

Фесенко М. А.¹, Фесенко А. М.²

(¹ДУІКТ, Київ; ²ДДМА, м. Краматорськ)

**ДОСЛІДЖЕННЯ НОВОГО СПОСОБУ ВИГОТОВЛЕННЯ ЧАВУННИХ
ВИЛИВКІВ З ФУНКЦІОНАЛЬНО-ГРАДІЄНТНОЮ СТРУКТУРОЮ**

E-mail: fesmak@ukr.net; anatoly.fesenko@ukr.net

Резервом суттєвого підвищення експлуатаційних характеристик сучасних технічних засобів, які працюють в важких екстремальних умовах знакозмінних динамічних навантажень, особливо при високих температурах, або при дії агресивного середовища, є використання в їх конструкціях замість деталей з монолітних матеріалів (металів або сплавів) композиційних біметалевих виробів, виготовлених з двох і більше металевих компонентів. Монолітні вироби з одного металу або сплаву уже сьогодні в багатьох випадках практично вичерпали свої потенційні можливості подальшого підвищення експлуатаційних характеристик технічних засобів, в той час як композиційні біметалеві вироби, в яких використовуються синергетичні характеристики кожного із складових компонентів, в більшості випадків дозволяють підвищити експлуатаційні властивості і зменшити масу виробів.

Однак, незважаючи на те, що звичайні композиційні вироби з диференційованою структурою в об'ємі характеризуються певними перевагами в порівнянні з монолітними виробами з одного металу або сплаву, наявність в них різкого переходу між різними шарами із-за різниці в фізичних властивостях може визвати розшарування виробів, що знижує ефективність використання таких композиційних біметалевих матеріалів з диференційованою структурою в окремих шарах виробу. Тому останнім часом у дослідників-металознавців, конструкторів і виробничників підвищений інтерес визивають композиційні матеріали з функціонально-градієнтною структурою, які є відносно новим класом композиційних матеріалів і знаходять все більш широке використання як сучасні функціональні конструкційні матеріали для виготовлення деталей, які працюють в особливих умовах та потребують суперечливих властивостей від робочих (функціональних) і базових (конструктивних) частин виробів.

Особливістю об'ємних виробів із функціонально-градієнтною структурою, які виготовляються з двох та більше металів або сплавів, що характеризуються різною структурою та властивостями, є наявність замість різкої межі розділу між різними матеріалами перехідної зони, в якій спостерігається плавний градієнт концентрації, мікроструктури та властивостей [1–4]. Для отримання таких виробів на практиці використовуються різні способи [1–4], в тому числі ливарні технології, перспективними з яких є відцентрове лиття [5–9], процес каст – декант – каст (CDC – cast-decant-cast) [10–16] та інші. Такі композиційні матеріали є перспективними конструкційними матеріалами для виробів, які експлуатуються при високих навантаженнях, особливо в умовах високих температур, агресивного середовища тощо.

Тому важливою задачею на сьогодні і в перспективі є забезпечення розроблення нових методів і технологічних процесів виготовлення композиційних матеріалів із двох і більше металів/сплавів з градієнтною структурою з плавним перехідним проміжним контактним шаром від структури та властивостей одного матеріалу до структури властивостей іншого шару матеріалу.

Незважаючи на значні переваги, основним недоліком існуючих ливарних технологій виготовлення об'ємних функціонально-градієнтних металевих матеріалів є необхідність попереднього підготовки двох і більше металевих розплавів, що потребує використання двох і більше плавильних агрегатів і призводить до значного підвищення капітальних затрат на організацію промислового виробництва таких матеріалів. Крім того, для реалізації відомих способів отримання функціонально-градієнтних матеріалів потрібна чітка синхронізація в часі процесів виплавлення двох різних за хімічним складом рідких сплавів та процесу заливання їх у ливарну форму. Враховуючи те, що сьогодні основним ливарним конструкційним матеріалом для широкої номенклатури фасонних литих виробів залишається чавун – залізо-вуглецевий сплав, структуру і властивості якого можливо змінювати в широкому діапазоні зміною хімічного складу, теплофізичних умов лиття та затвердіння, використанням процесів легування і модифікування, різних режимів термооброблення й інших факторів, в представленій роботі запропонований і досліджується новий спосіб виготовлення чавунних виливків з функціонально-

градієнтною структурою та властивостями з одного базового розплаву, виплавленого в одному плавильному агрегаті. В основу нового способу покладений процес каст – декант– каст (CDC – cast-decant-cast) [10–16].

На відміну від базового CDC процесу, в якому для отримання виливків з функціонально-градієнтною структурою потрібна виплавка в різних плавильних агрегатах двох різних розплавів, в запропонованому нами новому способі для виготовлення виливків з градієнтною структурою використовується один розплав базового чавуну необхідного хімічного складу, виплавлений в одному плавильному агрегаті [17].

Різна (диференційована) структура і властивості в окремих частинах виливка (в зовнішньому робочому шарі виливка й у його серцевині) в запропонованому способі досягається за рахунок того, що базовий рідкий метал, що виплавляється заданого хімічного складу в одному плавильному агрегаті та заливається в ливарну форму на першому етапі надходить у ливарну форму без будь-якого оброблення як вихідний і з нього формується в контакт з стінками ливарної форми поверхневий зовнішній робочий шар виливка, у той час як розплав, що заповнює вивільнений після декантації залишків першого розплаву внутрішній об'єм виливка в процесі заливання проходить оброблення дрібнодисперсним порошкоподібним, зернистим, гранульованим або брикетованим модифікатором, лігатурою або іншою добавкою. Внутрішньоформове оброблення розплаву внаслідок легувального або модифікувального впливу добавки або окремих її компонентів, хімічних елементів або речовин, призводить до формування іншої відмінної структури, а, отже, до зміни властивостей металу, що заповнює і в подальшому формує цю частину виливка, в порівнянні зі структурою та властивостями базового розплаву зовнішнього шару. Завдяки цьому досягається диференціація структури та властивостей металу в різних шарах виливка з плавним формуванням перехідної зони з градієнтною структурою від однієї до іншої структури в різних зонах.

Експериментальне підтвердження можливості отримання виливків з функціонально-градієнтною структурою запропонованим способом проводили в лабораторних умовах кафедри технології і обладнання ливарного виробництва

Донбаської державної машинобудівної академії при виготовленні експериментальних виливків типу «Вертикальний циліндр» діаметром 100 мм і висотою 100 мм в разовій ливарній формі, виготовлений з піщано-глинястої формувальної суміші, в яку в процесі виготовлення встановлювали сталеву гільзу з товщиною стінки 10 мм, яка виконувала роль металевого кокілю для формування виливка. Форму заливали зверху ручним поворотним розливним ковшем конічного типу базовим розплавом чавуну доєвтектичного складу, схильного до кристалізації з вибіленням відповідно до метастабільної діаграми стану залізо-цементит, виплавленим в індукційній тигельній печі з кислотою футерівкою типу ІЧТ-006 при температурі розплаву 1430...1450 °С. Заливання форми проводили в два етапи.

На першому етапі заливання форми проводили зверху базовим чавуном доєвтектичного складу без будь-якого оброблення. Залитий розплав витримували в ливарній формі протягом 40 с для кристалізації розплаву в поверхневому шарі виливка й формування твердого поверхневого шару в контакті зі сталеву гільзою. Після визначеного 40-секундного витримання проводили декантацію розплаву, що не закристалізувався, з осьових об'ємів виливка, після чого у вивільнену після декантації центральну порожнину виливка заливали розраховану порцію того ж базового розплаву чавуну, який на шляху руху до виливка піддавався внутрішньоформовому обробленню твердою порошкоподібною графітизувальною модифікувальною добавкою у вигляді дробленого феросиліцію ФС75 з розмірами часток 1,0...2,5 мм у кількості 2,0 % від маси рідкого чавуну.

Виливок тверднув і охолоджувався в ливарній формі до температури оточуючого середовища, після чого проводилось його вибивання з форми. З отриманого виливка на половині його висоти вирізали диск діаметром 100 мм і товщиною 20 мм, який після виготовлення макрошліфа і візуального дослідження макроструктури в подальшому розбивався на дві приблизно рівні частини для вивчення характеру зламу й виготовлення зразків для дослідження мікроструктури, а також заміру твердості за шкалою Брінелля в різних точках перерізу виливка.

Як показали результати проведених експериментів, на зламі одержаного виливка чітко виявлені дві характерні зони: поверхнева зона товщиною близько 10 мм білого чавуну, а також зона темно-сірого кольору сірого чавуну з пластинчастим графітом у центральній частині виливка (рис. 1, а).

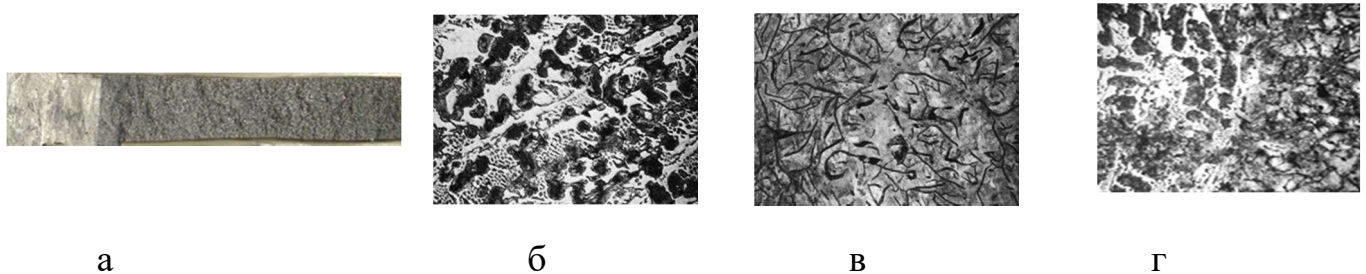


Рис. 1. Макроструктура перерізу зламу (а) і мікроструктура чавуну експериментального виливка на половині висоти в поверхневому шарі (б), у внутрішній (осьовій) зоні (в) і в перехідній зоні (г) виливка

Мікроструктура чавуну в поверхневій робочій зоні виливка, який кристалізувався з вихідного чавуну, складається з продуктів розпаду первинних кристалів аустеніту й ледебуритної евтектики (рис. 1, б) з твердістю 370...380 НВ. У внутрішній частині виливка, яка після декантації незатверділого розплаву з внутрішнього об'єму заповнювалась рідким чавуном, який піддавався внутрішньоформовій модифікувальній обробці феросиліцієм ФС75, кристалізувався сірий чавун перліто-феритного класу (рис. 1, в) з твердістю близько 200 НВ. Між двома шарами з різною структурою та властивостями чавуну утворювалась перехідна зона з градієнтною структурою з плавним переходом від структури білого чавуну в зовнішньому шарі до структури сірого чавуну в осьових об'ємах виливка (рис. 1, г).

Таким чином, лабораторними дослідженнями підтверджена практична можливість отримання з одного базового розплаву чавуну виливка з диференційованою структурою і властивостями в зовнішньому і внутрішньому (осьовому) шарах з градієнтною структурою в перехідній зоні, що дозволяє рекомендувати його впровадження у виробничу практику для виготовлення вісесиметричних виливків, робота яких в конструкціях технічних засобів вимагає наявності двох шарів з різною структурою і властивостями.

Впровадження запропонованого способу не вимагає встановлення та закупівлю нового додаткового обладнання, засобів і матеріалів. Даний спосіб може бути реалізовано на існуючому устаткуванні без суттєвих змін технологічного процесу виготовлення виливків у діючому цеху, дільниці тощо.

Література

1. Sam, M. Progression in manufacturing of functionally graded materials and impact of thermal treatment – A critical review / M. Sam, R. Jothith, N. Radhika // J. Manufacturing Processes. – 2021. – Vol. 68. – P. 1339–1377.
2. Mohammadi, M. Functionally graded materials (FGMs): A review of classifications, fabrication methods and their applications / M. Mohammadi, M. Rajabi, M. Ghadiri // Processing Application of Ceramics. – 2021. – Vol. 15, № 4. – P. 319–343.
3. Zhang, N. Functionally graded materials: an overview of stability, buckling, and free vibration analysis / N. Zhang, T. Khan, H. Guo, e.a. // Adv. Mater. Science Engineering. – 2019. – Vol. 2019, № 1. – P. 1354150.
4. El-Galy, I. M. Functionally graded materials classifications and development trends from industrial point of view / I.M. El-Galy, B.I. Saleh, M.H. Ahmed // SN Applied Sciences. – 2019. – Vol. 1. – P. 1–23.
5. Gao, J. W. Modeling the solidification of functionally graded materials by centrifugal casting / J.W. Gao, C. Wang // Mater. Science Engineering: A. – 2000. – Vol. 292, № 2. – P. 207–215.
6. Caisalitín, L. G. H. Fabrication of a Functionally Graded Material by ex situ Centrifugal Casting Method / L.G.H. Caisalitín, F.H.O. Fierro // Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar. – 2023. – Vol. 7, № 5. – P. 3315–3336.
7. Watanabe, Y. Formation mechanism of graded composition in Al–Al₂Cu functionally graded materials fabricated by a centrifugal in situ method / Y. Watanabe, S. Oike // Acta Materialia. – 2005. – Vol. 53, № 6. – P. 1631–1641.
8. Xie, Y. Centrifugal casting processes of manufacturing in situ functionally gradient composite materials of Al-19Si-5Mg alloy / Y. Xie, C. Liu, Y. Zhai, K. Wang, X. Ling // Rare Metals. – 2009. – Vol. 28. – P. 405–411.

9. Verma, R. K. A review on fabrication and characteristics of functionally graded aluminum matrix composites fabricated by centrifugal casting method / R.K. Verma, D. Parganiha, M. Chopkar // SN Applied Sciences. – 2021. – Vol. 3. – P. 1–29.
10. Midson, S. Using the CDC process for the casting of low-cost functionally gradient materials / S. Midson, D.J. Weiss, D. Browne // Foundry Trade Journal. – 2009. – Vol. 182. – P. 116–118.
11. Scanlan, M. New casting route to novel functionally gradient light alloys / M. Scanlan, D.J. Browne, A. Bates // Mater. Science Engineering: A. – 2005. – Vol. 413. – P. 66–71.
12. Anandavel, B. Development and Characterization of Functionally Gradient Al-Si Alloy Using Cast-Decant-Cast Process / B. Anandavel, S. Mohamed Nazirudeen, J. Anburaj, P. Angelo // Trans. Indian Institute Metals. – 2015. – Vol. 68. – P. 137–145.
13. Nagarajan, D. Microstructure and Wear Behavior of a Functionally Gradient Al-Si Alloy Prepared Using the Cast-Decant-Cast (CDC) Process / D. Nagarajan, P. Mohana Sivam // Mater. Performance Characterization. – 2016. – Vol. 5, № 5. – P. 637–647.
14. Fathy, N. A Novel Approach of Optimum Time Interval Estimation for Al-7.5 Si/Al-18Si Liquid-Liquid Bimetal Casting in Sand and Metallic Moulds / N. Fathy, M. Ramadan, K.M. Hafez, F. Abdulaziz, B. Ayadi, A.S. Alghamdi // Materials. – 2023. – Vol. 16, № 8. – P. 3004.
15. Dhayaneethi, S. Investigation of wear behavior of functionally graded Al-Si alloy produced by cast decant cast (CDC) method / S. Dhayaneethi, S.S. Kumar, K. Vickram, V.S. Kumar // AIP Conference Proceedings. – 2019 – Vol. 2128.
16. Rahvard, M. M. Effect of superheat and solidified layer on achieving good metallic bond between A390/A356 alloys fabricated by cast-decant-cast process / M.M. Rahvard, M. Tamizifar, M. Boutorabi, S.G. Shiri // Transactions Nonferrous Metals Society China. – 2014. – Vol. 24, № 3. – P. 665–672.
17. Патент №155678 u202304305. **МПК:** B22D27/00 Спосіб виготовлення виливків із функціонально-градієнтних матеріалів / А. М. Фесенко, М. А. Фесенко. Заявл. 12.09.2023, опублік. 27.03.2024. Бюл.№ 13/2024.