

Зв'язок хімічної мікронеоднорідності сірого чавуну та структури пластинчатого графіту

Борисенко А. Ю. доктор технічних наук, старший науковий співробітник, asbor75@gmail.com, ORCID: 0000-0003-2120-0944

Балаханова Т. В., кандидат технічних наук, tatja.balakhanova@gmail.com, ORCID: 0000-0003-2493-218X

Інститут чорної металургії ім. З. І. Некрасова НАН України, Дніпро, Україна

Вивчено зв'язок хімічної мікронеоднорідності виливка із сірого чавуну, виявленої методом кольорового травлення в пікраті натрію, зі структурою пластинчатого графіту. Результати мікроструктурних досліджень свідчать про те, що кристалізація сірого чавуну супроводжується виникненням кількох рівнів хімічної та структурної мікронеоднорідностей розплаву, що кристалізується, впливаючи на утворення графіту. Мікроструктурні ознаки вказують на те, що розплав чавуну близького за вмістом вуглецю до евтектичного складу перед утворенням графіту набуває дендритної та комірчастої будови. Інтенсивність хімічної мікронеоднорідності та її топологія спадково пов'язані з розташуванням, розміром та формою графітних включень. Пластинчастий графіт, утворений усередині та на периферії комірок розплаву, має різну будову та товщину пластин. Збагачення кремнієм ділянок розплаву чавуну призводить до утворення в них дендритів первинного аустеніту та первинного графіту найбільшого розміру. Мікротвердість фериту в дендритах колишнього первинного аустеніту приблизно в 1,5 рази більша, ніж мікротвердість фериту в ділянках, прилеглих до включень первинного пластинчатого графіту. Встановлено тісний кореляційний зв'язок ($r = -0,93$) між мікротвердістю фериту в областях з різною інтенсивністю ліквіації та товщиною графітних пластин, розташованих у цих ділянках. Найбільший розкид значень мікротвердості та ширини графітних пластин спостерігається у найбільш ліквіційних ділянках збагачених кремнієм в центрі комірок, що відповідають розташуванню евтектичних колоній. У просторах між комірками утворюється графіт із найменшою товщиною пластин, які розташовані на найменшій відстані між собою.

Необхідно продовження досліджень спадкового впливу будови та фізико-хімічних властивостей високовуглецевих розплавів заліза на механізм утворення графіту та його морфологічних особливостей в сірих чавунах.

Ключові слова: сірий чавун, розплав, кристалізація, ліквіація, графіт.

Механізм кристалізації, структура та властивості евтектичних сплавів, до яких належать і чавуни, залежать від структури та властивостей їх розплавів [1-4]. Дослідження механізму утворення графіту в чавунах у зв'язку з будовою та властивостями високовуглецевих розплавів заліза залишається важливою науковою проблемою [5-8], вирішення якої необхідне для підвищення ефективності керування утворенням структури та властивостями чавунних виливків. Це зумовлено практичною необхідністю в сірому чавуні як найбільш економічно та екологічно прийняттого ливарного сплаву, властивості якого багато в чому залежить від структури графіту [9]. Форма зародків графіту та механізм їх зростання з розплаву, попри довгу історію їх вивчення [5, 6, 10, 11], залишаються не з'ясованими. Вивчення впливу будови та властивостей високовуглецевих розплавів на кристалізацію сірих чавунів необхідне для розуміння причин різноманіття форм графітних кристалів та вдосконалення способів керування їх утворенням.

Структуру металевих розплавів, що впливає на їхні властивості, вивчають за допомогою дифракційних (найчастіше рентгенографічних) або розрахункових методів [7, 8, 12-16]. Для інтерпретації отриманих даних та опису структури металевих розплавів залучають існуючі або розробляють нові гіпотези та моделі розташування в них іонів, атомів або молекул. Перевіркою таких гіпотез і моделей є можливість передбачати термодинамічні та фізичні властивості розплавів [15], але не структуру кристалів. Такий підхід до вивчення впливу будови високовуглецевих розплавів заліза на структуру графіту та розробки практичних рекомендацій щодо керування механізмом його утворення є дуже теоретизованим і тому малопродуктивним. Для цього необхідні більш доступні та інформативні методи досліджень. Такими на сьогоднішній день залишаються методи дослідження структури металів за допомогою світлової та растрової електронної мікроскопії у поєднанні з мікрорентгеноспектральним (мікрозондовим) аналізом. Однак інтерпретація даних, отриманих цими методами, так само як і у випадку дифракційних та розрахункових досліджень, вимагає застосування відповідних теоретичних уявлень щодо кристалізації металевих розплавів [17], але на вищому рівні їхньої будови доступного для мікроскопічного вивчення.

Серед методів мікроскопічних досліджень кристалізації залізовуглецевих розплавів часто застосовують методи кольорового травлення шліфів [5, 18-22]. Ці способи візуалізують розподіл у структурі проліктованих домішкових і легуючих елементів в залізі, за зовнішнім виглядом якого можна судити про структуру розплаву, що закристалізувався. Найбільшого поширення способи кольорового травлення набули при дослідженні дендритної кристалізації і перитектичного перетворення у сталях [18]. Виявлені цим методом структури, приклад яких наведений на обкладинках журналу «МОМ» [23, 24], за своєю топологією та кольору, який характеризує інтенсивність ліквідації компонентів дозволяють бачити на мікрорівні будову і хімічну неоднорідність закристалізованого розплаву сталі. Кольорове травлення також використовують для вивчення структури сірих чавунів [5, 19, 20, 22]. За топології розподілу домішок можна побічно вивчати структуру (зовнішній вигляд) розплаву чавуну, що

закристалізувався, й встановлювати її зв'язок зі структурою та механізмом утворення графіту. Представлена робота відображає перші результати досліджень авторів з цього питання.

Мета роботи – встановити зв'язок структури графіту з хімічною мікронеоднорідністю і виявленою за її допомогою структурою розплаву чавуну, що закристалізувався.

Для проведення досліджень було отримано дослідний виливок масою близько 14 г (рис. 1) шляхом переплавлення в печі Таммана чавунних заготовок поршневого кілець з подальшою повільною кристалізацією розплаву в алундовому тиглі. Температура перегріву склала 1450 ± 10 °С. Умови повільної кристалізації досягнуто шляхом перенесення тигля з розплавом у піч для термообробки, нагріту до 800 °С. Після цього піч вимкнули та охолоджували разом із тиглем приблизно до 60 °С. Хімічний склад отриманого виливка наведено у табл. 1.



Рис. 1. Шліф досліджуваного виливка із сірого чавуну з 3,94 % С та 2,59 % Si після травлення в пікраті натрію.

Fig. 1. Section of the studied gray cast iron casting with 3,94 % C and 2,59 % Si after etching in the Sodium picrate.

Таблица 1
Хімічний склад (мас., %) досліджуваного виливка із сірого чавуну

Table 1
Chemical composition (wt., %) of the studied grey cast iron casting

C	Mn	Si	P	S	Ni	Cr	Cu	Mo
3,94	0,27	2,59	0,06	0,008	0,08	0,03	0,05	0,04

Хімічну мікронеоднорідність розподілу хімічних елементів виявляли шляхом травлення шліфа в гарячому розчині пікрату натрію: 25 г NaOH + 5 г пікринової кислоти +100 мл H₂O. Застосування цього реактиву дозволяє за кольором травлення* якісно оцінити розподіл в структурі чавуну насамперед кремнію, який завжди є у його складі та значно впливає на утворення графіту. Найбільш збагачені кремнієм ділянки структури забарвлюються у темно-синій колір. Із зменшенням концентрації кремнію колір протравленої

структури змінюється до коричневого та світло-жовтого. Ця залежність неодноразово була підтверджена мікрозондовими дослідженнями [5, 18, 19], що дозволяє застосовувати травлення у пікраті натрію для якісної оцінки вмісту кремнію в структурі сталей та чавунів.

Металографічний аналіз виконано за допомогою світлового мікроскопа «Axiovert 200M MAT». Досліджували зв'язок розподілу, кольору та зовнішній вигляд хімічної мікронеоднорідності з відповідною ним структурою за перерізом вилівка та будовою графіту, а також ширину його пластин, визначену методом випадкових січних. У прилеглих до графітних включень ділянках металевої матриці з феритною структурою визначали мікротвердість методом Віккерса при навантаженні 20 г.

Дослідження показали (рис. 2 а), що у верхній частині вилівка (рис. 2 б) формується більше дендритів аустеніту і менше евтектичних колоній порівняно з його центром та нижньою частиною (рис. 2 в, г). Відмінності, що спостерігаються в палітрі кольорів за допомогою якої виявляються особливості хімічної та структурної мікронеоднорідностей

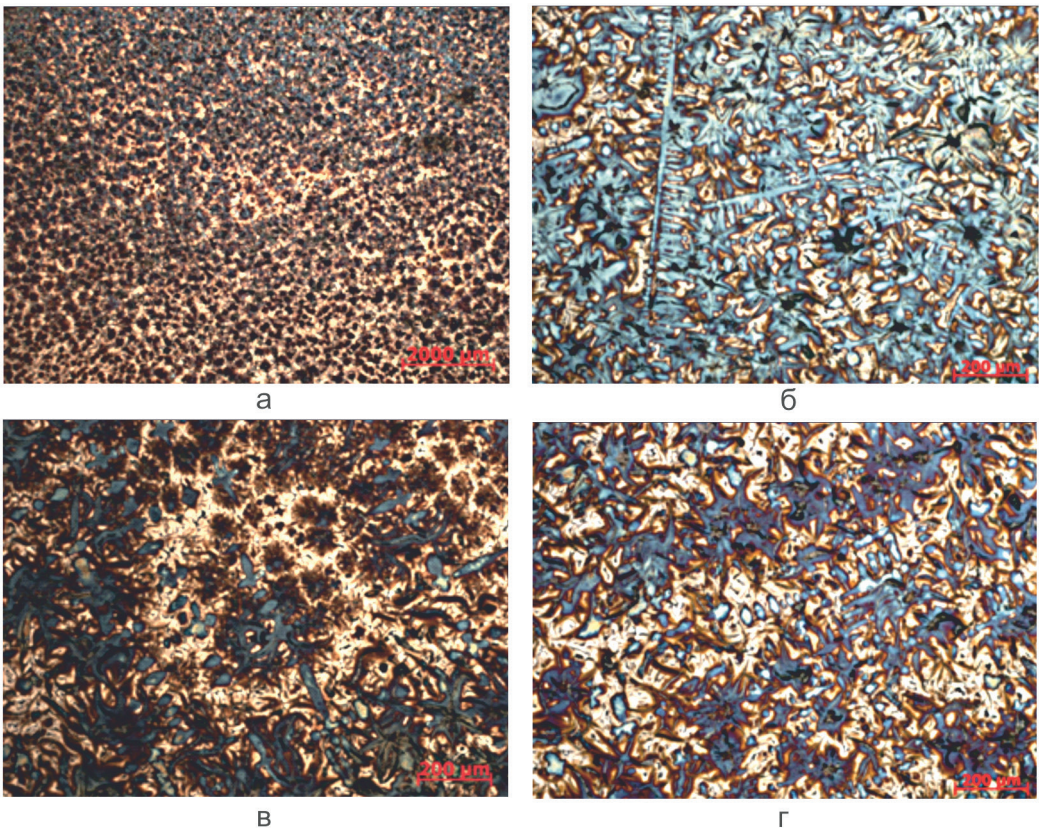


Рис. 2. Мікроструктура по висоті досліджуваного вилівка із сірого чавуну з 3,94 % С та 2,59 % Si після травлення в пікраті натрію: а – загальний вигляд; б – верх вилівка; в – середина вилівка; г – низ вилівка.

Fig. 2. The microstructure of the heights of the studied casting from gray cast iron with 3,94 % C and 2,59 % Si after etching in the Sodium picrate: а – general view; б – the top of the casting; в – the middle of the casting; г – bottom of the casting.

свідчать про те, що їх утворення пов'язано з кількома стадіями (рівнями) існування розплаву чавуну, що твердіє, і набуває дендритної та комірчастої будови перед утворенням графіту.

Привертає увагу те, що в мікроструктурі дослідженого зразка практично евтектичного складу за вмістом вуглецю утворюється значна кількість дендритів аустеніту, синій колір яких (рис. 2 б, рис. 3 а) вказує на високий вміст в них кремнію. Графіт утворюється між гілками дендритів,

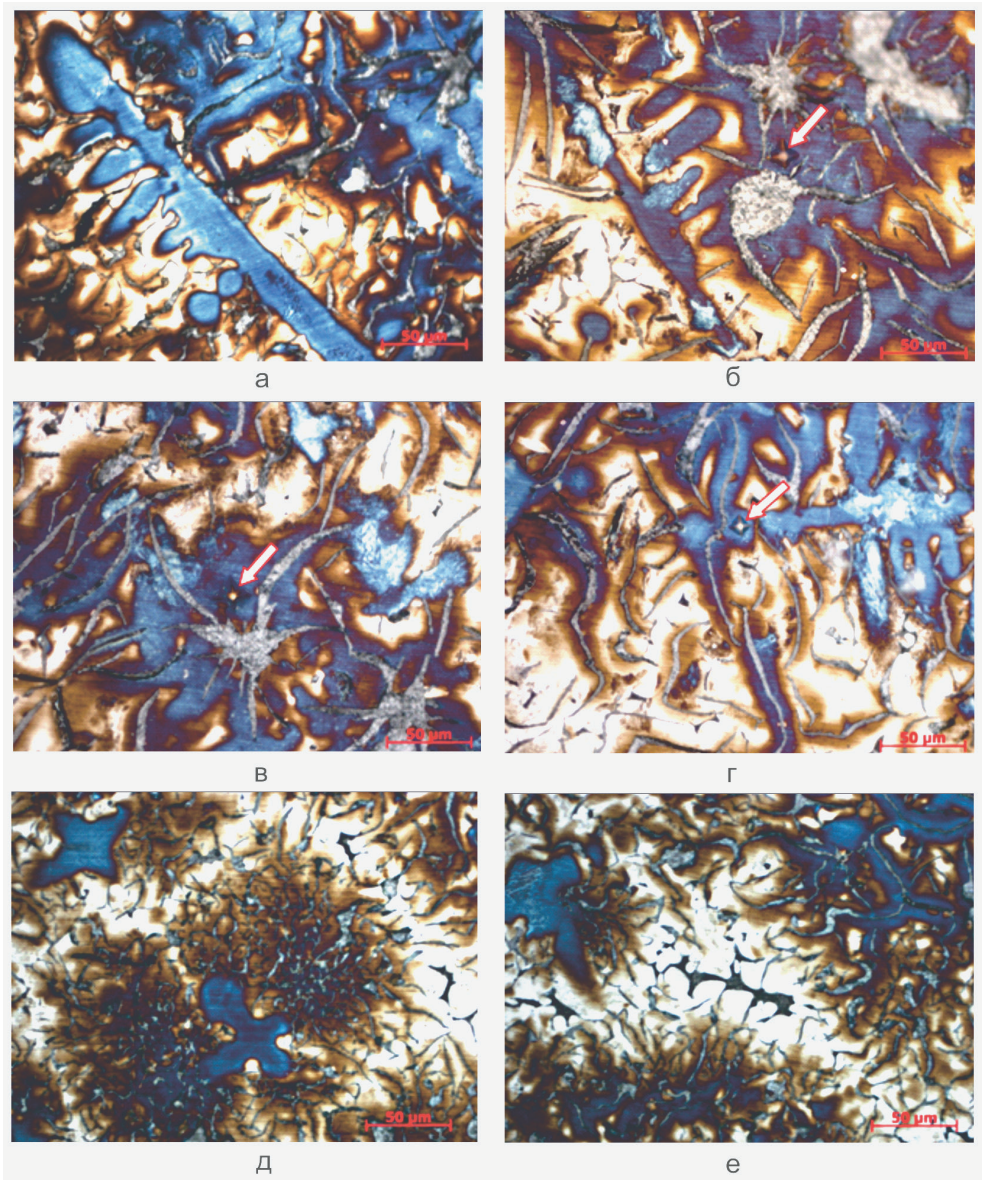


Рис. 3. Зв'язок хімічної мікронеоднорідності з мікроструктурою виливка із сірого чавуну з 3,94 % C та 2,59 % Si.

Fig. 3. The relationship of chemical microheterogeneity with the microstructure of gray cast iron castings with 3,94 % C and 2,59 % Si.

усередині яких він відсутній (рис. 3 а). Середня мікротвердість фериту у гілках дендритів становить $205 \text{ HV}_{\mu 20}$. Формування хімічної та структурної мікронеоднорідностей у вигляді збагачених кремнієм дендритів аустеніту зумовлено, ймовірно, початковим рівнем їх виникнення при найвищих температурах існування та кристалізації розплаву до стадії утворення графіту. Наявні структурні ознаки вказують, що утворенню первинного та евтектичного графіту передувало також виникнення комірчастої будови [1, 17, 18] розплаву чавуну.

Первинний графіт утворюється в центрі комірок розплаву і збігається за розташуванням із зіркоподібними ліквацийними зонами такого ж синього кольору (рис. 3 б-г), як і дендрити первинного аустеніту. Цей графіт складається з масивного центру своєрідної форми, від якого, повторюючи форму променів лікватів уздовж їхньої уявної центральної лінії розташовуються пластини графіту. Масивні центри графітних включень пов'язані з однорідними за кольором синіми ліквацийними областями (рис. 3 б) або з областями коричневого кольору (рис. 3 в). У першому випадку графітні центри є масивнішими та суцільнішими, ніж у другому.

Коричневий колір опосередковано вказує на менший вміст кремнію у цих ділянках. Середня мікротвердість фериту в ліквацийних ділянках синього кольору, прилеглих до масивних включень первинного графіту, становить $141 \text{ HV}_{\mu 20}$. У цих ділянках спостерігається великий розкид значень мікротвердості, а відбитки індентора мають увігнуті сторони (показано стрілками на рис. 3 б, в), що притаманне матеріалам з низькою твердістю [25]. Однак мікротвердість фериту у прилеглих дендритних ліквацийних ділянках малого розміру й такого ж синього кольору дорівнює $172 \text{ HV}_{\mu 20}$ (показано стрілкою на рис. 3 г). В осях цих дендритів, на відміну вищеописаних, спостерігаються переважно ізольовані пластини графіту, які не пов'язані з спільним масивним графітовим центром. Довжина цих пластин (рис. 3 г) зазвичай менша, ніж довжина пластин графіту, зв'язаних з масивним центром.

Великі комірки всередині виливка містять у собі кілька комірок меншого розміру (рис. 2 в), коричневий колір яких свідчить про менший вміст у них кремнію порівняно з ліквацийними ділянками синього кольору. Мікротвердість фериту у цих ділянках становить $162 \text{ HV}_{\mu 20}$. Ймовірно, утворенню комірок меншого розміру передувало формування великих комірок розплаву. Усередині коричневих осередків малого розміру знаходиться найдрібніший графіт (рис. 3 д), який, скоріш за все, утворився в результаті евтектичного перетворення. Особливість цього графіту полягає в тому, що розташування його пластин пов'язане з найменшими за розміром ліквацийними ділянками темно-коричневого кольору. Пластини цього графіту рідко мають спільний центр свого утворення, хоча такий має бути обов'язковим структурним елементом для евтектичної колонії [5]. Подібна структура, має назву «переохолоджений графіт». Вона утворюється за умов швидкого охолодження виливків. Проте умови кристалізації дослідного виливка виключають утворення переохолодженого графіту. Отже, існує інша причина його утворення.

Між комірками коричневого кольору розташовані світлі проміжки хвилястої і дендритної будови (рис. 3 д, е), де також утворюється графіт. Розмір включень графіту у цих місцях більший за розмір графітних включень, які розташовані усередині комірок. У проміжках між гілками дендритів спостерігаються ділянки сірого і чорного кольорів, які можуть бути викришеним графітом, порами або ділянками, які збагачені сіркою і фосфором в наслідок ліквіації цих елементів у кінцевих порціях рідини між дендритами аустеніту, що зростають назустріч один одному. Часто в міжгілкових проміжках дендритів пластини графіту сірого кольору пов'язані між собою спільними центрами чорного кольору. Мікротвердість фериту в цих ділянках структури становить $185 \text{ HV}_{\mu 20}$, а кількість перліту менша порівняно з усіма вищеописаними ліквіаційними областями. У просторах між комірками іноді спостерігаються дендрити первинного аустеніту, які мають синій колір (рис. 3 д).

Результати вимірювання ширини графітних пластин залежно від їх розташування в зонах з різною інтенсивністю ліквіації (рис. 4) показують, що найбільший розкид значень спостерігається у ліквіаційних ділянках темно-синього кольору, де також є найбільший розкид значень мікротвердості. У просторах між комірками спостерігається графіт з найменшою товщиною пластин, які розташовані на малій відстані одна від одної. Існує тісний кореляційний зв'язок ($r = -0,93$) між мікротвердістю областей з різною інтенсивністю ліквіації та товщиною графіту, розташованого в них (рис. 4 б). У найбільш збагачених кремнієм та м'яких ділянках металевої матриці утворюється найбільш масивний графіт.

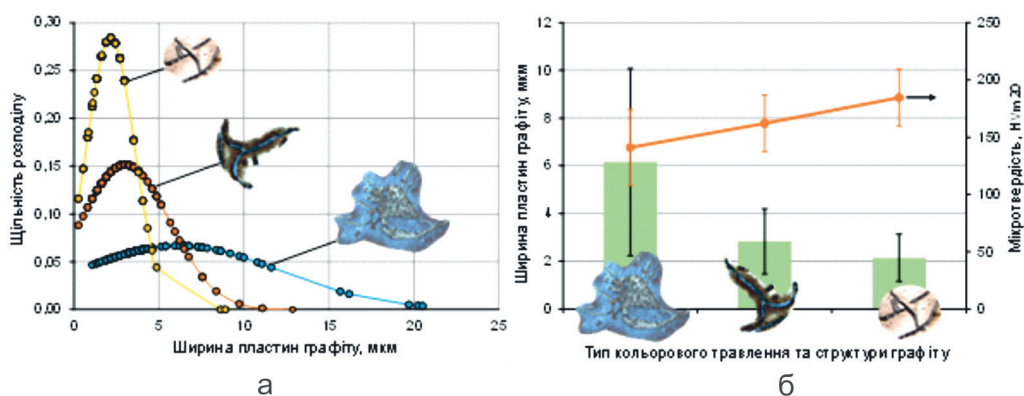


Рис. 4. Щільність розподілу (а) та зв'язок (б) середньої ширини графітних включень з мікротвердістю фериту в прилеглих до них зонах різного ступеня ліквіації у виливку з чавуну з 3,94 % С і 2,59 % Si.

Fig. 4. Distribution density (a) and relationship (b) of the average width of graphite inclusions with the microhardness of ferrite in adjacent zones of varying degrees of liquation in a cast iron casting with 3,94 % C and 2,59 % Si.

Наведені вище результати мікроструктурних досліджень узгоджуються з даними роботи [5], а саме: під час кристалізації чавунів концентрація кремнію є вищою в тих ділянках аустеніту, які кристалізуються першими – у дендритах первинного аустеніту та центральних областях евтектичних колоній. Оскільки кремній знижує розчинність вуглецю в аустеніті, то

неоднорідний за вмістом кремнію аустеніт повинен бути неоднорідним і за вмістом вуглецю. У ділянках структури чавуну, збагачених кремнієм, концентрація вуглецю має бути меншою, ніж у ділянках зі зниженим вмістом кремнію. Можливо саме цим пояснюється низька мікротвердість фериту в найбільш збагачених кремнієм ліквідаційних ділянках біля первинного графіту і висока мікротвердість у ділянках із меншим вмістом кремнію. Однак виникають питання щодо причин найбільшої мікротвердості в дендритах первинного аустеніту, які також збагачені кремнієм і не містять графіту, тоді як між гілками дендритів графіт утворюється. Відповіді на ці питання слід шукати в поки що невідомих механізмах спадкового впливу хімічної та структурної мікронеоднорідностей розплаву на формування структури залізовуглецевих сплавів, зокрема на утворення графіту.

Результати виконаних досліджень показують, що кристалізація сірого чавуну супроводжується виникненням багаторівневої хімічної та структурної мікронеоднорідності розплаву, які спадково впливають на розташування, розмір та форму графітних включень. Особливості процесів формування структури розплаву чавуну та продуктів його кристалізації на кожному рівні залежать від фізико-хімічних властивостей розплаву та умов охолодження виливка.

Автори вдячні д.т.н., професору Геннадію Васильовичу Левченку за обговорення результатів роботи.

Література

1. Таран Ю.Н., Мазур В.И. Структура эвтектических сплавов. – М.: Металлургия, 1978. – 312 с.
2. Мазур В.І., Таран Ю.М. Розвиток бунінської теорії евтектичної кристалізації. // Металознавство та обробка металів. – 2001. – №1-2. – С. 22-29.
3. Лучкин В.С., Тубольцев Л.Г., Падун Н.И., Шевченко А.М. Диаграмма состояния и структура жидких Fe–C сплавов. Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии. – 2009. – С. 265-282.
4. Мазур В.И., Мазур А.В. Введение в теорию сплавов. – Д.: Лири ЛТД. – 2009. – 264 с.
5. Бунин К.П., Малиночка Я.Н., Таран Ю.Н. Основы металлографии чугуна. – М.: Металлургия, 1969. – 416 с.
6. Верховлюк А.М., Сергієнко Р.А., Щерецький О.А., Потрух О.Г., Афанасієв М.В. Сучасні уявлення про структуроутворення у графітізованих чавунах (огляд). // Металознавство та обробка металів. – 2018. – №1. – С. 9-22.
7. Shaopeng Pan, Shidong Feng, Junwei Qiao, Bangshao Dong, Jingyu Qin The atomic structure of liquid Fe-C alloys. Journal of Alloys and Compounds. – 2015. – Vol. 648. – P. 178-183. DOI: 10.1016/j.jallcom.2015.06.252.
8. Попель П.С., Сидоров В.Е., Бродова И.Г., Кальво-Дальборг М., Дальборг У. Влияние термической обработки исходного расплава на структуру и свойства кристаллических слитков или отливок. Расплавы. – 2020. – № 1. – С. 3-36. DOI: 10.31857/S0235010620010065.
9. Lacaze J., Dawson S. Cast Iron: A Historical and Green Material Worthy of Continuous Research. International Journal of Technology. – 2021. – Vol. 12. – P. 1123. DOI: 10.14716/ijtech.v12i6.5235.

10. Stefanescu D.M., Alonso G., Larranaga P., De la Fuente E., Suarez R. On the crystallization of graphite from liquid iron-carbon-silicon melts. *Acta Materialia*. – 2016. – Vol. 107. – P. 102-126. DOI: 10.1016/j.actamat.2016.01.047.
11. Campbell J. A Hypothesis for Cast Iron Microstructures. *Metall Mater Trans B*. – 2009. – Vol.40. – P. 786-801. DOI: 10.1007/s11663-009-9289-0.
12. Ершов Г.С., Черняков В.А. Строение и свойства жидких и твердых металлов. – М.: Металлургия, 1978. – 248 с.
13. Арсатьев П.П., Коледов Л.А. Металлические расплавы и их свойства. – М.: Металлургия, 1976. – 376 с.
14. Баум Б.А. Металлические жидкости. – М.: Наука, 1979. – 120 с.
15. Вилсон Д.Р. Структура жидких металлов и сплавов. – М.: Металлургия, 1972. – 247 с.
16. Вертман А.А., Самарин А.М. Свойства расплавов железа. – М.: Наука, 1969. – 280 с.
17. Флемингс М. Процессы затвердевания. – М.: Мир, 1977. – 424 с.
18. Яценко А.И., Хрычиков В.Е., Хохлова Т.С., Борисенко А.Ю., Репина Н.И., Грушко П.Д., Татарчук А.В. Кристаллизация и первичная структура конструкционных сталей. – Д.: Журфонд, 2010. – 226 с.
19. Vazehrad S., Elfsberg J., Dioszegi A. Study of microstructure and silicon segregation in cast iron using color etching and electron microprobe analysis. *Materials Characterization*. – 2015. – P. 104. DOI: 10.1016/j.matchar.2014.09.008.
20. Guiquan Wang, Xiang Chen, Yanxiang Li, Zhongli Liu. Effects of Inoculation on the Pearlitic Gray Cast Iron with High Thermal Conductivity and Tensile Strength. *Materials*. – 2018. – Vol. 11. – P. 1876. DOI:10.3390/ma11101876.
21. Basso A., Toda-Caraballo I., San-Martin D., Caballero F.G. Influence of cast part size on macro- and microsegregation patterns in a high carbon high silicon steel. *Journal of Materials Research and Technology*. – 2020. – Vol. 9(3). – P. 3013-3025. DOI: 10.1016/j.jmrt.2020.01.052.
22. Vaško, A. Advantages of colour etching in quality control of graphitic cast irons. *Production Engineering Archives*. – 2022. – Vol. 28(4). – P. 319-324. DOI: 10.30657/pea.2022.28.40.
23. Науково-технічний журнал «Металознавство та обробка металів». – 2019. – Том 25. – № 2.
24. Науково-технічний журнал «Металознавство та обробка металів». – 2019. – Том 25. – № 3.
25. Григорович В. К. Твердость и микротвердость металлов. – М.: Наука, 1976. – 230 с.

References

1. Taran Y. N., Mazur V. I. (1978). *Structure of eutectic alloys*. Moscow: Metallurgiya. [in Russian].
2. Mazur V. I., Taran Y. M. (2001). Development of the Bunin theory of eutectic crystallization. *Metal Science and Heat Treatment*, 1-2, 22-29. [in Ukrainian].
3. Luchkin V. S., Tuboltsev L. G., Padun N. I., Shevchenko A. M. (2009). Phase diagram and structure of liquid Fe-C alloys. *Fundamental and Applied Problems of Ferrous Metallurgy*. 265-282. [in Russian].
4. Mazur V. I., Mazur A. V. (2009). *Introduction to alloy theory*. Dnipropetrovsk: Lira LTD. [in Russian].

5. Bunin K. P., Malinochka Y. N., Taran Y. N. (1969). *Fundamentals of metallography of cast iron*. Moscow: Metallurgiya. [in Russian].
6. Verkhovlyuk A. M., Serhiyenko R. A., Shchereckyi O. A., Potrukh O. G., Afanasiev M. V. (2018). Modern concepts of structural formation in graphitized cast irons (review). *Metal Science and Heat Treatment*. 1. 9-22. [in Ukrainian].
7. Pan S., Feng S., Qiao J., Dong B., Qin J. (2015). The atomic structure of liquid Fe–C alloys. *Journal of Alloys and Compounds*. 648. 178-183. [in English]. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2015.06.252>.
8. Popel P. S., Sidorov V. E., Brodova I. G., Calvo-Dalborg M., Dalborg U. (2020). Influence of thermal treatment of the initial melt on the structure and properties of crystalline ingots or castings. *Melts*. 1. 3-36. [in English]. <https://doi.org/10.31857/S0235010620010065>.
9. Lacaze J., Dawson S. (2021). Cast iron: A historical and green material worthy of continuous research. *International Journal of Technology*. 12(6). 1123. [in English]. <https://doi.org/10.14716/ijtech.v12i6.5235>.
10. Stefanescu D. M., Alonso G., Larranaga P., De la Fuente E., Suarez R. (2016). On the crystallization of graphite from liquid iron-carbon-silicon melts. *Acta Materialia*. 107. 102–126. [in English]. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2016.01.047>
11. Campbell J. (2009). A hypothesis for cast iron microstructures. *Metallurgical and Materials Transactions B*. 40B. 786-801. [in English]. <https://doi.org/10.1007/s11663-009-9289-0>.
12. Ershov G. S., Chernyakov V. A. (1978). *Structure and properties of liquid and solid metals*. Moscow: Metallurgiya. [in Russian].
13. Arsetiev P. P., Koledov L. A. (1976). *Metallic melts and their properties*. Moscow: Metallurgiya. [in Russian].
14. Baum B. A. (1979). *Metallic liquids*. Moscow: Nauka. [in Russian].
15. Wilson D. R. (1972). *Structure of liquid metals and alloys*. Moscow: Metallurgiya. [in Russian].
16. Vertman A. A., Samarin, A. M. (1969). *Properties of iron melts*. Moscow: Nauka. [in Russian].
17. Flemings M. (1977). *Solidification processes*. Moscow: Mir. [in Russian].
18. Yatsenko A.I., Khrychikov V.E., Khokhlova T.S., Borysenko A.Yu., Repina N.I., Grushko P.D., Tatarchuk A.V. (2010). *Crystallization and primary structure of constructional steels*. Dnipropetrovsk: Zhurfond. [in Russian].
19. Vazehrad S., Elfsberg J., Dioszegi A. (2015). Study of microstructure and silicon segregation in cast iron using color etching and electron microprobe analysis. *Materials Characterization*. 104. 1-8. [in English]. <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2014.09.008>.
20. Wang G., Chen X., Li Y., Liu Z. (2018). Effects of inoculation on the pearlitic gray cast iron with high thermal conductivity and tensile strength. *Materials*. 11(10). 1876. [in English]. <https://doi.org/10.3390/ma11101876>.
21. Basso A., Toda-Caraballo I., San-Martin D., Caballero F. G. (2020). Influence of cast part size on macro- and microsegregation patterns in a high carbon high silicon steel. *Journal of Materials Research and Technology*. 9(3). 3013-3025. [in English]. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.01.052>.
22. Vaško A. (2022). Advantages of color etching in quality control of graphitic cast irons. *Production Engineering Archives*. 28(4). 319-324. [in English]. <https://doi.org/10.30657/pea.2022.28.40>.

23. *Scientific and Technical Journal of Metal Science and Heat Treatment*, 25(2), 2019. [in Ukrainian].
24. *Scientific and Technical Journal of Metal Science and Heat Treatment*, 25(3), 2019. [in Ukrainian].
25. Hryhorovych V. K. (1976). *Hardness and microhardness of metals*. Moscow: Nauka. [in Russian].

Одержано 19.11.24

Relationship between chemical microheterogeneity of gray cast iron and the structure of flake graphite

A. Yu. Borysenko, Dr. Sc. (Tech.), Sen. Res., asbor75@gmail.com,
ORCID: 0000-0003-2120-0944

T. V. Balakhanova Cand. Sc. (Tech.), tatja.balakhanova@gmail.com,
ORCID: 0000-0003-2493-218X

Iron and Steel Institute of Z. I. Nekrasov NAS of Ukraine, Dniro

Summary

The relationship between chemical microheterogeneity of gray cast iron castings, revealed by the method of color etching in sodium picrate, and the structure of flake graphite was studied. The results of microstructural studies indicate that the crystallization of gray cast iron is accompanied by the emergence of several levels of chemical and structural microheterogeneities of the crystallizing melt, affecting the formation of graphite. Microstructural features indicate that the cast iron melt, which is close in carbon content to the eutectic composition, acquires a dendritic and cellular structure before the formation of graphite. The intensity of chemical microheterogeneity and its topology are hereditarily related to the location, size and shape of graphite inclusions. Flake graphite formed inside and on the periphery of melt cells has different structure and thickness of plates. The enrichment of areas of cast iron melt with silicon leads to the formation of dendrites of primary austenite and primary graphite of the largest size in them. The microhardness of ferrite in the dendrites of former primary austenite is approximately 1.5 times greater than the microhardness of ferrite in areas adjacent to inclusions of primary graphite. A close inverse correlation ($r = -0.93$) was established between the microhardness of ferrite in areas with different liquation intensities and the thickness of graphite flakes located in these areas.

The greatest spread of microhardness values and width of graphite flakes is observed in the most liquated areas enriched with silicon in the center of the cells, corresponding to the location of eutectic colonies.

In the spaces between the cells, graphite is observed with the smallest thickness of the flakes, which are located at the smallest distance from each other.

It is necessary to continue research into the hereditary influence of the structure and physical and chemical properties of high-carbon iron melts on the mechanism of graphite formation and the features of its structure in cast irons.

Keywords: gray cast iron, melt, crystallization, segregation, graphite.