

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»**

**ФЕСЕНКО КАТЕРИНА ВАЛЕРІЇВНА**



**УДК 621.74.046**

**МОДИФІКУВАННЯ ЧАВУНУ В ЛИВНИКОВІЙ СИСТЕМІ ДЛЯ  
ВИРОБНИЦТВА ДВОШАРОВИХ ВИЛИВКІВ**

Спеціальність 05.16.04 – Ливарне виробництво

**АВТОРЕФЕРАТ**

дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

**Київ – 2016**

Дисертацією є рукопис

Робота виконана на кафедрі ливарного виробництва чорних і кольорових металів Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут» Міністерства освіти і науки України

**Науковий керівник:** кандидат технічних наук, доцент  
**Ямшинський Михайло Михайлович,**  
Національний технічний університет  
«Київський політехнічний інститут»,  
доцент кафедри ливарного виробництва чорних  
та кольорових металів

**Офіційні опоненти:** доктор технічних наук, старший науковий співробітник  
**Бубликов Валентин Борисович,**  
Фізико-технологічний інститут  
металів і сплавів НАН України  
завідувач відділу високоміцних та спеціальних чавунів;

доктор технічних наук, професор  
**Хричиков Валерій Євгенович**  
Національна металургійна академія України,  
завідувач кафедри ливарного виробництва.

Захист відбудеться «17» травня 2016 р. о 14<sup>30</sup> годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.002.12 у Національному технічному університеті України «Київський політехнічний інститут» за адресою: 03056, м. Київ, просп. Перемоги, 37, корпус 9, аудиторія № 203.

З дисертацією можна ознайомитися в Науково-технічній бібліотеці ім. Г.І. Денисенка Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут» за адресою: м. Київ, просп. Перемоги, 37.

Автореферат розісланий «\_\_» квітня 2016 р.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради  
кандидат технічних наук, доцент



О.В. Степанов

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Перспективним напрямком підвищення працездатності та довговічності обладнання, машин і механізмів з одночасним покращанням економічних показників і зниженням витрат дефіцитних, дорогих легувальних матеріалів є використання в їх складі чавунних литих деталей з протилежною структурою та властивостями в локальних їх частинах.

Прикладами таких деталей є: валки прокатних станів, втулки, вальці, щоки дробарок, бронефутерувальні плити, склизи сипких матеріалів, насадки відбійних молотків, розпушувачі ґрунтів, лемехи, зуби ковшів екскаваторів тощо. Робоча поверхня або робочий шар таких деталей повинні мати високу твердість і зносостійкість, а серцевина або монтажна частина – ударостійкість, в'язкість і, на відміну від твердого робочого шару, задовільну оброблюваність різанням. Висока твердість і зносостійкість робочої поверхні може забезпечити білий чавун з цементитною фазою, а підвищені пластичність і в'язкість – високоміцний чавун ферито-перлітного класу.

Виробництво чавунних литих деталей з диференційованою структурою та властивостями в локальних їх частинах здійснюється такими способами: заливанням одного чавуну в металеву форму або в разову (піщану) ливарну форму з розташованим у ній холодильником; послідовним заливанням ливарної форми різними за хімічним складом чавунами через дві незалежні ливникові системи з паузою між заливаннями; виливанням залишку одного рідкого чавуну з доливанням серцевини іншим чавуном; відцентровим литтям з послідовним заливанням виливниці, яка обертається, розплавами чавунів різного хімічного складу та іншими способами.

Використання двох плавильних агрегатів для синхронного виплавляння різних чавунів або проведення до заливання в ливарну форму додаткових операцій оброблення розплавів легувальними добавками в ковшах є основними недоліками більшості перелічених способів виготовлення виливків з різною структурою та властивостями, а технологія заливання одного чавуну в металеву форму або в ливарну форму з розташованим у ній холодильником для прискореного охолодження та отримання вибіленого шару не дає стабільних результатів.

З метою усунення недоліків наведених методів запропоновано новий спосіб виготовлення двошарових чавунних виливків, який ґрунтується на методі модифікування вихідного розплаву в реакційній камері ливникової системи ливарної форми.

Новий спосіб виробництва двошарових виливків полягає у виплавлянні чавуну в одній печі та розділенні його в ливниковій системі на два потоки, які модифікуються в реакційних камерах різними добавками з відповідною зміною структури в процесі подальшої кристалізації. З апріорного моделювання можливих варіантів запропонованого способу вибрано, перспективний конструктивно-технологічний варіант, який передбачає розділення вихідного чавуну евтектичного складу на два потоки з внутрішньоформовим модифікуванням одного з них карбідоутворювальним модифікатором, для отримання в частині вилівка твердого зносостійкого чавуну, а іншого сфероїдизувальним модифікатором, для отримання в

іншій частині вилівка в'язкого ударостійкого високоміцного чавуну з кулястим графітом ферито-перлітного класу. Новизна способу та відсутність відповідних досліджень дає підставу вважати дисертаційну роботу **актуальною**.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами темами.** Дисертаційну роботу виконано на кафедрі ливарного виробництва чорних і кольорових металів НТУУ «КПІ» у рамках науково-дослідних робіт: № 2632п «Розроблення методології прогнозування структури і властивостей металу у виливках із сплавів на основі заліза з високим вмістом хрому» (номер держреєстрації 0113U000649); № 2851п «Технологічні особливості прогнозування властивостей розплавів і структури металу виливків для роботи в екстремальних умовах» (номер держреєстрації 0115U000406). У перерахованих роботах здобувач приймала безпосередню участь як виконавець.

**Мета та задачі дослідження.** Метою роботи є розроблення нового способу виробництва двошарових виливків з твердою зносостійкою робочою поверхнею та м'якою в'язкою ударостійкою основою.

Для досягнення поставленої мети сформульовані наступні наукові та практичні завдання:

1. Вибрати ефективні добавки для сфероїдизувального та карбідоутворювального модифікування розплаву чавуну евтектичного складу в ливарній формі.

2. Експериментально перевірити можливість практичної реалізації та особливості запропонованого способу виготовлення двошарових виливків модифікуванням чавуну евтектичного складу в ливниковій системі ливарної форми.

3. Виконати комп'ютерне моделювання процесів, що відбуваються в ливарній формі під час виготовлення двошарових виливків.

4. Дослідити процеси взаємодії різномодифікованих чавунів у порожнині ливарної форми під час та після її заливання та установити основні закономірності формування двошарових чавунних виливків з робочою поверхнею з твердого зносостійкого білого чавуну та м'якою в'язкою ударостійкою монтажною частиною з високоміцного чавуну з кулястим графітом ферито-перлітного класу.

5. Розробити та випробувати в промислових умовах технологічні процеси модифікування розплаву вихідного чавуну евтектичного складу в ливниковій системі при отриманні виливків з заданими структурою та властивостями.

*Об'єкт дослідження:* процес виробництва двошарових виливків з протилежною структурою та властивостями в локальних їх частинах модифікуванням чавуну в ливниковій системі ливарної форми.

*Предмет дослідження:* закономірності процесів кристалізації, структура та властивості чавуну в двошарових виливках з твердою зносостійкою частиною та в'язкою ударостійкою основою.

**Методи дослідження.** У роботі використані стандартні методи хімічного і термічного аналізу, металографічних досліджень, а також визначення твердості, мікротвердості та механічних властивостей чавуну. Дослідження гідродинамічних процесів виконано за допомогою системи комп'ютерного 3D моделювання ливарних процесів.

**Наукова новизна одержаних результатів.** Наукову новизну складають наведені нижче результати теоретичних та експериментальних досліджень:

1. Запропоновано новий спосіб розділення структури та властивостей частин вилівка в процесі одночасного модифікування вихідного розплаву чавуну евтектичного складу в реакційних камерах карбідоутворювальним та сфероїдизувальним модифікаторами. Це дало можливість розробити нову технологію виробництва вилівок з робочою частиною з твердого білого зносостійкого чавуну та монтажною в'язкою частиною з високоміцного чавуну.

2. Вперше встановлено, що додавання добавок НМг19 та МЦ50Ж3 в реакційну камеру ливникової системи ливарної форми в кількості 2,0% від маси оброблювального розплаву чавуну евтектичного складу забезпечують кристалізацію чавуну з вибіленням на глибину 50 мм.

3. Вперше встановлено залежності впливу вихідної товщини перегородки з вуглецевої сталі без покриття та вуглецевої сталі з цинковим покриттям і температури розплаву, що заливається в ливарну форму на товщину перехідної зони двошарового вилівка з робочою зносостійкою та монтажною в'язкою частинами з товщиною стінки до 25 мм. Визначено, що отримання двошарових вилівок за запропонованим способом забезпечується використанням перегородок з сталі товщиною 0,5...1,3 мм з цинковим покриттям та температурою заливання вихідного розплаву чавуну в ливарну форму  $1420 \pm 10^\circ\text{C}$ .

4. Вперше, на основі експериментальних досліджень, встановлено закономірності формування мікроструктури перехідної зони двошарового вилівка, яка складається з залишків сталевий перегородки та зневуглецьованого шару між чавунними частинами вилівка та перегородкою. Подібний шар утворюється внаслідок дифузійного перерозподілу вуглецю з прилеглих шарів чавуну вбік сталевий перегородки та заліза вбік чавуну. При цьому вихідна ферито-перлітна структура сталевий перегородки трансформується в структуру заевтектоїдної сталі. Перехідний шар вилівка характеризується міцністю 420...450 МПа.

**Практичне значення одержаних результатів.** На підставі виконаних теоретичних і експериментальних досліджень отримано такі практичні результати:

1. Розроблено новий спосіб виробництва вилівок з протилежною структурою та властивостями в їх окремих частинах за допомогою модифікування в ливниковій системі ливарної форми двох потоків розплавів чавунів.

2. Визначено ефективні добавки для внутрішньоформового сфероїдизувального та карбідоутворювального модифікування розплаву чавуну евтектичного складу.

3. Установлено вплив основних технологічних параметрів процесу, а саме: вихідної товщини розділової сталевий перегородки та температури заливання розплаву вихідного чавуну на процес виробництва двошарових вилівок з протилежною структурою та властивостями металу в локальних їх частинах.

4. Технологічні процеси сфероїдизувального модифікування чавуну в ливарній формі та виробництва двошарових вилівок з твердою зносостійкою робочою поверхнею з білого чавуну та в'язкою ударостійкою матрицею з високоміцного чавуну внутрішньоформовим модифікуванням успішно випробувано в промислових умовах. Результати дисертаційної роботи впроваджено в навчальний процес.

**Особистий внесок здобувача.** Усі наукові положення дисертаційної роботи, що виносяться на захист, сформульовано автором особисто. Складено огляд літера-

тури за темою дисертаційної роботи, зроблено відповідні висновки, сформульовані мета та основні задачі дослідження. Послідовним виконанням серії експериментальних і промислових досліджень автором визначено особливості перспективного конструктивно-технологічного варіанта виробництва двошарових чавунних виливків з використанням внутрішньоформового модифікування.

Автором виконано комп'ютерне моделювання гідродинамічних процесів, що відбуваються під час виготовлення двошарових виливків. Установлено закономірності впливу основних технологічних параметрів вихідної товщини розділової сталевий перегородки та температури заливання чавуну евтектичного складу на різницю в структурі та властивостях двошарових виливків. Обговорення результатів досліджень, формулювання основних висновків і рекомендацій за темою роботи виконано здобувачем спільно з науковим керівником і, частково, із співавторами публікацій.

**Апробація результатів дисертації.** Наукові положення та результати роботи представлені та обговорені на міжнародних конференціях: «Нові матеріали та технології в машинобудуванні» (м. Київ, 2013, 2014, 2015 рр.), «Перспективні технології, матеріали та обладнання в ливарному виробництві» (м. Краматорськ, 2013, 2015 рр.), «Литво 2014» (м. Запоріжжя, 2014 р.), «Університетська наука 2014» (м. Маріуполь, 2014 р.), «Спеціальна металургія: вчора, сьогодні, завтра» (м. Київ, 2015 р.), «Зварювання та споріднені технології» (м. Київ, 2015 р.), «Неметалеві вкраплення та гази в ливарних сплавах» (м. Запоріжжя, 2015 р.) та науково-технічна уральська школа-семінар металознавців – молодих вчених (м. Єкатеринбург, 2013, 2014 рр.).

**Публікації.** Основні положення дисертаційної роботи викладено в 24 наукових працях, з яких 6 статей у наукових фахових виданнях з них, 1 стаття у виданні іноземної держави, 2 патенти України на корисну модель та додатково висвітлені в тезах доповідей у вигляді матеріалів наукових конференцій.

**Структура та обсяг дисертаційної роботи.** Дисертація складається із вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел і додатків. Загальний обсяг роботи 153 сторінки, 10 таблиць, 100 рисунків, перелік посилань з 100 найменувань, 6 додатків.

## **ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ**

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми, сформульовано мету та завдання дослідження, показано зв'язок з науково-дослідними роботами, наведено основні результати, відзначено їх наукову новизну та практичне значення, особистий внесок здобувача та апробацію результатів роботи.

У **першому розділі** проаналізовано номенклатуру промислових деталей з різними властивостями, матеріали, які використовуються в їх локальних частинах та основні вимоги до них залежно від умов експлуатації. Наведено основні ливарні технології виробництва двошарових чавунних виливків з практичними прикладами, та проаналізовано основні переваги й недоліки цих технологій. Розглянуто особливості модифікування рідкого чавуну в ливарній формі та типи модифікаторів, які при цьому використовують. Установлено основні фактори, які лімітують процес

розчинення модифікатора в реакційній камері ливникової системи під час заливання ливарної форми металом. Зазначено недоліки методу, серед яких можливість нерівномірного розчинення модифікатора у потоці чавуну й відповідна неоднорідність структури та властивостей сплаву в окремих частинах перерізу стінок виливка.

На підставі аналізу науково-технічної літератури за темою дисертації сформульовано висновки та основну мету дослідження: розроблення нового способу виробництва двошарових виливків з твердою зносостійкою робочою поверхнею та м'якою в'язкою ударостійкою монтажною основою. Запропонований спосіб виробництва виливків з різномодифікованих чавунів у окремих частинах перерізу стінок має інформаційну новизну і захищений Патентами України на корисну модель.

У другому розділі виконано апріорне моделювання конструктивно-технологічних варіантів роздільного модифікування чавуну в ливарній формі (рис. 1).

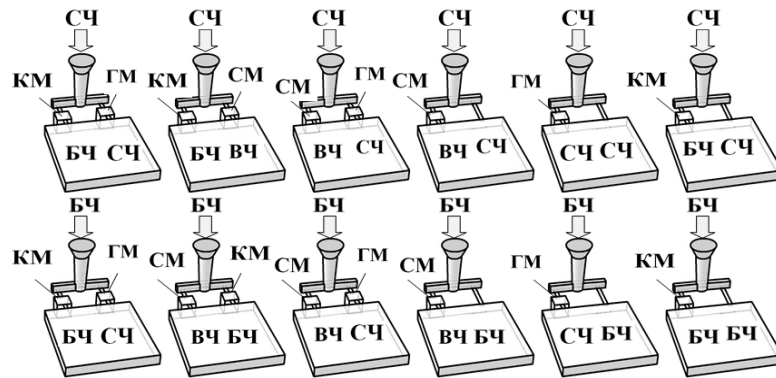


Рис. 1. Конструктивно-технологічні варіанти роздільного модифікування чавуну в ливарній формі:

СЧ – чавун евтектичного складу; БЧ – білий чавун; ВЧ – високоміцний чавун; КМ – карбідоутворювальний модифікатор; СМ – сфероїдизувальний модифікатор; ГМ – графітизувальний модифікатор

З усіх можливих змодельованих варіантів для дослідження вибрано перспективний варіант, суть якого полягає в заливанні вихідного чавуну евтектичного складу (СЧ) в ливарну форму з роздільним сфероїдизувальним та карбідоутворювальним модифікуванням, після чого одна частина виливка кристалізується з твердого зносостійкого білого чавуну, а інша частина з високоміцного чавуну з кулястим графітом (рис. 2). Для експериментальних досліджень спроектовано моделі виливків «Ступінчаста проба» та «Плита».

Вихідний евтектичний чавун наступного хімічного складу (% мас.): С = 3,6...3,8; Si = 2,0...2,2; Mn = 0,85...0,9; P до 0,2, S до 0,15 виплавляли в індукційній печі ІСТ-0,06 з кислотою футерівкою. Вуглецевий еквівалент чавуну визначали термографічним експрес-контролем. Хімічний склад чавунів визначали хімічним і спектральним експрес-аналізом. Температуру розплаву чавуну контролювали вольфрам-ренієвими термопарами.

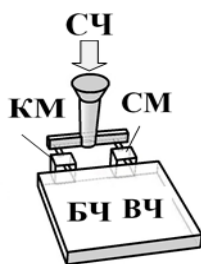


Рис. 2. Конструктивно-технологічний варіант виготовлення двошарових виливків

Математичне оброблення результатів експериментальних досліджень, оцінку достовірності одержаних даних і закономірностей та побудову графічних залежностей здійснювали на ПЕОМ з використанням пакету прикладних програм Grapher та Excel. Вивчення гідродинамічних та температурних процесів, що відбуваються в ливарній формі під час заливання та тверднення розплаву виконано за допомогою системи 3D комп'ютерного моделювання ливарних процесів.

У **третьому розділі** викладено результати досліджень щодо вибору ефективних добавок для сфероїдизувального та карбідоутворювального модифікування вихідного чавуну евтектичного складу в ливарній формі. Для проведення досліджень обрано виливок типу здвоєної ступінчастої проби масою  $5,0 \pm 0,2$  кг з перерізами стінок 5, 10, 20, 30, 40, 50 мм і ливниковою системою, до складу якої входила кубічна реакційна камера з довжиною ребра 40 мм (рис. 3).



Рис. 3. Здвоєна ступінчаста проба з ливниковою системою

Матеріалом для сфероїдизувального внутрішньоформового модифікування вибрано сплав ФСМг7 з розмірами часток  $1,0 \dots 5,0$  мм у кількості 2,0% від маси оброблюваного розплаву чавуну. Температура заливання чавуну в ливарні форми складала  $1400 \pm 20$  °С. Заливання кожної форми тривало 5...6 с.

Установлено, що після оброблення рідкого вихідного чавуну модифікатором ФСМг7 чавун у всіх перерізах проби кристалізувався із світло-сірим кольором зламу (рис. 4, а), характерним для високоміцного чавуну та структурою, яка складається з графіту кулястої форми в перліто-феритній металевій матриці (рис. 4, б).

Твердість високоміцного чавуну зменшується в середньому від 220 до 180 НВ із зниженням швидкості відведення тепла від виливка, що еквівалентно збільшенню товщини перерізу стінки від 5 до 50 мм (рис. 5, крива 1), а також за рахунок збільшення розміру включень графіту (рис.6, а) та долі фериту в металевій матриці (рис.6, б).

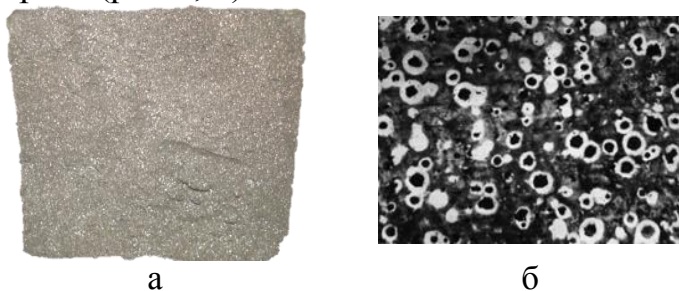


Рис. 4. Макроструктура зламу (а) та мікроструктура ( $\times 100$ ) (б) чавуну, модифікованого в ливарній формі сплавом ФСМг7 у перерізі ступінчастої проби 50 мм



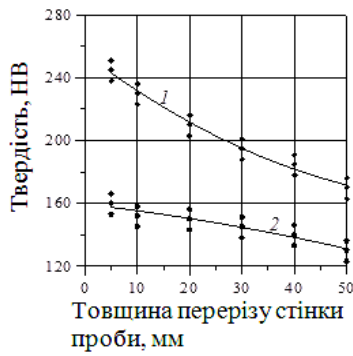


Рис. 5. Зміна твердості модифікованого сплавом ФСМг7 ВЧ (1) та ВЧ після низькотемпературного графітизувального відпалу (2) від товщини перерізу стінки ступінчастої проби

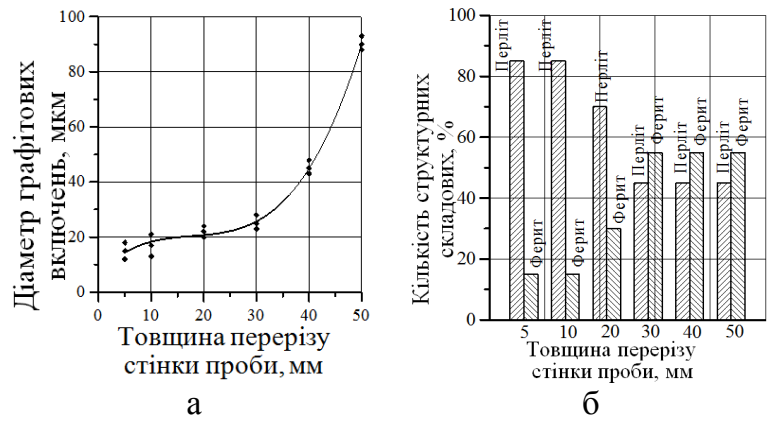


Рис. 6. Вплив товщини перерізу стінок ступінчастої проби на діаметр вкраплень графіту (а) та кількість перліту й фериту (б)

Для збільшення феритної складової частини стінок ступінчастої проби з високоміцного чавуну додатково піддавали низькотемпературному графітизувальному відпалу, за наступним режимом: нагрівання до температури 780...800 °С разом з піччю, витримування за цієї температури протягом 3,0...4,0 год. та охолодження разом з піччю до температури навколишнього середовища.

Після графітизувального відпалу структура виливків складалася з графіту кулястої форми, який рівномірно розподілявся в феритній металевій матриці (не більше 4% залишкового перліту) (рис. 7, рис. 8). Твердість виливків складала 130...160 НВ (див. рис. 5, крива 2), тобто на 50...80 НВ менша, ніж у литому стані (див. рис. 5, крива 1).

Таким чином, для отримання частини виливка з високоміцного чавуну з кулястим графітом ферито-перлітного класу доцільно застосовувати внутрішньоформове сфероїдизувальне модифікування вихідного розплаву чавуну евтектичного складу сплавом ФСМг7 з додатковим низькотемпературним графітизувальним відпалом.

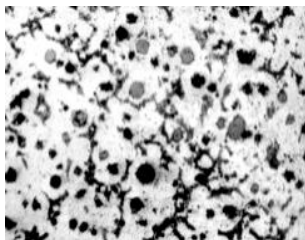


Рис. 7. Мікροструктура високоміцного чавуну ( $\times 100$ ) після низькотемпературного графітизувального відпалу в перерізі проби 50 мм

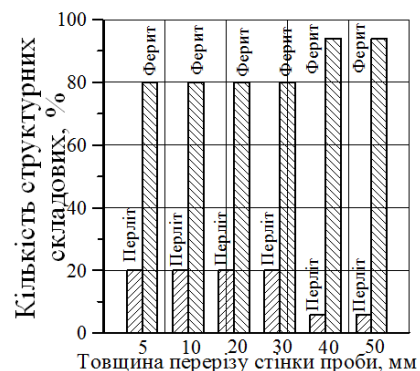


Рис. 8. Кількість фериту та перліту в перерізах проби 5...50 мм після низькотемпературного графітизувального відпалу

Матеріалами для внутрішньоформового оброблення чавуну евтектичного складу карбідоутворювальними добавками вибрано високовуглецевий ферохром марки ФХ900, сплав нікелю з магнієм марки НМг19 і фероцерій марки МЦ50Ж3 розміром часток 1,0...5,0 мм, в кількості 2,0% від маси оброблюваного чавуну.

Установлено, що за час заливання ливарних форм домішки ферохрому не встигають розчинитися та засвоїтися металом виливка.

Підвищення температури заливання вихідного чавуну в ливарну форму до 1560...1580 °С та стимулювання механічного перемішування рідкого чавуну з ферохромом, додаванням до нього газотвірних компонентів порошкоподібного магнію або пінополістиролу не призвело до бажаного результату.

Ефективні результати стабілізації карбідів були отримані при використанні нікель-магнієвої лігатури марки НМг19 та фероцерію МЦ50Ж3.

Чавун після оброблення цими карбідоутворювальними добавками мав транскристалічну макроструктуру блискучого світлого кольору з типовою для білого чавуну значною усадковою раковиною та поруватістю (рис. 9, а). Мікроструктура чавуну навіть у найтовстішому перерізі проби 50 мм складається з перліто-цементитно-ледебуритної структури (рис. 9, б). Площина зайнята цементитом і ледебуритом складає 13000...20000 мкм<sup>2</sup> (рис. 10).

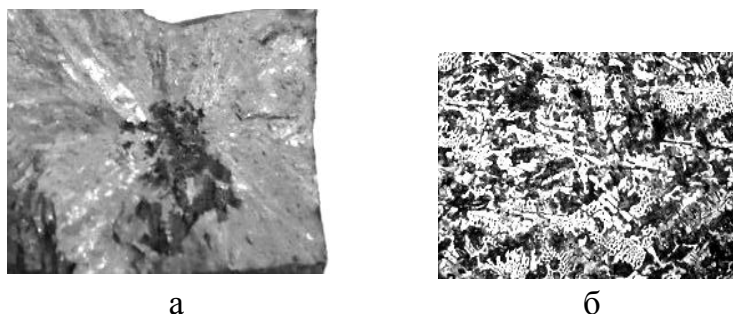


Рис. 9. Макроструктура зламу (а), мікроструктура (×100) (б) чавуну, модифікованого карбідоутворювальними добавками в перерізі ступінчастої проби 50 мм

Після оброблення чавуну сплавом НМг19 і фероцерієм МЦ50Ж3 його твердість порівняно з вихідним чавуном підвищується до 400...440 НВ (рис. 11).

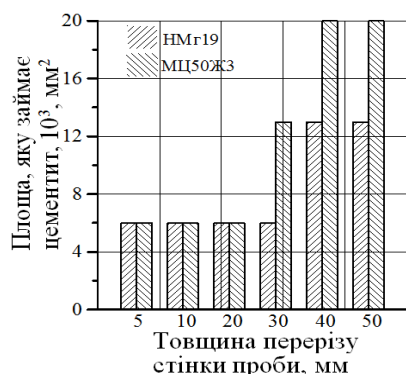


Рис. 10. Кількість цементиту та ледебуриту в перерізах проби 5...50 мм після оброблення чавуну карбідоутворювальними добавками НМг19 і МЦ50Ж3

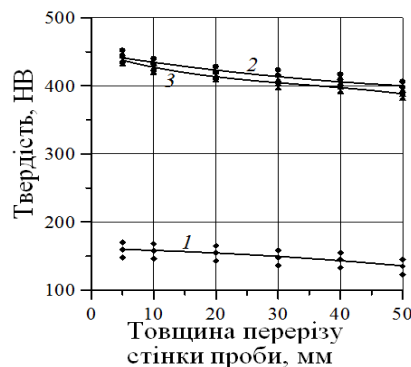


Рис. 11. Зміна твердості вихідного чавуну (1) та модифікованого НМг19 (2) і МЦ50Ж3 (3) залежно від товщини перерізів ступінчастої проби

Різниця твердості чавунів у перерізах проб 5...50 мм модифікованих двома сплавами НМг19 та МЦ50Ж3 менша за похибку вимірювання (див. рис. 11, криві 2, 3), тому враховуючи технологічні особливості, цих добавок, а також їх економічні показники рекомендовано в якості карбідоутворювального модифікатора для оброблення чавуну евтектичного складу використовувати нікель-магнієву лігатуру марки НМг19.

У четвертому розділі наведено результати дослідження процесу розділення частин вилівка одночасним модифікуванням вихідного розплаву чавуну евтектичного складу в реакційній камері карбідоутворювальним і сфероїдизувальним модифікаторами для виробництва двошарових вилівоків.



Рис. 12. Вилівок «Плита» з ливниково-модифікувальною системою

Для проведення досліджень вибрано вилівок «Плита» (рис. 12) з розмірами 240×240×25 мм масою  $10 \pm 0,2$  кг з загальною симетричною ливниково-модифікувальною системою, до якої входили дві кубічні реакційні камери з довжиною ребра 40 мм.

Аналіз результатів комп'ютерного моделювання (рис. 13) свідчить, що при заливанні ливарної форми через ливникову систему з двома симетрично розташованими живильниками майже з самого початку заповнення порожнини ливарної форми розплавом спостерігається взаємодія цих двох потоків, що призводить до інтенсивного переміщення різномодифікованих розплавів чавунів в об'ємі, а це неминуче призведе до гомогенізації структури, і як наслідок властивостей металу в різних частинах вилівка. Причому таке перемішування розплавів двох потоків відбувається з різною інтенсивністю не залежно від масової швидкості заливання (рис. 13). Таким чином різниця структури і властивостей чавуну в різних частинах (боковинах) плити можлива лише за наявності механічного бар'єру, який відокремить потоки і виключить перемішування розплавів. В якості такого бар'єру може виступати тверда вставка, яку після заливання необхідно вилучати з форми (рис. 14, б), або стаціонарна вставка (рис. 14, в), яка залишається в вилівку і надійно сплавляється з двох боків з розплавами.

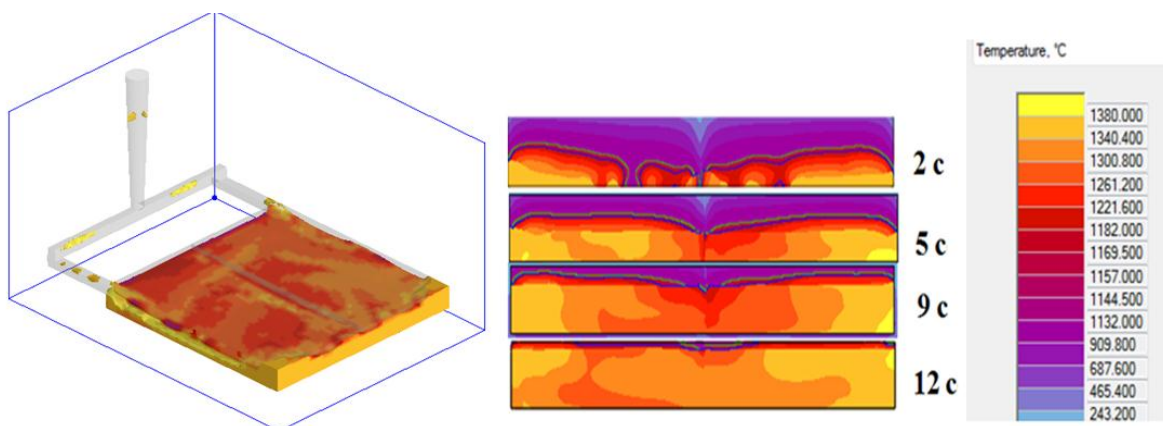


Рис. 13. Комп'ютерне моделювання гідродинаміки заповнення порожнини форми під час виготовлення вилівка «Плита»

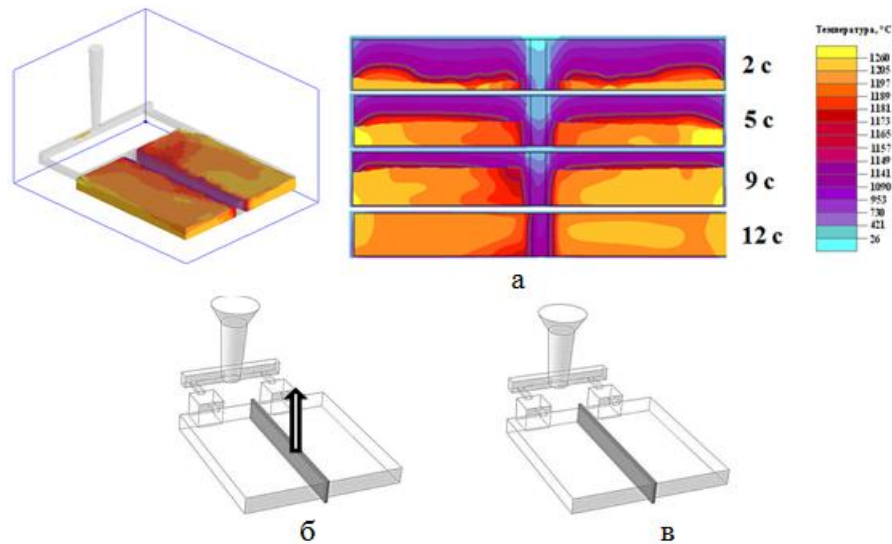


Рис. 14. Комп'ютерне моделювання гідродинаміки заповнення порожнини форми при виготовленні виливка «Плита» з використанням перегородки (а) та схеми експериментального виливка «Плита» із перегородкою, що вилучається (б) та перегородкою, що залишається у формі (в)

З метою перевірення результатів досліджень комп'ютерного моделювання виконано натурні експерименти на чавунних виливках. Спочатку обрали варіант з перегородкою, що вилучається з форми після її заповнення розплавом (рис.14, б). Як матеріал для прямокутної перегородки використано вуглецеву сталь марки Ст3пс хімічного складу, % С=0,14...0,22; Si=0,05...0,17; Mn=0,4...0,75; S до 0,05; P до 0,05 товщиною 1,0...2,0 мм. Сухі форми з перегородками та реакційними камерами, завантаженими модифікаторами ФСМг7 та НМг19, заливали вихідним чавуном за температури  $1480 \pm 10$  °С,  $1420 \pm 10$  °С і  $1380 \pm 10$  °С. Відразу після заливання рідким чавуном порожнини форми та зупинки руху розплавів, через відкритий надлив перегородку виймали з форм.

Дослідженнями на натурних виливках установлено, що після заливання вихідного чавуну з модифікуванням потоків, які заповнюють ліву та праву частини порожнини форми, зупинки їх руху та вилучення перегородки відбувається гідродинамічне та теплоконвекційне перемішування різномодифікованих чавунів в порожнині форми й чавун у виливках кристалізується з однорідною структурою та властивостями. Хімічний склад чавуну лівої та правої частини виливка після модифікування складав, %: С=3,2...3,4; Si=1,9...2,1; Mn=0,25...0,35; S до 0,2; P до 0,05; Ni=0,4...0,5; Mg=0,06...0,08.

Подальші дослідження виконано з використанням стаціонарної перегородки, тобто такої що не вилучається з форми (рис. 14, в). Як перегородки використано пластини із сталі Ст3пс завтовшки 1,0, 2,0 і 3,0 мм, які встановлювали в порожнину ливарної форми на однаковій відстані 60 мм. Підведення металу між пластинами здійснювали крізь загальну ливникову систему, яка має чотири живильники без реакційних камер. Сухі форми з перегородками заливали за температур  $1480 \pm 10$  °С,  $1420 \pm 10$  °С та  $1380 \pm 10$  °С.

Для аналізу результатів експерименту кожену плиту після охолодження руйнували ударним навантаженням за поперечним перерізом площини її симетрії,



де на макроструктурі зламу вилівка спостерігали перехідний шар – залишки перегородок у вигляді смуги світло-сірого кольору на темно-сірому фоні вихідного чавуну. Установлено, що при заливанні чавуну за температури  $1380 \pm 10^\circ\text{C}$  та  $1420 \pm 10^\circ\text{C}$  сталеві пластини завтовшки 1,0 мм надійно з'єднувались з металом вилівка, а перегородки товщиною 2,0 і 3,0 мм лише послаблювали переріз плити не з'єднуючись з чавуном і сприяли руйнуванню. За температури заливання  $1480 \pm 10^\circ\text{C}$  пластини товщиною 1,0 мм розчинялись в об'ємі вилівка, а товстіші 2,0 і 3,0 мм – хоча і з'єднувались з металом вилівка, однак при ударних навантаженнях такі вилівки руйнувалися в контактній зоні пластини з чавуном.

Аналізом макроструктури зламів установлено, що смуга світло-сірого кольору зламу на темно-сірому фоні, навіть у тих місцях, де пластини контактували з чавуном і не з'єднувались, не зменшувалась, а навпаки збільшувалась (табл. 1, рис. 15).

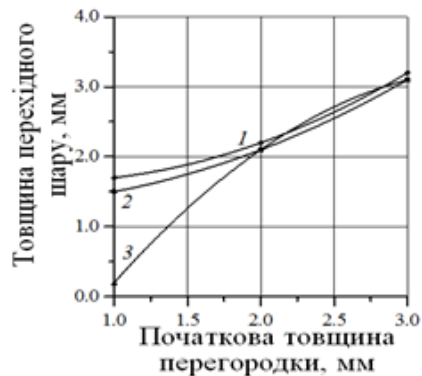


Рис. 15. Вплив температури заливання та вихідної товщини розділової перегородки на товщину перехідного шару у вилівках:

1 – температура заливання чавуну  $1380^\circ\text{C}$ ; 2 –  $1420^\circ\text{C}$ ; 3 –  $1480^\circ\text{C}$

Таблиця 1

Вплив сполучення рівнів варіювання вихідної товщини перегородок із сталі Ст3пс ( $\delta_n$ ) і температури заливання ( $t_{\text{зал}}$ ) на кінцеву товщину перехідного шару ( $\delta_k$ )

Індекс форми	$t_{\text{зал}}, ^\circ\text{C}$	Вихідна товщина перегородки, $\delta_n$ , мм	Товщина перехідного шару, $\delta_k$ , мм	Математичні залежності
1.1	1380	1,0	1,7	$\delta_k = 1,21 \cdot e^{0,32 \cdot \delta_n}$
1.2	1380	2,0	2,2	
1.3	1380	3,0	3,2	
1.4	1420	1,0	1,5	$\delta_k = 1,04 \cdot e^{0,36 \cdot \delta_n}$
1.5	1420	2,0	2,1	
1.6	1420	3,0	3,1	
1.7	1480	1,0	-	$\delta_k = 2,88 \cdot \ln \delta_n$
1.8	1480	2,0	2,1	
1.9	1480	3,0	3,1	

Збільшення товщини смуги пояснюється тим, що після заливання розплаву в процесі взаємодії розділової перегородки з чавуном в ливарній формі утворюється перехідний шар (рис. 16, а), в якому спостерігається формування структури, яка

складалася з залишків сталевий перегородки та знеуглецьованої зони між чавуном та перегородкою. Знеуглецьована зона формується внаслідок дифузії вуглецю з прилеглих шарів чавуну в сталеву перегородку, який забезпечує формування карбідної сітки мікротвердістю 5800 МПа навкруги перлітної структури мікротвердістю 2650 МПа (рис. 16, б). При чому феритна (рис. 16, в) вихідна структура перегородки трансформується у перліто-цементитну структуру заевтектної сталі (рис. 16, а).

За одержаними експериментальними даними вперше встановлено математичні залежності впливу вихідної товщини перегородки з вуглецевої сталі та температури заливання на товщину перехідного шару виливка (див. рис.15).

Аналізом експериментальних виливків встановлено, що в зоні контакту сталевий перегородки з вуглецевої сталі та чавуну спостерігається формування газової поруватості та раковин, причиною виникнення яких є виділення газів в процесі заливання та кристалізації виливка, а також окиснення перегородки. Наявність таких дефектів не призводить до надійного з'єднання таких перегородок з чавунами.

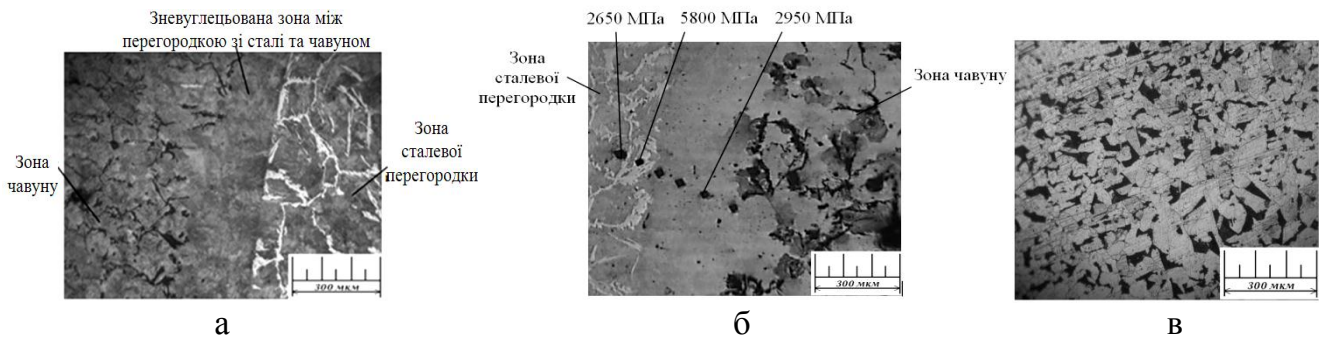


Рис. 16. Мікроструктура перехідного шару у виливку з щільним з'єднанням чавуну та перегородки (а, б) і мікроструктура сталевий перегородки сталі із Ст3пс перед установленням у ливарну форму (в)

Незважаючи на те, що поверхню кожної пластини зі сталі Ст3пс перед установленням у форму зачищали від іржі наждачним папером, ретельно промивали від залишків змащення очищеним бензином і висушували від вологи та мастил, використання пластин з вуглецевих сталей не дає стабільних результатів.

Для зменшення вірогідності нез'єднання між твердою сталевий пластиною та чавуном в якості розділового бар'єра використано перегородки із сталі Ст08кп хімічного складу, % : С =0,05...0,12; Si=0,17...0,37; Mn=0,35...0,65; S до 0,4; P до 0,035 покриті шаром цинку Ц0...Ц1 (ГОСТ3640-94) завтовшки 60...80 мкм.

Використано прямокутні перегородки товщиною 0,5; 1,0 та 1,3 мм. Усі інші умови експерименту копіювали попередні. При заливанні форм розплавом чавуну за температур 1380 ± 10 °С та 1420 ± 10 °С пластини з сталі товщиною 0,5, 1,0 і 1,3 мм з цинковим покриттям, які надійно з'єднувались у виливку. За температури заливання 1480±10 °С всі перегородки з сталі покритої шаром цинку повністю розплавлялись та остаточно розчинялись в об'ємі виливка.

Оглядом макроструктур зламів та мікроструктур перехідних шарів виливків, встановлено подібні результати, як і у випадку з використанням вуглецевої сталі Ст3пс (табл. 2, рис. 17, 18).

За одержаними експериментальними даними побудовані математичні залежності впливу вихідної товщини перегородки з сталі Ст08кп покритої шаром цинку та температури заливання на товщину перехідного шару виливка (рис. 18).

Таблиця 2

Вплив сполучення рівнів варіювання вихідної товщини перегородок з сталевій перегородки покритої шаром цинку  $\delta_n$  та температури заливання  $t_{\text{зал}}$  на кінцеву товщину перехідного шару  $\delta_k$

Індекс форми	$t_{\text{зал}}, ^\circ\text{C}$	Вихідна товщина перегородки, $\delta_n$ , мм	Товщина перехідного шару, $\delta_k$ , мм	Математичні залежності
2.1	1380	0,5	0,95	$\delta_k=0,83 \cdot e^{0,39 \cdot \delta_n}$
2.2	1380	1,0	1,25	
2.3	1380	1,3	1,45	
2.4	1420	0,5	0,7	$\delta_k=0,47 \cdot e^{0,91 \cdot \delta_n}$
2.5	1420	1,0	1,15	
2.6	1420	1,3	1,35	
2.7	1480	0,5	0	-
2.8	1480	1,0	0	
2.9	1480	1,3	0	



Рис. 17. Мікроструктура перехідної зони у виливку з щільним з'єднанням чавуну і перегородки з сталі Ст08кп покритої шаром цинку

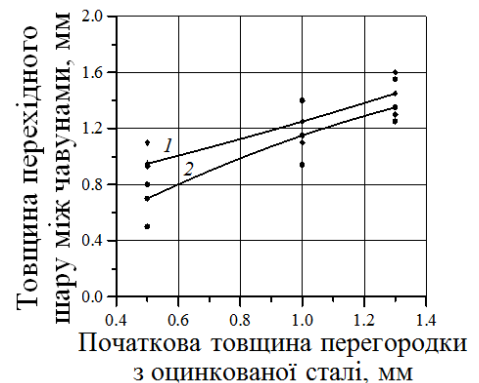


Рис. 18. Вплив температури заливання та вихідної товщини розділової сталевію перегородки Ст08кп покритої шаром цинку на товщину перехідного шару у виливках:

1 – температура заливання чавуну 1380 °C; 2 – 1420 °C

Мікроструктурним аналізом частин виливків зі щільним з'єднанням чавуну та сталевію перегородки визначено, що залишкова товщина перехідного шару ( $\delta_k$ ) пропорційно залежить від товщини сталевію перегородки, яка залишається після взаємодії з розплавами чавунів у виливку ( $\delta_{\text{зал. ст. пер.}}$ ) (рис. 19, 20), а її залишкова товщина ( $\delta_{\text{зал. ст. пер.}}$ ) залежить від температури заливання розплаву в ливарну форму. Кінетику зменшення товщини сталевію перегородки у виливках отриманих за різних температур заливання розплаву показано на рис. 19, рис. 21.

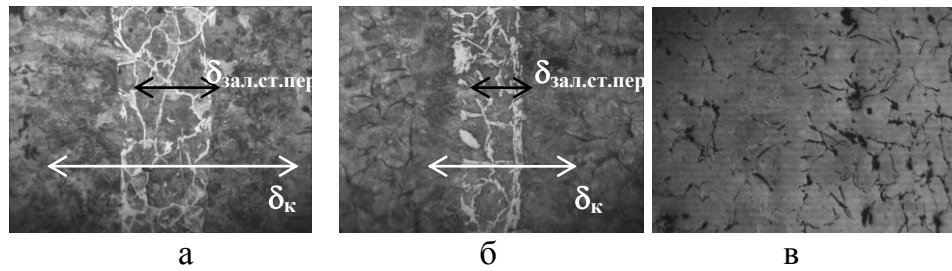


Рис. 19. Мікроструктури перехідних шарів виливків з різною залишковою товщиною сталеві перегородки ( $\times 100$ ) при вихідній товщині перегородки з сталі 1,0 мм покритої шаром цинку, яка встановлювалась в порожнину форми перед заливанням розплаву за температур 1380 °C (а), 1420 °C (б) і 1480 °C (в)

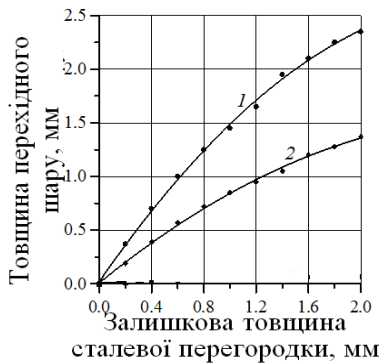


Рис. 20. Співвідношення залишкової товщини сталеві перегородки та перехідного шару у виливках:

1 – температура заливання чавуну 1380 °C; 2 – 1420 °C

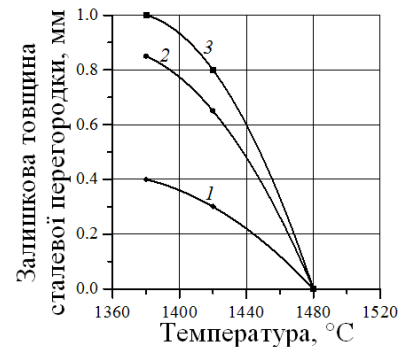


Рис. 21. Вплив температури заливання чавуну на залишкову товщину сталеві перегородки:

1 – вихідна товщина сталеві перегородки 0,5 мм; 2 – 1,0 мм; 3 – 1,3 мм

Зменшення товщини сталеві перегородки пояснюється тим, що у ливарній формі під час заливання розплаву з температури 1480 $\pm$ 10 °C відбуваються процеси нагрівання, плавлення та повного розчинення перегородки, що призводить до перемішування розплавів в об'ємі виливка. Встановлено, що час нагрівання перегородок з товщиною 0,5...1,3 мм від розплаву, який заливають у форму при температурі 1480 $\pm$ 10 °C до температури початку їх плавлення складає 2...4 с, а час їх плавлення 4...8 с. Загальний час нагрівання та плавлення перегородок в даному випадку менший або співпадає з часом заливання розплаву чавуну в ливарну форму (12  $\pm$  2 с). Це призводить до розплавлення перегородок та гідродинамічного перемішування розплавів в ливарній формі.

За температур заливання розплавів 1380 $\pm$ 10 та 1420  $\pm$ 10 °C також відбуваються процеси нагрівання перегородок (за розрахунком 4...7 с) до температури чавуну, який заливається у форму, а також часткового підплавлення поверхні твердої перегородки за рахунок дифузії вуглецю. Однак основна частина сталеві перегородки в цьому випадку залишається у виливку та щільно з'єднується з чавуном.

Механізм формування перехідної зони у виливках відбувається наступним чином: спочатку при заливанні чавуну між розплавом та твердою перегородкою утворюється рідко-рухомий пограничний шар в межах якого відбувається



дифузійний перерозподіл атомів елементів – вуглецю вбік сталевій перегородки та заліза вбік чавуну (рис. 22, а).

За рахунок зміни концентрації цих елементів (хімічний склад перегородки після взаємодії з чавуном %:  $C=0,9\dots 1,0$ ;  $Si=0,45\dots 0,55$ ;  $Mn=0,55\dots 0,7$ ;  $S$  до  $0,45$ ;  $P$  до  $0,05$ ) знижується температура її плавлення, після чого вона починає розплавлятися від пограничного шару та зменшуватись у розмірах.

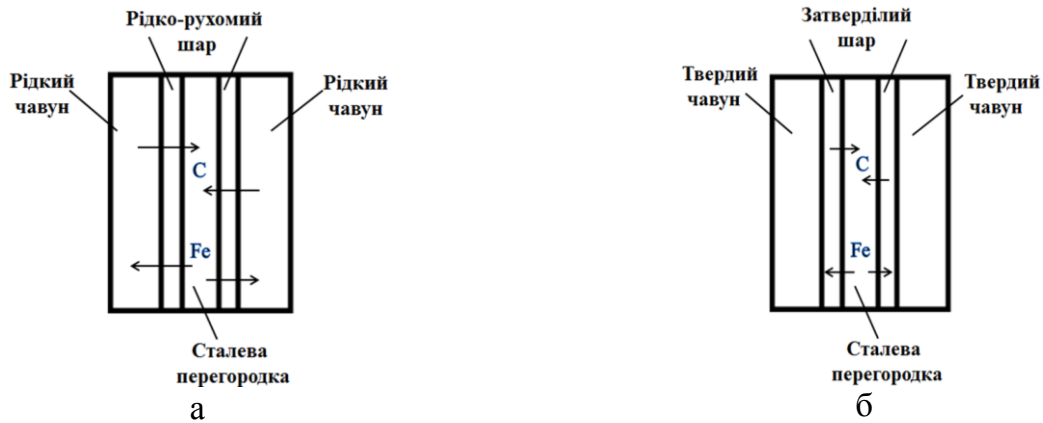


Рис. 22. Схеми формування перехідних шарів у виливках після взаємодії

Збільшення концентрації вуглецю від  $0,1$  до  $0,95$  % призводить до зменшення температури плавлення з  $1520^{\circ}\text{C}$  до  $1440\dots 1460^{\circ}\text{C}$ , відповідно до діаграми стану «залізо-вуглець». Далі перерозподіл вуглецю та заліза продовжується в твердому стані (вуглець дифундує з затверділого пограничного шару, а залізо з сталевій перегородки в пограничну зону) (рис. 22, б), однак з меншою на один-два порядки швидкістю. Це і призводить до формування знеуглецьовуваної зони між чавуном та залишками сталевих перегородок.

При візуальному огляді макрозламів виливків встановлено, що в місцях з'єднання перегородок зі сталі Ст08кп з цинковим покриттям та чавунів не спостерігається наявності дефектів у вигляді газової поруватості та раковин, порівняно з використанням СтЗпс. Це обумовлено тим, що в процесі їх контакту відбувається виділення оксиду цинку ( $ZnO$ ) у вигляді білого порошку, який слугує флюсом і захищає пластину від окиснення в контактній зоні та сприяє утворенню щільного з'єднання. Щільне з'єднання чавунів з перегородкою з сталі покритої шаром цинку не дає руйнуватися перехідній зоні в процесі ударного навантаження та має міцність на розтяг  $400\dots 450$  МПа.

З метою підтвердження структуроутворення перехідного шару у виливках, що забезпечує щільне з'єднання чавунів зі сталевій перегородкою виконано порівняльні дослідження процесу їх з'єднання методом зварювання. Для експериментів обрали дві пластини з сірого чавуну товщиною  $25$  мм та приварили одну до одної за допомогою звичайного зварювального електрода АНО-21 діаметром  $5$  мм (основа електроду Ст08кп). Зварювання здійснювалось за допомогою ручного дугового апарату змінного струму з силою  $60\dots 80$  А.

Установлено, що в зоні зварного з'єднання формується структура (рис. 23, а) подібна заевтектоїдній сталі з дрібнодисперсною цементитною сіткою (мікротвердістю  $6200$  МПа) навколо перлітної складової (мікротвердістю

2750 МПа). Між структурою шву та сірим чавуном з пластинчастим графітом спостерігається наявність голкоподібного цементиту (мікротвердістю 6700 МПа), який є достатньо крихким, створює додаткові структурні напруження й приєє тріщиноутворенню та руйнуванню зварного з'єднання чавунів (рис. 23, б), чого не спостерігається при з'єднанні сталевих перегородок з сталі покритої шаром цинку з розплавами чавунів у двошарових виливках.



Рис. 23. Мікроструктура перехідної зони зварного з'єднання та сірого чавуну (а), загальний вигляд зруйнованих зразків зварного з'єднання із чавуном після ударного навантаження (б)

Таким чином, на підставі проведених досліджень встановлено, що для забезпечення протилежних структур та властивостей частин двошарових виливків за запропонованим в роботі конструктивно-технологічним варіантом і не змішування розплавів модифікованих чавунів сфероїдизувальним сплавом ФСМг7 та карбідоутворювальним сплавом НМг19 в загальній ливарній формі рекомендовано бар'єр – перегородка з сталі з товщиною 0,5...1,3 мм, покрита шаром цинку при температурі заливання рідкого чавуну в ливарну форму не вище  $1420 \pm 10$  °С.

За розробленим технологічним процесом виготовлено двошарові виливки (рис. 24, а, б) з вихідного чавуну евтектичного складу – в одній частині з твердого зносостійкого білого чавуну (рис. 24, в), в іншій – з високоміцного чавуну з кулястим графітом (рис. 24, д).

У центральній частині такого виливка формувався перехідний шар з щільним з'єднанням різномодифікованих чавунів з сталеву перегородкою (рис. 24, г), тобто між залишковою сталеву перегородкою та білим і високоміцним чавуном формується знеуглецьовувана зона, яка забезпечує міцність з'єднання 420...450 МПа, що максимально наближається до міцності чавуну з кулястим графітом.

Для збільшення феритної складової та в'язкості в частині виливка із високоміцного чавуну проводили низькотемпературний відпал. Після якого в цій частині виливка формувалась переважно феритна структура (рис. 25, в), а в частині з білого чавуну структура залишалась перліто-цементитна (рис. 25, а). У зоні контакту чавунів із сталеву перегородкою залишалася структура заевтектоїдної сталі (рис. 25, б). Різниця твердості двох протилежних частин виливка досягає 180...200 НВ (рис. 25).

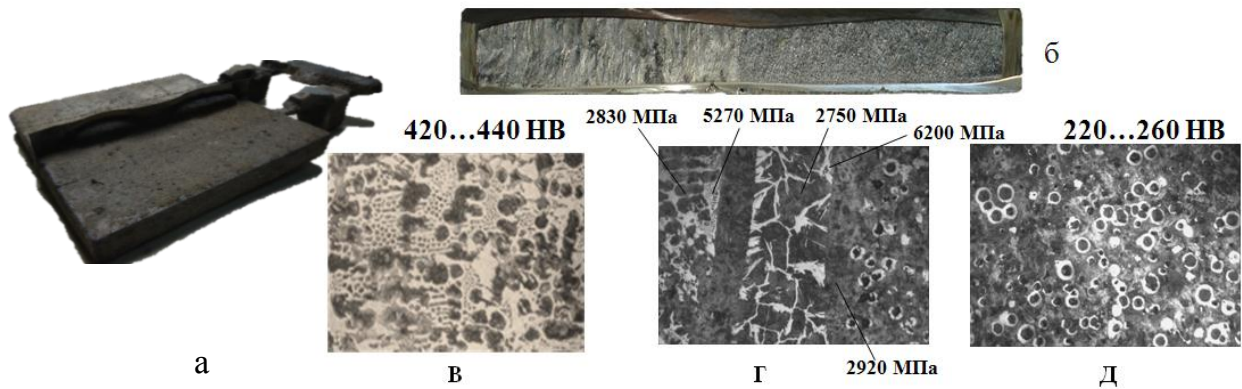


Рис. 24. Загальний вигляд виливка (а), макрозлам (б), мікроструктура лівої (в), перехідної (г) та правої частини двошарового виливка (д) ( $\times 100$ )



Рис. 25. Мікроструктура лівої (а) перехідної зони (б) та правої (в) частини двошарового виливка після графітизувального відпалу ( $\times 100$ )

У п'ятому розділі наведено результати розроблення та апробації технологічних процесів виготовлення промислових двошарових виливків із структурою та властивостями високоміцного чавуну в одній частині та білого зносостійкого чавуну в іншій частині, а також технологічного процесу сфероїдизувального внутрішньоформового модифікування розплаву чавуну.

За результатами досліджень розроблено технологічні процеси виготовлення промислових виливків «Поршень» із високоміцного чавуну марки ВЧ50 методом внутрішньоформового сфероїдизувального модифікування, що пройшли промислові випробування на ТОВ «НВО» Ясинуватський машинобудівний завод, двошарових виливків «Насадки молоткових дробарок» та «Ніж» із структурою та властивостями високоміцного чавуну в одній частині та білого зносостійкого чавуну в іншій частині на ТОВ «Лінгвей» та приватному підприємстві вітчизняного ножового бренду "Колодач".

В розділі наведено розрахунок економічної ефективності використання двошарових виливків, отриманих за запропонованим в роботі новим способом замість монолітних виливків з високолегованої сталі 110Г13. Собівартість виробництва двошарових чавунних виливків у 1,2 рази нижча ніж виливків, які раніше виготовлялись з сталі 110Г13 при збереженні робочого ресурсу деталей. Розрахунки виконані з урахуванням вартості матеріалів на 30 грудня 2015 року.

Результати випробувань показали, що робочий ресурс гідромоторів шахтних комбайнів, укомплектованих деталями «Поршень» з високоміцного чавуну марки ВЧ50, більш ніж вдвічі перевищив робочий ресурс базових гідромоторів з деталями

«Поршень» з сірого чавуну марки СЧ20. Результати дисертаційної роботи впроваджено в навчальний процес.

## ВИСНОВКИ

На основі виконаних досліджень, викладених в дисертаційній роботі, сформульовано наступні висновки:

1. Запропоновано та досліджено новий спосіб виробництва двошарових виливків. Сутність способу полягає у виплавланні чавуну в одній печі та розділенні його в ливниковій системі на два потоки, які модифікуються в реакційних камерах з відповідною зміною структури в процесі подальшої кристалізації. З апріорного моделювання можливих варіантів запропонованого способу вибрано, перспективний конструктивно-технологічний варіант, який передбачає розділення вихідного чавуну евтектичного складу на два потоки з внутрішньоформовим модифікуванням одного з них карбідоутворювальним модифікатором, для отримання в частині виливка твердого зносостійкого чавуну, а іншого сфероїдизувальним модифікатором, для отримання в іншій частині виливка високоміцного чавуну з кулястим графітом.

2. Установлено високу ефективність внутрішньоформового сфероїдизувального модифікування чавуну використанням модифікатора типу ФСМг7, а карбідоутворення в структурі чавуну евтектичного складу, схильного до кристалізації з графітизацією, навіть у товстих перерізах стінок виливків (40...50 мм) забезпечується нікель-магнієвим сплавом НМг19 або фероцерієм марки МЦ50ЖЗ.

3. Для забезпечення розділення структури та властивостей двошарових виливків методом комп'ютерного моделювання встановлено доцільність використання розділового бар'єра між різномодифікованими чавунами за одночасного заповнення ними порожнини ливарної форми.

4. Карбідоутворювальне модифікування вихідного чавуну евтектичного складу в одній частині ливарної форми модифікатором НМг19 і сфероїдизувальне модифікування сплавом ФСМг7 в іншій частині призводить до розділення структури та двократної різниці твердості білого та високоміцного чавунів у виливку масою до 50 кг з товщиною стінки не більше 25 мм за наявності механічного бар'єра у вигляді розділової перегородки з сталі товщиною 0,5...1,3 мм, покрита шаром цинку за температури заливання вихідного чавуну не вищої  $1420 \pm 10$  °С.

5. Установлено, що після заливання розплаву в процесі взаємодії сталеві розділової перегородки з чавуном в перехідній зоні виливка спостерігається формування мікроструктури, яка складається з залишків сталеві перегородки та знеуглецьованої зони між чавуном та перегородкою. Знеуглецьована зона формується внаслідок дифузії вуглецю з прилеглих шарів чавуну в сталеву перегородку, який забезпечує формування карбідної сітки мікротвердістю 5800 МПа навкруги перлітної структури мікротвердістю 2650 МПа. При чому феритна вихідна структура перегородки трансформується у перліто-цементитну структуру заевтектоїдної сталі. Така двошарова перехідна зона характеризується міцністю з'єднання 420...450 МПа.

6. Розділення структури та властивостей вихідного чавуну евтектичного складу карбідоутворювальним і сфероїдизувальним модифікуванням призводить до різниці твердості між протилежними частинами двошарового виливка 140...150 НВ, яка може бути підвищена до 180...200 НВ низькотемпературним графітизувальним відпалом.

7. Розроблений технологічний процес сфероїдизувального внутрішньоформового модифікування для отримання виливків із високоміцного чавуну та виробництва двошарових чавунних виливків з твердою зносостійкою робочою та в'язкою ударостійкою частинами пройшов успішні промислові випробування на підприємствах України.

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ:

1. Фесенко Е.В. Получение отливок с разнородной структурой и свойствами из базового расплава доэвтектического чугуна методом внутриформенного модифицирования / А.Н. Фесенко, М.А. Фесенко, В.А. Косячков, Е.В. Фесенко // Вісник Донбаської державної машинобудівної академії. – 2009. – №1(15). – С. 317–321. *Здобувачем досліджено вплив модифікувальних домішок при внутрішньоформовому обробленні доевтектичного чавуну.*

2. Фесенко Е.В. Технологии получения чугуновых отливок с дифференцированной структурой и свойствами / М.А. Фесенко, В.Г. Могилатенко, В.А. Косячков, Е.В. Фесенко // Науковий Вісник Донбаської державної машинобудівної академії. – 2013. №2 (12Е). – С. 31–36. *Здобувачем досліджено спосіб запобігання перемішуванню різномодифікованих чавунів у ливарній формі з використанням постійної розділової перегородки.*

3. Фесенко Е.В. Получение двухслойных и двухсторонних чугуновых отливок методом внутриформенного модифицирования расплава / М.А. Фесенко, В.А. Косячков, А.Н. Фесенко, Е.В. Фесенко // Вісник Донбаської державної машинобудівної академії – 2014. №1 (32). С. 149–152. *Здобувачем досліджено процеси отримання виливків з різною структурою та властивостями в їх локальних частинах.*

4. Фесенко Е. В. Карбидостабилизирующие заряды реакционных камер при модифицировании чугуна в литейной форме / Е.В. Фесенко, В.А. Косячков, М.А. Фесенко // Процессы литья – 2014. №3 (105). – С. 23–27. *Здобувачем досліджено процес внутрішньоформового карбидостабілізувального модифікування вихідного сірого чавуну добавками  $\text{FX900}$ ,  $\text{NMz19}$  та  $\text{Ce48La28Mz3}$ .*

5. Fesenko Kateryna Manufacture of two-layers and double-sides iron castings with differential structure and properties / Kateryna Fesenko, Volodymir Mogylatenko, Anatoliy Fesenko, Vyacheslav Kosyachkov, Maksym Fesenko // «EUREKA: Physical Sciences and Engineering», Tallinn, Estonia: 2015. №1 – P. 55–60. *Іноземне видання. Здобувачем досліджено метод внутрішньоформового модифікування для виробництва двошарових виливків.*

6. Фесенко Е.В. Графитизирующее модифицирование чугуна в литейной форме / М.А. Фесенко, В.А. Косячков, А.Н. Фесенко, И.В. Лукьяненко, Е.В. Фесенко // Металл и литье Украины – 2015. № 10 (269). С. 1–6. *Здобувачем досліджено*



*процес внутрішньоформового графітувального модифікування вихідного чавуну, схильного до кристалізації за метастабільною системою добавками ФС75.*

7. Патент України на корисну модель №41383 U 2008 11908, B22D27/00. Спосіб виготовлення виливків з диференційованими структурою і властивостями // Фесенко А. М., Фесенко М. А., Косячков В. О., Ємельяненко (Фесенко) К. В. Заявл. 07.10.2008, опубл. 25.05.2009. Бюл. 10, 2009 р. *Здобувачем запропоновано та досліджено спосіб отримання виливків з різною структурою та властивостями методом внутрішньоформової обробки вихідного розплаву через дві незалежні ливникові системи.*

8. Патент України на корисну модель № 42795 U 2009 00009, B22D27/00. Спосіб виготовлення виливків з диференційованими структурою і властивостями // Фесенко М. А., Фесенко А. М., Косячков В. О., Ємельяненко (Фесенко) К. В. Заявл. 05.01.2009, опубл. 27.07.2009. Бюл. № 14, 2009 р. *Здобувачем запропоновано та досліджено спосіб запобігання перемішуванню різномодифікованих чавунів з використанням спеціальної розділової перегородки.*

9. Фесенко К.В. Розширення можливостей отримання чавунних виливків з диференційованою структурою та властивостями / К.В. Фесенко, В.О. Косячков, В.Г. Вініченко // 5 Міжнародна науково-технічна конференція «Нові матеріали і технології в машинобудуванні». Матеріали конференції, Київ, 2013 р. – С.113-114. *Здобувачем проаналізовано новий спосіб отримання виливків з протилежними структурою та властивостями.*

10. Фесенко Е.В. Развитие способов получения чугуных отливок с дифференцированными структурой и свойствами / Е.В. Фесенко, В.А. Косячков, М. А. Фесенко // 4 Международная научно-техническая конференция «Перспективные технологии, материалы и оборудование в литейном производстве». Материалы конференции, Краматорск, 2013 г. – С.220-222. *Здобувачем проаналізовано можливості отримання двошарових виливків з одного вихідного чавуну модифікуванням в ливарній формі.*

11. Фесенко Е.В. Технологии модифицирования чугуна в литейной форме для получения отливок с дифференцированной структурой и свойствами / М.А. Фесенко, Е.В. Фесенко // 14 Международная научно-техническая уральская школа-семинар металлосведов-молодых ученых. Материалы конференции, Екатеринбург, 2013 г. – С.55-58. *Здобувачем досліджена технологія внутрішньоформового модифікування для отримання виливків з протилежними структурою та властивостями.*

12. Фесенко Е.В. Компьютерное моделирование процесса получения литых деталей с дифференцированной структурой и свойствами / Е.В. Фесенко, В.А. Косячков, М.А. Фесенко // Всеукраїнська науково-практична інтернет конференція. Материалы конференции, Черкасы, 2014 г. – С.72-73. *Здобувачем проведено комп'ютерне моделювання процесів, що відбуваються в ливарній формі.*

13. Фесенко Е.В. Компьютерное моделирование процесса получения двухсторонних отливок с дифференцированными свойствами / М.А. Фесенко, В.А. Косячков, Е.В. Фесенко // 8 Всеукраїнська науково-практична конференція. Материалы конференции, Луганск, 2014 г. – С.112-115. *Здобувачем проведено*

*комп'ютерне моделювання процесів, що відбуваються в ливарній формі при отриманні двошарових виливків.*

14. Фесенко Е.В. Спосіб отримання чавунних виливків з диференційованими властивостями / Е.В. Фесенко, М.А. Фесенко // 5 Науково-практична конференція молодих вчених України. Київ, ФТІМС НАН України, 2014 г. *Здобувачем проаналізовано новий спосіб отримання виливків з диференційними властивостями.*

15. Фесенко К.В. Карбідостабілізувальна обробка розплаву чавуну в ливарній формі / К.В. Фесенко, М.А. Фесенко, С.В. Місюра, В.Ю. Тулуп, В.О. Косячков // 6 Міжнародна науково-технічна конференція «Нові матеріали і технології в машинобудуванні». Матеріали конференції, Київ, 2014 р. – С.129-131. *Здобувачем проаналізовано процес карбідоутворювальної обробки чавуну в ливарній формі.*

16. Фесенко Е.В. Оптимизация карбидостабилизирующих присадок для модифицирования чугуна в литейной форме / Е.В. Фесенко, В.А. Косячков, М.А. Фесенко // Юбилейная 10 Международная научно-практическая конференция «Литье 2014». Материалы конференции, Запорожье, 2014 г. – С.246-248. *Здобувачем проаналізовано процес внутрішньоформової карбідоутворювальної обробки чавуну.*

17. Фесенко Е.В. Метод изготовления чугунных отливок с дифференцированными свойствами / М.А. Фесенко, В.А. Косячков, Е.В. Фесенко // Международная научно-техническая конференция «Университетская наука - 2014». Материалы конференции, Мариуполь, 2014 г. – С. 49. *Здобувачем розкрито суть нового способу отримання виливків з різною структурою та властивостями.*

18. Фесенко К.В. Спосіб виготовлення двобічних чавунних литих деталей / М.А. Фесенко, В.О. Косячков, К.В. Фесенко // Міжнародна науково-технічна конференція молодих учених та студентів. Матеріали конференції, Тернопіль, 2014р. С. 154-155. *Здобувачем представлено суть способу отримання двобічних виливків.*

19. Фесенко К.В. Технологія отримання виливків з диференційованими структурою та властивостями методом внутрішньоформового модифікування / К.В. Фесенко, В.О.Косячков, М.А. Фесенко, С.В. Мисюра // 7 Міжнародна науково-технічна конференція «Нові матеріали і технології в машинобудуванні». Матеріали конференції, Київ, 2015 р. – С.140-142. *Здобувачем розкрито технологію отримання виливків з протилежними властивостями в їх локальних частинах.*

20. Фесенко Е.В. Новый способ получения чугунных отливок с дифференционными структурой и свойствами / Е.В. Фесенко, В.А. Косячков, М. А. Фесенко // 5 Международная научно-техническая конференция «Перспективные технологии, материалы и оборудование в литейном производстве». Материалы конференции, Краматорск, 2015 г. – С.166-168. *Здобувачем досліджено сутність нового способу отримання виливків з диференційними структурою та властивостями.*

21. Фесенко К.В. Дослідження процесів внутрішньоформового модифікування чавуну для виготовлення деталей з підвищеними експлуатаційними властивостями / М.А. Фесенко, В.Г. Могилатенко, В.А. Косячков, К.В. Фесенко // Всеукраїнська науково-практична інтернет конференція. Матеріали конференції, Черкаси, 2015 г. – С.129-130. *Здобувачем досліджено процеси що відбуваються в ливарній формі при внутрішньоформовому модифікуванні.*

22. Фесенко Е.В. Способ получения двухсторонних чугуновых отливок / Е.В. Фесенко, М.А. Фесенко // 8 Міжнародна конференція молодих учених та спеціалістів «Зварювання та споріднені технології». Матеріали конференції, Київ, 2015 г. – С.179. *Здобувачем розкрито суть нового способу отримання двобічних чавунних виливків.*

23. Фесенко Е.В. Способ изготовления литых чугуновых деталей, для работы в условиях ударно-абразивного износа / Е.В. Фесенко, В.А. Косячков, М.А. Фесенко // Спеціальна металургія вчора, сьогодні, завтра. Матеріали конференції, Київ, 2015 г. – С.925-930. *Здобувачем запропоновано новий спосіб отримання виливків для роботи в умовах ударно-абразивного зносу.*

24. Фесенко Е.В. Способ изготовления чугуновых отливок с дифференцированной структурой и свойствами / Е.В. Фесенко, И.В. Лукьяненко, М.А. Фесенко, М.М. Ямшинский // Неметалеві вкраплення і газу у ливарних сплавах. Матеріали конференції, Запоріжжя, 2015 г. – С.99-101. *Здобувачем досліджено спосіб отримання двошарових чавунних виливків.*

## АНОТАЦІЯ

Фесенко К. В. Модифікування чавуну в ливниковій системі для виробництва двошарових виливків. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.16.04 «Ливарне виробництво». – Національний технічний університет «Київський політехнічний інститут» МОН України, Київ, 2016.

У роботі запропоновано та досліджено новий спосіб виробництва двошарових виливків. Сутність способу полягає у виплавлянні чавуну в одній печі та розділенні його в ливниковій системі на два потоки, які модифікуються в реакційних камерах з відповідною зміною структури в процесі подальшої кристалізації. З аналізу можливих варіантів запропонованого способу найперспективнішим конструктивно-технологічним варіантом є розділення вихідного чавуну евтектичного складу на два потоки з внутрішньоформовим модифікуванням одного з них карбідоутворювальним, а іншого сфероїдизувальним модифікаторами. Вибрано ефективні добавки для роздільного карбідоутворювального та сфероїдизувального модифікування чавуну в ливарній формі.

Досліджено особливості нового перспективного конструктивно-технологічного варіанта виготовлення двошарових виливків із зносостійкого білого та ударостійкого високоміцного чавунів одночасним роздільним карбідоутворювальним і сфероїдизувальним модифікуванням вихідного чавуну евтектичного складу в ливарній формі.

Установлено вплив основних технологічних параметрів процесу: температури заливання вихідного чавуну, товщини розділової перегородки на процес отримання різної структури та властивостей двошарових виливків.

**Ключові слова:** спосіб; розділення властивостей; двошарові виливки; модифікування в ливарній формі; чавун евтектичного складу; білий чавун; високоміцний чавун.



## АНОТАЦИЯ

Фесенко Е. В. Модифицирование чугуна в литниковой системе для производства двухслойных отливок. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание научной степени кандидата технических наук по специальности 05.16.04 «Литейное производство» - Национальный технический университет «Киевский политехнический институт» МОН Украины, Киев, 2016.

Работа посвящена разработке нового способа получения двухслойных отливок в одной части из твердого износостойкого белого чугуна и в другой ее части из высокопрочного чугуна с шаровидным графитом.

Сущность нового способа заключается в выплавке чугуна в одной печи и разделении его при заполнении полости формы в литниковой системе на два потока, которые модифицируются в реакционных камерах разными по функциональному назначению модификаторами с соответствующим изменением структуры в процессе дальнейшей кристаллизации.

Априорным моделированием возможных вариантов предлагаемого способа, выбран и исследован конструктивно-технологический вариант, который предусматривает разделение исходного чугуна эвтектического состава на два потока с внутриформенным модифицированием в литниковой системе одного из них карбидообразующим модификатором, для получения в части отливки твердого износостойкого белого чугуна, а другой сфероидизирующим модификатором, для получения в другой части отливки высокопрочного чугуна с шаровидным графитом.

На основании проведенных теоретических и экспериментальных исследований выбраны эффективные добавки для сфероидизирующего и карбидообразующего модифицирования чугуна в литейной форме на основе модификаторов, которые обеспечивают гарантированное получение заданных структуры и свойств чугуна в отливке.

Методом компьютерного моделирования, а также натурными экспериментами исследованы особенности нового конструктивно-технологического варианта изготовления двухслойных отливок. Установлено влияние технологических параметров процесса – температуры заливки исходного чугуна, толщины разделительной стальной перегородки на процесс получения разной структуры и свойств двухслойных отливок в локальных ее частях.

Определены закономерности формирования микроструктуры переходного слоя двухслойных отливок от исследуемых технологических параметров.

Разработаны и опробованы в лабораторных и производственных условиях технологические процессы получения двухслойных промышленных отливок «Насадки молотковых дробилок» и «Нож» с твердой износостойкой рабочей частью из белого чугуна и вязкой пластичной частью из высокопрочного чугуна с шаровидным графитом, а также технологический процесс получения промышленных отливок «Поршень» из высокопрочного чугуна с шаровидным графитом марки ВЧ50.

Себестоимость изготовления двухслойных чугунных отливок предложенным новым способом в 1,2 раза ниже аналогичных монолитных отливок, изготавливаемых из стали 110Г13.

Ресурс гидромоторов шахтных комбайнов, укомплектованных деталями «Поршень» изготовленных по технологии внутриформенного сфероидизирующего модифицирования из чугуна марки ВЧ50 в два раза превышает рабочий ресурс аналогичных гидромоторов, укомплектованными деталями «Поршень» из серого чугуна марки СЧ20.

**Ключевые слова:** способ; разделение свойств; двухслойные отливки; модифицирование в литейной форме; чугун эвтектического состава; белый чугун; высокопрочный чугун.

## ABSTRACT

Fesenko K.V. Modification of iron in the gating system for the production of double-layer cast. – The Manuscript.

Dissertation on the receipt of scientific degree of candidate of engineering's sciences on speciality 05.16.04 – «Casting production». – National technical university of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv, 2016.

Work is devoted to development of technological process of simultaneous separate modifying of liquid cast iron in reactionary cameras of gating system of a casting mold for production of castings with a firm wear-resistant superficial working layer and a viscous shockproof basis.

On the basis of the conducted theoretical and pilot researches effective additives for sferoidyzation and karbidostabilization modifying of cast iron in a casting mold on the basis of modifiers which provide the guaranteed receiving set structure and properties of cast iron in casting are chosen.

The most perspective constructive and technological option of production of two-layer castings as separate modifying of cast iron in a casting mold is chosen. The method of computer modeling, and also natural experiments investigated features of new constructive and technological option of production of two-layer castings from white wear-resistant and shockproof high-strength iron by separate karbidostabilization and sferoidyzation modifying of initial cast iron of the eutectic structure in a casting mold. Influence of the key technological parameters of process is established: temperatures of filling of source cast iron, thickness of a dividing steel partition on process of receiving different structure and properties of two-layer castings.

Technological processes of receiving two-layer industrial castings with a firm wear-resistant working surface from white cast iron and a viscous plastic basis from high-strength cast iron with spherical graphite, and also technological process of receiving castings of high-strength cast iron with spherical graphite are developed and tested in laboratory and working conditions.

**Key words:** method; differential properties; two-layer castings; modification in a mold; grey cast iron; white cast iron; high-tensile cast iron.