

---

## ВПЛИВ МОДИФІКУВАННЯ РІДКІСНОЗЕМЕЛЬНИМИ МЕТАЛАМИ НА КРИСТАЛІЗАЦІЮ ЗАЛІЗОВУГЛЕЦЕВИХ СПЛАВІВ

---

Босий М. В., Кузик О. В.

DOI <https://doi.org/10.30525/978-9934-26-653-9-3>

### ВСТУП

В Україні є перспективні родовища рідкісноземельних металів (РЗМ), що є стратегічною перевагою для промисловості. РЗМ виконують важливу роль у розвитку багатьох галузей виробництва<sup>1,2</sup>.

Досліджувалися відносно чисті синтетичні Fe – C – Si сплави різної степені евтектичності. Вміст елементів в досліджуваних сплавах змінювався в інтервалі 2,60-3,85 % C; 1,81-3,38 % Si; 0,01 % Mn; 0,004-0,016 % S; 0,005 % P; 0,356 % Ce<sup>3</sup>.

Проводили дослідження модифікування сплавів фероцерієм при 1450 °C які затверджували в тиглі зі швидкістю охолодження ~ 90 град/хв. Виконувався термічний аналіз процесу кристалізації, металографічні дослідження виливків.

Також проводили модифікування при розливанні металу в тонкостінні металеві форми діаметром 16 мм з товщиною стінки 0,15 мм, які розташовані в підігрійтій шамотній обоймі. При кристалізації, яка контролюється за термічною кривою, форми витягувалися з обойми і закалювалися в 10 %-му розчині NaCl.

Модифікування ще виконувалося для технічних чавунів наступного складу: 3,14-3,28 % C; 2,65-2,75 % Si; 0,67 % Mn; 0,032 % S; 0,005 % P; 0,290 % Ce. Метал виплавлявся в плавильній печі ємністю 50 кг. Після перегріву до 1435-1457 °C розплав модифікували присадками РЗМ

---

<sup>1</sup> Шпильовий Л., Білецький В. Роль рідкісних і рідкісноземельних металів у 5-6 технологічних устроях: перспективи України. *Геотехнології*. 2022. № 5. С. 40-44.

<sup>2</sup> Новосад І.Я., Руська Р.В., Пласконь С.А. Рідкоземельні метали: ключові компоненти сучасних технологій. *Інноваційна економіка*. 2024, вип. 1. с. 222-38. URL: <https://inneco.org/index.php/innecoa/article/view/>

<sup>3</sup> Афанасьєва О.В. Матеріалознавство та конструкційні матеріали: навч. посіб. Харків: ХНУРЕ, 2016. 188 с.

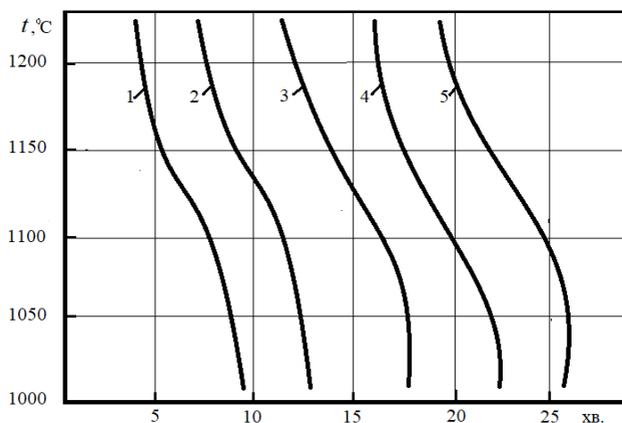
і розливали у форму з різним тепловим опором. Швидкість охолодження проб діаметром 50 мм, довжиною 200 мм змінювалися в діапазоні 65-325 град/хв<sup>4,5</sup>.

Таким чином, треба вивчити ряд сплавів у широкому інтервалі зміни хімічного складу, швидкостей охолодження і вмісту модифікаторів.

### 1. Модифікуючий вплив РЗМ на залізуглецеві сплави

Дослідження проводили для заевтектичних сплавів для дослідів, отриманих при ідентичних умовах модифікування і кристалізації. Із проведених дослідів випливає, що невеликі добавки церію приводять лише до деякого подрібнення евтектичного графіту. Зі збільшенням вмісту церію спостерігається утворення компактного графіту. В структурі з'являються евтектичні карбіди і подальше збільшення церію приводе до формування колоній аустенітно-карбідної евтектики. При максимальних добавках церію евтектика з тонко диференційованим графітом стає переважною складовою первинної структури. Число кулястих включень графіту різко знижується зі зникненням евтектичних карбідів.

На (рис. 1) наведені криві охолодження описуваних зразків.



1, 2, 3, 4, 5 – вміст церію відповідно 0,01; 0,040; 0,163; 0,211; 0,358

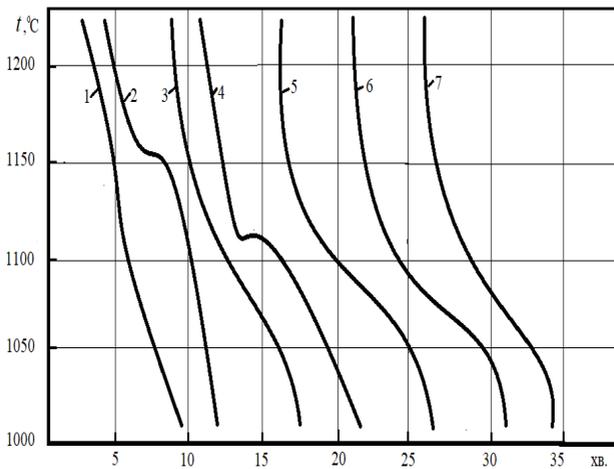
**Рис. 1. Криві охолодження заевтектичного чавуну**

<sup>4</sup> Кшнякін В. С., Опанасюк А.С., Дядора К.О. Основи фізичного матеріалознавства: навч. посіб. у 2 ч. Суми. Сумський державний університет, 2015. Ч. 2. 291 с.

<sup>5</sup> Антонова Г.В., Вершков О.О., Мацулевич О.Є. Матеріалознавство. Технологія конструкційних матеріалів. *Матеріалознавство*: навч. посіб. Запоріжжя. 2024. 215 с.

Криві охолодження описуваних зразків (рис. 1) показують зміщення температурного рівня евтектичних заупинок, які закономірно пов'язанні з вмістом церію. Переохолодження рідкої фази збільшується аж до вмісту церію, забезпечуючи максимальну ступінь відбілу. При подальшому підвищенні вмісту церію відбувається формування тонкої графітної евтектики і рівень температурних заупинок при евтектичній кристалізації починає збільшуватися.

Описаний характер процесу структуроутворення є загальним для всіх досліджуваних залізвуглецевих сплавів. На (рис. 2) наведені термічні криві зразків частини дослідів.



1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 – вміст церію відповідно 0,01; 0,033; 0,044; 0,073; 0,089; 0,187; 0,240

**Рис. 2. Криві охолодження доевтектичного чавуну**

При співставленні термічних кривих зразків частини дослідів при швидкості охолодження ( 67, 121 і 173 град./хв.) можна вказати на те, що різниця в хімічному складі і швидкості охолодження не позначається на закономірній змінні переохолодження розплавів, що обумовлено вмістом модифікаторів.

Точні характеристики концентраційних зон модифікування, забезпечуючи відповідну форму графітних включень і певну ступінь відбілу, пов'язані зі складом сплаву і швидкістю охолодження.

Поява компактного графіту супроводжує збільшення числа евтектичних карбідів. Зі зростанням швидкості охолодження концентраційна зона

формування компактного графіту зміщується в напрямку менших концентрацій церію. Важливою особливістю високоцерієвих сплавів є утворення тонкої графітної евтектики, що приводить до різкого зниження числа евтектичних карбідів і компактних графітних включень.

Механізм утворення колоній тонкої графітної евтектики вивчався як на синтетичних, так і на промислових сплавах. На кінцевому етапі кристалізації сплаву колонії графітної евтектики приходять в зіткнення і набувають поліедричну форму, границі колоній при цьому збагачуються лікватами.

За даними дослідження великої кількості колоній, структурним центром окремої колонії є найбільш компактне графітне включення, яке дає початок графітному скелету колонії, яка формується шляхом регулярного розгалуження радіально направлених пластин.

Досліджено розподіл церію, ітрію у сплавах, що містять від тисячних часток відсотка до оптимальної кількості (забезпечуючи отримання кулястих зерен графіту). При дослідженні використовували сучасні методи аналізу.

Розподіл глобуляризуючого елемента в модифікованому чавуні можна показати на прикладі церієвого сплаву. При невеликому вмісті церію в сплаві 0,005% та пластинчастій формі графіту спостерігається переважне зосередження церію у графітній фазі<sup>6,7</sup>.

У сплаві, що містить 0,04% церію з компактною, рідше глобулярною, формою графіту має місце переважна локалізація церію в графіті. При цьому деяка кількість церію є в неграфітній частині сплаву і розподіляється за межами первинної структури.

У церієвому чавуні з підвищеним вмістом модифікатора 0,30 % при збагаченні церієм графітної фази спостерігається переважна локалізація його в неграфітній частині сплаву, по межах евтектичних колоній, що мають не феритну, а перлітну металеву основу.

Так при вмісті церію в чавуні, що дорівнює 0,005%, його концентрація в графітній фазі досягає 0,027-0,034%, в неграфітній частині сплаву – лише 0,0024%. У чавуні з 0,04% церію концентрація його в кулястих зернах графіту досягає 0,27%, у пластинчастих та компактних – 0,15% – 0,25%, при одночасному зниженні його вмісту в неграфітній частині сплаву – 0,015-0,023%. У церієвому чавуні, вмістом 0,31% церію, поряд зі збагаченням церієм зерен графіту відбувається значне зосередження модифікатора за межами первинної структури при його вмісті 0,58-0,72 %. При великих

<sup>6</sup> Афтанділянц С. Г., Зазимко О. В., Лопатько К. Г. Матеріалознавство: підручник. К.: Вища освіта, 2012. 548 с.

<sup>7</sup> Матеріалознавство: навч. посіб. / Бузило В.І. та ін. Дніпро: НТУ «ДП», 2021. 243 с.

кількостях церія в чавуні спостерігається його значне збагачення ним не графітової частини сплаву при зниженні його концентрації в графіті.

У відповідності зі зміною вмісту церію в чавуні і графітної фази змінюється і форма включень графіту: пластинчата при невеликих концентраціях церію в чавуні в графітній фазі, куляста – при оптимальних концентраціях церію в чавуні і максимальному вмісті його в графіті. Аналогічні закономірності в розподілі модифікуючого елемента в чавуні, в залежності від його концентрації, і форма включень графіту, які формуються в сплаві, встановлені також і для ітрію<sup>8,9,10</sup>.

Експериментальні результати показують, що при охолодженні модифікуючого чавуну при зародженні і зростанні графітної фази, модифікатор є поверхнево активним елементом по відношенню до графіту, переважно адсорбується зернами графіту. Це приводить до виникнення і функціонування дифузійних потоків глобуляризуючого елемента, направлених до графітної фази, які особливо інтенсивно протікають в рідкому чавуні.

Наряду з формуванням графітної фази в модифікованому чавуні зароджуються і зростають дендрити аустеніту, об'єднані церієм. В цих умовах при визначеній, але не повній локалізації глобуляризуючого елемента в графіті його розподіл в не графітовій частині сплаву має нерівномірний характер за рахунок пасивного відтиснення атомів модифікатора в міждендритний простір. Підвищення концентрації глобуляризуючого елемента в міждендритному просторі первинних дендритів аустеніту збільшує можливість утворення хімічних з'єднань  $\text{CeFe}_5$ ,  $\text{YFe}_9$ . Це приводить до появи другого дифузійного потоку модифікатора, направленого до хімічної сполуки, що формується в міждендритному просторі.

Всі ці процеси суттєво впливають на будову графітної фази в чавуні. Так модифіковані чавуни глобуляризуючим елементом в кількостях, які не перевищують оптимальні концентрації за рахунок переважно абсорбції глобуляризатора в графіті забезпечує невелирровку коефіцієнтів  $\alpha_i$  поверхневого натягу по  $i$ -граням зерна графіту і, як випадок цього, у відповідності з правилом Гібса-Кюри-Вульфа – квазіфероїдизацію

<sup>8</sup> Босий М.В., Боса О.А. Вплив рідкісноземельних металів на структуру та властивості залізуглецевих сплавів. *Збірник наукових праць НУК*. Миколаїв: Гельветика. 2025. № 3 (501). С. 42–48.

<sup>9</sup> Баглок Г., Троцан А., Уськова Н., Мамонова А., Молчановська Г. Властивості та структура чавуну, модифікованого ЛГМ-технологією. *Процеси лиття*. 2024. 156(2), С. 29–37.

<sup>10</sup> Верховлюк А.М., Нарівський А.В., Могилатенко В.Г. Технології одержання металів та сплавів для ливарного виробництва: навч. посіб. / за ред. академіка НАН України В.Л. Найдека. К.: Видавничий дім “Вініченко”, 2016. 224с.

зерна графіту. Підвищення концентрації модифікатора в чавуні викликає об'єднання графітної фази модифікованим елементом, при якому  $\alpha_c = \bar{\alpha}$  вже не реалізується і графіт набуває деглобуляризований карбовидний вигляд<sup>11</sup>. Результати розподілу РЗМ і ітрію в чавунах дуже добре узгоджуються з літературними даними.

## 2. Дослідження впливу РЗМ на кристалізацію залізівуглецевих сплавів залізівуглецевих сплавів

Вивчали взаємодію РЗМ на кристалізацію чавуну та його структуру в залежності від умов охолодження.

Для дослідження кристалізації чавуну використовували загартовано структурний метод. При цьому використовували синтетичний чавун, який містить 4,0 % С; 3,00% Si; 0,05% Mn; 0,013 % S; 0,014 % P, модифікований добавками ітрію в межах 0,03 – 1,0 %. Встановлено, що введення в сплав ітрію в межах 0,03-1,0 % не вносить принципових змін в послідовність кристалізації. В чавуні з добавкою до 0,1% ітрію кристалізація починається з виділення графіту і закінчується евтектичним розпадом рідини на А+Г і А+Ц. Збільшення кількості введеного в розплав ітрію в досліджуваних межах сприяє стабілізації рідини, що позначається в зменшенні температури кристалізації надлишкової фази і евтектики. При введенні добавок ітрію більше 0,1% поряд з графітом із рідини кристалізується первинний цементит<sup>12, 13</sup>.

Встановлена мікроскопічна картина формоутворення графітних включень в залежності від величини добавки ітрія.

В початковому сплаві первинний графіт з моменту появи до завершення кристалізації має пластинчасту форму. В сплавах з добавками 0,03 – 0,05 % ітрію невеликі включення графіту мають кулясту форму. Але в процесі росту вони трансформуються і до повного затвердіння сплаву набувають пластівчасту форму із гострим відгалуженням.

Збільшення кількості введеного в чавун ітрію до 0,1% приводить до того, що графітні включення досягають великих розмірів, залишаючись кулястими більш тривалий проміжок часу. Виявляється характерна для кулястого графіту промениста структура, що зберігається в центральній

<sup>11</sup> Лисенко О.Б., Калініна Т.В. Матеріалознавство: конспект лекцій. Кам'янське: ДДТУ, 2019. 268 с.

<sup>12</sup> Іванова Л.Х., Колотило Є.В., Мирошніченко Г.О. Рідкісноземельні метали у валкових чавунах // Інформаційні технології в металургії та машинобудуванні. ІТММ'2022: тези доповідей міжнародної науково-практичної конференції. Дніпро: НМетАУ, 2022. С.30-34.

<sup>13</sup> Іванова Л.Х., Колотило Є.В., Хитько О.Ю., Терехін В.О. Отримання і застосування комплексних модифікаторів з рідкісноземельними металами. *Метал і лиття України*, 2020. т.28. №1(320). С.30-33.

частині кінцевих утворень. На периферійних ділянках таких включень графіт кристалізується у вигляді пластинчастих відгалужень<sup>14,15</sup>.

Подальше збільшення кількості ітрію у сплаві сприяє вдосконаленню форми графіту.

Для дослідження сумісного впливу швидкості охолодження та добавок РЗМ на процес структуроутворення чавун після модифікування виливали у форму з спрямованим відведенням теплоти. Температурні криві кристалізації записували за допомогою термопар у чотирьох точках виливка, що розташовуються на вертикальній осі.

Як модифікатори використовували церій, лантан та ітрію частотою 99,5% основного елемента. Кількість модифікуючої добавки змінювалася в межах від 0,03 – 1,0 %.

На рис. 3 представлена залежність температури початку евтектичного перетворення чавуну від кількості введеного ітрію при швидкостях охолодження 1,78 град/сек (крива 1) та 3,68 град/сек (крива 2). Якісно аналогічна залежність спостерігається для церієвого та лантанового чавуну в абсолютних величинах зниження температури. Найбільш ефективно знижує температуру ітрію, потім вже церій і лантан.

Збільшення добавки ітрію від 0,03% до 0,3% суттєво знижує температуру початку евтектичної реакції. При цьому в структурі чавуну з'являється цементит, графіт набуває компакту кулясту форму. Подальше збільшення присадки ітрію до 1,0 % призводить до значного виділу чавуну.

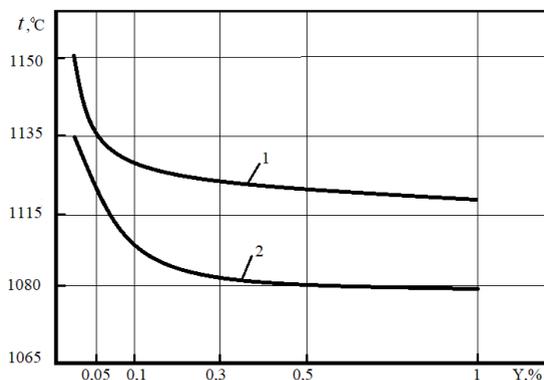
РЗМ покращують ливарні властивості та зменшують усадкоутворення, а також і покращують рідкоплинність сплаву.

Залізовуглецеві сплави при використанні РЗМ застосовуються для виробництва високоякісних виливків із високоміцного чавуну, модифікованого чавуну і ще легованих сталей для машинобудування, автомобілебудування та сільськогосподарської техніки.

Для визначення впливу РЗМ на час евтектичного перетворення використовували криві охолодження в ділянках виливків з мінімальною швидкістю охолодження, де температурна зупинка фіксується найбільш чітко. При побудові графічних залежностей у розрахунок приймали охолодження виливка від початку кристалізації евтектики до температури 1050 °С.

<sup>14</sup> Ямшинський М. М., Федоров Г. Е. Вплив процесів додаткового легування, мікролегування та модифікування на Властивості хромарганцевого чавуну. *Вісник Донбаської державної машинобудівної академії*. 2017. № 2 (41). С.82-88.

<sup>15</sup> Фесенко К.В. Модифікування чавуну в ливничій системі для виробництва двошарових виливків: дис.... канд. техн. наук: 05.16.04. Київ, 2016. 153 с.



- 1 – швидкість охолодження 1,78 град/сек;  
 2 – швидкість охолодження 3,68 град/сек

**Рис. 3. Зміна температури початку евтектичного перетворення чавуну в залежності від кількості введеного ітрію**

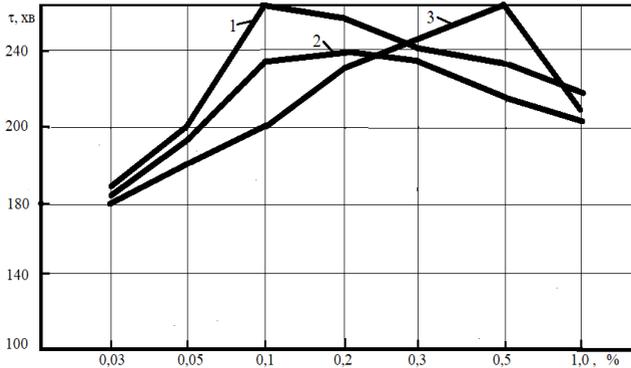
Зі збільшенням добавки РЗМ час евтектичної кристалізації збільшується і має максимальне значення для ітрієвого та церієвого чавунів при введенні 0,1 – 0,3%, а для лантанового при введенні 0,5% модифікатора. Подальше зростання добавок РЗМ призводить до зменшення часу кристалізації евтектики, проте мінімальним воно залишається для вихідного чавуну та чавуну з невеликими до 0,05% добавками РЗМ (рис. 4).

Максимальна тривалість евтектичної кристалізації відповідає утворенню в структурі чавуну кулястої та перехідних форм графіту за наявності незначної кількості цементиту. Зменшення тривалості кристалізації, викликане подальшим збільшенням модифікуючої добавки пов'язане зі зменшенням кількості графіту в структурі сплаву.

Хід температурної кривої кристалізації відображає тепловий баланс між теплою кристалізації, та відведенням теплоти. При оцінці отриманих результатів з цієї точки зору збільшення часу охолодження вилівка в інтервалі температур евтектичного перетворення викликане введенням РЗМ не може бути пояснено зміною фазового складу евтектики оскільки, як було встановлено при металографічному дослідженні РЗМ відбілює чавун, зменшуючи тим самим теплоту. Звідси випливає, що причиною явища, що спостерігається, звісно, служить зменшення швидкості кристалізації в модифікованих чавунах.

До появи суцільної аустенітної оболонки навколо кулястих утворень графіту такому ефекту може сприяти адсорбція РЗМ на графіті, що

призводить до збільшення енергії активації процесу кристалізації та суттєвого переохолодження сплаву, що ускладнює дифузійні процеси.



1,2,3 – криві ітрієвий, церієвий, лантановий чавун

**Рис. 4. Час охолодження виливка від початку евтектичного перетворення до температури 1050 °С залежно від введеного модифікатора**

Встановлено, що в чавуні, модифікованому 0,3% ітрію, концентрація модифікатора в окремих ділянках кулястих графітних включень досягає 0,81 – 1,21%. Вивчення мікроструктур виливків із чавунів, модифікованих РЗМ, показало, що вплив церію, лантану та ітрію на структуру чавуну є принципово ідентичним. Їх добавки, починаючи від 0,03% ітрію і 0,05% церію та лантану, виявляють відбілюючу дію на структуру чавуну. Зі збільшенням кількості модифікатора, що вводиться, глибина відбілу збільшується від 3-4 мм у чавуні з добавками до 0,05% до 40-50 мм у чавуні, модифікованому 1,0 % РЗМ. Разом з найбільшим відбілюючим впливом на структуру чавуну, ітрій має найефективніший сфероїдизуючий вплив на форму графіту. За ним за рівнем ефективності слідує далі церій і лантан.

Сфероїдизуючий вплив РЗМ на формування графіту значною мірою залежить від умов відведення теплоти. У структурі виливка на відстані 3-5 мм від холодильника утворюється кулястий графіт (діаметр глобулів 10-15 мк) при добавці ітрію 0,03%, а церію та лантану 0,05%, у той час як в іншому об'ємі виливка графіт має пластинчасту або пластівчасту форму. У зоні виливка, що розташовується на відстані 60-65 мм від холодильника, введення ітрію тільки в кількості 0,35-0,4% і церію 0,4-0,45% забезпечує

сферидизацію графіту (діаметр глобулів 50-80 мк) тобто ефективна кількість модифікатора збільшується на порядок<sup>16, 17, 18, 19</sup>.

Модифікування сплавів РЗМ, наприклад, ітрієм, церієм та іншими є процес введення цих елементів до рідкого розплаву для покращення їх механічних властивостей, жаростійкості, зносостійкості, а також і ливарних властивостей залізвуглецевих сплавів. РЗМ діють як модифікатори при кристалізації сплаву, а також впливають на структуру кристалізації, зменшуючи також пористість і звісно покращуючи мікроструктуру, це важливо для деталей, які будуть працювати в надзвичайних умовах. Модифікування РЗМ покращує механічні властивості сплавів, тобто, збільшуючи міцність, пластичність та завдяки кулястій формі графіту здійснюється також і модифікування кристалічної решітки сталей<sup>20</sup>.

РЗМ очищують розплав, вони можуть зв'язувати шкідливі домішки – сірку і фосфор з утворенням шлаків.

Модифікатори додають у вигляді феро-сполук або ще чистих металів під час заливання металу в ківш, ще використовують спеціальні добавки, які містять РЗМ.

Використовують жаростійкі сталі для виготовлення деталей, які працюють при дуже високих температурах.

В чавунах використовують РЗМ для покращення як їх механічних властивостей, так і ливарних характеристик, наприклад, це стосується виробництва деталей машин для машинобудування і автомобілебудування.

Можна вважати, що модифікування РЗМ – це один із ефективних методів для створення високоякісних сплавів з покращеними експлуатаційними характеристиками.

<sup>16</sup> Бубликов В.Б., Нарівський А.В., Бачинський Ю.Д., Ясинський О.О. Високоміцний чавун зі зміцненням кремнієм та нікелем  $\alpha$ -твердим розчином. *Метал та лиття України*. 2020. Том 28. № 3. С. 63-68.

<sup>17</sup> Лук'яненко І.В., Кивгило Б.В., Биба Є.Г., Ямшинський М.М., Ковальчук О.Г. Вплив легування, мікролегування та модифікування на властивості зносостійких хромомарганцевих чавунів. *Процеси лиття. Кристалізація та структуроутворення сплавів*. 2025. № 3 (161). С.52-61.

<sup>18</sup> Тростянчин А.М. Концепція застосування водневої обробки для удосконалення структурно-фазового стану та властивостей функціональних матеріалів на основі сплавів рідкісноземельних та перехідних металів: дис... д-ра техн. наук : 05.02.01. Львів. 2022. 116 с.

<sup>19</sup> Іванова Л.Х., Колотило Є.В., Хитько О.Ю., Терехін В.О. Вплив комплексних модифікаторів на структуру чавунів з різним вмістом сірки. *Метал та лиття України*. 2022. Том 30. № 2 (329). С.30-34.

<sup>20</sup> Бубіс А., Федоров Г. Підвищення властивостей жаростійких сталей для роботи в екстремальних умовах мікролегування і модифікування. *Нові матеріали і технології в машинобудуванні (Праці Міжнародної науково-технічної конференції)*. 2016. (6), С. 158–159.

## ВИСНОВКИ

Аналіз морфології колоній аустенітно-карбідної евтектики дозволяє зробити висновок, що утворення графіто-аустенітної евтектики являє типовий випадок росту двох евтектичних фаз. Зародження колоній відбувається в умовах великих переохолоджень. Але висока ступінь диференціювання евтектики забезпечує суттєве підвищення лінійної швидкості кристалізації. Інтенсивне виділення теплоти кристалізації виражається в підвищенні температурного рівня евтектичних зупинок на термічних кривих.

Зразки сплаву різного складу гартувалися на різних етапах кристалізації і піддавалися аналізу. Металографічні дослідження дозволили зробити висновок про існування закономірностей зв'язку між структурою сплава і параметрами модифікування.

Встановлена нерівномірність розподілу церію між структурними складовими сплаву. Присутність в цементиті церію не виявлена. В модифікованих сплавах часто виявляються графітні включення з чітко вираженим внутрішнім ядром. Дослідження показують, що церієм збагачені об'єми графітної фази, які в процесі кристалізації знаходяться в контакт з рідиною.

Зважаючи на встановлений позитивний вплив інтенсифікацій відведення теплоти на формування кулястого графіту, а також результати досліджень субструктури графітних утворень у чавуні, наведено такі міркування про можливий механізм сфероїдизуючої дії РЗМ. Дегазація розплаву і насамперед його глибоке розкислення за рахунок утворення стійких оксидів у поєднанні з істотним переохолодженням чавуну призводить до розщеплення графітних кристалів та обмеження включення базисними площинами. При значній анізотропії властивості кристалічних ґрат графіту можуть мати місце вибіркової адсорбція РЗМ на торцевих гранях графітних кристалах, що також, як і високий ступінь переохолодження, забезпечує нівелювання швидкостей зростання різних граней.

На підставі таких уявлень про вплив РЗМ на процес формування графітних включень добре можна пояснити різноманіття форм графіту та його трансформацію в процесі зростання в чавунах, модифікованих різними добавками ітрію.

РЗМ звісно суттєво виконують вплив модифікування на кристалізацію сплавів, вони діють як модифікатори, це впливає на розмір, форму, а також фазовий склад кристалів, що сприяє утворенню нових фаз, ще також можуть впливати і на огранку самих кристалів. Також впливають на швидкість нуклеації і ріст кристалів, при

цьому зміщується рівновага, це призводить до отримання відповідно дрібнозернистої структури та зміцнення сплавів і покращення їх механічних властивостей.

Основні механізми впливу РЗМ – це зміна швидкості нуклеації, а також РЗМ можуть виступати як центри кристалізації, збільшуючи кількість центрів зародкоутворення і, відповідно, зменшуючи розмір зерен. Взаємодіючи з іншими елементами сплаву, вони формують нові, більш за все тугоплавкі сполуки, які впливають на структуру.

РЗМ будуть концентруватися на поверхнях росту кристалів, при цьому змінюється їх морфологія та знижуються дефекти, це покращує як властивості, так і запобігає руйнуванню кристалів.

РЗМ можуть також зміщувати фазові рівноваги, при цьому сприяють виділенню нових фаз або ще стабілізації певних структур, це важливо для сплавів з високою міцністю.

Завдяки взаємодії з іншими домішками (наприклад, із залізом), РЗМ також сприяють, як зменшенню дефектів, так і покращенню якості їх кристалічної структури. РЗМ покращують механічні властивості, при цьому відбувається подрібнення зерна та утворення дисперсних фаз, що зміцнює сплав.

Завдяки РЗМ можна створити нові сплави з унікальним фазовим складом та з підвищеними характеристиками.

Отже, РЗМ є досить потужними модифікаторами, що дозволяє керувати процесом кристалізації сплавів для досягнення їх необхідної мікроструктури, а також властивостей сплавів.

## **АНОТАЦІЯ**

Розглядається проблема модифікування залізовуглецевих сплавів рідкісноземельними металами (РЗМ) – це процес додавання цих елементів (лантану, церію, ітрію тощо) для покращення їх, ливарних і механічних властивостей тобто, покращення пластичності, міцності, зносостійкості та формування дрібнозернистої структури шляхом їх впливу на кристалізацію та фазові перетворення для високоякісних чавунів та сталей. Ключовими аспектами модифікування РЗМ є вплив на структуру, РЗМ також десульфурують сплави та звісно зв'язують шкідливі домішки (сірку, кисень, азот), утворюючи при цьому стабільні сполуки, ще впливають на формування графіту в чавунах і включень в сталях, сприяючи утворенню сферідного графіту, тобто кулястого.

Покращення властивостей залізовуглецевих сплавів полягає в зменшенні дефектів. Це стосується мінімізації газових та усадочних порожнин, шлакових включень, що робить виливки більш щільними.

Підвищення механічних властивостей залізовуглецевих сплавів при використанні РЗМ як модифікаторів полягає у збільшенні міцності, твердості, зносостійкості та пластичності сплавів.

РЗМ та їх механізм дії як модифікаторів впливу на кристалізацію сплаву, змінюючи умови зародження та росту кристалів, призводить до формування як більш однорідної, так і дрібної структури.

Таким чином, введення РЗМ в залізовуглецеві сплави є ефективним методом їх модифікування, що дозволяє отримати сплави з покращеними механічними та ливарними властивостями для відповідальних деталей.

### Література

1. Афанасьєва О.В. Матеріалознавство та конструкційні матеріали: навч. посіб. Харків: ХНУРЕ, 2016. 188 с.
2. Шпильовий Л., Білецький В. Роль рідкісних і рідкісноземельних металів у 5-6 технологічних устроях: перспективи України. *Геотехнології*. 2022. № 5. С. 40-44.
3. Новосад І.Я., Руська Р.В., Пласконь С.А. Рідкоземельні метали: ключові компоненти сучасних технологій. *Інноваційна економіка* вип. 1. 2024, с. 222-238. URL: <https://inneco.org/index.php/innecoua/article/view/1209>
4. Кшнякін В.С., Опанасюк А.С., Дядюра К.О. Основи фізичного матеріалознавства: навч. посіб. у 2 ч. Суми: Сумський державний університет, 2015. Ч. 2. 291 с.
5. Антонова Г.В., Вершков О.О., Мацулевич О.С. Матеріалознавство. Технологія конструкційних матеріалів. *Матеріалознавство*: навч. посіб. Запоріжжя, 2024. 215 с.
6. Афтандіянц Є.Г., Зазимко О.В., Лопатько К.Г. Матеріалознавство: підручник. Київ: Вища освіта, 2012. 548 с.
7. Матеріалознавство: навч. посіб. / Бузило В.І. та ін. Дніпро: НТУ «ДП», 2021. 243 с.
8. Босий М. В., Боса О.А. Вплив рідкісноземельних металів на структуру та властивості залізовуглецевих сплавів. *Збірник наукових праць НУК*. Миколаїв. Гельветика. 2025. № 3 (501). С. 42–48.
9. Баглюк Г.А., Троцан А.І., Уськова Н.О., Мамонова А.А., Молчановська Г.М., Властивості та структура чавуну, модифікованого ЛГМ-технологією. *Процеси лиття. Нові методи та прогресивні технології лиття*. 2024. № 2 (156). С. 29-37.
10. Верховлюк А.М., Нарівський А.В., Могилатенко В.Г. Технології одержання металів та сплавів для ливарного виробництва: навч. посіб. /

За ред. академіка НАН України В.Л. Найдека. Київ: Видавничий дім “Вініченко”, 2016. 224 с.

11. Лисенко О.Б., Калініна Т.В. Матеріалознавство: конспект лекцій. Кам'янське: ДДТУ, 2019. 268с.

12. Іванова Л.Х., Колотило Є.В., Мирошніченко Г.О. Рідкісноземельні метали у валкових чавунах // Інформаційні технології в металургії та машинобудуванні. ІТММ'2022: тези доповідей міжнародної науково-практичної конференції. Дніпро: НМетАУ, 2022. С. 30-34.

13. Іванова Л.Х., Колотило Є.В., Хитько О.Ю., Терехін В.О. Отримання і застосування комплексних модифікаторів з рідкісноземельними металами. *Метал і лиття України*, 2020. т.28. №1(320). С.30-33.

14. Ямшинський М. М., Федоров Г. Е. Вплив процесів додаткового легування, мікролегування та модифікування на властивості хромарганцевого чавуну. *Вісник Донбаської державної машинобудівної академії*. 2017. № 2 (41). С.82-88.

15. Фесенко К.В. Модифікування чавуну в ливниковій системі для виробництва двошарових виливків: дис.... канд. техн. наук : 05.16.04. Київ, 2016. 153 с.

16. Бубликов В.Б., Нарівський А.В., Бачинський Ю.Д., Ясинський О.О. Високоміцний чавун зі зміцненим кремнієм та нікелем  $\alpha$ -твердим розчином. *Метал та лиття України*. 2020. Том 28. № 3. С. 63-68.

17. Лук'яненко І.В., Кивгило Б.В., Биба Є.Г., Ямшинський М.М., Ковальчук О.Г. Вплив легування, мікролегування та модифікування на властивості зносостійких хромарганцевих чавунів. *Процеси лиття. Кристалізація та структуроутворення сплавів*. 2025. № 3 (161). С.52-61.

18. Тростянчин А.М. Концепція застосування водневої обробки для удосконалення структурно-фазового стану та властивостей функціональних матеріалів на основі сплавів рідкісноземельних та перехідних металів: дис.... д-ра техн. наук : 05.02.01. Львів, 2022. 116 с.

19. Іванова Л.Х., Колотило Є.В., Хитько О.Ю., Терехін В.О. Вплив комплексних модифікаторів на структуру чавунів з різним вмістом сірки. *Метал та лиття України*. 2022, Том 30. № 2 (329). С.30-34.

20. Бубіс А., Федоров Г. Підвищення властивостей жаростійких сталей для роботи в екстремальних умовах мікролегування і модифікування. *Нові матеріали і технології в машинобудуванні (Праці Міжнародної науково-технічної конференції)*. 2016. (6), С. 158–159.

**Information about the authors:**

**Bosyi Mykola Viktorovich,**

Senior Lecturer at the Department  
of Materials and foundry engineering,  
Central Ukrainian National Technical University,  
8, Universytetskyi ave., Kropyvnytskyi, 25006, Ukraine

**Kuzyk Oleksandr Volodymyrovych,**

Candidate of Technical Sciences,  
Associate Professor at the Department  
of Materials and foundry engineering,  
Central Ukrainian National Technical University,  
8, Universytetskyi ave., Kropyvnytskyi, 25006, Ukraine