

ISSN 2077-1304. Met. lit'e Ukr., vol. 32, 2024, № 1 (336), 31-39

<https://doi.org/10.15407/steelcast2024.01.004>

УДК 669.131.7:621.74:621.78.082:66.046.516

В.Б. Бубликов, д-р техн. наук, ст. наук. співр., зав. відділу, e-mail: otchel.vch@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-4465-9256>

Ю.Д. Бачинський, канд. техн. наук, ст. наук. співр., e-mail: 909_bach@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0002-5745-1369>

О.П. Нестерук, канд. техн. наук, ст. наук. співр., e-mail: pavlena81@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-6342-3551>

Д.М. Берчук, канд. техн. наук, ст. наук. співр., заст. зав. відділу, e-mail: otchel.vch@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-5273-5522>

О.О. Ясинська, канд. техн. наук, наук. співр., e-mail: yasinskaalena@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-2187-6701>

О.О. Ясинський, наук. співр., e-mail: alexyasinskyi@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-0932-5309>

В.О. Овсянников, гол. технолог, e-mail: otchel.vch@gmail.com

Фізико-технологічний інститут металів та сплавів НАН України (Київ, Україна)

Вплив модифікаторів, легування міддю і нікелем на структуру, механічні і експлуатаційні властивості перлітного високоміцного чавуну

Високоміцні чавуни з перлітною металевою основою широко застосовуються для виготовлення великої номенклатури високонавантажуваних деталей машин. Світові лідери в галузі високоміцного чавуну успішно виготовляють деталі з нових марок перлітного високоміцного чавуну, що мають підвищене у 2–5 разів мінімальне відносне видовження δ , порівняно з вимогами діючих українських стандартів. Традиційні технології виготовлення таких чавунів потребують використання в шихті дорогих легувальних елементів (нікелю та/або міді) і обов'язкового проведення енергоємного термічного оброблення. У статті наведено порівняльні дані по впливу модифікування двома типами магнієвмісних лігатур, а саме феросиліцій-магній-кальцієвої ФСМг7К4 та нікель-магнієвої НіМг15, на структуроутворення та механічні властивості високоміцних чавунів у литому стані та після нормалізування. Отримані результати свідчать, що застосування розробленого процесу модифікувально-рафінувального оброблення вихідного розплаву феросиліцій-магній-кальцієвою лігатурою ФСМг7К4 взамін процесу модифікування нікель-магнієвою лігатурою НіМг15 і феросиліцієм ФС75 є перспективним і ефективним способом отримання високоміцних чавунів перлітного класу з підвищеними технологічними і механічними властивостями при економних енерговитратах на термічне оброблення виливків. Розроблена технологія отримання перлітного високоміцного чавуну з масовою часткою міді 0,85–1,15 %, модифікованого феросиліцій-магній-кальцієвою лігатурою, дозволяє одержати деталі з високими механічними властивостями: тимчасовим опором розривання $\sigma_B = 920\text{--}952$ МПа, відносним видовженням $\delta = 6,0\text{--}8,0$ % і на 60 % більшою циклічною міцністю, ніж при використанні нікель-магнієвої лігатури. Це показує можливість значного підвищення механічних властивостей і циклічної довговічності деталей без введення до складу високоміцного чавуну дорогого нікелю. Використання процесу модифікування розплаву феросиліцій-магній-кальцієвою лігатурою взамін модифікування нікель-магнієвою лігатурою і феросиліцієм не призводить до збільшення рівня браку виливків і не створює специфічних його видів.

Ключові слова: високоміцний чавун, перліт, структура, модифікатор, легування, мідь, нікель, нормалізування, механічні властивості.

Вступ. Статистичні дані за 2021 рік [1] свідчать, що у світі було вироблено близько 120,0 млн т виливків з усіх типів сплавів, з яких приблизно 23 % становило литво з високоміцного чавуну, випуск якого у понад 2,7 рази перевищив випуск виливків зі сталі. У США, Німеччині, Кореї, Китаї, Японії випуск виливків з високоміцного чавуну становить 70—80 % від випуску виливків з сірого чавуну з пластинчастим графітом. Випуск виливків з високоміцного чавуну перевищує випуск виливків з сірого чавуну у 1,2—2,8 рази у Туреччині, Фінляндії, Франції, Великобританії, Іспанії, Португалії, Данії, Норвегії, Австрії (країни вказані за зростанням співвідношення), що є, свого роду, індексом випуску сучасної високотехнологічної промислової продукції в конкретній країні.

Сучасний розвиток техніки неможливий без створення нових марок матеріалів з підвищеним комплексом технологічних, механічних та експлуатаційних властивостей. Сьогодні світові лідери в галузі високоміцного чавуну (швейцарська фірма «Georg Fischer», англійська фірма «Meehanite», італійська фірма «Zanardi Fonderie» та інші) створили і успішно виготовляють деталі з нових марок високоміцних чавунів з кулястим графітом з тимчасовим опором під час розтягування σ_B від 500 МПа до 1000 МПа, що мають підвищене у 2—5 разів відносне видовження δ [2—6]. Вони широко використовують марки типу ВЧ700-10; ВЧ800-10; ВЧ850-5, що мають перлітну металеву основу, для виготовлення колінчастих валів, втулок, блоків та кришок циліндрів, поршневих кілець для дизельних двигунів, корпусів боєприпасів, корпусів редукторів, поворотних кулаків та багатьох інших. Збільшення пластичності металу таких виробів забезпечує підвищення їхньої циклічної довговічності та поліпшує оброблюваність різанням. Діючими в Україні стандартами ДСТУ 3925-99 та ДСТУ EN 1563:2018 передбачено отримання 2 марок перлітного високоміцного чавуну з регламентованими мінімальними тимчасовим опором під час розтягування σ_B , відповідно, 700 МПа і 800 МПа та відносним видовженням $\delta \geq 2\%$ (ВЧ700-2 і ВЧ800-2), які у багатьох випадках не задовольняють актуальні зростаючі вимоги до матеріалів для сучасної техніки, що стрімко розвивається. Це зумовило проведення досліджень зі створення нових процесів одержання високоміцних чавунів перлітного класу з підвищеними технологічними і механічними властивостями.

На підвищення механічних властивостей високоміцного чавуну, і зокрема пластичності, найбільший вплив мають його хімічний склад, склад модифікаторів і методи модифікування, легування, швидкість охолодження та термічне оброблення виливків. Перспективним напрямом розвитку технології одержання перлітного високоміцного чавуну підвищеної пластичності є застосування для модифікування феросиліцій-магній-кальцієвих лігатур. Кальцій вводиться до складу феросиліцій-магнієвих лігатур, у структурі яких переважаючою структурною складовою є хімічно-активна фаза Mg_2Si з відносно низькою температурою плавлення ($\sim 1025^\circ C$), для зниження піроефекту і димоутворення за рахунок формування

потрійних Ca-Si-Mg фаз з температурою плавлення понад $\sim 1200^\circ C$ [7]. Взаємодія таких складових з рідким чавуном відбувається менш активно, порівняно з фазою Mg_2Si , що покращує засвоєння Mg чавуном [8]. Перевагами кальцію також є висока спорідненість до кисню і сірки, від яких він ефективно очищує чавунний розплав, підвищення ступеня засвоєння магнію та зменшення переохолодження від його введення, краща інокулювальна здатність (збільшує кількість центрів формування кулястого графіту під час кристалізування), зменшення схильності тонкостінних виливків до утворення відбілу, зниження лінійної і об'ємної усадок. За рахунок підвищення ступеня рафінування розплаву та інтенсивності графітоутворення підвищуються показники міцності і пластичності, зменшується анізотропія механічних властивостей чавуну у виливках [9].

Обґрунтування проблеми дослідження. Наявні технології виготовлення високоміцних чавунів перлітного класу характеризуються високими затратами в виробництві і не задовольняють постійно зростаючі вимоги до створюваної нової техніки і обладнання. Існуючі технології потребують застосування дорогого нікелю з нікель-магнієвих лігатур для сфероїдувального модифікування та в якості легувального елементу, який сприяє перлітизуванню металевої основи і підвищенню механічних властивостей високоміцного чавуну. Проте наявність дорогого нікелю у технологічному процесі отримання високоміцного чавуну не забезпечує досягнення заданого ступеня перлітизування його металевої основи (понад 92 %) і тому застосовується додаткове легування міддю в кількості 0,5 %. Традиційні процеси модифікування повністю не вирішують проблему отримання виливків без відбілу, що потребує проведення термічного оброблення — енергоємного високотемпературного відпалу для розкладання структурно-вільного цементиту. Вказані недоліки існуючих технологій зумовлюють актуальність досліджень, спрямованих на створення нових економічних процесів одержання високоміцних чавунів перлітного класу з підвищеними показниками міцності, пластичності, циклічної довговічності при зниженні собівартості виробництва.

Мета і методика досліджень. Метою роботи було дослідження і оптимізування параметрів процесів модифікування та легування для розроблення високоефективних технологій одержання перлітних високоміцних чавунів з підвищеними механічними і функціональними властивостями.

Для проведення досліджень із шихти, що складалась з рафінованого продуванням магнієм доменного чавуну марки ЛРЗ-II-A (48 %), пакетованих відходів листової сталі від холодного штампування (49,73 %), феросиліцію ФС45-5 (2,27 %) та графіту марки ЕКК (3 % понад 100 %), було отримано розплав з низькою масовою часткою сірки і фосфору наступного хімічного складу (%): 3,6 C; 1,68 Si; 0,38 Mn; 0,05 Ni; 0,03 Cr; 0,013 S; 0,03 P. Модифікувально-рафінувальне оброблення розплаву чавуну проводили у ковші феросиліцій-магній-кальцієвою лігатурою ФСМг7К4 спільно з флюсувальною добавкою флюориту кальцію у ви-

гляді ФК-92, яка знижує температуру і в'язкість реакційного шлаку, що утворюється під час взаємодії лігатури з розплавом, і забезпечує його переведення в рафінувальний. Оксидно-фторидний шлак системи $\text{CaO-SiO}_2\text{-CaF}_2$, утворений на поверхні часток феросиліцій-магній-кальцієвої лігатури під час їх плавлення виконує функцію адгезивного фільтру і запобігає переходу окислів та інших неметалевих вкраплень із лігатури до чавуну, що дозволяє підвищити механічні властивості високоміцного чавуну [10].

Для порівняння використовували також традиційну для українських підприємств технологію одержання перлітного високоміцного чавуну із використанням процесу модифікування-легування розплаву нікель-магнієвою лігатурою NiMg15 спільно з графітізуювальним модифікуванням феросиліцієм ФС75 [11]. Модифікування «важкою» нікель-магнієвою лігатурою забезпечує ступінь засвоєння магнію розплавом чавуну на рівні 50 %, при цьому сам процес відбувається спокійніше, порівняно з засвоєнням 35 % магнію розплавом при обробленні «легшою» феросиліцій-магнієвою лігатурою ФСМг7. Зважаючи на низьку масову частку сірки у вихідному розплаві (0,013 %), для одержання в дослідних плавках високоміцного чавуну зі ступенем сфероїдизування графіту ССГ понад 85 % було експериментально визначено витрату сфероїдизуювальних лігатур: у випадку використання лігатури ФСМг7К4 вона склала 1,2 %, у випадку лігатури NiMg15 — 0,5 % від маси розплаву у ковші. Таким чином, у порівнянні з раніше застосованим для досліджень вихідним розплавом [11], який отримали переплавленням переробного чушкового чавуну марки ПЛ2 з підвищеною у понад 2 рази масовою часткою сірки (0,03 %), витрата сфероїдизуювальних лігатур для модифікування значно зменшується: на 40 % — лігатури ФСМг7К4, у 3 рази — лігатури NiMg15 .

Разом з модифікаторами на дно ковшів вводили заплановану кількість легувальних елементів — міді та нікелю. Для визначення хімічного складу, параметрів мікроструктури, механічних властивостей високоміцного чавуну в кожному досліді відливали стандартні клиноподібні проби з товщиною основи 25 мм (ДСТУ 3925-99), швидкість охолодження яких становила 0,12 °C/с. Механічні властивості отриманих дослідних високоміцних чавунів визначали у литому стані і після термічного оброблення, яким було нормалізування (нагрів в печі до 850+20 °C, витримка 2 години, охолодження на повітрі).

Результати та їх обговорення. Отриманий модифікуванням лігатурою ФСМг7К4 нелегований високоміцний чавун мав наступну масову частку хімічних елементів у своєму складі (%): 3,63 C; 2,75 Si; 0,39 Mn; 0,03 Cr; 0,05 Ni; 0,05 Cu; 0,037 Mg; 0,01 S; 0,029 P. Структура такого чавуну складалась із кулястого графіту зі ступенем сфероїдизування 90—95 % і феритно-перлітної металевої основи (60 % фериту, решта — перліт). Механічні властивості становили: тимчасовий опір під час розтягування $\sigma_B = 590$ МПа; відносне видовження $\delta = 12$ %; твердість 203 НВ. Встановлено, що нормалізування такого чавуну за вищенаведеним режимом, який застосовується у су-

часних технологіях одержання перлітного високоміцного чавуну, лише незначно знижує кількість фериту в структурі і не дозволяє одержати перлітну структуру (перліту понад 90 %) і мінімальну міцність, характерну для матеріалів з такою металевою основою ($\sigma_B > 700$ МПа).

Для підвищення механічних показників чи надання високоміцному чавуну спеціальних властивостей (зносо-, ударостійкості, корозійної стійкості та інших) його легують. Внаслідок підвищеної схильності високоміцного чавуну до утворення при кристалізуванні карбідної фази, вибір легувальних елементів для зміцнення його металевої основи, порівняно зі сталлю і чавуном з пластинчастим графітом, вкрай обмежений. Гарантоване отримання виливків із перлітного високоміцного чавуну з безкарбідною структурою є головним критерієм їхньої високої якості і досягається: високоякісними шихтовими матеріалами, що забезпечують низьку масову частку у розплаві сірки, фосфору і карбідоутворювальних елементів (хрому, марганцю та інших); використанням легування елементами, що сприяють перлітизуванню при евтектичному перетворенні, зміцнюють твердий розчин і не утворюють карбідів, тобто міддю та/або нікелем [12, 13]; високоефективним сфероїдизуювальним та графітізуювальним (інокулювальним) модифікуванням [14, 15]. Для ефективного сфероїдизуювального модифікування розплаву будь-якими магнієвмісними лігатурами масова частка сірки у ньому повинна бути менше 0,015 % [8, 16, 17].

Нікель — метал зі щільністю 8350 кг/м³ і температурою плавлення 1453 °C. Утворює із залізом сплави зі структурою необмеженого гомогенного твердого розчину, сприяє розширенню γ -області на діаграмі фазового стану Fe-Ni сплавів. Розчинність нікелю у фериті (α -Fe) складає 5,8 %мас. [18, 19]. Відповідно до класифікування [20], нікель (так само як мідь, кобальт, кремній та алюміній) відноситься до некарбідоутворювальних легувальних елементів, знижує розчинність вуглецю в рідкому і твердому розчинах, підвищує евтектичну температуру і знижує евтектичну. Легування нікелем розширює інтервал між температурами утворення стабільної (аустенітно-графітної) та метастабільної (аустенітно-цементитної) евтектик, що відповідає його графітізуювальному впливу в процесі кристалізування [21]. Нікель сприяє графітізуванню чавуну в процесі кристалізування та гальмує його при $\gamma \rightarrow \alpha$ перетворенні, підвищуючи ступінь перлітизування металевої основи [21, 22]. У складі високоміцного чавуну нікель сприяє збільшенню розчинності міді. Зміцнення твердого розчину за рахунок легування нікелем дозволяє підвищити показники міцності високоміцних чавунів з усіма типами металевої основи. У легованих нікелем перлітних високоміцних чавунах внаслідок диспергування металевої основи забезпечується сприятливе для службових властивостей виробів поєднання міцності, пластичності та ударної в'язкості.

Вплив нікелю на структуру металевої основи високоміцного чавуну визначається швидкістю охолодження стінки виливка [7]. В клиноподібних пробах

товщиною основи 25 мм, що охолоджувались з невисокою швидкістю (0,12 °C/с), при легуванні нікелем у кількості 0,5—1,0 %мас. його перлітизувальний вплив не проявлявся, спостерігалось навіть певне збільшення кількості фериту у структурі (рис. 1). При масовій частці нікелю 1,5 % кількість перліту збільшується, а після нормалізування забезпечується отримання перлітної металевої основи і підвищення тимчасового опору під час розтягування σ_B до 900 МПа, твердості до 255 НВ, при цьому відносне видовження δ становить 6,5 %.

Найбільш поширеним і відносно недорогим легувальним елементом високоміцного чавуну є мідь, яка має щільність 8920 кг/м³ та температуру плавлення 1083 °C. Мідь є графітизувальним елементом, який, не сприяючи утворенню цементиту при кристалізуванні, забезпечує формування перлітної матриці у структурі виливків. Кристалічна решітка міді подібна до решітки γ -заліза, тому мідь сприяє розширенню цієї області на діаграмі стану Fe-C-сплавів. Відповідно до фазової діаграми Cu-Fe максимальна розчинність міді в аустеніті (γ -Fe) складає 13 %, а в фериті (α -Fe) — 2,2 %мас. [18, 19]. Розчинність міді залежить від температури та складу чавуну — підвищується зі збільшенням масових часток нікелю, марганцю, кремнію. Мідь розчиняється в чавуні до 3,5 %мас., а при масовій частці, що перевищує граничну розчинність, може виділятися у вигляді самостійної мікроскопічної фази [8].

Порівняно з нікелем, легування міддю є більш ефективним засобом для утворення у високоміц-

ному чавуні перлітної матриці (рис. 2). В результаті легування міддю зміцнюється твердий розчин, збільшується дисперсність перліту, значно підвищується міцність.

Для визначення впливу модифікаторів, легування міддю та нікелем на структуру і властивості високоміцного чавуну були виготовлені дослідні партії виливків колінчатих валів масою 13,5 кг, з яких вирізали заготовки зразків для проведення хімічного та металографічного аналізів і механічних випробувань. Метал виливків досліджували у литому стані і після термічного оброблення (нормалізування). Результати досліджень наведені у табл. 1. Після проведення механічних випробувань нормалізованих зразків встановлено, що застосування розробленого процесу одержання безнікелевого перлітного високоміцного чавуну легуванням міддю (0,96 %) та модифікуванням феросиліцій-магній-кальцієвою лігатурою (варіант 1) взамін традиційного процесу легування та модифікування нікель-магнієвою лігатурою (варіант 3) дозволяє підвищити показники механічних властивостей: тимчасовий опір під час розтягування σ_B на 22,7 %, відносне видовження δ на 50 %. Порівняно з варіантом 1, застосування варіанту 2 (легування 0,5 % Cu + 0,5 % Ni та модифікування феросиліцій-магній-кальцієвою лігатурою) при одержанні однакових значень $\sigma_B = 952$ МПа дозволяє підвищити показник відносного видовження δ з 6 % до 8 % (на 33 %) і зменшити твердість з 285 НВ до 263 НВ (рис. 3).

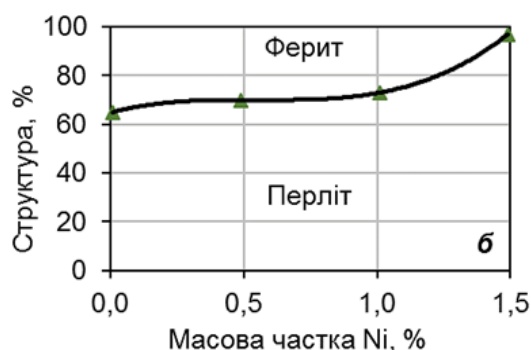
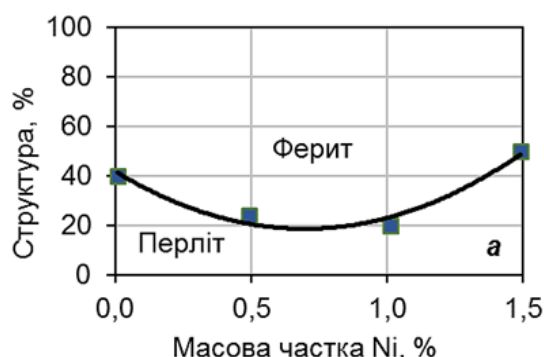


Рис. 1. Мікроструктура металеві основи високоміцного чавуну після легування Ni у литому стані (а) та після нормалізування (б)

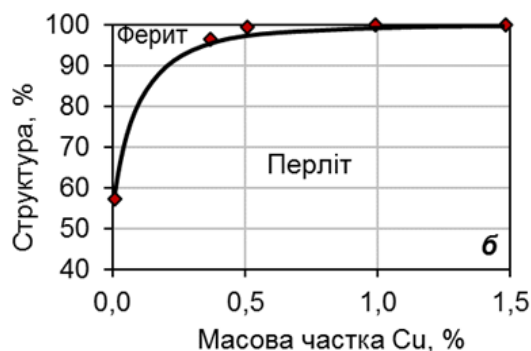
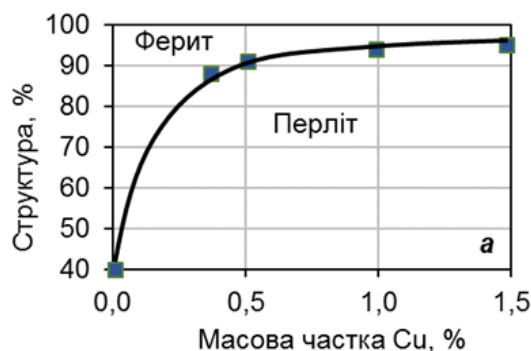


Рис. 2. Мікроструктура металеві основи високоміцного чавуну після легування Cu у литому стані (а) та після нормалізування (б)

Хімічний склад, кількість перліту і механічні властивості високоміцного чавуну при різних варіантах ковшового оброблення (модифікування + легування)

Варіант оброблення чавуну	Модифікатор і кількість легувальних добавок, % (від маси рідкого металу)	Масова частка елемента у високоміцному чавуні, %				Кількість перліту, %	Механічні властивості*		
		Si	Cu	Ni	Mg		σ_B , МПа	δ , %	НВ
1	ФСМг7К4 + 1,0 Cu	2,84	0,96	0,05	0,055	97 / 98	912 / 952	7 / 6	295 / 285
2	ФСМг7К4 + 0,5 Cu + 0,5 Ni	2,78	0,48	0,51	0,041	92 / 92	854 / 952	7 / 8	282 / 263
3	HiMn15 + ФС75 + 0,5 Cu + 0,5 Ni	2,70	0,45	1,14	0,053	96 / 98	761 / 776	6 / 4	305 / 295

Примітка: *у чисельнику наведено дані для зразків у литому стані, в знаменнику — після нормалізування.

Ефективність підвищення впливу модифікувально-рафінувального оброблення розплаву феросиліцій-магній-кальцієвою лігатурою з добавкою флюориту кальцію CaF_2 , порівняно з модифікувальним обробленням нікель-магнієвою лігатурою сумісно з феросиліцієм, найбільш контрастна для варіантів оброблення 2 і 3, в яких застосовується комбіноване легування нікелем і міддю (0,5 % Ni + 0,5 % Cu). Незважаючи на отриману для варіанту 3 понад вдвічі більшу масову частку нікелю при майже однаковій масовій частці міді механічні властивості одержаного за варіантом 2 високоміцного чавуну ($\sigma_B = 952$ МПа, $\delta = 8$ %) значно перевищують одержані за

варіантом 3 ($\sigma_B = 776$ МПа, $\delta = 4$ %).

Таким чином, ефект зміцнення і особливо підвищення пластичності при обробленні розплаву феросиліцій-магній-кальцієвою лігатурою значно перевищує дію вдвічі збільшеної масової частки нікелю, яка має місце при застосуванні нікель-магнієвої лігатури. Окрім цього, одержаний із застосуванням нікель-магнієвої лігатури високоміцний чавун має підвищені схильність до відбілу при кристалізуванні тонкостінних виливків, об'ємну усадку та твердість, що негативно впливає на оброблюваність різанням і властивості виробів.

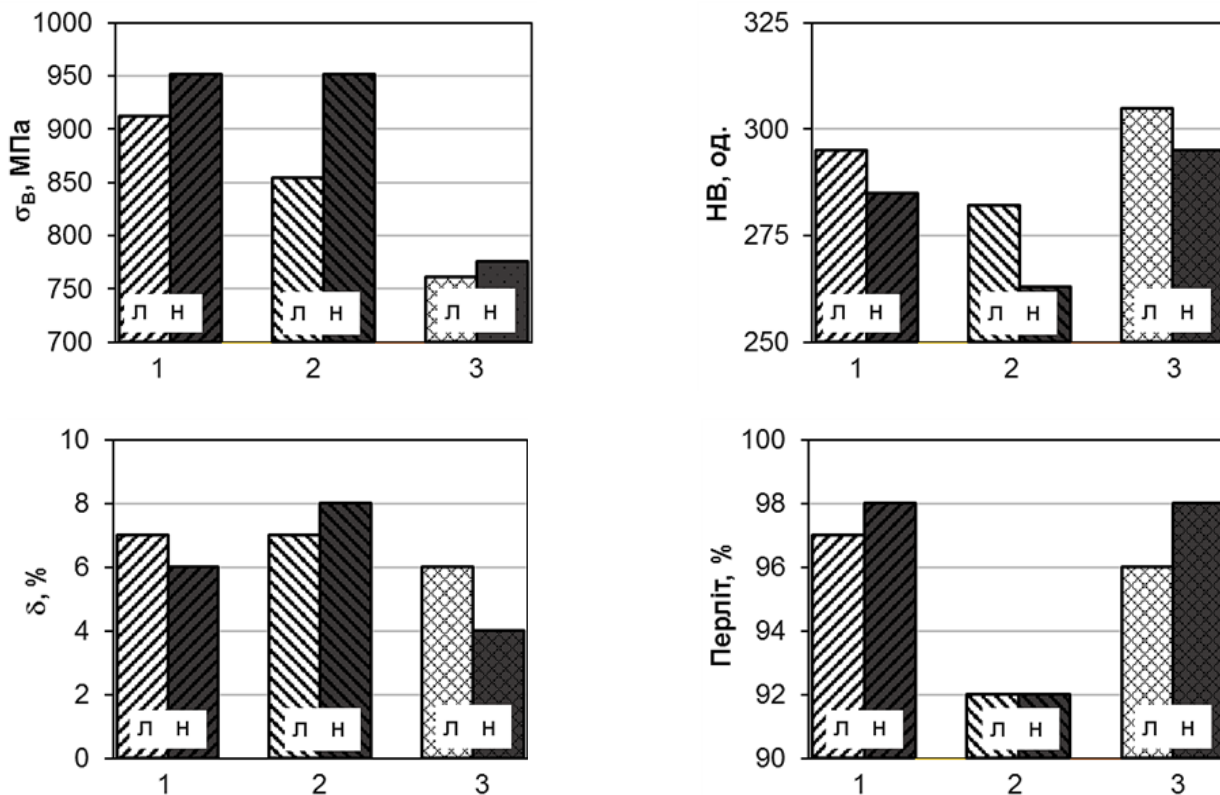


Рис. 3.

Вплив технології отримання перлітного високоміцного чавуну на його механічні властивості та кількість перліту в структурі металевій основі (л — литий стан; н — після нормалізування): 1 — варіант легування розплаву 1,0 % Cu, модифікування ФСМг7К4; 2 — варіант легування розплаву 0,5 % Cu + 0,5 % Ni, модифікування ФСМг7К4; 3 — варіант легування розплаву 0,5 % Cu + 0,5 % Ni, модифікування HiMn15 + ФС75

Для оцінки ефективності роботи 2-х розроблених складів високоміцних чавунів, отриманих застосуванням модифікування ФСМг7К4 лігатурою, що мали високі механічні властивості ($\sigma_B = 950$ МПа, $\delta = 6\%$), але відмінних за масовою часткою легувальних елементів (перший був легований 0,96 % міді, другий — комбінацією 0,58 % міді та 0,51 % Ni), в умовах змінного навантаження було проведено стендові випробування виготовлених з цих сплавів дослідних колінчатих валів. Для порівняння також були виготовлені і випробувані колінчаті вали з високоміцного чавуну, який отримували за серійною технологією на основі модифікування NiMg15 лігатурою легованого 1,14 % Ni та 0,68 % Cu розплавів і характеризувався меншими механічними властивостями ($\sigma_B = 778$ МПа, $\delta = 4\%$). Дослідження циклічної довговічності проводили на

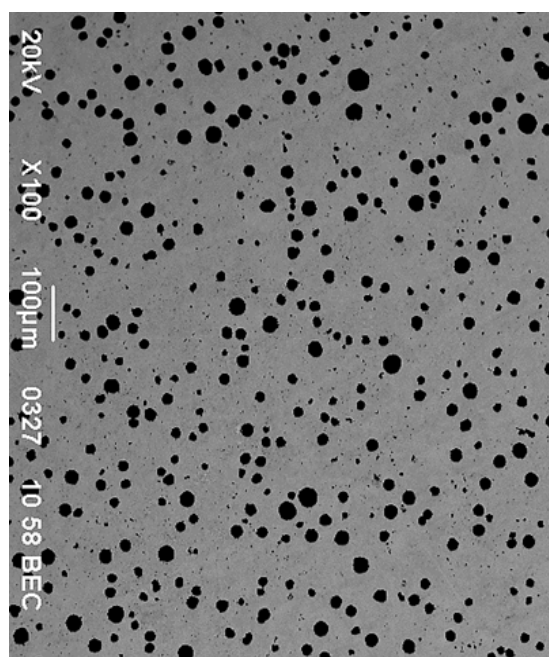
вертикальному пульсаторі «Шенк» (Німеччина) при режимі навантаження деталей від 100 кг до 1800 кг до їх руйнування. Результати випробувань колінчатих валів на циклічну довговічність наведено у табл. 2. Наведені дані показують підвищення на 60 % втомної міцності колінчатих валів, отриманих за розробленою технологією на основі модифікування феросиліцій-магній-кальцієвою лігатурою, — 194000 циклів порівняно з 121500 циклів для колінчатих валів, виготовлених застосуванням нікель-магнієвої лігатури.

Таким чином, при використанні розробленої технології отримання перлітного високоміцного чавуну з 0,96 % Si модифікуванням феросиліцій-магній-кальцієвою лігатурою є можливість значного підвищення механічних властивостей і довговічності деталей без введення до складу чавуну нікелю, який мінімум у

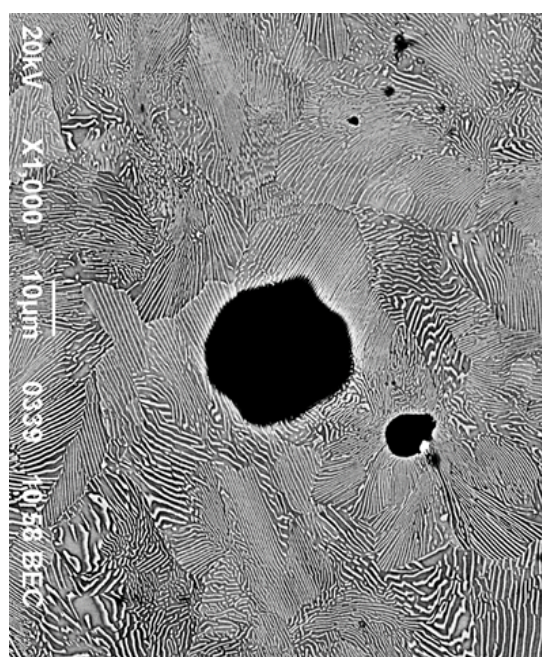
Таблиця 2

Структура, механічні властивості і результати стендових випробувань колінчатих валів

Показник	Варіант модифікування		
	нікель-магнієва лігатура NiMg15 + феросиліцій ФС75	феросиліцій-магній-кальцієва лігатура ФСМг7К4	
Масова частка, %: нікелю міді	1,14 0,68	0,05 0,96	0,51 0,48
Мікроструктура: ССГ, % кількість перліту, %	90—95 98	90—95 98	90—95 98
Механічні властивості: σ_B , МПа δ , % НВ, од.	770 4 285	952 6 285	952 6 268
Кількість циклів навантаження (від 100 до 1800 кг) до руйнування колінчатих валів	121500	194000	216000



а



б

Рис. 4. Мікроструктури перлітного високоміцного чавуну у колінчатому валі при різних збільшеннях (а — $\times 100$; б — $\times 1000$)

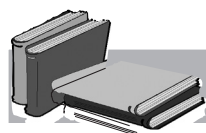
4 рази дорожчий міді.

За технологічними режимами, які були встановлені при проведенні дослідних плавок і забезпечили найкращі результати процесу модифікування феросиліцій-магній-кальцієвою лігатурою, було виготовлено дослідно-промислову партію колінчатих валів з перлітного високоміцного чавуну легованого міддю. Масова частка міді в отриманих виливках знаходилась у межах 0,85—1,15 %, а нікелю — не перевищувала 0,05 % (тобто він був практично відсутній). Мікроструктура колінчатих валів дослідно-промислової партії складалась з графіту кулястої форми в кількості приблизно 310 шт/мм² (ступінь сфероїдизування графіту 90—95 %) і перлітної металевої основи (рис. 4). Механічні властивості металу знаходились у наступних межах: $\sigma_B = 920\text{—}950$ МПа; $\delta = 5,8\text{—}8,0$ %; твердість 269—285 НВ.

Встановлено, що використання феросиліцій-магній-кальцієвої лігатури взамін нікель-магнієвої лігатури не призводить до збільшення рівня браку виливків і не створює специфічних його видів. У процесі оброблення дослідно-промислової партії колінчатих валів дефектів по литтю не виявлено.

Висновки

Встановлено, що розроблена технологія отримання перлітного високоміцного чавуну з масовою часткою міді ($1 \pm 0,15$) % модифікуванням феросиліцій-магній-кальцієвою лігатурою забезпечує одержання деталей з підвищеними механічними властивостями (σ_B у межах 920—950 МПа, $\delta = 5,8\text{—}8,0$ %) і циклічною міцністю (на 60 %). Перлітний високоміцний чавун у деталях, які отримували за серійною технологією на основі модифікування нікель-магнієвою лігатурою легованого 1,14 % Ni та 0,68 % Si розплаву, характеризувався меншими механічними властивостями ($\sigma_B = 770\text{—}785$ МПа, $\delta = 4,0\text{—}5,0$ %). Розроблена технологія відкриває можливість значного підвищення механічних властивостей і циклічної довговічності деталей без введення до складу високоміцного чавуну дорогого нікелю. Використання процесу модифікування розплаву феросиліцій-магній-кальцієвою лігатурою взамін модифікування нікель-магнієвою лігатурою і феросиліцієм не призводить до збільшення рівня браку виливків і не створює специфічних його видів.

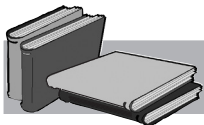


ЛІТЕРАТУРА

1. Industry Outlook: Sales Expected to Keep Growing. *Modern Casting*. 2023. Vol. 113. No. 1. P. 33—35.
2. Zanardi F., Bonollo F., Angella G. et al. A contribution to new material standards for ductile irons and austempered ductile irons. *International Journal of Metalcasting*. 2017. Vol. 11. Iss. 1. P. 136—147. <https://doi.org/10.1007/s40962-016-0095-6>
3. Masaggia S. The development of ADI and IDI in Italy. *Procedia Engineering*. 2010. Vol. 2. Iss. 1. P. 1459—1476. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2010.03.158>
4. Meehanite Specification Handbook 2013. URL: <https://meehanitemetal.com/technical-lit> (дата звернення: 20.02.2024).
5. Menk W. A new high strength high ductile nodular iron. *Materials Science Forum*. 2018. Vol. 925. P. 224—230. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.925.224>
6. Menk W. Ein neues hochfestes, hoch duktiles Gusseisen mit Kugelgraphit. *GIesserei*. 2018. Vol. 105. No. 8. P. 36—40.
7. Gröbner J., Chumak I., Schmid-Fetzer R. Experimental study of ternary Ca-Mg-Si phase equilibria and thermodynamic assessment of Ca-Si and Ca-Mg-Si systems. *Intermetallics*. 2003. Vol. 11. Iss. 10. P. 1065—1074. <https://doi.org/10.1016/j.intermet.2003.07.001>
8. Hartung C., White D., Copi K., Liptak M., Logan R. The continuing evolution of MgFeSi treatments for ductile and CG irons. *International Journal of Metalcasting*. 2014. Vol. 8. Iss. 2. P. 7—15. <https://doi.org/10.1007/BF03355577>
9. Бубликов В.Б. Кальций в высокопрочном чугуна. *Процессы литья*. 2007. № 5. С. 4—10.
10. Бубликов В.Б. Особенности взаимодействия основных типов модификаторов с расплавом чугуна при внутриформенном модифицировании. *Процессы литья*. 1998. № 1. С. 30—36.
11. Бубликов В.Б., Бачинський Ю.Д., Нестерук О.П. Одержання високоміцних чавунів перлітного класу з підвищеними технологічними і механічними властивостями. *Процеси лиття*. 2024. № 1 (155). С. 3—13. <https://doi.org/10.15407/plit2024.01.003>
12. Бубликов В.Б., Ясинский А.А., Сиропоршнев Л.Н., Берчук Д.Н., Киришун И.В. Влияние никеля на структуру и механические свойства отливок из высокопрочного чугуна. *Процессы литья*. 2011. № 2. С. 24—34.
13. Бубликов В.Б., Ясинский А.А., Сыропоршнев Л.Н., Бачинский Ю.Д., Козак Д.С. Медь в высокопрочном чугуна. *Процессы литья*. 2010. № 3. С. 46—57.
14. Hartung K., Michels L., Logan R. The evolution of inoculants. *Modern Casting*. October 2021. P. 24—29.
15. Fay A., Pinel P. Inoculation solutions against metallurgical problems. *International Journal of Metalcasting*. 2020. Vol. 14. P. 1123—1135. <https://doi.org/10.1007/s40962-020-00431-4>
16. Pietrowski S. Control of cast iron and casts manufacturing by in mold method. *Archives of foundry engineering*. 2009. Vol. 9. Iss. 3. P. 133—142.

17. Бубликов В. Б., Нарівський А. В., Бачинський Ю. Д. Технологія одержання тонкостінних виливків з високоміцного чавуну в облицьованих копіях з використанням внутрішньоформового модифікування розплаву. *Метал та лиття України*. 2021. Т. 29. № 1 (324). С. 46—53. <https://doi.org/10.15407/steelcast2021.01.046>
18. ASM Handbook: Alloy Phase Diagrams / Edited by Hue Baker. «ASM International». 1992. Vol. 3. 1741 p.
19. Лякишев Н.П. Диаграммы состояния двойных металлических систем. Справочник. Том 2. Москва: Машиностроение, 1997. 1023 с.
20. Куцова В.З., Ковзель М.А., Носко О.А. Леговані сталі та сплави з особливими властивостями. Дніпропетровськ: НМетАУ, 2008. 348 с.
21. Ващенко К.И., Шумихин В.С. Плавка и выпечная обработка чугуна для отливок. Киев: Вища школа, 1992. 246 с.
22. Чугун: Справочник / Под ред. А.Д. Шермана, А.А. Жукова. Москва: Металлургия, 1991. 576 с.

Надійшла 28.02.2024



REFERENCES

1. (2023). Industry Outlook: Sales Expected to Keep Growing. *Modern Casting*, 113(1), 33-35.
2. Zanardi, F., Bonollo, F., Angella, G. et al. (2017). A contribution to new material standards for ductile irons and austempered ductile irons. *International Journal of Metalcasting*, 11(1), 136-147. <https://doi.org/10.1007/s40962-016-0095-6>
3. Masaggia, S. (2010). The development of ADI and IDI in Italy. *Procedia Engineering*, 2(1), 1459-1476. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2010.03.158>
4. Meehanite Specification Handbook 2013. URL: <https://meehanitemetal.com/technical-lit> (Last accessed: 20.02.2024).
5. Menk, W. (2018). A new high strength high ductile nodular iron. *Materials Science Forum*, 925, 224-230. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.925.224>
6. Menk, W. (2018). Ein neues hochfestes, hoch duktiles Gusseisen mit Kugelgraphit [A new high-strength, highly ductile cast iron with nodular graphite]. *GIesserei*, 105(8), 36-40 [in German].
7. Gröbner, J., Chumak, I., Schmid-Fetzer, R. (2003). Experimental study of ternary Ca-Mg-Si phase equilibria and thermodynamic assessment of Ca-Si and Ca-Mg-Si systems. *Intermetallics*, 11(10), 1065-1074. <https://doi.org/10.1016/j.intermet.2003.07.001>
8. Hartung, C., White, D., Copi, K., Liptak, M., Logan, R. (2014). The continuing evolution of MgFeSi treatments for ductile and CG irons. *International Journal of Metalcasting*, 8(2), 7-15. <https://doi.org/10.1007/BF03355577>
9. Bublikov, V.B. (2007). Calcium in high-strength cast iron. *Casting processes*, 5, 4-10 [in Russian].
10. Bublikov, V.B. (1998). Features of main types modifiers interaction with molten cast iron during in-mold modifying. *Casting processes*, 1, 30-36 [in Russian].
11. Bublikov, V.B., Bachynskyi, Yu.D., Nesteruk, O.P. (2024). Obtaining of pearlite grade ductile cast iron with improved technological and mechanical properties. *Casting processes*, 1(155), 3-13. <https://doi.org/10.15407/plit2024.01.003> [in Ukrainian]
12. Bublikov, V.B., Yasinskiy, A.A., Syroporsnev, L.N., Berchuk, D.N., Kirishun, I.V. (2011). Influence of nickel on the structure and mechanical properties of high-strength cast iron castings. *Casting processes*, 2, 24-34 [in Russian].
13. Bublikov, V.B., Yasinsky, A.A., Syroporshnev, L.N., Bachynskyi, Yu.D., Kozak, D.S. (2010). Copper in high-strength cast iron. *Casting processes*, 3, 46-57 [in Russian].
14. Hartung, K., Michels, L., Logan, R. (2021). The evolution of inoculants. *Modern Casting*. October, 24-29.
15. Fay, A., Pinel, P. (2020). Inoculation solutions against metallurgical problems. *International Journal of Metalcasting*, 14, 1123-1135. <https://doi.org/10.1007/s40962-020-00431-4>
16. Pietrowski, S. (2009). Control of cast iron and casts manufacturing by in mold method. *Archives of foundry engineering*, 9(3), 133-142.
17. Bublikov, V.B., Narivskyi, A.V., Bachynskyi, Yu.D. (2021). Technology of thin-walled ductile cast iron castings obtaining in coated metal moulds with the use of in-mold melt modifying. *Metal and Casting of Ukraine*, 29(1(324)), 46-53. <https://doi.org/10.15407/steelcast2021.01.046> [in Ukrainian].
18. Baker, H. (Ed.) (1992). ASM Handbook: Alloy Phase Diagrams. «ASM International», vol. 3, 1741 p.
19. Lyakishev, N.P. (1997). State diagrams of binary metal systems. Handbook. Vol. 2. Moscow: Mashinostroenie, 1023 p. [in Russian].
20. Kutsova, V.Z., Kovzel, M.A., Nosko, O.A. (2008). Alloyed steels and alloys with special properties. Dnipro: NMetAU. 348 p. [in Ukrainian].
21. Vashchenko, K.I., Shumykhyn, V.S. (1992). Melting and after-furnace processing of cast iron for castings. Kyiv: Vyshcha shkola, 246 p. [in Russian].
22. Sherman, A.D., Zhukov, A.A. (Eds.) (1991). Cast iron. Handbook. Moscow: Metallurgiya, 576 p. [in Russian].

Received 28.02.2024

Summary

V.B. Bublikov, Dr. Sci. (Engin.), Senior Research Scientist, Department Chair, e-mail: otdel.vch@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-4465-9256>
Yu.D. Bachynskyi, PhD (Engin.), Senior Researcher, e-mail: 909_bach@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0002-5745-1369>
O.P. Nesteruk, PhD (Engin.), Senior Researcher, e-mail: pavlina81@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-6342-3551>
D.M. Berchuk, PhD (Engin.), Senior Research Officer, Department Chair Deputy, e-mail: otdel.vch@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-5273-5522>
O.O. Yasynska, PhD (Engin.), Researcher, e-mail: yasinskaalena@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-2187-6701>
O.O. Yasynskyi, Researcher, e-mail: alexyasynskyi@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-0932-5309>
V.O. Ovsianynkov, Chief technologist, e-mail: otdel.vch@gmail.com

Physico-technological Institute of Metals and Alloys of the NAS of Ukraine (Kyiv, Ukraine)

The influence of modifiers, alloying with copper and nickel on the structure, mechanical and performance properties of pearlitic ductile iron

Ductile cast irons with a pearlitic metal base are widely used in manufacture of a large range of highly-load machine parts. World leaders in the field of ductile cast iron are successfully manufacturing parts from new grades of pearlitic ductile cast irons, which have a 2-5 times higher minimum relative elongation A, compared to the requirements of current Ukrainian standards. Traditional manufacturing technologies of such cast irons require the use of expensive alloying elements (like nickel and/or copper) in the charge and mandatory energy-intensive heat treatment. The article provides comparative data on the effect of modifying with two types of magnesium-containing master alloys (named ferrosilicon-magnesium-calcium FeSi-45Mg7Ca4 and nickel-magnesium NiMg15), on the ductile cast irons structure formation and mechanical properties in the as-cast state and after normalizing heat treatment. The obtained results indicate that usage of developed process of original melt modifying and refining with ferrosilicon-magnesium-calcium master alloy FeSi45Mg7Ca4 instead of modifying with nickel-magnesium master alloy NiMg15 and ferrosilicon FeSi75 is a promising and effective way of pearlitic ductile cast iron with increased technological and mechanical properties production at lower energy consumption for castings heat treatment. The developed technology of pearlitic ductile cast iron with Cu = 0.85-1.15 %wt. obtaining via modifying with ferrosilicon-magnesium-calcium master alloy allows to obtain parts with high mechanical properties: tensile strength Rm = 920-952 MPa, relative elongation A = 6,0-8.0 % and 60 % higher cyclic strength compared to nickel-magnesium master alloy using. This shows the possibility to increase the mechanical properties and cyclic durability in parts significantly without introducing of expensive nickel into the ductile cast iron composition. Usage of the melt modifying process with ferrosilicon-magnesium-calcium master alloy instead of modifying with nickel-magnesium master alloy and ferrosilicon doesn't increase the level of defects in castings and doesn't create its specific types.

Keywords

Ductile cast iron, pearlite, structure, modifier, alloying, copper, nickel, normalizing heat treatment, mechanical properties.