

КРОПІВНИЙ В.М., КРОПІВНА А.В., БОСИЙ М.В., О.В. КУЗИК

(ЦНТУ, м. Кропивницьк)

## РОЛЬ ТЕПЛОВИХ ЕФЕКТІВ У СТРУКТУРОУТВОРЕННІ ПРИ КРИСТАЛІЗАЦІЇ ВИСОКОМІЦНИХ ЧАВУНІВ

*E-mail: vlkropivny@gmail.com*

**АНОТАЦІЯ.** В статті обґрунтовано роль теплофізичних процесів у формуванні включень вермикулярного та кулястого графіту, із забезпеченням їх росту за рахунок дифузії вуглецю з розплаву через аустенітну оболонку. Наведено розрахунок теплових ефектів за теплою утворення реагентів у чавуні та встановлено їх залежність від температурного фактора.

**КЛЮЧОВІ СЛОВА:** кристалізація, кулястий та вермикулярний графіт, реакція, тепловий ефект, формоутворення, чавун

### Вступ

Чавуни зберігають провідне положення серед ливарних сплавів за рахунок зростання виробництва виробів з високоміцних чавунів при прогнозі щорічного збільшення обсягів їх випуску [1].

Результатом модифікування розплавів сфероїдизуючими елементами є формування у структурі високоміцного чавуну включень кулястого та вермикулярного графіту. Утворення вермикулярного графіту у чавунах має ряд спільних закономірностей з формуванням кулястого графіту.

Гіпотези стосовно механізму формування кулястого графіту на сьогодні все ще не дають загальноприйнятого теоретичного пояснення протікаючих явищ та залишаються дискусійними. Вермикулярний графіт, на відміну від кулястого, має розгалужену просторову будову, але у них є багато спільних закономірностей:

- обидві форми графітних включень утворюються у результаті модифікуючої обробки розплаву магнієм або рідкоземельними металами;
- у структурі високоміцних чавунів можуть бути одночасно присутніми включення як кулястого, так і вермикулярного графіту;
- утворення цих двох форм графіту пов'язане з підвищеними значеннями переохолодження розплаву;
- включення графіт знаходяться в оточенні феритних ділянок з підвищеним вмістом кремнію та пониженим – марганцю.

Розкриття механізму утворення кулястого графіту сприятиме відкриттю широких можливостей для управління його структурою і властивостями, дозволить розробляти ефективні технологічні процеси для отримання литих виробів різного призначення з високоміцного чавуну.

### Матеріали і методи

Сучасні методи досліджень, створюють нові можливості для підтвердження або спростування справедливості існування тієї чи іншої гіпотези механізму утворення кулястого та вермикулярного графіту у високоміцному чавуні.

При поясненні формування кулястого графіту після модифікування магній - вміщуючими добавками однією з перших була теорія «газових бульбашок», які формуються з парів магнію. Формування включень кулястого графіту пов'язують з його тотожністю формі газової бульбашки не знаходить достатнього підтвердження[2]. З'являються спроби трансформувати бульбашкову теорію новими експериментальними даними, наприклад, відкриттям нової модифікації вуглецю - фулеренів і виявлення їх в залізобуглецевих сплавах [3]. Однак дані теорії не пояснюють механізму формування у модифікованому чавуні вермикулярного графіту.

На думку авторів роботи [4] утворення кулястої форми графіту в чавуні пов'язано з очищенням від поверхнево-активних елементів та їх нейтралізацією. Результатом такого очищення є зміна співвідношень поверхневого натягу між розплавом та базисною і призматичною площинами графітних включень, що частково дозволяє пояснити явища формування як кулястого, так і вермикулярного графіту.

Ряд дослідників [5,6] пов'язує утворення компактних форм графіту за рахунок їх формування в процесі евтектичної кристалізації включень графіту завдяки дифузії вуглецю через аустенітну оболонку. Зазначається, що певну роль в процесах формування графіту при кристалізації чавунів відіграють умови теплопередачі від

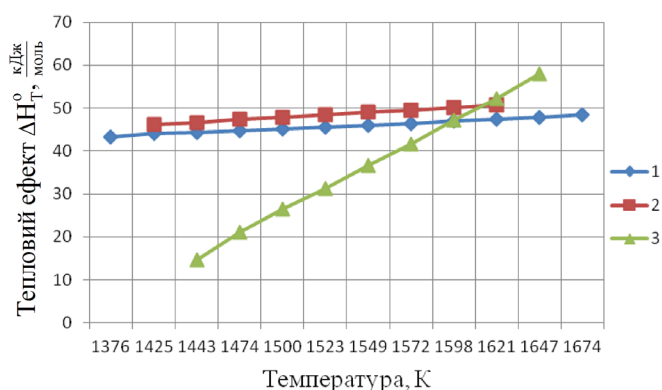
поверхонь на фронтах кристалізації, на яких відбуваються екзотермічні реакції (кристалізація аустеніту та виділення графіту з рідкого чи твердого розчину вуглецю в залізі).

**Експерименти та результати**

Високоміцний чавун виплавляли в індукційній печі, хімічний склад якого відповідав марці ВЧ 500-2 (ДСТУ 3925-99). Розплав модифікували у ковші сендвіч-методом до вмісту Mg залишок = 0,035% лігатурою VL 63 (O) з вмістом Mg= 6.3%, Ca=1,8%, Si=46%, Fe – решта. Модифікований чавун заливали у графітові тиглі ємністю 1 кг і 5 кг. Після формування біля поверхні тигля кірки товщиною до 10 мм, рідкий залишок виливали і проводили наступне швидке охолодження закристалізованої кірки водному соляному розчині.

Результати дослідження мікроструктури показали, що розміщені включення кулястого графіту навіть безпосередньо біля внутрішньої поверхні кірки знаходяться в оточенні феритної оболонки. Включення вермикулярного графіту виходять на поверхню розділу торцями і феритом вони оточені лише по бокам, а їх торці в окремі періоди процесу кристалізації мали контакт з розплавом. Слід відзначити, що у загартованих зразках у зоні торців включення вермикулярного графіту мають малу товщину (до 3 мкм), що свідчить про суттєву роль у подальшому формуванні дифузійного росту графіту через аустенітну оболонку. Таким чином, після формування зародка кулястого графіту відбувається повне оточення його аустенітною оболонкою, а при формуванні вермикулярного графіту лише часткове. Кількість евтектичних осередків у чавуні з пластинчастим графітом приблизно у 100 разів менша, у порівнянні з чавуном з кулястим графітом (до  $5 \cdot 10^{13} \text{ м}^{-3}$ ).

Згідно з методикою розрахунку теплових ефектів реакцій за теплою утворення реаген-



**Рис. 1.** Залежність теплових ефектів реакцій від температурного фактора 1 – реакція  $\text{Fe}_p \rightarrow \text{Fe}_{\text{тв}}$ ; 2 – реакція  $[\text{C}]\text{Fe} \rightarrow \text{C}_{\text{г}}$ ; 3 – реакція  $[\text{C}]\text{Fe} \rightarrow \text{Fe}_3\text{C}$

тів у чавуні, на основі теплофізичних констант [7], було проведено термодинамічний розрахунок теплових ефектів реакцій:  $\text{Fe}_p \rightarrow \text{Fe}_{\text{тв}}$ ;  $[\text{C}]\text{Fe} \rightarrow \text{C}_{\text{г}}$ ;  $[\text{C}]\text{Fe} \rightarrow \text{Fe}_3\text{C}$ . Результати оцінки теплових ефектів реакцій за різних діапазонів температур наведено на рис. 1.

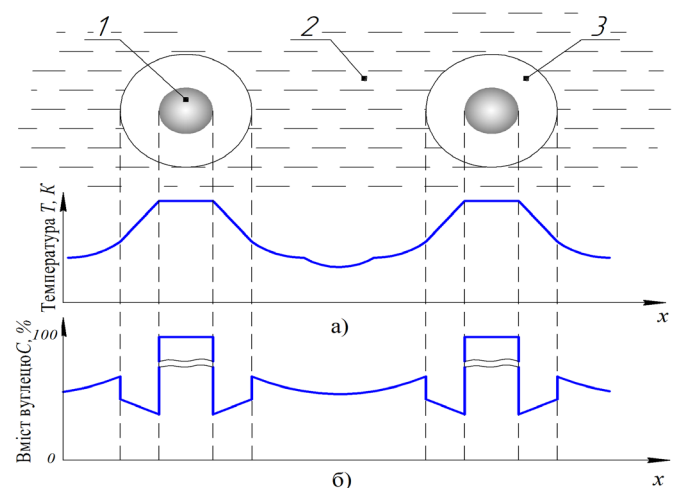
Мольні частки (вмісту) Fe і C в чавуні дорівнюють 96 г і 4 г відповідно. Враховуючи молярні маси Fe і C:  $M(\text{Fe})=56 \text{ г/моль}$ ;  $M(\text{C})=12 \text{ г/моль}$  їх мольні частки дорівнюють:

$$n_{(\text{Fe})} = \frac{m_{\text{Fe}}}{M_{(\text{Fe})}} = \frac{96 \text{ г}}{56 \text{ г/моль}} = 1,714 \text{ моль};$$

$$n_{(\text{C})} = \frac{m_{\text{C}}}{M_{(\text{C})}} = \frac{4 \text{ г}}{12 \text{ г/моль}} = 0,333 \text{ моль}.$$

При цьому кількість теплоти, яка виділяється при кристалізації аустенітної фази по межі поділу «розплав – аустеніт» становить 76,69 кДж на 1 кг розплаву. Відповідно, кількість тепла, яке виділяється на межі «аустеніт – компактне графітне включення» складає 15,39 кДж на 1 кг розплаву. Такий характер розподілу ділянок виділення тепла визначає, що оточуюча включення компактного графіту тверда аустенітна фаза буде мати суттєво вищу температуру ніж у розплаву (рис. 2).

Утворення суцільної перегрітої аустенітної оболонки відбувається за рахунок зниженого вмісту в ній вуглецю і відповідно підвищення температури солідусу. В свою чергу це створює умови для інтенсивної дифузії вуглецю через аустеніт з розплаву евтектичного складу до поверхні графітних включень. Особливі теплофізичні умови формування аустенітних оболонок приводить до ліквідаційного перерозподілу кремнію та марганцю, наслідком чого є формування



**Рис. 2.** Розподіл температур а) та вмісту вуглецю б) в евтектичній оболонці, під час росту компактного включення графіту 1 – графіт; 2 – розплав; 3 – аустенітна оболонка

феритних оболонкок навколо включень компактного графіту.

### ВИСНОВКИ

На основі розрахунку теплових ефектів за теплою утворення процесів утворення твердих

фаз обґрунтовано роль теплофізичних процесів у формуванні включень вермикулярного та кулястого графіту із забезпеченням їх росту за рахунок дифузії вуглецю з розплаву через аустенітну оболонку.

### ЛІТЕРАТУРА

1. Гнатуш В. А. Состояние и перспективы развития мирового рынка литья из чугуна с шаровидным графитом / В. А. Гнатуш, В. С. Дорошенко // Литье Украины. – 2017. – №2 (198). – С. 24–33.
2. Соценко О. В. Компьютерная DLA-модель формирования шаровидного графита в высокопрочном чугуне / О. В. Соценко // Металл и литье Украины. – 2009. – № 9. – С. 3–9.
3. Аулін В. В. З'ясування природи процесів структурних та фазових перетворень в залізвуглецевих сплавах на основі утворення молекулярної форми вуглецю / В. В. Аулін, В. М. Кропівний, О. В. Кузик // Зб. наук. праць КНТУ. Техніка в с/г виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація. – Кіровоград, 2016. – Вип. 29. – С. 94–104.
4. Мильман Б. С. Основные факторы образования шаровидного графита в чугуне / Б. С. Мильман, Н. Г. Осада, Л. В. Ильичева // Основы образования литейных сплавов. – М.: Наука, 1970.
5. Комаров О. С. Формирование структуры чугуновых оливок / Комаров О. С. – Мн.: Наука и техника, 1977. – 224 с.
6. Toshiro Owadano. Quantitative Metallographic Study of the Solidification of Spheroidal Graphite Cast Iron / Owadano Toshiro, Yamada Koji, Torogoe Kiyoshi // Trans. JIM. –1977. – Vol.18. – P. 871–877.
7. Сабірзянов Т.Г. Теплотехніка ливарних процесів / Т. Г. Сабірзянов, В.М. Кропівний. – Кіровоград: КНТУ, 2005. – 403 с.

---

## A ROLE OF THERMAL EFFECTS IS IN GELATION DURING CRYSTALLIZATION OF HIGH-STRENGTH CAST-IRONS

**SUMMARY:** In the article the role of thermo physical processes in the formation of inclusions of vermicular and globular graphite is substantiated, ensuring their growth due to the diffusion of carbon from the melt through the austenite shell. The calculation of thermal effects with the heat of formation of reagents in cast iron is given and their dependence on the temperature factor is established.

**KEYWORDS:** *cast iron, globular and vermicular graphite, formations, crystallization, thermal reaction, effect.*