

Пройдак А.Ю.

Легування чавунів фосфором для підвищення функціональних властивостей виробів

Proidak A.Y.

Alloying cast iron with phosphorus to improve the functional properties of products

Поряд із традиційним виробництвом чавуну є низка марок з підвищеним вмістом фосфору. Фосфористі чавуни характеризуються низкою позитивних властивостей. Підвищений вміст фосфору в чавуні приводить до збільшення гідрорухливості розчину, сприяє підвищенню антифрикційних властивостей, а також зносостійкості. У чавунах, які порівняно зі сталями містять більше вуглецю, фосфор утворює евтектику, складовою частиною якої є фосфід заліза Fe_3P . У залежності від вмісту фосфору в сірих чавунах з пластинчастою та високоміцних чавунах з кулястою формою графіту, фосфідна евтектика має вигляд розорієнтованих окремих включень, розірваної або суцільної сітки. У роботі наведені результати досліджень щодо впливу різних концентрацій фосфору на функціональні властивості виробів. Потреба металургійного виробництва України у ферофосфорі забезпечується, в основному, за рахунок імпорту постачок. У зв'язку з цим забезпечення металургійних підприємств вітчизняними фосфоромісними матеріалами, як ферофосфор, для виплавки широкого марочного спектру чавунів є нагальною задачею.

Ключові слова: ферофосфор, чавун, фосфідна евтектика, зносотривкість, антифрикційні властивості, евтектоїдний цементит, дисперсність перліту, модифікатор, графіт, гільзи двигунів, гальмієні колодки.

Along with the traditional production of cast iron, there are a number of grades with a high phosphorus content. Phosphorous cast iron exhibits a number of beneficial properties. The increased phosphorus content in cast iron leads to an increase in the hydraulic mobility of the solution, improves antifriction properties and wear resistance. In cast iron, which contains more carbon compared to steels, phosphorus forms eutectic that includes Fe_3P . Depending on the phosphorus content in lamellar graphite cast iron and high-strength nodular cast iron, the phosphide eutectic appears as misaligned individual inclusions, or a broken or continuous mesh. The paper presents the results of the research on the effect of various phosphorus concentrations on the functional properties of products. In Ukraine's metallurgical industry, the demand for ferrophosphorus is mainly met by imports, and therefore, supplying metallurgical enterprises with domestic phosphorus-containing materials, such as ferrophosphorus, for smelting a wide range of cast irons appears to be an urgent task.

Keywords: ferrophosphorus, cast iron, phosphide eutectic, wear resistance, antifriction properties, eutectoid cementite, perlite dispersion, modifier, graphite, engine liners, brake pads.

Вступ. Як відомо, в металургії фосфор як хімічний елемент може використовуватися в якості розкиснювача, за рахунок більш високої хімічної спорідненості до кисню в порівнянні, наприклад, з міддю, або як легуюча добавка. Фосфор відноситься до групи феритоутворюючих елементів та необмежено розчинним у залізі. Максимальний вміст фосфору в $\alpha - Fe$ твердому розчині складає 2,55 % (4,52 % ат.).

У чавунах, які порівняно зі сталями містять більше вуглецю, фосфор утворює евтектику, складовою частиною якої є фосфід заліза Fe_3P . Її класифікують як псевдобінарну (ферит + фосфід) або як потрійну (ферит + фосфід + цементит). У залежності від вмісту фосфору в сірих чавунах із пластинчастою та високоміцних чавунах з кулястою формою графіту фосфідна евтектика має вигляд дезорієнтованих окремих включень, розірваної або суцільної сітки [1]. Наявність м'яких включень графіту та твердих включень фосфідної евтектики (мікротвердість якої $h_{\mu} = 390 \dots 530$ проти $h_{\mu} = 190 \dots 200$ для фериту) в металевій основі сірих і високоміцних чавунів дещо підвищує їх міцність, але знижує тріщиностійкість під статичним навантаженням,

менше – для сірих чавунів та істотніше – для високоміцних. Тому вміст фосфору обмежується до 0,2...0,3 % у сірих чавунах, а для високоміцних – до 0,1 %.

З іншого боку, фосфідна евтектика є ефективним армувальним матеріалом для металеві основи чавунів, коли від них вимагаються високі характеристики зносотривкості [5, 6]. З цих позицій рекомендують чавуни із вмістом фосфору 0,3...0,6 %.

Результати дослідження впливу фосфору на мікроструктуру, короткочасну міцність, швидкість росту тріщини та мікромеханізм втомного руйнування сірих і високоміцних чавунів феритного та феритноперлітного класів, на підставі яких встановлено допустимий з позиції циклічної тріщиностійкості вміст фосфору (кількість фосфідної евтектики) у цих чавунах, показали, що низька циклічна тріщиностійкість сірих і високоміцних чавунів із підвищеним вмістом (0,7...0,8 %) фосфору спричинена поширенням втомної тріщини внаслідок міжзеренного відколу, ініційованого суцільною сіткою виділень необхідної дрібнозернистої фосфідної евтектики по межах зерен [2]. Негативний вплив фосфідної евтектики на циклічну тріщиностійкість сильніше



проявляється для високоміцних чавунів, ніж для сірих. Проте в дослідженому інтервалі зміни вмісту фосфору (0,02...0,76 %) в сірих і високоміцних чавунах інтенсивність падіння характеристик циклічної тріщиностійкості є різною в залежності від кількості фосфідної евтектики (рис. 1). Коли фосфору 0,15...0,26 %, і в сірих, і в високоміцних чавунах утворюються окремі включення та розірвана сітка псевдобінарної дрібнозернистої фосфідної

евтектики, які займають в об'ємі металічної основи 3...5 % для сірих і 4...7 % для високоміцних чавунів, фосфористі чавуни є ще достатньо працездатними. Тому з погляду на циклічну тріщиностійкість допустимо легувати чавуни фосфором до 0,3 %, істотно не погіршуючи опір крихкому руйнуванню сірих і високоміцних чавунів феритного та феритно-перлітного класів.

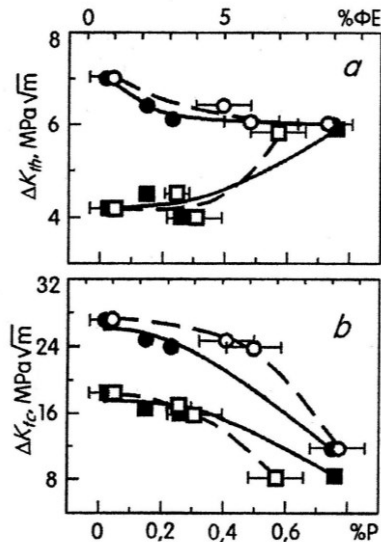


Рисунок 1 – Зміна умовних порогових (а) і критичних (б) характеристик циклічної тріщиностійкості сірих (■, □) і високоміцних (●, ○) чавунів у залежності від вмісту фосфору, % P (■, ●) або кількості фосфідної евтектики, % ФЕ (□, ○) [2]

У потрійній системі $Fe - Fe_3C - Fe_3P$ утворюються евтектики. В білих чавунах фосфор знаходиться у вигляді потрійної евтектики $Fe - Fe_3C - Fe_3P$. Розчинність фосфору в залізі залежить від вмісту вуглецю та зменшується з його збільшенням. Разом з тим теоретично та експериментально обґрунтовано, що розчинність вуглецю в розплавах системи $Fe - C - P$ залежить від концентрації фосфору, а не навпаки [3]. Закономірність зниження розчинності вуглецю в системі $Fe - C - P$ аналогічна розчинності вуглецю в системі $Fe - Si - C$. Відомо, що підвищення вмісту кремнію знижує розчинність вуглецю, а не навпаки.

Фосфористі чавуни характеризуються низкою позитивних властивостей. Підвищений вміст фосфору в чавуні приводить до збільшення гідрорухливості розплаву, сприяє підвищенню антифрикційних властивостей чавуну, а також зносостійкості високоміцних чавунів.

Високоміцні чавуни широко застосовують як матеріали елементів трибоспряжень: колінчасті та розподільчі вали, блоки циліндрів, зубчасті колеса та інші деталі [1, 2]. Одним з ефективних тверддорозчинних неметалічних зміцнювачів цих матеріалів є фосфор, який практично не впливає на графітизацію, проте покращує технологічність, антифрикційні властивості та зменшує в'язкість розплаву під час

вилиття, що зумовлює утворення відносно легкоплавкої ($T_{пл} \sim 950$ °C) потрійної фосфідної евтектики – так званого “стеадиту”. Вона складається з аустеніту, збагаченого фосфором, цементиту та фосфиду заліза Fe_3P .

Для дослідження впливу фосфору як легуючого елемента на мікроструктуру, температуру евтектики, твердість і механічні властивості сірого чавуну вибрано п'ять різних кількостей фосфору (0,5; 1,0; 1,5; 2,0 і 2,5 мас. %). Результати показали, що збільшення вмісту фосфору з 0,45 до 2,58 % у сірому чавуні підвищує кількість евтектичного фосфиду з 4,70 до 17,81 %, послаблюються механічні властивості (границя міцності на розрив знижується з 297,5 до 184,1 МПа; ударна в'язкість – з 4,3 до 2,7 Дж/м²), підвищується твердість від 215 до 249 НВ і знижується температура евтектики з 1139,7 до 1102,5 °C [4].

*стеадит (stedite) – евтектика фосфиду заліза Fe_3P , часто як мікрокомпонент чавуну з високим вмістом фосфору

У вузлах машин харчової промисловості, які працюють у високотемпературних умовах, де змащувальний матеріал недопустимий, спостерігається режим сухого тертя.

Якщо за тертя локальна й інтегральна температура поверхневих шарів досягає температури рекристалізації металу, то поверхневий шар не

наклепується, а перебуває в стані підвищеної пластичності (розм'якшення). Тоді вся металева поверхня рівномірно вигладжується або вибірково – одна з фазових складових. Ймовірно [6] під час сухого тертя локальне підвищення температури в зоні контакту спричиняє оплавлення (розмашування) фосфідної евтектики, що покращує антифрикційні властивості чавуну [4].

З підвищенням кількості фосфору зносотривкість високоміцних чавунів зростає в 1,5 – 2,0 рази

(рис. 2). Сумарна інтенсивність зношування пари тертя “високоміцний чавун – загартована сталь 45” зменшується та наближається до інтенсивності зношування високоміцних чавунів. Порівнюючи втрати мас зразків (Δm) і контртіл (ΔM) в умовах граничного тертя, можна зробити висновок, що, як і під час сухого тертя, зі збільшенням кількості фосфору у високоміцних чавунах антифрикційні властивості трибопар покращуються.

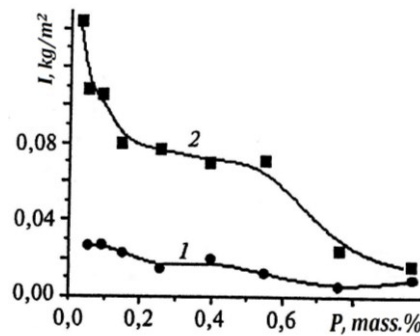


Рисунок 2 – Вплив концентрацій фосфору на інтенсивність зношування елементів пари тертя “високоміцний чавун (1) – сталь 45 (2)” в умовах сухого тертя

Досліджено вплив суцільної фосфідної сітки в матрицях перліту, фериту, мартенситу та відпущеного мартенситу на сухе зношування сірого чавуну, що ковзає зі швидкістю $1,5 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$ з напруженням 0,5 і 2,0 МПа [6]. Період припрацювання спостерігалось з 0,2 % PIron, тоді як припрацювання не спостерігалось з 1,0 % PIron. Наявність суцільної фосфідної сітки зменшувала швидкість зношування перлітного чавуну в 2,5 рази. У слабших матрицях (перліт, ферит і загартований мартенсит) фосфідна сітка зміцнювала матрицю, розламувалась і утворювала фосфідний композит на деформованій поверхні, який протистояв деформації.

За складом сірі чавуни для виливок, які працюють в умовах тертя з мастилом, мало розрізняються, тому відмінність їх експлуатаційних властивостей (зносостійкості, міцності, твердості) в значній мірі зумовлена структурою деталі. Структура виливки із фосфористих сірих чавунів має складатися з пластинчастого, рівномірно розподіленого графіту середніх розмірів, дрібнодисперсної перлітної металічної матриці, замкненої сітки дрібних включень потрібної фосфідної евтектики, дрібного евтектичного зерна.

Пластинчастий рівномірно розподілений графіт підвищує термін служби деталі, сприяючи утриманню мастила на поверхні тертя в режимі мастильного голодування. Присутність пластинчастого перліту в металічній матриці збільшує зносостійкість сплаву, оскільки пластини евтектоїдного цементиту мають високу мікротвердість. Крім того, чим більш дисперсним є перліт, тим вище міцність, твердість і зносостійкість чавуну. Потрібна фосфідна евтектика зменшує спрацювання та покращує стійкість до задирок, особливо у вигляді замкненої

або розірваної сітки. Дрібне евтектичне зерно приводить до підвищення міцнісних властивостей деталі.

Застосування ферофосфору як модифікатора істотно збільшує кількість, довжину, частку рівномірно розподіленого графіту в чавуні, подрібнює евтектичне зерно, знижує кількість несприятливої евтектики та міждендритного графіту, що істотно підвищує зносостійкість і міцність чавунів [7], які працюють в умовах тертя з мастилом.

Сірі чавуни з підвищеним вмістом фосфору (0,3 – 0,8 % P) також застосовують для отримання виливок гільз дизельних автомобільних двигунів. Висока працездатність гільз забезпечується оптимальною структурою, яка складається з перлітної дрібнодисперсної металічної матриці, пластинчастого графіту та зносостійкої фосфідної евтектики.

Модифікувальну дію фосфору досліджували на чавуні, який застосовується для виготовлення виливок гільз дизельних двигунів, такого складу: 2,7 – 3,0 % C; 1,3 – 1,5 % Si; 0,5 – 0,7 % Mn; $\leq 0,5$ % Cr; 0,20 – 0,35 % Cu; 0,2 – 0,3 % Ni; 0,05 – 0,10 % P; $\leq 0,04$ % S [8].

Встановлено, що модифікування чавуну фосфором подрібнює евтектичне зерно, збільшує кількість графіту за більш рівномірного його розподілу. Вивчення зламів показало, що зі збільшенням кількості модифікатора товщина вибіленого шару ($H_{6\mu}$) зменшилася з 36 до 14 %, глибина половинчастого шару ($H_{\mu\mu}$) скоротилася з 40 до 22 %, а глибина сірого шару ($H_{\text{сч}}$) зросла з 24 до 46 % по відношенню до загальної ширини проби. При цьому були отримані залежності для оцінки кількісних змін щодо впливу тривалості витримки (від 1 до 20 хвил.)

розчину, модифікованого фосфором, на глибину вибілу:

$$H_{сч} = 55,77 - 8,93\sqrt{t};$$

$$H_{пч} = -0,44 + 4,58\sqrt{t};$$

$$H_{бч} = -2,62 + 3,91\sqrt{t}.$$

Отримані результати показують, що фосфор при введенні його в чавун як модифікатора багато в чому поводить себе аналогічно кремнію. Вочевидь, у сплаві створюються локальні об'єми, збагачені фосфором, де склад чавуну стає заевтектичним і відбувається виділення первинного графіту. Завдяки цьому кристалізація чавуну йде за стабільною діаграмою. З плином тривалості витримки за рахунок дифузійних процесів локальні зони підвищених концентрацій фосфору зменшуються, поступово розчиняючись у загальному об'ємі чавуну, що пояснює послаблення його модифікувальної дії.

Широкого застосування набув фосфористий сірий чавун для виробництва гальмівних колодок. Проблема гальмівних колодок полягає у високому спрацюванні, отже, у короткому терміні служби. Щоб звести цю проблему до мінімуму, в дослідженні фахівців Таїланду [9] феросиліцій ($FeSi$) використовувався як модифікатор для зразків гальмівних колодок із сірого чавуну з високим вмістом фосфору. Кількість $FeSi$ змінювалася для вивчення його впливу на структуру графіту та властивості гальмівних колодок. Результати показали, що чавунні гальмівні колодки з високим вмістом фосфору складаються з лусок фериту, стеадиту, перліту та графіту, а кількість $FeSi$ впливає на утворення графіту в чавуні. Інокуляційна обробка привела до зменшення вмісту графіту III типу, збільшення графіту I типу та зміни кількості фаз стеадиту, перліту та фериту. При 0,2 мас.% $FeSi$, хоча було встановлено, що фази стеадиту та перліту мають найвищі рівні, максимальна твердість 216 НВ була досягнута.

Також досліджено мікроструктуру та властивості гальмівних колодок, виготовлених із сірого чавуну з високим вмістом фосфору з різними пропорціями легуючих елементів [10]. Вміст трьох основних елементів сплаву в трьох гальмівних колодках становив $3,37C - 1,64Si - 2,21P$; $3,17C - 1,82Si - 2,00P$ і $2,96C - 2,03Si - 1,79P$. Температури евтектики графіт – аустеніт змінювалися в залежності від вибору хімічного складу, тоді як температура евтектики фосфіду починалася з 936 °С для всіх трьох композицій. Мікроструктури показують, що відмінності вуглецю, кремнію та фосфору в гальмівних колодках із сірого чавуну з високим вмістом фосфору впливають на кількість, щільність і довжину графітових пластин. Підвищення вмісту фосфору (з 2,00–2,21 % мас.) і вуглецю (з 3,17–3,37 % мас.) збільшило пористість і зменшило утворення стеадиту, що призвело до

найменшої твердості та зносостійкості. Найвищу частку площі стеадитної фази (37 %) та найнижчу пористість мали гальмівні колодки з 1,79 мас. % фосфору, які отримали найвищу твердість – 282 НВ і найвищу зносостійкість.

Досліджені властивості чавуну, легованого міддю та фосфором, які працюють в умовах підвищеного спрацювання [11]. В досліді вміст міді змінювали в межах 0,11–2,36 % і фосфору – 0,22–0,45 %. Предметом дослідження було встановлення впливу міді та фосфору на границю міцності (σ_B), твердість (НВ), теплопровідність (λ), термічну стійкість, зносостійкість та оброблюваність різанням чавуну (y %): 3,2–3,4 % C ; 2,1–2,4 % Si ; 0,6–0,8 % Mn ; 0,3–0,4 % Cr ; 0,05–0,10 % Mo ; 0,035–0,065 % V ; 0,025–0,050 % Ti ; 0,026–0,047 % S ; 0,22–0,45 % P . Встановлено, що мідь підвищує σ_B , НВ, λ , стійкість при термоциклуванні, зносостійкість та оброблюваність різанням чавуну. Границя міцності має найбільше значення при 0,94–1,58 % Cu . Оброблюваність різанням підвищується при вмісті міді понад 1,5 %. Легування фосфором приводить до підвищення зносостійкості та не впливає на міцність. Експериментально досліджено вплив фосфору (0,3–0,8 % P) на поверхневі (σ_1) та міжфазові характеристики (σ_{1-2}) залізо-вуглецевих розплавів.

Для зниження вартості виробництва чавунів, легованих фосфором і кремнієм, на Аксукському заводі феросплавів (Казахстан) розроблено спосіб та освоєно виробництво фосфористого феросиліцію (18–48 % Si ; 0,5–7,0 % P) сумісним відновленням кварциту та фосфориту коксом у рудовідновлювальній електропечі. Використання фосфористого феросиліцію на Карагандинському заводі опалювального обладнання підтверджено можливістю та ефективністю його застосування у складі шихтових матеріалів під час виплавки чавуну марки СВ-15-32 та інших марок [12].

Висновки. 1. Показано, що в залежності від вмісту фосфору фосфідна евтектика має вигляд дезорієнтованих окремих включень розірваної або суцільної сітки та є ефективним армувальним матеріалом для металевої основи чавунів.

2. Згідно з літературними даними показано, що вплив фосфору на мікроструктуру та механічні властивості залежить від його концентрації в конкретних марках чавунів та їх призначення.

3. Наявність сульфідної сітки зменшує швидкість зношування перлітного чавуну в режимі сухого та мастильного тертя.

4. У фосфористому чавуні кількість кремнію істотно впливає на утворення графіту, що спонукало до розробки технології фосфористого феросиліцію.

Перелік посилань

1. Волчок І.П., Єгоров А.О., Слинько Г.І. Мікромеханізм руйнування і властивості фосфористих чавунів // Механіка руйнування матеріалів і міцність конструкцій (вип. 2): В 3-х т. / Під заг. ред. В.В. Панасюка. – Львів: Каменяр, 1999. – Т. 1. – С. 208-220.

2. Андрейко І.М., Слинько Г.І., Осташ О.П., Волчок І.П. Циклічна тріщиностійкість сірих і високоміцних чавунів з підвищеним вмістом фосфору. *Фізико-хімічна механіка матеріалів*. 2000. № 6. С. 45-51.
3. Богачев І.М. *Металургія чавуну*. М.: Mashvid. 1952. 336 с.
4. Materials Science and Engineering: AV 444, iss 1-2, p. 314-317. 25 January 2007 DOI 10.1016/j.msea.2006.08.108
Abbasi H.R., Bazdar M.; Halvae A. Effect of phosphorus as an alloying element on microstructure and mechanical properties gray cast iron.
5. Широков В.В., Арендар Л.А., Слинько Г.І., Волчок І.П. Вплив фосфідної евтектики на зношуваність високоміцних чавунів. *Фізико-хімічна механіка матеріалів*. 2003. № 2. С. 115-117.
6. Tomilson W.J., Dennison G. Effect of phosphide and matrix microstructures on the dry sliding wear of grey cast iron. *Tribology International* V. 22, iss 4, P. 259-264 August 1989. DOI 10.1016/0301-679X(89)90084-4
7. Сироквашев А.В., Бауман Б.В. Модифікація сірих фосфористих чавунів для виливків, що працюють в умовах тертя. *Ливарне виробництво*. 2000. № 9. С. 16-18.
8. Gabets D.A., Markov A.M. Investigation of the influence of alloying elements on the structure and properties of gray cast iron working under shock-frictional wear conditions // *Metal processing (technology, equipment, tools)*. -2019. -Т. 21, No. 1. -S. 70-81. - DOI: 10.17212/1994-6309-2019-21.1-70-81.
9. Control of Graphite Structure in high Phosphorus Grey Cast Iron Brake Shoes thtogh Ferro-Sikicon Inoculant Khuntrakool Chadanuch, Janudom Somjai, Muangjunburee Prapas, Jodjan Anusit, Mahathaninwong Narissara, Chucheep Thiemsak. *International Journal of Metalcasting*. 2024 DOI 10.1007/s 40962-024-01302-y
10. Effects of Chemical Composition on Microstructure and Properties of High Phosphorus Grey Cast Iron Brake Shoe. Khuntrakool, Chadanuch, Janudom, Somjai Muangjunburee, Prapas; Mahathaninwong, Narissara; Chucheep, Thiensak; Choticarn, Treetos Yodjan, Anusit. *International Journal of Metalcasting T16*, P. 1221-1234 July 2022. DOI 10.1007/s40962-021-00671-y.
11. Gabets D.A., Markov A.M. Issledovanie vliyaniya legiruyushchikh elementov na strukturu i svoystva serykh chugunov, rabotayushchikh v usloviyakh udarno-friktsionnogo iznosa [Study of the influence of alloying elements on the structure and properties of gray cast iron operating under conditions of shock-friction wear]. *Obrabotka metallov (tehnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2019, vol. 21, no. 1, pp. 70-81. DOI: 10.17212/1994-6309-2019-21.1-70-81
12. Дослідні випробування з отримання та застосування фосфатного феросиліцію / Ж.Д. Алібаєв, Ю.І. Сухарніков, М.І. Друїнській, Н.П. Мелікаєв Інститут металургії та збагачення АН Казахстану. 1977. 5 с.

References

1. Volchok, I. P., Yehorov, A. O., & Slyenko, H. I. (1999). Micromechanism of Fracture and Properties of Phosphorous Cast Irons. In Panasiuk, V. V. (Ed.) *Mechanics of Fracture of Materials and Strength of Structures*, Issue 2, Vol. 1. Kameniar. (pp. 208-220)
2. Andreiko, I. M., Slyenko, H. I., Ostash, O. P., & Volchok, I. P. (2000). Cyclic Crack Resistance of Gray and High-Strength Cast Irons with High Phosphorus Content. *Physical and Chemical Mechanics of Materials*, (6), 5-51
3. Bogachev, I. M. (1952). *Metallurgy of Cast Iron*. Mashgiz
4. Abbasi, H. R., Bazdar, M. & Halvae, A. (2007). Effect of Phosphorus as an Alloying Element on Microstructure and Mechanical Properties of Gray of Cast Iron. *Materials Science and Engineering*, 444(1-2), 314-317. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2006.08.108>
5. Shirokov, V. V., Arendar, L. A., Slyenko, H. I., & Volchok, I. P. (2003). Influence of Phosphide Eutectics on Wear of High-Strength Cast Irons. *Physical and Chemical Mechanics of Materials*. No. 2. P. 115-117
6. Tomilson, W. J., & Dennison, G. (1989). Effect of Phosphide and Matrix Microstructures on the Dry Sliding Wear of Gray Cast Iron. *Tribology International*, 22(4), 259-264. [https://doi.org/10.1016/0301-679X\(89\)90084-4](https://doi.org/10.1016/0301-679X(89)90084-4)
7. Syrokvashov, A. V., & Bauman, B. V. (2000). Modification of Gray Phosphorous Cast Irons for Castings Operating in Friction Conditions. *Foundry production*, (9), 16-18
8. Syrokvashov, A. V., Bauman, B. V., & Vorobiov, A. P. (1997). Modification of Gray Phosphorous Cast Irons for Ingots of Automobile Diesel Engine Liners. *News of Higher Educational Institutions. Black Metallurgy*, 6-77.
9. Khuntrakool, C., Janudom, S., Muangjunburee, P., Anusit, J., Narissara, M., & Thiemsak, C. (2025). Control of Graphite Structure in High Phosphorus Grey Cast Iron Brake Shoes through Ferro-Silicon Inoculant. *Inter Metalcast*, 19, 259–270. <https://doi.org/10.1007/s40962-024-01302-y>
10. Khuntrakool, C., Janudom, S., Muangjunburee, P., Mahathaninwong, N., Chucheep, T., Choticarn, T., & Yodjan, A. (2022). Effects of Chemical Composition on Microstructure and Properties of High Phosphorus Grey Cast Iron Brake Shoe. *Inter Metalcast*, 16, 1221–1234. <https://doi.org/10.1007/s40962-021-00671-y>
11. Zhukov, A. A., Afanaskin, A. V., Onalikhina, O. D., et al. (1996). Investigation of the Properties of Cast Irons Alloyed with Copper and Phosphorus Operating under High Class Conditions. *News of Higher Educational Institutions. Black Metallurgy*, (1), 59-61
12. Alibaiev, Zh. D. , Sukharnikov, Yu. I. , Druinskii, M. I. , & Melikaiev, N. P. (1977). *Experimental tests on the production and use of ferrosilicon phosphate*. Institute of Metallurgy and Enrichment of the Academy of Sciences of Kazakhstan.

Надійшла до редколегії / Received by the editorial board: 04.03.2024

Прийнята до друку / Accepted for publication: 20.05.2024