

УДК 669.131.7:621.74:621.78.082:66.046.516

В.Б. Бубликов, д-р техн. наук, старш. наук. співроб., завідувач відділу;
e-mail: otdel.vch@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0003-4465-9256>

О.О. Ясинський, наук. співроб.; e-mail: alexyasinskyi@gmail.com;
<https://orcid.org/0000-0002-0932-5309>

О.О. Ясинська, канд. техн. наук, наук. співроб.;
e-mail: yasinskaalena@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0002-2187-6701>

Д.М. Берчук, канд. техн. наук, старш. наук. співроб., заст. зав. відділу;
e-mail: berchuk@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0002-5273-5522>

Ю.Д. Бачинський, канд. техн. наук, старш. наук. співроб.;
e-mail: 909_bach@ukr.net; <https://orcid.org/0000-0002-5745-1369>

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

ОСОБЛИВОСТІ ВПЛИВУ ЛЕГУВАННЯ НА СТРУКТУРОУТВОРЕННЯ І МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ВИСОКОМІЦНОГО ЧАВУНУ У ВИЛИВКАХ

Високоміцний чавун має підвищену схильність до утворення карбідної фази при кристалізуванні. Тому ефективним є підвищення характеристик міцності високоміцного чавуну шляхом легування некарбідоутворювальними елементами, до яких належать мідь та нікель. У роботі досліджено закономірності впливу легування міддю та нікелем на структуроутворення й механічні властивості високоміцного чавуну у виливках. Показано, що при легуванні високоміцного чавуну міддю, порівняно з легуванням нікелем, збільшується кількість перліту в металевій основі, підвищується тимчасовий опір під час розривання та зменшується відносне видовження. Розроблено технологічні параметри, які забезпечують одержання легованих високоміцних чавунів із механічними властивостями, що значно перевищують вимоги чинного стандарту ДСТУ EN 1563:2018 до перлітного чавуну марки ВЧ800-2 ($\sigma_B \geq 800$ МПа, $\delta \geq 2\%$). Встановлено, що використання високоякісного чушкового чавуну дозволяє зменшити витрату на модифікування феросиліцій-магній-кальцієвої лігатури з 2,5 % до 1,5 % (від маси рідкого чавуну) і сприяє підвищенню пластичності литого металу більше як у 2 рази при достатньо високому рівні міцності легованих високоміцних чавунів. Розроблено короткотривалий процес більш економного термічного оброблення, який забезпечує значне підвищення міцності легованих високоміцних чавунів: у тонкостінних виробках із легованого міддю (1 %) високоміцного чавуну тимчасовий опір розриванню σ_B становить 950 МПа при відносному видовженні $\delta = 6,6\%$, із легованого нікелем (1 %) — 875 МПа при $\delta = 9,1\%$. Тобто легування нікелем є більш ефективним для підвищення пластичності, тоді як легування міддю — для підвищення міцності. Результати проведених досліджень розширюють базу даних для розроблення прогресивних технологій отримання виробів із легованих високоміцних чавунів з підвищеними механічними й спеціальними властивостями для сучасної техніки.

Ключові слова: високоміцний чавун, перліт, модифікатор, легування, мідь, нікель, нормалізування, структуроутворення, механічні властивості.

Високоміцний чавун із кулястим графітом є перспективним литим конструкційним матеріалом сучасного машинобудування, що забезпечує надійність та довговічність роботи деталей машин і механізмів за різних режимів та умов їх експлуатування [1]. Застосування виливків із високоміцного чавуну замість сталевих

дозволяє зменшити масу деталей, підвищити коефіцієнт використання металу, значно знизити витрату енергії та вартість виробництва. Із високоміцного чавуну випускають виливки масою від десятків грамів до кількох десятків тон. Підвищення властивостей високоміцного чавуну, створення прогресивних технологій, що забезпечують покращення якості виливків при зниженні вартості їх виробництва, є актуальним напрямком наукових розробок, результати яких будуть затребувані промисловими підприємствами.

Високоміцний чавун легують для підвищення механічних показників або надання йому спеціальних властивостей (зносо-, ударо-, холодо-, жаро-, корозійної стійкості, немагнітності та ін.) [2]. Унаслідок підвищеної схильності високоміцного чавуну до утворення при кристалізуванні карбідної фази вибір легувальних елементів для зміцнення його металевої основи, порівняно зі сталлю й чавуном з пластинчастим графітом, украй обмежений. Ефективне підвищення властивостей міцності високоміцного чавуну досягається легуванням хімічними елементами, що зміцнюють твердий розчин, але не утворюють карбідів у чавуні. До таких елементів належать мідь та нікель.

Мідь — метал щільністю 8920 кг/м^3 і температурою плавлення 1083°C ; нікель — метал щільністю 8350 кг/м^3 і температурою плавлення 1453°C . Нікель із залізом утворює сплави зі структурою необмеженого гомогенного твердого розчину. На відміну від нікелю, мідь має межу розчинності в чавуні, яка залежить від температури та складу чавуну — підвищується зі збільшенням масових часток нікелю [3], марганцю, кремнію. Мідь розчиняється в чавуні до 3,5 % мас., а при масовій частці, що перевищує граничну розчинність, може виділятися у вигляді самостійної мікроскопічної фази [2–4]. Відповідно до фазової діаграми Cu-Fe, максимальна розчинність міді в аустеніті ($\gamma\text{-Fe}$) складає 13 %, а у фериті ($\alpha\text{-Fe}$) — 2,2 % мас. [5, 6]. Згідно з класифікацією [7], мідь і нікель поряд із кобальтом належать до некарбідоутворювальних легувальних елементів і сприяють розширенню γ -області на діаграмі стану Fe–C сплавів. Мідь і особливо нікель знижують розчинність вуглецю в рідкому й твердому розчинах, підвищують евтектичну температуру і знижують евтектоїдну. Легування міддю та нікелем розширює інтервал між температурами утворення стабільної (аустенітно-графітної) та метастабільної (аустенітно-цементитної) евтектик, що відповідає їх графітизувальному впливу на процес кристалізування. Мідь і нікель сприяють графітизуванню чавуну в процесі кристалізування і гальмують графітизування при $\gamma \rightarrow \alpha$ перетворенні, підвищуючи ступінь перлітизування металевої основи [4, 8–11], підвищують стійкість аустеніту й покращують прогартовуваність чавуну [2, 12].

Оптимальною за впливом на структуру та фізико-механічні властивості високоміцного чавуну вважається масова частка у чавуні 0,6–1,2 % міді. Така кількість міді сприяє утворенню перлітної металевої основи з підвищеними значеннями міцності та зносостійкості. У роботах [8, 13] наголошується, що мідь перешкоджає утворенню кулястого графіту при її масовій частці у чавуні понад 1,8 %.

У низьколегованих чавунах масова частка будь-якого легувального елемента складає до 3 %, у середньолегованих — 3–10 %, високолегованих — понад 10 % [14]. Аналогічне класифікування застосовується і для легованих нікелем високоміцних чавунів. У високолегованих нікелем високоміцних чавунах формується немагнітна аустенітна металева основа. У поширених корозійностійких аустенітних чавунах «нірезист» масова частка нікелю перевищує 13 % [15].

Найпоширенішим та відносно недорогим легувальним елементом високоміцного чавуну є мідь. Легування нікелем, незважаючи на більш високу вартість, рекомендується проводити як для отримання деяких стандартних марок високоміцного чавуну, що передбачено ДСТУ 3925-99, так і для підвищення механічних і спеціальних властивостей: ударо-, холодо-, зносостійкості тощо.

З огляду на подану інформацію та суперечливість результатів деяких раніше виконаних досліджень, актуальним є проведення системного дослідження й уточнення низки закономірностей впливу міді та нікелю на структуру й механічні

властивості високоміцного чавуну. Отримані результати дозволяють розширити базу даних для розроблення прогресивних технологій виготовлення виробів із високоміцного чавуну з підвищеними властивостями для сучасної техніки.

Мета роботи полягала в дослідженні закономірностей впливу легування міддю та нікелем на структуроутворення і механічні властивості виливків із високоміцного чавуну.

У лабораторних плавках як шихту застосовували переробний чушковий чавун марки ПЛ2 (мав такий хімічний склад, % мас.: 4,1 С; 0,75 Si; 0,35 Mn; 0,06 Cr; 0,02 Al; 0,026 Ti; 0,035 S; 0,10 P), масові частки шкідливих домішок (сірки й фосфору) у якому значно перевищували максимально допустимі для технологій високоміцного чавуну оптимальні рівні, відповідно, 0,015 % S і 0,05 % P [16–18]. Наприкінці плавки в піч вводили розрахункову кількість феросиліцію марки ФС75. Масова частка кремнію у виливках перебувала у межах 2,60–2,95 %. Для одержання в структурі виливків кулястої форми графіту застосовували модифікування в ковші феросиліцій-магній-кальцієвою лігатурою ФСМг7К6 кількості 2,5 % від маси рідкого чавуну. Нікель марки Н-4 (ГОСТ 849-2008) вводили до шихти. Катодну мідь марки М0К (ДСТУ ГОСТ 859-2003) вводили в ківш, укладаючи її поверх раніше засипаної лігатури ФСМг7К6.

Під час дослідів для вивчення мікроструктури у сирих піщано-глиняних формах відливали пластини висотою 200 мм, шириною 40 мм, товщиною 5; 10; 15; 20 мм. Для визначення механічних властивостей та мікроструктури відливали стандартні клиноподібні проби товщиною біля основи 25 мм (ДСТУ 3925-99).

З метою дослідження впливу товщини стінки вилівка на механічні властивості легованого міддю або нікелем високоміцного чавуну відливали комплект клиноподібних проб (кільблоків) із товщиною біля основи від 8 до 45 мм, довжиною 100 мм та висотою 140 мм.

Легування 1,0 % міді або нікелю незначно впливає на параметри графітової фази. У виливках пластин товщиною 5; 10; 15; 20 мм спостерігається певне зменшення діаметру графітових включень та збільшення їх кількості (рис. 1). Вплив швидкості охолодження на металеву основу високоміцного чавуну проявляється контрастніше. У результаті легування у структурі всіх пластин формується переважно перлітна металева основа. При цьому перлітизувальний вплив міді дещо сильніший, ніж у нікелю.

Вплив масової частки міді та нікелю на зміну мікроструктури високоміцного чавуну у виливку стандартизованого «клина» представлено на рис. 2. Із підвищенням масової частки міді збільшується кількість перліту в металевій основі, але зберігаються феритні оболонки навколо сфероїдів графіту. Навіть при легуванні 1,5 % Si навколо частини сфероїдів спостерігається 3–5 % фериту у вигляді оболонок або окремих пелюсток. При масовій частці нікелю 0,5 і 1,0 % та невисокій швидкості охолодження (0,12 °C/c) стандартного «клина» кількість перліту в металевій основі, порівняно з нелегованим високоміцним чавуном, зменшується із 40 % до 25 % і лише при масовій частці 1,5 % нікелю збільшується до 55 %. Таким чином, експериментально показано, що легування 0,5–1,0 % нікелю при евтектоїдному перетворенні за певних умов сприяє графітизуванню структури виливків, що повільно охолоджуються.

З підвищенням масової частки міді збільшуються кількість перліту, тимчасовий опір під час розривання σ_B , твердість HB, зменшуються показники відносного видовження δ і ударної в'язкості КС (рис. 3). Отримані закономірності свідчать, що для одержання високоміцного чавуну перлітного класу (кількість перліту в металевій основі понад 92 %) достатнім є легування 1% Si, при якому вдається отримати високоміцний чавун із властивостями: $\sigma_B \geq 750$ МПа; $\delta \geq 3$ %; КС ≥ 20 Дж/см². При масовій частці Si = 1,5 % підвищується міцність, але знижуються відносно видовження та ударна в'язкість: $\sigma_B \geq 800$ МПа; $\delta \geq 2,5$ %; КС ≥ 12 Дж/см². Подальше підвищення масової частки міді до 2 % не має суттєвого впливу на зміну форми графіту й показників механічних властивостей високоміцного чавуну.

Характер впливу нікелю на співвідношення перліт / ферит у металевій основі високоміцного чавуну значною мірою визначається швидкістю охолодження

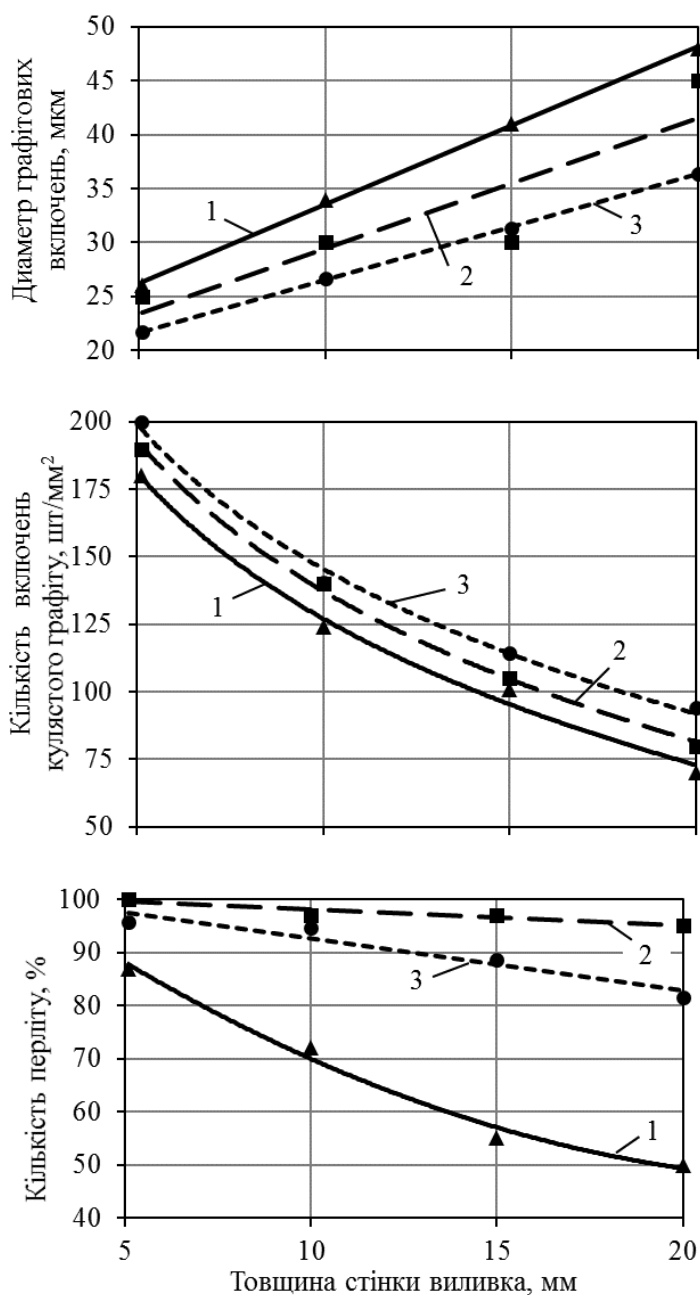


Рис. 1. Вплив товщини стінки виливка на мікроструктуру нелегованого (1), легованого 1,0 % Cu (2) або 1,0 % Ni (3) високоміцного чавуну

(товщиною стінки виливка). У металевій основі стандартних «клинів» із товщиною основи 25 мм, із яких виготовляли зразки для механічних випробувань, незначне збільшення кількості перліту спостерігали лише при масовій частці Ni = 1,5 %. Як випливає з рис. 3, у порівнянні з нелегованим високоміцним чавуном при легуванні 0,5 % Ni, тимчасовий опір під час розривання σ_B і твердість HB дещо знижуються. При легуванні 1,0 % Ni, незважаючи на меншу (порівняно з вихідним нелегованим високоміцним чавуном) кількість перліту, показники σ_B і HB трохи збільшуються, а відносне видовження зменшується, що є наслідком зміцнення твердого розчину

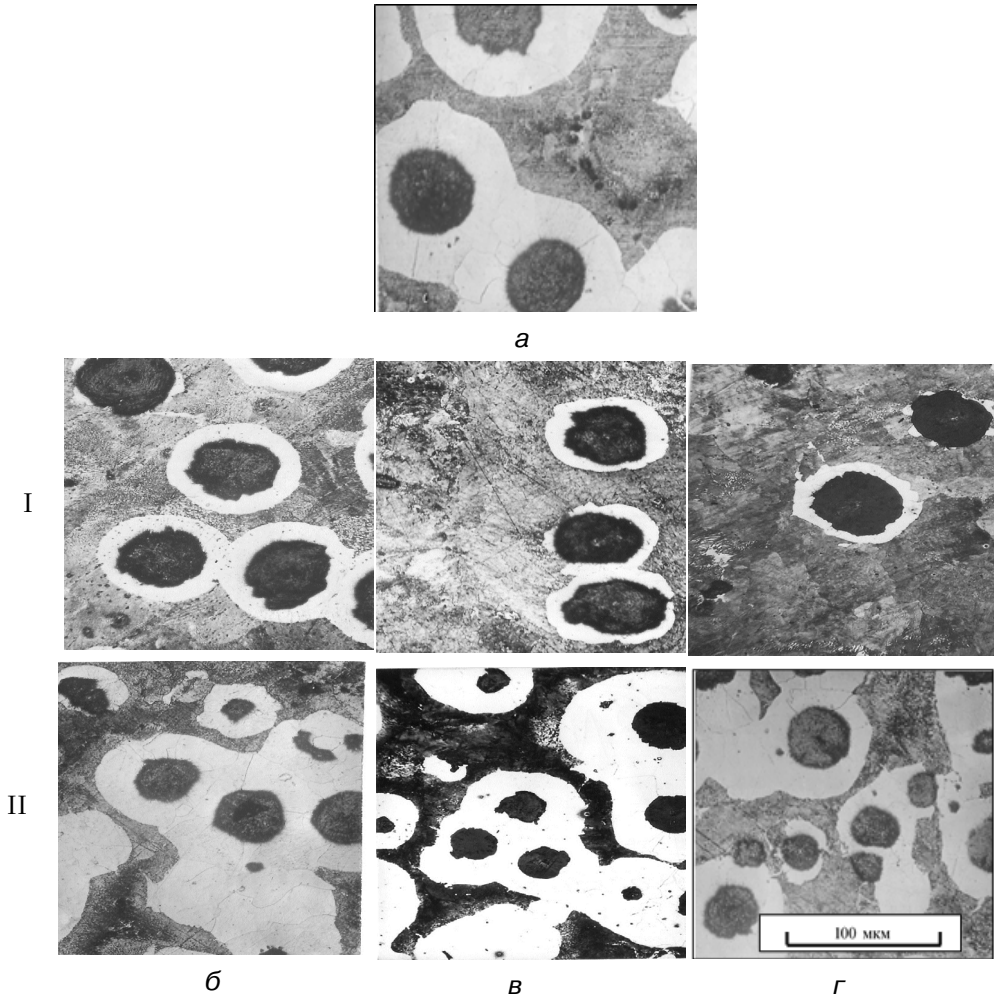


Рис. 2. Мікроструктура нелегованого високоміцного чавуну (а), легованого міддю (I) і нікелем (II) кількістю, відповідно, 0,5 % (б), 1,0 % (в), 1,5 % (г) у виливку «клин» із товщиною основи 25 мм (ДСТУ 3925-99)

легуванням. Ударна в'язкість, визначена на зразках без надрізу, у результаті легування нікелем підвищується. При 1,5 % Ni кількість перліту збільшується, підвищуються показники σ_b і HB, спостерігається незначне зниження δ і КС.

Швидкість охолодження виливка є таким же важливим фактором формування структури і властивостей високоміцного чавуну, як його хімічний склад і технологія модифікування. Для дослідження впливу швидкості охолодження на механічні властивості нелегованого та легованого міддю (1,0 % Cu) або нікелем (1,0 % Ni) високоміцних чавунів у умовах дослідного виробництва відливали клиноподібні проби (кільблоки) з різною товщиною основи (від 8 до 45 мм). Хімічний склад нелегованого високоміцного чавуну перебував у таких межах (% мас.): 3,4–3,7 C; 2,5–2,8 Si; 0,37–0,42 Mn; 0,020–0,025 S; 0,09–0,10 P; 0,023–0,037 Ti; 0,04–0,062 Mg.

Ступінь сфероїдизування графіту ССГ у мікроструктурі виливків із нелегованого високоміцного чавуну з товщиною стінки від 8 до 20 мм був понад 90 %, а у виливках із товщиною стінки 30 та 45 мм — нижчим (86 та 83 % відповідно). При збільшенні товщини виливка знижується тимчасовий опір під час розривання σ_b (рис. 4). Відносне видовження δ зі збільшенням кількості фериту в металевій основі підвищується у виливках товщиною до 25 мм і далі знижується в повільніше охолоджуваних виливках товщиною 30 і 45 мм, що пояснюється як зниженням показника ССГ, так і результатом дії масштабного фактора, який проявляється через більший ступінь розвиненості ліквіації, поруватості та інших недосконалостей структури [3].

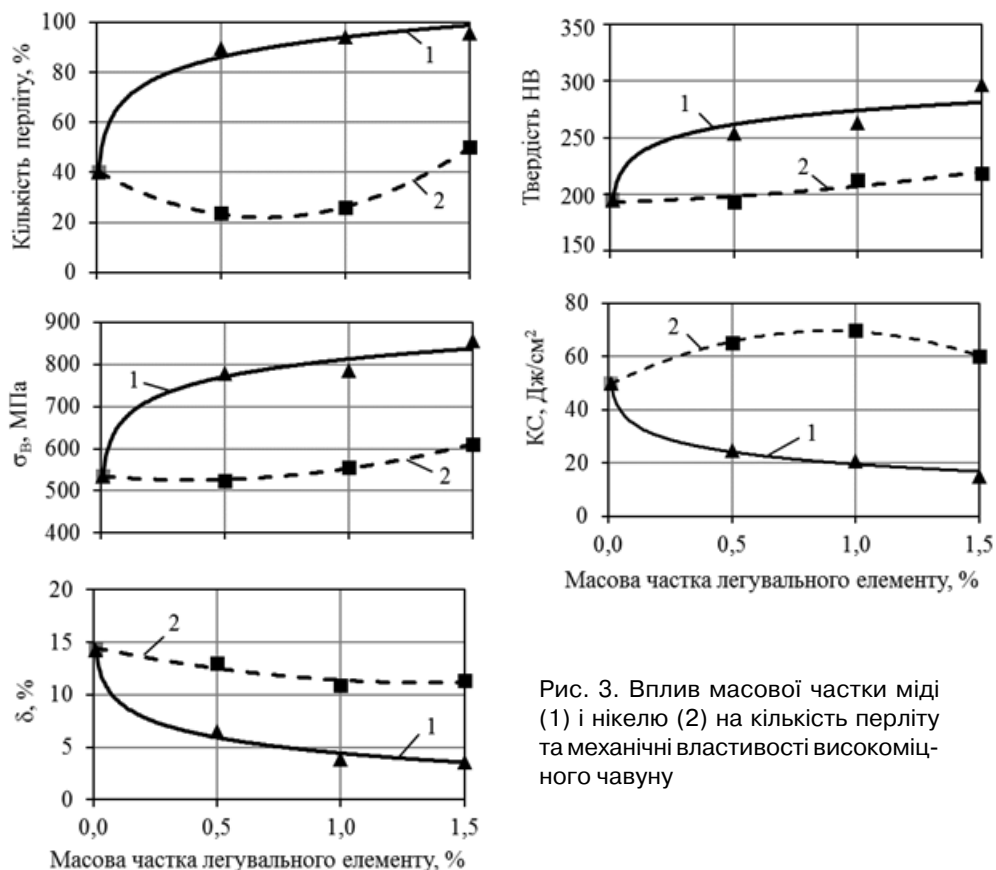


Рис. 3. Вплив масової частки міді (1) і нікелю (2) на кількість перліту та механічні властивості високоміцного чавуну

При легуванні 1,0 % Si мікроструктура клиноподібних проб складалася з перлітної металевої основи (кількість перліту щонайменше 94 %). Тому відмінність механічних властивостей виливків різної товщини визначалася особливостями сформованої тонкої структури металевої основи і впливом саме масштабного фактору. Підвищення механічних властивостей легованого міддю високоміцного чавуну зі збільшенням швидкості охолодження пояснюється подрібненням структури, зменшенням ліквациї, підвищенням дисперсності перліту в умовах прискореного тепловідведення. У міру зменшення швидкості охолодження виливків збільшуються розміри зерна, посилюється ліквация домішок у міжзерний простір, підвищується неоднорідність структури, розвивається мікропоруватість, що комплексно призводить до одночасного зниження як тимчасового опору під час розтягування σ_B , так і пластичності δ при збільшенні товщини стінки виливка. В умовах проведеного дослідження σ_B високоміцного чавуну з кулястим графітом та перлітною металевою основою знижується з 900 МПа до 820 МПа зі збільшенням товщини стінки виливка з 8 мм до 45 мм. При цьому також спостерігається незначне зменшення відносного видовження δ .

У результаті легування високоміцного чавуну 1,0 % Ni збільшується кількість перліту в металевій основі (65–95 %), підвищується тимчасовий опір під час розривання σ_B та знижується відносне видовження δ , порівняно з вихідним нелегованим високоміцним чавуном. Характер впливу показника ССГ та масштабного фактору в легованому 1,0 % Ni високоміцному чавуні, порівняно з нелегованим, несуттєвий, про що свідчить наявність максимуму на графіку зміни відносного видовження залежно від товщини виливка.

У порівнянні з високоміцним чавуном, легованим нікелем, при легуванні міддю збільшується кількість перліту в металевій основі, підвищуються тимчасовий опір під час розривання та зменшується відносне видовження.

На основі результатів експериментального дослідження отримано кількісні закономірності, що характеризують вплив масової частки міді та нікелю на структуру

й механічні властивості виливків із високоміцного чавуну залежно від швидкості охолодження. Мідь ефективно зміцнює твердий розчин, підвищує ступінь перлітизування металевої основи, збільшує показники міцності високоміцного чавуну. Найбільш ефективно перлітизувальна дія нікелю проявляється в діапазоні підвищених швидкостей охолодження — у виливках товщиною 5–15 мм. Тому легування нікелем рекомендується головню для відповідальних тонкостінних виливків із підвищеним рівнем механічних і службових властивостей.

На основі результатів лабораторних досліджень в умовах промислового виробництва було виготовлено дослідні деталі з легованих міддю та нікелем високоміцних чавунів із підвищеною міцністю. Дослідження проводили на виливках втулок із товщиною стінок 8–12 мм і масою 4,2 кг. Як шихту застосовували переробний високоякісний чавун марки ПВК2 із низькими масовими частками сірки й фосфору, — відповідно, менше 0,015 % S і 0,05 % P. Через низьку масову частку сірки для одержання високоміцного чавуну застосовували модифікування в ковші феросиліцій-магній-кальцієвою лігатурою в кількості 1,5 % від маси рідкого чавуну. Катодну мідь вводили в ківш, укладаючи її поверх лігатури. Нікель вводили в піч разом із шихтою. Хімічний склад отриманих високоміцних чавунів, легованих 1,0 % Cu або 1,0 % Ni, перебував у таких межах, % мас.: 3,50–3,74 C; 2,60–2,95 Si; 0,20–0,22 Mn; 0,010–0,012 S; 0,035–0,042 P; 0,040–0,052 Mg.

Механічні властивості виливків втулок, одержаних із високоміцних чавунів, виплавлених із високоякісного переробного чавуну марки ПВК2, наведено у табл. 1. Для порівняння наведені механічні властивості легованих такою ж кількістю міді або нікелю високоміцних чавунів, отриманих у кількох подібної товщини на шихті з переробного чушкового чавуну ПЛ2, який мав вищі масові частки сірки й фосфору у своєму складі.

Встановлено, що використання більш чистих по сірці й фосфору шихтових матеріалів дозволяє не лише зменшити витрату модифікаторів на процес сфероїдизувального модифікування, але в кінцевому результаті сприяє підвищенню пластичності литого металу більше як у 2 рази при достатньо високому рівні міцності високоміцного чавуну.

Досліджено й оптимізовано режими термічного оброблення для підвищення та стабілізування властивостей легованого перлітного високоміцного чавуну у виробі. За умови отримання в литому стані виливків із високоміцного чавуну без структурно-вільних карбідів відпадає потреба в застосуванні енергоємного довготривалого (6–8 год) термооброблення — високотемпературного відпалу при 920–950 °C для розкладання структурно-вільного цементиту. Експериментально встановлено оптимальні параметри більш економного термооброблення — нормалізування.

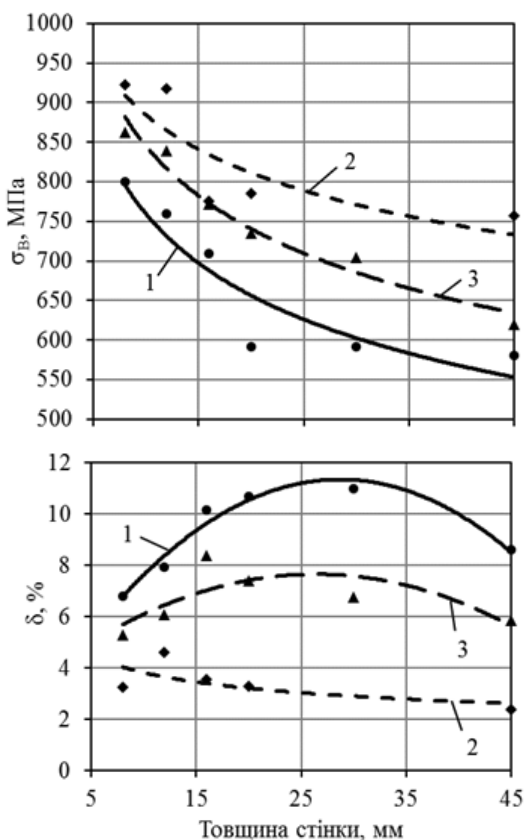


Рис. 4. Вплив товщини стінки виливка на механічні властивості нелегованого (1) і легованого 1,0 % Cu (2) або 1,0 % Ni (3) високоміцного чавуну

Таблиця 1
Вплив легування і шихтових матеріалів на механічні властивості високоміцного чавуну у виливках

№ з/п	Марка переробного чавуну	Варіант легування, % мас.	Механічні властивості		
			σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %
1	ПВК2	1,0 % Cu	831	655	7,3
		1,0 % Ni	675	516	13,3
2	ПЛ2	1,0 % Cu	880	–	3,2
		1,0 % Ni	750	–	6,5

Вибір температурних режимів нормалізування проведений на основі аналізу результатів дилатометричних досліджень із визначення температури перетворення $\alpha \leftrightarrow \gamma$ фаз, яка значною мірою залежить від хімічного складу й легування. Легування чавуну міддю та нікелем призводить до зниження температур початку перетворення при нагріванні A_c^n на 20–30 °С та охолодженні A_r^n на 30–40 °С. У результаті легування міддю міжкритичний інтервал існування $\alpha \leftrightarrow \gamma$ фаз при охолодженні зменшується до 15–20 °С, що вказує на ефективність нормалізування чавунів, легованих міддю, з метою одержання тонкодисперсної перлітної структури. Нікель дещо звужує міжкритичний інтервал при нагріві та мало впливає на нього при охолодженні, що дозволяє одержувати оптимальне сполучення показників міцності й пластичності високоміцного чавуну, легованого нікелем. З метою отримання структури сорбітоподібного перліту з рівномірно розподіленим у металевій матриці феритом, підвищення ступеня перлітизування та механічних властивостей розроблено короткотривале економне термооброблення — нормалізування (нагрівання до 850–870 °С, витримка 1–2 год, охолодження на повітрі), яке забезпечує значне підвищення показників механічних властивостей легованих міддю й нікелем високоміцних чавунів.

Лита структура металевої основи розроблених легованих високоміцних чавунів у виливках складалась переважно з 85–95 % перліту (решта — ферит, який був розташований у вигляді оболонок навколо включень кулястого графіту). Після нормалізування металева матриця складається із сорбітованого перліту (95–97 %) та рівномірно розподіленого у матриці фериту. У результаті нормалізування легованого міддю (1 %) високоміцного чавуну тимчасовий опір розриванню σ_B підвищується до 951 МПа, відносне видовження δ складає 6,6 %. У легованого нікелем (1 %) ВЧ після нормалізування показник σ_B збільшується до 875 МПа при $\delta = 9,1$ % (рис. 5).

Таким чином, розроблені технологічні параметри забезпечують одержання

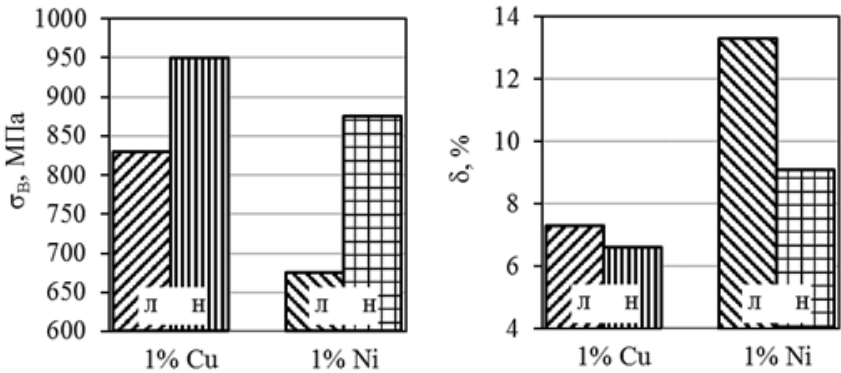


Рис. 5. Вплив легування та нормалізування на механічні властивості високоміцного чавуну

легованих високоміцних чавунів із механічними властивостями, які значно перевищують вимоги чинного стандарту ДСТУ EN 1563:2018 до перлітного чавуну марки ВЧ800-2 ($\sigma_B \geq 800$ МПа, $\delta \geq 2$ %).

Висновки

Встановлено, що заміна в шихті чушкового чавуну марки ПЛ2 (0,035 %мас. S; 0,10 %мас. P) на високоякісний чушковий чавун марки ПВК2 ($\leq 0,015$ %мас. S; 0,05 %мас. P) дозволяє зменшити витрату на модифікування феросиліцій-магній-кальцієвої лігатури з 2,5 % до 1,5 % (від маси рідкого чавуну) і сприяє підвищенню пластичності литого металу більше як у 2 рази при достатньо високому рівні міцності легованих високоміцних чавунів.

Розроблено короткотривалий процес термічного оброблення, а саме нормалізування, який забезпечує значне підвищення міцності легованих високоміцних чавунів: у тонкостінних виробах із легованого міддю (1 %) ВЧ тимчасовий опір розриванню σ_B збільшується з 830 МПа до 950 МПа (на 14,5 %) при відносному видовженні $\delta = 6,6$ %, із легованого нікелем (1 %) — з 675 МПа до 875 МПа (майже на 30 %) при $\delta = 9,1$ %. Тобто легування нікелем є більш ефективним для підвищення пластичності й ударної в'язкості, тоді як легування міддю — для підвищення міцності.

Отримані результати розширяють базу даних для розроблення прогресивних технологій отримання виробів із легованих високоміцних чавунів із підвищеними механічними й спеціальними властивостями для сучасної техніки.

Список літератури

- 1 Бубликов В.Б., Бачинський Ю.Д. Високоміцний чавун: прогрес технологій, підвищення властивостей. *Метал та лиття України*. 2018, № 7–8. С. 7–12.
- 2 Бубликов В.Б., Ясинский А.А., Сыропоршнев Л.Н. и др. Медь в высокопрочном чугуна. *Процессы литья*. 2010. №3. С. 46–57.
- 3 Ващенко К.И., Шумихин В.С. Плавка и выпечная обработка чугуна для отливок. Киев: Вища школа, 1992. 246 с.
- 4 Гиршович Н.Г. Кристаллизация и свойства чугуна в отливках. Москва: Машиностроение, 1966. 562 с.
- 5 ASM Handbook: Alloy Phase Diagrams / Edited by Hue Baker. «ASM International». 1992. Vol. 3. 1741 p.
- 6 Лякишев Н.П. Диаграммы состояния двойных металлических систем. Справочник. Том 2. Москва: Машиностроение, 1997. 1023 с.
- 7 Куцова В.З., Ковзель М.А., Носков О.А. Леговані сталі та сплави з особливими властивостями. Дніпропетровськ: НМетАУ, 2008. 350 с.
- 8 Бубликов В.Б., Ясинский А.А., Сыропоршнев Л.Н. и др. Влияние никеля на структуру и механические свойства отливок из высокопрочного чугуна. *Процессы литья*. 2011. №2. С. 24–34.
- 9 Чугун: Справ. / изд. под ред. Шермана А.Д. и Жукова А.А. Москва: Металлургия, 1991. 576 с.
- 10 Lacaze J., Larranaga P., Asenjo I., Suarez R., Sertucha J. Influence of 1 wt-% addition of Ni on structural and mechanical properties of ferritic ductile irons. *Materials Science and Technology*. 2012. Vol. 28, No 5. pp. 603-608. <https://doi.org/10.1179/1743284711Y.00000000100>.
- 11 Watsada Siripongtana, Rungsinee Canyook. Influence of nickel on the microstructure and mechanical properties of nodular cast iron. *Materials Science Forum*. 2023. Vol. 1023. pp. 61–66. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.1023.61>.
- 12 Литовка В.И. Повышение качества высокопрочного чугуна в отливках. Киев: Наук. думка, 1987. 208 с.
- 13 Высококачественные чугуны для отливок / В.С. Шумихин, В.П. Кутозов, А.И. Храмченков и др.; Под. ред. Н.Н. Александрова. Москва: Машиностроение, 1982. 222 с.

- 14 Власенко А.М. Матеріалознавство та технологія металів: підручник для здобувачів професійної (професійно-технічної) освіти. Київ: Літера ЛТД, 2019. 224 с.
- 15 Nabil Fatahallaa, Aly AbuElEzz, Moenes Semeida. C, Si and Ni as alloying elements to vary carbon equivalent of austenitic ductile cast iron: Microstructure and mechanical properties. *Materials Science and Engineering A*. 2009. Vol. 504, Iss. 1–2. pp. 81–89. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2008.10.019>.
- 16 Hartung C., White D., Copi K., Liptak M., Logan R. The continuing evolution of MgFeSi treatments for ductile and CG irons. *International Journal of Metalcasting*. 2014. Vol. 8, iss. 2, pp. 7–15. <https://doi.org/10.1007/BF03355577>.
- 17 Pietrowski S. Control of cast iron and casts manufacturing by in mold method. *Archives of foundry engineering*. 2009. Vol. 9, Is. 3. pp. 133–142
- 18 Бубликов В.Б., Нарівський А.В., Бачинський Ю.Д. Технологія одержання тонкостінних виливків з високоміцного чавуну в облицьованих кокілях з використанням внутрішньоформового модифікування розплаву. *Метал та лиття України*. 2021, №1. С. 46–53.

Надійшла 22.10.2024

References

- 1 Sherman, A.D., Zhukov, A.A. (Eds.) (1991). Cast iron. Handbook. Moscow: Metallurgiya, 576 p. [in Russian].
- 2 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].
- 3 Bublikov V.B., Yasinsky A.A., Syroporshnev L.N., Bachynskiy Yu.D., Kozak D.S. (2010). Copper in high-strength cast iron. no. 3, pp. 46–57 [in Russian].
- 4 Vashchenko, K.I., Shumykhyn, V.S. (1992). Melting and after-furnace processing of cast iron for castings. Kyiv: Vyshcha shkola, 246 p. [in Russian].
- 5 Girshovich, N.G. (1966). Crystallization and properties of cast iron in castings. Moscow: Mashinostroenie, 562 p. [in Russian].
- 6 Baker, H. (Ed.) (1992). ASM Handbook: Alloy Phase Diagrams. "ASM International", vol. 3, 1741 p.
- 7 Lyakishev, N.P. (1997). State diagrams of binary metal systems. Handbook. Vol. 2. Moscow: Mashinostroenie, 1023 p. [in Russian].
- 8 Kutsova, V.Z., Kovzel, M. A., Nosko, O.A. (2008). Alloyed steels and alloys with special properties. Dnipro: NMetAU. 348 p. [in Ukrainian]
- 9 Bublikov, V.B., Yasinskiy, A.A., Syroporsnev, L.N., Berchuk, D.N., Kirishun, I.V. (2011). Influence of nickel on the structure and mechanical properties of high-strength cast iron castings. *Casting processes*, no. 2, pp. 24–34 [in Russian].
- 10 Lacaze J., Larranaga P., Asenjo I., Suarez R., Sertucha J. (2012). Influence of 1 wt-% addition of Ni on structural and mechanical properties of ferritic ductile irons. *Materials Science and Technology*. Vol. 28, No 5. pp. 603–608. <https://doi.org/10.1179/1743284711Y.0000000100>.
- 11 Watsada Siripongtana, Rungsinee Canyook (2023). Influence of nickel on the microstructure and mechanical properties of nodular cast iron. *Materials Science Forum*. Vol. 1023. pp. 61–66. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.1023.61>.
- 12 Litovka, V.I. (1987). Improving of high-strength cast iron quality in castings. Kiev: Naukova dumka. 208 p. [in Russian].
- 13 Shumykhyn, V.S., Kutuzov, V.P, et al. (1982). High-quality cast irons for castings (Ed. by Alexandrov, N.N.). Moscow: Mashinostroenie, 222 p. [in Russian].
- 14 chnology of metals: a textbook for students of professional (technical) education. Kyiv: Litera LTD. 224 p. [in Ukrainian].

- 15 Nabil Fatahallaa, Aly AbuElEzz, Moenes Semeida (2009). C, Si and Ni as alloying elements to vary carbon equivalent of austenitic ductile cast iron: Microstructure and mechanical properties. *Materials Science and Engineering A*. Vol. 504, Iss. 1–2. pp. 81–89. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2008.10.019>.
- 16 Hartung C., White D., Copi K., Liptak M., Logan R. (2014). The continuing evolution of MgFeSi treatments for ductile and CG irons. *International Journal of Metalcasting*. Vol. 8, iss. 2, pp. 7–15. <https://doi.org/10.1007/BF03355577>.
- 17 Pietrowski S. (2009). Control of cast iron and casts manufacturing by in mold method. *Archives of foundry engineering*. Vol. 9, Is. 3. pp. 133–142.
- 18 U. D. (2021). Technology of thin-walled ductile cast iron castings obtaining in coated metal moulds with the use of in-mold melt modifying. *Metal and Casting of Ukraine*, no. 1, pp. 46–53 [in Ukrainian].

Received 22.10.2024

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

O.O. Yasynskyi, Researcher, e-mail: alexysynskyi@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0002-0932-5309>

O.O. Yasynska, PhD (Engin.), Researcher; e-mail: yasinskaalena@gmail.com;
<https://orcid.org/0000-0002-2187-6701>

D.M. Berchuk, PhD (Engin.), Senior Research Officer, Department Chair Deputy;
e-mail: otdel.vch@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0002-5273-5522>

Yu.D. Bachynskyi, PhD (Engin.), Senior Researcher; e-mail: 909_bach@ukr.net;
<https://orcid.org/0000-0002-5745-1369>

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

FEATURES OF ALLOYING INFLUENCE ON DUCTILE CAST IRON STRUCTURE FORMATION AND MECHANICAL PROPERTIES IN CASTINGS

Ductile cast iron has an increased tendency to carbide phase forming during crystallization. Therefore, it is effective to increase the ductile cast iron strength characteristics via alloying with non-carbide-forming elements, which also are copper and nickel. The work investigates the regularities of alloying with copper and nickel influence on the ductile cast iron structure formation and mechanical properties in castings. It is shown that at ductile cast iron alloying with copper, compared to alloying with nickel, the perlite amount in metal base and tensile strength R_m increases while the relative elongation A decreases. Technological parameters that ensure the production of alloyed ductile cast irons with mechanical properties that significantly exceed the requirements of DSTU EN 1563:2018 standard for perlitic cast iron single ($R_m \geq 800$ MPa, $A \geq 2\%$) have been developed. It was established that high-quality pig iron use allows to reduce the FeSiMgCa master alloy consumption for modifying from 2.5 % to 1.5 % (from liquid cast iron weight) and promotes to cast metal plasticity increasing by more than 2 times at a sufficiently high level of alloyed ductile cast irons strength. A short-term process of more economical heat treatment has been developed which provides a significant increase of alloyed ductile cast iron strength: in thin-walled products made of ductile cast iron alloyed with copper (1 %wt.) the tensile strength R_m reaches 950 MPa at a relative elongation $A = 6.6\%$, alloyed with nickel (1 %wt.) – up to 875 MPa at $A = 9.1\%$. That is, ductile cast iron alloying with nickel is more effective for plasticity increasing while alloying with copper is more effective for strength increasing. The results of the conducted research expand the database for development of advanced technologies of products obtaining from alloyed ductile cast iron with increased mechanical and special properties for modern technic.

Keywords: ductile cast iron, perlite, modifier, alloying, copper, nickel, normalization, structure formation, mechanical properties.