

II ТЕХНОЛОГІЇ ОТРИМАННЯ ТА ОБРОБКИ КОНСТРУКЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ

УДК 620.186: 669.131.7

Канд. техн. наук В. Г. Іванов, канд. техн. наук В. С. Голтвяница
Запорізький національний технічний університет, м. Запоріжжя

МОРФОЛОГІЯ ГРАФІТУ У ЗАЕВТЕКТИЧНОМУ СИНТЕТИЧНОМУ ЧАВУНІ

Представлено дані про утворення кулястого графіту в заевтектичних синтетичних чавунах, що виплавлені на шихтових матеріалах підвищеної чистоти. Підтверджено, що вкраплення графіту в заевтектичному синтетичному високоміцному чавуні зростають за дендритним механізмом при високій швидкості кристалізації. Морфологічні показники (фрактальна розмірність, аспект, кулястість) графітових вкраплень, що утворилися в синтетичному високоміцному чавуні, мають більш високі значення внаслідок більш розвинутої поверхні та високої швидкості кристалізації.

Ключові слова: синтетичний чавун, кулястий графіт, морфологія, фрактальна розмірність, дендрит.

Вступ

Виготовлення високоякісних чавунних виливків у сучасному ливарному виробництві нерозривно пов'язано з використанням електричних печей (дугових та індукційних), для яких характерна більша технологічна гнучкість. Серед багатьох переваг плавки у цих агрегатах особливу увагу привертає можливість використання як шихти малоцінних відходів машинобудівної галузі (сталеві обрізи, висічки, стружки та ін.) з метою отримання «синтетичних» чавунів. Унаслідок меншої кількості сірки, фосфору, водню, азоту, кисню, а також інших домішок та неметалевих вкраплень синтетичні чавуни відрізняються підвищеними механічними та службовими властивостями, що дає змогу використовувати їх замість легованих конструкційних чавунів та навіть сталей. У багатьох випадках сталі замінюють високоміцним чавуном з кулястим графітом, який отримують шляхом модифікування магнієм, церієм, барієм та ін. елементами.

Але синтетичним чавунам також притаманна нестабільність структури та властивостей внаслідок схильності до метастабільного твердіння. Недостатня вивченість механізмів формування структури синтетичного чавуну та відсутність загальноприйнятої гіпотези утворення кулястої форми графіту при модифікуванні магнієм дещо стримують масштаби використання цього матеріалу для виготовлення високоякісних виливків. Тому дослідження спрямовані на встановлення механізму утворення графіту кулястої форми в синтетичних чавунах буде сприяти вдосконаленню технології виготовлення виливків і є актуальними для сучасного ливарного виробництва.

Постановка задачі

Вивчали утворення кулястого графіту в синтетичному чавуні, що виплавляли на шихтових матеріалах з мінімальною кількістю шкідливих домішок.

Огляд літератури

Синтетичний чавун з успіхом використовується у промисловості вже понад сорок років. Роботи Н. Г. Гиршовича, В. С. Шуміхіна, П. П. Лузана, М. В. Жельніса, Д. П. Іванова, Л. Б. Когана [1–4] сприяли вдосконаленню ливарного виробництва та впровадженню синтетичного чавуну з пластинчатим графітом для виробництва різноманітних виливків відповідального призначення. Синтетичний ковкий чавун широко застосовували також для виливків запірної арматури [5, 6]. У наш час найбільш доцільно використовувати синтетичні сплави для виробництва високоякісних чавунів з кулястим графітом, враховуючи низький вміст у них демодифікувальних домішок [2]. Так, відомо [7], що для виготовлення автомобільних виливків на ВАЗі використовують синтетичний чавун з кулястим графітом, що виплавляють дуплекс-процесом: дугова піч – індукційна піч. Особливості модифікування синтетичних чавунів з метою сфероїдизації графіту представлені в роботах [8, 9]. Однак у цілому слід відзначити, що синтетичний чавун з кулястим графітом до теперішнього часу вивчений недостатньо. Особливо це стосується морфології графітових вкраплень кулястої форми в синтетичних чавунах, бо відзначена вище чистота за домішками та газми суттєво змінює умови зародження та кристалізації графіту. Ці дані досить обмежені та часто носять фрагментарний характер. У цій роботі вивчали відмінності

будови та розподілу графітових вкраплень у синтетичних чавунах, що були отримані з шихтових матеріалів підвищеної чистоти.

Матеріали і методи

В якості шихтових матеріалів для отримання синтетичного чавуну 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'язувального. Плавку проводили у відкритій індукційній печі 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 нікель-магнієву лігатуру (15 % Mg, 0,6 % Се), що попередньо виготовляли з електролітичного нікелю (Н-1, ГОСТ 849-97), первинного магнію (Мг 95, ГОСТ 804-93) та фероцерію (МЦ50Ж3 (Ж6) ТУ 48-4-280-91) під барієвим флюсом (ТУ 1714-462-05785388-2010). 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 % Mg_{зал.}

Металографічний аналіз зразків чавуну проводили з використанням мікроскопів МІМ-7 і «ZEISS. Epityp-2». Також додатково оцінювали фрактальну розмірність та інші геометричні параметри кулястих включень за допомогою програми Image Pro.

Експерименти

Кристалічний кремній та нікель-магнієву лігатуру додавали в рідкий чавун фракційно і після засвоєння добавок відбирали проби металу за допомогою кварцових трубок діаметром 5 мм. Потім з відібраних заготовок виготовляли шліфи для металографічного аналізу. Заевтектичний склад чавуну вибирався навмисно для дослідження виділення графіту у якості ведучої фази.

Результати

Типові мікроструктури синтетичного чавуну наведені на рис. 1. Як і слід було очікувати чистий Fe-C сплав кристалізувався переважно за метастабільною системою, і графіт майже не виділявся (рис. 1, а). При наступних добавках кристалічного кремнію (до 2,5 %) характер кристалізації чавуну змінюється і починає відповідати стабільній системі (рис. 1, б). При добавці нікель – магнієвої лігатури чавун кристалізується за змішаним половинчастим механізмом з утворенням графіту спочатку вермикулярної (рис. 1, в), а потім і кулястої форми та ледобуритної матриці (рис. 1, г).

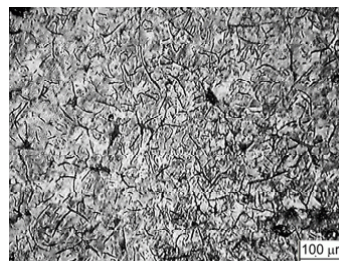
Мала кількість домішок у чавуні буде сприяти тому, що головним чином магній буде йти не на рафінування чавуну, а на утворення кулястого графіту. Відомо, що утворення графіту, як правило, відбувається на поверхні розділу, і чим більше домішок, тим більше буде цих поверхонь. Тому часто в синтетичних чавунах спостерігається менша кількість вкраплень графіту.

Кулясті вкраплення графіту були квазіглобулярними і являли собою в перерізі багатокутники. Методами пошарового шліфування встановлено, що ці багатокутники уявляють собою секторальні дендритні утворення (рис. 2).

Застосування імерсійних об'єктивів виявило, що вкраплення графіту являють собою або зростки декількох куль, або так званий «вироджений», «підірваний» графіт (рис. 3 в, г). Морфологія таких вкраплень суттєво відрізнялася від включень кулястого графіту, що спостерігається в заевтектичних синтетичних чавунах промислової частоти (рис. 3, а, б).



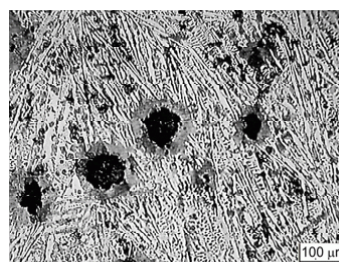
а



б



в



г

Рис. 1. Мікроструктура зразків синтетичного чавуну діаметром 5 мм при різному вмісті добавок кристалічного кремнію та магнію (оброблено ніталем): а – початковий чавун з 5 % вуглецю; б – той же чавун з добавкою 2,5 % кремнію; в – той же чавун з додатковою добавкою 0,5 % нікель-магнієвої лігатури (Mg залишковий 0,02 %); г – той же чавун з додатковою добавкою 1,0 % нікель-магнієвої лігатури (Mg залишковий 0,04 %)

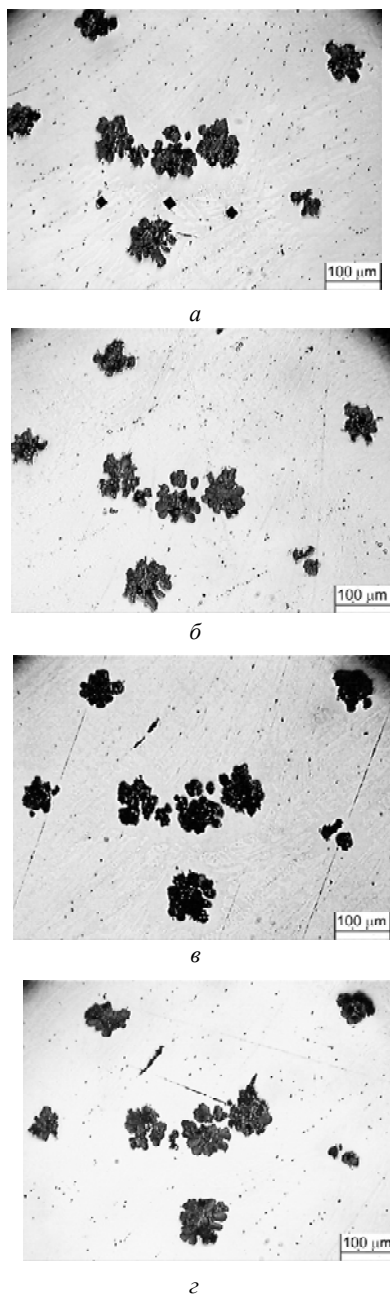


Рис. 2. Вкраплення кулястого графіту при послідовному шліфуванні:

a – початковий стан; *б, в, з* – структури після послідовного шліфування кроком 3–5 мкм

Такі неправильні вкраплення графіту іноді пов'язують або з агрегативним механізмом кристалізації графіту, або з так званим спотворенням, виродженням вкраплень графіту. Виродження кулястого графіту, що може спостерігатися у заевтектичних чавунах, пов'язують з тим, що у перенасиченому вуглецем розчині графіт зростає за дендритним механізмом, бо відсутній опір матриці – аустеніту [10], очищенням призматичних граней від кисню та сірки [11], досягненням критичних розмірів радіуса глобуля (7–20 мкм) та зростанням швидкості охолодження від 20 до 350 °С/хв. [12].

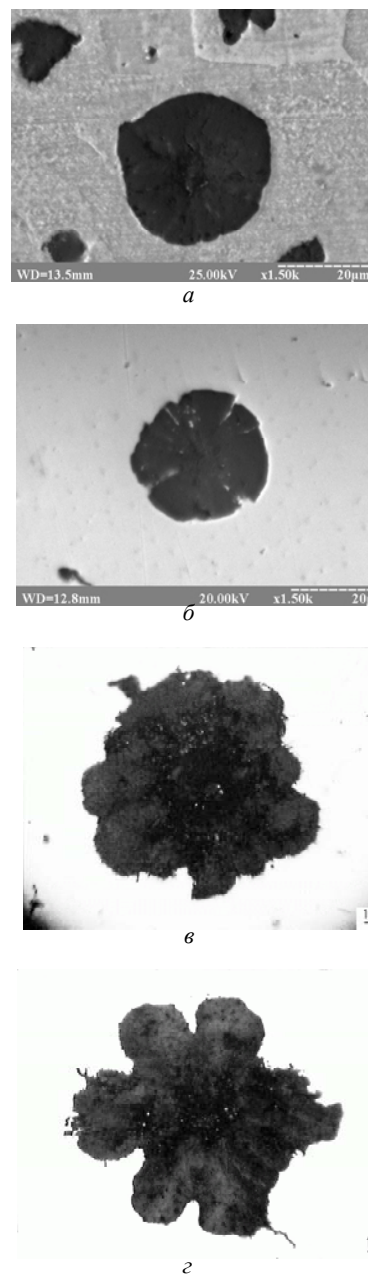


Рис. 3. Типові вкраплення графіту кулястої форми в заевтектичних чавунах:

a, б – включення графіту у промислового синтетичному чавуні для вилівка «Супорт» (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); *в, з* – включення графіту у синтетичному дослідному чавуні

У нашому випадку швидкість охолодження була також досить високою і знаходилась якраз у таких межах (до 350 °С/хв.). Вміст сірки був на низькому рівні (0,005 %).

Обговорення

Введення у синтетичний чавун сфероїдизуючих модифікаторів спочатку створює додаткові поверхні розділи та виникає ефект інокуляції. Внаслідок того, що

таких центрів буде небагато (фракція модифікатора близько 1 мм), утворюються не поодинокі включення графіту, а зростки з декількох куль. Однак ці зростки кулястих вкраплень зростають з одного зародка.

Ефект модифікування нікель-магнієвою лігатурою супроводжується дуже бурхливою реакцією, навіть «мікробиухами», випаровуванням магнію та утворенням бульбашок, тобто кулястих поверхонь розділу.

На наш погляд, утворюється єдина система, що складається з газової бульбашки або навіть бульбашок, каналу живлення, основою якого є вкраплення графіту шестикутної форми з порожниною всередині. Через цей канал живлення відбувається дифузія вуглецю. Внаслідок високої активності вуглецю ці порожнини швидко заповнюються вуглецем і утворюються такі зростки кулястих вкраплень. Внаслідок високої швидкості кристалізації реалізується дендритний характер кристалізації графіту.

Для описання морфології включень графіту дуже зручно користуватися фрактальною розмірністю. Як показано у роботах [13, 14], фрактальна розмірність може виступати новою кількісною оцінкою форми і морфології графітних вкраплень.

У табл. 1 наведена фрактальна розмірність вкраплень графіту кулястої форми в дослідному чавуні порівняно з промисловим чавуном. Використовувалися безрозмірні характеристики, які дали змогу оцінювати

тільки форму вкраплень та не враховувати власне їх розміри.

Як видно з рис. 3 та табл. 1, графіт, що утворився у дослідному чавуні, має більш розвинену поверхню, менш компактний та кулястий. Усі морфологічні показники мають більш високий діапазон варіювання та більш високі значення.

Висновки

1. За результатами досліджень підтверджено, що вкраплення графіту у заевтектичному синтетичному чавуні зростають за дендритним механізмом.

2. Менша кількість домішок у синтетичному чавуні зменшує кількість поверхонь розділу, що можуть слугувати зародками графіту. Внаслідок цього кількість вкраплень графіту суттєво менша, ніж у чавунах промислової чистоти.

3. Морфологічні показники вкраплень графіту, що утворився в дослідному синтетичному високоміцному чавуні, мають більш високі значення внаслідок розвинутої поверхні та високої швидкості кристалізації.

4. Отримання правильних кулястих вкраплень графіту в заевтектичних синтетичних чавунах пов'язано зі зміною умов кристалізації та сфероїдизувального модифікування. Зменшення швидкості кристалізації та фракції модифікаторів буде сприяти рівномірному розподілу графіту та покращенню форми вкраплень.

Таблиця 1 – Морфологічні показники вкраплень графіту в синтетичних високоміцних чавунах

Вид чавуну	Показники		
	Фрактальна розмірність (лінії, що огинає графітне вкраплення)	Аспект	Кулястість
промисловий	1,01–1,05	1,04–1,05	1,6–2,6
дослідний	1,09–1,12	1,02–1,10	3,7–4,5

Примітки:

1. Аспект – співвідношення між великою та малою вісями еліпса. 2. Кулястість – розрахункова величина

$$K = \frac{P^2}{4\pi S}, \text{ де } P - \text{периметр вкраплення графіту; } S - \text{площа вкраплення графіту}$$

3. Фрактальна розмірність – розмірність Мінковського або груба розмірність обмеженої множини в метричному просторі, що дорівнює:

$$D = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{\log N(\varepsilon)}{-\log \varepsilon}, \text{ де } N(\varepsilon) - \text{мінімальне число множин діаметра } \varepsilon, \text{ якими можна покрити цю множину.}$$

Список літератури

1. Плавка синтетического чугуна в индукционных печах и ее технология на Каунасском литейном заводе «Центролит» / Под ред. Н. Г. Гиршовича. – Вильнюс : Минтис, 1974. – 297 с.
2. Шумихин В. С. Синтетический чугун / В. С. Шумихин, П. П. Лузан, М. В. Жельнис. – К. : Наук. думка, 1971. – 158 с.
3. Иванов Д. П. Синтетический чугун, свойства и методы его получения / Д. П. Иванов // Литейное производство. – 1972. – № 10. – С. 1–5.
4. Коган Л. Б. Структурные диаграммы для синтетического чугуна / Л. Б. Коган // Литейное производство. – 1972. – № 11. – С. 13–14.
5. Пархоменко В. А. Совершенствование методов выплавки белого чугуна в индукционных печах ИЧТ-10 /

- В. А. Пархоменко, И. Н. Бондаренко, Г. Ю. Шульте // Механизация и повышение эффективности технологических процессов производства отливок металлургического оборудования : тез. докл. IV Республ. науч.-техн. конф. – Днепропетровск : ДМетИ. – 1986. – 77 с.
6. Пархоменко В. А. Технологические особенности производства низкомарганцовистых синтетических ковких чугунов / В. А. Пархоменко, В. С. Драмшев, Т. Ф. Тылик // Неметаллические включения и газы в литейных сплавах : тез. докл. IV Республ. науч.-техн. конф. (окт. 1985). – Запорожье: ЗМИ. – 1985. – С. 183–184.
 7. Чугуны с шаровидным и вермикулярным графитом и аустенито-бейнитной матрицей – современные материалы для литых деталей (свойства, применение, особенности технологии). Информационный сборник № 2. – М. : Инженерно-технологический центр машиностроения «Металлург», 2004. – 440 с.
 8. Кимстач Г. М. Об особенностях сфероидизирующего модифицирования синтетического чугуна / Г. М. Кимстач, М. Н. Шилова // Металлургия машиностроения. – 2006. – № 5. – С. 28–30.
 9. Кимстач Г. М. Синтетический чугун / Г. М. Кимстач // Заготовительные производства в машиностроении. – 2007. – №12. – С. 7–14.
 10. Campbell J. Complete casting handbook: metal casting processes, metallurgy, techniques and design / Campbell J. – Butterworth-Heinemann, 2015. – 1054 p.
 11. Microstructural characterization of graphite spheroids in ductile iron / Theuwissen K. etc. // Transactions of the Indian Institute of Metals. – 2012. – Т. 65. – №. 6. – P. 627–631.
 12. Gerghu R. A Possible Mechanism for the Formation of Exploded Graphite in Nodular Cast Irons / Gerghu R., Eberg L. M., Lacaze J. // Materials Science Forum. – 2014. – Т. 790. – P. 435–440.
 13. Соценко О. В. Особенности агрегативного механизма формирования структуры шаровидного и вермикулярного графита в модифицированных чугуна / О. В. Соценко // Металл и литье Украины. – 2012. – № 12 (235). – С. 3–10.
 14. Макаренко К. В. Фрактальный анализ структурообразования чугунов [Текст] + [Электронный ресурс]: монография / К. В. Макаренко. – Брянск : БГТУ, 2013. – 92 с.

Одержано 05.11.2015

Иванов В.Г. Голтвяница В.С. Морфология графита в заэвтектических синтетических чугунах

Представлены данные об образовании шаровидного графита в заэвтектических синтетических чугунах, выплавленных на шихтовых материалах повышенной чистоты. Установлено, что включения графита в заэвтектическом синтетическом высокопрочном чугуне растут по дендритному механизму при высокой скорости кристаллизации. Морфологические показатели (фрактальная размерность, аспект, округлость) графитовых включений, образовавшихся в синтетическом высокопрочном чугуне, имеют более высокие значения вследствие более развитой поверхности и высокой скорости кристаллизации.

Ключевые слова: синтетический чугун, шаровидный графит, морфология, фрактальная размерность, дендрит.

Ivanov V., Goltvyanitsya V. Graphite morphology in hypereutectic synthetic cast iron

The formation data of spherical graphite in hypereutectic synthetic cast irons, which were melted using high purity charge materials, were shown. The graphite inclusions in hypereutectic synthetic high-strength cast iron growth at high crystallization speed by dendritic mechanism were confirmed. Morphological parameters (fractal dimension, aspect, roundness) of graphite inclusions which were formed in synthetic high-strength cast iron have higher values due to developed surface and dendritic solidification mechanism.

Key words: synthetic cast iron, spheroidal graphite, morphology, fractal dimension, dendrite.