

А.О. Жуков, Ю.Ю. Жигуц*

Вінницький державний технічний університет,
кафедра технології конструкційних матеріалів*Ужгородський національний університет,
кафедра технології машинобудування

НОВІТНІ ТЕХНОЛОГІЇ ВИГОТОВЛЕННЯ ТА ЗМІЦНЕННЯ ДЕТАЛЕЙ ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ СВС-ПРОЦЕСІВ

© Жуков А.О., Жигуц Ю.Ю., 2006

Нелеговані білі чавуни мають велику крихкість. Після гарячого пластичного деформування матриця роздрібнюється, і структура її починає відповідати принципу Шарпі–Бочвара. Інакше досягти того ж результату можна легуванням білого чавуну V, Nb або Ti. Тобто з'являється можливість отримувати білий чавун, який використовується не тільки для технологій литва, але і для кування, зварювання, наплавлення.

Non-alloyed white cast irons have large brittleness. After carrying out of not plastic deformation the matrix is grinded and the structure begins to correspond to Sharpe-Bochwar principle. Another way of achieving the same result is by means of alloying of white cast iron V, Nb or Ti. Thus we have a possibility to get white cast iron, which is used, not only for casting but for swaging, welding and surfacing as well.

Вступ. Всім добре відомо, що виливки з білого чавуну крихкі, особливо під дією повторно-змінних навантажень, що пов'язано із карбідною основою евтектики чавунів. Вищезгадану особливість білих чавунів можна змінити, провівши “інверсію” мікроструктури за рахунок легування такими елементами, як V, Nb або Ti. Існує також і інший варіант підвищення їхньої міцності – отримання стабільно-половинчастих чавунів, які містять як стабільні карбіди VC, NbC або TiC, так і залишок вуглецю у вигляді твердого розчину заліза і графіту. Дендрити у цій матриці зміцнюють метал за аналогією із сталеву арматурою, що зміцнює крихкий бетон. Якщо ж графіт глобуляризований магнієм або рідкісноземельними металами, то чавун за збереження високої оброблюваності різанням набуває ще і високих антифрикційних властивостей [1–3].

Ці властивості дають можливість використовувати чавуни і для технології пластичного деформування, а сам ефект – під час зварювання за рахунок надання їм пластичності домішками V, Nb або Ti за одночасного підвищення міцності, в'язкості і тріщиностійкості зварювального шва.

Загальні проблеми. Метою роботи було дослідження інвертованих структур та їхнього впливу на властивості таких матеріалів, як білі та стабільно-половинчасті чавуни, карбідосталі.

Об'єкт дослідження – високовуглецеві матеріали з інвертованою структурою.

Вихідні матеріали та методика досліджень. Для виконання роботи використовували такі матеріали: сажу ацетиленову (технічний вуглець ТУ 14–7–24–80), порошок алюмінієвий ПА–3–ПА–4 ГОСТ6058-73, просіяне мливо алюмінієвої стружки, оксиди вольфраму категорії хімічно чисті та ін. Порошкову шихту просушували, перемішували і ущільнювали і після цього розміщували у металотермічному пакеті.

Для отримання рідкого термітного чавуну у шихту вводять навуглецьовувальні домішки, феросплави та інші матеріали. Для отримання чавуну з глобулярним графітом до складу шихти вводять модифікатори.

Огляд теоретичних та експериментальних досліджень. В евтектичних білих чавунах, крім крихкої цементитної матриці, спостерігаються ізольовані включення дендритного аустеніту, які за високих навантажень “легко” руйнуються у зв'язку з ізоляцією одного “стовпчика” від іншого.

Тільки у разі гарячого деформування такого чавуну отримують структуру – пластичну матрицю+карбіди [1,2]. Отже, прокатні валки з білого чавуну обробляють у два етапи; на першому – кування за малого ковальського тиску і тільки після руйнування цементитної сітки по границям зерен виконують другий етап – кування за високого тиску.

Введення приблизно 1 % Cr в процесі виплавки дає змогу повністю запобігти графітизації. Легування ж V або Nb робить структуру такою, що відповідає принципу Шарпі–Бочвара (у в'язкій матриці знаходяться високотверді включення). Під час комбінованого легування V і Mn у білому чавуні досягнуто показник відносного видовження 8% [1], що вдалося за рахунок докорінної зміни структури матеріалу: матриця стала аустенітною, а карбіди ванадію VC_{1-x} (надалі ці карбіди умовно позначатимуться VC) утворили ізольовані сферичні, пластинчасті та стрижньові включення.

Аналогічний ефект спостерігався і у разі додаткового легування Ni, але більшість включень при цьому мали глобулярну форму. Малі домішки Ti сприяли формуванню ще компактніших включень VC [3], а додаткове легування Si, Cu, Ni, Al – елементами, що підвищують коефіцієнт активності вуглецю – знижує необхідний для інверсії мікроструктури вміст ванадію [1].

На рис.1 прямі лінії – це коноди у ізотермічних розрізах потрібних діаграм стану.

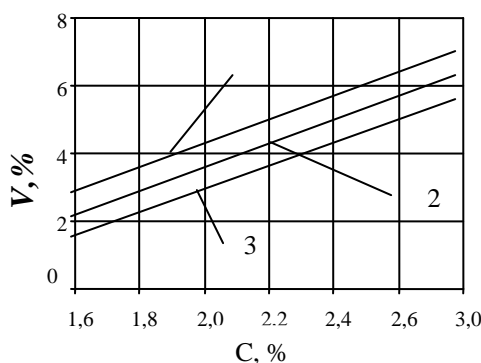


Рис. 1. Границі між концентраційними областями сплавів з “інвертованою” (вище прямих ліній) і не повністю “інвертованими” ледебуритними структурами аустенітно-карбідної евтектики (нижче прямих ліній): 1 – сплави Fe–C–V; 2 – Fe–C–V+1,5 % Si; 3–Fe–C–V+1,5 %Cu

Конода 1 належить до системи Fe–C–V і описується рівнянням, що встановлює мінімально необхідний вміст V (у процентах за масою) $C_{Vmin} = 4,5C_C - 5,3$. Якщо ж розглянути комплексно леговані білі чавуни, то

$$C_{Vmin} = [4,5 - 0,12C_{Cr} - 0,40(C_{Si} + C_{Al}) - 0,15(C_{Cu} + C_{Ni})] \cdot C_C - 5,3 - 0,41(C_{Cu} + C_{Cr})$$

При $C_V < C_{Vmin}$ встановлюється частково інвертована структура, тобто, крім інвертованої аустенітної евтектики, в ній наявні фази сорбіту (HV300) і карбідів вольфраму (HV2000). Додаткове легування 0,06 % Ti перетворює стовпчики VC у рівновісні включення.

Легування ванадієм при концентраціях значно більших ніж C_{Vmin} перетворює структуру чавуну у перлітну матрицю з карбідами VC, що підвищує пластичність, знижує зносостійкість одночасно із незначним зниженням міцності на розтяг.

Результати досліджень [4] допомогли впровадити у виробництво два типи білих чавунів: “м’якший” і “твердий” сорт, хімічний і фазовий склад яких подано у таблиці.

Комплексно леговані чавуни не мають бути “перелегованими”, бо це приводить до втрати їхніх механічних властивостей, тому рекомендуються такі межі легуючих елементів (у % за масою):

$$\frac{V}{Cr} = \frac{0,4-0,5}{19-20}; \frac{0,8-0,9}{14-15}; \frac{1,0-1,1}{13}$$

Ці “пластичні” чавуни не тільки спроможні замінити леговані сталі, але ще і збільшують довговічність деталей у 2–3 рази під час роботи в абразивних ґрунтах (що особливо важливо для зубців екскаваторних машин та ін. деталей).

Хімічний склад сірого (СЧ) та високоміцного (ВЧ) чавунів¹

Вид чавуну	Форма графіту	Хімічний склад, мас. % (за винятком ванадію ²)						
		C	Si	Mn	Cu	Mg	Ce (PЗМ)	Cr
СЧ	Пластівці	3,8–3,9	2,6–3,3	0,29–0,50	0,7–1,0	–	–	4,5–4,8
ВЧ	Глобулярний	3,6–3,9	3,0–3,5	0,30–0,50	0,9–1,3	0,03–0,06	0,01–0,02	4,7–5,0

¹Ванадій мав десять різних концентрацій у СЧ від 0,12 до 4,7% і п'ять різних концентрацій у ВЧ від 2,4 до 5,0 %.

²Вміст фосфору 0,031–0,035, сірки 0,012–0,015.

Порівняно “новим” елементом для легування чавунів є ніобій, легування яким приводить до утворення голчастої структури, а вона, своєю чергою, підвищує крихкість чавуну (порівняно з ванадієвим чавуном). Мінімальні домішки Ті роблять карбідні частки ізольованішими, хоча загалом Nb не так сильно впливає на цементитну сітку, як V, що пояснюється його більшою атомною масою. Разом з тим Nb поліпшує здатність чавунів до деформування. Аналізуючи мікроструктуру базового (з 2,6 % C; 0,6 % Si і 1 % Cr) і легованого (додатково 1,2 % V і 1,3 % Nb) чавунів, можна дійти таких висновків: 1) гаряче деформування значною мірою руйнує “погану” ледебуритну структуру низькохромованого білого чавуну, але значна частина ледебуритних включень залишається не зруйнованою; 2) додавання 1,2 % V сприяє роздрібненню мікроструктури після гарячого деформування; 3) додавання 1,3 % Nb замість 1,2 % V приводить до подальшого роздрібнення структури у литому, а особливо у гарячедеформованому стані.

Іншим перспективним матеріалом є стабільно-половинчастий чавун [5]. Класичний стабільно-половинчастий чавун не містить крихкої фази M_3C , у твердому розчині залишається тільки частка V, Nb, Ti, Cr (карбідотвірних елементів) і достатньо велика кількість C і Si. Структура таких чавунів описується механізмом утворення потрійної евтектики (розплав+карбідний дендрит+аустеніт+графіт), що приводить до появи довгих дендритів VC, NbC або TiC.

Легування ванадієм стабільно-половинчастих чавунів з пластинчастим графітом підвищує їхню міцність на згин (до 270 МПа), зносостійкість і міцність на втому за незначного зниження антифрикційних властивостей і стійкості проти зношування. Такий матеріал особливо корисний для деталей автотракторної промисловості.

Стабільно-половинчастий чавун з глобулярним графітом має мікроструктуру типу “волове око” у зв'язку із високим вмістом Si і мікроліквацією Si до центральних частин евтектик. Друга частина його матриці складається з продуктів евтектичного перетворення системи VC+аустеніт, що призводить до зниження антифрикційних, демпфуючих властивостей, стійкості проти зношування, теплопровідності, опору термоциклічним навантаженням (порівнюючи із аналогічними сплавами з пластинчастим графітом) і підвищення міцності до 200 МПа при $C_V < 0,5$.

Повна глобуляризація графіту при 6–9% Mg; 4–8% Ca; 45–55% Si; 1,0–1,5% Ce; 15–20% Cu (решта – залізо) призводила до зростання стійкості проти зношування.

На рис. 2 параметр зношування подано як функцію твердості (HRC) для сірих (СЧ) і високоміцних (ВЧ) чавунів.

Проблема стабільно-половинчастих чавунів не нова: всі сірі чавуни, як правило, містять невелику кількість стабільних оксикарбонітридів Ti (C, N, O). Відповідно, необхідно тільки домовитись про вибір довільної границі їхнього вмісту, вище якої сірі чавуни вважатимуть стабільно-половинчастими.

Розглядаючи проблему стабільно-половинчастих чавунів, не можна обійти увагою технології зварювання і зміцнювального наплавлення [5].

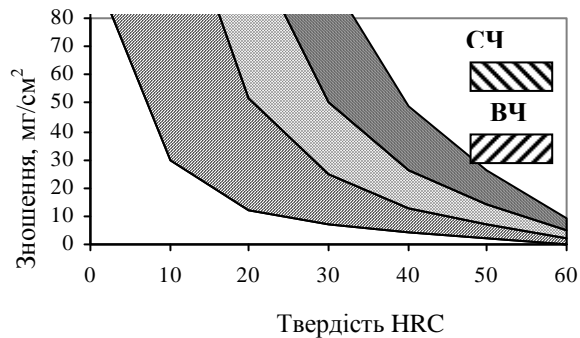


Рис. 2. Показник зношення чавунів СЧ і ВЧ (див. табл.) як функція твердості (в литому, відпаленому і гартованому станах) незалежно від цих станів і вмісту V (при навантаженні 3 МПа)

У роботі [3] Ф.І. Кісс та його німецькі колеги запропонували новий метод зварювання сталі і чавуну із використанням сталевих електродів, до складу яких входить V, Nb, та Ti. У разі утворення білого чавуну на границі наплавленого металу і зони термічного впливу (ЗТВ) він збіднюється вуглецем, але збагачується легуючими елементами, і тоді його структура перетворюється на "інвертовану" – тріщин не виникає. Цю роботу було продовжено у Вінниці й Ужгороді із використанням нікелевих електродів з V, Nb і Ti у разі введення цих елементів без сплавлення з Ni безпосередньо в обмазку електродів [6].

Якщо покрити сталеву плиту шаром вуглецевих волокон і пропускати через них електричний струм (волокна електропровідні), то виникає явище швидкого контактного наплавлення (обернена евтектична реакція). Волокна з вуглецю добре змочуються рідкою сталлю, а враховуючи їхні високі капілярні властивості, тканина ніби "всмоктує" розплав. Після припинення дії електричного імпульсу шар рідкого чавуну перетворюється у доевтектичний або евтектичний рідкий чавун, який і покриває сталь на глибину 0,5–2,0 мм (до 6 мм).

Така технологія наплавлення спричиняє низку проблем: надзвичайна рідкотекучість евтектичного чавуну приводить до можливості сповзання наплавлення із зміцнюваної поверхні; обернена евтектична реакція ендотермічна і структура ледебуриту може призвести до утворення тріщин поблизу ЗТВ.

Ці проблеми легко вирішуються використанням V як легуючого елемента [6]. Повість, виготовлена з вуглецевих волокон, насичували шлікером (рідко-твердою сумішшю) з частинок Fe і FeV, висушували, накладали на сталеву зміцнювану поверхню і через неї пропускали електричний струм, який мав тільки підпалювати суміш. Починалася високоекзотермічна реакція саморозповсюджувального високотемпературного синтезу (СВС). Карбіди VC у СВС процесі (як показала мікроструктура шліфа) були повністю ізольованими і підвищували в'язкість шлікеру, глибина ЗТВ – мінімальна за рахунок зниження сили струму в імпульсі, тріщини не утворювались, а механічні властивості наплавленого металу (міцність) і його зносостійкість були значно вищі ніж у нелегованих білих чавунах. Все вищесказане дає змогу зробити висновок, що ми є свідками створення нових високоефективних технологій зміцнювального наплавлення, в яких повністю виконується принцип Шарпі–Бочвара.

При цьому не можна обійти увагою і традиційний напрям зміни властивостей матеріалів за рахунок термічної або термомеханічної обробки. Термічна обробка після лиття або зварювання значною мірою може зняти внутрішні напруження, які виникають у результаті фазових і структурних перетворень під час охолодження сплаву.

Існує два основних механізми бейнітного перетворення – один, під час легування V, Nb, Ni супроводжується осадженням карбідної фази в результаті евтектоїдного розпаду переохолодженого аустеніту, а другий, при легуванні Si, Cu, Ni, виключає таке осадження ("аусферит" Бели Ковача).

У ливарних технологіях найбільш багатообіцяючий варіант термічного оброблення полягає у бейнітному гартуванні виливків після гарячої вибивки з форм і очищувальних операцій. Так, одна з

розроблюваних технологій (найбільш економічно приваблива) передбачає занурення на декілька секунд розпечених виливків (з температурою ще вищою за критичну точку A_{C1}) у холодну воду або розчин NaCl, а потім – у кипляче масло на більш тривалий час (без перетину точки мартенситного перетворення), з подальшим перенесенням у звичайну термпіч для проведення ізотермічного розпаду аустеніту (наприклад, витримка 0,8 години при 370°C) [7].

Високолегований білий чавун можна розглядати і як карбідний твердий сплав – тому, що між цими двома сплавами немає принципової різниці. Дійсно, ванадієві білі чавуни за структурою схожі на надвисоковуглецеві сталі (“ultra high carbon steel” UHCS проф. О.Д. Шербі), що використовуються замість стандартних швидкорізальних сталей [8,9]. Впродовж останніх років на основі цього розроблено нові технологічні процеси, які дають змогу проводити не тільки металургійне зварювання (наприклад, приварювання інструментальної пластини до основи різця або зварювання дротів), але і наплавлення. Один з них [10,11] заснований на СВС. Над керамічною формою встановлено вогнетривку реакційну камеру, а між ними прокладено тонкий титановий лист. У реакційній камері розміщено суміш порошків Fe_2O_3 , Cr_2O_3 , WO_3 , Al і C, яка підпалюється невеликою кількістю порошку Ti, запаленого, своєю чергою, від звичайного сірника. Під час горіння проходять класичні термітні реакції відновлення Fe, Cr і W з їх окислів, доповнені іншими екзотермічними реакціями карбідоутворення [8]. У зв'язку з додаванням теплових ефектів двох типів реакцій (металотермічної і СВС) адіабатична температура горіння такого комбінованого процесу сягає 3000°C , тому продукти реакції (зокрема і тугоплавкі карбіди) являють собою рідку фазу, яка після відокремлення від рідкого шлаку пропалює титановий лист і заливається у керамічну форму.

Розроблено також варіант технологічного процесу, під час якого вищокопегретий розплав заповнює простір над стрижнем металорізального інструменту або бурильної коронки і металургійно приварюється до них під час однієї операції, що виключає операції пайки, склеювання і механічного кріплення [12].

На рис. 3 показано мікрофотографію одного з таких сплавів, який складається з крупних кристалів WC, охоплених матрицею з сталі UHCS з дуже високим вмістом вуглецю (~2 %) і вольфраму (~24 %).

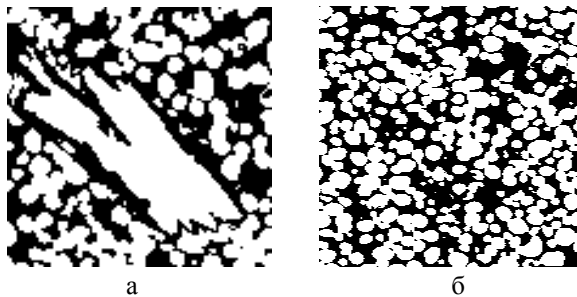


Рис. 3. Мікроструктура карбідосталі, отриманої внаслідок СВС процесу: а – з масивними карбідами WC у матриці типу UHCS (x200); б – сталева матриця з глобуляризованими комплексними карбідами типу W_2C (x400)

Ця металічна зв'язка для карбідів має значно кращі властивості порівняно з кобальтом у традиційних твердих сплавах тому, що вона не тільки цементує надлишкові карбіди, але й сама є інструментальним матеріалом. На рис. 3 видно, що комплексні карбіди у цій матриці глобуляризовані за механізмом реолитва, отже, повністю відповідають принципу Шарпі–Бочвара.

В описаній технології, на жаль, W не можливо замінити на дешевший Ti тому, що TiO_2 дуже погано відновлюється алюмінієвим порошком, а кількість виділеного тепла в реакції термітного типу невелика. З метою отримання карбідосталі (термін “карбідосталь” для позначення матеріалу, що містить карбіди і сталеву матрицю, вже введено і в англомовну літературу) з TiC пізніше було розроблено іншу технологію [12].

Згідно з нею в електропечі сплавлялися всі інгредієнти, крім Ті, який неможливо вводити у великих кількостях у розплав тому, що рідкий метал повністю втратить рідкотекучість (при масивному формуванні TiC). Порошок Ті або FeTi подається безперервно на струмінь розплаву під час заповнення розливного ковша, у якому формується високотемпературний шлікер (температура металу зростає більш ніж на 100 °С за рахунок утворення TiC).

Надалі шлікер переливають з ковша у металічну форму-матрицю, в якій і пресується або обробляється литвом-видавлюванням. Видалена з металевої форми заготовка (ще нагріта до білого розжарювання) швидко піддається додатковій операції гарячого деформування, поки цей карбідний сплав знаходиться у надпластичному стані.

В обох прикладах фігурують сплави практично безпористі, тоді як зараз аналогічні сплави отримують тільки методами порошкової металургії, які у більшості випадків надають пористості отриманим продуктам.

Висновки. Результати аналізу сучасних технологій і матеріалів, отриманих за їхньою допомогою, свідчать, що матеріали типу білі чавуни, стабільно-половинчасті чавуни та ін. мають значні перспективи для використання у разі застосування легування V, Nb, Ti. Крім цього, за допомогою спеціальних технологій термічного оброблення і пластичного деформування досягають того ж ефекту. Саме такі новітні технологічні процеси можуть містити реолиття, лиття у кокіль та выдавлювання, рідку штамповку та лиття-кування (процес “autoforge”) і слугувати прототипом майбутніх комплексних технологій, що поєднують у собі декілька стадій гарячого оброблення металу.

1. Zhukov A. A., Mohanty O. N., Mukunda P.G., Pani B.B. *Proc. Of Natural Semiconductor on Composition Material Indira Gandhi Institut of Technology, Sarang, Orissa, India, TS*, – 1992, – N2, – P.1–6. 2. Taran Yu.N., Maiurnickov V., Goobenko S. *Mottled iron as a promising material for the making of the equipment parts and deforming tools processing improved durability//Metal and Casting of Ukraine*. – 1994, – N 7–10, – P. 21–26. 3. Kiss F.Y., Berns H., Fisher A. *Joint Sciences*, – 1993, – vol. 1., – N4, – P. 182–187. 4. Жуков А.А., Сильман Г.И. *Что такое стабильно-половинчатый чугуи? // Литейное производство*, – 1993. – № 2–3. – С. 3–4. 5. Brosale R., Chakrabarti A.K., Basak A. *Cast Metals*, 1991, – vol.3. – № 4. – P. 209–213. 6. Zhukov A.A., Bondarenko A.V., Osadchuk A.Yu. *New methods of joining carbonaceous materials to the surface of steel. Joining Sciences*. – 1993. – vol. 1. – № 4. – P. 188–193. 7. Жуков А.А. *Некоторые вопросы теории и практики бейнитной закалки чугунов // Металловедение и термическая обработка металлов*. – 1995. – № 12. – С. 26–27. 8. Жуков А.А., Жигуц Ю.Ю. *Нетрадиционные методы наплавки инструментальных материалов на металлорежущий инструмент // Тез. докл. 2-й Междун. конф. – Брянск, 1996. – С. 5–6*. 9. Zhiguts Yu. *Some Permanent Joints Obtained with the Use of SHS // Modern Foundry Technologies – Environmental Protection. 3 Intern. Conference. Wydzial Odlewnictwa Akademii Gorniczo-Hutniczej Stowarzyszenie Techniczne Odlewnicow Polskich. – Krasow, 2000. – P. 213–215*. 10. Жигуц Ю.Ю., Скиба Ю.Ю. *Патент №2002021429. Спосіб термітного зварювання чавунів // Бюл. №1, – 2003*. 11. Жигуц Ю.Ю., Курітнік І.П. *Карбідосталі синтезовані металотермією і СВЧ // Мат 2-ї Між. конф. “Конструк. та функціон. матеріали”. – Львів, Вид. НТШ, 1997. – С. 186–187*. 12. Жуков А.А., Жигуц Ю.Ю., Шилина Е.П., Мажумдар Дж. Датта. *Комбинированная поверхностная обработка лазерным поверхностным упрочнением и самораспространяющимся высокотемпературным синтезом // Изв. ВУЗов. “Черная металлургия”, 1998. – №5. – С. 60–63*.