

УДК 672.1; 669.13

Г.А. Баглюк, В.Я. Куровський*Інститут проблем матеріалознавства НАН України***ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ОБРОБКИ РОЗПЛАВІВ ЧАВУНІВ РІЗНИХ
ФУНКЦІОНАЛЬНИХ ГРУП ПОРОШКОВИМИ БРИКЕТОВАНИМИ
МОДИФІКАТОРАМИ**

Представлено результати досліджень особливостей структури і властивостей високоміцних, азотистих і валкових чавунів, отриманих з використанням модифікування порошковими брикетованими модифікаторами. Показана ефективність використання брикетованих модифікаторів при обробці розплавів чавуну як за схемою ковшового, так і внутрішньоформового модифікування. Відзначено переваги використання порошкових брикетованих модифікаторів у порівнянні з традиційними кусковими плавленими лігатурами.

Ключові слова: високоміцний чавун, лиття. модифікатор, брикетування, порошок.

Г.А. Баглюк, В.Я. Куровський**ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ОБРАБОТКИ РАСПЛАВОВ ЧУГУНОВ РАЗНЫХ
ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ГРУПП ПОРОШКОВЫМИ БРИКЕТОВАННЫМИ
МОДИФИКАТОРАМИ**

Представлены результаты исследований особенностей структуры и свойств высокопрочных, азотистых и валковых чугунов, полученных с использованием модифицирования порошковыми брикетированными модификаторами. Показана эффективность использования брикетированных модификаторов при обработке расплавов чугуна как по схеме ковшевого, так и внутриформенного модифицирования. Отмечены преимущества использования порошковы брикетированных модификаторов по сравнению с традиционными кусковыми плавленными лигатурами.

Ключевые слова: высокопрочный чугун, литье. модификатор, брикетирование, порошок.

G.A. Bagliuk, V.Ya. Kurovskyi**THE ESTIMATION FOR EFFICIENCY OF MELTS PROCESSING BY POWDER
BRIQUETTED INOCULANTS FOR CAST IRONS OF DIFFERENT FUNCTIONAL GROUPS**

The results of investigations of the features of the structure and properties of high-strength, nitrogenous and roll cast irons obtained with the use of modification with powdered briquetted modifiers are presented. The effectiveness of the use of briquetted modifiers is shown for the treatment of cast iron melts both in the ladle and Inmold modification schemes. Advantages of using powder briquetted modifiers are compared with traditional lump melted master alloys.

Key words: high-strength cast iron, casting, modifier, briquetting, powder.

Вступ. Одним з основних факторів, що впливають на стан литої структури і рівня фізико-механічних властивостей чавуну, є режими модифікування розплаву при виготовленні з нього виливків [1-6].

Найпоширенішою залишається технологія модифікування чавуну кусковими плавленими лігатурами в ковшах, яка, будучи досить простою технологічно, має, однак, ряд істотних недоліків, пов'язаних зі значним димовиділенням, відносно низьким і нестабільним засвоєнням магнію. Істотним недоліком застосування модифікаторів з магнієм у вигляді кускових литих лігатур, є, також, значна втрата дорогого магнію на випаровування (ступінь засвоєння його при виплавці лігатури становить 60 – 90 %), нестабільний склад лігатури та високі (до 20 %) відходи при подрібненні кускової лігатури до необхідних фракцій.

Відзначені недоліки значною мірою усуваються або мінімізуються при модифікуванні розплаву в ковші або ливарній формі з використанням порошкових брикетованих модифікаторів, які одержуються з використанням методів порошкової металургії [6-10]. Технологія одержання брикетованих модифікаторів включає операцію пресування брикетів необхідної маси, форми та хімічного складу з відповідних компонентів порошкової шихти, внаслідок чого практично виключаються втрати дрібнодисперсної фракції, як у випадку подрібнення литих лігатур, а завдяки стабільному вмісту магнію в брикетах їх відносна витрата для одержання високоміцного чавуну на 15÷25 % менше, ніж при використанні литої кускової лігатури з аналогічним вмістом магнію.

Шляхом зміни вмісту окремих компонентів шихти, а також тиску пресування, вдається регулювати в широких межах хімічний склад та густину брикетів, що визначає також різні значення як контактної міжчасткової міцності і температури плавлення, так і теплопровідності, що неминуче позначається на інтенсивності їх розчинення в рідкому металі.

Метою даної роботи було оцінити вплив модифікування розплавів порошковими брикетованими модифікаторами на структуру та основні механічні властивості чавунів різних функціональних груп.

Високоміцні чавуни. Високоміцний чавун з кулястим графітом (ВЧКГ), що характеризується сполученням високих технологічних, фізико-механічних і експлуатаційних характеристик, широко застосовується взамін сталевого лиття та поковок, ковкого і сірого чавуну, забезпечуючи надійність і довговічність виробів у різних режимах експлуатації. Відмінні риси ВЧКГ у порівнянні зі сталлю - більше високе відношення границі текучості до межі міцності при розтязі, що досягає $0,70 \div 0,80$ (проти $0,50 \div 0,55$ для сталі), досить високий модуль пружності, (до $180 \div 190 \cdot 10^3$ МПа, низька чутливість до концентраторів напруг, підвищена (в $1,5 \div 3,5$ рази) циклічна в'язкість і інші, у ряді випадків дозволяють вважати цей конструкційний матеріал навіть більше ефективним, ніж сталь. Крім того, суттєво висока рідкотекучість цього матеріалу у порівнянні зі сталлю відкриває можливості для розширення номенклатури виробів з нього, зниження перетину і маси виливків.

Основним компонентом, під дією якого в розплаві чавуну графіт набуває кулеподібної форми, а при охолодженні розплаву утворюється структура високоміцного чавуну, є магній, який є сильним сфероїдизатором графіту [1, 2]. При виготовленні брикетованих модифікаторів магній вводився в шихту як у вигляді порошку магнію марки МПФ-1 (ГОСТ 6001-79), так і у складі високодисперсної лігатури марки ФСМг7 (пилоподібні відходи, отримані після подрібнення кускової плавленої лігатури), склад якої наведений у табл.1.

Таблиця 1

Хімічний склад лігатури ФСМг-7 (мас. %)

Mg	Ca	Al	Fe	PЗМ	Si
7,6	0,34	0,84	39,1	0,64	51,5

Застосування методів порошкової металургії для одержання модифікуючи брикетів дозволяє в широких межах варіювати не тільки складом модифікатора, але і пористістю брикетів: за рівних умов як хімічний склад модифікатора, так і величина пористості брикету визначає інтенсивність його розчинення в розплаві [9, 10].

Збільшення вмісту легкоплавкої лігатури призводить до підвищення інтенсивності розчинення брикету, тоді як додаткове введення магнію дещо його сповільнює. Підвищення пористості брикету призводить до істотного зменшення теплофізичних характеристик матеріалу, що сповільнює його нагрів і розчинення, а також інтегральної характеристики міжчасткової контактної міцності матеріалу модифікатора, що призводить до прискорення процесу деструкції брикету в розплаві. Інтенсивність розчинення обумовлюється домінуючим впливом одного з цих факторів.

Вищенаведене обумовило необхідність проведення досліджень впливу тиску пресування, що варіювали в межах $200 \div 600$ МПа, на густину порошкових брикетів при різних співвідношеннях компонентів шихти - порошоків заліза і лігатури.

Аналіз отриманих результатів (рис. 1) дозволяє зробити висновок, що для всіх складів модифікаторів пористість брикетів істотно залежить від концентрації заліза в складі брикетованої суміші і закономірно зменшується зі збільшенням тиску пресування. Звертає на себе увагу, що шихта, яка складається тільки з лігатури (№ 6), як більш тверда і крихка, ущільнюється до істотно меншої щільності у порівнянні із шихтою, отриманою із сумішей з порошком заліза при всіх тисках пресування, причому зі збільшенням тиску ця розбіжність збільшується.

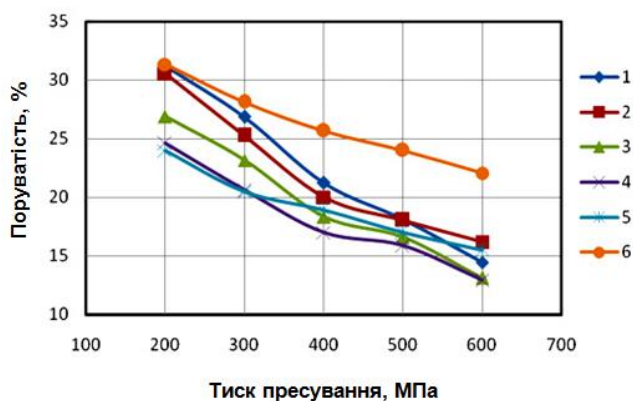


Рис.1. Залежність поруватості брикетів від тиску пресування для модифікаторів із суміші порошоків заліза і лігатури ФСМг-7. Вміст лігатури в шихті: 1 – 0; 2 – 20; 3 – 40; 4 – 60; 5 – 80; 6 – 100 % (мас.)

Для оцінки ефективності використання порошкових брикетованих модифікаторів вихідний розплав чавуну наступного складу: (%), мас.): S - 0,03; Mn - 0,45; Si - 2,1; C - 3,75 обробляли шляхом ковшового модифікування у відкритому ковші як стандартною кусковою лігатурою ФСМГ-7, так і брикетованими модифікаторами, спресованими із порошкової шихти, що складалася із Mg - 10 %; феросиліцій ФС75 - 35 %; CaF₂ - 5 %; Fe - 50 %. Температура розплаву складала 1450±10 °С.

Брикети поміщали в спеціальні тримачі і примусово занурювали на дно ковша з розплавом чавуну. З обробленого в такий спосіб чавуну заливали стрижневі проби діаметром 60 і 150 мм.

Ефективність використання брикетованих порошкових модифікаторів підтверджується порівняльним аналізом мікроструктур чавуну, отриманого без використання модифікатора (рис. 2,а); чавуну, обробленого модифікатором у вигляді кускової плавленої лігатури ФСМГ - 7 (рис. 2,б) та з використанням брикетованих модифікаторів складу 50 % Fe, 35 % ФСМГ-7, 10 % Mg, 5 % CaF₂ (рис. 2,в). Представлені результати показують, що у виливках з чавуну, отриманого з розплаву, не обробленого модифікатором, вільний вуглець знаходиться у вигляді пластинчастого графіту (рис. 2,а). Металева основа чавуну практично повністю перлітна.

В результаті модифікування чавуну графіт набуває кулеподібної форми з розміром часток 20÷60 мкм (рис. 2,б,в). В той же час, використання брикетованих модифікаторів забезпечує утворення більш дисперсних включень графіту й більшу кількість фериту, ніж у випадку застосування плавлених лігатур: розміри включень вуглецю у чавуні, модифікованому порошковим модифікатором (рис. 2,в) в 1,5–2 рази менші у порівнянні з включеннями вуглецю в чавуні, модифікованому плавленою лігатурою (рис. 1,б). Такі результати пояснюються наявністю в складі брикету високодисперсних компонентів, які при розчиненні модифікатора в розплаві відіграють роль центрів графітизації. Металева основа в цьому випадку складається головним чином із перліту та фериту.

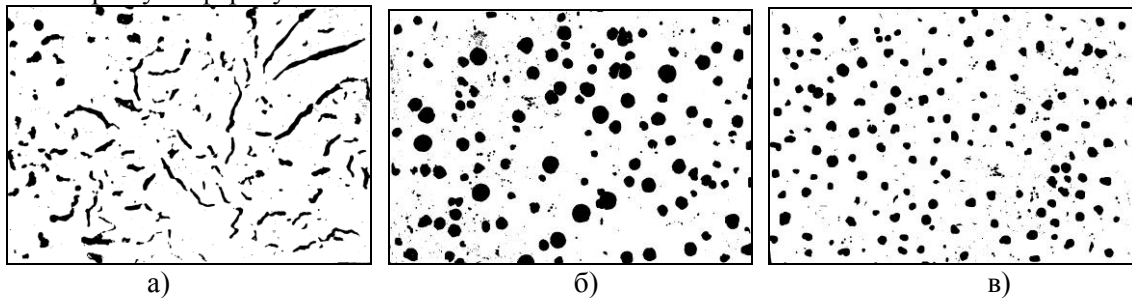


Рис.2. Форма часток графіту вихідного чавуну без обробки модифікаторами (а); після обробки розплаву модифікатором – плавленою лігатурою (б); після обробки брикетованим модифікатором (в) (×100, не травлено)

Результати порівняльного аналізу даних механічних властивостей і основних структурних параметрів модифікованого чавуну (ступінь сфероїзації графіту - ССГ, вміст перлітної і феритної складової) чавунів, отриманих із розплавів, які були оброблені за двома схемами: брикетованим модифікатором складу і кусковою лігатурою ФСМГ-7, показали (табл. 2), що використання брикетованих порошкових модифікаторів дозволяє помітно збільшити ступінь сфероїзації графіту і вміст перлітної складової при приблизно однакових вмістах фериту, що призвело до підвищення характеристик міцності сплаву і деякого збільшення пластичності у порівнянні з аналогічним матеріалом, обробленим литою кусковою лігатурою.

Таблиця 2

Характеристики структури і властивості чавуну в залежності від виду використаного модифікатора

Параметр	Діаметр виливка, мм			
	60		150	
	Брикетована лігатура	Кускова лігатура	Брикетована лігатура	Кускова лігатура
ССГ, %	95	92	90	80
Перліт %	60	40	25	20
Ферит, %	40	40	75	80
σ_b , МПа	548	532	498	435
δ , %	6,5	6,1	5,3	4,8

Як відзначалося вище, найбільш розповсюдженою в практиці ливарного виробництва залишається технологія модифікування чавуну лігатурами в ковшах, яка, будучи досить простою, має, однак, ряд істотних недоліків. В той же час, аналіз тенденцій розвитку способів сфероїдизуючого модифікування чавуну свідчить про те, що одним з найбільш ефективних і перспективних є процес обробки розплаву безпосередньо в ливарній формі - INMOLD-процес [11, 12].

Суть INMOLD-процесу полягає в тому, що в складі елементів литникової системи передбачається спеціальна проточна реакційна камера, у порожнині якої міститься визначена кількість модифікатора. В процесі заливання форми чавун, проходячи через реакційну камеру, розчиняє модифікатор і піддається модифікуючій обробці. В таких умовах, з одного боку, виключається чи істотно зменшується окислювання елементів модифікатора, а з іншого боку - максимально скорочується час між модифікуванням і кристалізацією розплаву, що підвищує ефективність графітізуючого модифікування.

При оптимальному сполученні температури і швидкості заливання форми металом заряд реакційної камери рівномірно і повністю розчиняється в струмені чавуну, що приводить до кардинальної зміни мікроструктури, механічних і функціональних властивостей базового сплаву.

Особливістю запропонованою авторами даної роботи схеми модифікування чавуну магнійвміщуючими брикетами (рис. 3) є те, що брикетований модифікатор 2, виконаний, зокрема, у вигляді втулки, встановлюється в канал 4 литникової системи. В результаті того, що перетин ливникового каналу на виході з реакційної камери (перетин живильника) менше, ніж на вході, рідкий метал при проходженні крізь отвір модифікуючого брикету (втулки) пригальмує свій рух і вже в початковий момент заливання перші порції чавуну піддаються сфероїдизуючій обробці.

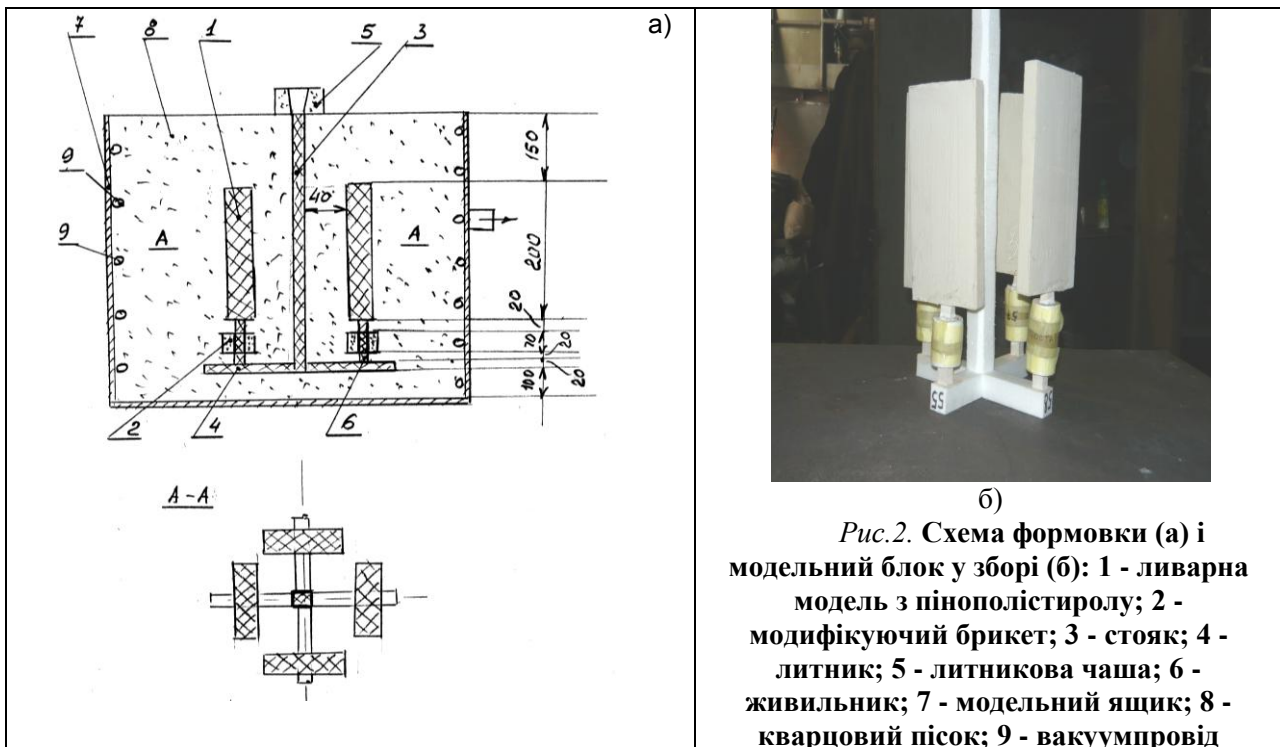


Рис.2. Схема формовки (а) і модельний блок у зборі (б): 1 - ливарна модель з пінополістиролу; 2 - модифікуючий брикет; 3 - стояк; 4 - литник; 5 - литникова чаша; 6 - живильник; 7 - модельний ящик; 8 - кварцовий пісок; 9 - вакуумпровід

Передача тепла до часток брикету здійснюється потоком рідкого металу, що проходить через отвір брикету. При цьому, модифікування розплаву відбувається безперервно, поки метал протікає через литникову систему перед попаданням у порожнину, сформовану у формі моделлю 1. У цьому випадку модифікатор витрачається тільки на частину форми, зайняту вилівками, прибутками і живильниками, а частина форми, що складається зі стояка і литникової чаші, залишається немодифікованою. Це визначає можливість значного зниження витрат використовуваного модифікатора.

Варіюючи величиною площі контакту модифікатора з розплавленим металом і теплофізичними характеристиками брикетованого модифікатора, що залежать від компонентного складу модифікатора і його пористості, можна регулювати ступінь насичення металу елементами, що модифікують, і відповідно забезпечувати необхідну структуру металу у виливку.

З метою оцінки здатності порошкових модифікуючих брикетів при внутрішньоформовому модифікуванні були проведені дослідні плавки чавуну, що містить 3,75 % С; 2,1 % Si, 0,03 % S, 0,45 % Mn, з використанням брикетованих модифікаторів у виді втулок 2 (рис. 2), спресованих із суміші порошоків наступного складу: феросиліцій ФС75 - 40 %; Fe - 50 %; Mg - 10 % (мас.). Пористість брикетів складала 15 і 25 %. Температура розплаву 1450 ± 10 °С. Як еталонний матеріал служив чавун, оброблений у ковші кусковою лігатурою типу КМГ (ДСТУ 3362-96) на основі кремнію і заліза.

Як показали результати оцінки структури литих чавунів, зі збільшенням витрати модифікатора з 0,5 до 2,0 % відносно маси розплаву ступінь сфероїдизації графіту (ССГ) помітно зростає для усіх видів модифікаторів. При цьому, використання брикетованих модифікаторів (№ 1 і 2, рис. 3) і внутрішньоформове модифікування призводить до підвищення значення ССГ у порівнянні з ковшовим модифікуванням литим кусковою модифікатором (№ 3) при всіх значеннях витрати модифікатора. У той же час, збільшення пористості брикету з 15 (№ 1) до 25 % (№ 2) також сприяє підвищенню ступеня сфероїдизації графіту.

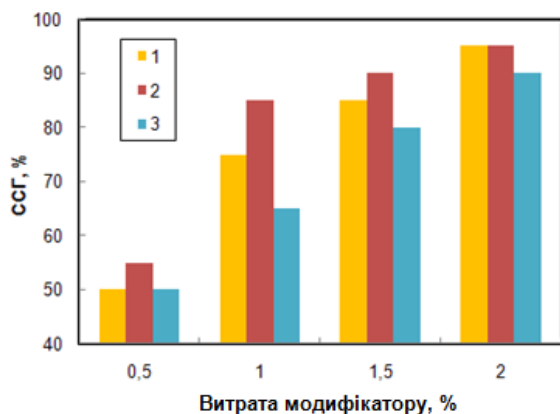


Рис. 3. Вплив виду модифікатора (1, 2 - брикетовані порошкові, 3 - литий кусковий) і пористості брикетів (1 - 15 %; 2 - 25 %) на ступінь сфероїдизації графіту (ССГ) у чавуні

Порівняльне вивчення структури модифікованих чавунів (рис. 4) показало, що порошкові брикети забезпечують утворення більш дисперсних включень графіту і більшу кількість фериту, ніж у випадку застосування сплавів - лігатур тієї ж (кремній і залізо) основи. Відзначений ефект пояснюється наявністю в складі порошкового брикету дисперсних компонентів (феросиліцій, залізо), які при розплавленні цього модифікатора відіграють роль центрів графітизації.

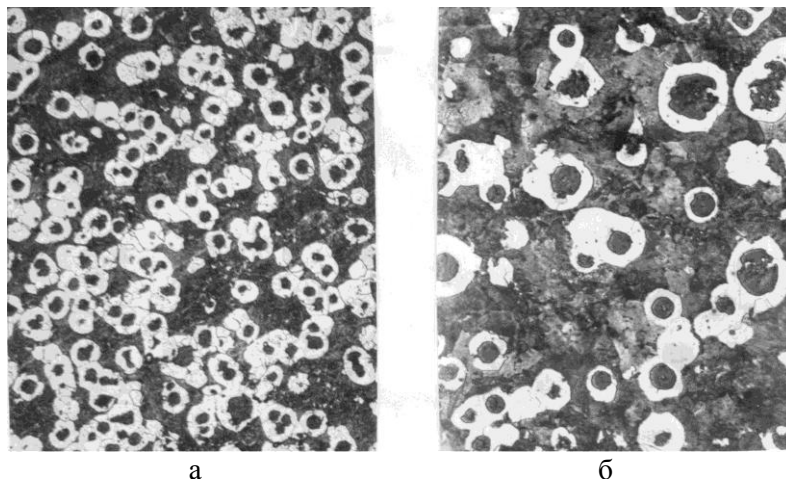


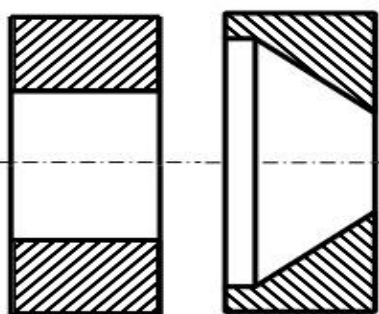
Рис. 4. Мікроструктура високоміцного чавуну, отриманого з розплаву, обробленого брикетованим модифікатором (а) і кусковою плавленою лігатурою (б)

При модифікуванні в ливарній формі важливою задачею є забезпечення рівномірного розчинення і, по можливості, повного або максимального засвоєння модифікуючих елементів вихідним чавуном. При цьому, варто враховувати, що швидкість розчинення брикету значною мірою визначається значенням пористості та геометрією брикету, значення яких повинно забезпечити його повне розчинення в процесі заливання ливарної форми.

З метою оцінки впливу форми брикету і маси вставки-модифікатора, на розподіл вмісту магнію по перетину виливка в якості модифікуючих вставок використовували брикети, що склалися з: Mg – 15%, Фс75 – 45%, CaF₂ – 2% та Fe – 38%, як у вигляді гладкої втулки (рис. 5,а), так і втулки з внутрішнім конусом (рис. 5,б) (діафрагми), що забезпечує перемінне значення площі брикету, що контактує з пококом розплаву, в процесі заповнення форми розплавом.

Модельний блок (рис. 2,б) складався з 4-х частин, до кожної з яких була встановлена модифікуюча вставка однакового складу, але різної маси: 25 г; 50 г; 75 г і 100 г.

У отриманих таким чином виливках спектральним методом визначали розподіл магнію у виливку в залежності від відстані від живильника та основні механічні характеристики ливарного сплаву.



а) б)

Рис. 5. Переріз форм модифікуючих брикетів, спресованих з порошку:

а – циліндрична втулка; б – із внутрішнім конусом (діафрагма)

Як показали результати дослідження (рис. 6), застосування такої форми модифікування забезпечує відносно рівномірний розподіл магнію по перерізу відливка. Зі збільшенням маси модифікуючих брикетів відбувається очікуване підвищення загального вмісту магнію у виливку. При цьому, для всіх значень мас вставок, вміст магнію при використанні вставки у виді діафрагми дещо вище, у порівнянні із втулкою. Це обумовлено деяким збільшенням місцевого гідравлічного опору розплаву металу в стояку на початковому етапі заливання внаслідок меншого діаметра отвору внутрішнього конуса брикету, що приводить до деякого збільшення часу заливання, що сприяє підвищенню ступеня засвоєння магнію. Крім того, внаслідок меншого значення товщини найтоншого перерізу брикету для конусної вставки у порівнянні із циліндричною на початковому етапі заливки відбувається більш швидкий прогрів, плавлення матеріалу брикету та модифікування розплаву на більш ранній стадії заповнення форми.

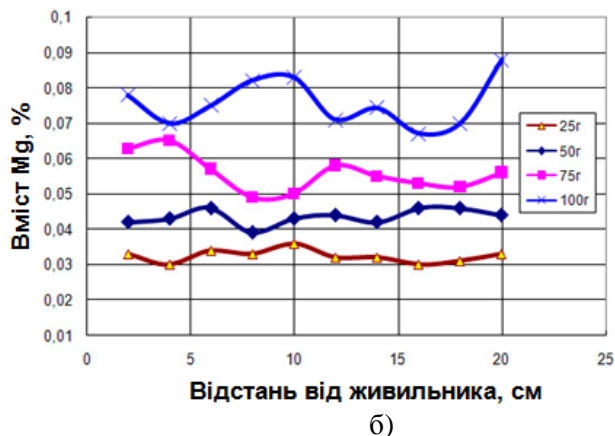
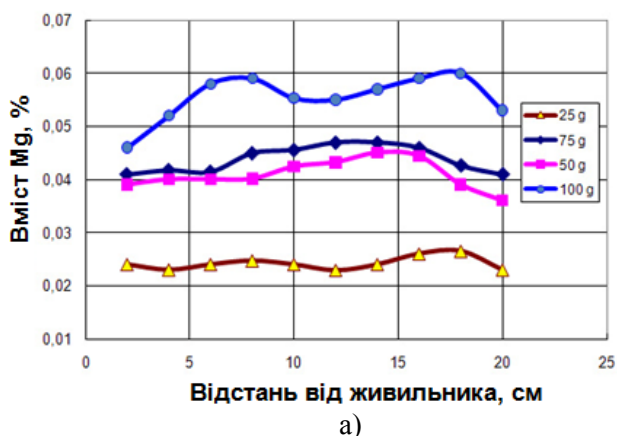


Рис. 6. Розподіл вмісту магнію у виливках на різній відстані від живильника із застосуванням модифікатора у вигляді втулки (а) та діафрагми (б)

Відзначені структурні закономірності проявляються і відносно основних механічних характеристик матеріалу відливок. Як видно з наведених на рис. 7 даних, як міцність та твердість, так і пластичність чавунів зростають із збільшенням маси модифікуючого брикету, застосованого для модифікування розплаву у ливарній формі. При цьому, аналогічно даним рис. 6, дещо більші значення всіх досліджених характеристик відносяться до чавунів, отриманих з використанням модифікуючого брикету, виконаного у формі діафрагми.

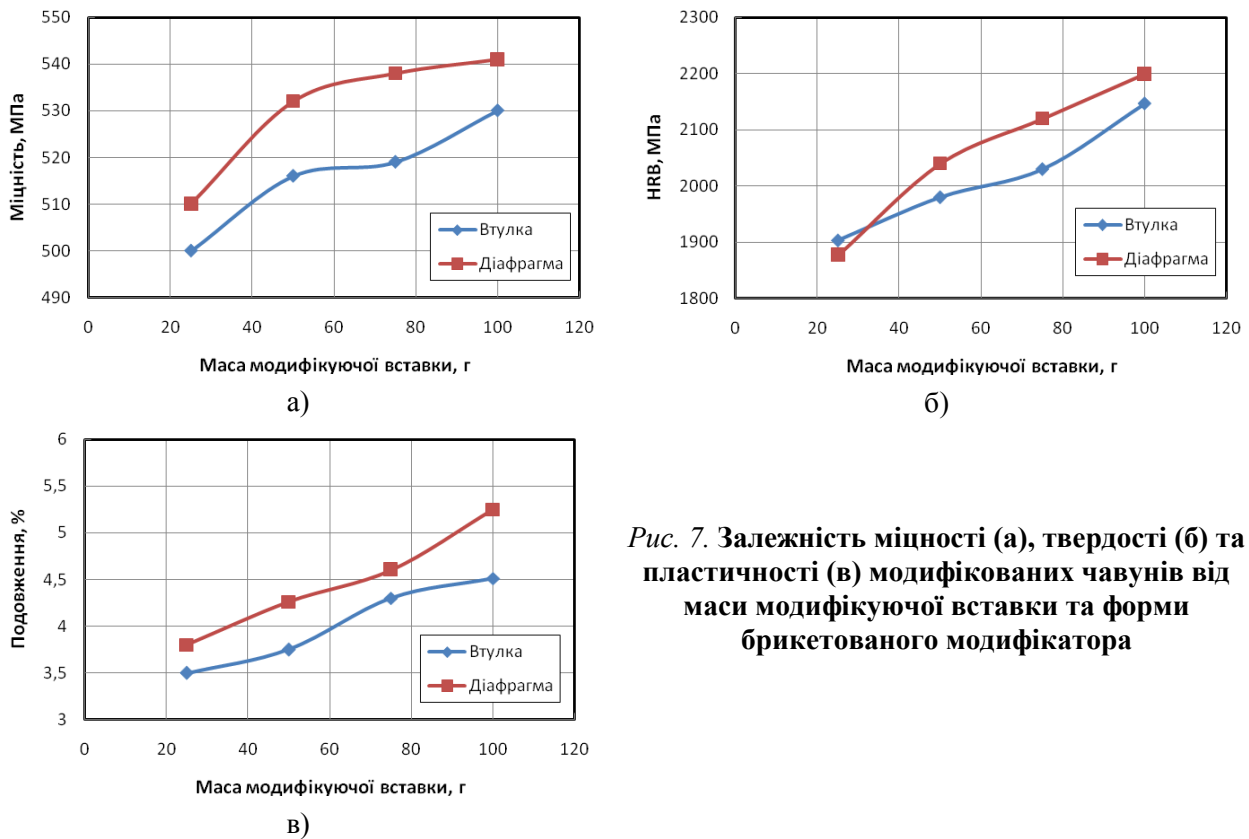


Рис. 7. Залежність міцності (а), твердості (б) та пластичності (в) модифікованих чавунів від маси модифікуючої вставки та форми брикетованого модифікатора

Азотовані сірі чавуни. Азот є одним з хімічних елементів, який навіть при вмісті в сплаві в сотих і тисячних частках відсотка, має істотний вплив на властивості металу. У більшості випадків цей вплив є негативним, проте часто азот використовується в якості корисного (легуючого) елемента. Як показали результати досліджень впливу азоту на властивості сірого чавуну, наведені в [13-15], азот у розчиненому стані уповільнює розпад карбідів і модифікує форму графітних включень, в результаті чого тимчасовий опір розриву і твердість сплаву значно зростає.

Азот є також ефективним аустенітостабілізуючим елементом, що дозволяє використовувати його як замітник таких дорогих легуючих елементів, як нікель і мідь.

Для введення великих концентрацій азоту в метал найбільш широке застосування отримали методи введення азоту з використанням азотованих лігатур (азотований феромарганець або ферохром, нітрид магнію і лігатури на основі марганцю і його сплавів), які вводяться в плавильний агрегат перед випуском або в ківш у процесі випуску рідкого металу.

Останнім часом намітилася тенденція застосування азотовмісних модифікаторів, виконаних у вигляді брикетів, отриманих шляхом пресування сумішей дисперсних порошкових матеріалів [20-21]. В якості азотвміщуючої компоненти шихти для азотуючих брикетів використовують органічні азотовмісні речовини, зокрема - карбамід, який представляє собою органічну хімічну сполуку $(\text{NH}_2)_2\text{CO}$, що містить 46 % азоту і плавиться при температурі 132,7 °С [16, 17].

При використанні карбаміду як азотвміщуючої складової модифікуючих брикетів, продуктом деструкції останнього є атомарний азот, який має підвищену хімічну активність, добре розчиняється в залізі, виявляючи по відношенню до нього легуючі властивості, перлітизує металеву основу, підвищуючи механічні властивості чавуну [17].

Для оцінки ефективності застосування порошкових брикетированих модифікаторів, що містять у своєму складі карбамід, проводили виплавку дослідних складів чавунів в індукційній печі з шихтового матеріалу на основі передільного чавуну наступного складу (мас. %): 3,45 С; 2,1 Si; 0,8 Mn; 0,08 S; 0,4 Cr; 0,2 Ni; Fe - ост.

Однак, з урахуванням того, що обробка металевих розплавів чистим карбамідом супроводжується вибухоподібною реакцією і інтенсивним димовиділенням, карбамід вводився в розплав у складі модифікуючих брикетів, що містять компоненти, які істотно знижують зазначені негативні ефекти: порошки заліза (фракції -200 мкм) і міді (фракції -160 мкм). В якості додаткових модифікуючих компонентів деякі склади сумішей містили феросиліцій ФС75, розмелений до фракції - 200 мкм, і порошок плавикового шпату (CaF_2).

Модифікуючі брикети виготовляли з порошкових сумішей з різним вмістом (5÷30 % (мас.)) карбаміду і різним вмістом металеві складові.

Модифікуючу обробку розплаву чавуну азотовмісними брикетами проводили в ковші шляхом примусового занурення останніх в розплав, при температурі 1420÷1440 °С, після чого чавун заливали в піщані форми для отримання виливків у вигляді клинових проб.

Ступінь засвоєння азоту А (%) в рідкому чавуні розраховували як співвідношення вмісту азоту в чавуні, отриманому після модифікуючої обробки, до загального початкового вмісту азоту в модифікуючих брикетах, використаних для обробки розплаву.

Відбіл оцінювали за величиною максимальної відстані (мм) від поверхні виливка до межі зони, в якій з'являлися включення вільного графіту (чистий відбіл).

Поряд з компонентним складом модифікуючих брикетів очевидно слід очікувати помітного впливу витрати останніх на основні механічні властивості чавунів, після обробки ними. Як показали результати експериментів (рис. 8), зі збільшенням витрати брикетів з 0,25 до 3 % по відношенню до маси обробленого чавуну, міцність (рис. 8, а) отриманих сплавів істотно збільшуються відповідно близькою до лінійної залежністю при деякому збільшенні твердості (рис. 8, б).

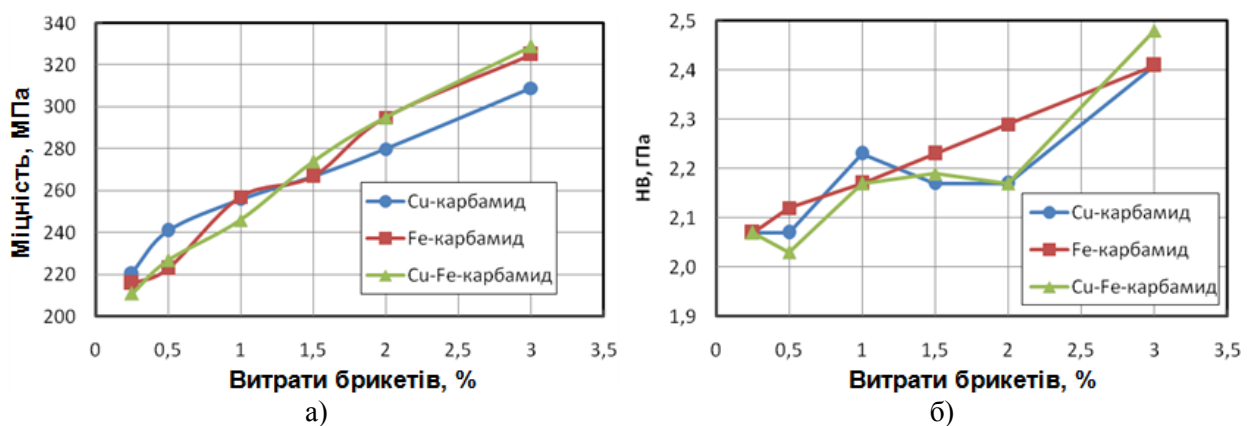


Рис. 8. Залежність міцності (а) і твердості за Брінеллем (б) чавунів, отриманих після обробки розплаву модифікуючими брикетами складів: 8 % карбамід; 90 % Cu; 2 % CaF₂; 8 % карбамід; 90 % Fe; 2 % CaF₂ та 8 % карбамід; 45 % Cu; 45 % Fe; 2 % CaF₂ від витрати брикетів

Блиький до лінійного характер залежності міцності чавуну від витрати брикетів в діапазоні від 0 до 3 % (від маси розплаву) очевидно зумовлює доцільність оцінки потенційної ефективності обробки розплаву при збільшенні витрати модифікуючих брикетів за межами вивченого діапазону. Однак, як показали результати визначення вмісту азоту в чавунах, оброблених 1÷6 % брикетами складу 90 % Fe; 8 % карбаміду; 2 % CaF₂, якщо з збільшенням витрати брикетів з 1 до 5 % вміст азоту в чавуні помітно підвищується з 0,0107 до 0,0297 %, то при 6 % витрати брикетів вміст азоту збільшується незначно (до 0,0312 %) (рис. 9, а).

Така тенденція також наочно ілюструється залежністю ступеню засвоєння азоту в чавуні від витрати брикетів, наведеною на рис. 9, б. Як впливає з наведених даних, якщо при мінімальній витраті брикетів в 1 % від маси оброблюваного чавуну ступінь засвоєння азоту становить близько 29 %, то вже починаючи з 2 % витрати ступінь засвоєння різко падає і при 6 % витрати брикетів складає вже лише 14%. Представлені результати свідчать про технічну та економічну недоцільність підвищення витрати карбамідвміщуючих брикетів для модифікування сірих чавунів понад 5÷6 %.

Зниження ефективності впливу азотовмісних модифікаторів при збільшенні їх витрати для обробки розплаву понад 5 % відбивається і на залежності міцності (рис. 10, а) і твердості (рис. 10, б) від кінцевого вмісту азоту в чавуні. Аналогічно з рис. 2, зі збільшенням витрати модифікуючих брикетів з 0 до 5 % відбувається істотне зростання механічних характеристик сплаву, тоді як при збільшенні витрати брикетів з 5 до 6 % середня міцність сплаву зростає незначно (з 487 до 493 МПа), а твердість чавуну взагалі залишається на тому ж рівні (2,48 ГПа). Тим не менш, слід звернути увагу, що обробка розплаву брикетованими модифікаторами в кількості 5÷6 % від маси

розплаву, що містять порошок заліза і карбамід, призводить до отримання міцності сірого чавуну на рівні високоміцних чавунів.

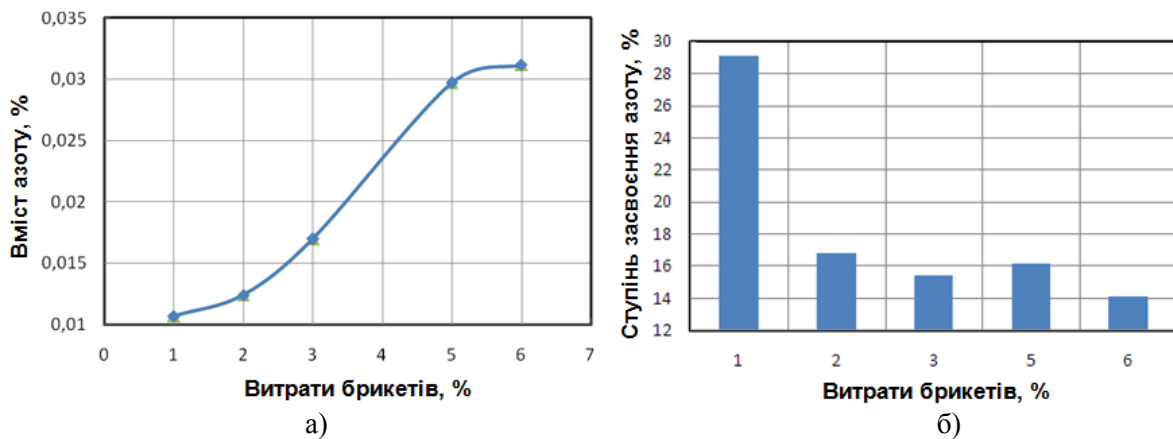


Рис. 9. Залежність вмісту азоту в чавуні (а) і ступінь засвоєння азоту (б) від витрати брикетів складу: 90 % Fe; 8 % карбаміду; 2 % CaF₂

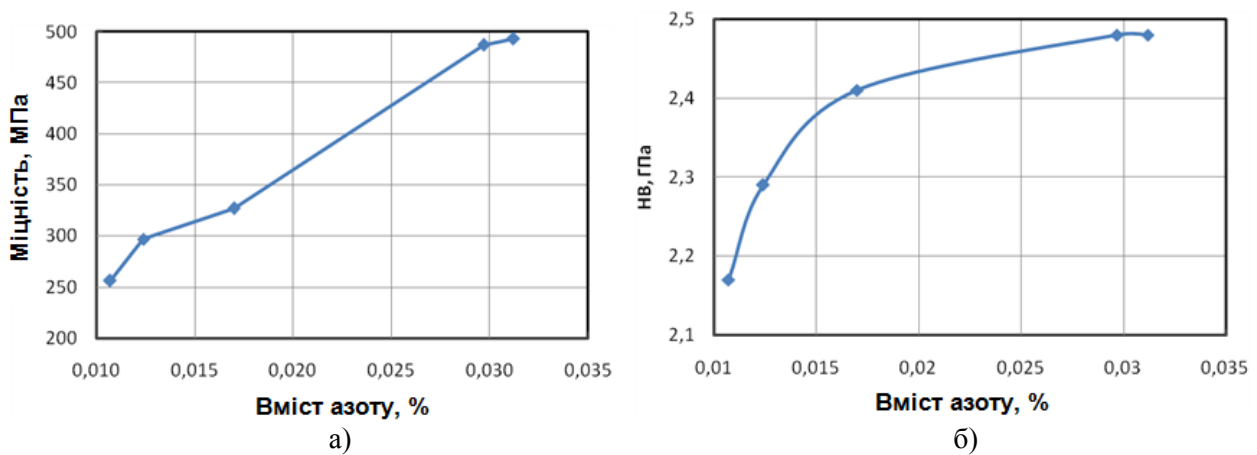


Рис. 10. Залежність міцності (а) і твердості (б) чавуну від вмісту азоту в сплаві

Валкові чавуни. Розвиток прокатного виробництва металургійної галузі пов'язано зі збільшенням випуску різних прокатних валків, які виготовляють з литих чи деформованих сплавів або твердих сплавів. В даний час все більш широке застосування для виготовлення прокатних валків знаходять високоміцні чавуни. Прокатні валки виготовлені з чавуну з кулястим графітом, в ряді випадків мають в 1,5÷3,0 рази більш високу стійкість у порівнянні з валками з чавуну з пластинчастим графітом або зі сталевими валками.

У світовій практиці при одержанні високоміцних чавунів найбільш поширеною для модифікування розплавів є технологія введення магнію в розплав з використанням якого отримують близько половини світового виробництва виливків з високоміцного чавуну, з допомогою магнійвміщуючих лігатур, головним чином на основі феросиліцію [1, 2, 5, 6].

Однак, серйозним недоліком використання кремнійвміщуваних лігатур при виробництві прокатних валків є підвищений вміст кремнію, який негативно впливає на найбільш важливий показник якості чавунних валків – глибину відбілу чавуну. У зв'язку з цим, при виробництві такого масивного литва як чавунні прокатні валки, застосування кремнійвміщуваних лігатур є небажаним або взагалі неприйнятним, а для модифікування розплаву часто застосовується недосконала технологія введення в рідкий чавун чушкового магнію за допомогою сталевих балонів. Її суттєвими недоліками є низький відсоток засвоєння магнію, недостатньо стабільні результати модифікування і погіршення екологічної обстановки в ливарних цехах.

Іноді використовують нікель-магнієві лігатури, але їх виплавка занадто затратна, а вартість таких лігатур дуже висока.

Зазначені недоліки відомих технологій модифікування значною мірою усуваються або мінімізуються при модифікуванні розплаву з використанням пресованих магнійвміщуючих брикетів на основі шихти з порошків заліза і (або) міді.

В якості базового шихтового матеріалу для отримання високоміцних валкових чавунів використовували переробний чавун наступного складу (мас. %): 3,27 С; 1,86 Si; 0,68 Mg; 0,12 Cr; 0,33 Ni; 0,12 P; 0,03 S, Fe - решта.

Як базові складові порошкової шихти для отримання модифікуючих брикетів використовували порошки заліза (фракції -200 мкм) або міді (фракції -160 мкм). Магній вводили в шихту у вигляді порошку магнію марки МПФ-1.

В якості одного з компонентів брикетированих модифікаторів при обробці розплавів чавуну доцільно використовувати мідь, яка, крім того, що сама по собі є ефективною легуючою добавкою в чавуні, що сприяє підвищенню службових властивостей виливків, крім того вона дозволяє зменшити вміст нікелю в валкових чугунах, має низьку температуру плавлення, і швидко розчиняється у рідкому чавуні.

Одним з критеріїв оптимізації складів брикетів для модифікування чавуну є ступінь засвоєння магнію при їх розчиненні в розплаві, а також наявність піроефекту. Як показали результати досліджень, ступінь засвоєння магнію рідким металом збільшується зі зменшенням вмісту магнію в брикеті. Однак, слід враховувати, що зі зниженням вмісту магнію в брикетах зростає витрата останніх і збільшується собівартість чавуну, а також зростають втрати температури на розчинення брикетів. Оцінка впливу вмісту магнію в брикеті на наявність піроефекту показала, що помітний піроефект проявляється при використанні брикетів з вмістом магнію більше 10-15 %. У зв'язку з цим, на підставі результатів дослідження зроблено висновок, що оптимальний вміст магнію в брикетах на основі залізного порошку складає близько 10-12 %.

Звертає на себе увагу, що ступінь засвоєння магнію помітно підвищується при наявності в складі брикетів мідного порошку. Позитивний вплив міді в цьому плані переконливо підтверджується також результатами експерименту з оцінки впливу температури розплаву на ступінь засвоєння магнію при використанні брикетированих модифікаторів двох компонентних складів: склад 1 - 42 % Fe; 8 % Mg; 50 % Cu і склад 2 - 92 % Cu; 10 % Mg (рис. 11, а). Як випливає з рисунка, для всіх значень температур розплаву ступінь засвоєння магнію при використанні брикетів, що не містять заліза, вище порівняно з залізовмісними брикетами на 5 %. При цьому, для обох складів модифікуючих брикетів з підвищенням температури розплаву з 1400 до 1450 °С відбувається помітне (згідно з практично лінійним характером залежності) зниження ступеня засвоєння магнію, обумовлене підвищенням випаровуванням останнього при ковшовому модифікуванні для більш високих температур розплаву.

Помітне підвищення ступеня засвоєння магнію для брикетів на основі мідного порошку порівняно з залізовмісними брикетами може бути обумовлено як збільшенням швидкості розчинення, так і підвищеною абсолютною щільністю мідьвміщуючих брикетів, що забезпечує більш тривале їх перебування в донній частині ковша порівняно з брикетами з меншою питомою вагою на основі порошку заліза, які спливають в процесі обробки розплаву.

Підвищене випаровування магнію в процесі ковшового модифікування при збільшенні температури розплаву чавуну до 1450 °С призводить до відповідного зниження міцнісних характеристик сплаву. Якщо міцність чавуну, отриманого з розплаву з температурою 1400 і 1420 °С відрізняється незначно і становить 825÷848 МПа для обох складів модифікаторів, то з підвищенням температури розплаву до 1450 °С середні значення міцності сплаву знижуються вже до рівня 780 МПа у разі використання залізовмісних модифікуючих брикетів, і 807 МПа - для мідь-магнієвих брикетів (рис. 11, б). Помітне зниження міцності чавуну, отриманого після модифікуючої обробки розплаву при 1450 °С, знаходить своє відображення також при аналізі параметрів фактора форми графіту в сплавах (рис. 11, в). Як випливає з рисунка, якщо для температур обробки розплаву 1400 і 1420 °С фактор форми графіту, що характеризує ступінь сфероїдизації його частинок, знаходиться в межах 0,6÷0,68, то з підвищенням температури розплаву до 1450 °С різко знижується до 0,45 для Fe-Cu-Mg модифікатора, і до 0,55 – для Cu-Mg модифікуючих брикетів. Причиною зазначеного є те, що кінцева форма графітових включень визначається залишковим вмістом магнію в чавуні і ступінь сфероїдизації зменшується із збільшенням температури розплаву і часу витримки обробленого сфероїдизуючими добавками розплаву внаслідок випаровування з нього магнію.

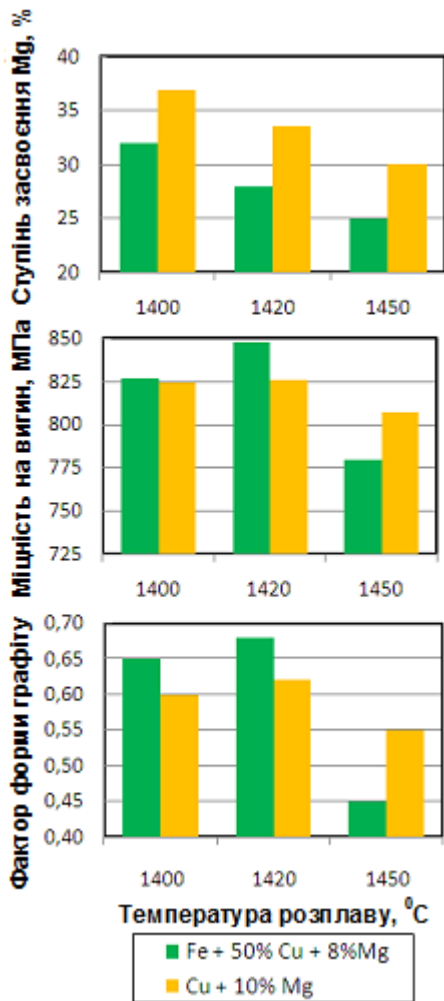


Рис. 11. Залежність ступеня засвоєння магнію (а), міцності чавунів на вигин (б) і фактора форми графіту (в) від складу порошкових модифікаторів і температури розплаву при модифікуванні

останнього (при оптимальних температурах обробки) знаходиться в межах 825÷848 МПа (рис. 11, б), то міцність чавуну серійної виплавки не перевищує 755 МПа. Експлуатаційні випробування валків ЛШД-41, відлитих із застосуванням Fe-Cu-Mg порошкових модифікуючих брикетів, показали, що їх стійкість на 15÷20 % вище стійкості валків з високоміцного чавуну серійного виробництва (ЛШ-41).

Висновки. Представлені результати вказують на ефективність використання порошкових брикетованих модифікаторів при обробці розплавів чавуна як за схемою ковшового, так і внутрішньоформового модифікування.

Порівняльне вивчення структури модифікованих чавунів показало, що порошкові брикети забезпечують утворення більш дисперсних включень графіту і більшу кількість фериту, ніж у випадку застосування литих кускових лігатур на тій ж (кремній і залізо) основі. Такі результати обумовлені наявністю в складі брикету дисперсних компонентів, які при розплавлюванні цього модифікатора відіграють роль центрів графітизації.

Результати широкої промислової апробації брикетованих модифікаторів при виготовленні відливок з високоміцного чавуна дозволяють рекомендувати їх замість плавлених лігатур для використання в різних галузях машинобудування і металургії з досягненням значного техніко-економічного ефекту.

Слід, однак, відзначити, що незважаючи на помітно більш високі значення ступеня засвоєння магнію при використанні для модифікування розплаву мідно-магнієвих брикетів порівняно з Fe-Cu-Mg модифікаторами (рис. 11, а), як фактор форми частинок графіту (рис. 11, в), так і міцність чавуну (рис. 11, б) при оптимальних температурах обробки розплавів (1400 і 1420 °С) дещо вище для останніх. Зазначений ефект може бути обумовлений як тим, що мідь є демодифікатором (в частині її впливу на сфероїдизацію графіту), так і наявністю в складі модифікуючих брикетів більш тугоплавких порівняно з міддю дисперсних частинок залізного порошку, що представляють собою готові кристали близькі за складом до складу фази, що кристалізується внаслідок кращого змочування та подібності їх кристалічних ґраток і забезпечують отримання більш стійкої суспензії в розплаві для досягнення необхідного інокулюючого ефекту. При використанні мідь-магнієвих брикетів, незважаючи на підвищення ступеня засвоєння розплавом магнію, інокулюючий і сфероїдизуючий ефекти знижуються.

Порівняння структури чавунів, отриманих за серійною технологією (ковшова обробкою розплаву металевим магнієм) і відлитих з розплавів, обробленого Fe-Cu-Mg брикетами і показало, що в останньому випадку діаметр графітних включень зменшується приблизно в 1,5 рази, збільшується ступінь сфероїдизації графіту (рис. 12, а, б). Оскільки мідь діє на чавун на чавун як сильний перлітизатор, внаслідок наявності порошку міді у складі модифікуючих брикетів помітно знижується аномальність перліту, підвищується його дисперсність (рис. 6, в, г) і мікротвердість (до 4,2 ГПа), тоді як перліт в чавуні серійної плавки має мікротвердість 2,7÷2,9 ГПа.

Такий вплив на структуру брикетированих модифікаторів призводить до відповідного підвищенню характеристик міцності чавуну, отриманого з використанням Fe-Cu-Mg брикетів. Тоді як міцність

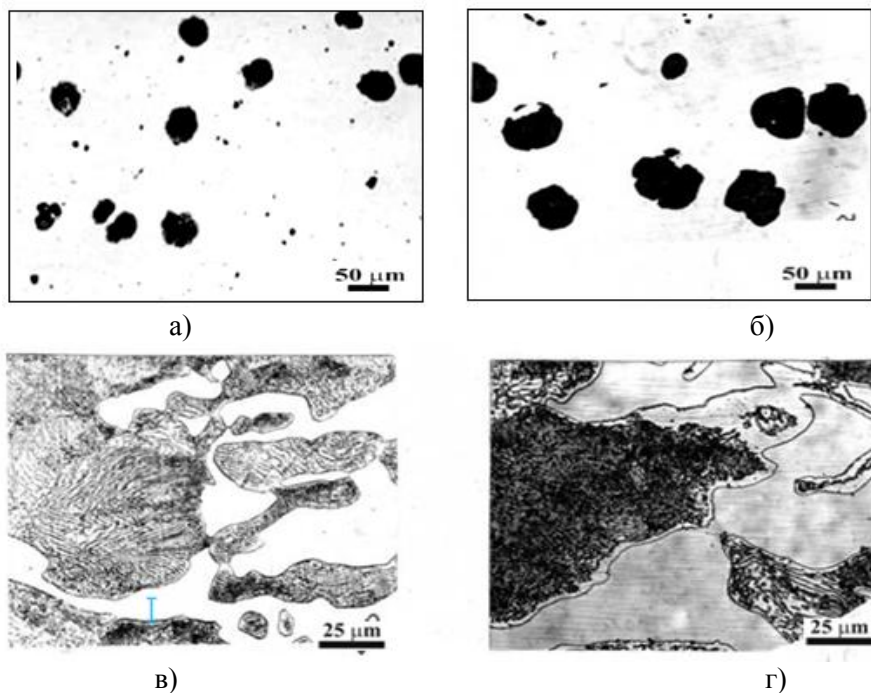


Рис. 12. Форма частинок графіту (а, б) і мікроструктура чавуну валків (в, г), відлитих з використанням Fe-Cu-Mg брикетів (а, в) і валків серійної виплавки (б, г)

Література

1. Литовка В.И. Повышение качества высокопрочного чугуна в отливках. – К.: Наука думка, 1987. – 208 с.
2. Гольдштейн Я.Е., Мидин В.Г. Модифицирование и микролегирование чугуна и стали. – М.: Машиностроение, 1988. – 272 с.
3. Chaengkham P., Srichandr P. Continuously cast ductile iron: Processing, structures, and properties // Journal of Materials Processing Technology. – 2011. – Vol. 211, Issue 8. – P. 1372-1378.
4. Xue Wendong, Li Yan. Pretreatments of gray cast iron with different inoculants // Journal of Alloys and Compounds. – 2016. – Vol. 689. – P. 408-415.
5. Макаренко К.В., Иващенко Ю.М. Инокулирующее модифицирование чугуна с шаровидным графитом // Ползуновский альманах. – 2007. - №1-2. – С. 107-109.
6. Чайкин В.А. Научное обоснование и технологическое обеспечение применения дисперсных модификаторов и рафинирующих смесей для выпечной обработки чугунов и сталей // Автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук. – Магнитогорск. – 2011. – 45 с.
7. Литовка В. И., Маслюк В. А., Куровский В. Я. и др. Получение высокопрочного чугуна с применением брикетированных модификаторов // Литейное производство. – 2003. – № 8 – С.7-12.
8. Kurovskiy V. Ya., Bagliuk G. A. The features of cast iron treatment with briquetted powder modifiers in manufacturing of forming rolls // Machines, technologies, materials, 2013. – 10th International Congress. Proceedings. – Vol. 1. – 10-12 September 2013. – Varna, Bulgaria. – 2013. – P. 93÷96.
9. Баглюк Г. А., Куровський В. Я., Шинський О. Й. Вплив режимів пресування порошкових модифікаторів на кінетику їх розчинення в розплаві чавуну // Вісник національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут». Серія «Машинобудування». – 2010. – № 59. – С. 27÷30.
10. Баглюк Г.А., Куровський В.Я., Терещенко Н.Я. The features of powder briquetted modifiers forming and dissolution in cast iron melt // Machines, technologies, materials, 2013. – 11th International Congress. Proceedings. – Vol. 2. – 10-12 September 2013. – Varna, Bulgaria. – 2014. – P. 14÷17.
11. Фесенко М. А., Фесенко А. Н. Перспективные направления использования метода внутрiformенного модифицирования расплава для изготовления отливок с заданными эксплуатационными свойствами // Литье и металургия. – 2013. - №4 (73). – С. 35÷41.
12. Фесенко М. А., Фесенко А. Н., Косячков В. А. Внутрiformенное модифицирование для получения чугунных отливок с дифференцированной структурой и свойствами // Литейное производство. - 2010. - № 1. - С. 7÷13.
13. Edington J., Nicola W., Richards V. L. Age Strengthening of Gray Cast Iron: Nitrogen Effects and Machinability // Transactions of the American Foundry Society, Vol. 110: Part 2. – 2002. – P. 983÷993.
14. Qi-jie Z. Effect of Nitrogen in Cast Irons and Nitrogen-Containing High-Strength Gray Iron // Modern Cast Iron. – 2001. – Vol. 2. – P. 9÷14.
15. Hongsheng Ding, Shiqiu Liu, Hailong Zhang, Jingjie Guo. Improving impact toughness of a high chromium cast iron regarding joint additive of nitrogen and titanium // Materials and Design. – 2016. - Vol. 90. - P. 958–968.
16. Суслa Н.В., Панченко А.Н. Азотсодержащие брикет-модификаторы для чугуна и стали // Разработка рудных месторождений. Научно-техн. сборник. - Кривой Рог, 2011. – Вып. 94. - С. 239-241.
17. Пат. 18224444 АЗ (СССР). Компактированный реагент для обработки расплава чугуна / Захарченко Э.В., Захарченко Л.Э., Клименко В.Н., Куровский В.Я., Ляпунов А.П. – Опубл. 15.06.1993. Бюл. № 22.

Стаття надійшла до редакції 10.05.2017