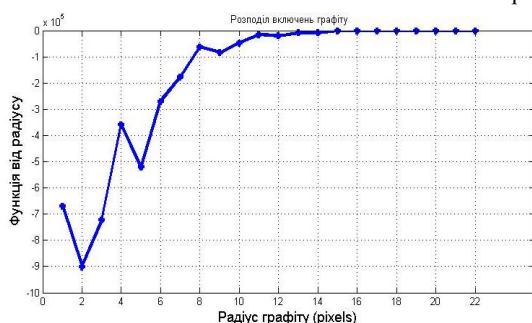


Рис. 5. Результати мікроструктурного аналізу



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.

Таблиця 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/produksiya/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. ГОСТР 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 07.02.17

О.В. ЗАМИЦЬКИЙ, д-р техн. наук, проф., М.Ю. ЛІДЕР, аспірант  
Криворізький національний університет

## ДОСЛІДЖЕННЯ ШЛЯХІВ ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ВИРОБНИЦТВА СТИСНЕНОГО ПОВІТРЯ В ШАХТНИХ КОМПРЕСОРНИХ УСТАНОВКАХ

**Мета.** Метою даної статті є аналіз сучасного стану виробництва стисненого повітря та шляхів підвищення енергетичної ефективності компресорних установок в умовах шахт.

**Методи дослідження.** У роботі використовувалися теоретичні та емпіричні методи дослідження. Проведено аналіз сучасного стану парку компресорних установок, досліджено можливі схеми охолодження стисненого повітря між ступенями компресора та вибрано найбільш ефективну систему.

**Наукова новизна.** Вдосконалено схему охолодження стисненого повітря між ступенями компресора за допомогою пари «труба Вентурі-відцентровий сепаратор-краплевлловач»; подальшого розвитку набуло дослідження щодо підвищення енергетичної ефективності виробництва стисненого повітря.

**Практична цінність.** Розроблена схема дозволить підвищити ефективність роботи турбокомпресора за рахунок оптимізації функціонування апаратів контактної системи охолодження стисненого повітря. Застосування даної системи охолодження дозволить зменшити енергетичну залежність та підвищити ефективність виробництва на підприємствах гірничо-металургійного комплексу.

**Результати роботи.** Способи охолодження, які застосовуються в даний час, не завжди забезпечують зниження температури повітря до необхідного рівня, в той же час вибір більш ефективного способу охолодження є суттєвим резервом для вдосконалення функціонування гірничого устаткування.

Аналіз показав, що більш ефективним є застосування саме контактної системи охолодження стисненого повітря. Контактна система охолодження стисненого повітря для роботи гірничого устаткування дозволяє значно підвищити ефективність його функціонування. Разом з тим, аналіз цієї системи охолодження вказує на необхідність оптимізації її параметрів з метою мінімізації втрат.

Найбільш прийнятним варіантом для застосування в якості апаратів контактної системи охолодження шахтних турбокомпресорів є система, що складається з змішувального пристрою типу труба Вентурі і відцентрового сепаратора-краплевлловача. Запропонована принципова схема охолодження стисненого повітря між ступенями компресора за допомогою пари «труба Вентурі - відцентровий сепаратор-краплевлловач», з якої видно, що дана пара «труба Вентурі - відцентровий сепаратор-краплевлловач» є головним конструктивним елементом як контактних повітроохолоджувачів, так і охолоджувача циркуляційної води. Такий контактний апарат поєднує досить високу ефективність тепломасообміну з відносно невеликим гідравлічним опором.

Тому, вдосконалення системи забезпечення шахт стисненим повітрям є одним з основних напрямків енергозбереження у гірничій галузі.

**Ключові слова:** турбокомпресори, енергетична ефективність, стиснуте повітря, пневмопостачання, енергозбереження, енергоносії.

doi: 10.31721/2306-5435-2017-1-102-35-40

**Постановка проблеми і стан її вирішення.** Компресорні станції та установки є невід'ємною частиною промислових підприємств гірничої галузі. Повітряні компресори становлять понад 80 % від загального парку компресорів. Таке велике поширення повітряних компресорів пояснюється необхідністю використання стисненого повітря як найбільш зручного і порівняно недорогого енергоносія. Основними перевагами стисненого повітря перед іншими енергоносіями (природний газ, електроенергія, водяна пара) є простота й дешевизна його вироблення і транспортування до місця споживання. Системи виробництва та розподілу стисненого повітря в промисловості споживають до 10 % електроенергії. На жаль, існує думка, що стиснене повітря коштує дешево, хоча лише 5-10 % спожитої електроенергії витрачається на здійснення корисної механічної роботи. Витрати на вироблення стисненого повітря становлять 5-15 % від собівартості продукції, а для деяких виробництв досягають 30 % та більше [7]. Тому, вдосконалення системи забезпечення шахт стисненим повітрям є одним з основних напрямків енергозбереження у гірничій галузі.

**Аналіз досліджень та публікацій.** Дослідженням щодо підвищення ефективності компресорних установок присвячені праці видатних науковців В.Ф. Мурзіна, П.П. Фролова, Ю.А. Цейгліна, В.Ф. Ріса, В.І. Самусі, Ю.І. Оксеня та ін.

Стиснене повітря - найпоширеніший енергоносіє. Він використовується практично на будь-якому підприємстві. Широкому застосуванню стисненого повітря, як енергоносія, сприя-