

ОДЕРЖАННЯ ТА ОБРОБКА РОЗПЛАВІВ

<https://doi.org/10.15407/plit2023.03.003>

УДК 669.131.7:669-154.9:669-153.62

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)

ПІДВИЩЕННЯ ПЛАСТИЧНОСТІ ВИСОКОМІЦНОГО ЧАВУНУ ВНУТРІШНЬОФОРМОВИМ МОДИФІКУВАННЯМ РОЗПЛАВУ ЗІ ЗМЕНШЕНИМ ВМІСТОМ КРЕМНІЮ

Високоміцні чавуни з підвищеною пластичністю широко застосовуються для одержання деталей машин, які працюють в умовах ударно-циклічних та динамічних навантажень, а також при низьких температурах. Пластичність високоміцного чавуну визначається в основному його хімічним складом, способом модифікування, методом лиття і видом термічного оброблення. У світі поширені високоміцні чавуни з удвічі більшим значенням мінімального відносного видовження, ніж передбачено державним стандартом України, а технології виготовлення таких чавунів засновані на використанні у шихті дорогих рафінованих чавунів та проведенні енергоємного термічного оброблення. У статті наведено результати впливу зменшення масової частки кремнію у складі високоміцного чавуну на зміну показників його структури та механічні властивості. Дослідження проведено з використанням дешевих шихтових матеріалів та високоефективних феросиліцій-магнієвих модифікаторів при економних енерговитратах на термічне оброблення виливків. Експериментально показано, що якщо при ковшовому модифікуванні відбіл починає утворюватися при масовій частці кремнію у металі вилівка 2,2–2,3 %, то при застосуванні внутрішньоформового модифікування до 7 % цементиту утворюється при кристалізації високоміцного чавуну з масовою часткою $Si = 0,9\text{--}1,1\%$. Механічні властивості внутрішньоформового високоміцного чавуну з масовою часткою кремнію 1,2–1,3 %, яка гарантує отримання металевої основи без вкраплень цементиту, у литому стані відповідають марці ВЧ480-15 при твердості 156–163 НВ. Після графітизувального відпалу цей високоміцний чавун має феритну металеву основу і відповідне їй поєднання тимчасового опору під час розтягування $\sigma_B = 400\text{--}450$ МПа з більш високим відносним видовженням $\delta = 22\text{--}26\%$, ударною в'язкістю $KC = 100\text{--}120$ Дж/см² і низькою твердістю 134–156 НВ. Результати досліджень показують суттєве збільшення пластичності модифікованого у ливарній формі високоміцного чавуну з кулястим графітом за рахунок зменшення масової частки кремнію і створюють передумови для розроблення нових конструкцій литих деталей

Ключові слова: високоміцний чавун, відносне видовження, модифікування, кремній, структура.

Технології отримання високоміцного чавуну, які впроваджувались кілька десятиліть тому, вважаються застарілими. Регламентовані стандартами марки в багатьох випадках не відповідають постійно зростаючим вимогам до матеріалів для створення сучасної техніки. Сьогодні світові лідери в галузі технологій високоміцного чавуну (швейцарська фірма «Georg Fischer», англійська фірма «Meehanite», італійська фірма «Zanardi» та ін.) працюють над створенням нових марок високоміцного чавуну з комбінацією передбаченого стандартами тимчасового опору під час розтягування σ_B з підвищеним відносним видовженням δ [1–4]. Виконувані роботи спрямовані на створення наукових і технологічних основ високоефективних методів модифікування високовуглецевих розплавів, що забезпечують збільшення кількості утворених сферокристалів графіту, запобігання переходу на метастабільний механізм кристалізації з утворенням небажаної цементитної фази, подрібнення структури, підвищення технологічних, механічних, службових властивостей виробів із високоміцного чавуну й ресурсозбереження.

У випадку феритного відпаленого чавуну зі збільшенням кількості кремнію збільшується тимчасовий опір під час розтягування σ_B , його умовна границя плинності $\sigma_{0,2}$ і твердість HB, тоді як відносне видовження δ зменшується. Важливе значення у виробництві високоміцного чавуну має оптимізація масової частки кремнію, атоми якого можуть замінювати атоми заліза в кристалічній ґратці й утворювати твердий розчин заміщення (тобто силікоферит). Вплив кремнію на зміну твердості силікофериту показано в табл. 1.

Таблиця 1
Вплив вмісту кремнію на твердість силікофериту [5]

Масова частка Si, %	0	0,82	2,22	3,40
Твердість HB	70	88	124	150

Вочевидь, важливим фактором одержання високопластичного високоміцного чавуну є зменшення масової частки кремнію в ньому до певної технологічної межі. У зв'язку з тим, що кремній у чавуні є основним графітизувальним елементом, мінімальна його кількість повинна бути такою, що запобігає утворенню пер-

винних та евтектичних карбідів у виливках при кристалізації. Водночас мінімальний вміст кремнію лімітується також його кількістю, що переходить у розплав чавуну при модифікуванні кремнієвмісними сплавами [6, 7].

Процес внутрішньоформового модифікування, на відміну від традиційних процесів ковшового модифікування, протікає в реакційній камері, що ізольована від повітряної атмосфери ливарною формою. Унаслідок цього виключається інтенсивне окислення модифікувальних елементів киснем повітря та витрата лігатури знижується мінімум у 2 рази [8]. Для внутрішньоформового модифікування характерне індивідуальне для кожного типу виливків (форм) дозування модифікатора й розплаву, причому дуже точним дозатором останнього є сама ливарна форма. Внутрішньоформове модифікування добре поєднується із застосуванням заливальних агрегатів, що гарантують заливання форм у вузькому температурному інтервалі однорідним за хімічним складом розплавом [9]. Разом із цими обставинами при внутрішньоформовому модифікуванні значний вплив на перебіг кристалізації має зниження на 60–100 °С температури взаємодії лігатури із розплавом і скорочення до мінімуму проміжку часу від початку модифікування до початку затвердіння виливка. Усе це сукупно забезпечує підвищення ефективності сфероїдизувального графіт-модифікування. Модифікування в ливарній формі дозволяє найбільш повно реалізувати потенціал комплексних лігатур щодо збільшення числа центрів кристалізації та зменшення кристалізаційного пере-

охолодження, зумовленого введенням у розплав магнію, створює максимально сприятливі умови для утворення великої кількості зародків графіту, зростання їх у формі сфероїдів та формування дрібнокристалічної структури. Такий характер кристалізації запобігає утворенню структурно-вільних карбідів та інтенсифікує феритизування металеві основи. Як наслідок, покращується якість високоміцного чавуну у виливках: підвищується відносне видовження й ударна в'язкість, знижується температурний поріг крихкості, зменшується міжзеренна ліквация, знижується схильність до утворення усадкових дефектів [10, 11].

Обґрунтування проблеми дослідження. Підвищена графітізувальна здатність внутрішньоформового модифікування створює об'єктивні передумови для застосування як матеріалу машинобудівних виливків високоміцних чавунів із розширеним діапазоном фізико-механічних властивостей за рахунок зниження рівня вмісту кремнію. Наявні технології виготовлення високоміцних чавунів феритного класу з високою пластичністю застаріли. Існуючі процеси потребують використання в шихті дорогих рафінованих доменних чавунів та проведення енергоємного двостадійного відпалу для графітізування цементиту й одержання феритної металеві матриці, яка забезпечує необхідні показники пластичності та ударної в'язкості, що значно збільшує витрати на виробництво [12, 13]. Традиційні процеси модифікування не завжди забезпечують одержання високоміцного чавуну із заданим оптимальним співвідношенням міцності, пластичності та ударної в'язкості для сучасної техніки. Нині актуальними є дослідження, спрямовані на підвищення пластичних властивостей високоміцних чавунів шляхом застосування високоефективного внутрішньоформового модифікування, що дає можливість значно зменшити масову частку кремнію в металі до межі, при якій виливки починають кристалізуватися з утворенням структурно-вільних карбідів.

Мета і методика дослідження. Метою роботи є визначення та оптимізація технологічних процесів одержання високоміцних чавунів із підвищеними показниками міцності, пластичності, ударної в'язкості при зниженні собівартості литих виробів застосуванням внутрішньоформового модифікування і зменшенням вмісту кремнію.

З метою отримання даних про закономірності зміни структури та властивостей виливків із модифікованого у формі високоміцного чавуну при варіюванні масові частки кремнію від 1 % до 2,8 % проведено спеціальне дослідження. Вихідний розплав отримували в електропечі ІСТ-016 переплавом чавуну, що містив (% мас.): 4,4 С; 0,21 Si; 0,3 Mn; 0,022 S; 0,073 P; 0,05 Cr. У піщаній формі відливали стандартні клиноподібні проби з товщиною основи 25 мм. Модифікування проводили в реакційній камері, розташованій між стояком і відцентровим шлаковиком, феросиліцій-магнієвою лігатурою ФСМг7. Форми заливали рідким чавуном із температурою $(1425 \pm 10)^\circ\text{C}$.

Зразки для хімічного аналізу, металографічних шліфів та механічних випробувань вирізали з нижньої частини проб. Термічне оброблення проводили на виливках-дублерах, одержаних в одній формі. Режим відпалу: нагрівання у печі до 880°C , витримка 2 год, охолодження з піччю до 720°C , витримка 1 год, охолодження з піччю до 650°C , витримка 1 год, охолодження на повітрі.

Аналіз отриманих даних. Дані, отримані при внутрішньоформовому модифікуванні, порівнювали з даними, отриманими при модифікуванні у ковші. При ковшовому модифікуванні кількість включень кулястого графіту в мікроструктурі проб становила 96 шт/мм² при середньому їх діаметрі 47 мкм (табл. 2), а при внутрішньоформовому модифікуванні кількість включень графіту збільшується у понад 4 рази і становить

Таблиця 2
Параметри графіту в мікроструктурі високоміцного чавуну

Спосіб модифікування	Кількість включень кулястого графіту, шт/мм ²	Середній діаметр графітних включень, мкм
Ківш	96	47
Реакційна камера ливарної форми	409	30

409 шт/мм², а середній їх діаметр зменшується до 30 мкм. Для внутрішньоформового модифікування характерний більш рівномірний розподіл у матриці та значно менша диференціація розмірів сфероїдів графіту. Розрахунки із застосуванням отриманих експериментальних даних показують, що в разі внутрішньоформового модифікування товщина утворюваної аустенітної оболонки навколо сфероїдів графіту, яка визначає довжину шляхів дифузії атомів вуглецю, скорочується більше як у 3 рази.

Унаслідок значного зниження схильності виливків до відбілу внутрішньоформове модифікування дозволяє до певної міри розширити діапазон регулювання властивостей виливків за рахунок зниження масової частки кремнію у високоміцному чавуні. Структурні діаграми (рис. 1) свідчать, що, порівняно з ковшовим, внутрішньоформове модифікування дозволяє знизити масову частку кремнію у сплаві на 1 % (з 2,2–2,3 % до 1,2–1,3 %) без ризику утворення структурно-вільних карбідів.

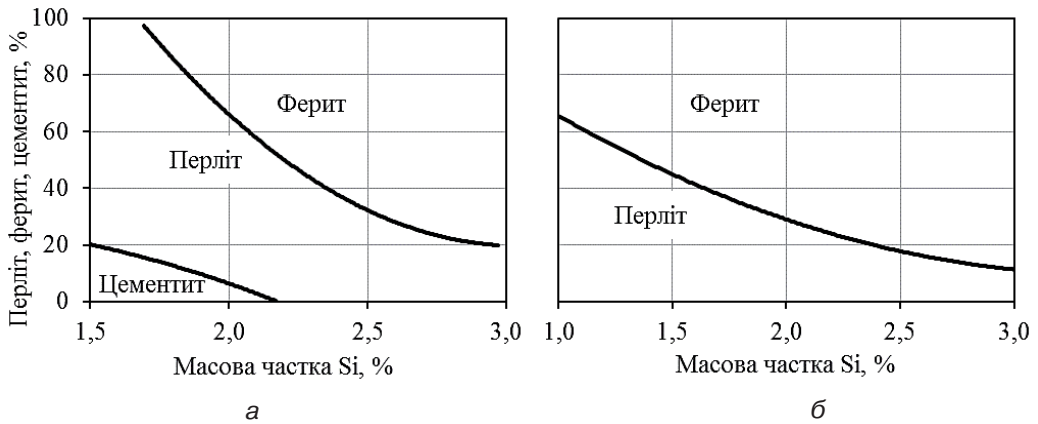


Рис. 1. Вплив масової частки кремнію на кількісні співвідношення складових мікроструктури високоміцного чавуну, отриманого модифікуванням розплаву у ковші (а) або у ливарній формі (б)

Унаслідок цього, як відомо, зменшується твердість, підвищується пластичність і в'язкість, змінюються теплопровідність, електропровідність, магнітна проникність, холодостійкість та інші властивості високоміцного чавуну. Важливе значення для якості виливків має високий ступінь феритизування металевої основи, який досягається у виливках при внутрішньоформовому модифікуванні (рис. 2). Експериментально встановлено, що в умовах проведеного дослідження критичною для початку утворення структурно-вільного цементиту при модифікуванні у ливарній формі є масова частка кремнію 0,9–1,1 % (рис. 2, а).

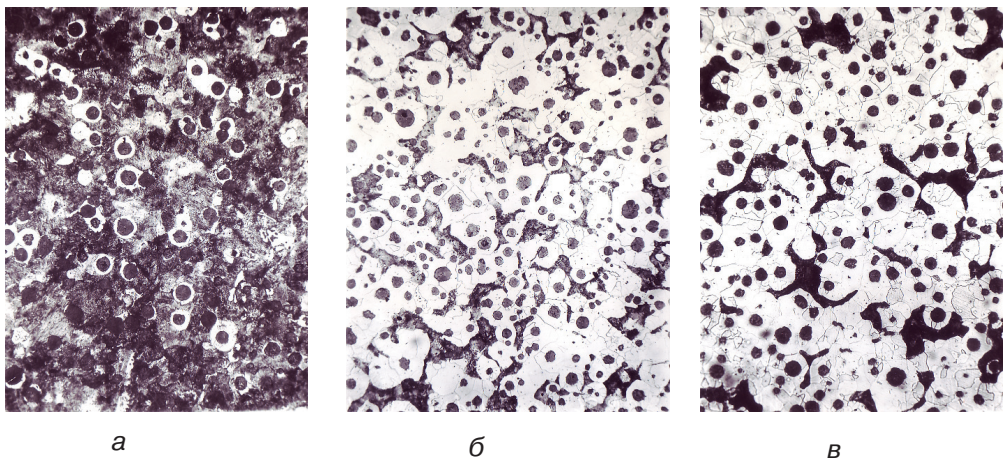


Рис. 2. Вплив кремнію на мікроструктуру виливків із високоміцного чавуну, модифікованого у ливарній формі: а) 1,0 % Si; б) 1,7 % Si; в) 2,8 % Si

Можливість зниження вмісту кремнію до рівня 1,0–1,6 %, прийнятого у виробництві феритного ковкого чавуну [14, 15], значно спрощує процедуру заміни останнього високоміцним чавуном, що забезпечує відомі технологічні та економічні переваги при одночасному підвищенні рівня механічних властивостей виливків. Результати механічних випробувань зразків металу високоміцного чавуну після внутрішньоформового модифікування свідчать, що при зменшенні масової частки кремнію до встановленої мінімальної кількості 1,3 % вже у литому стані (рис. 3) досягається досить сприятливе поєднання високих міцнісних і пластичних властивостей (тимчасовий опір під час розтягування $\sigma_B \geq 480$ МПа, відносне видовження $\delta \geq 15,0$ %) при твердості 156–163 НВ.

Застосування графітизувального відпалу дозволяє при оптимальній масовій частці кремнію отримати феритну металеву основу (рис. 4, б-в) і поєднання міцності $\sigma_B \geq 400$ МПа (рис. 5), характерної для феритного високоміцного чавуну, зі значно вищим відносним видовженням ($\delta \geq 22$ %) і високою ударною в'язкістю ($KC \geq 110$ Дж/см²) при твердості 134–156 НВ.

У високоміцному чавуні зі встановленим критично низьким вмістом 0,9–1,1 % Si при кристалізації утворюється до 7 % цементиту (рис. 2, а). Після графітизувального відпалу формується структура з феритно-перлітною металеву основу (90 % фериту, 10 % перліту), і ударна в'язкість зменшується до 80 Дж/см². Низьокремнієвий високоміцний чавун характеризується також покращеною оброблюваністю різанням.

У результаті проведених досліджень виявлено можливість суттєвого збільшення пластичності модифікованого в ливарній формі високоміцного чавуну з кулястим графітом за рахунок зменшення масової частки кремнію.

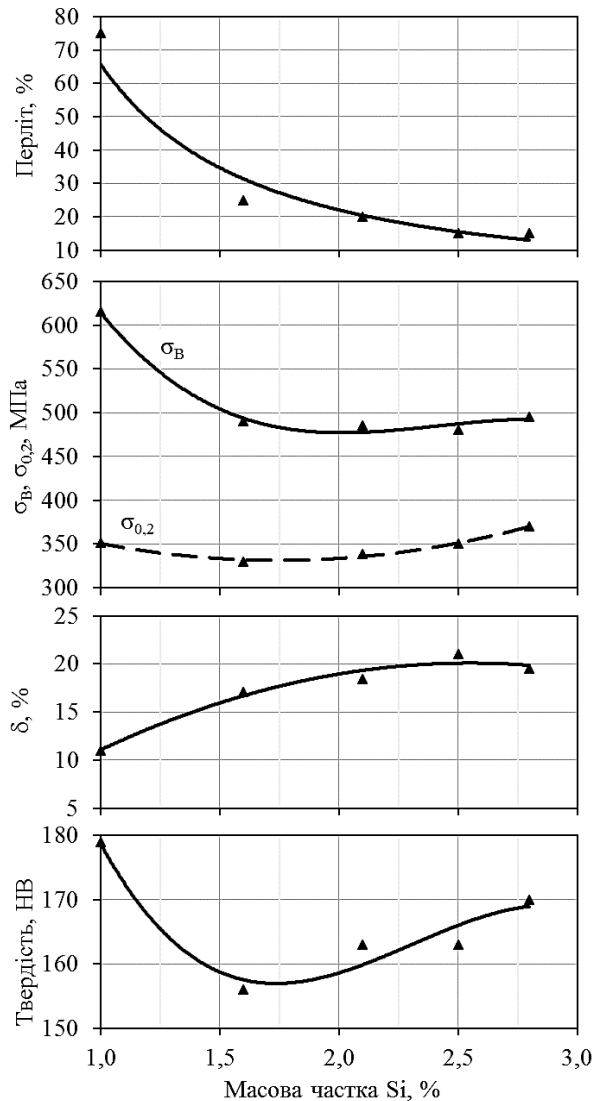
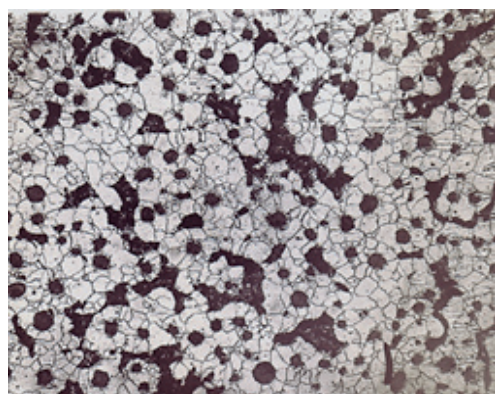
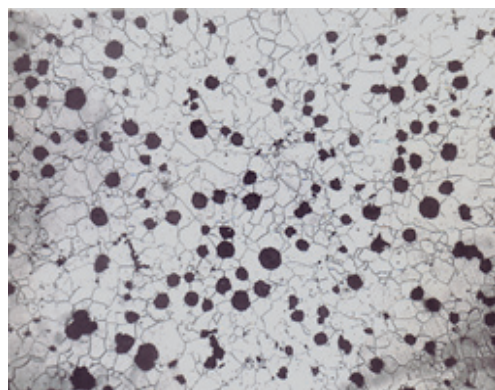


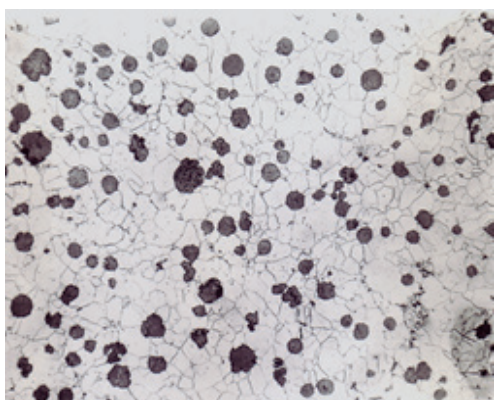
Рис. 3. Вплив масової частки кремнію на мікроструктуру та механічні властивості високоміцного чавуну в литому стані



а



б



в

Рис 4. Вплив кремнію на мікроструктуру високоміцного чавуну після термічного оброблення (відпалу): а) 1,0 % Si; б) 1,7 % Si; в) 2,8 % Si

відпалу формується феритна металева основа та поєднання типового для високоміцного чавуну феритного класу тимчасового опору під час розтягування $\sigma_B = 400\text{--}450$ МПа з більш високим відносним видовженням $\delta = 22\text{--}26$ %, ударною в'язкістю $KC = 100\text{--}120$ Дж/см² і низькою твердістю 134–156 НВ. Низьокремнієвий високоміцний чавун краще оброблюється різанням і рекомендується для широкого застосування у машинобудівних галузях промисловості.

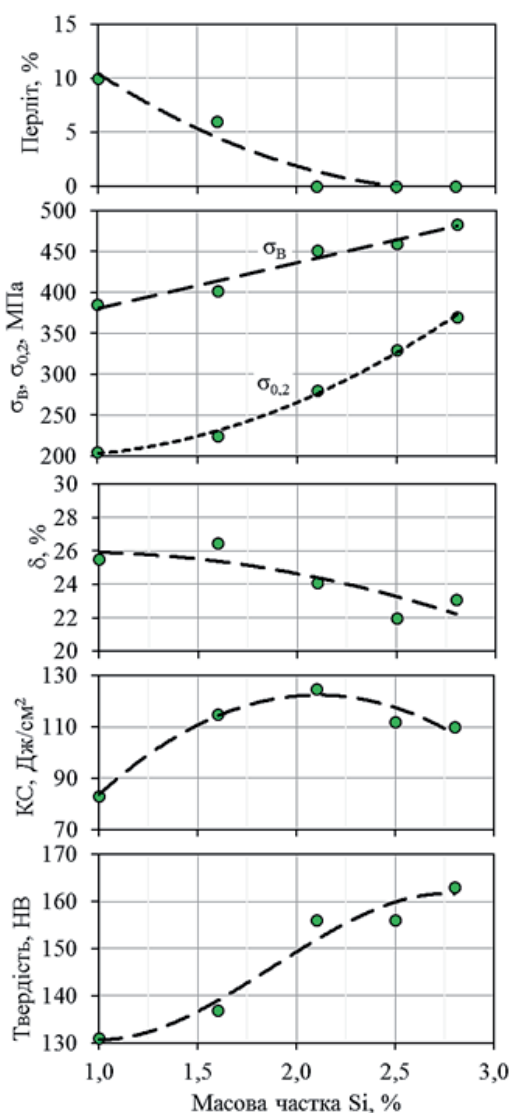


Рис. 5. Вплив масової частки кремнію на мікроструктуру і механічні властивості відпаленого високоміцного чавуну

Висновок

Встановлено, що, порівняно з ковшовим, внутрішньоформове модифікування дозволяє знизити масову частку кремнію у сплав з 2,2–2,3 % до 1,2–1,3 % без ризику утворення структурно-вільного цементиту у виливках, в яких після графітізуючого

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 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>.
- 4 Meehanite Specification Handbook 2013 . URL: <https://meehanitemetal.com/technical-lit>.
- 5 Harold T. Angus. Cast Iron: Physical and Engineering Properties (2nd edition). – Butterworth-Heinemann, 1976. 542 p.
- 6 Бубликов В. Б., Зеленый Б. Г., Шейко А. А., Берчук Д. Н., Козак Д. С. Перспективные направления развития технологий высокопрочных и специальных чугунов. *Процессы литья*. 2007, №1–2, с. 32–39.
- 7 Бубликов В. Б., Нарівський А. В., Бачинський Ю. Д., Ясинський О. О. Легований кремнієм високоміцний чавун та його застосування. *Процеси лиття*. 2020, №1, с. 20–29. <https://doi.org/10.15407/plit2020.01.020>.
- 8 Бубликов В. Б., Бачинський Ю. Д. Високоміцний чавун: прогрес технологій, підвищення властивостей. *Метал та лиття України*. 2018, № 7–8, с. 7–12.
- 9 Heine H. Comparing seven methods for producing ductile iron. *Foundry Management and Technology*. 1987, №8, pp. 38–41.
- 10 Бубликов В. Б. Підвищення модифікувального впливу на структуроутворення високоміцного чавуну. *Ливарне виробництво*. 2003, №8, с. 20–22.
- 11 Бубликов В. Б. Високоміцному чавуну – 60. *Ливарне виробництво*. 2008, №11, С. 2–8.
- 12 Rundman K. B. Heat treating of ductile irons. *ASM Handbook*. 1991, vol. 4, pp. 1484–1496.
- 13 Giacomini A., Boeri R. E., Sikora J. A. Carbide dissolution in thin wall ductile iron. *Materials Science and Technology*. 2003, vol. 19, is. 12, pp. 1755–1760. <https://doi.org/10.1179/02670830322-5009445>.
- 14 ДСТУ EN 1562:2019 «Литво. Ковкий чавун»
- 15 C. J. van Ettinger. Oil quenched malleable iron, the strength of an old material in a “green cast” development and a new future. *China Foundry*. 2010, Vol. 7, is. 4, pp. 447–455.

Надійшла 25.05.2023

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 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>.
- 4 Meehanite Specification Handbook 2013. URL: <https://meehanitemetal.com/technical-lit>.
- 5 Harold T. Angus. (1976). Cast Iron: Physical and Engineering Properties (2nd edition). Butterworth-Heinemann, 542 p.
- 6 Bublikov, V. B., Zelenyi, B. G., Sheiko, A. A., Berchuk, D. N., Kozak, D. S. (2007). Perspective directions of high-strength and special cast irons technologies development. *Casting processes*, no. 1–2, pp. 32–39 [in Russian].

- 7 Bublikov V. B., Narivskiy A. V., Bachynskiy Yu. D., Yasynskiy O. O. (2020). Silicon alloyed ductile cast iron and its application. *Casting processes*, no. 1, pp. 20–29. <https://doi.org/10.15407/plit2020.01.020> [in Ukrainian].
- 8 Bublikov V. B., Bachynskiy Yu. D. (2018). Ductile cast iron: the progress of technologies, an improvement of properties. *Metal and Casting of Ukraine*, no. 7–8, pp. 7–12. [in Russian].
- 9 Heine H. (1987). Comparing seven methods for producing ductile iron. *Foundry Management and Technology*. №8, pp. 38–41.
- 10 Bublikov V. B. (2003). Increasing of modifying impact on cast iron structure formation. *Foundry. Technologies and Equipment*, no. 8, pp. 20–22 [in Russian].
- 11 Bublikov V. B. (2008). High-strength cast iron – 60. *Foundry. Technologies and Equipment*, no. 11, pp. 2–8 [in Russian].
- 12 Rundman K. B. (1991). Heat treating of ductile irons. *ASM Handbook*. Vol. 4, pp. 1484–1496.
- 13 Giacomini A., Boeri R. E., Sikora J. A. (2003). Carbide dissolution in thin wall ductile iron. *Materials Science and Technology*. Vol. 19, is. 12, pp. 1755–1760. <https://doi.org/10.1179/02670830322-5009445>
- 14 Ukrainian standard DSTU EN 1562:2019 «Founding. Malleable cast irons» [in Ukrainian].
- 15 C. J. van Ettinger. (2010). Oil quenched malleable iron, the strength of an old material in a «green cast» development and a new future. *China Foundry*. Vol. 7, is. 4, pp. 447–455.

Received 25.05.2023

V.B. Bublikov, Dr. Sci. (Engin.), Senior Research Scientist, Department Chair;

e-mail: otdel.vch@gmail.com; ORCID 0000-0003-4465-9256

Yu.D. Bachynskiy, 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)

INCREASING OF DUCTILE CAST IRON PLASTICITY VIA IN-MOLD MODIFYING OF MELT WITH LOWERED SILICON CONTENT

Ductile cast irons with increased plasticity are widely used in production of machine parts that work under shock-cyclic and dynamic loads as well as at low temperatures. The plasticity of ductile cast iron is determined mainly by its chemical composition, modification method, casting method and type of heat treatment. In the world ductile cast irons with a twice higher minimum relative elongation as stipulated by the Ukrainian state standard are common and the manufacturing technologies of such cast irons are based on the use of expensive refined cast irons in the charge and energy-intensive heat treatment. The article presents the results of influence of silicon content reducing in ductile cast iron composition on changes in its structure and mechanical properties. The research was carried out using cheap charge materials and highly effective ferrosilicon-magnesium modifiers with low energy consumption on castings heat treatment. Experimentally shown that during ladle modifying chill begins to form in the casting metal at silicon content of 2.2–2.3 %wt., while at in-mold modifying using up to 7 % of cementite is formed during the crystallization of ductile cast iron with a Si content of 0.9–1.1 %wt. The mechanical properties of in-mold ductile cast iron with 1.2–1.3 %wt. Si (which guarantees a metal base obtaining without cementite inclusions) in the cast state correspond to the GJS480-15 grade at Brinell hardness of 156–163 HB. After graphitizing annealing this ductile cast iron has a ferritic metal base and a corresponding for it combination of tensile strength $R_m = 400–450$ MPa with a higher relative elongation $A = 22–26$ %, impact tough-

ness $KS = 100-120 \text{ J/cm}^2$ and with low hardness of 134–156 HB. The results of the research show a significant increase in the plasticity of ductile cast iron with nodular graphite modified in a foundry mold due to silicon content reducing and create preconditions for the development of new cast parts designs for modern technic with given high mechanical properties and performance characteristics and of high-efficiency economic technologies for their production.

Keywords: ductile cast iron, elongation, modifying, silicon, structure.