

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2021-265-1-188-193>

УДК 621.745.55:629.1.01

## ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ БАРІЮ ТА ЦЕРІЮ НА ПРОЦЕС ГРАФІТИЗАЦІЇ ТА СТРУКТУРУ ФРИКЦІЙНОГО СІРОГО ЧАВУНУ

Шевченко О.В.

## STUDY OF THE INFLUENCE OF BARIUM AND CERIUM ON THE GRAPHITIZATION PROCESS AND THE STRUCTURE OF FRICTION GRAY CAST IRON

Shevchenko O.V.

*В статті досліджено вплив барію та церію на процес графітизації та структуру фрикційного сірого чавуна, а саме вплив цих хімічних елементів на морфологію, розподіл та дисперсність цементиту та графіту. Для модифікування чавуна було використано два типи лігатур: лігатуру СіітМіш-І (Si-Ca) та лігатуру ЦІСМ (Si-Ca-Ba-Ce). Встановлено оптимальні концентрації лігатур, які забезпечують необхідну ступінь графітизації чавуна, попереджують утворення ледебуриду та обмежують вміст вторинного цементиту на припустимому рівні. Встановлено, що модифікування чавуна лігатурою ЦІСМ, що містить барій та церій, дозволяє повністю подавити утворення міждендритного графіту, який суттєво знижує фрикційні характеристики чавуна. Доведено, що модифікування сірого фрикційного чавуна комплексною лігатурою, що містить барій та церій, дозволяє приблизно втричі зменшити довжину графітних включень порівняно із чавуном, модифікованим силіко - кальцієвою лігатурою.  
**Ключові слова:** сірий чавун, фрикційний матеріал, модифікування, аустеніт, лігатура, вторинний цементит, графіт, ледебурид.*

**Вступ.** Інтенсивний розвиток сучасних транспортних засобів не можливий без удосконалення фрикційних матеріалів, що застосовуються в гальмівних системах. Більш жорсткі умови експлуатації транспортних засобів диктують необхідність розробки нових фрикційних матеріалів та вдосконалення існуючих фрикційних сплавів. Одним із традиційних класів фрикційних матеріалів, що знаходять широке застосування в гальмівних системах автомобільного та залізничного транспорту, є сірі чавуни.

З сірих чавунів виготовляються фрикційні елементи, що працюють в умовах короткочасного локального підвищення температури в зоні тертя до 600-700°C [1]. Основні проблеми, що виникають при експлуатації фрикційних елементів, виготовлених із сірих чавунів, пов'язані із наявністю в структурі цих матеріалів міждендритного графіту. Міждендритний графіт, навіть при достатньо високій

дисперсності графітних включень, суттєво знижує експлуатаційний ресурс та надійність гальмівних елементів, виготовлених з сірих чавунів. Тому в наступний час у різних країнах проводяться активні пошуки нових систем легування та модифікування сірих чавунів, спрямовані на запобігання утворенню міждендритного графіту в виливках із сірих чавунів [1 - 5]. Певні успіхи у цьому напрямку досягнуті для сірих чавунів з ферито - перлітною та перлітною структурою металевої основи при використанні для модифікування чавунів лігатур, що містять барій та церій [6]. Закономірності графітизації сірих чавунів аустенітного класу, зокрема марганцевих чавунів, при їхньому модифікуванні барієм та церієм до теперішнього часу не досліджені. Окремо слід відзначити про те, що до теперішнього часу не досліджено вплив алюмінію на процес графітизації цих чавунів у присутності барію та церію, незважаючи на те, що алюміній досить часто використовуються в цих сплавах в якості легуючого елемента.

Отже, **метою роботи** є визначення оптимального складу комплексного модифікатора, який забезпечує необхідну структуру фрикційного чавуна та покращення його триботехнічних характеристик.

### **Завдання дослідження:**

1. Дослідити вплив алюмінію, кальцію, барію та церію на процес графітизації аустенітних марганцевих сірих чавунів. Встановити оптимальний вміст лігатур, що містять кальцій, барій та церій: критерієм оптимальності є відсутність включень ледебуриду та міждендритного графіту без перевищення допустимого вмісту вторинного цементиту.

2. Дослідити вплив вмісту вуглецю та алюмінію на розподіл, морфологію та дисперсність цементитних та графітних включень в чавунах, модифікованих кальцієм, барієм та церієм.

### **Основна частина.**

При виборі системи легування фрикційних сірих чавунів зазвичай вирішуються наступні проблеми: створення умов, що унеможливають утворення

ня ледебуриту; отримання оптимального вмісту вторинного цементиту (2-4 %); забезпечення необхідного ступеня графітизації при мінімальній кількості міждендритного графіту [2]. Перші два завдання вирішуються шляхом вибору оптимального співвідношення між концентрацією вуглецю та кремнію (вуглець та кремній є елементами - графітизаторами), а також введенням до складу чавуна додаткових елементів - графітизаторів: нікелю, алюмінію, міді. Вуглець, кремній, нікель, алюміній (при його вмісті не більше 5 %), мідь сприяють графітизації чавуна, але при цьому ніяк не впливають на морфологію та дисперсність графітної фази [3]. Для подрібнення графітних включень та підвищення рівномірності їхнього розподілу до складу сірих чавунів вводять кальцій, сурму, барій, церій [4]. Кальцій та сурма сприяють інтенсивному подрібненню графітних включень, але у більшості випадків в структурі чавунів залишається міждендритний графіт [5]. Попередити утворення міждендритного графіту в сірих чавунах можна двома засобами: модифікуванням чавунів барієм та церієм; використанням спеціальних режимів охолодження або спеціальної термічної обробки з тривалим часом витримки при температурі, яка на 100 - 150°C перевищує критичну точку  $A_{c1}$  [6]. Забезпечити контрольовані режими охолодження виливок в умовах реального виробництва практично неможливо, а додаткова термічна обробка є вкрай енергоємною. Тому на сьогодні найбільш перспективним способом запобігання утворенню міждендритного графіту в виливках з сірих чавунів вважається комплексне модифікування чавунів барієм та церієм [6]. Цей спосіб є універсальним, оскільки він може бути застосований для будь-яких процесів литва [6]. Позитивний вплив барію та церію на морфологію графітних включень спостерігається при сумарній залишковій концентрації цих елементів не більше 0,18 %. При більш високій концентрації барію та церію в сірих чавунах процес графітизації уповільнюється, а вміст карбідів суттєвим чином збільшується [6].

Основна мета роботи полягала у дослідженні впливу хімічного складу модифікаторів на процес графітизації та структуру аустенітного фрикційного сірого чавуну.

**Методика проведення експериментальних досліджень.** Хімічний склад чавунів змінювався у наступних межах: 3,4 - 3,8 % вуглецю; 10 - 12 % марганцю; 2,0 - 3,5 % алюмінію; 1,7 - 1,9 мас. % Si.

Модифікування чавунів здійснювалось двома типами лігатур: лігатурою СітМіш-1 системи кремній-кальцій та лігатурою ЦІСМ системи кремній-кальцій-барій-церій. Пресовані брикети лігатур додавались у розплавлений чавун безпосередньо перед розливанням чавуна у ливарні форми – кокілі з теплоізоляційним покриттям по ТУ 226.32.884 - 86.

Мікроструктура чавунів досліджувалась на оптичному мікроскопі МІМ-8М. Хімічне травлення мікрошліфів здійснювалось царською водкою. Шлі-

фування та полірування мікрошліфів виконувалось на шліфувально-полірувальному верстаті СШП-12.

Оскільки чавуни, що досліджувались, мали аустенітну металеву матрицю, їхню мікроструктуру визначали за графітом та цементитом. Структуру фосфідної евтектики не досліджували, оскільки чавуни містили не більше 0,15 мас. % фосфору.

При визначенні графіту оцінці підлягали форма, розподіл, розміри, кількість включень графіту, при визначенні цементиту – кількість та розміри включень цементиту, наявність ледебуриту.

Металографічний аналіз чавунів починали із вивчення травлених ділянок мікрошліфів, на яких виявляли вторинний і евтектичний цементит. Якщо в структурі чавунів виявляли евтектичний цементит (ледебурит), зразки бракували. Кількість вторинного цементиту не повинна перевищувати 6 %; у протилежному випадку зразки також бракували.

Якщо на травленій ділянці мікрошліфів був відсутній ледебурит і кількість вторинного цементиту не перевищувала 6 %, проводили аналіз форми та розподілу включень графіту на нетравлених ділянках мікрошліфів.

Кількість вторинного цементиту та ледебуриту в структурі чавунів оцінювали за шкалою 10А ГОСТ 3443-87 як середній відсоток площі, яку займали ці включення на мікрошліфах не менше ніж у трьох полях зору.

При наявності в структурі чавунів включень цементиту у кількості менше 1,0 % (одне - два включення площею менше 2000  $\mu\text{m}^2$  у трьох різних полях зору), їх оцінювали як «сліди».

Розмір ізольованих включень вторинного цементиту та ледебуриту оцінювали за шкалою 10Б ГОСТ 3443-87 через середню площу трьох найбільших включень.

Форма включень графіту в структурі чавунів оцінювалась по шкалі 1А ГОСТ 3443-87.

Оцінка довжини включень графіту здійснювалась по шкалі 1Б ГОСТ 3443-87. Визначення довжини включень графіту проводилось по середній довжині трьох найбільших включень. Максимальна довжина включень визначалась у трьох різних полях зору.

Розподіл включень графіту оцінювали по шкалі 1В ГОСТ 3443-87. При наявності в структурі чавунів включень графіту, що займали площу до 1,0 % від загальної площі мікрошліфа, їх оцінювали як «сліди».

Кількість включень графіту оцінювали за шкалою 1Г ГОСТ 3443-87 через середній відсоток площі, яку займали на мікрошліфах включення графіту у трьох різних полях зору.

**Вплив модифікаторів на кількість, розподіл та розміри включень цементиту та графіту.** Дослідження впливу модифікаторів на кількість, розподіл та розміри включень цементиту проводили на серії зразків, які мали наступний хімічний склад: 3,4 - 3,5 мас. % C; 10 - 11 мас. % Mn; 2,5 - 2,7 мас. % Al; 1,7 - 1,9 мас. % Si. Немодифікований чавун має

структуру аустеніт + вторинний цементит + ледебурит без помітних слідів графіту (рис. 1). Такий чавун непридатний для виготовлення фрикційних деталей.

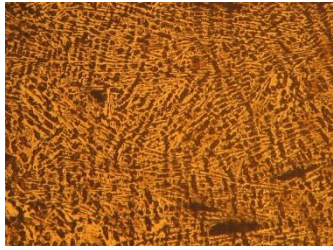


Рис. 1. Мікроструктура немодифікованого чавуна: (3,4 - 3,5 мас. % C; 10 - 11 мас. % Mn; 2,5 - 2,7 мас. % Al; 1,7 - 1,9 мас. % Si): структура – аустеніт + вторинний цементит + ледеburит; вміст вторинного цементиту та ледеburиту 45 - 50 %;  $\times 100$

При модифікуванні чавуну силіко - кальцієвою лігатурою СітМіш-1 у кількості 0,03 мас. % в мікроструктурі виливок чітко фіксуються вторинний цементит і ледеburит (рис. 2). Вміст цементиту та ледеburиту за еталонною шкалою 10А ГОСТ 3443 - 87 складає 10 - 15 % (шкала Ц10). При збільшенні вмісту лігатури до 0,05 мас. % ледеburит зникає (рис. 3), а кількість вторинного цементиту не перевищує 6 % (шкали Ц2 - Ц4 ГОСТ 3443 - 87). Комплексна лігатура ЦІСМ системи Si-Ca-Ba-Ce забезпечує інтенсивну графітизацію чавуну при меншій концентрації, ніж силіко - кальцієва лігатура СітМіш-1.

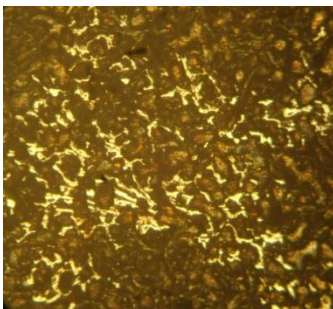


Рис. 2. Мікроструктура чавуна, модифікованого силіко - кальцієвою лігатурою СітМіш-1 в кількості 0,03 мас. % (3,4 - 3,5 мас. % C; 10 - 11 мас. % Mn; 2,5 - 2,7 мас. % Al; 1,7 - 1,9 мас. % Si): структура – аустеніт + графіт + вторинний цементит + ледеburит; вміст вторинного цементиту та ледеburиту 10 - 15 %;  $\times 100$

При модифікуванні чавуну лігатурою ЦІСМ у кількості 0,01 мас. % об'ємний вміст вторинного цементиту і ледеburиту у виливках складає  $\sim 10$  % (рис. 4). При збільшенні вмісту лігатури до 0,03 мас. % ледеburит не виділяється, а кількість вторинного цементиту не перевищує 4 % (рис. 5).

Більш детальні дані щодо впливу вмісту модифікаторів на кількість цементиту в чавуні наведено на рис. 6. Оптимальний вміст силіко - кальцієвого модифікатора СітМіш-1 складає 0,05 - 0,1 %, комплексного модифікатора ЦІСМ системи Si-Ca-Ba-Ce

– 0,03 - 0,05 %. При такій концентрації модифікаторів вміст вторинного цементиту в чавуні складає 2 - 4 %, ледеburит – відсутній.

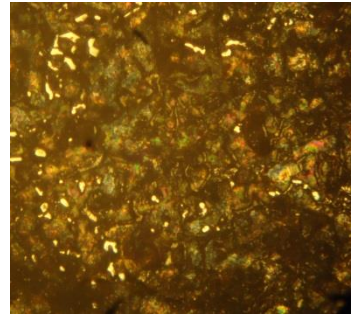


Рис. 3. Мікроструктура чавуна, модифікованого силіко - кальцієвою лігатурою СітМіш-1 в кількості 0,05 мас. % (3,4 - 3,5 мас. % C; 10 - 11 мас. % Mn; 2,5 - 2,7 мас. % Al; 1,7 - 1,9 мас. % Si): структура – аустеніт + графіт + вторинний цементит; вміст вторинного цементиту 2 - 6 %;  $\times 100$



Рис. 4. Мікроструктура чавуна, модифікованого комплексною лігатурою ЦІСМ системи Si-Ca-Ba-Ce у кількості 0,01 мас. % (3,4 - 3,5 мас. % C; 10 - 11 мас. % Mn; 2,5 - 2,7 мас. % Al; 1,7 - 1,9 мас. % Si): структура – аустеніт + графіт + вторинний цементит + ледеburит; вміст вторинного цементиту та ледеburиту  $\sim 10$  %;  $\times 100$

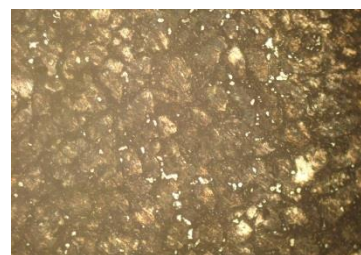


Рис. 5. Мікроструктура чавуна, модифікованого комплексною лігатурою ЦІСМ системи Si-Ca-Ba-Ce у кількості 0,03 мас. % (3,4 - 3,5 мас. % C; 10 - 11 мас. % Mn; 2,5 - 2,7 мас. % Al; 1,7 - 1,9 мас. % Si): структура – аустеніт + графіт + вторинний цементит; вміст вторинного цементиту 2 - 4 %;  $\times 100$

Вуглець та алюміній у складі чавуну підвищують швидкість його графітизації та сприяють зменшенню вмісту цементиту (рис. 7, 8). Дослідження впливу концентрації вуглецю на вміст цементиту в чавуні проводили з використанням зразків, які містили 3,2; 3,5 та 3,8 мас. % C. Вміст марганцю, алюмінію та кремнію в зразках був однаковий: 10 - 11

мас. % Mn; 2,5 мас. % Al; 1,7 - 1,9 мас. % Si. В якості модифікатора використовували комплексну лігатуру ЦІСМ. Вона забезпечує більш інтенсивну графітизацію чавуну, ніж лігатура СітМіш-1 (рис. 6). При вмісті в чавуні лігатури ЦІСМ 0,03 мас. % збільшення концентрації вуглецю з 3,2 до 3,8 мас. % призводить до зменшення кількості цементиту з 6 % до 2 %. В чавуні, що містить 0,05 мас. % лігатури ЦІСМ, при збільшенні концентрації вуглецю з 3,2 до 3,8 мас. % кількість цементиту зменшується з 4 до 1 % (рис. 7).

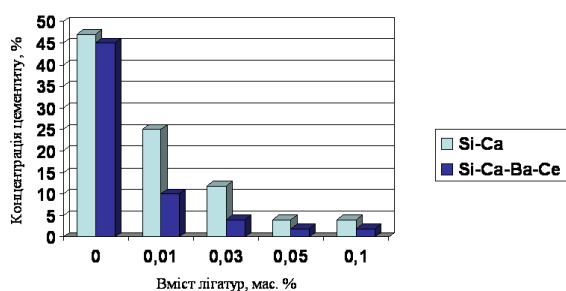


Рис. 6. Вплив вмісту модифікаторів на концентрацію цементиту в чавуні (3,4 - 3,5 % C; 10 - 11 % Mn; 2,5 - 2,7 % Al; 1,7 - 1,9 % Si)

Дослідження впливу концентрації алюмінію на вміст цементиту в чавуні проводили з використанням зразків, які містили 2,5; 3,0 та 3,5 мас. % Al. Вміст марганцю, вуглецю та кремнію в зразках був однаковий: 10 - 11 мас. % Mn; 3,5 мас. % C; 1,7 - 1,9 мас. % Si. В якості модифікатора використовували комплексну лігатуру ЦІСМ. При вмісті лігатури 0,03 мас. % збільшення концентрації алюмінію з 2,5 до 3,5 мас. % призводить до зменшення кількості цементиту з 4 % до 1 %. В чавуні, що містить 0,05 мас. % лігатури ЦІСМ, при збільшенні концентрації алюмінію з 2,5 до 3,5 мас. % кількість цементиту зменшується з 2 до 0,5 % (рис. 8).

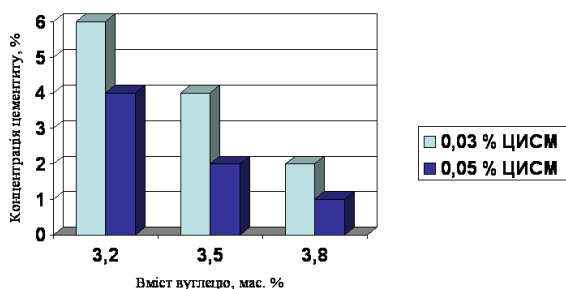


Рис. 7. Вплив вмісту вуглецю на концентрацію цементиту в чавуні, модифікованому лігатурою ЦІСМ (10 - 11 мас. % Mn; 2,5 мас. % Al; 1,7 - 1,9 мас. % Si)

Форма та розподіл включень графіту досліджувались на нетравлених ділянках мікрошліфів. Для досліджень використовували дві серії зразків з вмістом вуглецю 3,5 та 3,8 мас. %. Вміст марганцю, алюмінію та кремнію в зразках не змінювався і складав: 10 - 11 мас. % Mn; 2,5 мас. % Al; 1,7 - 1,9

мас. % Si. В зразках з чавуну, модифікованого силіко - кальцієвою лігатурою СітМіш-1, форма включень графіту – пластинчаста завихрена (еталонна шкала ПГф2 по ГОСТ 3443-87) (рис. 9, а, б). Довжина включень графіту відповідає еталонній шкалі ПГд90 (ГОСТ 3443-87; середня довжина графітних включень 90 мкм). Розподіл включень графіту – колонії пластинчастого та міждендритного графіту (шкали ПГр3, ПГр4 по ГОСТ 3443-87).

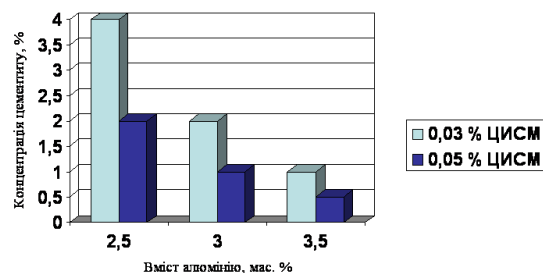
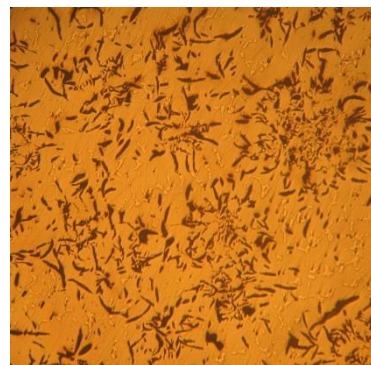


Рис. 8. Вплив вмісту алюмінію на концентрацію цементиту в чавуні, модифікованому лігатурою ЦІСМ (10 - 11 мас. % Mn; 3,5 мас. % C; 1,7 - 1,9 мас. % Si)



а



б

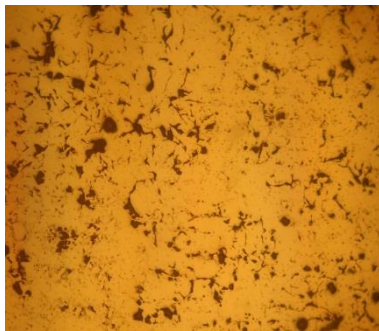
Рис. 9. Морфологія графіту у чавуні, модифікованому силіко - кальцієвою лігатурою СітМіш-1 в кількості 0,1 мас. % (10 - 11 мас. % Mn; 2,5 мас. % Al; 1,7 - 1,9 мас. % Si); а – вміст вуглецю 3,4 %; б – вміст вуглецю 3,8 мас. %

І при концентрації вуглецю 3,5 % (рис. 9, а), і при концентрації вуглецю 3,8 % (рис. 9, б) на мікрошліфах чітко ідентифікується грубодисперсна графітна евтектика. При збільшенні концентрації

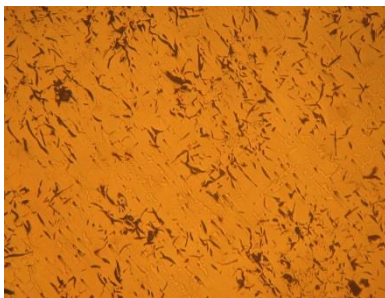


вуглецю в чавуні з 3,5 до 3,8 % зростає товщина пластин графіту та кількість графіту, а також доля графітних включень, розташованих по границях зерен аустеніту (міждендритний розподіл графіту). Міждендритний розподіл графіту сприяє одночасному суттєвому зменшенню міцності та пластичності чавуну. Також знижується тріщиностійкість чавуну при термоциклуванні. Термоциклування полягає спочатку у різкому підвищенні контактної температури у трибосполученні при гальмуванні, а потім у різкому охолодженні гальмівних колодок після зупинки.

В зразках з чавуну, модифікованого лігатурою ЦІСМ, форма включень графіту – пластинчаста прямокутнісна (шкала ПГф1 по ГОСТ 3443-87) (рис. 10, а, б). Довжина включень графіту відповідає еталонній шкалі ПГд45 (ГОСТ 3443-87; середня довжина графітних включень 45 мкм). Розподіл включень графіту – рівномірний (шкала ПГр1 по ГОСТ 3443-87). Колонії міждендритного та пластинчастого графіту не виявлені як при концентрації вуглецю 3,5 % (рис. 9, а), так і при концентрації вуглецю 3,8 % (рис. 10, б).



а



б

Рис. 10. Морфологія графіту у чавуні, модифікованому силіко - кальцієвою лігатурою СітМіш-1 в кількості 0,1 мас. % (10 - 11 мас. % Mn; 2,5 мас. % Al; 1,7 - 1,9 мас. % Si);  $\times 100$ ; а – вміст вуглецю 3,4 %; б – вміст вуглецю 3,8 мас. %

Відсутність колоній міждендритного та пластинчастого графіту в чавуні, що модифікований лігатурою ЦІСМ, можна пояснити впливом церію та барію, котрі входять до складу цієї лігатури. Церій та барій у невеликих концентраціях суттєво збільшують кількість центрів графітизації при первинній кристалізації чавуну. Внаслідок цього утворюється

дрібнодисперсна графітна евтектика з рівномірним розподілом включень графіту в аустенітній матриці. Таким чином, фрикційний чавун найбільш доцільно модифікувати комплексною лігатурою ЦІСМ, котра не тільки прискорює процес графітизації чавуна, але і подрібнює графітну фазу (перш за все графітну евтектику). Оптимальний вміст лігатури складає 0,03 - 0,05 % від маси розплавленого чавуну.

### Висновки

1. Досліджено вплив модифікаторів СітМіш-1 і ЦІСМ на структуру сірих чавунів з аустенітною матрицею. Встановлено оптимальні концентрації модифікаторів, при яких досягається максимальна ступінь графітизації чавунів. Оптимальний вміст силіко-кальцієвого модифікатора СітМіш-1 складає 0,05 - 0,1 %, комплексного модифікатора ЦІСМ – 0,03 - 0,05 %. При такій концентрації модифікаторів вміст вторинного цементиту в чавуні не перевищує 2 - 4 %.

2. Встановлено, що комплексне модифікування марганцевого аустенітного чавуну церієм та барієм (модифікатор ЦІСМ) дозволяє повністю попередити утворення міждендритного графіту, чого не можливо досягнути при модифікуванні чавуна лише кальцієм (модифікатор СітМіш-1).

3. Доведено, що модифікування сірого фрикційного чавуну комплексною лігатурою, що містить барій та церій, дозволяє приблизно втричі зменшити довжину графітних включень порівняно із чавуном, модифікованим силіко-кальцієвою лігатурою.

### Література

1. Ямшинський М.М., Назаренко В.С., Кравченко К.О. Аналіз гальмівних колодок та шляхи оцінки їх перспективних конструкцій // ВІСНИК СХУ ім. В. Даля, 2015. № 1 (218). С. 204 – 209.
2. Пілюшенко В. Л., Шаповалов Ю. С. Формування структури і властивостей зносостійких чавунів зі зміною ступеня їх легування // Металознавство та обробка металів, 2004. № 2. С. 120 - 121.
3. Марукович Е.И., Карпенко М.И. Износостойкие сплавы. – М.: Машиностроение, 2005. 428с.
4. Tribological study of Fe-Cu-Cr-graphite alloy and cast iron railway brake shoes by pin-on-disc technique / C. Ferrer, M. Pascual, D. Busquets, E. Rayón. // Wear, 2010. 268. P. 784–789.
5. Tribological investigation of titanium-based materials for brakes / Peter J. Blau, Brian C. Jolly, Jun Qu]. // Wear, 2007. 263. P. 1202 – 1211.
6. Балицький М.Г. Експериментальні методи оптимізації ливарних сплавів. – Львів: Львівська політехніка, 2003. 204 с.

### References

1. Yamshinsky M., Nazarenko V., Kravchenko K. Analysis of the brake pads and the ways of assessing their perspective designs // Visnyk of Volodymyr Dahl EUNU, 2015. № 1 (218). P. 204 – 209.
2. Piliushenko V. L., Shapovalov Yu. S. Formuvannia struktury i vlastyvoستي znosostiikh chavuniv zi zminoiu stupinia yikh lehuvannia // Metaloznavstvo ta obrobka metaliv, 2004. № 2.

3. Marukovych E.Y., Karpenko M.Y. Yznosostoikye splavy. – М.: Mashynostroenye, 2005. 428 p.
4. Tribological study of Fe–Cu–Cr–graphite alloy and cast iron railway brake shoes by pin-on-disc technique / C. Ferrer, M. Pascual, D. Busquets, E. Rayón. // Wear, 2010. №268. P. 784–789.
5. Tribological investigation of titanium-based materials for brakes / Peter J. Blau, Brian C. Jolly, Jun Qu]. // Wear, 2007. №263. P. 1202–1211.
6. Balytskyi M.H. Eksperymentalni metody optymizatsii lyvarnykh splaviv. – Lviv: Lvivska politekhnika, 2003. 204 p.

**Шевченко А.В. Исследование влияния бария и церия на процесс графитизации и структуру фрикционного серого чугуна.**

В статье исследовано влияние бария и церия на процесс графитизации и структуру фрикционного серого чугуна, а именно влияние этих химических элементов на морфологию, распределение и дисперсность цементита и графита. Для модифицирования чугуна было использовано два типа лигатур: лигатура СиитМиш-1 (Si-Ca) и лигатура ЦИСМ (Si-Ca-Ba-Ce). Установлены оптимальные концентрации лигатур, которые обеспечивают необходимую степень графитизации чугуна, предотвращают образование ледебурита и ограничивают содержание вторичного цементита на допустимом уровне. Установлено, что модифицирование чугуна лигатурой ЦИСМ, содержащий барий и церий, позволяет полностью подавить образование междендритного графита, который существенно снижает фрикционные характеристики чугуна. Показано, что модифицирование серого фрикционного чугуна комплексной лигатурой, содержащей барий и церий, позволяет примерно втрое уменьшить длину графитных включений в сравнении с чугуном, модифицированным силико-кальциевой лигатурой.

**Ключевые слова:** фрикционный материал, модифицирование, аустенит, лигатура, вторичный цементит, графит, ледебурит.

**Shevchenko O.V. Study of the influence of barium and cerium on the graphitization process and the structure of friction gray cast iron.**

The authors of this scientific article conducted comprehensive studies aimed at identifying the influence of barium and cerium on the graphitization process and the structure of frictional gray cast iron. The purpose of this scientific article: to investigate the effect of barium and cerium, which are part of industrial foundry alloys used to modify iron-carbon alloys, on the morphology, distribution and dispersion of cementite and graphite. In the course of experimental studies, two industrial foundry alloys were used to modify cast iron. First foundry alloy: foundry alloy SiitMish-1 based on silicon and calcium. Second foundry alloy: foundry alloy TsISM; this foundry alloy is a powder alloy that contains silicon, calcium, barium, cerium. The authors of this article have established the optimal concentration of foundry alloys that provide the necessary degree of graphitization of cast iron without the formation of ledeburite. Such concentrations of foundry alloys make it possible to avoid the formation of ledeburite in the structure of cast iron and to limit the content of secondary cementite: the content of secondary cementite is optimal for gray friction cast irons, which have an austenitic structure of the metal base. The authors of this article found that the modification of cast iron with a foundry alloy TsISM, which contains barium and cerium, completely prevents the formation of graphite, which is located along the boundaries of dendrites. Graphite, which is located along the boundaries of dendrites, significantly reduces the frictional characteristics of cast iron. It was found that the modification of cast iron only with calcium does not allow avoiding the formation of graphite, which is located along the boundaries of dendrites. Modification of gray friction cast iron with a complex master alloy containing barium and cerium makes it possible to approximately three times reduce the length of graphite inclusions in comparison with cast iron modified with a silicon-calcium alloy.

**Key words:** friction material, modification, austenite, foundry alloy, secondary cementite, graphite, ledeburite.

**Шевченко Олександр Володимирович** – к.т.н., доц., доцент кафедри машинобудування та прикладної механіки, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля (м. Северодонецьк), [shev.cmw@ukr.net](mailto:shev.cmw@ukr.net)

Стаття подана 10.02.2021 р.