

УДК 669.111.22

В.Г. Іванов, докторант, к.т.н., доцент

САМОПОДІБНІСТЬ ВКЛЮЧЕНЬ ГРАФІТУ В ЧАВУНАХ*Запорізький національний технічний університет*

Виконано порівняльний морфологічний аналіз включень графіту у високоміцних чавунах та графітових комплексів, що виділяються з рідкого металу під час кристалізації та часто відкладаються у порах та раковинах.

Встановлено, що кристали та включення графіту за різним масштабним фактором мають самоподібність і майже ідентичну морфологію. Виділені з рідкого металу графітні комплекси та компактні включення графіту у високоміцному чавуні мають таку ж форму як і елементарна форма гексагональної решітки графіту. Тому утворення кулястих включень у чавунах відбувається відповідно власній гексагональній природі графіту.

Ключові слова: включення графіту, морфологія, самоподібність, гексагональна решітка, фрактальна теорія

Выполнен сравнительный морфологический анализ включений графита в высокопрочных чугунах и графитовых комплексов, которые выделяются из жидкого металла при кристаллизации и часто откладываются в порах и раковинах.

Установлено, что кристаллы и включения графита при различном масштабном факторе имеют самоподобие и почти идентичную морфологию. Выделенные из жидкого металла графитовые комплексы и компактные включения графита в высокопрочном чугуне имеют такую же форму, как и элементарная форма гексагональной решетки графита. Поэтому образование шаровидных включений в чугунах происходит в соответствии с собственной гексагональной природой графита.

Ключевые слова: включение графита, морфология, самоподобие, гексагональная решетка, фрактальная теория

Comparative morphological analysis of graphite inclusions in ductile iron and graphite complexes, which were separated from liquid metal during crystallization and often precipitated in pores and cavities, was realized.

It was determined that crystals and graphite inclusions at various scale factor have self-similarity and almost identical morphology. Graphite complexes separated from liquid metal and compact graphite inclusions in ductile cast iron have the same form as elementary form of graphite hexagonal lattice. Therefore formation of globular inclusions in cast irons occurs in accordance with own hexagonal nature of graphite.

Keywords: graphite inclusions, morphology, self-similarity, hexagonal lattice, fractal theory

Вступ. Фактори формоутворення графіту в чавунах давно є предметом дискусій та суперечок металознавців. У чавунах графіт, що має власну гексагональну решітку, може створювати найрізноманітніші форми включень: пластинчасті, кулясті, пластівчасті, вермикулярні та ін. Утворення тієї чи іншої форми пов'язують з багатьма явищами: поверхневого натягу або опору середовища, наявністю домішок, природою, формою або будовою зародків графіту, співвідношенням росту різних граней графіту тощо.

Постановка проблеми. Дослідження морфології графітових утворень дасть можливість визначити умови формування та закономірності, за якими відбувається набуття тієї чи іншої форми графітових включень.

Мета та завдання. Виконані дослідження ставили за мету визначити морфологію графітових утворень, що було одержано в різних умовах: кулясті включення графіту у чавунах, які

оброблено магнієм, включення графіту, що витісняються під час кристалізації та відкладаються у порах і раковинах, графітова піна, яка виділяється з первинного доменного чавуну (спель).

Для досягнення поставленої мети вирішували наступні завдання:

– за допомогою металографічного та петрографічного методів дослідити графітові включення у чавунах;

– встановити подібність будови графітових вкраплень, що утворюються у чавунах у різні технологічні періоди виробництва.

Огляд літератури. Вивченню онтогенії графіту, морфології його включень присвячено багато робіт [1-8]. Але до сьогодні не створено єдиної теорії, що пояснює різноманітність утворень графіту в чавунах. Як справедливо відмічено у роботі [1], утворюється та компромісна форма графіту, за якої забезпечується найбільш швидке у конкретних умовах завершення фазового переходу «рідина \Rightarrow тверде тіло» за най-

менш можливої втрати ступеня кристалографічної досконалості.

За численними експериментальними даними вітчизняних і зарубіжних дослідників показано, що в чистих залізобуглецевих сплавах, виплавлених у вакуумі, створюється кулястий графіт без використання спеціальних додавань, які надають включенням графіту кулястої форми [4,7]. Це може свідчити про те, що створення кулястої форми графіту, незалежно від складу сплаву та способу його виплавлення, притаманне власне природі графіту [4]. Базисні площини зростають перпендикулярно радіусу включення, утворюючи багатогранник, що ідентифікується у площині шліфа як кулясте включення. Домішки пригнічують зростання кулястого графіту. Таким чином, роль елементів, що сприяють сфероїдизації графіту у промислових чавунах з високим вмістом домішок часто пов'язують з рафінуванням розплаву, видаленням сірки, кисню та інших шкідливих елементів [1-8].

В останніх роботах [9-10] утворення кулястих графітових включень у чавунах пов'язують навіть з наявністю сферичних фулеренів вуглецю.

Особливо цікавою та новою є гіпотеза О.В. Соценко про агрегативний механізм формування графіту за фрактальною природою. Так, у роботах [11-13] з'явилися нові дані про фрактальну природу графітових включень у чавунах. Однією з головних ознак такої будови є самоподібність [14]. Тому дослідження морфології графітових утворень, що виникли та зростали у різних умовах надасть можливість отримати нові знання про формоутворення графітових включень у чавунах, виявити механізм їх виникнення та зростання.

У цій роботі зроблено порівняльну морфологічну оцінку графітових утворень, які можна спостерігати у чавунах.

Матеріал та методика досліджень. Високоміцний чавун заевтектичного складу виплавлляли в індукційній печі, місткістю 30 кг. Хімічний склад чавуну був наступним (мас. %): 3,87 Si; 3,72 C; 0,30 Mn; 0,081 S; 0,038 P. Для одержання кулястого графіту метал у ковші обробляли нікель-магнієвою лігатурою (15 % Mg, 0,6 % Ce) та феросиліцієм ФС 65 кількістю 1,0 % кожного.

У графітових виливницях відливали заготовки діаметром 60 мм. Із заготовок вирізали шліфи для металографічного та петрографічного

аналізу, який виконували з використанням мікроскопів МІМ-7 і «ZEISS. EpiTyp-2».

Екстрагували включення графіту з поверхні шліфа та з усадкової раковини злитка високоміцного чавуну під бінокулярним мікроскопом МБС-2 за допомогою препараторської голки.

Досліджували також графітові включення у високоміцному чавуні марки ВЧ500-2 (ДСТУ 3925-99), якого застосовують для маслотних заготовок поршневих кілець.

Також відбирали спель з первинного доменного чавуну виробництва ВАТ «Металургійний комбінат «Запоріжсталь».

Використовуючи імерсійні рідини, здійснювали петрографічні дослідження на кристалооптичному мікроскопі МІН-8. У прохідному світлі визначали форму, розміри та інші властивості графітових включень.

Результати досліджень та їх обговорення. Виявлені графітові включення та утворення наведено на рис. 1.

Виконані дослідження показали, що форма включень графіту в чавунах після обробки модифікаторами, а також форма графітових комплексів, що виділяються на поверхні усадкових раковин, а також з рідкого доменного чавуну є дуже схожими. Елементарна гексагональна решітка відтворюється також у включеннях графіту у модифікованому магнієм чавуні.

У перерізі шліфа часто спостерігають шість секторів, що утворюють кулясте включення графіту (рис. 1,а). Мікроструктура таких включень є гетерогенною та складається з великої кількості пакетів-агрегатів кристалів графіту різної форми, розмірів, з різними оптичними і фізико-хімічними властивостями, які добре виявляються та визначаються у прохідному світлі в імерсійних препаратах. Так, екстраговані з поверхні шліфа частинки графіту є дуже різноманітними за формою й оптичними властивостями. Деякі з них (тонкі пластинчасті кристали графіту шестигранної форми) світло-сірого кольору, прозорі, оптично анізотропні з високим показником світлозаломлення 1,98...2,03. Інші пакети-агрегати кристалів графіту сірого кольору, ізотропні, непрозорі з матовою поверхнею (рис. 1,б). Поряд з відміченими формами присутні інші комбінації шестигранних агрегатів, а також частинки без кристалографічних границь або плівкові чорного кольору з металоподібним блиском.

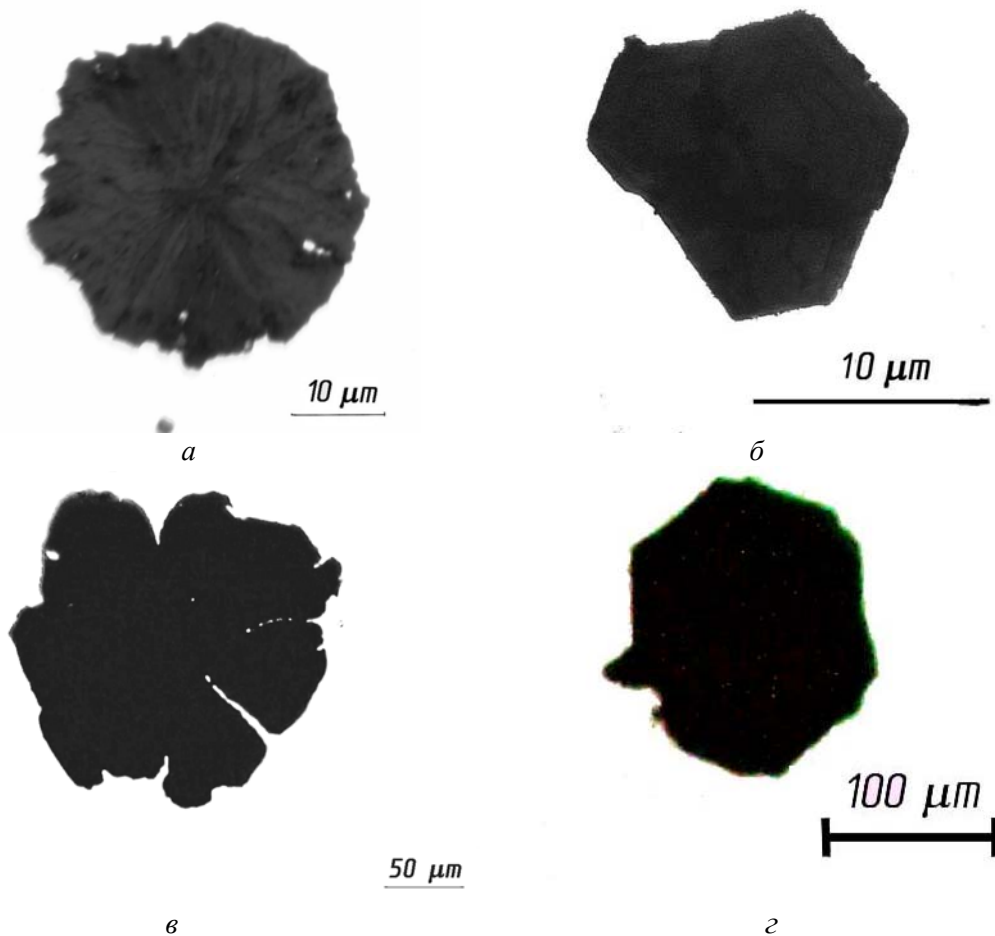


Рисунок 1 – Форма включень графіту в чавунах:

а – включення на шліфі з високоміцного чавуну для маслотних заготовок (світло - відбивне); б – включення екстраговане з поверхні шліфа, комбінація шестигранних агрегатів графіту (світло - прохідне); в – включення екстраговане з усадкової раковини злитка високоміцного чавуну (світло - прохідне); г – включення спелі доменного чавуну (світло - прохідне)

Витіснення атомів графіту з рідкого чавуну та відкладання їх у порах та раковинах утворює кристали графіту майже такої ж шестигранної форми, яка спостерігалася у металевій матриці чавуну. За морфологічними ознаками ці включення є ідентичними (рис. 1,в). Дослідження кристалів графіту (спелі) також виявляє переважно шестигранну форму (рис. 1,г).

Висновки.

Таким чином, обробка рідкого чавуну модифікаторами, що сприяють утворенню кулястої форми графіту призводить до змінювання умов росту кристалів графіту, сприяє зростанню гра-

фіту у вигляді компактних включень. Виділені з рідкого металу включення графіту мають таку ж форму як і елементарна форма гексагональної решітки графіту. Тому можна припустити, що утворення кулястих включень відбувається відповідно власній гексагональній природі графіту. Кристали та включення графіту за різним масштабним фактором мають самоподібність. Утворення кулястої форми графіту під час обробки чавуну модифікаторами відбувається внаслідок компенсації впливу опору середовища на природне утворення шестигранної форми включень.

Бібліографічний список

1. **Захарченко, Э. В.** Отливки из чугуна с шаровидным и вермикулярным графитом [Текст] / Э. В. Захарченко, Ю. Н. Левченко, В. Г. Горенко, П. А. Вареник. – Киев : Наукова думка, 1986. – 248 с. – Библиогр.: с. 234-246. – 1500 экз.
2. **Любченко, А. П.** Высокопрочные чугуны [Текст] / А. П. Любченко. – М. : Металлургия, 1982. – 120 с. – Библиогр.: с. 117-120 – 2700 экз.

3. **Бунин, К. П.** Основы металлографии чугуна [Текст] / К. П. Бунин, Я. Н. Малиночка, Ю. Н. Таран. – М. : Metallurgia, 1969. – 414 с. – Библиогр.: с. 403-415. – 4000 экз.
4. **Бунин, К. П.** Строение чугуна [Текст] / К. П. Бунин, Ю. Н. Таран. – М. : Metallurgia, 1972. – 170 с. – Библиогр.: с. 403-415. – 3900 экз.
5. **Богачев, И. Н.** Металлография чугуна [Текст] / И. М. Богачев. – Свердловськ : Metallurgia, 1962. – 392 с. – Библиогр.: с. 389-390. – 6215 экз.
6. **Stefanescu, D. M.** Theory of solidification and graphite growth in ductile iron / D. M. Stefanescu // Ductile iron handbook. American Foundrymen's Soc. Inc., 1992, – P. 1-19. – Ref. 58.
7. **Skaland, T.** Nucleation Mechanisms in Ductile Iron [Text] / T. Skaland // Processing of the AFS cast iron inoculation conference. – 2005. Schaumburg, Illinois, September 20-30. – P. 13-30. (<http://www.elkemfoundry.com.cn/pdf/48f1b39297.pdf>). Ref. 78
8. **Найдек, В. Л.** Шаровидный графит в чугунах [Текст] / В. Л. Найдек, И. Гю Неижко, В. П. Гаврилюк // Процессы литья. – 2012. – № 5. – С. 33-42. – Библиогр.: с. 42.
9. **Закирничная, М. М.** Образование фуллеренов в углеродистых сталях и чугунах при кристаллизации и термических воздействиях [Текст] : автореф. дис. ... д-ра техн. наук : 05.02.01 / М. М. Закирничная ; [Уфимский государственный нефтяной технический университет]. – Уфа, 2001. – 46 с.
10. **Дубровский, С. А.** Роль фуллеренов в процессе образования шаровидного графита в чугуне [Текст] / С. А. Дубровский, А. Н. Роговский, Ю. Н. Петрикин // Известия вузов. Черная металлургия. – 2005. – № 9. – С. 28-31. – Библиогр.: с. 31.
11. **Соценко, О. В.** Фрактальна структура кулястого графіту у високоміцному чавуні [Текст] / О. В. Соценко // Металознавство та обробка металів. – 2009. – № 3. – С. 18-24. – Библиогр.: с. 24.
12. **Соценко, О. В.** Особенности агрегативного механизма формирования структуры шаровидного и вермикулярного графита в модифицированных чугуна [Текст] / О. В. Соценко // Металл и литье Украины. – 2012. – №12 (235). – С. 3-10. – Библиогр.: с. 10.
13. **Макаренко, К. В.** Фрактальный анализ структурообразования чугунов [Текст] + [Электронный ресурс]: монография. – Брянськ : БГТУ, 2013. – 92 с. – Библиогр.: с. 76-90. – ISBN 978-5-89838-701-3.
14. **Мандельброт, Б.** Фрактальная геометрия природы [Текст] / Б. Мандельброт. – М. : Институт компьютерных исследований, 2002. – 656 с. – Библиогр.: с. 605-640. – 2000 экз.

Стаття надійшла до редакції 04.04.2016 р.
Рецензент, проф. В.А. Шаломеев

Текст даної статті знаходиться на сайті ЗДІА в розділі Наука
<http://www.zgia.zp.ua>