

Л.Х. Іванова, В.Ю. Селівьорстов, О.Ю. Хитько, О.П. Білий

## СИСТЕМНИЙ ПІДХІД ДО ВСТАНОВЛЕННЯ ВПЛИВУ РІДКІСНОЗЕМЕЛЬНИХ МЕТАЛІВ НА СТРУКТУРУ ВАЛКОВИХ ЧАВУНІВ

*Анотація. У статті розглядається вплив рідкісноземельних металів на мікроструктуру валкових чавунів. Наведено аналіз сучасного стану вальцеливарного виробництва та питання у обраному напрямку дослідження. Протягом багатьох років у вальцеливарному виробництві ведуться роботи із заміни магнію іншими модифікаторами. Аналіз наявних досліджень і публікацій охоплює питання, що зосереджені на окремих складниках, тоді як модель модифікування чавунних валків РЗМ потребує подальшого дослідження та узагальнення. Метою статті є встановлення карбідоутворюючої здатності різних РЗМ у білих валкових чавунах. Для досягнення цієї мети була поставлена наступна задача – установити вплив хімічних елементів церієвої та ітрієвої підгруп РЗМ на мікроструктуру валкового чавуну. Обґрунтувати вибір РЗМ для обробки білих валкових чавунів. Виявлені закономірності впливу рідкісноземельних елементів церієвої підгрупи – самарію та церію та ітрієвої підгрупи – гадолінію та ітрію при швидкості охолодження, що має місце у валковій ливарній формі на процеси структуроутворення білих чавунів для прокатних валків. Встановлені індивідуальні закономірності впливу досліджених підгруп рідкісноземельних металів на мікроструктуру відрізняються інтервалами їх залишкових вмістів. Модифікування білого чавуну РЗМ забезпечувало зміну типу карбідної евтектики та дисперсності перліту. Встановлені закономірності впливу рідкісноземельних елементів підгруп на процеси структуроутворення білих чавунів для прокатних валків: карбідоутворююча здатність РЗМ ітрієвої підгрупи була у 5,2 рази більшою за церієву підгрупу. Це дало можливість обґрунтувати тип основи комплексного модифікатора для досягнення необхідних властивостей матеріалу прокатних валків.*

*Ключові слова: валковий чавун, рідкісноземельний метал, структурний складник, карбідоутворююча здатність, модифікування чавуну, мікроструктура чавуну, структуроутворення, евтектичні перетворення*

**Вступ.** Чавунні прокатні валки є складними виливками, в яких поверхневий робочий шар представлений білим (або половинчастим з кулястим або пластинчастим графітом), а серцевина - сірим чавуном з графітом таких же форм [1]. Якість литих чавунних валків, їх службові властивості залежать від багатьох факторів, але, головним чином, від фізико-хімічних властивостей застосовуваних розплавів і процесів, що протікають у період затвердіння та подальшого охолодження в ливарній формі. Засто-

совувани на прокатних станах нині валки з модифікованого чавуну різноманітні за розмірами та призначенням, виготовляються з різною структурою та механічними властивостями [2]. Питанням технології лиття валків із такого чавуну, дослідженням структури, механічних та теплофізичних властивостей цього валкового матеріалу присвячено роботи багатьох українських дослідників [3-4].

Автором [5] було досліджено п'ять (церій, ітрій, лантан, неодим і празеодим) з шістнадцяти рідкісноземельних металів церієвої групи та наведено експериментально-теоретичні основи отримання ітрієвого чавуну для виробництва деталей відповідального призначення в галузях народного господарства. Що ж до способів введення модифікаторів, були вивчені різні способи їх введення. Найкращим вважається примусове занурення.

Великий інтерес представляють комплексні модифікатори, застосування яких розширює можливості отримання чавунів із широким діапазоном структур та властивостей.

В Україні у сімдесяті роки були розроблені склади комплексних модифікаторів на базі рідкісноземельних металів та ітрію [6]. Промислове випробування таких комплексних модифікаторів на чавунах електропічних плавок показало перспективність їх застосування. Отже, питання щодо складу комплексних модифікаторів досі залишається дискусійним. Так, наприклад, в Україні отримано велику кількість патентів та авторських свідоцтв на склади комплексних модифікаторів для отримання високоміцного чавуну з кулястим графітом. Часто в них наводяться відомості, викликані, очевидно, різними умовами виробництва. У ряді модифікаторів обґрунтовується необхідність високих вмістів кальцію, в інших – навпаки, низьких. Як основний модифікувальний елемент вводяться магній, церій, ітрій, лантан, рідкісноземельні метали, фториди ітрію, фториди рідкісноземельних металів, кальцій та інші. У роботі [7] пропонується діаграма вибору модифікаторів для чавунів і показано, що ефект сфероїдизації визначається створенням відповідними модифікаторами бар'єру в рідкій фазі на межі кристалів графіту в процесі їх зростання. Найбільш сильними модифікаторами, згідно з діаграмою, є магній, ітрій, церій, лантан і гадоліній.

В даний час кількість комплексних модифікаторів перевищує дві тисячі складів, до яких входять графітизуючі, стабілізуючі, сфероїдизуючі та інші компоненти. Найбільша кількість модифікаторів створена на основі феросиліцію, для посилення модифікуючої дії якої вводять цирконій, барій, стронцій, титан, рідкісноземельні та інші хімічні елементи. В інших випадках використовують безкремнієві модифікатори. Точних даних про ефективність модифікаторів немає, незважаючи на те, що у науково-технічній літературі наведено результати численних експериментальних досліджень. Це, очевидно, тим, що ефективність тих чи інших модифікаторів залежить від різноманітних умов виробництва. Тому вибір модифікаторів роблять експериментальним шляхом. Вальцеливарне виробництво, як складний тип виробництва, що охоплює використання білих, половинчастих і сірих чавунів, потребує експериментальних досліджень з відпрацювання та оптимізації складів комплексних модифікаторів для отримання високоякісних чавунів і в робочому шарі, і в серцевині прокатних валків. Аналіз

тенденцій розвитку цього виду техніки показав, що розвиток його йде за такими основними напрямками: удосконалення хімічного складу ливарних сплавів, способів їх отримання та складів лігатур.

До РЗМ відповідно до промислової класифікації металів [8] відносяться хімічні елементи з номерами 57...71 Періодичної системи Д. І. Менделєєва, що мають однакову кількість електронів на зовнішній оболонці атомів і відповідно схожі фізико-хімічні властивості. До рідкісноземельних також відносять близькі до них перехідні метали третьої групи – хімічні елементи з порядковим номером 39 та 21 – ітрій та скандій.

Рідкісноземельні елементи ділять на дві підгрупи: церієву (La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu) і ітрієву (Y, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Lu).

Фізичні властивості РЗМ, а також дані про їх кристалічну структуру вперше були узагальнені Гшнейдером і доповідалися на симпозіумі РЗМ в 1959 г. у Чикаго.

Самарій (лат. Samarium) Sm - атомний номер 62, атомна маса 150,36, атомний радіус 1,802А, густина 7,536 г/см<sup>3</sup> температура плавлення 1345К (1072 ± 5°С), температура поліморфного перетворення 1193К9 (1670°С). Самарій не сильно окислюється, проте має дуже високий тиск пари.

Гадоліній (лат. Gadolinium) Gd – атомний номер 64, атомна маса 157,25, атомний радіус 1,802А, густина 7,886 г/см<sup>3</sup> температура плавлення 1585К (1312 ± 15°С), температура кипіння 3103К, гадоліній та самарій мають дуже близькі значення радіусів атомів, але відрізняються кристалічними структурами, через те, що гадоліній має гексагональну структуру типу магнію.

Церій (лат. Cerium) Ce – атомний номер 58, атомна маса 140,12, атомний радіус 1,71А, густина 6,789 г/см<sup>3</sup> температура плавлення 1077К (804 ± 5°С), температура кипіння 3743К (3470°С).

Ітрій (лат. Yttrium) Y – атомний номер 39, атомна маса 88,9059, атомний радіус 1,801А, густина 4,472 г/см<sup>3</sup> температура плавлення 1825К (1552 ± 15°С), температура кипіння 2903К (2630°С).

В Україні модифікований чавун вперше було отримано в інституті машинознавства та сільськогосподарської механіки АН УРСР. Після цього в дослідження цього чавуну включився цілий ряд інститутів ( ЦНДІТмаш, ДМетІ та ін). В Україні як основний модифікатор для отримання прокатних валків застосовується чистий магній або лігатури на його основі. При обробці валкового розплаву магнієм виникають труднощі, пов'язані з інтенсивним випаром, що тягне за собою викиди металу, піроефекти, загазованість приміщень. Тому протягом багатьох років ведуться роботи із заміни магнію іншими модифікаторами.

**Аналіз останніх досліджень.** Останнім часом, поряд з такими сплавами, як фероцерій, мішметал для поліпшення властивостей чавуну, все більше застосування знаходять комплексні модифікатори (КМ) на основі РЗМ. Цей напрямок знаходить все більшого поширення у зв'язку із відносною простотою використання КМ порівняно з обробкою металевим магнієм. Ливарники дійшли єдиної думки, що для зниження концентрації неметалевих включень у вибіленому шарі прокатних валків необхідна при

модифікуванні чавунного розплаву заміна магнію РЗМ. Вплив модифікаторів на процеси кристалізації автори розглядають, передусім, з погляду їхнього впливу на поведінку вуглецю в розплаві. Враховується, крім того, зміна властивостей розплаву за рахунок глибокого розкислення та обезсірчення його РЗМ. По відношенню до заліза всі РЗМ мають нижчі температури плавлення і нижчий поверхневий натяг, тобто є поверхнево-активними елементами-модифікаторами.

Отже, одним із найбільш доступних методів покращення якості чавунів є модифікування. Більшість літературних відомостей щодо впливу РЗМ на властивості високовуглецевих сплавів заліза зосереджена на дослідженні наступних питань: 1) нейтралізації шкідливих елементів, 2) сфероїдизації графіту та утворенні зародків та 3) утворенні карбідів та характері кристалізації чавуну. Однак відомостей щодо впливу всіх РЗМ, у тому числі самарію та гадолінію на кристалізацію білих, половинчастих і сірих валкових чавунів дуже мало. Так, у роботі [9] було визначено, що евтектичне перетворення з утворенням пластинчастої ледебуритної евтектики в доевтектичному валковому чавуні при литті у кокільні форми проходило при присадках гадолінію в межах 1,6...3,2%.

У роботі авторів [10] отримані результати досліджень показали доцільність застосування для модифікування чавуну робочого шару двошарових прокатних валків комплексного модифікатору на основі рідкісноземельних металів та термічної обробки литих заготовок валків, а також їх позитивний вплив на фізико-механічні та службові властивості: матеріал дослідного валка (після комплексної обробки) у порівнянні з серійним на відстані 10-30 мм від поверхні бочки мав підвищені властивості: границя міцності при розтягу  $\sigma_b$  була більшою на 3-7, границя міцності при вигині  $\sigma_u$  - на 2-3, ударна в'язкість  $a_k$  - на 4-15, а термостійкість - на 27%.

У роботі [11] наведені результати дослідження і уточнення технології отримання комплексних модифікаторів вуглетермічним способом з окускуваної сировини та застосування їх у вальцеливарному виробництві. Цим дослідженням передувало дослідження особливостей модифікуючого впливу індивідуальних рідкісноземельних металів церієвої групи (церію, лантану та самарію) на параметри кристалізації і структуроутворення валкових чавунів при різних швидкостях охолодження, що мають місце у реальній валковій формі. Встановлено, що мінімальна необхідна кількість модифікатора, що дозволяла досягти максимального рівня зниження температури початку евтектичної кристалізації залежала від швидкості охолодження. Підвищення швидкості охолодження призводило до зміщення цієї кількості модифікатора у бік менших концентрацій.

У роботі [12] зазначено, що кафедра ливарного виробництва Українського державного університету науки і технологій понад шістдесят років займається дослідженням впливу модифікування рідкісноземельними металами на якість литих чавунних виливків. Одним з важливих питань для теорії та практики виробництва чавуну з кулястим графітом є дослідження впливу величини присадки на параметри кристалізації чавуну. Визначення ролі модифікатора в процесі модифікування валкового чавуну дозволить створити найбільш ефективні модифікатори і розробити раціональну технологію отримання високоміцного чавуну. Проведено дослідження впливу величини присадки трьох

індивідуальних рідкісноземельних металів з вмістом домішок, %: лантану (0,39%), церію (0,41%) та ітрію (0,24%) на параметри кристалізації валкового чавуну хімічного складу, %: вуглець 3,29; кремній 1,81; марганець 0,44; фосфор 0,07; сірка 0,026; залізо решта. Встановлено подібний впливу дослідних рідкісноземельних металів на параметри кристалізації валкового чавуну та критичні їх концентрації, які призводили до найбільших змін параметрів кристалізації та утворення кулястих графітних включень в структурах модифікованих чавунів. За модифікування чавунного розплаву з метою одержання кулястого графіту ітрію необхідно додавати в 1,5-1,6 разів менше, ніж церію або лантану.

У роботах [13, 14] були досліджені питання про вплив РЗМ на карбідоутворювальну здатність валкових чавунів та доведено, що це має велике теоретичне і практичне значення. У роботах виявлені закономірності впливу основних РЗМ в інтервалі швидкості охолодження, що мають місце у валковій ливарній формі на процеси структуроутворення білих валкових чавунів. Встановлено, що вплив досліджених РЗМ на мікроструктуру відрізнявся інтервалами їх залишкових вмістів у валкових чавунах. При постійних умовах плавлення, близьких вихідних і кінцевих вмістах сірки в металах було оцінено коефіцієнти засвоєння РЗМ як відношення залишкового вмісту  $RZM_{зал. до}$  введеного  $RZM_e$ . Визначення коефіцієнта засвоєння РЗМ проводили за усередненим залишковим їх вмістом у нижніх частинах досліджуваних зразків. Дослідили присадки РЗМ від 0,2 мас.% до 2,4 мас.%. Коефіцієнти засвоєння всіх досліджених РЗМ при малих присадках у розплав чавуну були в діапазоні від 10 до 56,5%.

Таким чином, наявні дослідження охоплюють питання, що зосереджені на окремих складниках, тоді як модель модифікування РЗМ потребує подальшого дослідження та узагальнення.

**Метою** статті є встановлення карбідоутворюючої здатності двох різних груп РЗМ у білих валкових чавунах та встановити вплив хімічних елементів церієвої та ітрієвої підгруп РЗМ на мікроструктуру валкового чавуну. Обґрунтувати вибір РЗМ для обробки білих чавунів.

**Методика дослідження.** Для виконання поставлених у роботі завдань використовували стандартні методи контролю, апробовані методи дослідження та сучасне обладнання для отримання чавунів, проведення хімічного, металографічного аналізу. Мікроскопічне дослідження проводили на оптичних метало-мікроскопах МІМ-8М та Neophot 21 при збільшеннях 12...1300. Шліфі досліджували до та після травлення. Як основний травник використовували 2% -ний розчин азотної кислоти в етиловому спирті (ніталь). Кількість структурних складників визначали точковим методом Глаголева у 20 полях зору зі збільшенням 400, що забезпечувало достатню достовірність. Мікротвердість структурних складових чавунів визначали на приладі ПМТ-3 за ГОСТ 9450-76 при навантаженні 0,49Н та збільшенні 487. Точність вимірювання діагоналі відбитка становила 0,07 мкм. Величину мікротвердості розраховували як середню 50 вимірів. Застосування науково обґрунтованих методів обробки експериментальних даних при ви-

користанні розроблених методик обробки чавунних розплавів забезпечило отримання результатів із досить високим ступенем точності та достовірності.

**Особливості обробки чавунів рідкісноземельними металами.** Для розробки оптимальних режимів модифікування та типів КМ на основі РЗМ необхідне знання особливостей впливу індивідуальних РЗМ на структуру та властивості та дані про їх засвоєння за різних умов плавки та обробки чавунів. Для модифікування чавунних розплавів використовували індивідуальні РЗМ із вмістом домішок %: церій – 0,41, ітрій – 0,24, гадоліній – 0,29, самарій – 0,46.

Оскільки до складів комплексних модифікаторів входять церій, лантан, ітрій, а також гадоліній, самарій та ряд інших лантанодів, а в літературі, як показав аналітичний огляд, практично відсутні відомості про їх вплив на структуру валкових чавунів, провели дослідження впливу цих хімічних елементів. Для цього було проведено серію плавок на чавуні постійного хімічного складу, мас. %: С 3,49; Si 0,30; Mn 0,05; P 0,005; S 0,2; Fe – решта.

При постійних умовах плавки, близьких вихідних і кінцевих вмістах сірки в металі доцільно, як встановлено в роботі [4], оцінювати засвоєння РЗМ спеціальним коефіцієнтом. Засвоєння церію та самарію зменшувалося зі зростанням величини присадки їх у розплав чавуну, а ітрію та гадолінію – збільшувалося. Найкращий коефіцієнт засвоєння в досліджуваному діапазоні присадок у білих чавунах мали ітрій і гадоліній, а найгірший – самарій, що, мабуть, пов'язане з відмінностями температури плавлення цих хімічних елементів. Коефіцієнт засвоєння (середній) РЗМ церієвої підгрупи при модифікуванні чавунів становив 48,2, а РЗМ ітрієвої підгрупи при модифікуванні чавунів – 38,5%. Таким чином, засвоєння РЗМ ітрієвої підгрупи було на 20% меншим, ніж РЗМ церієвої підгрупи.

**Мікроструктура вихідного немодифікованого чавуну.** Зразок з немодифікованого чавуну після кристалізації зі швидкістю охолодження 5,5 град/с мав структуру доєвтектичного БЧ: дендрити аустеніту були оточені ледебуритної евтектикою стільникового типу з мікротвердістю  $H_{50}7512$  МПа. Евтектоїдне перетворення аустеніту проходило з утворенням трооститу, мікротвердість якого складала 3883 МПа, рідко зустрічалися ділянки пластинчастого перліту. Перетворення ледебуритного аустеніту частіше відбувалося з поділом фаз, цементит нашаровувався на евтектичному, ферит виділявся окремо.

**Мікроструктура чавунів, модифікованих РЗМ церієвої групи.** Відповідно до завдань даної роботи досліджували особливості структури типових валкових чавунів, модифікованих зростаючими присадками індивідуальних РЗМ. Дослідження проводили на доєвтектичних чавунах, виплавлених на постійній шихті. При модифікуванні досліджуваного базового чавуну зростаючими кількостями самарію чавун з його залишковим вмістом 0,094% мав структуру доєвтектичного БЧ, у порівнянні з вихідним чавуном зросла кількість аустеніту до 40,5% (табл. 1), а також знизилася кількість ледебуриту і підвищилася його мікротвердість. При евтектоїдному перетворенні утворювався троостит з більшою мікротвердістю  $H_{50}3991$  МПа.

При підвищенні концентрації елемента-модифікатора до 0,198% при кристалізації

Вплив РЗМ церієвої підгрупи на кількість карбідної складової у чавуні

Тип РЗМ	Середній вміст РЗМ, %	Кількість карбідних структурних складників, %		
		карбід	карбід + ледебурит	ледебурит
-	-	-	-	76,0
Sm	0,094	-	-	59,5
	0,198	-	43,8	-
	0,423	23,2	-	-
	0,821	<b>26,6</b>	-	-
	1,082	25,9	-	-
Ce	0,113	-	-	30,6
	0,208	-	31,0	-
	0,392	-	30,4	-
	0,651	29,2	-	-
	0,948	<b>27,5</b>	-	-
	1,423	26,9	-	-

більшість рідини перетворювалася на аустеніт, кількість якого досягала 56,2% (див. табл. 1). Решта рідини, що залишилася, зазнавала евтектичного перетворення з утворенням тонкого ледебуриду і ділянок з конгломератною структурою. Після затвердіння при охолодженні від евтектичної до евтектоїдної температури відбувалося виділення вторинного цементиту, який ріс в аустеніті у вигляді пластин. Евтектоїдне перетворення проходило в основному з утворенням тонкодиференційованого перліту (трооститу). Значення мікротвердості карбідної фази і мартенситу в чавунах із залишковим вмістом самарію 0,198% були в середньому на 10% вище порівняно з чавуном, що містить 0,094% модифікатора.

Подальше підвищення концентрації самарію в чавуні (до 0,423%) призводило до різкого зменшення кількості ледебуриду, майже вся евтектична рідина зазнавала розпаду з утворенням конгломератної структури, тобто спостерігалася роздільне зростання дендритів аустеніту та цементитних пластин. Дрібні ледебурні колонії зустрічалися дуже рідко. Після затвердіння вторинний цементит виділявся у вигляді пластин. Крім того, деякі дендритні гілки аустеніту переохолоджувалися до температури мартенситної області. При вмістах самарію 0,821% кристалізація ледебуриду повністю придушувалася, евтектичне перетворення проходило з поділом фаз. Кількість мартенситу у структурі чавуну зростала.

При модифікуванні вихідного чавуну церієм отримані близькі результати щодо зміни структури матриці. У межах досліджених концентрацій (0,113...1,423%) було отримано БЧ, у матрицях яких кількість перліту зростала від 66,4 до 72,5%. У чавуні із вмістом церію 0,113% порівняно з базовим чавуном зросла кількість аустеніту та знизилася кількість ледебуриду (30,6%), а також його мікротвердість до 6992 МПа. При

евтектоїдному перетворенні утворювався перліт з нижчою мікротвердістю  $H_{50}$  3790 МПа. При підвищенні вмісту церію до 0,208 і 0,392% при кристалізації більшість рідини перетворювалася на аустеніт, кількість якого досягала 68,0% (див. табл.1). Решта рідини, що залишилася, зазнавала евтектичного перетворення з утворенням тонкого ледебуриту і ділянок з конгломератною структурою.

Евтектоїдне перетворення проходило в основному з утворенням тонкоцифренованого перліту (трооститу) з мікротвердістю 4280 МПа. Слід зазначити, що з концентраціях 0,113...0,392% в ледебуритних колоніях зустрічався аномальний ферит. При вмістах церію 0,651 і 0,948% кристалізація ледебуриту в чавуні повністю придушувалася, евтектичне перетворення проходило з поділом фаз. Мікротвердість карбідів досягала максимальних значень – 9463 та 9571 МПа відповідно. При евтектоїдному перетворенні утворювався троостит з мікротвердістю 4373 МПа.

Таким чином, а) максимальну кількість карбідів (без урахування карбідів у ледебуриті стільникового типу) було отримано при 0,821% самарію, 0,948% церію; б) середній вміст РЗМ цієї підгрупи становив 0,885%; в) середній вміст карбідної складової – 27,1%.

**Мікроструктура чавунів, модифікованих РЗМ ітрієвої групи.** У первинній структурі чавуну з залишковим вмістом 0,020% гадолінію дендрити аустеніту займали 34,5%, решта 65,5% припадала на ледебурит і цементит, що був продуктом роздільної кристалізації евтектичних фаз (табл.2).

Таблиця 2

Вплив РЗМ ітрієвої підгрупи на кількість карбідної складової у чавун

Тип модифікатора	Середній вміст РЗМ %	Кількість карбідної структурної складової, %		
		карбід	карбід + ледебурит	ледебурит
-	-	-	-	76,0
Gd	0,020	-	65,5	-
	0,190	13,9	-	-
	0,900	<b>17,9</b>	-	-
	1,446	16,7	-	-
Y	0,023	-	-	69,5
	0,079	-	30,1	-
	0,250	-	55,8	-
	0,731	<b>54,8</b>	-	-
	1,423	46,9	-	-

Існують критичні вмісти індивідуальних РЗМ, які забезпечують максимальну кількість карбідів у структурі чавуну. Середній залишковий вміст елементів ітрієвої підгрупи в чавуні було на 8% менше, ніж церієвої. Максимальна кількість карбідів (без урахування карбідів у ледебуриті стільникового типу) була отримана при 0,900% га-

долінію та 0,731% ітрію. Середній вміст РЗМ цієї підгрупи становив 0,816%. Середній вміст карбідної складової 36,4%, що на 34% більше, ніж церієвої підгрупи.

Подальше підвищення вмісту індивідуальних РЗМ сприяло зменшенню кількості надлишкових карбідів у структурі чавунів. У чавунах із залишковим вмістом гадолінію 0,190; 0,900 і 1,446% при евтектичній кристалізації відбувався повний поділ фаз, і первинна структура складалася з дендритів аустеніту та цементиту. Вторинний цементит при подальшому охолодженні після затвердіння виділявся з аустеніту як тонких пластин. Евтектоїдне перетворення аустеніту при малому вмісті гадолінію призводило до утворення тонкого перліту з мікротвердістю 3883 МПа. Зі збільшенням вмісту гадолінію в чавуні мікротвердість перліту зростала, у структурі утворювався троостит, мікротвердість якого досягала 5120 МПа.

Вплив модифікування ітрієм було аналогічним впливу самарію: воно виражалось в зменшенні кількості ледебуриту, кристалізація якого повністю пригнічувалася при 0,731% ітрію, збільшенні мікротвердості цементиту і матриці (трооститу), в перетворенні частини аустеніту в мартенсит, частка якого зі збільшенням залишкового змісту ітрію зростала.

Отже, для модифікування білого чавуну існують критичні змісти індивідуальних РЗМ, що забезпечували максимальну кількість карбідів у його структурі. Так, максимальна кількість карбідів (без урахування карбідів у ледебуріті стільникового типу) була отримана при 0,314% самарію та 0,900% гадолінію, а також при 0,731% ітрію, 0,651% церію (див. табл.1 і 2). Подальше підвищення вмісту індивідуальних РЗМ сприяло зменшенню кількості надлишкових карбідів у структурах чавунів.

Як впливає з даних кількісного металографічного аналізу (див. табл. 1 та 2), при постійній швидкості охолодження кількість та тип структурних складників чавуну залежать від виду та залишкового вмісту індивідуального РЗМ.

**Визначення карбідоутворюючої здатності РЗМ.** Металографічний аналіз модифікованих індивідуальними РЗМ чавунів та розрахунок середніх відносних величин кількості карбідної складової на одиницю залишкового вмісту РЗМ показали, що за карбідоутворювальною здатністю досліджувані РЗМ ітрієвої групи мали в середньому показник  $845+747=796$  (рис.1), а досліджувані РЗМ церієвої групи –  $193 +114 = 154$  (рис.2).

Таким чином, в інтервалі досліджених концентрацій РЗМ та швидкостей охолодження вплив РЗМ на структурні зміни валкового БЧ був аналогічним. Модифікування білого чавуну РЗМ забезпечувало зміну типу карбідної евтектики та дисперсності перліту. Найбільша зміна структури модифікованого БЧ спостерігалася при залишковому вмісті самарію 0,423% або гадолінію 0,190%, а також ітрію 0,731%, і церію 0,651%. Підвищення дисперсності та мікротвердості перліту, поява в структурах мартенситу та пластинкова будова карбідної евтектики повинні сприяти підвищенню зносостійкості та міцності БЧ.

Таким чином, незважаючи на те, що середній залишковий вміст елементів ітрієвої підгрупи в чавуні було на 8% меншим, карбідоутворююча здатність цієї підгрупи була

у 5.2 рази більшою за церієву підгрупу. Зазначені індивідуальні особливості РЗМ необхідно враховувати при виборі високоефективних складів КМ, так заміщення частини церію (20...50%) на гадоліній в КМ при модифікуванні, наприклад, білих валкових чавунів, дає ефект в 1,5...3,7 рази більший, що свідчить про особливу цінність його як складової КМ.

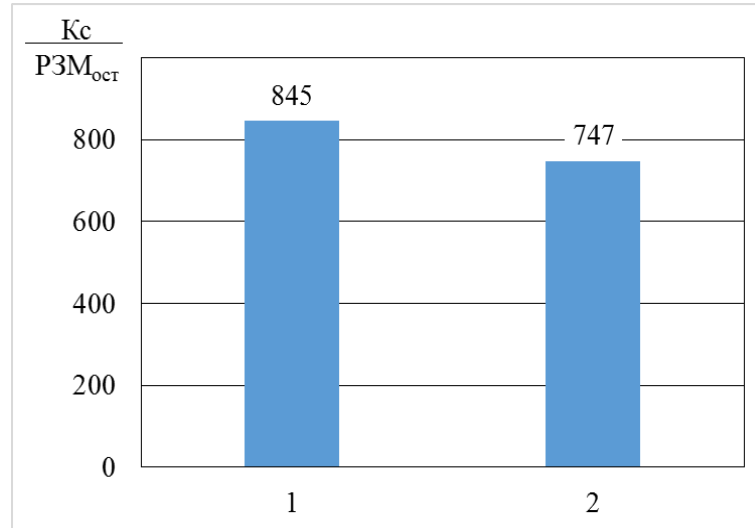


Рисунок 1 - Карбідоутворююча здатність РЗМ ітрієвої підгрупи:  
1 – гадоліній ; 2 – ітрій

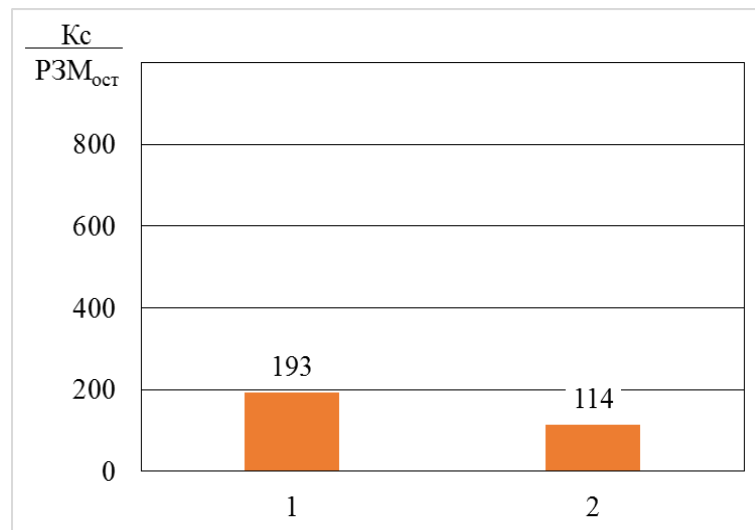


Рисунок 2 - Карбідоутворююча здатність РЗМ церієвої підгрупи:  
1 - самарій ; 2 – церій

**Висновки.** Виявлені закономірності впливу рідкісноземельних елементів церієвої підгрупи – самарію та церію та ітрієвої підгрупи – гадолінію та ітрій при швидкості охолодження, що має місце у валковій ливарній формі на процеси структуроутворення білих чавунів для прокатних валків. Встановлено, що в інтервалі досліджених концентрацій РЗМ вплив РЗМ на структурні зміни валкового БЧ був аналогічним. Модифікування білих чавунів РЗМ забезпечувало зміну типу карбідної евтектики та дисперсності перліту.

Встановлені закономірності впливу рідкісноземельних елементів двох підгруп на процеси структуроутворення білих чавунів для прокатних валків: карбідоутворююча здатність РЗМ ітрієвої підгрупи була у 5,2 рази більшою у порівнянні з церієвою підгрупою. Це дало можливість обґрунтувати тип основи комплексного модифікатора для досягнення необхідних властивостей матеріалу прокатних валків.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. Кривошесєв А.Є. Литі валки (теоретичні і технологічні основи виробництва).– М.: Металургвидат, 1957.– 360 с.
2. ТУ У 28.9–00187375–106:2018. Валки чавунні та сталеві для гарячого прокатування металів. Технічні умови. Чинний з 05.03.2018.– Дніпро, 2018. – 36 с.
3. Іванова Л. Х. Теоретичні основи та практичні методи одержання литих прокатних валків із комплексномодифікованих чавунів: Автореф. дис. ... д-ра техн. наук : 05.16.04 / Націон. металург. академія України. – Дніпропетровськ, 2008. – 35 с.
4. Колотило Є.В. Дослідження та удосконалення процесів виробництва листопрокатних валков із модифікованих чавунів: Дис... кандидата техн. наук: 05.16.04; Захищена 14.11.1977; Затв. 26.04.1978. – Дніпропетровськ, 1977.–207 с.
5. Анікін А.А. Експериментально-теоретичні основи одержання ітрієвого чавуні для виробництва деталей відповідального призначення в галузях народного гооподарства: Автореф. дис. ... доктора техн. наук: 05.16.04/ Моск. ін-т стали і спл.–М., 1989.– 47 с.
6. Рябчиков І.В. Матеріали для позапічної обробки залізвуглецевих сплавів // Металургія машинобудування. – 2005.– № 2.– С. 9–17.
7. Комплексні сплави з рідкоземельними металами для модифікування чавуну / І.С.Кумиш, Н.П.Лякишев, А.А.Федотов та ін. // Теорія та практика одержання і застосування комплексних феросплавів:– Тбілісі, 1974.– С. 184–190.
8. Уткін Н.І. Виробництво кольорових металів. –М.: ”Интернет Инжиниринг”, 2000.– 442 с.
9. Іванова Л.Х., Ніколаєнко О.А. Легування білого чавуну гадолінієм/ Нові матеріали і технології в машинобудуванні-2017: матеріали ІХ Міжнарод.наук.-техн. конф., 30-31 трав. 2017 р. м.Київ/ Загальна редакція Р.В.Лютій, І.М.Гурія.- К.: НТУУ «КПІ», 2017.- С.79.
10. Іванова Л.Х., Калашнікова А.Ю., Терехін В.О. Розробка технології виготовлення двошарового прокатного валка / Литво. Металургія. 2019: матеріали XV Міжнар. наук.-практ. конф.(21-23 травня 2019 р., м.Запоріжжя)/ під заг. ред. О.І.Пономаренко.- Запоріжжя: ФОП Наталія Олександрівна Систерова, 2019.- С.102-104.
11. Іванова Л.Х., Колотило Е.В., Хитько О.Ю., Терехієн В.О. Отримання і застосування комплексних модифікаторів з рідкісноземельними металами / Метал і лиття України, т.28, 2020, №1(320), С.30-33.
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 наук.-практич. конф., (Дніпро, 18 трав.. 2022 р.) – Дніпро: УДУНТ, 2022.- С.30-34.

13. ІВАНОВА Л.Х., КОЛОТИЛО Є.В., БІЛИЙ А.П., ШЕМЕТ КАРБІДОУТВОРЮВАЛЬНА ЗДАТНІСТЬ РІДКІСНОЗЕМЕЛЬНИХ МЕТАЛІВ У ВАЛКОВИХ ЧАВУНАХ/ РОЗВИТОК ПРОМИСЛОВОСТІ ТА СУСПІЛЬСТВА: МАТЕРІАЛИ МІЖНАР. НАУК.-ТЕХН. КОНФ.(28 -30 ТРАВНЯ 2025 Р., М.КРИВИЙ РІГ).- КРИВИЙ РІГ, КНУ, 2025.С. 74.

14. ІВАНОВА Л.Х., КОЛОТИЛО Є.В. ДОСЛІДЖЕННЯ КРИСТАЛІЗАЦІЇ ПОЛОВИНЧАСТИХ ЧАВУНІВ / ЛИТВО. МЕЕТАЛУРГІЯ. 2025: МАТЕРІАЛИ ХХІ МІЖНАР. НАУК.-ПРАКТ. КОНФ. (27-29 ТРАВНЯ 2025 Р., М.ХАРКІВ-М.КИЇВ)/ ПІД ЗАГ. РЕД. Д.Т.Н., ПРОФ. ПОНОМАРЕНКО О.І.- ХАРКІВ, НТУ «ХП», 2025.- С. 131-133.

#### REFERENSIS

1. Krivosheev, A.E. (1957). Liteye valki (teoreticheskie i tekhnologicheskie osnovy proizvodstva). M: Metallurgizdat, 360 p.
2. TU U 28.9–00187375–106:2018. (2018). Valky chavunni ta stalevi dlia hariachoho prokatuvannya metaliv. Tekhnichni umovy. Dnipro, 36 p.
3. Ivanova L. KH. Teoretychni osnovy ta praktychni metody oderzhannya lytykh prokatnykh valkiv iz kompleksnomodyfikovanykh chavuniv: Avtoref. dys. ... d-ra tekhn. nauk : 05.16.04 / Natsion. metalurh. akademiya Ukrainy. – Dnipropetrovs'k, 2008. – 35 s. [in Ukrainian].
4. Kolotylo, E.V. (1977). Doslidzhennia ta udoskonalennia protsesiv vyrobnytstva lystoprokatnykh valkiv iz modyfikovanykh chavuniv. PhD thesis. Dnipropetrovsk, 207 p.
5. Anikin, A.A. (1989). Eksperimentalno-teoreticheskie osnovy polucheniya ittrievogo chuguna dlya proizvodstva detaley otvetstvennogo naznacheniya v otraslyakh narodnogo khozyaystva. Abstract of DSc thesis. M Institute of Steel and Alloys, 47 p.
6. Ryabchikov, I.V. (2005). Materialy dlya pozaprechnoy obrabotki zhelezouglerodistykh splavov. Metallurgiya mashinostroeniya, No. 2, pp. 9–17.
7. Kumysh, I.S., Lyakishev, N.P., Fedotov, A.A., et al. (1974). Kompleksnye splavy s redkozemelnyimi metallami dlya modifitsirovaniya chuguna. In: Teoriya i praktika polucheniya i primeneniya kompleksnykh ferrosplavov. Tbilisi, pp. 184–190.
8. Utkin, N.I. (2000). Proizvodstvo tsvetnykh metallov. M: Intermet Inzhiniring, 442 p.
9. Ivanova, L.Kh., Nikolaenko, O.A. (2017). Leguvannya biloho chavunu hadoliniem. In: Novi materialy i tekhnolohii v mashynobuduvanni: materialy IX Mizhnarodnoi naukovo-tekhnichnoi konferentsii. Kyiv: NTUU «KPI», p. 79.
10. Ivanova, L.Kh., Kalashnikova, A.Yu., Terekhin, V.O. (2019). Rozrobka tekhnolohii vyhotovlennia dvosharovoho prokatnoho valka. In: Lytvo. Metalurhiia 2019: materialy XV Mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii. Zaporizhzhia, pp. 102–104.
11. Ivanova, L.Kh., Kolotylo, E.V., Khytko, O.Yu., Terekhin, V.O. (2020). Otrymannia i zastosuvannya kompleksnykh modyfikatoriv z ridkisnozemelnyimi metalamy. Metal i lytvo Ukrainy, Vol. 28, No. 1(320), pp. 30–33.
12. Ivanova, L.Kh., Kolotylo, E.V., Miroschnychenko, H.O. (2022). Ridkisnozemelni metaly u valkovykh chavunakh. In: Informatsiini tekhnolohii v metalurhii ta mashynobuduvanni (ITMM'2022). Dnipro: UDUNT, pp. 30–34.
13. Ivanova, L.Kh., Kolotylo, E.V., Bilyi, A.P., Shemet, O. (2025). Karbidooutvoriuvalna zdattnist ridkisnozemelnykh metaliv u valkovykh chavunakh. In: Rozvytok promyslovosti ta

suspilstva: materialy Mizhnarodnoi naukovo-tekhnichnoi konferentsii. Kryvyi Rih: KNU, p. 74.

14. Ivanova, L.Kh., Kolotylo, E.V. (2025). Doslidzhennia krystalizatsii polovynchastykh chavuniv. In: Lytvo. Metalurhiia 2025: materialy XXI Mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii. Kharkiv–Kyiv: NTU «KhPI», pp. 131–133.

Received 17.04.2026.

Accepted 22.04.2026.

Published 30.04.2026

***System approach to determining the effect of rare-earth metals  
on the structure of roll cast irons***

*The article examines the effect of rare-earth metals on the microstructure of roll cast irons. An analysis of the current state of roll casting production and the issues within the selected research direction is presented. For many years, efforts have been made in roll casting to replace magnesium with alternative modifiers. The analysis of available studies and publications mainly focuses on individual components, while a comprehensive model of modification of roll cast irons using rare-earth metals still requires further investigation and generalization.*

*The aim of the study is to determine the carbide-forming ability of various rare-earth metals in white roll cast irons. To achieve this goal, the following task was formulated: to establish the influence of chemical elements of the cerium and yttrium subgroups of rare-earth metals on the microstructure of roll cast iron, as well as to substantiate the selection of rare-earth metals for the treatment of white roll cast irons.*

*Regularities of the influence of rare-earth elements of the cerium subgroup (samarium and cerium) and the yttrium subgroup (gadolinium and yttrium) on the structure formation processes of white cast irons for rolling rolls under cooling rates typical for roll casting molds have been established. It has been shown that the individual effects of the studied subgroups of rare-earth metals on the microstructure differ in terms of their residual content ranges.*

*Modification of white cast iron with rare-earth metals leads to changes in the type of carbide eutectic and the dispersion of pearlite. It has been established that the carbide-forming ability of rare-earth metals of the yttrium subgroup is 5.2 times higher than that of the cerium subgroup. This made it possible to substantiate the composition of the base of a complex modifier to achieve the required properties of roll materials.*

*Keywords: roll cast iron, rare-earth metal, structural constituent, carbide-forming ability, cast iron modification, cast iron microstructure, structure formation, eutectic transformations*

**Іванова Людмила Харитонівна** – доктор технічних наук, професор, професор кафедри ливарного виробництва, Український державний університет науки і технологій.

ORCID:<https://orcid.org/0000-0002-5997-610X>

**Селівьорстов Вадим Юрійович** – доктор технічних наук, професор, професор кафедри ливарного виробництва, Український державний університет науки і технологій.

ORCID:<https://orcid.org/0000-0002-1916-625X>

**Хитько Олександр Юрійович** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри ливарного виробництва, Український державний університет науки і технологій.

ORCID:<https://orcid.org/0000-0002-5997-610X>

**Білий Олександр Петрович** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри ливарного виробництва, Український державний університет науки і технологій.

ORCID:<https://orcid.org/0000-0002-5997-610X>

**Ivanova Liudmyla Kharytonivna** – Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Foundry Engineering, Ukrainian State University of Science and Technologies.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5997-610X>

**Selivorstov Vadym Yuriiovich** – Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Foundry Engineering, Ukrainian State University of Science and Technologies.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1916-625X>

**Khytko Oleksandr Yuriiovich** – PhD (Technical Sciences), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Foundry Engineering, Ukrainian State University of Science and Technologies.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5997-610X>

**Bilyi Oleksandr Petrovych** – PhD (Technical Sciences), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Foundry Engineering, Ukrainian State University of Science and Technologies.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1234-5404>