

<https://doi.org/10.15407/plit2024.01.003>

УДК 669.131.7:621.74:621.78.082:66.046.516

В.Б. Бубликов, д-р техн. наук, старш. наук. співроб., зав. відділу;
e-mail: otdel.vch@gmail.com; ORCID 0000-0003-4465-9256

Ю.Д. Бачинський, канд. техн. наук, старш. наук. співроб.;
e-mail: 909_bach@ukr.net; ORCID 0000-0002-5745-1369

О.П. Нестерук, канд. техн. наук, старш. наук. співроб.;
e-mail: pavlena81@gmail.com; ORCID 0000-0001-6342-3551

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

ОДЕРЖАННЯ ВИСОКОМІЦНИХ ЧАВУНІВ ПЕРЛІТНОГО КЛАСУ З ПІДВИЩЕНИМИ ТЕХНОЛОГІЧНИМИ ТА МЕХАНІЧНИМИ ВЛАСТИВОСТЯМИ

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, які, порівняно з українськими марками, мають тимчасовий опір розриванню 700–850 МПа та підвищене в 2,5–5 разів відносне видовження. Традиційні технології виготовлення таких чавунів вимагають використання в шихті дорогих легувальних елементів (нікелю та / або міді) і обов'язкового проведення енергоємного термічного оброблення. У статті наведено порівняльні дані щодо впливу ковшового модифікування базового розплаву з різних за якістю шихтових матеріалів двома типами магнієвмісних лігатур, а саме нікель-магнієвої NiMg15 та феросиліцій-магній-кальцієвої FeSi45Mg7Ca4, 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 FeSi45Mg7Ca4 спільно з легкоплавким оксидно-фторидним рафінувальним шлаком системи CaO–SiO₂–CaF₂ взамін традиційного процесу модифікування нікель-магнієвою лігатурою NiMg15 і феросиліцієм FeSi75 є перспективним та ефективним способом отримання високоміцних чавунів перлітного класу з підвищеними технологічними й механічними властивостями при економічних енерговитратах на термічне оброблення виливків. Розроблена технологія дозволяє одержати високоміцний чавун перлітного класу, що має такі механічні властивості: тимчасовий опір розриванню $\sigma_b = 830\text{--}890$ МПа; відносне видовження $\delta = 6,5\text{--}7,5$ %; ударну в'язкість $KC = 30\text{--}65$ Дж/см² при твердості 241–255 НВ. Результати досліджень створюють передумови для розроблення нових конструкцій деталей сучасної техніки, заготовки яких отримують литтям, із заданими високими механічними властивостями та експлуатаційними характеристиками і високоефективних економічних технологій їх одержання.

Ключові слова: високоміцний чавун, перліт, лігатура, модифікувально-рафінувальне оброблення, механічні властивості, нормалізування.

Вступ

Створення сучасної техніки вимагає нових марок матеріалів із підвищеним комплексом технологічних, механічних та експлуатаційних властивостей. Високоміцні чавуни з кулястим графітом із перлітною металевою основою широко застосовуються в машинобудуванні для виготовлення таких високо-навантажуваних деталей, як колінчасті вали, втулки, блоки та кришки циліндрів, поршневі кільця для дизельних двигунів, корпуси боеприпасів, корпуси редукторів, поворотні кулаки й багатьох ін. Чинні в Україні стандарти ДСТУ 3925-99 та ДСТУ EN 1563:2018 передбачають отримання двох марок перлітного високоміцного чавуну ВЧ700-2 і ВЧ800-2 з регламентованим мінімальним тимчасовим опором під час розтягування σ_B , відповідно, 700 МПа і 800 МПа та відносним видовженням $\delta \geq 2\%$, що в багатьох випадках не відповідають вимогам до матеріалів для сучасної техніки. Сьогодні світові лідери в галузі високоміцного чавуну (швейцарська фірма «Georg Fischer», англійська фірма «Meehanite», італійська фірма «Zanardi Fonderie» та ін.) створили й успішно виготовляють деталі з нових марок перлітного високоміцного чавуну типу ВЧ700-10; ВЧ800-10; ВЧ850-5, що мають підвищене в 2,5–5 разів відносно видовження [1–5]. Збільшення пластичності забезпечує підвищення циклічної довговічності виробів та поліпшує їх оброблюваність різанням.

В Україні для одержання високоміцних чавунів застосовують одночасне сфероїдизувальне модифікування розплаву нікель-магнієвою лігатурою NiMg15 і графітизувальне модифікування феросиліцієм FeSi75. Модифікування нікель-магнієвою лігатурою підвищує ступінь засвоєння магнію розплавом чавуну до 45–50 %, зменшує піроефект. З метою виключення дорогого нікелю з технологій модифікування розплав обробляють феросиліцій-магнієвою лігатурою FeSi45Mg7. У результаті такого модифікування ступінь засвоєння магнію розплавом знижується до 28–35 %, підвищується інтенсивність піроефекту, а також зменшуються міцність і пластичність чавуну. Для ефективного модифікування лігатурами NiMg15 та FeSi45Mg7 масова частка сірки у вихідному чавуні повинна бути менше 0,015 % [6–8].

Стабільні структура й властивості високоміцного чавуну у виливках досягаються при виплавлянні чавуну в електропечах з використанням чистих від шкідливих домішок шихтових матеріалів. При цьому разом із чушковими чавунами, що мають низькі масові частки сірки, фосфору та марганцю, широко застосовуються дорожчі рафіновані магнієм доменні ливарні чавуни марки ЛР (ДСТУ 3132-95). Для підприємств економічно вигідно повністю або частково виключити зі складу шихти ливарні рафіновані чавуни та інші високоякісні первинні матеріали. Замінити їх можна відходами відповідних марок сталей штампового виробництва.

Введення в чавун при модифікуванні дорогого нікелю не забезпечує необхідного ступеня перлітизування (більше 92 %) металевої основи, і тому потребує додаткового легування міддю в кількості 0,4–0,5 %. 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. Наведені недоліки наявних технологій та актуальний стрімкий розвиток техніки зумовили проведення досліджень, спрямованих на створення нових процесів одержання високоміцних чавунів перлітного класу з підвищеними технологічними й механічними властивостями.

Перспективним напрямком розвитку технології одержання перлітного високоміцного чавуну підвищеної пластичності є застосування для модифікування феросиліцій-магній-кальцієвих лігатур. У широко розповсюджених для одержання високоміцного чавуну феросиліцій-магнієвих лігатурах хімічно-активною структурною складовою є фаза Mg_2Si , яка має невисоку температуру плавлення $\sim 1025^\circ C$, інтенсивно взаємодіє з розплавом чавуну зі значним піроефектом і димоутворенням. Для зниження цієї активності до складу FeSiMg лігатур вводиться кальцій, який сприяє утворенню потрійних Ca–Si–Mg фаз із вищою температурою плавлення ($\sim 1200^\circ C$), взаємодія яких із рідким чавуном відбувається менш активно, порівняно

з фазою Mg_2Si , що покращує засвоєння Mg чавуном [6]. У реакціях десульфування й розкислення чавуну кальцій має вищу термодинамічну активність, ніж магній. Використання кальцію у складі феросиліцій-магнієвих лігатур дозволяє знизити витрату пірофорного магнію до рівня, який потрібен для виконання тільки його основної функції — забезпечення отримання при кристалізуванні глобулів графіту. Кальцій знижує переохолодження, зумовлене введенням магнію в рідкий чавун, збільшує кількість центрів кристалізування графіту, зменшує схильність тонкостінних виливків до утворення відбілу, знижує лінійну та об'ємну усадку. У результаті підвищення ступеня рафінування розплаву та інтенсивності графітоутворення в процесі кристалізування підвищуються показники міцності й пластичності, зменшується анізотропія механічних властивостей чавуну у виливках [9].

При взаємодії частинок феросиліцій-магній-кальцієвої $FeSiMgCa$ лігатури з рідким чавуном на їх поверхні утворюються шлакові оболонки. Лігатура з кальцієм, порівняно з традиційними магнієвими лігатурами, дозволяє отримати якісніший високоміцний чавун за умови додаткового введення реагентів (фторидів лужних і лужноземельних елементів та ін.) для переведення реакційного шлаку в рафінувальний. Рафінувальний оксидно-фторидний шлак системи $CaO-SiO_2-CaF_2$, утворений на поверхні часток $FeSiMgCa$ лігатури під час їх плавлення, виконує функцію адгезійного фільтру і таким чином запобігає переходу окислів та інших неметалевих вкраплень із лігатури до чавуну, що дозволяє збільшити механічні властивості високоміцного чавуну [10].

Рациональне отримання високоміцного чавуну перлітного класу забезпечується за умови, коли кристалізування з рідкого стану відбувається за стабільною системою діаграми $Fe-C$ без утворення у виливках структурно-вільного цементиту (відбілу), а перекристалізування — за метастабільною з утворенням перлітної металевої основи. Для цього необхідно інтенсифікувати графітизування при евтектичному перетворенні і загальмувати його при евтектоїдному. У результаті модифікування магнієм, яке забезпечує утворення кулястого графіту, збільшується ступінь переохолодження розплаву і підвищується схильність до кристалізування частини розплаву за метастабільною системою з утворенням первинного або евтектичного цементиту. Утворення карбідів запобігається головним чином за рахунок підвищення масової частки кремнію у розплаві та застосування додаткового графітизувального модифікування сплавами з високою масовою часткою кремнію, що сприяє феритизуванню металевої основи.

Гарантоване отримання виливків із високоміцного чавуну з безкарбідною структурою є одним із головних критеріїв їх високої якості і досягається комплексом технологічних заходів: високоякісними шихтовими матеріалами, що забезпечують низьку масову частку в розплаві сірки, фосфору й карбідоутворювальних елементів (хрому, марганцю та інших); використанням легування елементами, що не утворюють карбідів і сприяють перлітизуванню при евтектоїдному перетворенні, тобто міддю та / або нікелем [11, 12]; високоефективним сфероїдизувальним та графітизувальним (інокулювальним) модифікуванням [13, 14].

За умови отримання в литому стані виливків із перлітного високоміцного чавуну без структурно-вільних карбідів відпадає потреба в застосуванні енергоємного довготривалого (6–8 год) термооброблення — високотемпературного графітизувального відпалу при 920–950 °C для розкладання структурно-вільного цементиту. У таких умовах при потребі досить застосувати короткотривале економне термооброблення — нормалізування (нагрів до 850–870 °C, витримка 1–2 год, охолодження на повітрі) з метою підвищення показників механічних властивостей перлітного високоміцного чавуну у виливках.

Обґрунтування проблеми дослідження. Наявні технології виготовлення високоміцних чавунів перлітного класу застарілі, характеризуються високими затратами у виробництві і не задовольняють вимог до створеної нової техніки й обладнання, що постійно зростають. Наявні процеси потребують використання в шихті дорогих рафінованих чушкових чавунів, застосування дорогого нікелю як основи нікель-магнієвих лігатур для сфероїдизувального модифікування та

як легувального елемента, що сприяє одержанню перлітної металевої основи та підвищенню механічних властивостей високоміцного чавуну перлітного класу. Традиційні процеси модифікування повністю не вирішують проблему отримання виливків без відбілу, що потребує проведення дорогого термічного оброблення — енергоємного високотемпературного відпалу для розкладання структурно-вільного цементиту. Указані недоліки наявних технологій зумовлюють актуальність досліджень, спрямованих на створення економічних процесів одержання високоміцних чавунів перлітного класу з підвищеними технологічними та механічними властивостями.

Мета й методика досліджень. Мета роботи — дослідження, визначення та оптимізування параметрів технологічного процесу одержання високоміцного чавуну перлітного класу з підвищеними технологічними й механічними властивостями.

Базовий чавун для проведення першого етапу досліджень виплавляли в індукційній печі ICT-016 з переробного чавуну ПЛ2 звичайної якості (група II, клас А, категорія 3 за ДСТУ 3133-96, масова частка Si = 0,5–0,7 %, Mn = 0,3–0,5 %, P ≤ 0,08 %, S ≤ 0,03 %). Модифікувально-рафінувальне оброблення розплаву чавуну проводили в ковші феросиліцій-магній-кальцієвою лігатурою FeSi45Mg7Ca4 разом із флюсувальною добавкою флюориту кальцію CaF₂, яка знижує температуру і в'язкість шлаку, що утворюється під час реакційної взаємодії лігатури з розплавом. Для порівняння використовували також традиційний для технологій одержання перлітного високоміцного чавуну процес модифікування нікель-магнієвою лігатурою NiMg15 разом із феросиліцієм FeSi75. Зважаючи на високу масову частку сірки у вихідному розплаві (до 0,03 %), порівняно з рекомендованими 0,015 %, для одержання в дослідних плавках високоміцного чавуну зі ступенем сфероїдизування графіту понад 85 % було експериментально визначено витрату сфероїдизувальних модифікаторів: у випадку використання FeSi45Mg7Ca4 вона склала 2 %, у випадку NiMg15 — 1,5 % від маси розплаву в ковші. Хімічний склад базового високоміцного чавуну (в % за масою): 3,64–3,86 C; 2,50–2,87 Si; 0,38–0,46 Mn; 0,022–0,025 S; 0,064–0,075 P. Після модифікування нікель-магнієвою лігатурою NiMg15 масова частка нікелю у складі високоміцного чавуну становила 0,95–1,15 %.

У кожному досліді в сирій піщаній формі відливали два комплекти пластин товщиною 5; 10; 15; 20 мм, шириною 40 мм і висотою 200 мм. Для збільшення схильності високоміцного чавуну до утворення відбілу пластини одного з комплектів відливали із застосуванням вертикального чавунного холодильника, який контактував з однією з менших граней виливків. Швидкості охолодження $V_{\text{охол}}$ дослідних виливків представлені в табл. 1.

Таблиця 1

Швидкість охолодження дослідних виливків

Характеристика дослідних виливків	Умови охолодження							
	Звичайне (без холодильника)				Прискорене (з холодильником)			
Товщина пластини, мм	5	10	15	20	5	10	15	20
$V_{\text{охол}}$, °C/c	4,20	1,25	0,6	0,45	8,3	4,8	2,3	1,53

Макроструктуру оцінювали за зламами площини поперечного перерізу пластин на середині їх висоти. Вид зламів схематично зображали у вигляді розташування площ структур сірого, білого та половинчастого чавунів. Ступінь відбілу визначали як відсоток площі, зайнятої відбілом, плюс половина площі, зайнятої половинчастою структурою [15]. Для визначення 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/c.

Визначена за наведеною раніше спеціальною методикою схильність високоміцного чавуну до відбілу (ступінь відбілу) у варіантах модифікування NiMg15 та FeSi45Mg7Ca4

склала, відповідно, 22 % та 5 % (зниження у понад 4 рази). У мікроструктурі виливків (рис. 1) показник щільності розподілу сфероїдів графіту збільшується у 1,5–2,0 рази (до 120–190 шт/мм²), що також свідчить про кращу графітизувальну здатність процесу модифікування FeSi45Mg7Ca4 лігатурою.

Встановлено, що злами пластин товщиною 5 мм, які були отримані у високоміцному чавуні після модифікування 1,5 % NiMg15 лігатури разом із 1 % FeSi75 в умовах охолодження без холодильника, мали структуру білого чавуну, а товщиною 10 мм — вибілені зони. У пластинах аналогічної товщини, відлитих у тих же умовах із високоміцного чавуну після модифікування 2 % FeSi45Mg7Ca4 лігатури, структурно-вільний цементит був відсутній. Установлене значне зниження схильності високоміцного чавуну до відбілу в результаті введення в розплав кальцію пояснюється його комплексною дією, що забезпечує нейтралізування дії шкідливих домішок (сірки, кисню та ін.), зменшення ступеня переохолодження при кристалізуванні, утворення додаткових центрів графітизування, що прискорює процес евтектичного кристалізування [9].

У зв'язку з тим, що питомий об'єм графіту в 3 рази більший за питомий об'єм рідкого чавуну, збільшення кількості графітної фази в процесі кристалізування компенсує усадку високоміцного чавуну в рідко-твердому стані. Для визначення об'ємної усадки чавуну, обробленого порівнюваними лігатурами, застосовували загальноприйняту кінчну технологічну пробу; обчислення проводили за відомою методикою [16]. Отримані результати (табл. 2) свідчать, що у високоміцного чавуну, модифікованого NiMg15 лігатурою і феросиліцієм, загальна величина об'ємної усадки складає 14,6 %, а у модифікованого FeSi45Mg7Ca4 лігатурою — 9,6 %, що на 34 % менше і пояснюється різною графітизувальною здатністю порівнюваних процесів модифікування. Збільшення масової частки кальцію у складі лігатури сприяє зменшенню загальної величини об'ємної усадки. У результаті цього евтектичне кристалізування чавуну, модифікованого лігатурою FeSi45Mg7Ca4, відбувається при підвищеній у середньому на 20 °С температурі та у більш вузькому температурному інтервалі [9].

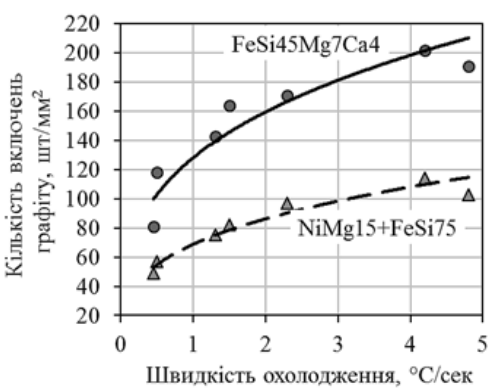


Рис. 1. Вплив модифікаторів на кількість включень кулястого графіту у високоміцному чавуні залежно від швидкості охолодження виливків

Таблиця 2
Вплив способу модифікування на усадку високоміцного чавуну

№ з/п	Лігатура	Об'ємна усадка чавуну, %		Загальна об'ємна усадка, %
		у рідкому стані та при кристалізуванні	у твердому стані	
1	NiMg15 + FeSi75	9,2	5,4	14,6
2	FeSi45Mg7Ca4	7,2	2,4	9,6

Встановлене зниження усадки високоміцного чавуну, модифікованого лігатурою FeSi45Mg7Ca4, дозволяє зменшити мікропоруватість виливків, підвищити їх механічні властивості, знизити в 1,3–1,5 рази масу живильних бобишок і, відповідно, підвищити вихід придатного лиття.

Важливим технологічним показником процесів виробництва високоміцного чавуну є тривалість сфероїдизувальної дії модифікатора, яка обмежує час витримки

розплаву в ковші після модифікування. Встановлено, що FeSiMgCa лігатури мають триваліший ефект сфероїдизування розплаву, порівняно з NiMg лігатурами. Це підтверджено у виробничих умовах. Так, у технологіях, заснованих на застосуванні NiMg лігатури, тривалість розливання у форми чавуну з ковша ємністю 1 т не повинна перевищувати 10 хв, після чого залишок чавуну зливається назад у плавильну (роздавальну) піч або заливаються чушки. Експериментально встановлено, що при використанні FeSiMgCa лігатури тривалість розливання модифікованого металу може бути продовжена до 15 хв при збереженні у структурі виливків показника ССГ понад 85 % і не призводить до суттєвої зміни рівня механічних властивостей виробів із високоміцного чавуну.

Структуру, тимчасовий опір під час розтягування σ_B , відносне видовження δ , ударну в'язкість КС, твердість НВ визначали на зразках, вирізаних, згідно з методикою, зі стандартних клиноподібних проб товщиною 25 мм. Дані щодо структури металевої основи й результати механічних випробувань наведені в табл. 3. У литому стані високоміцний чавун, що модифікований NiMg лігатурою і феросиліцієм, характеризується більш високими значеннями показників міцності σ_B й твердості НВ, що пояснюється більшою кількістю перліту в металевій основі, а модифікований FeSiMgCa лігатурою при ідентичному хімічному складі (у т.ч. і при масовій частці нікелю 1 %) вирізняється збільшеними показниками пластичності δ і в'язкості КС. Після термічного оброблення — нормалізування (нагрів в печі до 850+20 °С, витримка 2 год, охолодження на повітрі) - досліджуваних високоміцних чавунів у варіанті модифікування NiMg 15 лігатурою металева основа складалася з 92 % перліту та 8 % фериту, а у варіанті модифікування лігатурою FeSi45Mg7Ca4 — з 88 % перліту і 12 % фериту (рис. 2). Механічні властивості отриманих високоміцних чавунів, відповідно, становили: $\sigma_B = 714$ МПа; $\delta = 4,1$ %; КС = 18 Дж/см²; 269 НВ і $\sigma_B = 835$ МПа; $\delta = 6,6$ %; КС = 29 Дж/см²; 241 НВ.

Таблиця 3

Структура металевої основи та механічні властивості високоміцних чавунів, модифікованих різними лігатурами після нормалізування

Лігатура та її витрата (у % від маси рідкого металу)	Структура, %		Показники механічних властивостей			
	ферит	перліт	σ_B , МПа	δ , %	КС, Дж/см ²	НВ
1,5 % NiMg15 + 1 % FeSi75	50/8*	50/92	590/714	5/4,1	19/18	207/269
2,0 % FeSi45Mg7Ca4	60/12	40/88	543/835	15/6,6	49/29	187/241

*У чисельнику наведено дані для зразків у литому стані, у знаменнику — після нормалізування.

Таким чином, встановлено, що застосування розробленого процесу модифікувально-рафінувального оброблення розплаву чавуну феросиліцій-магній-кальцієвою лігатурою разом із легкоплавким оксидно-фторидним шлаком системи CaO–SiO₂–CaF₂ замість традиційного процесу модифікування нікель-магнієвою лігатурою та феро-силіцієм дозволяє підвищити показники механічних властивостей високоміцного чавуну: опір під час розтягування σ_B на 17 %, відносне видовження δ на 63 %, ударну в'язкість КС на 61 % при зменшенні твердості НВ на 10,4 %.

Другий етап досліджень проводився на базовому синтетичному чавуні, який одержували переплавом пакетованих відходів листової штампованої сталі з масовою часткою 0,08 % С, 0,2–0,3 % Si, 0,08–0,11 % Mn, 0,03 % S, 0,02 % P із додаванням графітової стружки для науглецювання та феросиліцію. Хімічний склад

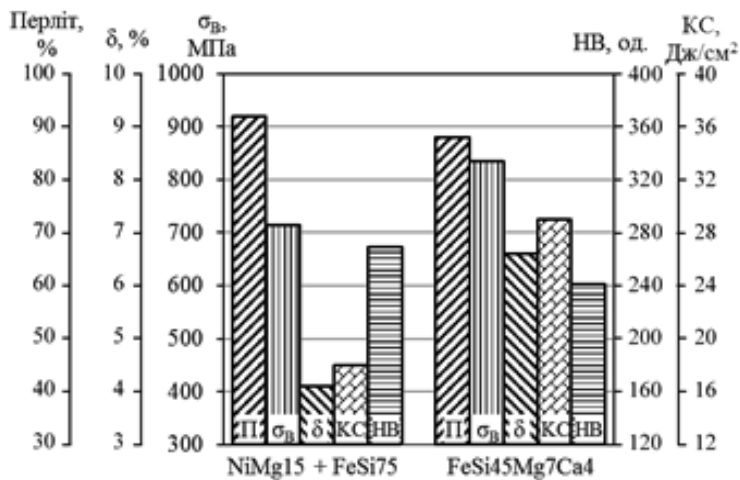


Рис. 2. Вплив варіанту модифікування вихідного розплаву на кількість перліту в структурі металевої основи та механічні властивості високоміцного чавуну після нормалізування

Таблиця 4
Хімічний склад, структура металевої основи та механічні властивості по-різному модифікованих високоміцних чавунів, виплавлених зі сталевих відходів

Спосіб модифікування	Масова частка елемента, %				Структура, %				Показники механічних властивостей			
	Si	Mn	Ni	Cu	Фе-рит	Пер-літ	σ_b , МПа	δ , %	KC, Дж/см ²	НВ		
1,5% NiMg15 + 1% FeSi75	2,19	0,08	1,10	0,42	45/8	55/92	650/790	5,8/3,8	32,8/21,3	217/269		
2,0% FeSi45Mg7Ca4	2,34	0,11	0,05	1,12	55/8	45/92	695/883	9/7,2	55,4/65,5	207/255		

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

виплавленого синтетичного чавуну (в мас. %: 0,58 Si; 0,1 Mn; 0,02 P; 0,026 S) відрізнявся від використаного на першому етапі переробного чавуну ПЛ2, головним чином, меншими в 4 рази масовими частками фосфору й марганцю. Вміст інших хімічних елементів, включаючи сірку, відрізнявся мало. Дані щодо хімічного складу, структури та механічних властивостей високоміцних чавунів, виплавлених зі сталевих відходів за двома варіантами процесів модифікування, наведені у табл. 4. Для одержання перлітної металевої основи (більше 92 % перліту) та підвищення міцності застосовували легування міддю кількістю 1,2 % при модифікуванні FeSiMgCa лігатурою і 0,45 % — при модифікуванні NiMg - лігатурою. У високоміцному чавуні мідь значно (в рази) перевершує нікель по перлітизувальній здатності і майже в 4 рази дешевша.

Після нормалізування при однаковій структурі металевої основи (92 % перліту і 8 % фериту) механічні властивості одержаних високоміцних чавунів були такі: для варіанту модифікування FeSi45Mg7Ca4 — σ_b = 883 МПа; δ = 7,2 %; KC = 65,5 Дж/см²; 255 НВ, у варіанті модифікування лігатурою NiMg15 + FeSi75 — σ_b = 790 МПа; δ = 3,8 %; KC = 21,3 Дж/см²; 269 НВ (рис. 3).

Таким чином, в умовах застосування синтетичного чавуну (із відходів сталі)

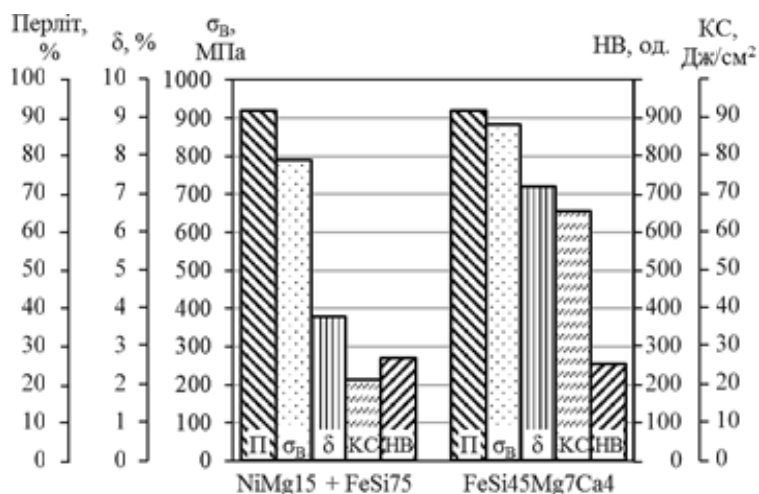


Рис. 3. Вплив варіанту модифікування вихідного розплаву зі сталевих відходів на кількість перліту в структурі металевої основи та механічні властивості високоміцного чавуну після нормалізування

з низьким вмістом фосфору 0,02% і марганцю 0,1% встановлено, що модифікувально-рафінувальна обробка розплаву феросиліцій-магній-кальцієвою лігатурою і легкоплавким оксидно-фторидним шлаком, порівняно з традиційним процесом модифікування нікель-магнієвою лігатурою та феросиліцієм, дозволяє підвищити показники механічних властивостей перлітного високоміцного чавуну: опір під час розтягування σ_b на 12 %, відносне видовження δ на 90 %, ударну в'язкість КС у 2,1 рази. У результаті застосування для легування замість нікелю дешевшої міді досягається значний економічний ефект. Вирішення проблеми одержання литих виробів без структурно-вільного цементиту (відбілу) дозволяє значно знизити витрати на термічне оброблення — виключити з технологічного процесу енергоємну операцію високотемпературного графітизувального відпалу для його розкладання. Заміна в шихті переробного чавуну на дешевші сталеві відходи з низькою масовою часткою фосфору та марганцю додатково забезпечує приріст показників механічних властивостей σ_b на 5,6 %, δ на 9,1 %, КС у 1,2 рази.

Висновки

Перспективним напрямком розвитку прогресивних технологій отримання високоміцних чавунів перлітного класу з підвищеними технологічними й механічними властивостями є застосування розробленого процесу модифікувально-рафінувального оброблення вихідного розплаву феросиліцій-магній-кальцієвою лігатурою разом із легкоплавким оксидно-фторидним рафінувальним шлаком системи $\text{CaO-SiO}_2\text{-CaF}_2$ взамін традиційного процесу модифікування нікель-магнієвою лігатурою та феросиліцієм. У результаті введення в розплав чавуну кальцію встановлено:

- значне зниження схильності високоміцного чавуну до відбілу й збільшення щільності розподілу сфероїдів графіту в 1,5–2,0 рази, що дозволяє ліквідувати операцію високотемпературного графітизувального відпалу;
- зменшення величини об'ємної усадки, зниження маси живильних бобишок у 1,3–1,5 рази, що загалом підвищують вихід придатного лиття;
- підвищення механічних властивостей: у високоміцному чавуні, виплавленому з переробного чушкового доменного чавуну, тимчасовий опір під час розтягування σ_b зростає на 17 %, відносне видовження δ на 63 %, ударна в'язкість КС на 61 % при зменшенні твердості НВ на 10,4 %, а у виплавленому з сталевих відходів, що мають масову частку фосфору менше 0,02 % і марганцю менше 0,1 %, σ_b на 12 %, δ на 90 %, КС у 2,1 рази.

Список літератури

- 1 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, is. 1, pp. 136-147. <https://doi.org/10.1007/s40962-016-0095-6>.
- 2 Masaggia S. The development of ADI and IDI in Italy. *Procedia Engineering*. April 2010, Vol. 2, is. 1, pp. 1459-1476. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2010.03.158>.
- 3 Meehanite Specification Handbook 2013 [Електронний ресурс] / Режим доступу: <https://meehanitemetal.com/technical-lit>.
- 4 Menk W. A new high strength high ductile nodular iron. *Materials Science Forum*. 2018. Vol. 925. pp. 224-230. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.925.224>.
- 5 Menk W. Ein neues hochfestes, hoch duktiles Gusseisen mit Kugelgraphit. *GIESSEREI*. 2018. Vol. 105, no. 8, pp. 36-40.
- 6 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, pp. 7-15. <https://doi.org/10.1007/BF03355577>.
- 7 Pietrowski S. Control of cast iron and casts manufacturing by in mold method. *Archives of foundry engineering*. 2009. Vol. 9, Is. 3. pp. 133-142.
- 8 Бубликов В. Б., Нарівський А. В., Бачинський Ю. Д. Технологія одержання тонкостінних виливків з високоміцного чавуну в облицьованих кокілях з використанням внутрішньоформового модифікування розплаву. *Метал та лиття України*. 2021. №1. с. 46-53
- 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., 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.
- 12 Бубликов В. Б., Ясинский А. А., Сиропоршнев Л. Н., Бачинский Ю. Д., Козак Д. С. Медь в высокопрочном чугуна. *Процессы литья*. 2010. №3. с. 46-57.
- 13 Hartung K., Michels L., Logan R. The evolution of inoculants. *Modern Casting*. October 2021. pp. 24-29.
- 14 Fay A., Pinel P. Inoculation solutions against metallurgical problems. *International Journal of Metalcasting*. 2020. Vol. 14. pp. 1123-1135. doi: 10.1007/s40962-020-00431-4.
- 15 Бубликов В.Б., Ясинский А.А., Сиропоршнев Л. Н., Козак Д. С., Бачинский Ю. Д. Влияние содержания кремния и скорости охлаждения на образование отбела в отливках из модифицированного в ковше высокопрочного чугуна. *Процессы литья*. 2009. №4. с. 17-24.
- 16 Клочнев Н.И. Литейные свойства чугуна. Москва: Машиностроение, 1968.

Надійшла 17.11.2023

References

- 1 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*. Vol. 11, is. 1, pp. 136-147. <https://doi.org/10.1007/s40962-016-0095-6>.
- 2 Masaggia S. (2010). The development of ADI and IDI in Italy. *Procedia Engineering*. Vol. 2, is. 1, pp. 1459-1476. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2010.03.158>.

- 3 Meehanite Specification Handbook 2013. URL: <https://meehanitemetal.com/technical-lit>.
- 4 Menk W. (2018). A new high strength high ductile nodular iron. *Materials Science Forum*. Vol. 925, pp. 224-230. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.925.224>.
- 5 Menk W. (2018). Ein neues hochfestes, hoch duktiles Gusseisen mit Kugelgraphit. *GIESSEREI*. Vol. 105, no. 8, pp. 36–40 [in German].
- 6 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*. Vol. 8, is. 2, pp. 7-15. <https://doi.org/10.1007/BF03355577>.
- 7 Pietrowski S. (2009). Control of cast iron and casts manufacturing by in mold method. *Archives of foundry engineering*. Vol. 9, is. 3. pp. 133–142.
- 8 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*, no. 1, pp. 46–53 [in Ukrainian].
- 9 Bublikov V. B. (2007). Calcium in high-strength cast iron. *Processy lit'a (Casting processes)*, no. 5, pp. 4–10 [in Russian].
- 10 Bublikov V. B. (1998). Features of main types modifiers interaction with molten cast iron during in-mold modifying. *Processy lit'a (Casting processes)*, no. 1, pp. 30–36 [in Russian].
- 11 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. *Processy lit'a (Casting processes)*, no. 2, pp. 24–34 [in Russian].
- 12 Bublikov V.B., Yasinsky A.A., Syroporshnev L.N., Bachynskyi Yu.D., Kozak D.S. (2010). Copper in high-strength cast iron. *Processy lit'a (Casting processes)*, no. 3, pp. 46–57 [in Russian].
- 13 Fay A., Pinel P. (2020). Inoculation solutions against metallurgical problems. *International Journal of Metalcasting*. Vol. 14, pp. 1123-1135. doi: 10.1007/s40962-020-00431-4.
- 14 Fay A., Pinel P. (2020). Inoculation solutions against metallurgical problems. *International Journal of Metalcasting*. Vol. 14, pp. 1123-1135. doi: 10.1007/s40962-020-00431-4.
- 15 Bublikov V.B., Yasinskiy A.A., Syroporsnev L.N., Kozak D.S., Bachinskiy Yu.D. (2009). Influence of silicon content and cooling rate on chill formation in ladle-modified high-strength cast iron castings. *Processy lit'a (Casting processes)*, no. 4, pp. 17–24 [in Russian].
- 16 Klochnev N.I. (1968). Foundry properties of cast iron. Moskva: Mashinostroenie. 132 p. [in Russian].

Received 17.11.2023

V.B. Bublikov, Dr. Sci. (Engin.), Senior Research Scientist, Department Chair;
e-mail: otdel.vch@gmail.com; ORCID 0000-0003-4465-9256

Yu.D. Bachynskyi, PhD (Engin.), Senior Researcher; e-mail: 909_bach@ukr.net;
ORCID 0000-0002-5745-1369

O.P. Nesteruk, PhD (Engin.), Senior Researcher; e-mail: pavlena81@gmail.com;
ORCID 0000-0001-6342-3551

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

OBTAINING OF PEARLITE GRADE DUCTILE CAST IRON WITH IMPROVED TECHNOLOGICAL AND MECHANICAL PROPERTIES

Ductile cast irons with pearlitic metal base are widely used in the production of a large range of high-load machine parts. World leaders in the field of ductile cast iron successfully manufacture

parts from new grades of pearlitic ductile cast iron, which, compared to Ukrainian grades, have a 700-850 MPa tensile strength and a 2.5-5 times higher relative elongation. Traditional manufacturing technologies of such cast irons requires an expensive alloying elements use (like nickel and/or copper) in the charge and carrying out of energy-intensive heat treatment. The article provides comparative data on the influence of base melt (from different quality charge materials) ladle modifying with two types of magnesium-containing master alloys, namely nickel-magnesium NiMg15 and silicon or silicon-magnesium-calcium FeSi45Mg7Ca4, on the structure formation and mechanical properties of ductile cast irons in as-cast state and after normalizing heat treatment. The obtained results indicate that the use of the developed process of initial melt modifying-refining processing with ferrosilicon-magnesium-calcium master alloy FeSi45Mg7Ca4 together with the fusible oxide-fluoridic slag of the $\text{CaO-SiO}_2\text{-CaF}_2$ system instead of traditional modifying process with nickel-magnesium master alloy NiMg15 and ferrosilicon FeSi75 is promising and an effective method of pearlitic ductile cast irons with increased technological and mechanical properties obtaining at low energy consumption for castings heat treatment. The developed technology allows to obtain pearlitic ductile cast iron with the following mechanical properties: tensile strength $R_m = 830\text{-}890$ МПа; elongation $A = 6,5\text{-}7,5$ %; impact toughness $KS = 30\text{-}65$ J/cm² at Brinell hardness of 241-255 HB. The research results create preconditions for the development of new parts designs for modern technic with given high mechanical properties and performance characteristics which blanks are obtained with casting method and of high-efficiency economic technologies for their production.

Keywords: ductile cast iron, pearlite, master alloy, modifying-refining processing, mechanical properties, normalizing heat treatment.