

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2021-265-1-194-200>

УДК 621.745.55:629.1.01

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ МІКРОЛЕГУВАННЯ НА ЗНОСОСТІЙКІСТЬ ГАЛЬМІВНИХ КОЛОДОК

Шевченко О.В., Сергієнко О.В., Возлюблений Б.М.

STUDY OF THE MICRO-ALLOYING INFLUENCE ON THE WEAR RESISTANCE OF BRAKE PADS

Shevchenko O.V., Serhiienko O.V., Vozliublenyi B.M.

В статті досліджено вплив мікролегування на зносостійкість гальмівних колодок, а саме вплив концентрації вуглецю та алюмінію на вміст, морфологію та дисперсність цементиту у чавуні при введенні модифікаторів системи Si-Ca та Si-Ca-Ba-Ce. Отримані закономірності графітизації марганцевих сірих чавунів, легованих алюмінієм, при їхньому модифікуванні лігатурами системи Si-Ca та Si-Ca-Ba-Ce дають можливість встановити оптимальний вміст цих лігатур у чавуні, при якому забезпечується його задовільна структура без утворення міждендритного графіту та без перевищення допустимого вмісту вторинного цементиту, який забезпечує мінімальну інтенсивність зношування важко навантажених гальмівних колодок в умовах сухого тертя.

Ключові слова: гальмівна колодка, зносостійкість, мікролегування, фрикційний чавун, інтенсивність зношування.

Вступ. Гальмування та фрикційний знос в умовах сухого тертя являють собою специфічні нестационарні процеси, які супроводжуються суттєвими структурними змінами в поверхневих шарах деталей, що контактують між собою. Для інтенсивних процесів гальмування, що супроводжуються значним тепловиділенням і високими температурами у зоні контакту, які істотно впливають на інтенсивність зношування пар тертя.

Для виготовлення фрикційних елементів, що працюють в умовах короткочасного локального підвищення температури до 700°C, широко використовуються сірі чавуни [1]. Одним з перспективних напрямків поліпшення структури фрикційних сірих чавунів є мікролегування та модифікування. У сучасних фрикційних вузлах все частіше починають використовуватись гальмівні колодки з високолегованих марганцевих сірих чавунів, але до теперішнього часу не встановлені закономірності графітизації цих чавунів при

комплексному впливі кремнію, вуглецю та алюмінію, з однієї сторони, та кальцію, барію і церію з іншої сторони.

У зв'язку з цим **метою роботи** є розробка конкретних рекомендацій щодо використання лігатур, що містять кальцій, барій та церій, для модифікування марганцевих сірих чавунів, з яких виготовляються важко навантажені гальмівні колодки рухомого складу залізничного транспорту.

Завдання дослідження:

1. Дослідити закономірності графітизації марганцевих сірих чавунів, легованих алюмінієм, при їхньому модифікуванні лігатурами системи Si-Ca та Si-Ca-Ba-Ce. Встановити оптимальний вміст цих лігатур у чавуні, при якому забезпечується задовільна структура чавуна без утворення міждендритного графіту та без перевищення допустимого вмісту вторинного цементиту.

2. Дослідити вплив концентрації вуглецю та алюмінію на вміст, морфологію та дисперсність цементиту у чавуні при введенні у чавун модифікаторів системи Si-Ca та Si-Ca-Ba-Ce.

3. Оптимізувати склад марганцевого сірого чавуна за критерієм найменшої інтенсивності зношування.

Основна частина.

Для фрикційних вузлів тертя характерні наступні режими роботи [2]:

1. Легкі, коли на поверхні тертя температура не перевищує 250°C.

2. Середні і важкі, при яких температура відповідно підвищується до 250 - 600°C та 600 - 1000°C.

3. Надважкі, коли температура досягає 1000 - 1300°C і більше.

Зносостійкість литих деталей при сухому терті, також, як і при абразивному зносі, знаходиться, як правило, у прямій залежності від твердості виливків. Але у деяких випадках ця залежність має зворотний

характер. Так, зносостійкі та тверді білі чавуни практично не використовуються в умовах фрикційного зносу, а перевага віддається графітізованим сплавам системи залізо - вуглець - кремній [3]. Основними особливостями сірих фрикційних чавунів є: високий коефіцієнт тертя, висока зносостійкість і здатність протистояти утворенню задирів у широкому інтервалі температур. Цим вимогам задовільно відповідають сірі фосфористі чавуни з металевою основою із дрібнозернистого перліту з рівномірно розподіленими включеннями подвійної та потрійної фосфідної евтектики і пластинчастого графіту [4]. У чавунах з вуглецевим еквівалентом $S_e > 5,2$ при низьких швидкостях охолодження утворюється розеткова форма графіту, що негативно впливає на механічні та експлуатаційні властивості фрикційних виробів. При цій формі графіту в центральній зоні зразків діаметром 30 - 60 мм утворюється переважно ферит, що призводить до зниження міцності, вібростойкості і зносостійкості чавуну [4]. Більш високі механічні властивості забезпечують чавуни доевтектичного та евтектичного складу. У виливках з товщиною стінок 40 мм при підвищеному вмісті фосфору утворюється металева основа П96 (Ф4) - ФЕЗ - ПД0 і графіт ПГ6 - ПГр3 - ПГд45 - ПГф2. Така структура забезпечує литим виробам хороші фрикційно-зносні властивості при роботі в парі з асбофрикційними матеріалами [5]. Якщо в бінарній системі Fe - C критична швидкість кристалізації, при якій сірий чавун переходить у білий, дорівнює 420 - 450 мкм/с, то в потрійній системі Fe - C - P вона змінюється від 30 до 100 мкм/с [6]. Зміна довжини включень графіту в основному визначається умовами охолодження і розміром відлитого зразка. Чисто перлітна структура в масивних зразках забезпечується тільки при відносно низькій ступені евтектичності ($S_e = 0,7 - 0,8$), що характерно для фосфористих нелегованих і модифікованих чавунів, які використовуються для виробництва тонкостінних фрикційних виливків. При збільшенні ступеня евтектичності до 0,8 - 0,9 кількість фериту в структурі різко зростає, а зносостійкість зразків знижується [3].

Встановлено, що добавка фосфору в сірий чавун підвищує його фрикційні властивості, але сприяє утворенню тріщин, знижує термічну стійкість, стабільність коефіцієнта тертя при підвищених температурах і механічні властивості, особливо динамічну міцність [6]. Для поліпшення механічних властивостей фрикційного сірого чавуну доцільно реалізувати в ньому хоча б обмежену пластичність, що запобігає його крихкому руйнуванню. При збільшенні ступеня евтектичності фосфористих чавунів до 0,8 - 1,0 має місце значне зниження пластичності, хоча дисперсність перліту залишається досить високою як при литті в кокіль, так і в пісчано - глиняні форми. У виливках з товщиною стінок понад 30 мм виникає осьова пористість і неоднорідність структури. У виливках з

товщиною стінок 16 - 20 мм при литті в кокіль утворюється структура вибіленого чавуну при $S_e > 0,75$ [7].

Для роботи у фрикційних парах, в яких контактні поверхні нагріваються до температури не більше 250°C і небезпеки утворення тріщин немає, вміст фосфору в чавуні може бути доведений до 1,35 - 1,85 %. Однак для виготовлення фрикційних виробів, що працюють при підвищених температурах та ударних навантаженнях, коли одночасно з високою зносостійкістю необхідні підвищені термічна стійкість і динамічна міцність (наприклад, для гальмівних барабанів), слід використовувати більш термостійкі чавуни або інші фрикційні сплави [3, 6, 7].

Для отримання сірих фрикційних чавунів поряд з легуванням фосфором використовують комплексні лігатури і модифікатори, що містять бориди тугоплавких металів, дисульфід молібдену, нітрид бору і рідкоземельні метали, а також інші компоненти, що знижують знос при сухому терті і підвищують коефіцієнт тертя. Встановлено, що фрикційні матеріали з боридами тугоплавких металів і нітридом бору мають стабільний коефіцієнт тертя, хорошу прироблюваність, не схоплюються з контртілом, є корозійностійкими, негорючими, володіють необхідною механічною міцністю, зносостійкістю, а в ряді випадків і високими пружно-пластичними властивостями.

Для фрикційних виробів, що в процесі експлуатації нагріваються до температур 250 - 500°C, більш ефективними конструкційними матеріалами є мікролеговані сірі чавуни, що містять не більше 0,15 % фосфору [3]. Зокрема, мікролегування є одним з найефективніших засобів протидії утворенню між дендритного графіту без використання спеціальних режимів охолодження чавуну або спеціальної термічної обробки з тривалим часом витримки при температурі, на 100 - 150°C вище A_{c1} [8]. Модифікування доевтектичних зносостійких чавунів рідкоземельними металами (РЗМ) в кількості 0,03 - 0,16 % знижує точки первинних і евтектичних перетворень, збільшує евтектичне переохолодження, подрібнюючи структуру чавуну і підвищуючи його твердість та зносостійкість [8].

По характеру впливу на мікроструктуру чавуну модифікатори на основі рідкоземельних металів можна розділити на дві групи [3]:

1. Модифікатори, що прискорюють процес графітізації, але не впливають на форму та розподіл включень графіту (модифікатори систем Si - Ca, Si - Ca - Na).

2. Модифікатори, що прискорюють процес графітізації та водночас подрібнюють графітну фазу, особливо графітну евтектику (модифікатори систем Si - Ba, Si - Ce, Si - Ba - Ce).

Слід відзначити, що позитивний вплив рідкоземельних металів на мікроструктуру сірих фрикційних чавунів спостерігається при їхньому

сумарному вмісті не більше 0,18 %. При більш високій концентрації рідкоземельних металів у чавунах процес графітизації уповільнюється, а вміст карбідів збільшується. Важливим також є те, що модифікатори на основі РЗМ сильно прискорюють графітизацію вторинних карбідів та карбідів ледебуритної евтектики і водночас уповільнюють графітизацію карбідів, що входять до складу перліту [8]. За рахунок цього у чавунах, комплексно модифікованих РЗМ, отримати структуру перліту в металевій матриці значно простіше, ніж у чавунах, не модифікованих РЗМ. В металевій матриці чавунів, не модифікованих РЗМ, поряд із перлітом може міститись значна кількість фериту. Ферит вкрай негативно впливає на фрикційну зносостійкість сірих чавунів.

Коефіцієнт тертя, пластичність і міцність сірого чавуну, що має ступінь евтектичності 0,8 - 1,0, істотно підвищуються при легуванні молібденом у кількості 0,12 - 0,9 %. Для нейтралізації карбідоутворюючої дії молібдену в чавун можуть вводиться сурьма та нікель [9]. Для підвищення в'язкості чавуну може використовуватись комплексне його легування молібденом і міддю або молібденом і нікелем. Поєднання молібдену та нікелю дозволяє отримувати бейнітний чавун, що володіє одночасно високою міцністю, в'язкістю і відносно стабільним при підвищенні температури коефіцієнтом тертя [10].

Мікролегування сірого чавуну бором забезпечує підвищення стійкості коефіцієнта тертя внаслідок утворення карбоборидів і більш дисперсної та твердої евтектики, ніж фосфідна евтектика. Виливки з чавуну, мікролегованого бором в кількості до 0,35 %, мають більш високу герметичність, ніж виливки з високофосфористих чавунів. При збільшенні вмісту бору більше 0,35 % знижуються пластичність і тріщиностійкість чавуну [3]. Комплексне мікролегування є ефективним методом підвищення міцності, твердості та зносостійкості литих деталей з фрикційних чавунів. Титан та TiN у фосфористих чавунах не використовують, оскільки вони знижують коефіцієнт тертя [10].

При мікролегуванні фосфористих фрикційних чавунів металевою сурьмою остання витісняє фосфор з твердих фаз у рідкий розчин, що призводить до збільшення площі, яку займають включення фосфідної евтектики [11]. Кількість цементиту у виливках зростає, що призводить до збільшення мікротвердості фосфідної евтектики.

Для отримання голчатої бейнітоподібної структури фрикційні чавуни додатково легують молібденом. При мікролегуванні чавуну молібденом твердість підвищується до 245 - 320 НВ, а фрикційні властивості досягають параметрів, необхідних для виготовлення штамів, провідок дротяних станів і сепараторів підшипників. Сучасні фрикційні чавуни з бейнітоподібною структурою комплексно легують

вольфрамом, молібденом і нікелем [3, 11]. При комплексному мікролегуванні підвищується щільність чавуну в товстостінних виливках.

Додаткове введення в розплав кремнію, кальцію, цирконію і вуглецю збільшує схильність чавуну до усадкової пористості і знижує його фрикційні властивості. Зміна співвідношення між фосфором, кремнієм, марганцем і хромом в фосфористих чавунах є найважливішим резервом регулювання стабільності коефіцієнта тертя та інших фрикційних властивостей, а присадка молібдену в кількості 0,3 - 0,6 % підвищує фрикційну теплостійкість і службові властивості. Чавуни, леговані 0,3 - 0,6 % молібдену, 0,2 - 0,4 % фосфору і 0,03 - 0,06 % бору, характеризуються однорідною структурою графіту і металевої основи (навіть у товстостінних виливках), мають високі механічні та фрикційні властивості, стабільний (до 600°C) коефіцієнт тертя [8, 9].

Широке розповсюдження отримали високолеговані алюмінієві чавуни з пластинчастим графітом. Вони володіють рядом цінних фізичних та експлуатаційних властивостей: високою корозійною стійкістю, зносостійкістю, жароміцністю, стабільним коефіцієнтом тертя і високою теплопровідністю [12]. У сплавах з високим вмістом вуглецю алюміній впливає як на процес графітизації, так і на структуру металевої основи. Алюміній сприяє графітизації чавуну. Однак при збільшенні вмісту алюмінію понад 5 % його графітизуюча здатність знижується, а при 9 - 16 % алюмінію сплав кристалізується без виділення графіту [12]. Чавуни цієї групи характеризуються високою твердістю та крихкістю; вони погано обробляються усіма видами механічної обробки.

Відносно оптимальної структури металевої матриці сірих фрикційних чавунів єдиної думки серед дослідників не існує. Більшість дослідників відзначають, що вибір оптимальної структури металевої матриці напряму залежить від умов експлуатації деталей [3, 6, 8, 9, 11]. Якщо температура у зоні тертя не перевищує 250°C, максимальну фрикційну зносостійкість мають чавуни з мартенситною та мартенситно - бейнітною металевою основою. Мартенсит утворюється без додаткової термічної обробки у процесі охолодження виливки у ливарній формі при концентрації нікелю в чавуні 3,5 - 4,0 %.

При температурі у зоні тертя 250 - 450°C оптимальною структурою металевої основи вважається бейніт. Бейніт значно менш чутливий, ніж мартенсит, до концентраторів напруг, які утворюють пластинки графіту, і забезпечує високу тріщиностійкість сірого чавуну при різкій зміні температури у зоні тертя [3, 9, 11].

Якщо температура у зоні тертя періодично підвищується до 450 - 600°C, найкращим варіантом структури металевої основи сірих фрикційних чавунів є марганцевий аустеніт [11]. Вміст марганцю в аустенітних сірих чавунах складає 10 -

13 %. При такій концентрації марганцю утворюється стабільний аустеніт, який в умовах інтенсивної пластичної деформації поверхневих шарів фрикційних елементів сильно зміцнюється, але не розпадається з утворенням крихкого мартенситу. Марганцевий аустеніт ефективно пручається втомному руйнуванню завдяки поєднанню двох властивостей: здатності до сильного зміцнення при пластичному деформуванні та здатності до релаксації внутрішніх напруг, що виникають при пластичному деформуванні. Частковій релаксації внутрішніх напруг сприяють підвищені температури в зоні фрикційного контакту.

Мета досліджень полягала у вивченні впливу хімічного складу модифікаторів і вмісту легуючих елементів на структуру та фрикційні властивості аустенітних сірих чавунів.

Методика проведення експериментальних досліджень. Хімічний склад чавунів змінювався у наступних межах: 3,2 - 3,8 мас. % C; 9 - 12 мас. % Mn; 2,5 - 3,5 мас. % Al; 1,7 - 1,9 мас. % Si. Цілеспрямовано варіювались концентрації вуглецю, марганцю та алюмінію. Концентрація кремнію у всіх зразках залишалась на постійному рівні – 1,7 - 1,9 мас. %. Алюміній вводився до складу чавунів як замітник фосфору.

Для модифікування чавунів використовувались два типи лігатур: силіко-кальцієва лігатура СітМіш-1 та комплексна лігатура ЦІСМ системи Si-Ca-Ba-Se. Лігатури вводились у розплавлені чавуни у вигляді пресованих брикетів безпосередньо перед розливкою чавунів у ливарні форми – кокілі з теплоізоляційним покриттям по ТУ 226.32.884 - 86. Перед введенням у розплавлений чавун брикети зважувались на оптико-механічних вагах ВЛМ-001 з точністю $\pm 0,0005$ г.

Твердість вимірювалась за шкалами Бринеля та Роквела відповідно на твердомірах ТШ та ТК. Мікроструктуру чавунів досліджували на оптичному мікроскопі МІМ-8М. Для хімічного травлення мікрошліфів використовувалась царська водка. Для шліфування та полірування мікрошліфів використовувався шліфувально-полірувальний станок СШП-12. Мікротвердість вимірювалась на мікротвердомірі ПМТ-3.

Триботехнічні випробування чавунів проводились на машині тертя СМЦ-2 за схемою “ролик - колодка” (рис. 2.1). Ролик 2, виготовлений із сталі 45 твердістю 45 - 48 HRC, обертася із постійною частотою 300 об./хв., а нерухома чавунна колодка 1 притискалась до ролика з зусиллям 350Н (рис. 1). Тривалість кожного триботехнічного випробування становила три хвилини.

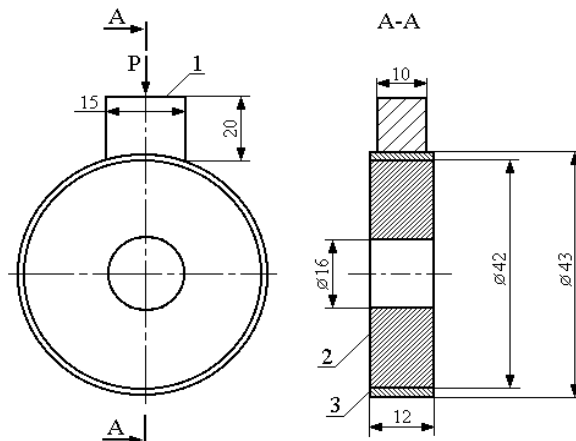


Рис. 1. Схема триботехнічних випробувань фрикційних чавунів:

1 – колодка із фрикційного чавуну; 2 – ролик зі Сталі 45

Після повного циклу випробувань визначалась втрата маси чавунних колодок і розраховувалась інтенсивність зношування чавунів. Зважування колодок до та після випробувань здійснювалось на оптико-механічних вагах ВЛМ-001 з точністю $\pm 0,0005$ г.

Інтенсивність зношування чавунів визначалась як питома втрата маси колодок:

$$W = \frac{\Delta M}{A}, \text{ г/см}^2, \quad (1)$$

де ΔM – втрата маси чавунних колодок, г;

A – площа поверхні тертя колодок; $A = 1,4 \text{ см}^2$.

Експериментальна оптимізація хімічного складу фрикційних сірих чавунів. Експериментальні дослідження проводились з використанням методики повного факторного експерименту 2^3 (табл. 1, 2) [13].

Таблиця 1

Матриця плану ПФЕ 2^3 "Інтенсивність зношування чавунів, модифікованих лігатурою Si-Ca"

Фактор, що варіюється		Al, %	Mn, %	C, %	Інтенсивність зношування (W), г/см ² (середнє значення)
Основний рівень		3,0	10,5	3,5	
Інтервал варіювання		0,5	1,5	0,3	
Верхній рівень		3,5	12,0	3,8	
Нижній рівень		2,5	9,0	3,2	
№ досліду	X ₀	X ₁	X ₂	X ₃	
1	+1	-1 (2,5)	-1 (9,0)	-1(3,2)	0,857
2	+1	+1 (3,5)	-1 (9,0)	-1 (3,2)	0,617
3	+1	-1 (2,5)	+1 (12)	-1 (3,2)	0,461
4	+1	+1 (3,5)	+1 (12)	-1 (3,2)	0,561
5	+1	-1 (2,5)	-1 (9,0)	+1 (3,8)	1,263
6	+1	+1 (3,5)	-1 (9,0)	+1 (3,8)	1,394
7	+1	-1 (2,5)	+1 (12)	+1 (3,8)	1,183
8	+1	+1 (3,5)	+1 (12)	+1 (3,8)	1,46

Експеримент складався з 8 дослідів. У кожному досліді випробовувались зразки фрикційного чавуну різного хімічного складу. Кожний дослід дублювався три рази. Факторами, що варіювались, були концентрації легуючих елементів в чавуні: алюмінію (x_1), марганцю (x_2), вуглецю (x_3). Межі варіювання концентрації легуючих елементів: алюмінію – 2,5 - 3,5 %, інтервал варіювання 0,5 %; марганцю – 9 - 12 %, інтервал варіювання 1,5 %; вуглецю – 3,2 - 3,8 %, інтервал варіювання 0,3 %. Умовний вміст легуючих елементів по верхньому та нижньому рівнях позначений через кодовані значення факторів " $X_i = +1$ " і " $X_i = -1$ ". Верхній рівень " $X_i = +1$ " відповідає максимальному вмісту легуючих елементів, нижній рівень " $X_i = -1$ " – мінімальному їхньому вмісту.

Графічне зіставлення експериментальних даних, наведених в табл. 1, 2, дозволяє заключити, що хімічний склад чавунів по різному впливає на їхню зносостійкість залежно від типу модифікатора (рис. 2).

Таблиця 2

Матриця плану ПФЕ 2³ "Інтенсивність зношування чавунів, модифікованих лігатурою Si-Ca-Ba-Ce"

Фактор, що варіюється		Al, %	Mn, %	C, %	Інтенсивність зношування (W), г/см ² (середнє значення)
Основний рівень		3,0	10,5	3,5	
Інтервал варіювання		0,5	1,5	0,3	
Верхній рівень		3,5	12,0	3,8	
Нижній рівень		2,5	9,0	3,2	
№ дослідів	X ₀	X ₁	X ₂	X ₃	
1	+1	-1 (2,5)	-1 (9,0)	-1(3,2)	0,383
2	+1	+1 (3,5)	-1 (9,0)	-1 (3,2)	0,281
3	+1	-1 (2,5)	+1 (12)	-1 (3,2)	0,232
4	+1	+1 (3,5)	+1 (12)	-1 (3,2)	0,297
5	+1	-1 (2,5)	-1 (9,0)	+1 (3,8)	0,078
6	+1	+1 (3,5)	-1 (9,0)	+1 (3,8)	0,131
7	+1	-1 (2,5)	+1 (12)	+1 (3,8)	0,059
8	+1	+1 (3,5)	+1 (12)	+1 (3,8)	0,084

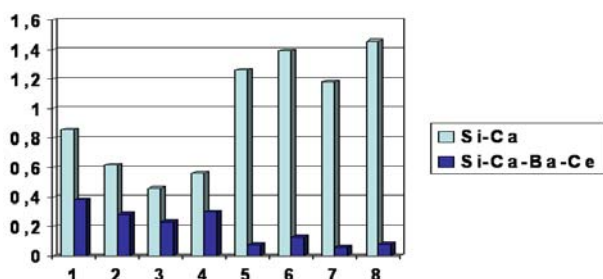


Рис. 2 Інтенсивність зношування (г/см²) фрикційних сірих чавунів, модифікованих лігатурами систем Si - Ca та Si - Ca - Ba - Ce, за номером дослідів

Серед чавунів, модифікованих лігатурою системи Si - Ca, максимальну зносостійкість має чавун, що містить 2,5 % Al; 12 % Mn; 3,2 % C (інтенсивність зношування – 0,461 г/см²) (рис. 2). Максимальна зносостійкість чавуну досягається при вмісті в ньому вуглецю по нижньому рівню – 3,2 %. Серед чавунів, модифікованих лігатурою системи Si - Ca - Ba - Ce, максимальну зносостійкість має чавун, що містить 2,5 % Al; 12 % Mn; 3,8 % C (інтенсивність зношування – 0,061 г/см²) (рис. 2). Максимальна зносостійкість чавуну досягається при вмісті в ньому вуглецю по верхньому рівню – 3,8 %.

Звертає на себе увагу також і той факт, що зносостійкість чавунів, модифікованих лігатурою системи Si - Ca - Ba - Ce, істотно перевищує зносостійкість чавунів, модифікованих лігатурою системи Si - Ca (рис. 2). Тому у подальшому основна увага приділялась оптимізації хімічного складу фрикційних чавунів, модифікованих лігатурою системи Si - Ca - Ba - Ce.

Для виявлення можливих напрямів оптимізації хімічного складу фрикційних чавунів, модифікованих лігатурою системи Si - Ca - Ba - Ce, за результатами випробувань, наведених у табл. 2, було побудоване регресійне рівняння, що описує вплив вмісту основних легуючих елементів (алюмінію, марганцю, вуглецю) на інтенсивність зношування чавунів.

Для побудови залежності інтенсивності зношування чавунів від вмісту в них алюмінію, марганцю та вуглецю скористаємось регресійним рівнянням у неповній квадратичній формі [13]:

$$W' = b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2 + b_3 X_3 + b_{12} X_1 X_2 + b_{13} X_1 X_3 + b_{23} X_2 X_3 + b_{123} X_1 X_2 X_3 \quad (2)$$

де X_1 , X_2 , X_3 – кодовані значення факторів, які можуть змінюватись від -1 до +1 (табл. 2);

b_0 , b_1 ... b_{123} – коефіцієнти регресійного рівняння.

Коефіцієнти регресійного рівняння (2) розраховуються по залежності [13]:

$$b_i = \frac{\sum_{u=1}^N X_{iu} \bar{W}_u}{N} \quad (3)$$

де u – номер дослідів;

X_{iu} – кодовані значення факторів (X_1 , X_2 , X_3) в u -му досліді (табл. 2);

\bar{W}_u – середнє значення інтенсивності зношування чавунів в u -му досліді.

Числові значення коефіцієнтів регресійного рівняння, розраховані за формулою (3), наведені у табл. 3.

Таблиця 3

Зведена таблиця з обчисленими значеннями коефіцієнтів регресійного рівняння

b_0	b_1	b_2	b_3	b_{12}	b_{13}	b_{23}	b_{123}
0,193	$4,911 \cdot 10^{-3}$	-0,025	-0,105	0,017	0,014	$8,554 \cdot 10^{-3}$	-0,024

З урахуванням числових значень коефіцієнтів $b_0, b_1, b_2, b_3, b_{12}, b_{13}, b_{23}, b_{123}$ (табл. 3) регресійне рівняння (2) запишеться у вигляді:

$$W' = 0,193 + 4,911 \cdot 10^{-3} X_1 - 0,025 X_2 - 0,105 X_3 + 0,017 X_1 X_2 + 0,014 X_1 X_3 + 8,554 \cdot 10^{-3} X_2 X_3 - 0,024 X_1 X_2 X_3 \quad (4)$$

За процедурою [13] було оцінено статистичну значимість коефіцієнтів регресії. Коефіцієнт b_1 виявився статистично не значимим.

Після виключення коефіцієнту b_1 регресійне рівняння (4) запишеться у виді:

$$W' = 0,193 - 0,025 X_2 - 0,105 X_3 + 0,017 X_1 X_2 + 0,014 X_1 X_3 + 8,554 \cdot 10^{-3} X_2 X_3 - 0,024 X_1 X_2 X_3 \quad (5)$$

Проаналізуємо рівняння (5). Оскільки в ньому відсутній коефіцієнт b_1 (коефіцієнт b_1 статистично незначущий), зміна вмісту алюмінію з 2,5 до 3,5 % не впливає на зносостійкість фрикційних сірих чавунів, модифікованих комплексною лігатурою системи Si - Ca - Ba - Ce. Отже, концентрацію алюмінію в чавунах можна брати по нижньому рівню – 2,5 %. Зміна вмісту марганцю (x_2) з 9 до 12 % та вуглецю (x_3) з 3,2 до 3,8 % призводить до зменшення інтенсивності зношування чавунів. Про це свідчать знаки коефіцієнтів b_2 та b_3 у рівнянні (4.29): $b_2 = -0,025$; $b_3 = -0,105$. Отже, для досягнення максимальної зносостійкості чавунів (мінімальної інтенсивності зношування) вміст марганцю та вуглецю доцільно брати по верхньому рівню – 12 % Mn та 3,8 % C.

Висновки.

1. Досліджено вплив модифікаторів СітМіш-1 і ЦІСМ на структуру та фрикційні властивості 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 системи Si-Ca-Ba-Ce – 0,03 - 0,05 %. При такій концентрації модифікаторів вміст вторинного цементиту в чавуні не перевищує 2 - 4 %.

2. Фрикційні чавуни найбільш доцільно модифікувати комплексною лігатурою ЦІСМ системи Si-Ca-Ba-Ce, котра не тільки прискорює процес графітизації чавуна, але і подрібнює графітну фазу (перш за все графітну евтектику).

3. Визначено оптимальний хімічний склад фрикційних сірих чавунів з аустенітною матрицею, який забезпечує мінімальну інтенсивність їхнього зношування в умовах сухого тертя. Оптимальний хімічний склад чавунів, модифікованих комплексною лігатурою Si-Ca-Ba-Ce: 2,5 % Al; 12 % Mn; 3,8 % C. Оптимальний хімічний склад чавунів,

модифікованих лігатурою Si-Ca: 2,5 % Al; 12 % Mn; 3,2 % C.

Л і т е р а т у р а

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. Шелушевич А.М. Структура и свойства литых фрикционных материалов / А.М. Шелушевич, С.П. Бортников. – Полоцк: Изд-во ПГУ, 2010. – 287с.
3. Худокормов Д. А. Повышение прочности и теплопроводности чугуна путём управления процессами формирования его структуры : дис. канд. техн. наук: 05.16.04 / Худокормов Дмитрий Андреевич – Минск, 2000. 144 с.
4. Ползунов В.В. Вязилов К.М., Меркулов Е.И. Металловедение износостойких чугунов. – М.: Металлургия, 1982. 356 с.
5. Тихонович В. І., Гаврилюк В. П., Тихонович В. В., Грипачевський А. Н. Формування зносостійких структур хромистих сталей і чавунів // Металознавство та обробка металів. 2003. № 3;
6. Пілюшенко В. Л., Шаповалов Ю. С. Формування структури і властивостей зносостійких чавунів зі зміною ступеня їх легування // Металознавство та обробка металів, 2004. № 2.
7. Марукович Е.И., Карпенко М.И. Износостойкие сплавы. – М.: Машиностроение, 2005. 428с.
8. Кузнецов О.П., Махненко Р.С. Сплавы для работы в экстремальных условиях трения. – К.: Наук. думка, 1991. 267с.
9. 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.
10. Tribological investigation of titanium-based materials for brakes / Peter J. Blau, Brian C. Jolly, Jun Qu та ін.]. // Wear, 2007. 263. P. 1202 – 1211.
11. Сапунов Д.Н., Корягин П.В., Самойлов В.В. Усталостный износ фрикционных материалов. – К.: Наук. думка, 1992. 193 с.
12. Марукович Е.И., Зинченко О.П. Новые фрикционные материалы. – М.: Машиностроение, 2000. – 274 с.
13. 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. Shelushevych A.M. Struktura y svoistva lytykh fryktsyonnykh materyalov / A.M. Shelushevych, S.P. Bortnikov. – Polotsk: Yzd-vo PHU, 2010. – 287 p.
3. Khudokormov D. A. Povyshenye prochnosty y teploprovodnosty chuhuna putem upravleniya protsessamy formirovaniya eho struktury : dys. kand. tekhn. nauk: 05.16.04 / Khudokormov Dmytryi Andreevych – Mynsk, 2000. 144 p.
4. Polzunov V.V. Viahylev K.M., Merkulov E.Y. Metallovedenye yznosostoikyykh chuhunov. – M.: Metallurhyia, 1982. 356 p.

5. Tykhonovych V. I., Havryliuk V. P., Tykhonovych V. V., Hrypachevskiy A. N. Formuvannya znosostiikhykh struktur khromystykh stalei i chavuniv // Metaloznavstvo ta obrobka metaliv. 2003. № 3.
6. Piliushenko V. L., Shapovalov Yu. S. Formuvannya struktury i vlastyvoستي znosostiikhykh chavuniv zi zminoiu stupinia yikh lehuвання // Metaloznavstvo ta obrobka metaliv, 2004. № 2.
7. Marukovych E.Y., Karpenko M.Y. Yznosostoikyе splavy. – M.: Mashynostroєnyє, 2005. 428 p.
8. Kuznetsov O.P., Makhnenko R.S. Splavy dlia raboty v ekstremalnykh uslovyakh treniya. – K.: Nauk. dumka, 1991. 267 p.
9. 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.
10. Tribological investigation of titanium-based materials for brakes / Peter J. Blau, Brian C. Jolly, Jun Qu та ін.]. // Wear, 2007. №263. P. 1202–1211.
11. Sapunov D.N., Koriahyn P.V., Samoilo V.V. Ustalostnyi yznos fryktsyonnykh materyalov. – K.: Nauk. dumka, 1992. 193 p.
12. Marukovych E.Y., Zynchenko O.P. Novye fryktsyonnye materyaly. – M.: Mashynostroєnyє, 2000. 274 p.
13. Balytskyi M.H. Eksperymentalni metody optymizatsii lyvarnykh splaviv. – Lviv: Lvivska politehnika, 2003. 204 p.

Шевченко А.В., Сергиенко О.В., Возлюбленный Б.Н.
Исследование влияния микролегирования на износостойкость тормозных колодок

В статье исследовано влияние микролегирования на износостойкость тормозных колодок, а именно влияние концентрации углерода и алюминия на содержание, морфологию и дисперсность цементита в чугунах при введении модификаторов системы Si-Ca и Si-Ca-Ba-Ce. Полученные закономерности графитизации марганцевых серых чугунов, легированных алюминием, при их модифицировании лигатурами системы Si-Ca и Si-Ca-Ba-Ce дают возможность установить оптимальное содержание этих лигатур в чугунах, при котором обеспечивается его удовлетворительная структура без образования междендритного графита и без превышения допустимого содержания вторичного цементита, который обеспечивает минимальную интенсивность изнашивания тяжело нагруженных тормозных колодок в условиях сухого трения.

Ключевые слова: тормозная колодка, износостойкость, микролегирование, фрикционный чугун, интенсивность изнашивания

Shevchenko O.V., Serhiienko O.V., Vozliublenyi B.M. Study of the micro-alloying influence on the wear resistance of brake pads

The article investigates the effect of microalloying on the wear resistance of brake pads, namely the effect of carbon and

aluminum concentration on the contents, morphology and dispersion of cementite in cast iron with the introduction of modifiers of Si-Ca and Si-Ca-Ba-Ce, which allowed to optimize the composition of manganese gray cast iron by the criterion of the lowest wear intensity. The obtained regularities of graphitization of manganese gray cast irons alloyed with aluminum, when modified by ligatures of the Si-Ca and Si-Ca-Ba-Ce system make it possible to establish the optimal contents of these ligatures in cast iron, which ensures its satisfactory structure without interdendritic graphite and without exceeding the allowable the content of secondary cementite, which provides a minimum wear intensity of heavily loaded brake pads in dry friction. In order to determine possible directions for optimizing the chemical composition of friction gray cast irons modified with the Si - Ca - Ba - Ce alloy, a regression equation was constructed on the basis of accelerated tribotechnical tests, which describes the dependence of the wear rate of brake pads on the content of the main alloying elements: aluminum, manganese, carbon. Tribotechnical tests were carried out according to the scheme of a full factorial experiment; the concentrations of aluminum, manganese and carbon were variable factors. Factors were varied at two levels: at the upper level and at the lower level. The minimum wear rate of cast irons corresponds to the concentration of carbon and manganese at the upper level. The aluminum concentration does not affect the wear rate of cast irons, that is, the aluminum concentration can correspond to the lower level of variation. The authors of the article proved that the modification of friction cast irons with a complex master alloy containing barium and cerium gives the most stable and reliable results in the context of preventing the formation of graphite inclusions located between grains. Therefore, despite an increase in the number of graphite inclusions in cast irons with an increase in carbon concentration in cast irons, the wear rate of cast irons decreases. In this case, graphite continues to play the role of a solid lubricant, and an increase in the number of graphite inclusions without increasing their size has a positive effect on the wear rate of cast irons.

Key words: brake pad, wear resistance, micro-alloying, friction cast iron, wear intensity.

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

Сергієнко Оксана Вікторівна – к.т.н., доц., доцент кафедри машинобудування та прикладної механіки, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля (м. Сєвєродонецьк), sergienko.o.v@gmail.com

Возлюбленный Богдан Миколайович – студент групи ГМ-18д факультету інженерії, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля (м. Сєвєродонецьк) bogdanzenkevich1997@gmail.com

Стаття подана 25.01.2021 р.