
КРИСТАЛІЗАЦІЯ ТА СТРУКТУРОУТВОРЕННЯ СПЛАВІВ

УДК 669.15:546.28

В. Б. Бубликов, д-р техн. наук, ст. наук. співр., зав. відділом,
e-mail: otdel.vch@gmail.com

А. В. Нарівський, чл.-кор. НАН України, директор,
e-mail: opprs@ptima.kiev.ua

Ю. Д. Бачинський, канд. техн. наук, ст. наук. співр.,
e-mail: 909_bach@ukr.net

О. О. Ясинський, наук. співр., e-mail: alexyasinskyi@gmail.com

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

ЛЕГОВАНИЙ КРЕМНІЄМ ВИСОКОМІЦНИЙ ЧАВУН ТА ЙОГО ЗАСТОСУВАННЯ

У даний час в багатьох країнах активно ведуться роботи по використанню легування кремнієм для створення нових марок високоміцного чавуну з підвищеним рівнем механічних властивостей і поліпшеним механічним обробленням. У статті наводяться експериментальні дані про вплив кремнію (масова частка до 4 %) на формування структури і рівень механічних властивостей високоміцного чавуну з кулястим графітом. Ефективність легування кремнієм залежить від складу вихідного розплаву, модифікатора, способу модифікування, швидкості охолодження виливків. Показано, що легування кремнієм дозволяє усунути відбій у виливках і забезпечує формування зміцненої феритної металевої основи. У результаті цього одночасно підвищуються міцність і пластичність високоміцного чавуну. Встановлено, що порівняно з ковшовим при внутрішньоформовому модифікуванні щільність розподілу включень кулястого графіту збільшується в 3–5 разів, а кількість фериту в структурі – в 1,8–2,0 рази. Легований кремнієм феритний високоміцний чавун, отриманий внутрішньоформовим модифікуванням, характеризується високими значеннями міцності ($\sigma_B = 550\text{--}620$ МПа, $\sigma_{0.2} = 420\text{--}500$ МПа) та пластичності ($\delta = 11\text{--}17\%$). За показниками міцності розроблений високоміцний чавун значно перевершує стандартні феритні марки, що містять до 2,9 %мас. кремнію, а за пластичністю – феритно-перлітні. Важливою перевагою легованого кремнієм високоміцного чавуну є рівномірний розподіл твердості виливків і поліпшення їх оброблюваності різанням. Сукупність зазначених показників дозволяє значно поліпшити якість литих виробів з високоміцного чавуну і підвищити їх конкурентоздатність.

Ключові слова: високоміцний чавун, легування, кремній, зміцнення, ферит, структура, механічні властивості, виливок.

Високоміцний чавун з кулястим графітом є унікальним залізовуглецевим сплавом, при кристалізації якого формується композитний матеріал з металевої матриці і рівномірно розподілених в ній мікроскопічних включень графіту кулястої форми діаметром від 5 до 100 мкм (у великих товстостінних виливках 200–350 мкм).

Оптимальне поєднання фізико-хімічних, ливарних, механічних і експлуатаційних характеристик, а також економічність виробництва забезпечують широке застосування такого чавуну в високотехнологічній техніці всіх галузей промисловості.

Останніми роками за кордоном активно проводяться науково-дослідні роботи зі створення нових марок високоміцного чавуну і технологій отримання з них литих виробів підвищеної якості [1–3]. Ці дослідження спрямовані на збільшення міцності (σ_B , $\sigma_{0,2}$) при збереженні високої пластичності високоміцних чавунів з феритною (ВЧ400-15) або феритно-перлітною (ВЧ450-10) матрицею. Для виробів з перлітно-феритних чавунів (ВЧ500-7, ВЧ600-3) вирішуються завдання підвищення в 2,0–2,5 рази пластичності при одночасному поліпшенні їх оброблюваності різанням. Постійно збільшується потреба промисловості у виробках з високоміцних чавунів з тимчасовим опором під час розтягування $\sigma_B = 500\text{--}600$ МПа і відносним видовженням δ до 15 %. Підвищені характеристики міцності цих чавунів забезпечує легування α -твердого розчину (фериту) нікелем і (або) міддю, які не утворюють карбідів [4, 5]. При цьому більш економічним процесом є легування чавуну міддю, яка приблизно в 3 рази дешевша нікелю.

Поряд із зазначеними елементами твердий розчин можна зміцнити за рахунок легування чавуну дешевшим кремнієм. Атоми кремнію замінюють атоми заліза в кристалічній решітці, і в чавуні утворюється твердий розчин заміщення. Кремній зменшує розчинність вуглецю в рідкому чавуні і сприяє формуванню графіту в виливках при їх затвердінні. Після легування кремнієм зменшується розчинність вуглецю в закристилізованому чавуні, в результаті чого інтенсифікується дифузія вуглецю з аустеніту до включень графіту при евтектоїдному перетворенні, що сприяє утворенню фериту в литому металі. У високоміцному чавуні кремній є основним графітізуючим елементом і його масова частка зазвичай не перевищує 3,0 %. При більшій масовій частці в розплаві кремній виступає легувальним елементом для чавуну [6].

Після легування розплаву кремнієм в структурі високоміцного чавуну не утворюються карбіди і підвищуються його механічні властивості. Однак, при певній масовій частці кремнію в розплаві, яка залежить від кількості шкідливих домішок (фосфор, сірка та ін.), способу модифікування, швидкості охолодження виливків і інших технологічних факторів, відбувається окрихчування чавуну. У результаті цього знижуються пластичність і, особливо, ударна в'язкість чавунних виробів. Незважаючи на це, кремній в оптимальній його кількості ефективно використовується для легування розплавів в процесах отримання нових марок високоміцного чавуну.

Спочатку легування кремнієм було використане для поліпшення оброблюваності феритно-перлітного високоміцного чавуну типу ВЧ500-7 [7], який в литому стані характеризується широкими діапазонами коливання кількості перліту в структурі виливків і величини твердості за Брінеллем (від 1700 до 2300 МПа), що ускладнює оброблення різанням. Для заміни цього сплаву в Швеції розроблено висококремнієвий феритний високоміцний чавун, який містить (%мас.) 3,3 C; 3,75 Si; $\leq 0,3$ Mn; $\leq 0,05$ P; $\leq 0,02$ S; 0,02–0,08 Mg і має наступні характеристики міцності – $\sigma_B > 500$ МПа, $\sigma_{0,2} > 360$ МПа, $\delta > 10$ %, $HB = 1850\text{--}2150$ МПа. Застосування створеного високоміцного чавуну для виготовлення маточин, корпусів і деталей ходової частини вантажних автомобілів фірми «Volvo» дозволило знизити вартість механічної обробки литих виробів на 10 %. Дослідження показали, що у феритного високоміцного чавуну, зміцненого кремнієм, температура в'язко-крихкого перетворення нижча, а втомна міцність на 11 % вища порівняно з високоміцним чавуном марки ВЧ500-7 [1, 7]. Наразі в багатьох країнах кремній використовують для легування з метою отримання нових марок високоміцного чавуну з підвищеним рівнем механічних властивостей і поліпшеною їх оброблюваністю в литому стані [1, 8–10].

З висококремнієвого високоміцного чавуну виготовляють литі маточини, важелі та інші деталі підвіски автомобільних коліс, корпуси підшипників, гідроциліндри блоку [8]. Стійкість різального інструменту при механічному обробленні високоміцного чавуну з феритною матрицею підвищується від 50 до 60 % [1].

У даний час деталі для енергосилових установок потужністю $\geq 4,5$ МВт виготовляють з високоміцного чавуну «SiWind», який леговано кремнієм і має наступні механічні властивості: $\sigma_B = 410$ (459) МПа, $\sigma_{0,2} = 330$ (344) МПа, $\delta = 10$ (17) %. З такого чавуну виготовляють також корпусні виливки масою до 40 т з товщиною стінок до 200 мм [9].

Однак широке застосування нових марок високоміцного чавуну, легованого кремнієм, стримується недостатньою вивченістю впливу багатьох технологічних параметрів на процеси формування міцнісних властивостей у литих виробах. Тому метою даного дослідження є вивчення впливу складів вихідного розплаву і модифікатора, способу модифікування, швидкості охолодження на структуру і механічні властивості виливків з високоміцного чавуну, який леговано кремнієм.

Як зазначено вище, кремній інтенсифікує процес графітизації при евтектичному і евтектоїдному перетвореннях. З підвищенням масової частки кремнію збільшуються кількість графіту в структурі і фериту в металевій матриці високоміцного чавуну. У результаті цього знижується схильність до утворення відбілу і усадкових дефектів у виливках. З підвищенням масової частки кремнію відбувається зміцнення α -твердого розчину (фериту) і змінюється співвідношення перліт/ферит в металевій основі чавуну. Внаслідок цього міцність і твердість чавунних виливків будуть збільшуватися або знижуватися.

На першому етапі вивчали вплив масової частки кремнію в розплаві на структуру і механічні властивості високоміцного чавуну, який модифікували в ковші. Плавку чавуну проводили в індукційній електропечі ІСТ-016. В якості шихти використовували переробний ливарний чушковий чавун марки ПЛ2 (група ІІ, клас А, категорія 3, згідно ДСТУ 3133-95). Задану масову частку кремнію в чавуні забезпечували шляхом введення в розплав розрахованої кількості феросиліцію ФС75. Чавун модифікували сплавом FeSi-MgCaPЗМ (%мас.: 48,0 Si; 7,85 Mg; 7,7 Ca, 1,7 PЗМ, решта Fe). Кінцева масова частка хімічних елементів у модифікованому високоміцному чавуні була наступною (%): 3,6–3,9 C; 2,0–3,5 Si; 0,38–0,43 Mn; 0,045–0,06 Mg; 0,018–0,024 S; 0,06–0,09 P; решта Fe.

Для дослідження впливу швидкості охолодження виливків на процес формування структури в високоміцному чавуні з різною масовою часткою кремнію в сирих піщано-глиняних формах отримували пластини товщиною 5; 10; 15; 20 мм, шириною 40 мм і висотою 200 мм. Для визначення механічних властивостей відливали стандартні клиновидні проби масою ~ 7 кг (ДСТУ 3925-99).

Залежності впливу масової частки кремнію в розплаві на ступінь графітизації і кількість включень кулястого графіту в пластинах різної товщини з високоміцного чавуну представлено на рис. 1. У пластинах товщиною від 5 до 20 мм при масовій частці кремнію 2,5–3,5 % цементит був відсутній і кількість включень кулястого графіту залежно від товщини пластини змінювалась в межах 70–170 шт./мм². Зі збільшенням товщини пластини кількість включень кулястого графіту зменшується в результаті зниження швидкості охолодження. Видно, що в міру підвищення масової частки кремнію в чавуні ступінь його графітизації збільшується. При кількості Si в чавуні $\sim 3,5$ % металева основа пластини товщиною 20 мм практично повністю складається з фериту.

Визначили, що в структурі клиновидних проб з високоміцного чавуну цементиту не було. Включення кулястого графіту діаметром 45–55 мкм розподілені з щільністю 25–35 шт./мм². При частці Si в чавуні $\sim 2,0$ % кількість фериту в металевій основі клиновидних виливків мінімальна (~ 40 %). З підвищенням масової частки кремнію до 3,5 % кількість фериту в структурі цих виливків збільшується до 95 %, а їх твердість не перевищує 2100 МПа (рис. 2).

При зміні масової частки кремнію в литому чавуні від 2,0 до 3,5 % тимчасовий опір під час розтягування σ_B зменшується на 8–9 %, а відносне видовження δ збільшується в 2,5 рази (з 5 до 12,5 %). Така зміна механічних властивостей литих виробів пояснюється різним впливом кремнію в чавуні на них. З одного боку, кремній сприяє феритизації чавуну, знижуючи при цьому міцність і підвищуючи пластичність

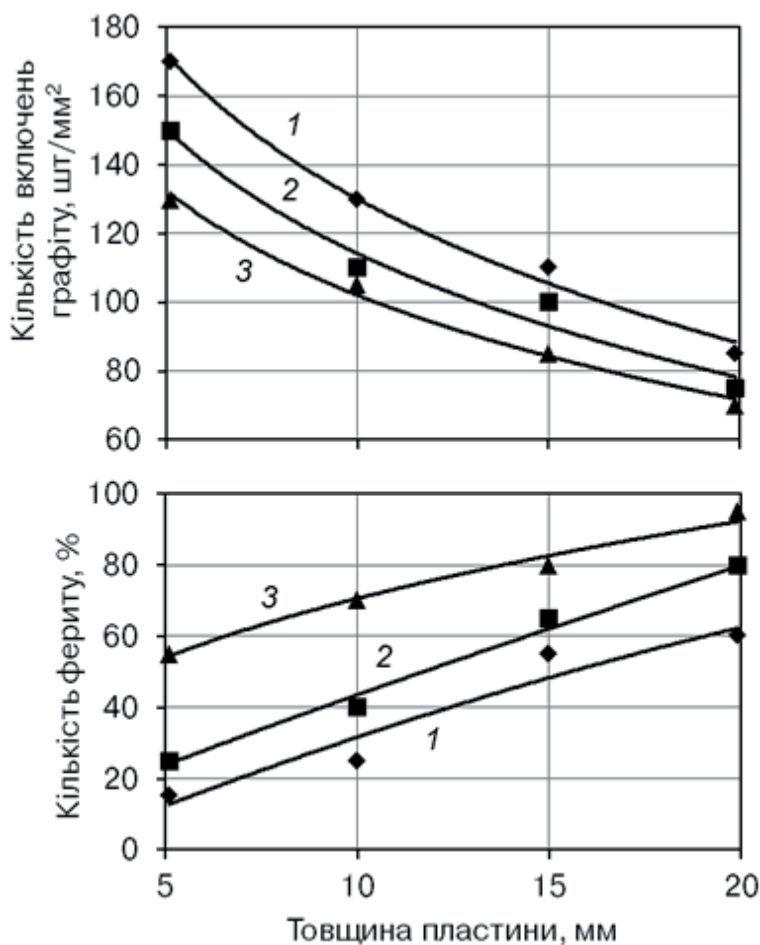


Рис. 1. Вплив масової частки кремнію (1–2,5 % Si; 2–3,0 % Si; 3–3,5 % Si) на мікроструктуру високоміцного чавуну в пластинах різної товщини

і в'язкість литого металу. З іншого боку, в результаті збільшення ступеня легування чавуну кремнієм при певній його кількості відбувається зміцнення. При масовій частці кремнію в металі на рівні 3,0–3,5 % тимчасовий опір під час розтягування σ_B високоміцного чавуну перевищує 500 МПа, а відносне видовження δ – 10 %.

У роботі вивчено також вплив масової частки кремнію в розплаві на структуру і механічні властивості модифікованого в формі високоміцного чавуну у виливках. Для цього в ливниково-живильній системі виливків передбачено протокові реактори, в яких рідкий чавун при заливанні форм взаємодіє з модифікатором. Внутрішньоформове модифікування чавуну порівняно з ковшовим дозволяє збільшити в 3–4 рази щільність розподілу включень кулястого графіту в структурі виливків при зменшенні їх розміру [11–13].

Для отримання розплаву в індукційній печі ICT-0, 16 використовували переробний високоякісний чавун марки ПВК2 з більш низькою масовою часткою сірки і фосфору (%: 4,41 C; 0,62 Si; 0,48 Mn; 0,014 S; 0,04 P; решта Fe). Необхідну кількість кремнію в виплавленому чавуні забезпечували введенням в розплав феросиліцію ФС75. Модифікування в ливарній формі проводили феросиліцій-магнієвою лігатурою марки ФСМг7. Високоміцний чавун у виливках мав наступну масову частку хімічних елементів (%): 3,27–3,51 C; 1,65–3,92 Si; до 0,04 Cr; 0,40–0,47 Mn; 0,040–0,055 Mg; 0,009–0,012 S; 0,025–0,035 P; решта Fe.

З високоміцного чавуну з різною масовою часткою в ньому кремнію отримували циліндричні втулки масою ~7,8 кг із зовнішнім діаметром 70 мм, внутрішнім – 40 мм

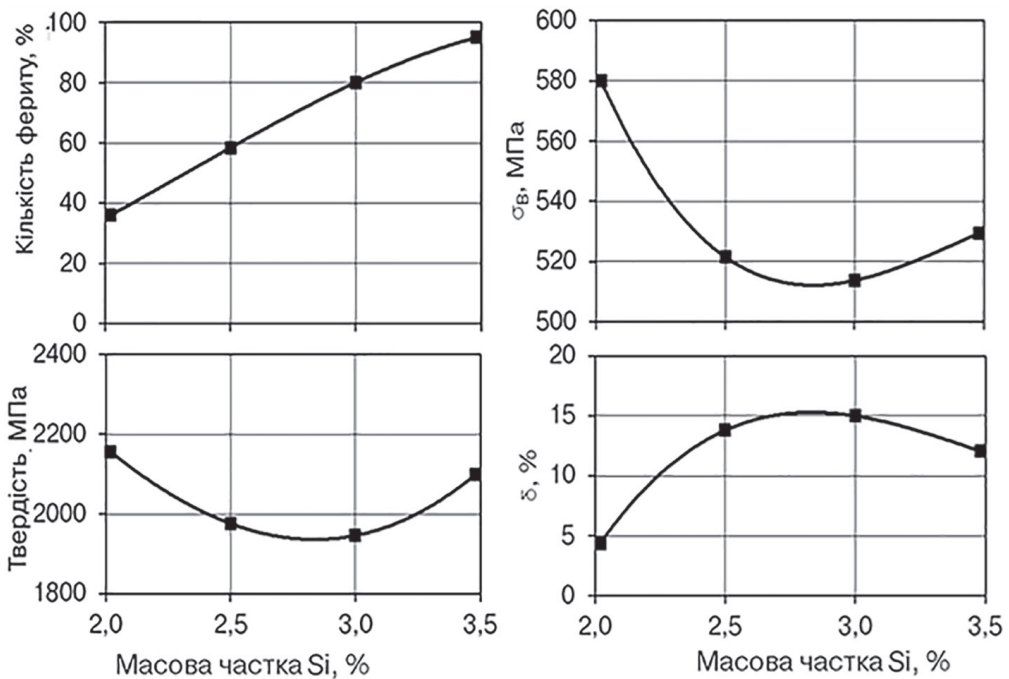


Рис. 2. Вплив кремнію на кількість фериту та механічні властивості високоміцного чавуну, отриманого модифікуванням у ковші розплаву з передільного чавуну марки ПЛ2

і висотою 200 мм. Із втулок вирізали зразки для хімічного аналізу, металографічних шліфів і механічних випробувань.

У структурі втулок з модифікованого в ливарній формі високоміцного чавуну діаметр включень кулястого графіту склав 25–35 мкм при щільності їх розподілу 310–360 шт./мм². Після модифікування розплаву в ковші, проведеного для порівняння, середній діаметр включень графіту в структурі високоміцного чавуну збільшується до 47 мкм, а щільність їх розподілу не перевищує 95 шт./мм². Наведені дані свідчать про те, що при внутрішньоформовому модифікуванні збільшується (більш ніж в 3 рази) кількість центрів кристалізації графіту в чавуні. Через це скорочуються шляхи дифузії вуглецю з аустеніту до включень графіту, що інтенсифікує процес утворення фериту в чавуні. При наявності в чавуні кремнію на рівні 2 % кількість фериту в металевій основі виливків перевищує 80 % (рис. 3). У міру підвищення масової частки кремнію в чавуні кількість фериту збільшується. Зі збільшенням кількості кремнію від 2,0 до 3,0 % тимчасовий опір під час розтягування σ_b становить 490–505 МПа і відносне видовження δ перевищує 18 %, тоді як умовна границя плинності $\sigma_{0,2}$ змінюється від 350 до 425 МПа, а твердість за Брінеллем збільшується з 1620 до 1900 МПа. При 3,2–3,9 % кремнію в рідкому металі збільшуються кількість фериту в структурі (з 93 до 100 %), σ_b (з 550 до 620 МПа), $\sigma_{0,2}$ (з 449 до 505 МПа), твердість HB (з 1850 до 2170 МПа) і знижується відносне видовження δ (з 18 до 11 %).

У промислових умовах розплав для отримання високоміцного чавуну виплавляли в індукційній електропечі ІЧТ-10. Як шихту використовували передільний високоякісний чавун марки ПВК3 в кількості 50 % і 50 % звороту від виробництва високоміцного чавуну. Використання такої шихти дозволило отримати рідкий метал з низькою масовою часткою шкідливих домішок – $S \leq 0,015$ % і $P \leq 0,06$ %. Чавун модифікували FeSiMg лігатурою в протоковому реакторі піщаної форми при отриманні корпусного виливка масою ~4 кг з товщиною стінок 4–15 мм. Дослідження проводили на зразках високоміцного чавуну, вирізаних із стінки виливка товщиною 10 мм.

Отриманий в виливках високоміцний чавун мав наступну масову частку хімічних елементів, в %: 3,40–3,61 C; 2,65–3,92 Si; 0,25–0,37 Mn; 0,035–0,050 Mg; 0,010–0,013 S; 0,035–0,055 P; решта Fe.

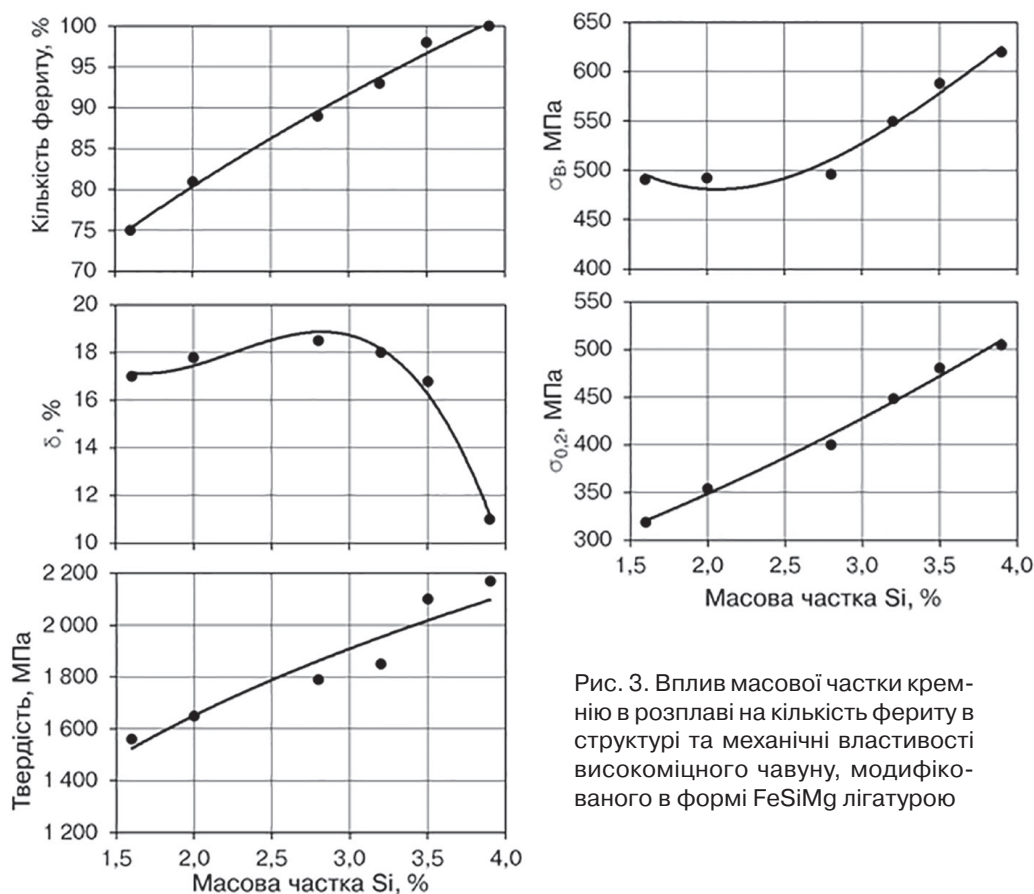


Рис. 3. Вплив масової частки кремнію в розплаві на кількість фериту в структурі та механічні властивості високоміцного чавуну, модифікованого в формі FeSiMg лігатурою

У мікроструктурі дослідних виливків (рис. 4) спостерігалися включення графіту кулястої форми розміром 20–25 мкм зі щільністю їх розподілу 450–610 шт./мм². Встановлено, що при внутрішньоформовому модифікуванні розплаву щільність розподілу кулястих включень графіту збільшується в 4–5 разів, а кількість фериту в структурі металевої основи чавуну – в 1,8–2,0 рази порівняно з обробленням його в ковші.

З підвищенням масової частки кремнію в високоміцному чавуні від 2,65 до 3,92 % пропорційно збільшується кількість фериту в його структурі (рис. 5). Тимчасовий опір чавуну під час розтягування σ_b підвищується на 4,4 % (з 570 до 595 МПа), а його умовна границя плинності $\sigma_{0,2}$ – на 26,6 % (з 375 до 475 МПа). При цьому відносне видовження і твердість змінюється в межах 12–17 % і 1650–1950 МПа, відповідно. Отже, легування фериту кремнієм більше впливає на пластичні характеристики високоміцного чавуну у виливках порівняно з показниками міцності. Виливки з такого чавуну легко обробляються різанням на верстатах-автоматах. Після механі-

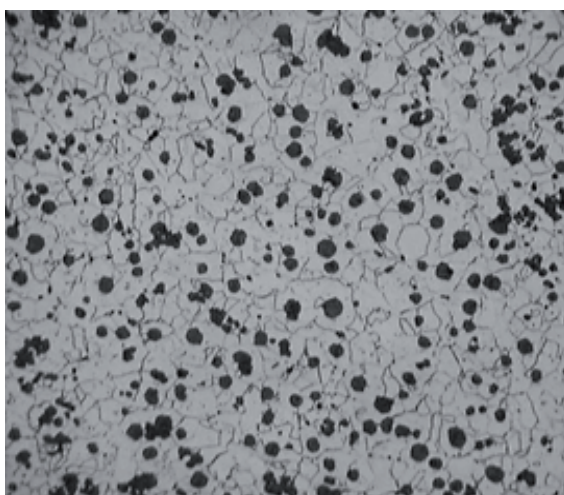


Рис. 4. Мікроструктура корпусного виливка з феритного високоміцного чавуну з масовою часткою кремнію 3,92 %, ($\times 100$)

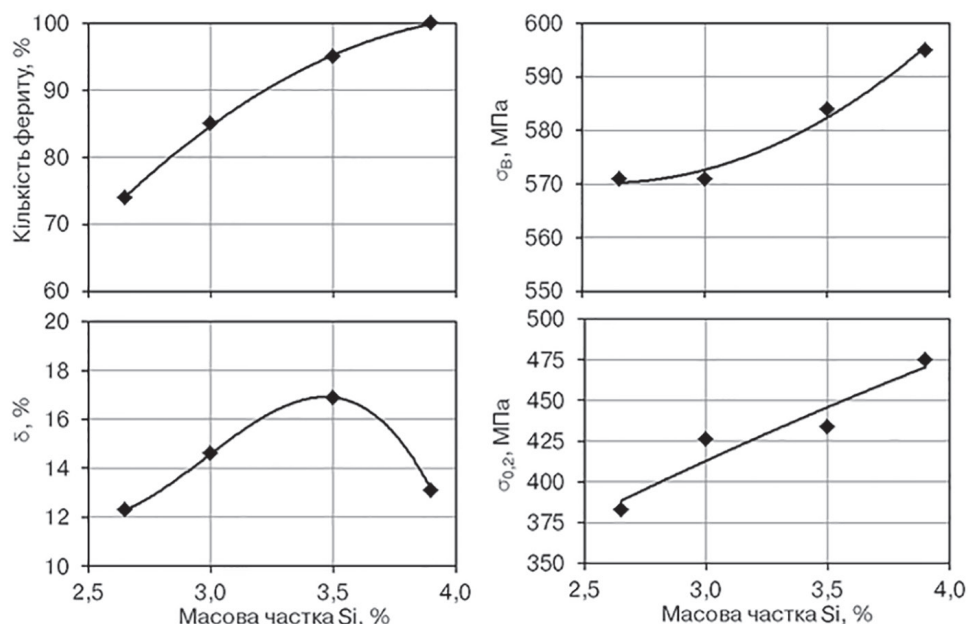


Рис. 5. Вплив масової частки кремнію на кількість фериту та механічні властивості металу виливків корпусів з високоміцного чавуну, отриманого з використанням внутрішньоформового модифікування розплаву

ного оброблення всі литі корпуси успішно пройшли гідровипробування надлишковим тиском 450 атм.

Таким чином, використання легування чавуну кремнієм в кількості 3,50–3,92 % і способу внутрішньоформового модифікування розплаву забезпечує отримання у виливках з товщиною стінки 10 мм високоміцного чавуну з більш високими механічними властивостями ($\sigma_B > 580$; $\sigma_{0.2} > 425$ МПа при $\delta > 12$ %), ніж передбачено стандартом ДСТУ3925-99.

Висновки

- За результатами досліджень високоміцних феритних чавунів з кулястим графітом, зміцнених кремнієм, встановлено, що вони мають високі значення умовної границі плинності, тимчасового опору під час розтягування і відносного видовження, а також однорідну твердість і поліпшену механічну оброблюваність, що відкриває перспективу створення групи нових марок високоміцного чавуну для виливків, механічні властивості яких отримують в литому стані.

- Експериментально встановлено, що леговані кремнієм високоміцні чавуни за показниками міцності значно перевершують стандартні феритні марки з більш низькою масовою часткою кремнію, а за пластичністю (відносно видовження) – феритно-перлітні марки високоміцного чавуну аналогічної міцності σ_B . Важливою перевагою також є висока умовна границя плинності $\sigma_{0.2}$, більш однорідний розподіл механічних властивостей і твердості, поліпшення оброблюваності різанням.

- Зі збільшенням масової частки кремнію в високоміцному чавуні збільшується кількість графітної фази, знижується схильність до утворення відбілу і усадкових дефектів, підвищується ступінь феритизації металевої основи, що, в сукупності, дозволяє значно поліпшити показники якості литих виробів і підвищити їх конкурентоздатність на ринку.

Легований кремнієм високоміцний чавун використовується для виготовлення відповідальних деталей сучасного машинобудування.

Список літератури

1. *Wolfram Stets, Herbert Löblich, Gert Gassner, Peter Schumacher*. Solution strengthened ferritic ductile cast iron properties, production and application // *International Journal of Metalcasting*. – April 2014. – Vol. 8. – Issue 2. – pp. 35–40.
2. *Schoenborn S., Kaufmann H., Sonsino C. M., Heim R.* Cumulative damage of high-strength cast iron alloys for automotive applications // *Procedia Engineering*. – 2015. – Vol. 101. – pp. 440–449.
3. *Gonzaga R. A.* Influence of ferrite and pearlite content on mechanical properties of ductile cast irons // *Materials Science & Engineering A*. – 2013. – Vol. 567. – pp. 1–8.
4. Бубликов В. Б., Ясинский А. А., Сыропоршнев 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.
5. Бубликов В. Б., Ясинский А. А., Сыропоршнев Л. Н., Бачинский Ю. Д., Козак Д. С. Медь в высокопрочном чугуне // *Процессы литья*. – 2010. – № 3. – С. 46–57.
6. Бунин К. П., Малиночка Я. Н., Таран Ю. Н. Основы металлографии чугуна. – М.: Металлургия. – 1969. – 416 с.
7. *Lars Erik Björkgren, Kenneth Hamberg*. Silicon alloyed ductile iron with excellent ductility and machinability // *Foundryman*. – February 2001. – pp. 42–48.
8. *Philipp Weiß, Anze Tekavcic, Andreas Bührig-Polaczek*. Mechanistic approach to new design concepts for high silicon ductile iron // *Materials Science and Engineering: A*. – 2018. – Vol. 713. – pp. 67–74.
9. *Peter Mikoleizik, Georg Geier*. SiWind – Development of materials for offshore wind power plants of the multi megawatt range // *Casting Plant & Technology*. – 2015. – Issue 2. – pp. 8–15.
10. *Stelian Stan, Iulian Riposan, Mihai Chisamera, Iuliana Stan*. Solidification Characteristics of Silicon-Alloyed Ductile Cast Irons // *Journal of Materials Engineering and Performance*. – 2019. – Vol. 28. – Issue 1. – pp. 278–286.
11. Бубликов В. Б. Повышение модифицирующего воздействия на структурообразование чугуна // *Литейное производство*. – 2003. – № 8. – С. 20–22.
12. Бубликов В. Б. Высокопрочному чугуну – 60. // *Литейное производство*. – 2008. – № 11. – С. 2–8.
13. Бубликов В. Б., Бачинский Ю. Д. Высокопрочный чугун: прогресс технологий, повышение свойств // *Металл и литье Украины*. – 2018. – № 7–8. – С. 7–12.

Поступила 26.12.2019

References

1. *Wolfram Stets, Herbert Löblich, Gert Gassner, Peter Schumacher* (2014) Solution strengthened ferritic ductile cast iron properties, production and application. *International Journal of Metalcasting*, April, Vol. 8, Issue 2, pp. 35-40 [in English].
2. *Schoenborn, S., Kaufmann, H., Sonsino, C. M., Heim, R.* (2015) Cumulative damage of high-strength cast iron alloys for automotive applications. *Procedia Engineering*, Vol. 101, pp. 440-449 [in English].
3. *Gonzaga, R. A.* (2013) Influence of ferrite and pearlite content on mechanical properties of ductile cast irons. *Materials Science & Engineering A*, vol. 567, pp. 1-8 [in English].
4. *Bublikov, V. B. et al.* (2011). Influence of nickel on the structure and mechanical properties of castings made of high-strength cast iron. *Protsessy litya*, no. 2, pp. 24-34 [in Russian].
5. *Bublikov, V. B. et al.* (2010) Copper in high-strength cast iron. *Protsessy litya*, no. 3, pp. 46-57 [in Russian].
6. *Bunin, K. P., Malinochka, Ya.N., Taran, Yu.N.* (1969) Fundamentals of cast iron metallography. Moscow: Metallurgiya Publ., 416 p. [in Russian].
7. *Lars Erik Björkgren, Kenneth Hamberg* (2001) Silicon alloyed ductile iron with excellent ductility and machinability. *Foundryman*, February, pp. 42-48 [in English].
8. *Philipp Weiß, Anze Tekavcic, Andreas Bührig-Polaczek* (2018) Mechanistic approach to new design concepts for high silicon ductile iron. *Materials Science and Engineering*, Vol. 713, pp. 67-74 [in English].
9. *Peter Mikoleizik, Georg Geier* (2015) SiWind – Development of materials for offshore wind power plants of the multi megawatt range. *Casting Plant & Technology*, Issue 2, pp. 8-15 [in English].

10. Stelian Stan, Iulian Riposan, Mihai Chisamera, Iuliana Stan (2019) Solidification characteristics of silicon-alloyed ductile cast irons. Journal of Materials Engineering and Performance, Vol. 28, Issue 1, pp. 278-286 [in English].
11. Bublikov, V. B. (2003) Increasing of modifying impact on cast iron structure formation. Foundry. Technologies and Equipment, no. 8, pp. 20-22 [in Russian].
12. Bublikov, V. B. (2008) High-strength cast iron – 60. Foundry. Technologies and Equipment, no. 11, pp. 20-22 [in Russian].
13. Bublikov, V. B. et al. (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].

Received 24.12.2019

В. Б. Бубликов, д-р техн. наук, ст. науч. сотр., зав. отделом,
e-mail: otchel.vch@gmail.com

А. В. Наривский, чл.-кор. НАН Украины, директор,
e-mail: opprs@ptima.kiev.ua

Ю. Д. Бачинский, канд. техн. наук, ст. науч. сотр., e-mail: 909_bach@ukr.net

А. А. Ясинский, науч. сотр., e-mail: alexyasinskyi@gmail.com

Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины (Киев, Украина)

ЛЕГИРОВАННЫЙ КРЕМНИЕМ ВЫСОКОПРОЧНЫЙ ЧУГУН И ЕГО ПРИМЕНЕНИЕ

В настоящее время во многих странах активно ведутся работы по использованию легирования кремнием для создания новых марок высокопрочного чугуна с повышенным уровнем механических свойств и улучшенной механической обработкой. В статье приводятся экспериментальные данные о влиянии кремния (в количестве до 4 %) на формирование структуры и уровень механических свойств высокопрочного чугуна с шаровидным графитом. Эффективность легирования кремнием зависит от состава исходного расплава, модификатора, способа модифицирования, скорости охлаждения отливок. Показано, что легирование кремнием позволяет устранить отбел в отливках и обеспечивает формирование упрочненной ферритной металлической основы. В результате этого одновременно повышаются прочность и пластичность высокопрочного чугуна. Установлено, что по сравнению с ковшовым при внутриформенном модифицировании плотность распределения включений шаровидного графита увеличивается в 3–5 раз, а количество феррита в структуре – в 1,8–2,0 раза. Легированный кремнием ферритный высокопрочный чугун, полученный внутриформенным модифицированием, характеризуется высокими значениями прочности ($\sigma_B = 550\text{--}620$ МПа, $\sigma_{0.2} = 420\text{--}500$ МПа) и пластичности ($\delta = 11\text{--}17$ %). По показателям прочности разработанный высокопрочный чугун значительно превосходит стандартные ферритные марки, содержащие до 2,9 %мас. кремния, а по пластичности – ферритно-перлитные. Важным преимуществом легированного кремнием высокопрочного чугуна является равномерное распределение твердости отливок и улучшение их обрабатываемости резанием. Совокупность указанных показателей позволяет значительно улучшить качество литых изделий из высокопрочного чугуна и повысить их конкурентоспособность.

Ключевые слова: высокопрочный чугун, легирование, кремний, упрочнение, феррит, структура, механические свойства, отливка.

V. B. Bublikov, Dr. Sci. (Engin.), Senior Research Fellow, Department Chair,
e-mail: otchel.vch@gmail.com

A. V. Narivskiy, Corresponding Member of the NAS of Ukraine, Director,
e-mail: opprs@ptima.kiev.ua

Yu. D. Bachynskiy, PhD (Engin.), Senior Researcher,
e-mail: 909_bach@ukr.net

O. O. Yasynskiy, Researcher, e-mail: alexyasynskiy@gmail.com

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

SILICON-ALLOYED DUCTILE CAST IRON AND ITS APPLICATION

Currently, many countries are actively working on the use of silicon alloying to create new grades of ductile cast iron with improved mechanical properties and machining. The article presents experimental data on the effect of silicon (up to 4 %wt.) on the structure formation and level of ductile cast iron with spheroidal graphite mechanical properties. The efficiency of alloying with silicon depends on the composition of the base melt, the modifier, on the modifying method, on the castings cooling rate. It is shown that alloying with silicon eliminates the chilling in castings and provides the formation of strengthened ferritic metal base. As a result, the strength and ductility of ductile cast iron are both increased. It is established that, compared to ladle modifying, at in-mold modifying the density of spheroidal graphite inclusions distribution is increased by 3–5 times, while the amount of ferrite in the structure – by 1.8–2.0 times. Silicon-alloyed ferritic ductile cast iron, obtained by in-mold modifying, is characterized by high values of strength ($R_m = 550\text{--}620\text{ MPa}$, $R_{p0.2} = 420\text{--}500\text{ MPa}$) and ductility ($A = 11\text{--}17\%$). In terms of strength, the developed ductile cast iron is far superior to the standard ferritic grades and plasticity – to ferritic-pearlitic, with a relatively lower (up to 2.9 %wt.) silicon amount. An important advantage of silicon-alloyed ductile cast iron is the even distribution of castings hardness and improvement of their machinability by cutting. The combination of these indicators can significantly improve the quality of cast products made of ductile cast iron and increase their competitiveness.

Keywords: ductile cast iron, alloying, silicon, strengthening, ferrite, structure, mechanical properties, casting.