

Ефективність FeSiMg лігатур при модифікуванні у ливарній формі

В. Б. Бубликов, доктор технічних наук

Д. М. Берчук, кандидат технічних наук

Ю. Д. Бачинський

О. П. Нестерук, кандидат технічних наук

Фізико-технологічний інститут металів та сплавів НАН України, Київ

Вивчено вплив FeSiMg лігатур з вмістом магнію ~ 7 % на зміну параметрів структури високоміцного чавуну залежно від швидкості охолодження. Встановлено, що всі досліджені лігатури, забезпечуючи високий ступінь сфероїдизації включень графіту (більше 90 %), відрізняються впливом на ступінь графітизації структури тонкостінних виливків.

Підвищення якості виливків і розробка нових високоефективних технологій, що забезпечують зниження собівартості продукції, є однією з найважливіших задач ливарного виробництва України. У сучасному машинобудуванні зростає потреба у виливках з високоміцного чавуну підвищеної якості, що зумовлює необхідність вдосконалення традиційних технологій, заснованих на методах ковшового модифікування розплаву. Прогресивним напрямом розвитку технологій високоміцного чавуну є підвищення ефективності модифікування шляхом застосування пізнього внутрішньоформового модифікування в реакційній камері, розташованій в ливниковій системі. У порівнянні з ковшовим модифікуванням в ливарній формі характеризується більш високою екологічністю, технологічністю і економічністю [1].

Наближення в часі процесів модифікування і кристалізації стимулює інокуляцію (збільшення числа центрів кристалізації), забезпечує більш високий рівень сфероїдизації графітних включень і ефективно запобігає утворенню відбілу в структурі тонкостінних виливків. При цьому у виливках формується дрібнокристалічна структура з підвищеною кількістю фериту в металевій основі, що забезпечує отримання оптимальних технологічних і механічних властивостей високоміцного чавуну в литому стані без проведення термічної обробки (графітизуючого відпалу) [2].

Відомо, що лігатури FeSiMg різних виробників, практично аналогічні за вмістом магнію, можуть значно відрізнятися ефективністю дії на формування заданої структури виливків з високоміцного чавуну. Магнієві лігатури можуть по-різному впливати на параметри структури високоміцного чавуну: ступінь сфероїдизації графіту, наявність або відсутність цементиту, співвідношення ферит/перліт в металевій основі, які в свою чергу визначають рівень механічних властивостей, оброблюваність різанням,

необхідність проведення термообробки для поліпшення структури і властивостей виробів. Різна модифікуюча здатність дослідних магнієвих лігатур є наслідком дії металургійної спадковості, зумовленої природою використаних шихтових матеріалів, методами плавки і введення модифікуючих елементів, наявністю і кількістю домішкових хімічних елементів, умовами кристалізації. Відмінність якісного і кількісного фазового складу лігатур впливає на кінетику їх розчинення і ступінь переходу активних модифікуючих елементів в розплав чавуну. Магнієві лігатури однієї марки, але різних виробників, можуть значно відрізнятися ступенем окислення магнію та інших активних модифікуючих елементів [3].

З огляду на вищевикладене, видається актуальним дослідити вплив магнієвих лігатур на формування фазово-структурного складу високоміцного чавуну з кулястим графітом при модифікуванні у ливарній формі.

Дослідні плавки проводили в індукційній електропечі місткістю 12 кг. У якості шихтових матеріалів використовували чавун, отриманий переплавом в індукційній електропечі ІСТ-016 чушкового переробного чавуну марки ПЛ2 (50 %) і звороту високоміцного чавуну (50 %). Необхідний вміст кремнію в чавуні досягався шляхом введення в кінці плавки в піч розрахункової кількості феросиліцію марки ФС75. Хімічний склад високоміцного чавуну дослідних плавок, варіювався в наступних межах: мас. частка, %: 3,65 – 3,82 С; 2,19 – 2,57 Si; 0,40 – 0,42 Mn; до 0,3 Cr; 0,026 S; 0,044 P.

Для дослідження впливу лігатур на структуру високоміцного чавуну при сфероїдизуючому внутрішньоформовому модифікуванні використовували ливарну форму наведену на рис. 1. Заливання чавуну в форму виконували при температурі $(1440 \pm 10)^\circ\text{C}$. У сирі піщано-глинисті форми відливали ступінчасті проби з розміром зразків 60x60 мм і товщиною 1,5; 2,5; 5; 10; 15 мм (рис. 2).

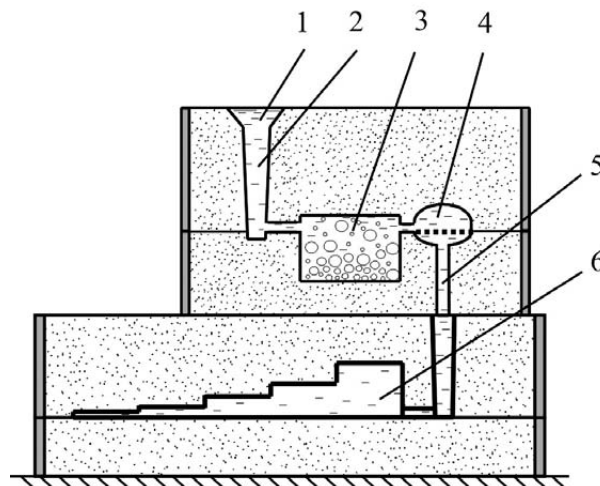


Рис. 1. Схема ливарної форми для внутрішньо-формового сфероїдизуючого модифікування: 1 – ливникова воронка; 2 – стояк; 3 – реакційна камера; 4 – шлаковловлювач з сітчастим фільтром; 5 – зливний канал у нижню форму; 6 – ступінчаста проба.

Для вивчення закономірностей впливу на структуроутворення високоміцного чавуну були обрані 3 магнієві лігатури з вмістом магнію ~ 7 % (табл. 1), які широко використовуються для одержання високоміцного чавуну, в тому числі на підприємствах України.

Дослідні магнієві лігатури в кількості 1,0 % від металоемності форми розташовували в реакційній камері верхньої форми. Модифікований розплав фільтрувався в шлаковловлювачі сітчастим фільтром і через вертикальний канал надходив в нижню форму для отримання ступінчастої проби.

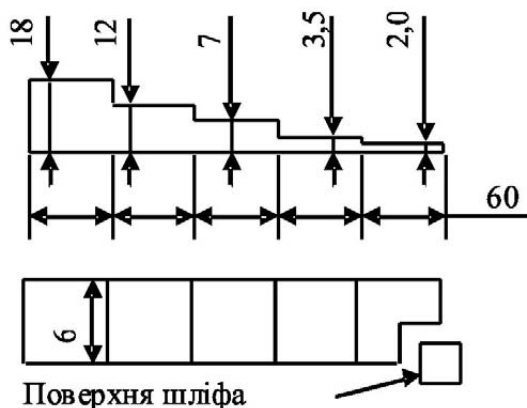


Рис. 2. Схема ступінчастої проби і вирізки зразків для структурного аналізу.

Таблиця 1

Хімічний склад дослідних магнієвих лігатур

Лігатура	Масова частка елементів, %				
	Mg	Ca	PЗМ	Si	Fe
ФСМг7-1	7,1	0,54	0,44	45,4	Решта
ФСМг6-2	6,6	2,40	0,45	49,6	Решта
ФСМг6-3	6,1	1,20	1,10	48,0	Решта

Металографічний аналіз виконували на шліфах, виготовлених зі зразків, товщина яких варіювалася в певних межах, обумовлених розштовхуванням форми при вилучанні моделі і деякими іншими факторами. Перед проведенням металографічного аналізу вимірювали фактичну товщину перетину в місці, підготовленому для дослідження. Функціональні графіки, що описують отримані закономірності будували за даними металографічного аналізу структури в центрі кожного зразка ступінчастої проби.

Модифікуючу здатність лігатур оцінювали в умовах внутрішньоформового модифікування за їх впливом на формування мікроструктури високоміцного чавуну залежно від швидкості охолодження, яка визначається товщиною зразка технологічної проби. Встановлено, що всі досліджені лігатури, забезпечуючи високий ступінь сфероїдизації графіту (більше 90 %) в зразках товщиною 2,0; 3,5; 7,0 мм, відрізняються впливом на ступінь графітизації структури, яку характеризують кількість структурно-вільного цементиту (або його відсутність), щільність розподілу включень кулястого графіту, кількість фериту в металевій основі.

Кількість цементиту визначали в центрі кожного поперечного перерізу ступінчастої проби. Вплив дослідних лігатур на кількість цементиту в мікроструктурі зразків технологічної проби наведено в табл. 2. Мінімальна кількість (1 – 2 %) цементиту утворюється при товщині зразка 2,0 мм і

Таблиця 2
Вплив FeSiMg лігатур на кількість цементиту в структурі високоміцного чавуну

Магнієва лігатура	Масова частка цементиту, % при товщині зразка		
	2,0 мм	3,5 мм	7,0 мм
ФСМг6-3	3 – 5	–	–
ФСМг7-1	2 – 3	–	–
ФСМг6-2	1 – 2	–	–

модифікуванні лігатурою ФСМг6-2. При модифікуванні лігатурами ФСМг7-1 і ФСМг6-3 в пробі товщиною 2,0 мм утворився цементит в кількості до 3 і 5 %, відповідно. В пробах товщиною 3,5 – 7,0 мм цементит відсутній.

Максимальна графітизуюча і феритизуюча здатність спостерігається при внутрішньоформовому модифікуванні лігатурою ФСМг6-2. Мікроструктура зразка товщиною 2,0 мм складається з включень кулястого графіту (ШГф 4; 5) діаметром 9 – 15 мкм в кількості 2100 шт/мм² і ферито-перлітної металевої основи (52 % фериту) (рис. 3, 4). Зі збільшенням товщини зразків технологічної проби до 7,0 мм кількість включень графіту зменшується в 2,5 рази, а фериту збільшується до 83 %.

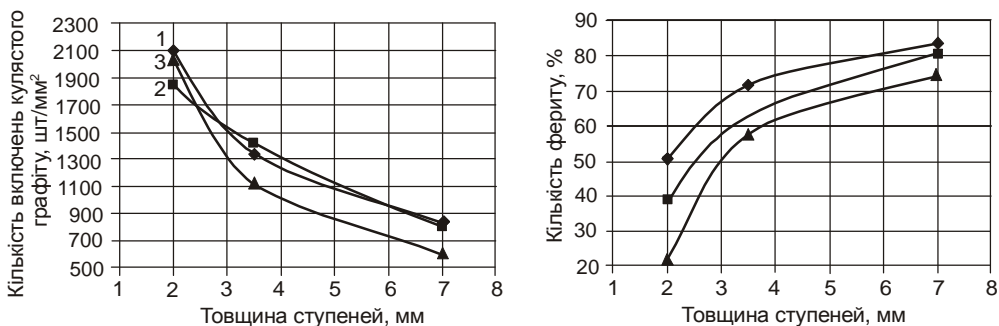
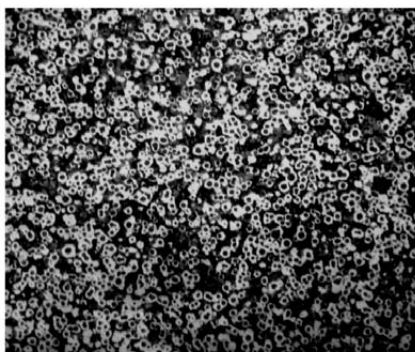


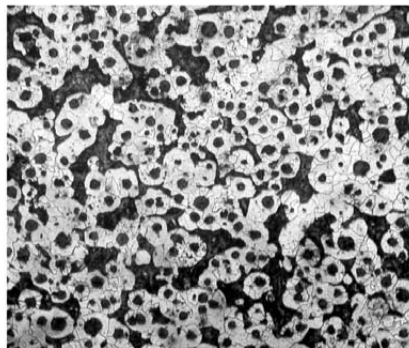
Рис. 3. Вплив лігатур на структуру високоміцного чавуну: 1 – ФСМг6-2; 2 – ФСМг7-1; 3 – ФСМг6-3.

При внутрішньоформовому модифікуванні лігатурою ФСМг7-1 у зразках товщиною 2,0 мм формується дрібнодисперсна структура, яка складається з включень кулястого графіту (ШГф 4; 5) з щільністю розподілу 1850 шт/мм² та перліто-феритної металевої основи (до 40 % фериту) (рис. 3, 5). У зразках товщиною 3,5 і 7,0 мм спостерігається закономірне зниження кількості включень графіту до 1414 і 807 шт/мм² та збільшення феритної складової в металевій основі до 63 і 81 %, відповідно. Розмір включень кулястого графіту при модифікуванні лігатурою ФСМг7-1 збільшується з 4 – 9 мкм в 2,0 мм зразку до 9 – 20 мкм в зразках товщиною 3,5 – 7,0 мм.

При внутрішньоформовому модифікуванні лігатурою ФСМг6-3 в зразку товщиною 2,0 мм утворюється структура, яка складається з включень кулястого графіту (ШГф 4; 5) і перліто-феритної металевої основи (до 20 % фериту) (рис. 3, 6). При більш низькому рівні феритизації, на відміну від лігатур ФСМг6-2 і ФСМг7-1, в структурі зразка товщиною 2,0 мм спостерігається досить велика кількість графітових включень – 2035 шт/мм².

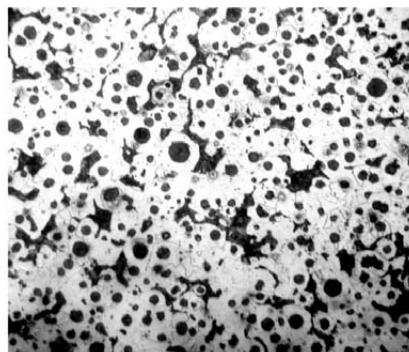


а

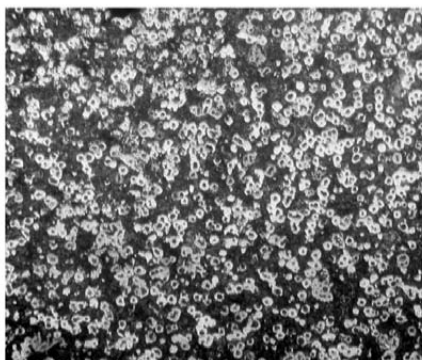


б

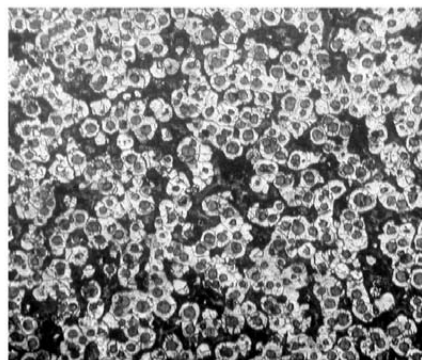
Рис. 4. Мікроструктура високоміцного чавуну, модифікованого лігатурою ФСМг6-2, у зразках товщиною: а – 2,0 мм; б – 3,5 мм; в – 7,0 мм, x100.



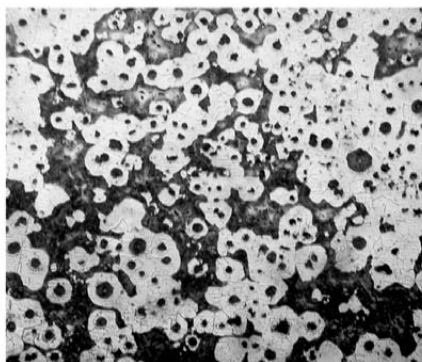
в



а

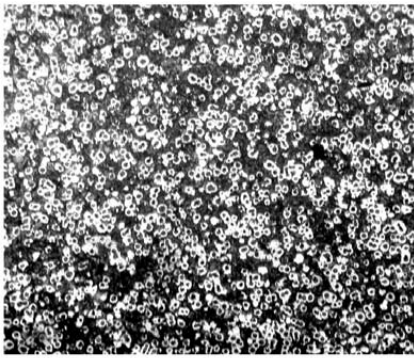


б

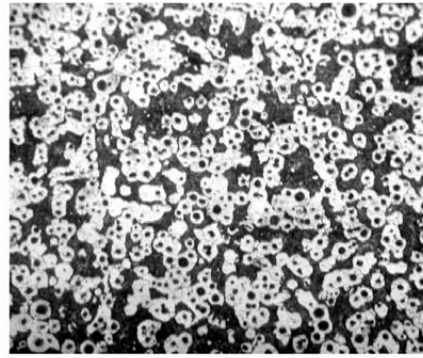


в

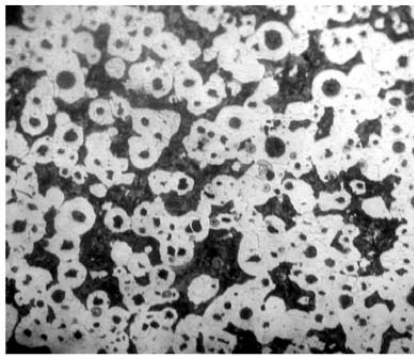
Рис. 5. Мікроструктура високоміцного чавуну, модифікованого лігатурою ФСМг7-1, у зразках товщиною: а – 2,0 мм; б – 3,5 мм; в – 7,0 мм, x100.



а



б



в

Рис. 6. Мікроструктура високоміцного чавуну, модифікованого лігатурою ФСМг6-3, у зразках товщиною: а – 2,0 мм; б – 3,5 мм; в – 7,0 мм, x100.

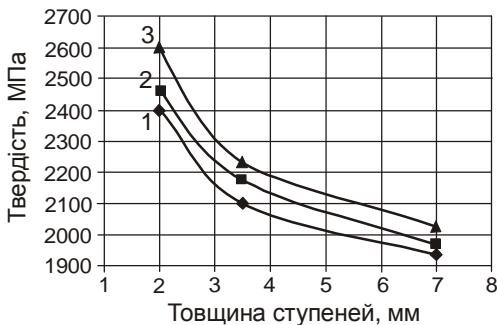


Рис. 7. Вплив магнієвих лігатур на твердість високоміцного чавуну в зразках технологічної проби: 1 – ФСМг6-2; 2 – ФСМг7-1; 3 – ФСМг6-3.

Розмір включень кулястого графіту в структурі зразків товщиною 2,0 і 3,5; 7,0 мм знаходиться в межах 9 – 15; 9 – 27 мкм, відповідно. Кількість фериту в зразках товщиною 3,5 і 7,0 мм складає 58 – 74 %, відповідно.

Твердість високоміцного чавуну у виливках визначається його структурою. Близька за величиною твердість при внутрішньоформовому модифікуванні лігатурами ФСМг6-2 і ФСМг7-1 (рис. 7) пояснюється невеликою відмінністю їх структури.

У зразках товщиною 2,0 мм твердість знаходиться на рівні 2400 – 2460 МПа, відповідно. У зразках товщиною 3,5 – 7,0 мм твердість закономірно знижується і складає 1940 – 2170 МПа.

Серед аналізованих лігатур, ФСМг6-3 характеризується більш низькою графітізуючою здатністю і, як наслідок, більш високими показниками твердості, ніж у чавуні, модифікованому лігатурами ФСМг6-2 і ФСМг7-1. Завдяки збільшенню перлітної складової в структурі, у зразку товщиною 2,0 мм твердість досягає 2600 МПа, а в зразках товщиною 3,5 і 7,0 мм знижується до 2230 – 2030 МПа, відповідно.

Дослідження магнієвих ліга-тур показало, що всі випробувані лігатури, забезпечуючи високий ступінь сфероїдизації включень графіту (більше 90 %), відрізняються впливом на ступінь графітізації структури тонкостінних виливків. Найбільш високий ступінь графітізації структури забезпечує модифікування лігатурою ФСМг6-2, де у зразках з товщиною стінки 2,0 та 3,5 мм утворюються включення кулястого графіту з щільністю розподілу, відповідно, 2100 та 1340 шт/мм² і металева основа з кількістю фериту 51 та 72 %.

За ефективністю дії на поліпшення структури тонкостінних виливків з високоміцного чавуну, в порівнянні з ковшовим, внутрішньоформове модифікування при меншій в 2 – 3 рази витраті магнієвої лігатури ефективно запобігає утворенню відбілу, збільшує в 3 – 4 рази щільність розподілу в структурі включень кулястого графіту, що сприяє зменшенню міжкристалітної ліквідації, збільшує в 2 – 3 рази кількість фериту в металевій основі, забезпечує більш оптимальне співвідношення показників міцності і пластичності високоміцного чавуну, покращує оброблюваність різанням і дозволяє виготовляти тонкостінні виливки з високим рівнем властивостей без проведення обов'язкового в технологіях ковшового модифікування енергоємного високотемпературного графітізуючого відпалу.

Література

1. Пирс Дж. Модифицирование чугунов. Практика и исследования // *Металлургия машиностроения*. – 2009. – №3. – С. 20 – 25.
2. Бубликов В.Б. Высокопрочному чугуны – 60 // *Литейное производство*. – 2008. – № 11. – С. 2 – 8.
3. Панов А.Г., Корниенко А.Е. О влиянии окисленности Fe-Si-Mg лигатур на свойства ЧШГ, полученного разными методами модифицирования // *Литейщик России*. – 2010. – № 1. – С. 27 – 34.

References

1. Pirs Dzh. Modifitsirovanie chugunov. Praktika i issledovaniya [Modification of cast irons. Practice and research.]. *Metallurgiya mashinostroeniya*, 2009, №3, s. 20 – 25 [in Russian].
2. Bublikov V.B. Vysokoprochnomu chugunu – 60 [60 years of ductile cast iron]. *Liteynoe proizvodstvo*, 2008, №11, s. 2 – 8 [in Russian].
3. Panov A.G., Kornienko A.E. O vliyaniy okislennosti Fe-Si-Mg ligatur na svoystva ChShG, poluchennogo raznymi metodami modifitsirovaniya [On the influence of oxidation of Fe-Si-Mg master alloys on the properties of spheroidal graphite cast iron obtained by different methods of modification]. *Liteyschik Rossii*, 2010, №1, s. 27 – 34 [in Russian].

Одержано 25.10.17

В. Б. Бубликов, Д. Н. Берчук, Ю. Д. Бачинский, Е. П. Нестерук

Эффективность FeSiMg лигатур при внутриформенном модифицировании

Резюме

Изучено влияние FeSiMg лигатур с содержанием магния ~ 7 % на изменение параметров структуры высокопрочного чугуна в зависимости от скорости охлаждения.

Установлено, что все исследованные лигатуры, обеспечивая высокую степень сфероидизации включений графита (более 90 %), отличаются влиянием на степень графитизации структуры тонкостенных отливок.

V. B. Bublikov, D. M. Berchuk, Y. D. Bachinskyi, O. P. Nesteruk
FeSiMg master alloys effectiveness at in-mould modifying

Summary

The influence of FeSiMg master alloys with magnesium content of ~ 7 % on ductile cast iron structure parameters change depending on the cooling rate is studied. It is established that all investigated master alloys, providing a high degree of graphite inclusions nodularity (more than 90 %), are different in influence on the degree of thin-walled castings structure graphitization.

УДК 621.746.6:542.65

*Структура і властивості спадково
модифікованих сталей*

С. Є. Кондратюк, доктор технічних наук, професор
Ж. В. Пархомчук, кандидат технічних наук
О. М. Стоянова, кандидат фізико-математичних наук

Фізико-технологічний інститут металів та сплавів НАН України, Київ

Досліджено вплив спадкового модифікування вуглецевих і легованих сталей добавками сталей аналогічного хімічного складу із структурою, підготовленою деформаційно-термічною обробкою. Показано закономірне підвищення дисперсності і однорідності структури, механічних властивостей і опору крихкому руйнуванню сталей 25Л, 45Л, 25ХГСТФЛ, 45ХГСТФЛ та Р6М5Л.

Технологічний процес виготовлення значної кількості виробів машинобудування складається з трьох основних послідовних або суміщених операцій обробки сталі формування литої структури, гарячої деформації і кінцевої термічної обробки. Визначальними параметрами виробництва при цьому є температурно-кінетичні умови кристалізації і структуроутворення, гарячої деформації та твердофазних перетворень сталі [1, 2].

Температурно-часові параметри кристалізації впливають не тільки на характеристики литої структури, але й призводять до закономірного спадкування структурних змін і властивостей сталей при наступних технологічних операціях обробки виливків. Можливість використання явищ спадковості для підвищення конструкційної міцності виробів з легованої