

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



АНОТАЦІЯ. У статті розглянуто сучасний стан та тенденції світового виробництва виливків із високоміцного чавуну з кулястим графітом. Авторами досліджено особливості технології отримання високоміцного чавуну, зокрема процеси внутрішньоформового модифікування розплаву. У роботі використано методи фізичного та комп'ютерного моделювання для аналізу гідродинамічних та теплофізичних процесів, які відбуваються під час взаємодії рідкого чавуну з модифікатором у порожнині ливарної форми. Отримані результати дають змогу оптимізувати параметри ливникових систем та режими модифікування, що забезпечує стабільне отримання кулястої форми графіту та високий рівень механічних властивостей литих деталей. Запропоновано підходи, які спрямовано на зниження собівартості виробництва за одночасного підвищення надійності та довговічності виробів машинобудування.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: високоміцний чавун, кулястий графіт, внутрішньоформове модифікування, комп'ютерне моделювання, ливарна форма.

Чавун і сьогодні залишається основним ливарним конструкційним матеріалом для широкої номенклатури виробів машинобудування. Враховуючи постійне зростання вимог до експлуатаційних властивостей (характеристик), надійності і довговічності агрегатів, машин, механізмів і обладнання при одночасному зниженні витрат на їх виготовлення і обслуговування, останнім часом у світовому випуску виливків із чавунів постійно збільшується доля високоміцного чавуну з кулястим графітом (ВЧКГ) (у країнах Європи за результатами 2023 року частка виливків із чавуну з кулястим графітом складає 32,7 %) [1], 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, порівняно з іншими типами чавунів, є наявність в їх структурі вкраплень вільного графіту кулястої геометричної форми в металевій матриці. Кулясті вкраплення графіту в структурі ВЧКГ чинять меншу надрізувальну дію на металеву матрицю порівняно, наприклад, з пластинчастим графітом у сірих чавунах, що сприятливо впливає на міцнісні характеристики і пластичність чавуну [2].

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) [3]. Завдяки цьому ВЧКГ знаходить 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 модифікувального оброблення базового розплаву. Отримання високоякісних виливків з ВЧКГ на практиці за реальних умов лиття без сфероїдизувального або більш складного комплексного сфероїдизувально-графітизувального модифікувального оброблення 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 в процесі затвердіння чавунних виливків у ливарній формі і, як результат, на кінцеву структуру і властивості металу в виливках. Фізико-механічні і експлуатаційні властивості ВЧКГ значною мірою визначаються структурою металевої 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 термічне оброблення.

На сьогодні у промисловості для отримання виливків з ВЧКГ доступно багато типів модифікаторів і ціла низка способів модифікування розплавів [4–6]. 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 із заданими структурою і комплексом необхідних властивостей є один із процесів пізнього модифікування – так званий INMOLD- процес [7–10].

При цьому способі модифікувальне оброблення розплаву здійснюється безпосередньо в момент заливання порожнини ливарної форми вихідним рідким чавуном, для чого в ливниковій системі на шляху руху розплаву до виливка передбачено порожнину (спеціальний резервуар) – проміжна проточна реакційна камера, в яку перед складанням форми завантажують розрахункову кількість зернистого, дробленого, порошкоподібного, гранульованого або брикетованого модифікатора. Під час заливання ливарної форми за умови оптимального поєднання температури і швидкості потоку рідкого чавуну в ливниковій системі модифікатор у реакційній камері послідовно розчиняється (розплавляється) в потоці рідкого чавуну і, переміщуючись в об'єм виливка, засвоюється остаточно розплавом. Під час внутрішньоформового модифікування суттєво зменшується окислення модифікувальних елементів, скорочується до мінімуму час між введенням модифікатора в рідкий чавун і початком кристалізації останнього, що дає змогу виключити демодифікування розплаву, забезпечити максимальний ефект утворення кристалічних зародків і високий ступінь графітизації, підвищити коефіцієнт засвоєння модифікувальних елементів і скоротити витрату модифікувальних 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 дільниці кількох плавильних агрегатів, додаткового обладнання чи інших агрегатів та спеціальних пристроїв.

Незважаючи на значні переваги INMOLD-процесу перед іншими методами модифікувального оброблення розплавів, технологія отримання виливків з високоміцних чавунів із заданою структурою і комплексом бажаних експлуатаційних властивостей є досить чутливою до багатьох змінних факторів лиття і модифікувального оброблення, що потребує встановлення (визначення) і чіткого дотримання оптимальних значень основних і допоміжних факторів і параметрів технологічного процесу в кожному конкретному випадку за реальних умов отримання конкретного виливка. А це, в свою чергу, потребує проведення всебічних комплексних досліджень і аналізу впливу основних і допоміжних факторів технологічного процесу лиття і внутрішньоформового оброблення розплаву в порожнині ливарної форми на литу структуру і властивості чавуну у виливках.

Метою даної роботи було дослідження впливу основних факторів технологічного процесу отримання виливків з високоміцного чавуну з кулястим графітом (лиття і модифікувального оброблення розплаву) на макро- і мікро-структуру 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 доевтектичного складу з низьким вмістом вуглецю ($C_E = 2,6-2,8 \%$) і кремнію (з низьким вуглецевим еквівалентом), схильних до кристалізації з вибіленням, та чавунів евтектичного або близького до евтектичного складу ($C_E = 3,3-3,4 \%$), які характеризуються схильністю до кристалізації з виділенням структурно вільного графіту.

Базові розплави чавунів виплавлялись у тигельній індукційній печі з кислотою футерівкою типу ІЧТ-0,06 на шихтових матеріалах, які включали ливарний чавун Л2 та Л4 (ДСТУ 3132-95), переробний чавун марки ПЛ2 (ДСТУ 3133-95), зворот власного виробництва, сталеві скрап і брухт сталі 3.

Як сфероїдизувальні модифікувальні добавки, які розміщувались у 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-вмісні 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.

Як експериментальні виливки, що 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 в основі – 20 мм.

В процесі порівняльних експериментів 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 із забезпеченням підведення базового розплаву в форму за допомогою загальних стояка і шлаковловлювача і окремих реакційних камер та живильників на кожний виливок (рис. 1, 2).

Для виявлення впливу конструкції реакційної камери у 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.

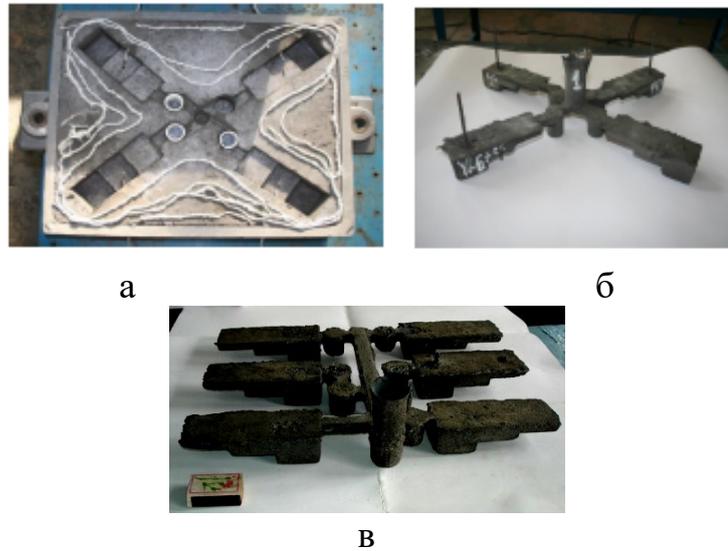


Рис. 1. Вид зверху на нижню півформу (а) і загальний вигляд блоків із чотирьох (б) і шести (в) отриманих експериментальних виливків «Трьохступенева плита» із ливниково-живильною системою



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

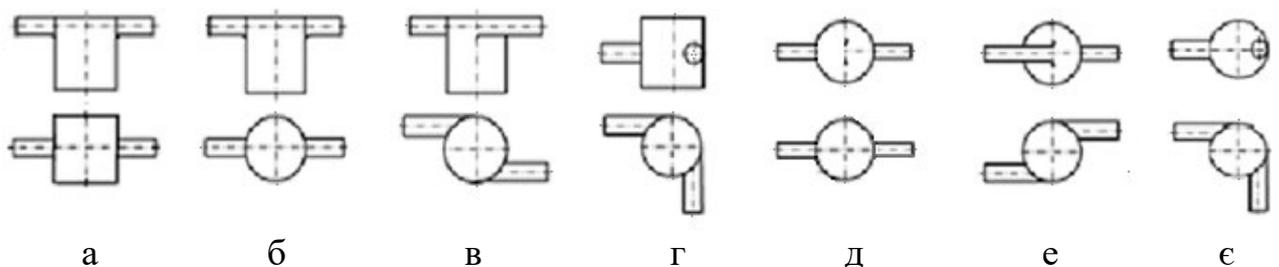


Рис. 3. Типи досліджуваних реакційних камер

Для отримання експериментальних виливків разову ливарну форму, виготовлену з піщано-глинястої суміші, заливали з ручного конічного ковша вихідним базовим розплавом чавуну за температур 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 із записом на двокоординатному самописці моделі Н307.

Після повного затвердіння металу і охолодження виливків у ливарній формі до температури навколишнього середовища разову ливарну форму руйнували і виливки вибивали. Після очищення отриманих виливків від формувальної суміші вони розбивались у 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 виливка, 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 СS-230, вміст інших елементів – за допомогою оптико-емісійних спектрометрів фірми «Bruker Materials» 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, а також скануванням поверхні макрошліфів.

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 %-й спиртовий розчин HNO_3 . Час травлення зразків – 5–20 с. Цифровий запис і аналіз знімка мікроструктури під час металографічних досліджень здійснювали на ПЕОМ з використанням пакета програм для оброблення графічної інформації.

Твердість чавуну в різних перерізах експериментальних виливків за Брінеллем вимірювали відповідно до ДСТУ EN ISO 6506-1:2007 «Металеві матеріали. Випробування на твердість за Брінеллем» на твердомірі моделі ТШ-2М (навантаження приладу 30000 Н), діаметр індентора 10 мм, витримка під навантаженням тривала 10 с.

Приготування шліфів для металографічного аналізу чавуну проводилося шляхом оброблення на абразивному камені грубого шліфування, тонкого шліфування та полірування. Оброблення на абразивному камені проводилося 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 здійснювали на полірувальному верстаті, диск якого обтягнутий сукном, за частоти обертання 400–600 об/хв.

Статистичне оброблення даних і побудову рівнянь регресії проводили з використанням ППП Microsoft Excel.

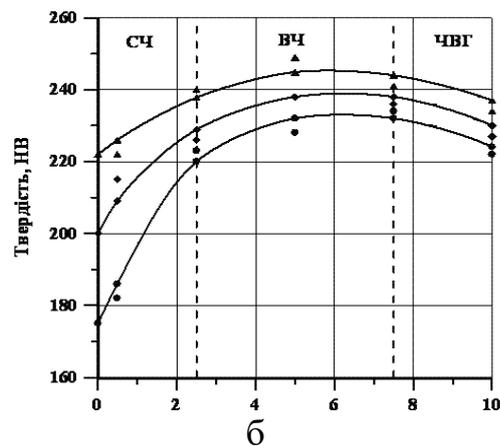
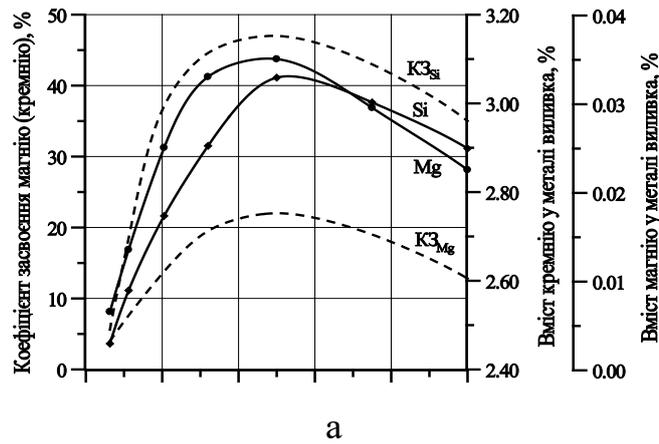
У результаті проведених експериментальних досліджень встановлено основні закономірності впливу режимів лиття, типів, зернистості (гранулометричного складу) і кількості модифікувальних добавок, а також конструктивних особливостей ливниково-живильних систем і температурно-часових режимів лиття і охолодження на структуру і властивості чавунних

випливаючі, виготовлених із розплавів з різним вуглецевим еквівалентом. Експериментально підтверджено на типових випливах отримані нами раніше результати фізичного і комп'ютерного моделювання [11–15] про ефективність протокових реакційних камер ливникової системи нижнього розташування порівняно з ливниковими системами верхнього розташування, а також можливості інтенсифікувати засвоєння модифікувальних добавок, у тому числі дрібнодисперсних, включаючи пилоподібні, за умови використання реакційних камер у вигляді спеціального патрона, виконаного із спеченого разом з модифікатором пінополістиролу, або у вигляді пінополістиролової оболонки, всередині якої міститься зернистий модифікатор і яка вставляється в ливарну форму під час її складання [16–18].

Під час внутрішньоформового сфероїдизувального оброблення стабільні результати з отримання випливів з ВЧКГ з кулястими вкрапленнями графіту правильної форми в перліто-феритній металевій матриці з різним співвідношенням фериту і перліту були отримані як за використання як базового доевтектичного, так і евтектичного чавуну та за умови використання феросилікомагнієвих сплавів ФСМг7 і VL63(М).

Оптимальні розміри частинок 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 дорогих модифікаторів, так і до підвищення твердості чавуну у випливах (рис. 4, б).

Як показали проведені нами експериментальні дослідження, після сфероїдизувального модифікування чавуну в ливарній формі у структурі досліджуваних зразків, вирізаних із різних перерізів випливів (8, 32 і 64 мм), спостерігається утворення вкраплень графіту правильної кулястої форми (бал ШГф5), рівномірно розподілених у площині шліфа з балом ШГр1.



Середній розмір зерен модифікатора, мм

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

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

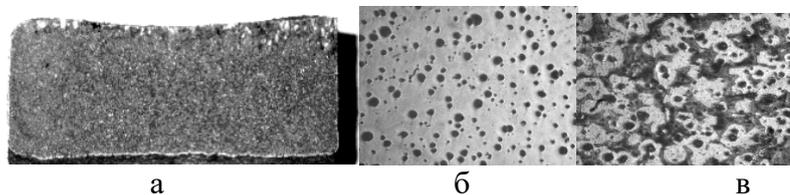


Рис. 5. Злам (а) і мікроструктура чавуну нетравлених (б) і травлених (в) зразків, вирізаних із ступені перерізом 32 мм експериментального трьохступеневого виливка, виготовленого з доєвтектичного чавуну, модифікованого лігатурою ФСМг7

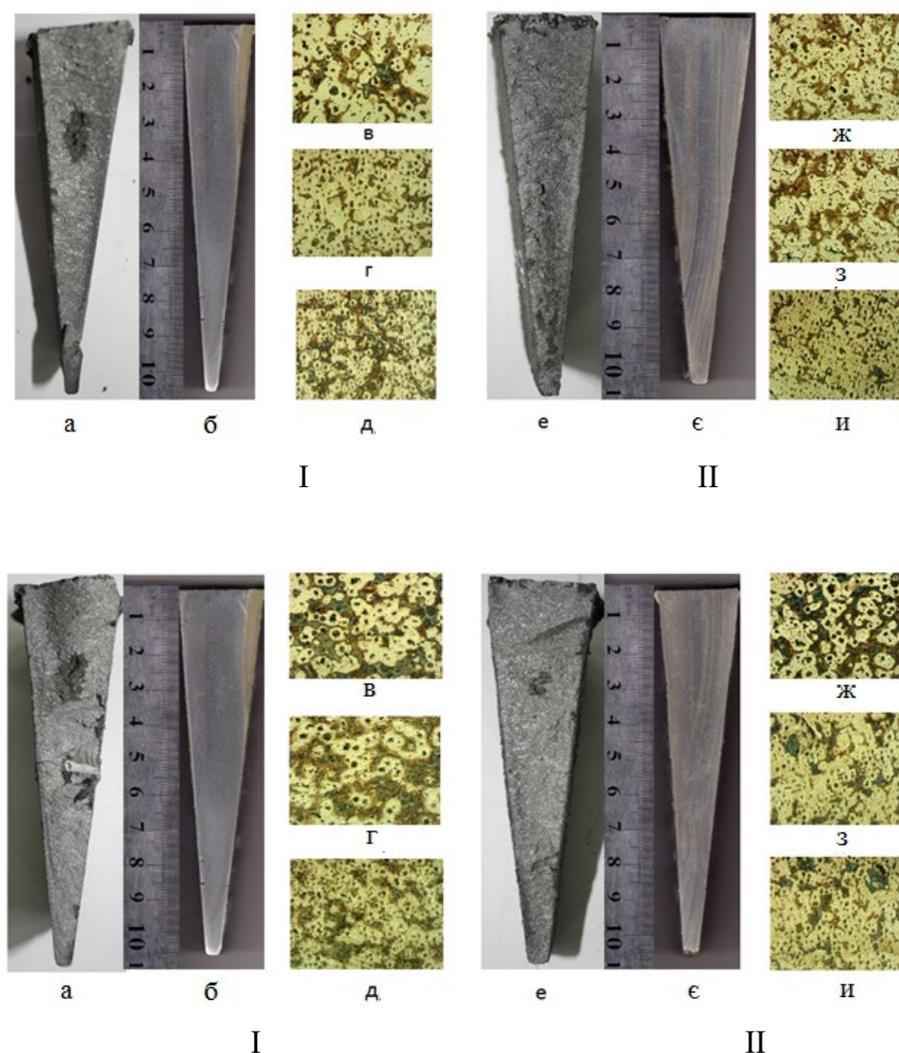


Рис. 6. Злам (а, е), макроструктура (б, є), мікроструктура у верхній (в, ж) середній (г, з) і нижній (д, и) по висоті частині виливка за умови використання доєвтектичного (I) і евтектичного (II) чавунів, модифікованих лігатурою ФСМГ7 (верхній ряд) і VL63 M (нижній ряд)

З ростом товщини перерізу виливка спостерігається незначне збільшення розміру глобулярних крапель графіту від балу ШГд15 в перерізі виливка 8 мм до балу ШГд45 в перерізі 64 мм за одночасного збільшення їх кількості від 6 % (бал ШГ6) в перерізі 8 мм до 10–12 % відповідно в перерізах 32 і 64 мм. Мікроструктура разків – ферито-перлітна зі збільшенням долі фериту за умови збільшення товщини стінки виливка.

Результати досліджень пройшли випробування під час виготовлення з ВЧШГ промислових виливків: «Подушка прокатного стана» масою 20 кг,

«Поршень гідронасоса» – 5 кг, «Опорна плита» – 30 кг, «Прес-форма для скло форм» – 10 кг, та 25 кг, «Бандаж» – 20 кг. Рекомендовані технологічні процеси дають змогу підвищити ефективність способів отримання чавунних виливків із заданим комплексом структури та властивостей. Впровадження перерахованих технологій не потребує переоснащення та зміни наявних технологічних процесів у цехах підприємств і дає змогу розширити номенклатуру лиття.

Література

1. Гнатуш В. А. Ринок металевих виливків 2021–2024: Світ, Європа, Америка // Процеси лиття. – № 2 (160). – 2025 – С. 58–71.
2. Olawale J. O., Ibitoye S. A., Oluwasegun K. M. Processing Techniques and Productions of Ductile Iron: A Review // International Journal of Scientific & Engineering Research, Volume 7, Issue 9, September 2016. – P. 397–423.
3. Oluwole O. O., Olorunniwo O. E., Ogundare O. O., Atanda P. O., Oridota O. O. Effect of Magnesium and Calcium as Spheroidizers on the Graphite Morphology in Ductile Cast Iron // Journal of Minerals & Materials Characterization & Engineering, 2007. – Vol. 6. – No.1. P. 25–37.
4. Lerner Y. S., Riabov M. V. Iron Inoculation: An Overview of Methods // Modern casting. – 1999. – № 6. – P. 37–41.
5. Knustad O. Проблемы, возникающие при производстве высокопрочных чугунов. Обзор существующих способов получения ВЧ и используемых модификаторов / О. Knustad // Лите Украины. Информационно-технический бюллетень. – №33 (79). – 2007. – С.7–16.
6. Ковалевич Е. В. Современные способы модифицирования для получения в чугуне шаровидного графита / Е. В. Ковалевич, Л. А. Петров, В. В. Андреев // Литейное производство, 2014. – №2. – С.2–5.
7. Mc Caulay J. L. Production of Nodular-graphite Iron Castings by the Inmold-Process // Foundry Trade Journal. – April 1971. – №4. PP. 327–332, 335.

8. Косячков В. А., Ващенко К. И. Особенности технологии получения высокопрочного чугуна модифицированием в форме // Литейное производство, 1975. – № 12. – С. 11–12.

9. Moore A., Weese S. Is the Future of Ductile Iron Precarious? / Foundry Management & Technology, 1992, 120. – P. 34–37.

10. Bagliuk H. A., Kurovs'kyu V. Ya., Shyns'kyu O. Y., Tereshchenko M. Ya., Tishchenko A. P. Influence of Technological Parameters of In-Mould Modification with Powder Briquetted Modifiers on the Structure and Properties of High-Strength Cast Iron Castings // Metallofiz. Noveishie Tekhnol., 2023. – 45. – № 3. – P. 343–357. DOI: 10.15407/mfint.45.03.0343.

11. Фесенко М. А. Исследование процес сов внутриформенной обработки чугуна методами физического моделирования / М. А. Фесенко, В. А. Косячков, А. Н. Фесенко // Вісник Донбаської державної машинобудівної академії. – Краматорськ, 2006. – № 3 (5). – С. 7–17.

12. Фесенко А. М., Корсун В. А., Фесенко М. А., Махмудов Р. Р. Дослідження процесу внутрішньо формового модифікувального оброблення розплаву методом комп'ютерного моделювання // Перспективні технології, матеріали й обладнання в ливарному виробництві: матеріали VIII міжнародної науково-технічної конференції / під заг. ред. А. М. Фесенка, М. А. Турчаніна. – Краматорськ: ДДМА, 2021. – С. 141–142.

13. Фесенко М. А., Фесенко А. М. Фізичне моделювання процесу внутрішньоформового модифікування чавуну / Литво. Металургія. 2020: Матеріали XVI Міжнародної науково-практичної конференції. – Запоріжжя: АА Тандем, 2020. – С. 154–155.

14. Фесенко А. Н. Исследование процесса внутриформенного модифицирования расплава чугуна методом компьютерного моделирования / А. Н. Фесенко, М. А. Фесенко, Р. И. Скок // Матеріали VIII Всеукраїнської науково-практичної конференції «Сучасні тенденції розвитку інформаційних технологій в науці, освіті та економіці». – Луганськ: ЛНУ ім. Т. Шевченка, 2014. – С. 111–112.

15. Фесенко А. Н. Физическое моделирование процесса внутриформенного модифицирования расплава / А. Н. Фесенко, М. А. Фесенко // Тезисы докладов МНТК «Университетская наука-2011». – Мариуполь: ПГТУ, 2011. – Т. 1. – С. 105–106.

16. Патент № 13632 U, B22D27/00. Спосіб обробки чавуну в ливарній формі / А. М. Фесенко, М. А. Фесенко. – Опубл. 17.04.2006, Бюл. № 5.

17. Патент № 13646 U, B22D27/00. Спосіб обробки рідкого металу в ливарній формі / А. М. Фесенко, М. А. Фесенко. – Опубл. 17.04.2006, Бюл. № 5.

18. Патент № 46486 U 2009 06686, B22D 27/00. Спосіб обробки рідкого металу / А. М. Фесенко, М. А. Фесенко. – Опубл. 25.12.2009, Бюл. № 24.



ABSTRACT. The article examines the current state and global production trends of high-strength ductile iron (DI) castings. The authors investigate the technological features of DI production, specifically the processes of in-mold melt modification. Physical and computer modeling methods were employed to analyze the hydrodynamic and thermophysical processes occurring during the interaction of molten iron with the modifier within the mold cavity. The results obtained allow for the optimization of gating system parameters and modification regimes, ensuring the stable formation of nodular graphite and a high level of mechanical properties in cast parts. The proposed approaches aim to reduce production costs while simultaneously increasing the reliability and durability of mechanical engineering products.

KEYWORDS: igh-strength iron, nodular graphite, in-mold modification, computer modeling, casting mold.