

Експериментально встановлено, що найбільш ефективними у якості протипригарних і протиужиминних добавок є кам'яновугільні порошки, які мають наступні характеристики: максимальний вихід блискучого вуглецю (8...12 %), вихід летких речовин на рівні 30...40 %; широкий температурний інтервал пластичного стану (350...550 °С), незначний вихід коксового залишку. Таким характеристикам можуть відповідати збагачені кам'яновугільні порошки марок: «газове», «довгополум'яно-газове», «жирне». З метою вибору оптимально ефективних різновидів кам'яновугільних порошків, необхідно здійснювати їх комплексне тестування для визначення вищезазначених властивостей.

Фесенко А. М.¹, Фесенко М. А.²

(¹ДДМА, м. Краматорськ; ²ДУІКТ, Київ)

**ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ ОТРИМАННЯ ВИЛИВКІВ З
ВИСОКОМІЦНОГО ЧАВУНУ З КУЛЯСТИМ ГРАФІТОМ**

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

Чавун і сьогодні залишається основним ливарним конструкційним матеріалом для широкої номенклатури виробів машинобудування. Враховуючи постійно зростаючі вимоги до експлуатаційних властивостей, надійності і довговічності агрегатів, машин, механізмів і обладнання при одночасному зниженні витрат на їх виготовлення і обслуговування останнім часом в світовому випуску виливків із чавунів постійно збільшується доля високоміцного чавуну з кулястим графітом (ВЧКГ), що обумовлено сприятливим поєднанням фізико-механічних, експлуатаційних і технологічних властивостей цього конструкційного матеріалу, а також економічними міркуваннями.

Основною особливістю виливків із високоміцного чавуну з кулястим графітом в порівнянні з іншими типами чавунів є наявність в їх структурі вкраплень вільного графіту кулястої геометричної форми в металевій матриці. Кулясті вклучення графіту в структурі ВЧКГ не є такими сильними концентраторами напружень і чинять меншу надрізувальну дію на металеву матрицю в порівнянні з

пластинчастим графітом в сірих чавунах, що сприятливо впливає на міцнісні характеристики і пластичність чавуну.

Таким чином ВЧКГ поєднує основні переваги сірого чавуну (низька температура плавлення, добра рідкоплинність і чудові ливарні властивості, чудова оброблюваність і хороша зносостійкість) з інженерними перевагами сталі (високою міцністю, в'язкістю, пластичністю, гарячою оброблюваністю і прогартовуваністю). Завдяки цьому ВЧКГ знаходять широке застосування в багатьох сферах техніки для виготовлення виливків відповідального призначення на заміну виробів з литої і кованої сталі, сірого і ковкого чавуну, інших сплавів.

Однією з необхідних і обов'язкових технологічних операцій в технологічному ланцюгу (циклі) виготовлення виливків із ВЧКГ є операція модифікувальної обробки базового розплаву. Отримання високоякісних виливків з ВЧКГ на практиці за реальних умов лиття без сфероїдизувальної або більш складної комплексної сфероїдизувально-графітизувальної модифікувальної обробки базового розплаву чавуну практично неможливе.

Технологія виготовлення якісних виливків з ВЧКГ з необхідними службовими характеристиками потребує врахування і дотримання багатьох факторів, які впливають на процес структуроутворення при затвердінні чавунних виливків в ливарній формі і як результат на кінцеву структуру і властивості металу в виливках. Фізико-механічні і експлуатаційні властивості ВЧКГ в значній мірі визначаються структурою металічної матриці, основними факторами регулювання якої є: якість вихідного (базового) розплаву, параметри модифікування (включаючи тип, хімічний склад, кількість, зернистість, спосіб і послідовність введення присадок), хімічний склад металу, легування, швидкість охолодження виливків і їх термічна обробка.

На сьогоднішній день у промисловості для отримання виливків з ВЧКГ доступно багато типів модифікаторів і ціла низка способів модифікування розплавів. Серед розроблених і використовуваних на практиці способів модифікування розплавів чавунів одним із найбільш ефективних, технологічно гнучких, економічно вигідних і екологічно чистих для отримання якісних чавунних

виливків з заданими структурою і комплексом необхідних властивостей є один із процесів пізнього модифікування – так званий IN-MOLD процес.

При цьому способі модифікувальне оброблення розплаву здійснюється безпосередньо в момент заливки порожнини ливарної форми вихідним рідким чавуном, для чого в ливниковій системі на шляху руху розплаву до виливка передбачена порожнина (спеціальний резервуар) – проміжна проточна реакційна камера, в яку перед збиранням форми завантажують розрахункову кількість зернистого, дробленого, порошкоподібного, гранульованого або брикетованого модифікатора. Під час заливання ливарної форми при оптимальному поєднанні температури і швидкості потоку рідкого чавуну у ливниковій системі модифікатор в реакційній камері послідовно розчиняється (розплавляється) в потоці рідкого чавуну і, переміщуючись в об'єм виливка, засвоюється остаточно розплавом. При внутрішньоформовому модифікуванні суттєво зменшується окислення модифікувальних елементів, скорочується до мінімуму час між введенням модифікатора в рідкий чавун і початком кристалізації останнього, що дозволяє виключити демодифікування розплаву, забезпечити максимальний ефект утворення кристалічних зародків і високий ступінь графітизації, підвищити коефіцієнт засвоєння модифікувальних елементів і скоротити витрату модифікуючих добавок, збільшити продуктивність праці, а також створює умови для автоматизації процесів модифікування та заливання. Крім того, впровадження цього методу у виробництво не потребує встановлення в цеху або на ливарній ділянці кількох плавильних агрегатів, додаткового обладнання чи інших агрегатів та спеціальних пристроїв.

Незважаючи на значні переваги IN-MOLD процесу перед іншими методами модифікувальної обробки розплавів, технологія отримання виливків з високоміцних чавунів з заданою структурою і комплексом бажаних експлуатаційних властивостей є досить чутливою до багатьох змінних факторів лиття і модифікувальної обробки, що потребує встановлення (визначення) і чіткого дотримання оптимальних значень основних і допоміжних факторів і параметрів технологічного процесу в кожному конкретному випадку при реальних умовах

отримання конкретного виливка. А це, в свою чергу, потребує проведення всебічних комплексних досліджень і аналізу впливу основних і допоміжних факторів технологічного процесу лиття і внутрішньоформової обробки розплаву в порожнині ливарної форми на литу структуру і властивості чавуну в виливках.

Метою даної роботи було дослідження впливу основних факторів технологічного процесу отримання виливків з високоміцного чавуну з кулястим графітом (лиття і модифікувальної обробки розплаву) на макро- і мікроструктуру і показники твердості металу в литому стані.

З метою встановлення закономірностей впливу хімічного складу і, в першу чергу, значення вуглецевого еквіваленту базового розплаву чавуну на контрольовані параметри дослідження проводили з використанням базових розплавів чавунів доєвтектичного складу з низьким вмістом вуглецю ($C = 2,6...2,8 \%$) і кремнію (с низьким вуглецевим еквівалентом), схильних до кристалізації з вибіленням, та чавунів евтектичного або близького до евтектичного складу ($C = 3,3...3,4 \%$), які характеризуються схильністю до кристалізації з виділенням структурно вільного графіту.

Базові розплави чавунів виплавлялись в тигельній індукційній печі з кислою футерівкою типу ІЧТ-006 на шихтових матеріалах, які включали ливарний чавун Л2 та Л4 (ДСТУ3132-95), переробний чавун марки ПЛ2 (ДСТУ 3133-95), зворотні відходи власного виробництва і сталевий скрап (лом, брухт) сталі 3.

В якості сфероїдизувальних модифікувальних добавок, які розміщувались в порожнині проточних реакційних камер ливникової системи ливарної форми використовували широко розповсюджені для виготовлення виливків з ВЧКГ дроблені Fe-Si-Mg лігатури VL63M, ФСМг7, ФСМг5, ФСМг9, в окремих експериментах – Се-вміщуючі лігатури ФЦМ-5, Це48Ла28Мг3 різної зернової фракції в кількості 0,5; 1,0; 1,5; 2,0 % від маси рідкого металу, який проходить через ливникову систему (від маси виливка).

Для оптимізації гранулометричного складу кускові модифікатори дробили, після чого проводили розсівання на комплекті сит на зерна (фракції) розмірами

менше 0,63 мм (включаючи пилоподібну фракцію); 0,63...1,6; 1,6...2,5; 2,5...5,0; 5,0...10,0; 10,0...20,0 і 20,0...30,0 мм.

В якості експериментальних виливків, які забезпечували можливість в тому числі досліджувати вплив швидкості затвердіння і охолодження (товщини стінки виливка) на вихідні параметри, використовували триступеневі проби (плити) з товщиною стінки ступенів 8, 32, 64 мм, масою 5 кг кожна та клинові проби розміром 100x100 мм і товщиною у основі – 20 мм.

При порівняльних експериментах з метою максимального зменшення впливу на вихідні параметри інших (додаткових) факторів процесу лиття, крім досліджуваного, в одній ливарній формі розміщували одночасно чотири або шість експериментальних виливків з забезпеченням підведення базового розплаву в форму за допомогою загальних стояка і шлаковловлювача і окремих реакційних камер та живильників на кожний виливок (рис. 1, 2).



а



б



в

Рис. 1. Вид зверху на нижню півформу (а) і загальний вигляд блоків із чотирьох (б) і шести (в) отриманих експериментальних виливків «Трьохступенева плита» із ливниково-живильною системою



а



б

Рис. 2. Вид зверху на нижню півформу (а) і блок отриманих експериментальних виливків «Клинова проба» (б) із ливниково-живильною системою

Для виявлення впливу конструкції реакційної камери в складі ливникових систем в експериментах використовувались проточні реакційні камери верхнього і нижнього розташування: кубічної (рис. 3, а), циліндричної (рис. 3, б, в, г) і сферичної (рис. 3, д, е, є) геометричної форми з прямим (рис. 3, а, б, д), відцентровим (рис. 3, в, е) і по дотичній (рис. 3, г, є) підведенням до них розплаву.

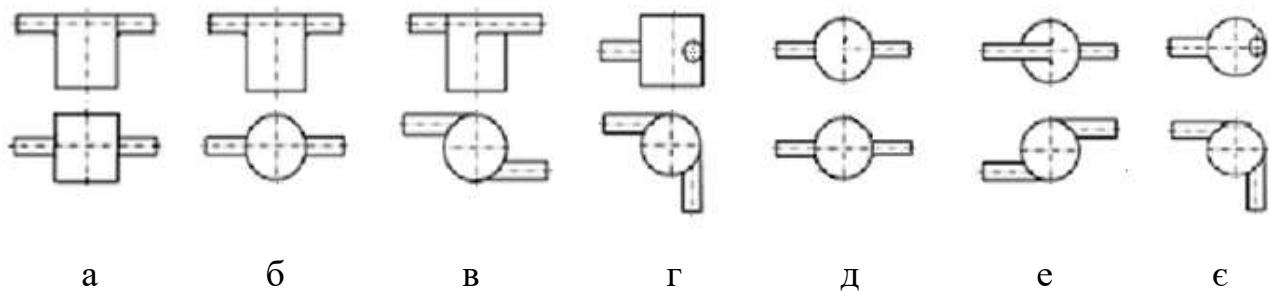


Рис. 3. Типи досліджуваних реакційних камер

Для отримання експериментальних виливків разову ливарну форму, виготовлену з піщано-глинястої суміші, заливали з ручного конічного ковша вихідним базовим розплавом чавуну при температурі 1350, 1400, 1450 і 1500 °С, для заміру (контролю) якої в печі і в ковші використовувались вольфрам-ренієві термопари ВР5/20 з діаметром електродів 0,35 мм, захищені кварцовими наконечниками (трубками) з реєстрацією показів на електронному самописному потенціометрі КСП (точність вимірювання температури ± 10 °С). Запис кривих охолодження виливків проводили за допомогою таких же термопар з записом на двокоординатному самописці моделі Н307.

Після повного затвердіння металу і охолодження виливків в ливарній формі до температури оточуючого середовища разова ливарна форма руйнувалась і виливки вибивались. Після очищення отриманих виливків від формувальної суміші вони розбивались в заданих місцях стінок, після вивчення зламів із перерізів різної товщини виливків вирізали зразки для подальших досліджень.

Вихідними параметрами оптимізації процесу служили хімічний склад чавуну, приріст вмісту і відповідний розрахований коефіцієнт засвоєння базових хімічних елементів модифікатора металом вилівка, а також характер і колір зламу,

характер макроструктури, мікроструктура і твердість чавуну в контрольованих перерізах експериментальних виливків.

Для визначення вмісту елементів у вихідному і модифікованому чавуні використовували хімічний і спектральний аналізи. Вміст вуглецю і сірки в чавуні (в металі зразків) визначали методом вакуум-плавлення на аналізаторах АН7529, АС7932 та CS-230, вміст інших елементів – за допомогою оптико-емісійних спектрометрів фірми «BrukerMaterials» марки Q4 TASMAN та «Specrtolab LAVFCO1F». Вуглецевий еквівалент чавуну визначали методом термографічного експрес-контролю з уточненням шляхом розрахунку після визначення хімічного складу чавуну.

Характер і колір зламу досліджувались і оцінювались візуально на поверхні зламів зразків експериментальних виливків, які виконувались шляхом розбивання по середині кожної ступені трьохступеневої проби і по середині клинової проби. Макроструктура вивчалась на макрошліфах після дослідження зламів візуальним шляхом.

Металографічні дослідження проводили на оптичних мікроскопах марки МІМ-8М та Neophot фірми Carl Zeiss Jena (Німеччина). Оцінку вкраплень графіту здійснювали на нетравлених шліфах, металевої матриці – на травлених шліфах. Для травлення зразків використовували 4 % спиртовий розчин HNO_3 . Час травлення зразків – 5...20 с. Цифровий запис і аналіз знімка мікроструктури при металографічних дослідженнях здійснювали на ПЕОМ з використанням пакета програм для оброблення графічної інформації.

Твердість чавуну в різних перерізах експериментальних виливків по Брінеллю вимірювали в відповідності ДСТУ EN ISO 6506-1:2007 «Металеві матеріали. Випробування на твердість по Брінеллю» на твердомірі моделі ТШ-2М при навантаженні приладу 30000 Н, діаметрі інтендора $D = 10$ мм; витримка під навантаженням тривала 10 с.

Приготування шліфів для металографічного аналізу чавуну проводилася шляхом обробки на абразивному камені, грубого шліфування, тонкого шліфування

та полірування. Обробка на абразивному камені проводилася для вирівнювання поверхні зразків. Грубе шліфування виконувалося послідовно на трьох шліфувальних шкурках: № 100-150, 150-200 і 280-320; тонке шліфування – на дрібнозернистих шкурках: № 40, 28 і 20. Полірування здійснюють на полірувальному верстаті, диск якого обтягнутий сукном, при частоті обертання 400-600 об/хв.

Статистичну обробку даних і побудову рівнянь регресії проводили з використанням ППП Microsoft Excel.

У результаті проведених експериментальних досліджень встановлені основні закономірності впливу режимів лиття, типів, зернистості (гранулометричного складу) і кількості модифікувальних добавок, а також конструктивних особливостей ливниково-живильних систем і температурно-часових режимів лиття і охолодження на структуру і властивості чавунних виливків, виготовлених з розплавів з різним вуглецевим еквівалентом. Експериментально підтверджені на типових виливках отримані нами раніше результати фізичного і комп'ютерного моделювання про ефективність протокових реакційних камер ливникової системи нижнього розташування в порівнянні з верхніми ливниковими системами (ливниковими системами верхнього розташування).

При внутрішньоформовій сфероїдизувальній обробці стабільні результати з отримання виливків з ВЧКГ з кулястими вкрапленнями графіту правильної форми в перліто-феритній металевій матриці з різним співвідношенням фериту і перліту були отримані як при використанні в якості базового доевтектичного, так і евтектичного чавуну при використанні в якості феросилікомагнієвих сплавів ФСМг7 и VL63(M).

Оптимальні розміри часток цих модифікувальних добавок $5,0 \pm 2,5$ мм (рис. 4, а), оптимальна кількість модифікатора в реакційній камері для гарантованого отримання кулястого графіту – 1,5...2,0 %. Підвищений вміст залишкового Mg в чавуні призводить як до збільшення витрати порівняно дороговартісних модифікаторів, так і до підвищення твердості чавуну в виливках (рис. 4, б).

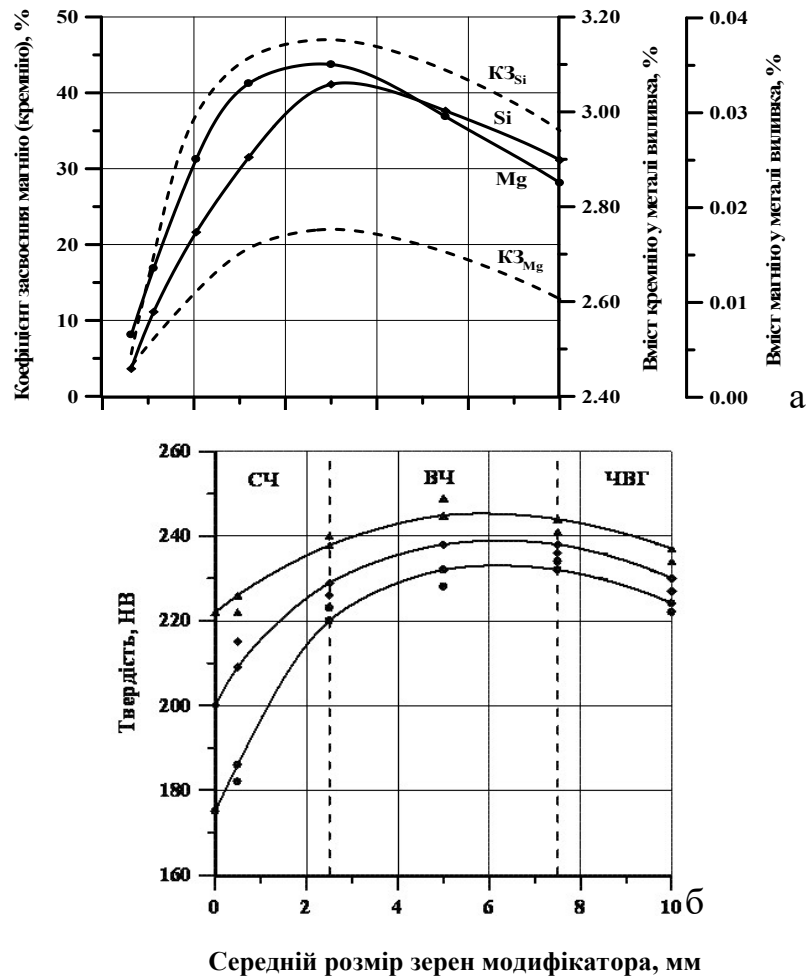


Рис. 4. Вплив розміру зерен модифікатора ФСМг7 на параметри оптимізації об'єкта дослідження

Для прикладу на рис. 5 і 6 наведені фото зламів, макро- і мікроструктури чавуну в виливках триступеневої (рис. 5) і клинової проби (рис. 6).

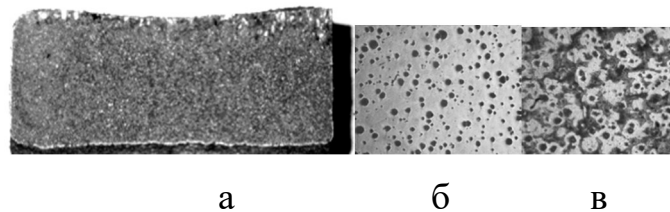


Рис. 5. Злам (а) і мікроструктура чавуну нетравлених (б) і травлених (в) зразків, вирізаних із ступені перерізом 32 мм експериментального трьохступеневого виливка, виготовленого з доєвтектичного чавуну, модифікованого лігатурою ФСМг7

Як показали проведені експериментальні дослідження, після сфероїдизувального модифікування чавуну в ливарній формі в структурі досліджуваних зразків, вирізаних з різних перетинів виливків (8, 32 і 64 мм) спостерігається утворення вкраплень графіту правильної кулястої форми (бал ШГф5), рівномірно розподілених у площині шліфа з балом ШГрІ.

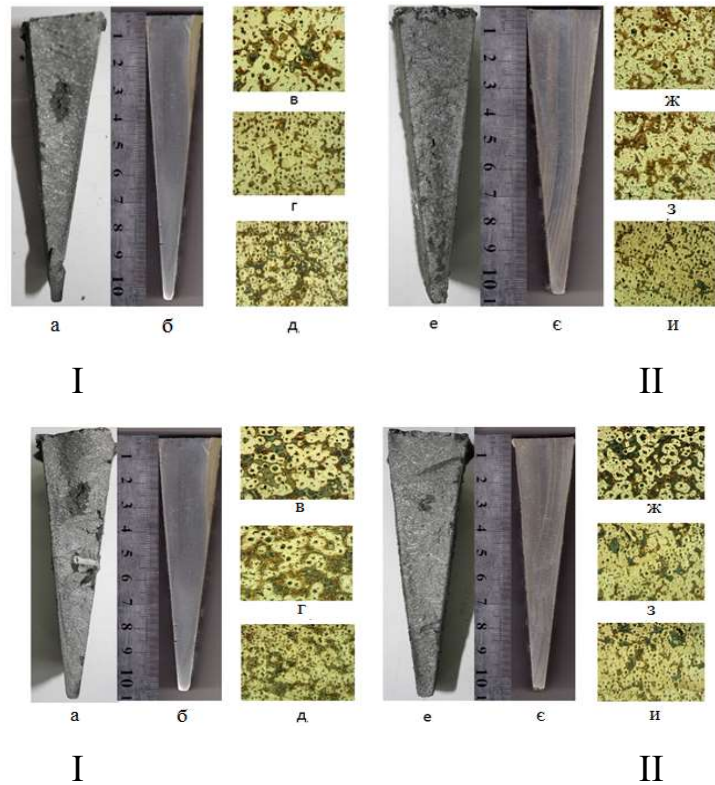


Рис. 6. Злам (а, е), макроструктура (б, є), мікроструктура у верхній (в, ж) середній (г, з) і нижній (д, и) по висоті частині виливка при використанні доевтектичного (I) і евтектичного (II) чавунів, модифікованих лігатурою ФСМГ7 (верхній ряд) і (VL63 M) (нижній ряд)

З ростом перерізу виливка спостерігається незначне збільшення розміру глобулярних вкраплень графіту від балу ШГд15 в перерізі виливка 8 мм до бала ШГд45 в перерізі 64 мм при одночасному збільшенні їх кількості від 6 % (бал ШГ6) в перерізі 8 мм до 10...12 % – відповідно в перерізах 32 і 64 мм. Мікроструктура зразків – ферито-перлітна зі збільшенням долі фериту з ростом товщини стінки виливка.

Результати досліджень пройшли випробування при виготовленні з ВЧШГ промислових виливків: «Подушка прокатного стану» масою 20 кг, «Поршень гідронасоса» – 5 кг, «Опорна плита» – 30 кг, «Прес-форма для склоформ» – 10 кг, 25 кг, «Бандаж» – 20 кг. Рекомендовані технологічні процеси дозволяють підвищити ефективність способів отримання чавунних виливків із заданим комплексом структури та властивостей. Впровадження перерахованих технологій не потребує переоснащення та зміни існуючих технологічних процесів у цехах підприємств і дозволить розширити номенклатуру лиття.

Фесенко А. М.¹, Фесенко М. А.²

(¹ДДМА м. Краматорськ; ²ДУІКТ, Київ)

**ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ ВНУТРІШНЬОФОРМОВОГО
МОДИФІКУВАННЯ РОЗПЛАВУ ПРИ ВИГОТОВЛЕННІ ЧАВУННИХ
ВИЛИКІВ**

E-mail: fesmak@ukr.net

Основним критерієм конкурентоспроможності ливарної продукції на світовому ринку на сьогоднішній день залишається висока її якість і низька собівартість. У свою чергу це висуває на перший план завдання зниження металоємності литих виробів за одночасного підвищення їх механічних та експлуатаційних властивостей.

Досягти таких умов можливо за рахунок застосування нових або поліпшення існуючих ливарних сплавів (матеріалів).

Одним із ефективних способів поліпшення структури та властивостей ливарних сплавів є модифікувальне оброблення рідкого металу (розплаву).

Частіше за все процеси модифікування знаходять використання при виготовленні литих деталей із чавуну як найбільш поширеного ливарного сплаву для широкої номенклатури виливків.

Незважаючи на значну кількість запропонованих і використовуваних на практиці способів модифікування, одним із перспективних, ефективних,