

УДК 620.186.12: 669.131.7

В.Г. Іванов*Запорізький національний технічний університет***ОЦІНКА МОРФОЛОГІЇ ВКЛЮЧЕНЬ ГРАФІТУ У ВИСОКОМІЦНИХ ЧАВУНАХ
ЗА ДОПОМОГОЮ ФРАКТАЛЬНОЇ РОЗМІРНОСТІ**

Оцінювали морфологію графітних вкраплень, що можуть зустрічатися у високоміцних чавунах, за допомогою геометричних параметрів: фрактальної розмірності, аспекту, кулястості.

Підтверджено, що фрактальна розмірність може слугувати кількісним показником вкраплень графіту у чавунах і характеризувати умови його утворення та формування. Підвищені значення (більше одиниці) вказують на спотворення кулястої форми вкраплень графіту внаслідок недостатньої кількості модифікатору, наявності у складі чавуну елементів — демодифікаторів або занадто високої швидкості кристалізації.

Ключові слова: кулястий графіт, формоутворення, морфологія, оцінка, фрактальна розмірність

В.Г. Іванов**ОЦЕНКА МОРФОЛОГИИ ВКЛЮЧЕНИЙ ГРАФИТА В ВЫСОКОПРОЧНОМ ЧУГУНЕ
С ПОМОЩЬЮ ФРАКТАЛЬНОЙ РАЗМЕРНОСТИ**

Оценивали морфологию графитовых включений, которые могут встречаться в высокопрочных чугунах, с помощью геометрических параметров: фрактальной размерности, аспекта, округлости.

Подтверждено, что фрактальная размерность может служить количественным показателем включений графита в чугунах и характеризовать условия его образования и формирования.

Повышенные значения (больше единицы) указывают на искажение шаровидной формы включений графита вследствие недостаточного количества модификатора, наличия в составе чугуна элементов – демодификаторов или слишком высокой скорости кристаллизации.

Ключевые слова: шаровидный графит, формообразование, морфология, оценка, фрактальная размерность

V. Ivanov**EVALUATION OF GRAPHITE CONCLUSIONS MORPHOLOGY IN DUCTILE IRON
USING FRACTAL DIMENSION**

Morphology of graphite conclusions which could be found in ductile iron was evaluated using geometrical parameters: fractal dimension, aspect, roundness.

Fractal dimension can be a quantitative indicator of graphite conclusions in the cast irons and characterize conditions of its forming was confirmed.

Increased values (more than one) point to distortion of globular form of graphite conclusions as a result of insufficient concentration of modifier, presence of de-modifiers or too high solidification rate in cast iron.

Keywords: spheroidal graphite, morphogenesis, morphology, evaluation, fractal dimension

Постановка проблеми. Як відомо у чавунах форма графітових вкраплень у значній мірі визначає увесь комплекс фізико-механічних та експлуатаційних властивостей. Тому точна оцінка морфології графітових вкраплень дозволяє прогнозувати властивості та розробляти раціональні економічно обґрунтовані технологічні процеси виготовлення литих виробів. Оцінка структури чавунів за металевою основою та графітною фазою здійснюється у теперішній вітчизняній та закордонній практиці виготовлення чавунних виливків шляхом співставлення реальних зображень структур з еталонними шкалами відповідних нормативних документів, наприклад ГОСТ 3443, ISO 945 та ін. Такий метод пов'язаний з суттєвою суб'єктивністю та необхідністю достатнього досвіду у дослідника. Крім того для науково-дослідних робіт такий метод малоприматний, бо тут зустрічається велика кількість форм включень, що не описана цими стандартами.

Встановлення морфологічних параметрів вкраплень графіту в залежності від хімічного складу чавуну, видом шихтових матеріалів, типу модифікатору та ін. дозволить створити наукові основи для керування морфологією графітної фази, і відповідно експлуатаційними властивостями чавунів. Особливо це стосується високоміцних чавунів, об'єми виробництва яких у світовій практиці мають стійку тенденцію до збільшення.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У сучасній металографії існує три способи оцінки мікроструктури [1]: кількісно – описова, напівкількісна (балова оцінка у порівнянні зі структурами стандартних шкал) та строго кількісна оцінка за геометричними параметрами мікроскопічної будови. Перші два способи мають суб'єктивний характер і результати оцінки різних спостерігачів часто суттєво відрізняються [1].

Для усунення суб'єктивності порівняльної оцінки реальних структур чавунів з еталонними зображеннями можливо застосовувати багато комп'ютеризованих програм, що мають високу

достовірність (Dup Detector v 3.122, Fast Duplicate Finder 3.7.0.1, Dupe Guru PE, AntiTwin, SyCMPi) [2].

Для забезпечення високої об'єктивності структури чавунів краще використовувати кількісну оцінку за геометричними параметрами складових мікроструктури. Для оцінки форми включень графіту у високоміцних чавунах можна користуватися безрозмірними співвідношеннями між основними геометричними параметрами, що характеризують розміри вкраплень графіту.

Салтиков С. А. [1] пропонує використовувати коефіцієнт форми або фактор форми. Для плоских фігур зручно користуватися двомірним фактором форми, що визначається співвідношенням їх площі до периметру. Для круга його значення складає одиницю, для правильного шестикутника – 0,953, для квадрату – 0,886, для трикутника – 0,777. Значення двомірного фактора форми можна визначити за формулою [1]

$$\Phi = 2 \frac{\sqrt{\pi F}}{P} = 3,545 \frac{\sqrt{F}}{P}, \quad (1)$$

де F – площа вкраплення;

P – периметр вкраплення.

Соценко О. В. [3] додатково радить використовувати показник компактності вкраплення

$$\Phi_K = \frac{F}{F_0} \quad (2)$$

де F_0 – площа круга, що описує включення.

Для полегшення застосування цих характеристик на практиці були розроблені еталонні шкали для різноманітних модифікацій форм графітових вкраплень.

Для визначення кількості кулястих вкраплень графіту у об'ємі чавуну використовують також декілька методів [1]: зворотних діаметрів, проєкційних зображень та ін.

Визначення розподілу вкраплень графіту за розмірними групами також потребує вводити декілька показників, що визначаються методом хорд, укрупнених показників та ін. [1].

Для одночасного визначення кількості та форми графіту Юзвак В. М запропонував використовувати індекс графіту [4]:

$$J_G = \frac{\sum a_i z}{L} \quad (3)$$

де $\sum a_i$ – сума максимальних розмірів включень графіту, що потрапили у перехрестя окуляру у діленнях окулярної шкали;

z – ціна одного ділення окулярної шкали, мм;

L – довжина підрахунку (довільної січної), мм.

Однак, не зважаючи на простоту та високу достовірність запропонованих методик об'єктивність результату в значній мірі все ж таки залежить від об'єму масиву даних, кваліфікації спостерігачів, копінкості та акуратності виконання розрахунків.

Для збільшення інформації про морфологію графітної фази можна також використовувати великий масив математичних характеристик: площу вкраплень, їх периметр, кулястість, овальність, еліпсоїдність та ін. Підрахунок цих характеристик може виконуватися за допомогою спеціальних комп'ютеризованих аналізаторів, спеціально адаптованих під чавуни програм (наприклад, РОСА [5], Видео-тест. Структура та ін), або навіть відкритих некомерційних комп'ютерних аналізаторів зображень, наприклад Image J. В останньому випадку підрахунок різних морфологічних характеристик не викликає високих вимог до оператора, тривалого терміну навчання і зрозуміло для звичайного середнього користувача комп'ютера.

Розвиток можливостей сучасного лабораторного обладнання надає нові дані про генезис утворення та формування графітової фази у чавунах. Наприклад, метод томографії дозволить досліджувати безпосереднього морфологію графіту у об'ємі чавуну [6].

Особливо цікавим є застосування для описання графітових включень фрактальної розмірності [7]. Такий метод в останні роки здобув широко вжитку майже в усіх галузях техніки, і природно і у металографічних дослідженнях.

У роботах вітчизняних [8, 9] та закордонних [10, 11] дослідників цей метод пропонується використовуватися для оцінки морфологічних характеристик графіту у чавунах.

Однак цей метод ще не набув широкого вжитку на практиці. Даних, що характеризують морфологію графітних вкраплень у чавунах отриманих за різноманітними технологічними процесами з позицій фрактальної геометрії, ще накопичено не достатньо і вони носять поки ще фрагментарний характер. Тому дослідження у цій галузі є перспективними, оцінка морфології графітних вкраплень з позицій фрактальної геометрії суттєво розширить знання про генезис утворення та зростання вкраплень графіту будь-якої форми.

Постановка завдань. В роботі поставлено мету — встановити можливість оцінки морфологічних показників графітових вкраплень за допомогою фрактальної розмірності та інших геометричних характеристик та їх залежність від хімічного складу, технології виробництва та умов кристалізації високоміцних чавунів.

Матеріали і методи. Досліджувалися високоміцні чавуни, що були отримані в лабораторних умовах з використанням звичайних шихтових матеріалів, а також синтетичні сплави, що були отримані за допомогою особливо чистих шихтових матеріалів.

Високоміцний чавун заевтектичного складу в лабораторних умовах виплавляли в індукційній печі, місткістю 30 кг. Хімічний склад чавуну був наступним (мас. доля,%): 3,72 С; 3,87 Si; 0,3 Mn; 0,038 P; 0,081 S. У якості шихти використовували переробний чавун марки ПЛ-2, чавунний та сталевий брухт. Для отримання кулястого графіту на дно нагрітого ковша давали нікель-магнієву лігатуру (15 % Mg, 0,6 % Се), що попередньо виготовляли з електролітичного нікелю (Н-1, ГОСТ 849-97), первинного магнію (Mg 95, ГОСТ 804-93) та фероцерію (МЦ50Ж3 (Ж6) ТУ 48-4-280-91) під барієвим флюсом (ТУ 1714-462-05785388-2010).

Також використовували заевтектичні чавуни промислових плавок марок ВЧ500 – 2 (ДСТУ 3925-99), що застосовують для маслотної заготовки поршневого кілець. Шихтові матеріали, що використовувалися для отримання чавуну аналогічні вищенаведеним.

На відцентровому верстаті отримували циліндричні маслотної заготовки із зовнішнім діаметром 65 мм та довжиною 175 мм.

З циліндричних заготовок вирізали зразки для металографічного та мікрорентгеноспектрального аналізу. Шліфи готували за загальноприйнятою методикою. Металографічний аналіз проводили з використанням мікроскопів МИМ-7 і «Zeiss. Erityp-2».

Для отримання синтетичного чавуну у лабораторних умовах в якості шихтових матеріалів використовували спеціально підготовлені металеві брикети у вигляді циліндрів, діаметром 30 мм та висотою 20 мм. Такі таблетки отримували на пресі ПГ-100 з 95 % порошку заліза (ПЖР 3.200.28, ГОСТ 9849-86) та 5 % малозольного графіту без зв'язуючого. Плавку проводили у відкритій індукційній печі місткістю 10 кг зі спеціально виготовленим графітовим сердечником в алундовому тиглі, діаметром 35 мм та висотою 100 мм. Для доведення складу чавуну за кремнієм використовували кристалічний кремній (Кр1, ГОСТ 2169-69). Для отримання кулястого графіту використовували ту ж саму нікель-магнієву лігатуру (15 % Mg, 0,6 % Се), Отриманий метал мав такий остаточний хімічний склад (мас. частка, %): 4,59 С; 2,48 Si; 0,042 Mn; 0,042 Cr; 0,92 Ni; 0,472 Cu; 0,012 P; 0,005 S; 0,04 % Mgзал. Проби для металографічного аналізу відбирали за допомогою кварцових трубок діаметром 5 мм.

Також дослідженню піддавали промисловий синтетичний високоміцний чавун, що використовують для отримання виливків автомобільного призначення (хімічний склад, мас. частка, %): 3,0 С, 4,09 Si; 0,06 Mn; 0,04 P; 0,02 S; 0,02 Ni; 0,03 Cr). Чавун виплавлений дуплекс-процесом: дугова піч – індукційна піч. Для отримання кулястого графіту застосовувався нікель — магнієва лігатура аналогічна за складом, що наведено вище.

Для оцінки геометричних розмірів кулястих включень користувалися програмою Image Pro. Використовували безрозмірні характеристики: фрактальну розмірність лінії, що огинає графітове вкраплення (Fractal Dimension), аспект (Aspect) та кулястість (Roundness).

Викладення основного матеріалу. У таблиці 1 наведені значення вищенаведених морфологічних показників графітових вкраплень, що взагалі можуть зустрічатися у високоміцних чавунах, а у таблиці 2 дослідних чавунів.

Графітові вкраплення у дослідних чавунах представлена на рис. 2.

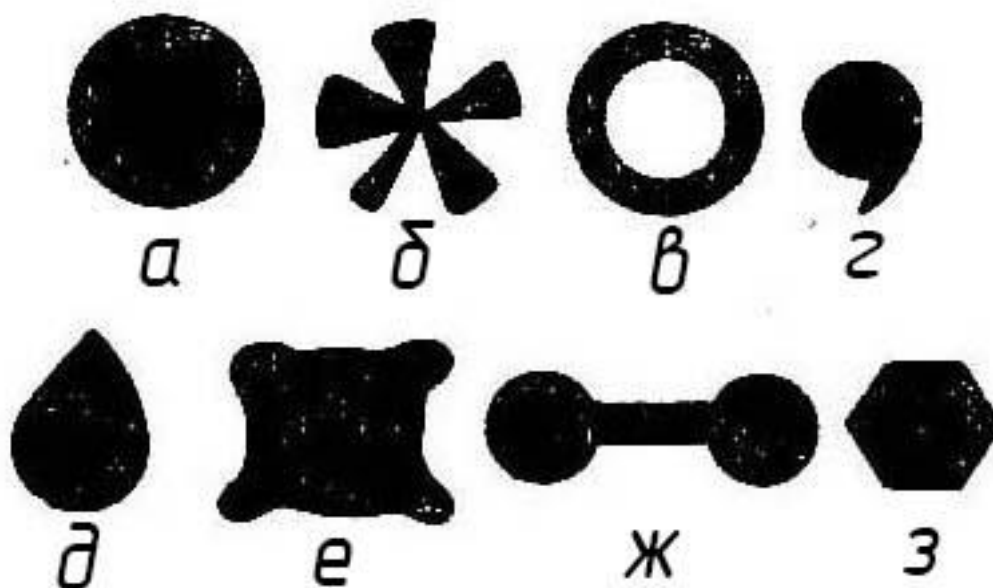


Рис. 1. Деякі можливі форми включення графіту у високоміцних чавунах (з використанням даних А. А. Горшкова [12]):

а – звичайна куляста; б – розірвана; в – пустотіла; г – у вигляді коми; д – каплеподібна; е – шишкоподібна; ж – у вигляді клепки (гантелі); з – багатогранна

Таблиця 1.

Морфологічні показники вкраплень графіту (рис. 1)

Форма вкраплень графіту згідно рис. 1	Морфологічні показники		
	Аспект	Кулястість	Фрактальна розмірність
а	1,02	2,43	1,06
б	1,11	6,82	1,30
в	1,02	8,26	1,06
г	1,20	1,62	1,07
д	1,32	1,43	1,05
е	1,16	2,41	1,11
ж	3,87	3,03	1,08
з	1,06	1,72	1,06

Таблиця 2.

Морфологічні показники вкраплень графіту у дослідних чавунах (рис. 2)

Найменування чавуну, згідно рис. 2	Морфологічні показники		
	Аспект	Кулястість	Фрактальна розмірність
а	1,06	3,48	1,12
б	1,02	1,88	1,04
в	1,05	3,74	1,09
г	1,04	2,21	1,01

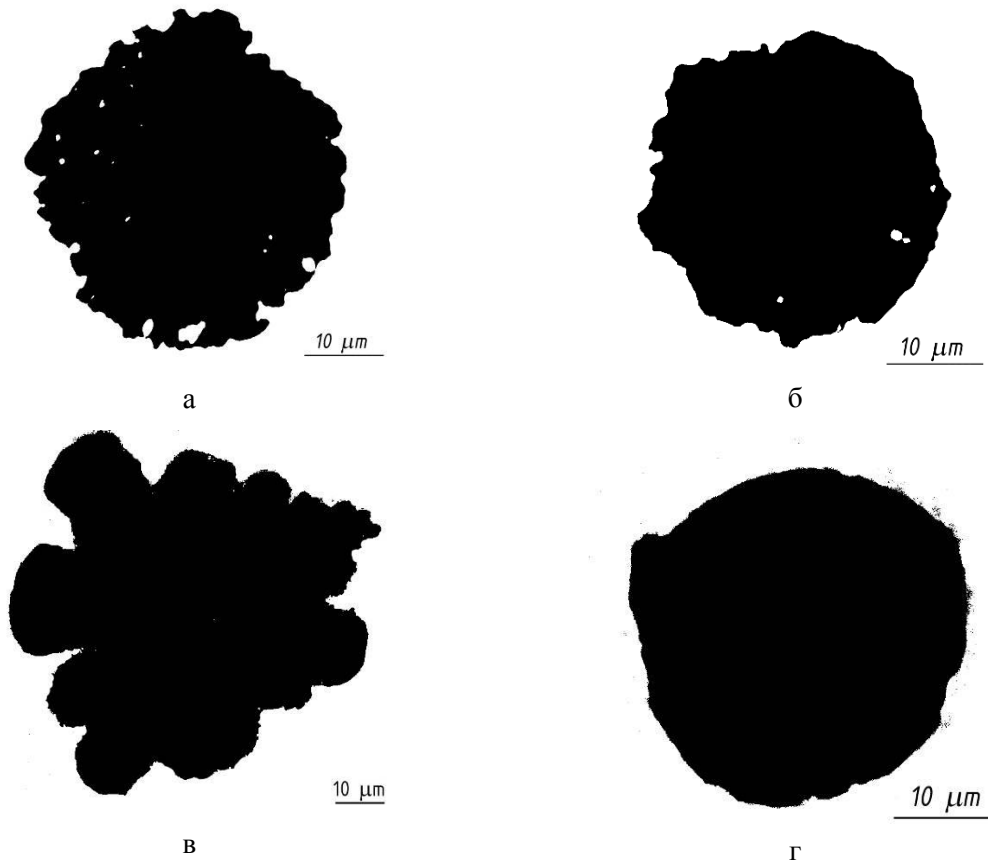


Рис. 2. Графітні вкраплення у дослідних чавунах (бінарні зображення):

- а — у лабораторному високоміцному чавуні, отриманому на чушкових чавунах у піщаних формах;
- б — у промисловому чавуні марки ВЧ 500-2, отриманому на чушкових чавунах і відцентровим методом;
- в — у лабораторному синтетичному високоміцному чавуні, отриманому на шихтових матеріалах підвищеної чистоти;
- г — промисловий синтетичний чавун для виливка “Супорт”, отриманий на сталевих відходах у піщаній формі

Як відомо чавуни є структурно – чуттєвими матеріалами. Форма графіту у чавунах суттєво залежить від умов кристалізації, ливарної форми, шихтових матеріалів, модифікаторів тощо.

Так найбільш високі значення геометричних параметрів вкраплень графіту спостерігалися у заевтектичного лабораторного чавуна отриманого у піщаних формах (рис. 1 а). Високі показники пояснюються спотворенням кулястих вкраплень внаслідок високого вмісту сірки – активного деглобуляризатора. Також високі значення морфологічних показників були у синтетичного лабораторного чавуну, що був виплавлений на шихтових матеріалах підвищеної чистоти і кристалізувався з високою швидкістю. Вкраплення графіту мають спотворену дедритоподібну форму, іноді вони уявляють собою зростки декількох куль (рис. 2 в).

Зразки промислового чавуну марки ВЧ500 — 2, що кристалізувався у металевій відцентровій формі має найменші за розмірами вкраплення кулястого графіту, що рівномірно розподілений у металевій матриці. У нього спостерігаються майже правильні кулясті вкраплення (рис 2 б). Найменшу фрактальну розмірність та невеликі інші геометричні показники мали вкраплення графіту у промисловому синтетичному чавуні (рис. 2г). Такий чавун має низький вміст домішок, що негативно впливають на формування кулястої форми вкраплень графіту — сірки, а також не містить титану, алюмінію, сурьми та ін. Також повільна кристалізація чавуну у піщаній формі сприяє формуванню правильної кулястої форми графіту.

Висновки. Підтверджено, що фрактальна розмірність може слугувати кількісним показником вкраплень графіту у чавунах і характеризувати умови утворення та формування графіту. Підвищенні значення (більше одиниці) вказують на спотворення кулястої форми вкраплень графіту і тим більше чим більше це значення. Це може вказувати на недостатню

кількість модифікатора або наявність у складі чавуну елементів — демодифікаторів. Дендритоподібні вкраплення графіту з високими показниками фрактальної розмірності можуть вказувати на занадто високу швидкість кристалізації.

Підтверджено, що утворення графіту у чавунах підпорядковується теорії фракталів і є одним із її прикладів.

Встановлено, що метод визначення фрактальної розмірності кулястих вкраплень графіту може слугувати кількісною характеристикою їх морфології. К перевагам цього методу можна віднести його простоту та оперативність. Отриманні характеристики дають можливість оцінити морфологію графіту, вдосконалити технологічний процес отримання високоміцних чавунів та прогнозувати експлуатаційну надійність литих виробів.

Список використаних джерел:

1. Салтыков, А. И. Стереометрическая металлография [Текст] / А. И. Салтыков. 3-е изд., – М.: Металлургия, 1970. – 376 с.
2. Соценко, О. В. Опыт применения методов компьютерной оценки формы графита в чугунах / О. В. Соценко, С. Ю. Афонин // Литье. Металлургия. 2014: Материалы X научно-практической конференции (27 — 29 мая 2014 г., г. Запорожье) / ЗТПП. - Запорожье: Изд-во ЗТПП, 2014. - С. 227 – 228.
3. Соценко, О. В. Оценка компактности включений графита в высокопрочном чугуне / О. В. Соценко // Литейное производство. – 1982. - №6. – С. 5 – 8.
4. Юзвак, В. М. Влияние включений графита на механические свойства чугуна / В. М. Юзвак, И. П. Волчок // Литейное производство. – 1981 - №2. – С. 7 – 8.
5. internetbasierte Klassifikation der Graphitmorphologie mit Hilfe des Stützvektorverfahrens [Электронный ресурс] / F. Mücklich, C. Richter, A. Velichko, G. Weikum. - 12. internationale Metallographie-Tagung. – режим доступа : [www/ URL: http://www.materialography.net/fileadmin/user_upload/materialography/Graphitklassifizierung/POCA.pdf](http://www.materialography.net/fileadmin/user_upload/materialography/Graphitklassifizierung/POCA.pdf). - 01.03.2016 г. Загл. с экрана.
6. Velichko, A. Quantitative 3D-Gefügeanalyse — Stereologie oder Tomographie. / A. Velichko, F. Mücklich // Practical Metallography. – 2008. – Vol. 45, №9, P. 423-439.
7. Соценко О. В. Компьютерная оценка формы графита в высокопрочном, ковком и сером чугунах / О. В. Соценко // Металл и литье Украины. - 2013. - № 5. - С. 21-26.
8. Мандельброт, Б. Фрактальная геометрия природы [Текст] / Б. Мандельброт. – М.: Институт компьютерных исследований, 2002. – 656 с.
9. Соценко, О. В. Фрактальна структура кулястого графіту у високоміцному чавуні / О. В. Соценко // Металознавство та обробка металів. – 2009. - №3. – С. 18 – 24.
10. Макаренко, К.В. Фрактальный анализ структурообразования чугунов [Текст] + [Электронный ресурс]: монография / К.В. Макаренко. – Брянск: БГТУ, 2013. – 92 с.
11. Ruxanda, R., Stefanescu, D.M., Graphite Shape Characterization in Cast iron – From Visual Estimation to Fractal Dimension. // int. J. Cast Metals Res. 14, 4 (2002), S. 207-216.
12. Справочник по изготовлению отливок из высокопрочного чугуна [Текст] / А. А. Горшков, М. В. Волощенко, В. В. Дубров, О. Ю. Крамаренко; под общ. ред. А. А. Горшкова. – Москва – Киев: Машгиз, 1961. – 300 с.

Стаття надійшла до редакції 31.03.2016.