

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**  
**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ**  
**“КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО”**



**ЛУК’ЯНЕНКО ІВАН ВІТАЛІЙОВИЧ**

**УДК 621.74.046**

**ОСОБЛИВОСТІ ВИРОБНИЦТВА ДВОШАРОВИХ ВИЛИВКІВ ІЗ  
МОДИФІКОВАНИХ У ЛИВАРНІЙ ФОРМІ ЧАВУНІВ**

Спеціальність 05.16.04 – Ливарне виробництво

**АВТОРЕФЕРАТ**  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

**Київ – 2020**

Дисертацією є рукопис

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

**Науковий керівник:**

кандидат технічних наук, доцент  
**Фесенко Максим Анатолійович**,  
Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут  
імені Ігоря Сікорського»,  
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  
Національної академії наук України,  
завідувач відділу високоміцних спеціальних чавунів

доктор технічних наук, доцент  
**Іванов Валерій Григорович**,  
Національний університет «Запорізька політехніка»,  
доцент кафедри машин і технології ливарного  
виробництва

Захист відбудеться «29» вересня 2020 р. о 14:30 на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.002.12 у Національному технічному університеті України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» за адресою: 03056, м. Київ, просп. Перемоги, 37, корпус 9, аудиторія № 101.

З дисертацією можна ознайомитися в Науково-технічній бібліотеці ім. Г. І. Денисенка Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» за адресою: 03056, м. Київ, пр-т Перемоги, 37.

Автореферат розісланий «28» серпня 2020 р.

Учений секретар  
спеціалізованої вченої ради Д 26.002.12  
кандидат технічних наук, доцент



О. В. Степанов

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** У гірничому та металургійному виробництвах, нафтохімічній, цементній, гірничо-збагачувальній галузях, енергетичному й сільськогосподарському машинобудуванні та інших галузях промисловості країни використовують механізми, машини та устаткування для видобування, транспортування, подрібнення та оброблення різних матеріалів, які працюють в умовах інтенсивного зношування, тобто експлуатуються в екстремальних умовах.

У таких умовах роботи машин і механізмів багато деталей, які входять до складу цього устаткування, потребують сучасних технологій їх виготовлення, які б забезпечували оптимальне поєднання технологічних, фізико-механічних та експлуатаційних властивостей.

Одним із напрямків вирішення цієї проблеми є використання технологій виготовлення литих деталей двошаровими з різною структурою та властивостями окремих їх частин. Відомо, що високу твердість металу й зносостійкість деталей можна забезпечити білим чавуном, що вміщує структурно вільні карбіди заліза, а підвищену в'язкість – сірим чавуном із пластинчастим графітом або високоміцним чавуном феритно-перлітного класу з кулястою формою графіту.

Виробництво литих деталей з різною структурою та властивостями окремих їх частин можна здійснювати різними способами лиття. Це можуть бути технології послідовного або одночасного заливання розплавів у ливарну форму з використанням розділової перегородки, яку встановлюють у порожнину форми, послідовного заливання у форму розплавів через незалежні ливникові системи з витримуванням між заливаннями, відцентрового способу з послідовним заливанням розплавів у виливницю, заливання розплаву на тверду заготовку та безперервного лиття в кристалізатори. Проте більшість цих технологій потребує одночасного виплавляння розплавів різного хімічного складу в окремих плавильних агрегатах і використання операцій додаткового оброблення розплавів з наступним їх заливанням в ливарну форму за необхідною послідовністю, що ускладнює та здорожує технологічний процес виготовлення таких виливків і погіршує умови роботи.

Зменшити або усунути ряд недоліків технологічних процесів виготовлення двошарових виливків можна використанням методів пізнього модифікування, серед яких перспективним є метод внутрішньоформового модифікування. Сутність методу полягає в тому, що розплав чавуну взаємодіє з подрібненим модифікатором у реакційній камері ливникової системи під час заливання ливарної форми. Проте одним із недоліків внутрішньоформового модифікування є ймовірність нерівномірного засвоєння добавок модифікатора потоком чавуну, що призводить до формування виливків з неоднорідною структурою. Усунення цього недоліку забезпечує можливість виготовлення з одного вихідного розплаву двошарових виливків з різною структурою та властивостями.

Відомості щодо особливостей використання методу внутрішньоформового модифікування для виготовлення двошарових виливків із чавунів різного класу вкрай обмежені, що потребує виконання розширених досліджень у напрямку встановлення особливостей цього процесу. Виконані дослідження дадуть змогу

чітко встановити як теоретичні аспекти, так і технологічні параметри процесів виготовлення двошарових виливків з використанням внутрішньоформового модифікування чавунів. Це сприятиме суттєвому спрощенню існуючих технологій виробництва такого литва та зменшити безповоротні втрати дорогих компонентів, що вміщуються в легованих сплавах, з яких виготовляють зносостійкі литі деталі для роботи в екстремальних умовах. Отже, робота є актуальною як для вирішення наукових проблем модифікування сплавів на основі заліза, так і такою, що потребує розроблення та впровадження у виробництво досконалих технологій виготовлення двошарових литих деталей для роботи в екстремальних умовах.

Актуальність роботи лежить і в економічній площині, оскільки заміна дорогих ливарних високолегованих сплавів, особливо за відсутністю в теперішній час в Україні феросплавів, дешевими, сприятиме суттєвому зниженню собівартості продукції ливарних цехів.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Робота виконувалась на кафедрі ливарного виробництва чорних та кольорових металів Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» і мала зв'язок з темою «Технологічні особливості прогнозування властивостей розплавів і структури металу виливків для роботи в екстремальних умовах». Номер державної реєстрації 0115U000406.

**Мета і задачі дослідження.** Метою роботи є розроблення технологічних процесів виробництва двошарових чавунних виливків з одного базового чавуну модифікованого в ливниковій системі ливарної форми.

Для досягнення мети в роботі сформульовано такі задачі дослідження:

1. Теоретично обґрунтувати та вибрати хімічні склади базових чавунів, схильних до кристалізації за метастабільною та стабільною діаграмами для забезпечення заданих структури металу та його властивостей у виливках.

2. Обґрунтувати та вибрати ефективні графітізувальний і сфероїдизувальний модифікатори.

3. Виконати моделювання та дослідження технологічних варіантів виготовлення двошарових виливків для перевіряння можливості їхньої реалізації у виробничих умовах і встановлення практичної доцільності використання кожного з них.

4. Дослідити процеси кристалізації модифікованих чавунів у порожнині ливарної форми й установити закономірності структуроутворення та формування властивостей металу в двошарових виливках.

Розробити та впровадити у виробництво технологічні процеси виготовлення двошарових чавунних виливків з використанням внутрішньоформового модифікування базового розплаву, який виплавлено в одному плавильному агрегаті.

*Об'єкт дослідження:* процес виробництва двошарових чавунних виливків модифікуванням базового розплаву в ливарній формі.

*Предмет дослідження:* хімічний склад, технологічні параметри процесів модифікування, структури металів і перехідної зони в двошарових виливках, механічні та експлуатаційні властивості виготовлених виливків.

**Методи дослідження.** У роботі використано сучасні методи та устаткування для проведення термічного, хімічного та металографічного аналізів, а також для визначення механічних та експлуатаційних властивостей чавуну у виливках.

**Наукова новизна одержаних результатів:**

1. Досліджено процес формування мікроструктури у перехідних зонах двошарових чавунних виливків, виготовлених способом послідовного заливання форми через незалежні ливникові системи. Установлено, що мікроструктура перехідної зони може змінюватися від половинчастого чавуну з вкрапленнями пластинчастого графіту та цементиту в перлітній металевій матриці для виливка з поєднанням шарів білого та сірого чавунів до чавуну з вкрапленнями кулястого та вермикулярного графіту й цементиту в перлітній металевій матриці – для виливка з поєднанням шарів білого та високоміцного чавунів.

2. Встановлено залежності впливу температури заливання розплаву та часу витримання між заливаннями на розміри перехідних зон у двошарових чавунних виливках товщиною до 50 мм. Показано, що зниження температури заливання розплаву від 1460 °С до 1380 °С та збільшення часу витримання між заливаннями від 3 с до 480 с призводять до зменшення товщини перехідного шару у виливках від 1,0 до 0,01 мм.

3. Досліджено процес формування мікроструктури виливках з чавуну, які виготовлено способом заливання на зовнішній холодильник. При цьому встановлено вплив товщини стінок зовнішнього холодильника та виливка на глибину вибіленого шару в двошарових чавунних виливках, а також визначено, що за збільшення їх товщини від 10 мм до 50 мм глибина вибілення змінюється в межах від 1,5 мм до 14,9 мм.

4. Встановлено, що зносостійкість робочої зони двошарового виливка, що виготовлено за технологією поетапного заливання ливарної форми знаходиться на рівні еталонного зразка, який виготовлено із низьколегованого хромистого чавуну. Наряду з цим показано, що використання зовнішнього чавунного холодильника підвищує дану характеристику на 10-20 % у порівнянні з еталоном й знаходиться в прямо пропорційній залежності від його товщини та обернено пропорційній – від розміру стінки виливка.

**Практичне значення одержаних результатів.** Запропоновано технологічні варіанти виготовлення двошарових чавунних виливків для роботи в екстремальних умовах; визначено хімічні склади чавунів, які доцільно застосовувати для виробництва двошарових виливків за різними технологічними варіантами та хімічний і гранулометричний склади модифікаторів для внутрішньоформового графітизувального й сфероїдизувального модифікування чавунів, схильних до кристалізації за метастабільною та стабільною діаграмами; розроблено технологічні процеси виробництва двошарових чавунних виливків («Прес-форма військової каски», «Плита броньова», «Корпус вібратора»), впроваджено їх у виробництво, що дало змогу знизити собівартість такого литва в 1,4-1,5 рази в порівнянні із собівартістю виробництва монолітних виливків такого ж призначення із низьколегованого хромистого чавуну.

**Особистий внесок здобувача.** Дисертація виконана автором самостійно й базується на результатах досліджень, що опубліковані. Основні експериментальні

дані й наукові положення дисертаційної роботи одержані й сформульовані автором у співавторстві.

У роботах, які опубліковано в співавторстві, здобувачеві належить наступне: постановка завдань, організація, планування та проведення досліджень з оформленням матеріалів до друку [3-6, 9, 16, 19, 20]; проведення дослідних плавок [4-6, 9, 13]; моделювання й дослідження процесів модифікування чавунів різного класу [5, 11, 16, 19]; визначення варіантів виготовлення двошарових виливків у лабораторних та виробничих умовах [4-6, 9, 10, 12-15, 17, 18]; аналіз та опрацювання результатів досліджень [1-3, 7, 8, 16, 19, 20]; узагальнення та обговорення результатів досліджень [1-3, 7, 8]; проведення металографічних досліджень [4-6]; проведення патентного пошуку [21]; відпрацювання технологій у лабораторних і промислових умовах [4-6, 17, 18, 20, 21].

Основні положення, висновки та рекомендації виконано спільно з науковим керівником і співавторами публікацій. Автор узагальнив результати досліджень і виконав апробацію запропонованих технічних рішень.

**Апробація результатів дисертації.** Основні наукові положення та результати роботи представлено та обговорено на міжнародних конференціях: «Литьє. Металургія 2014, Литьє. Металургія 2016» (м. Запоріжжя, 2014, 2016 рр.), «Нові матеріали і технології в машинобудуванні» (м. Київ, 2014, 2015, 2016, 2017, 2018, 2019 рр.), «Неметалеві вкраплення і гази у ливарних сплавах» (м. Запоріжжя, 2015 р.), «Спеціальна металургія: вчора, сьогодні, завтра» (м. Київ, 2016), «Матеріали для роботи в екстремальних умовах» (м. Київ, 2016), «Перспективні технології, матеріали і обладнання у ливарному виробництві» (м. Краматорськ, 2017), «Прикладні науково-технічні дослідження» (м. Івано-Франківськ, 2018).

**Публікації.** Основні положення дисертаційної роботи викладено в 21 науковій праці, з яких 6 статей у наукових фахових виданнях, з них 1 стаття в закордонному виданні, 1 патент України на корисну модель, 14 тез доповідей в збірниках матеріалів наукових конференцій.

**Структура та обсяг дисертаційної роботи.** Дисертація складається із вступу, 4 розділів, висновків, списку використаних джерел. Загальний обсяг дисертації складає 154 сторінки, у тому числі 62 рисунки, таблиць, список використаних джерел з 119 найменувань.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність роботи, сформульовано мету і задачі дослідження, показано зв'язок з науковими програмами, наведено основні результати, відзначено їх наукову новизну та практичне значення, особистий внесок здобувача та апробацію результатів роботи.

У **першому розділі** проаналізовано номенклатуру литих деталей, які працюють в екстремальних умовах, галузі їх застосування, вихідні матеріали та ливарні технології виготовлення двошарових виливків, показано переваги та недоліки цих технологій. Розглянуто фактори, які впливають на утворення якісного з'єднання між шарами виливка, основним із яких є створення умов здійснення

інтенсивних дифузійних процесів між шарами внаслідок зближення атомів металів на відстані дії міжатомних сил, що досягається змочуванням рідким металом твердого, описано теплофізичні та фізико-хімічні особливості утворення дифузійних перехідних зон у шаруватих виливках, проаналізовано технологічні варіанти виготовлення двошарових виливків та їх особливості залежно від методів модифікування чавунів.

На підставі критичного аналізу науково-технічної літератури за темою дисертаційної роботи сформульовано мету та основні напрямки досліджень для вирішення поставлених задач.

У **другому розділі** описано матеріали, устаткування та методи дослідження структури, механічних та експлуатаційних властивостей двошарових чавунних виливків.

Дослідження проводили за допомогою двох технологічних схем виготовлення двошарових чавунних виливків (рис. 1):

– послідовним заливанням у форму чавуну, схильного до кристалізації за метастабільною діаграмою через дві незалежні ливникові системи. До складу другої входить реакційна камера з подрібненим модифікатором для проведення внутрішньоформового графітизувального та сфероїдизувального модифікування розплаву (рис. 1, а);

– заливанням у форму чавуну, схильного до кристалізації за стабільною діаграмою через одну ливникову систему з реакційною камерою з подрібненим модифікатором для проведення внутрішньоформового графітизувального та сфероїдизувального модифікування розплаву та встановленим у ливарну форму зовнішнім холодильником (рис. 1, б).

Вихідний чавун виплавляли у високочастотній (2500 Гц) індукційній печі ІСТ-0,06 з кислотою футеровкою методом переплавлення з використанням сталевого брухту, звороту власного виробництва та відповідних феросплавів. Температуру чавуну перед заливанням у форми контролювали вольфрам-ренієвою термопарою занурення ВР 5/20 з кварцовим наконечником.

Дослідження мікроструктури чавунів виконували за допомогою металографічного мікроскопа МИМ-8. Інформацію з нього передавали цифровою камерою Tuscen на ПЕОМ і обробляли програмою “TSView”. Аналіз структурних складових зразків, вирізаних з різних частин виливка, здійснювали у відповідності з ГОСТ 3443-87. Співвідношення структурних складових визначали точковим методом А. А. Глаголева.

Хімічний склад чавунних зразків визначали на рентгенофлуорисцентному аналізаторі INAM EXPERT 3L. Вміст вуглецю в чавуні визначали методом інфрачервоної абсорбційної спектроскопії за ГОСТ 12344-2003. Твердість зразків вимірювали за методом Бринелля на твердомірі ТШ-2М згідно з ДСТУ ISO 6506-1:2007. Дослідження абразивної зносостійкості виконували за методикою, запропонованою Заболоцьким В. К. і Дьяченко Ю. Г., з використанням зразків перерізом 15×15 мм. Як абразивний матеріал використовували електрокорундове полотно з розмірами абразивних часточок 250 мкм. Моделювання процесів заливання розплаву в ливарну форму та його кристалізації здійснювали на ПЕОМ.

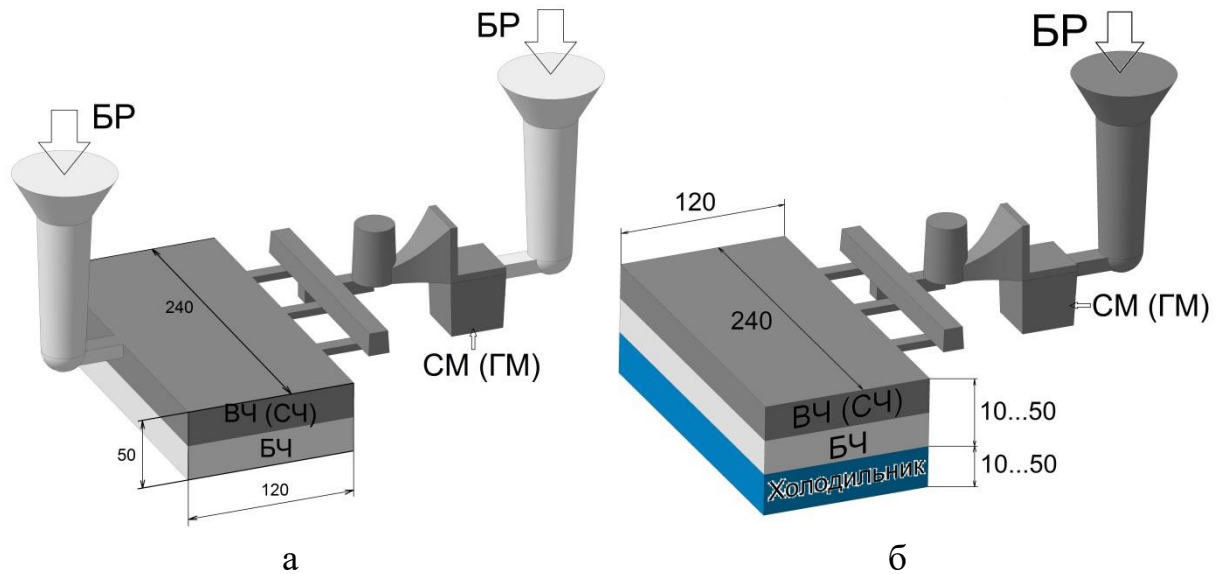


Рисунок 1 – Технологічні варіанти виготовлення двошарових виливків за технологією послідовного заливання (а) та заливання розплаву на зовнішній холодильник (б): БР – базовий розплав; БЧ – білий чавун; СЧ – сірий чавун; ВЧ – високоміцний чавун; ГМ – графітувальний модифікатор; СМ – сфероїдизувальний модифікатор

У третьому розділі викладено результати досліджень щодо визначення хімічного складу базового чавуну, схильного до кристалізації за метастабільною діаграмою, та чавуну, схильного до кристалізації за стабільною діаграмою.

Для визначення хімічного складу базових чавунів використовували вилівок ступінчастої проби з перерізами стінок 5, 10, 20, 30, 40 і 50 мм. Температура заливання розплаву в сухі піщано-глинясті форми становила  $1450 \pm 20$  °С.

Для забезпечення умов кристалізації базового чавуну за метастабільною діаграмою з вибіленням вміст вуглецю і кремнію у рідкому сплаві витримували в рекомендованому ГОСТ 1215-79 для ковкого чавуну діапазоні: 2,4-2,9 % вуглецю та 1,0-1,6% кремнію. Проте, за результатами експериментів, встановлено, що в перерізах ступінчастої проби товщиною 30, 40 і 50 мм такий чавун кристалізується із структурою, характерною для сірого або половинчастого чавуну із вкрапленнями як пластинчастого графіту, так і структурно вільного цементиту.

Для забезпечення кристалізації чавуну за метастабільною діаграмою змінювали вміст вуглецю в межах від 3,0 до 2,3 % додаванням в шихту сталевого брухту, а вміст кремнію – від 0,45 до 1,8 % – використанням феросиліцію ФС75. При цьому вуглецевий еквівалент сплаву змінювався в межах від 2,4 до 3,6 %.

Установлено, що за зміни вмісту кремнію в чавуні від 0,45 до 1,8% структура металу зразка з товщиною перерізу стінки 50 мм змінюється від структури доєвтектичного білого чавуну із цементитними вкрапленнями в перлітно-феритній металевій матриці до сірого із вкрапленнями графіту пластинчастої форми в такій же металевій матриці (рис. 2).

У свою чергу твердість зразків ступінчастої проби плавно знижується від 450 до 200 НВ із збільшенням товщини перерізу стінки від 10 до 50 мм і підвищенням



вмісту кремнію в дослідженому діапазоні (рис. 3). При цьому зміна вмісту вуглецю в дослідженому діапазоні впливає на кількість карбідів у вигляді структурно вільного цементиту та ледебуритної евтектики. Підвищення вмісту вуглецю в чавуні призводить до збільшення в його структурі кількості карбідів (рис. 4) та, як наслідок, до підвищення твердості металу в зразках (рис. 5).

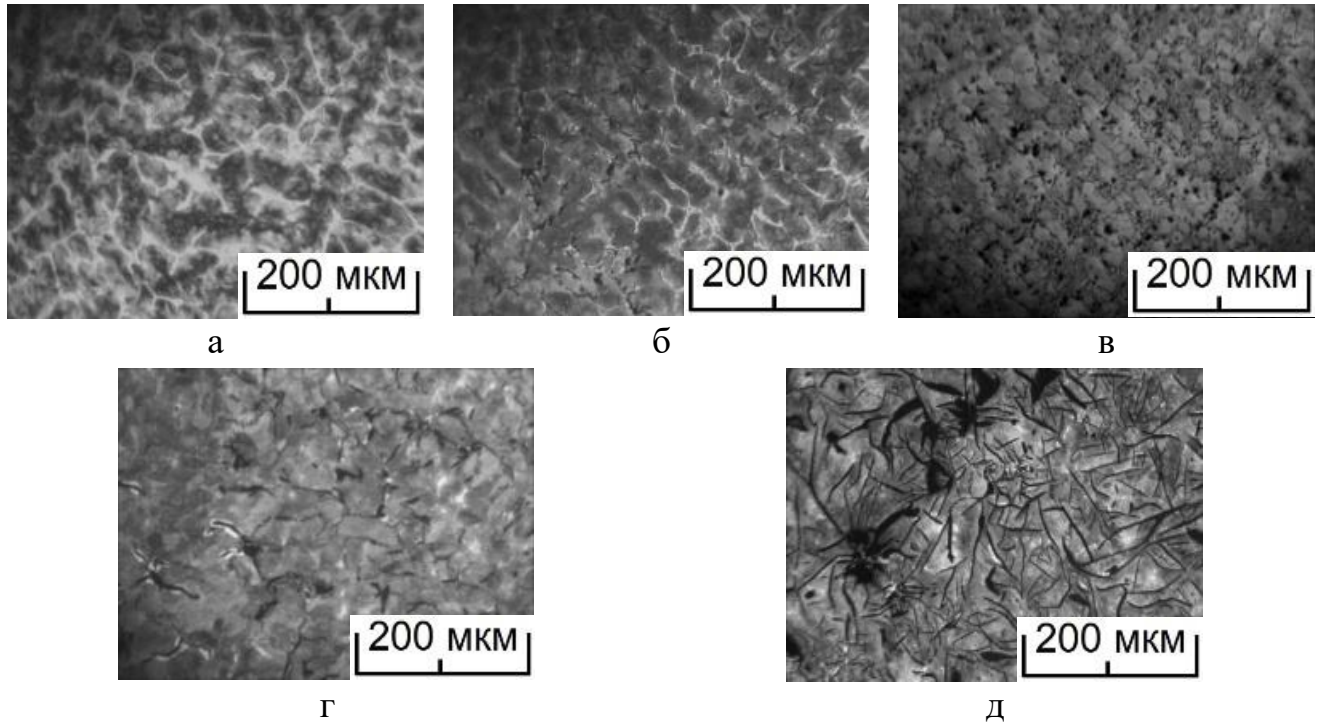


Рисунок 2 – Вплив кремнію на зміну мікроструктури білого чавуну із вмістом 2,8-3,0% вуглецю: а – 0,45% Si, б – 0,60% Si, в – 1,0% Si, г – 1,4% Si, д – 1,8% Si

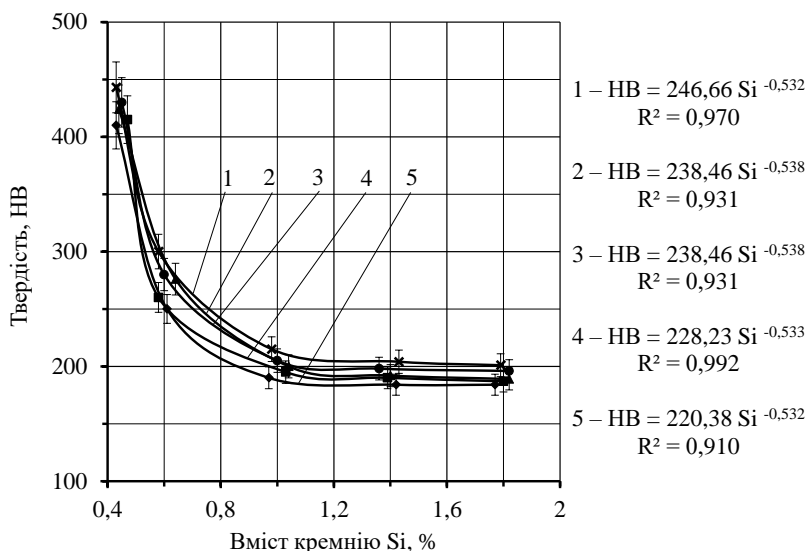


Рисунок 3 – Вплив кремнію на твердість базового чавуну, який містить вуглецю 2,85-3,00 % в перерізах зразків ступінчастої проби: 1 – 10 мм, 2 – 20 мм, 3 – 30 мм, 4 – 40 мм, 5 – 50 мм

Для забезпечення умов кристалізації базового чавуну за стабільною діаграмою стану обрано чавун з хімічним складом, близьким до евтектичного, із вмістом 3,4-3,6% вуглецю й 2,2-2,4% кремнію. Установлено, що кристалізація такого чавуну здійснюється за стабільною діаграмою з графітизацією у всіх перерізах зразків ступінчастої проби (рис. 6).

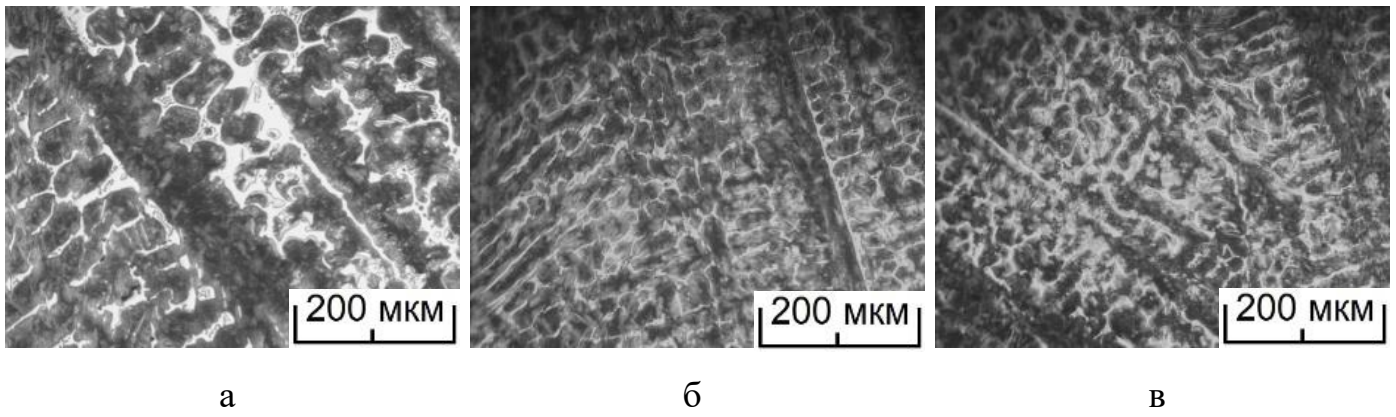


Рисунок 4 – Мікроструктура чавунної проби перерізом 50 мм, яка містить 0,45 % кремнію та вуглецю: а – 2,30 %, б – 2,85 %, в – 3,00 %

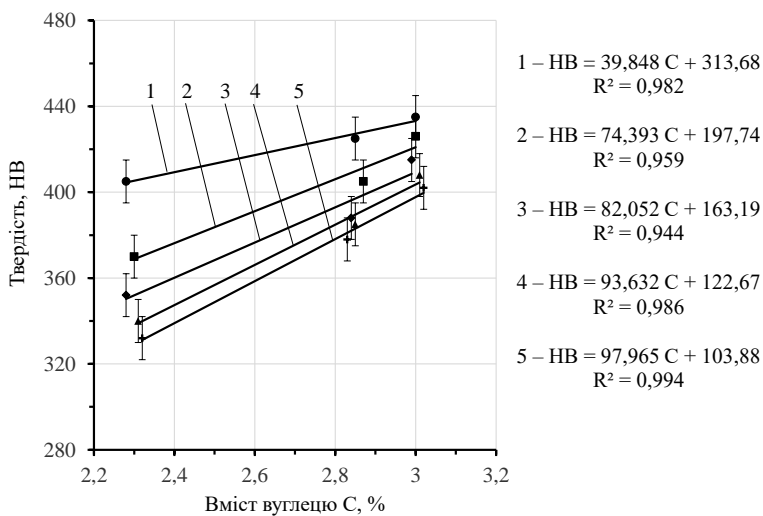


Рисунок 5 – Вплив вуглецю на твердість білого чавуну, який містить 0,45 % Si в перерізах зразків ступінчастої проби: 1 – 10 мм, 2 – 20 мм, 3 – 30 мм, 4 – 40 мм, 5 – 50 мм

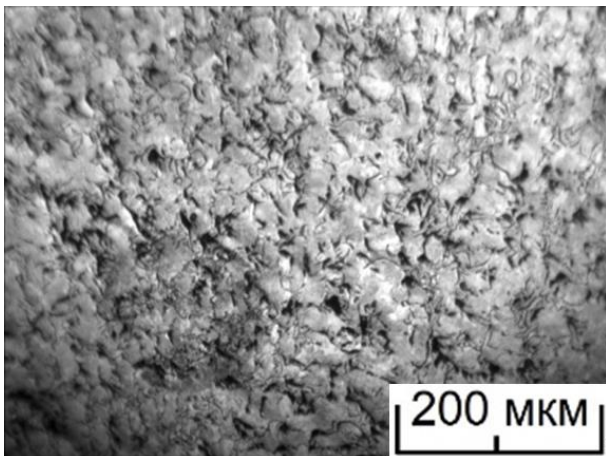


Рисунок 6 – Мікроструктура чавуну, який містить 3,4-3,6 % вуглецю та 2,2-2,4 % кремнію у перерізі зразка ступінчастої проби товщиною 10 мм

На підставі аналізу технічної літератури й власних практичних даних для внутрішньоформового графітизувального оброблення чавуну найефективнішим модифікатором є феросиліцій марки ФС75, а для сфероїдизувального модифікування – комплексна феросиліціймагнієва лігатура ФСМг7. У цій роботі використано обидва модифікатори з розмірами фракцій 1-5 мм.

Оброблення рідкого чавуну з вмістом вуглецю 2,8-3,0% й кремнію – 0,45-0,50% здійснювали двома способами, а саме: у відкритому ковші та методом внутрішньоформового модифікування. Температуру розплаву під час модифікування витримували на рівні  $1450 \pm 20$  °С.

Металографічним аналізом встановлено, що після оброблення чавуну графітизувальним модифікатором у ковші безпосередньо перед заливанням ливарної

форми одержали мікроструктуру проби товщиною перерізу 5 мм, яка характерна для половинчастого чавуну. Макроструктури зламів зразків ступінчастої проби з товщиною перерізів від 10 до 50 мм відповідали темно-сірому кольору, що характерно для сірого чавуну. При цьому в зразку з товщиною перерізу 5 мм формується мікроструктура з вкрапленнями графіту та цементиту в перлітній металевій матриці, а в зразку з товщиною перерізу 10 мм – мікроструктура з вкрапленнями графіту в перлітній металевій матриці, при цьому структурно вільний цементит зникає. Із збільшенням товщини перерізу зразків ступінчастої проби спостерігається зростання лінійних розмірів графітових вкраплень пластинчастої форми (рис. 7), а також збільшення частки фериту й зменшення частки перліту в металевій матриці (рис. 8).

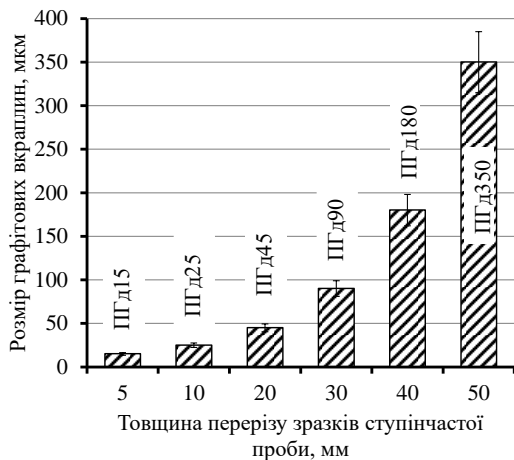


Рисунок 7 – Залежність розміру графітових вкраплень у мікроструктурі від товщини перерізу зразків ступінчастої проби після ковшового графітізувального модифікування

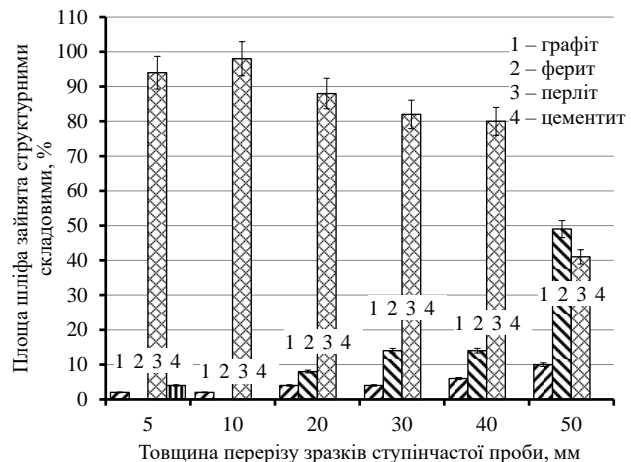


Рисунок 8 – Вміст структурних складових у перерізах зразків ступінчастої проби після ковшового графітізувального модифікування

За результатами внутрішньоформового графітізувального модифікування встановлено, що у всіх перерізах ступінчастої чавунної проби кристалізація відбувається за стабільною діаграмою з характерною темно-сірою макроструктурою зламу. Це пояснюється мінімальним часом витримування між проведеним модифікуванням чавуну та його кристалізацією в ливарній формі. При цьому в мікроструктурі зразків усіх перерізів ступінчастої проби відсутній структурно вільний цементит і спостерігаються вкраплення пластинчастого графіту у феритно-перлітній матриці. Крім того, збільшення товщини перерізу зразків ступінчастої проби від 5 до 50 мм призводить до зростання довжини пластинчастого графіту (рис. 9) та зменшення частки перліту в металевій матриці (рис. 10).

Твердість зразків ступінчастої проби із збільшенням товщини їх перерізу після ковшового графітізувального модифікування зменшується від 410 до 193 НВ (рис. 11, крива 1).

Після внутрішньоформового графітувального модифікування твердість зразків ступінчастої проби зменшується від 250 до 170 НВ із збільшенням товщини перерізу від 5 до 50 мм (рис. 11, крива 2).

Дослідженням сфероїдувального модифікування у відкритому ковші установлено, що макроструктура металу в зразках ступінчастої проби товщиною перерізу 5, 10 і 20 мм характерна для половинчастого чавуну, а в перерізах від 30 до 50 мм – світло-сірого кольору, що характерно для високоміцного чавуну з кулястим графітом. У мікроструктурі зразків ступінчастої проби з товщиною перерізу 5, 10 і 20 мм виявлено вкраплення дрібнодисперсного графіту кулястої форми та структурно вільного цементиту в перлітній металевій матриці. Подальше збільшення товщини перерізу зразків від 30 до 50 мм сприяє зникненню структурно вільного цементиту.

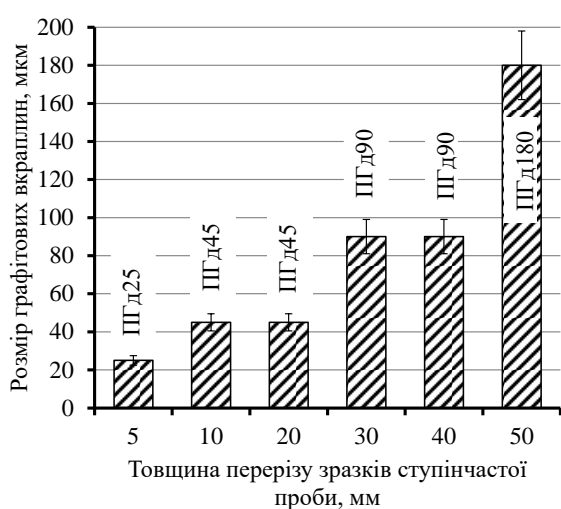


Рисунок 9 – Залежність розміру графітових вкраплін у мікроструктурі від товщини перерізу зразків ступінчастої проби після внутрішньоформового графітувального модифікування

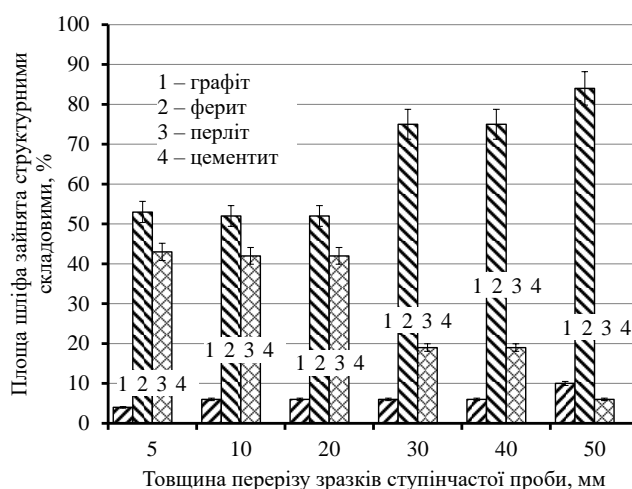


Рисунок 10 – Вміст структурних складових у перерізах зразків ступінчастої проби після внутрішньоформового графітувального модифікування

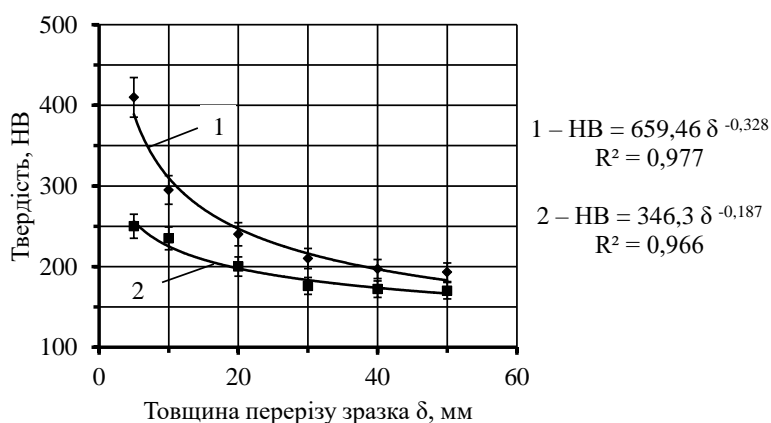


Рисунок 11 – Зміна твердості чавуну у перерізах ступінчастої проби після ковшового (1) та внутрішньоформового (2) графітувального модифікування

Із збільшенням товщини перерізу зразків від 5 до 50 мм збільшується й діаметр вкраплень кулястого графіту (рис. 12), а, починаючи з перерізу 30 мм, у мікроструктурі чавуну з'являється

феритна складова, кількість якої збільшується із зростанням товщини перерізу зразка (рис. 13).

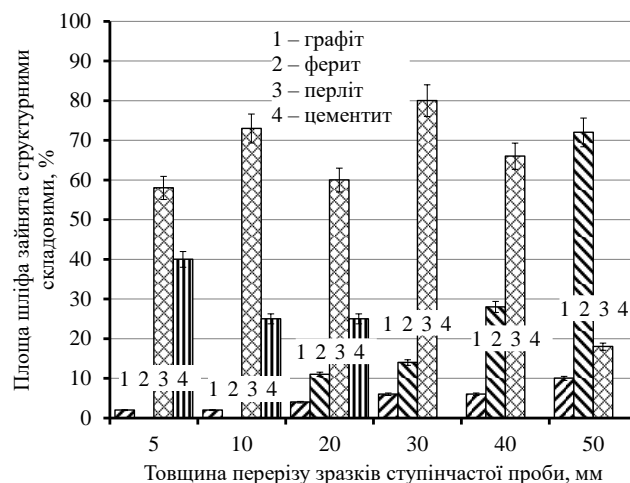
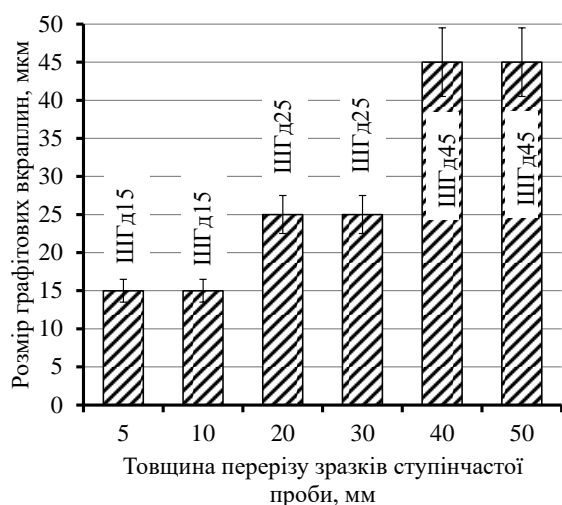


Рисунок 12 – Залежність діаметру графітових вкраплін у мікроструктурі від товщини перерізу зразків ступінчастої проби після ковшового сфероїдизувального модифікування

Рисунок 13 – Вміст структурних складових у перерізах зразків ступінчастої проби після ковшового сфероїдизувального модифікування

У результаті внутрішньоформового сфероїдизувального модифікування макроструктура всіх зразків має світло-сірий колір, що характерно для високоміцного чавуну з кулястим графітом. При цьому в мікроструктурах відсутній структурно вільний цементит.

Мікроструктура перерізу проби товщиною 5 мм складається з дрібнодисперсних вкраплень кулястого графіту в перлітно-феритній матриці. Із збільшенням товщини перерізу зразка від 5 до 50 мм збільшується й діаметр вкраплень кулястого графіту (рис. 14) та кількість феритної складової в металевій матриці (рис. 15).

Твердість металу в зразках із збільшенням товщини їх перерізу після ковшового сфероїдизувального модифікування зменшується від 450 до 230 НВ, що підтверджує наявність твердих вкраплень структурно вільного цементиту в перерізах товщиною 5, 10 і 20 мм (рис. 16, крива 1). Після внутрішньоформового сфероїдизувального модифікування твердість у перерізах проби зменшується від 300 до 210 НВ із збільшенням товщини перерізу від 5 до 50 мм (рис. 16, крива 2).

Таким чином доказано, що за однакового хімічного складу вихідних чавунів у литому стані спостерігаються суттєві відмінності в мікроструктурі, що й змінює механічні властивості металу в перерізах ступінчастих проб, особливо в перерізах 5, 10 і 20 мм.



Рисунок 14 – Залежність діаметру графітових вкраплин у мікроструктурі від товщини перерізу зразків ступінчастої проби після внутрішньо-формового сфероїдизувального модифікування

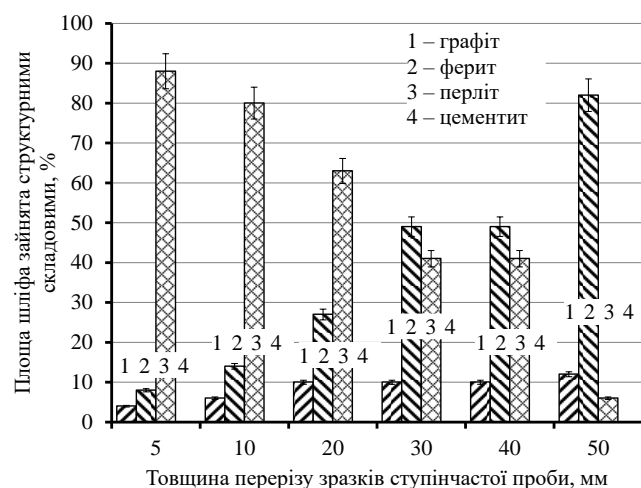


Рисунок 15 – Вміст структурних складових у перерізах зразків ступінчастої проби після внутрішньо-формового сфероїдизувального модифікування

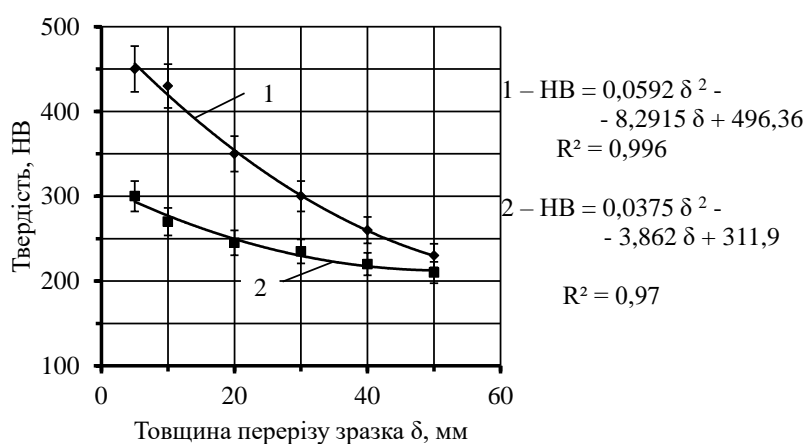


Рисунок 16 – Зміна твердості чавуну у перерізах ступінчастої проби після ковшового (1) та внутрішньо-формового (2) сфероїдизувального модифікування

Отже, дослідженнями установлено, що внутрішньо-формове модифікування чавуну забезпечує стабільну кристалізацію виливків без

вибілення в тонких перерізах на відміну від ковшового модифікування.

У четвертому розділі наведено результати моделювання та експериментальних досліджень формування структури у верхньому та нижньому шарах виливка.

Установлено, що за мінімального (2-3 с) інтервалу між заливаннями відсутнє розділення виливка на шари внаслідок гідродинамічного перемішування розплавів у порожнині ливарної форми. При цьому виливок кристалізується з однорідною структурою сірого чавуну із пластинчастим графітом (за використання графітізувального модифікатора), або чавуну з вермикулярним графітом (за використання сфероїдизувального модифікатора).

Для орієнтовного визначення часового інтервалу витримування між послідовними заливаннями розплаву використовували моделювання. Як об'єкти дослідження побудовані моделі довжиною і шириною  $100 \times 100$  мм. Висоту моделей варіювали в діапазоні від 5 до 50 мм з кроком в 5 мм, що моделює товщини стінок

чавунних виливків, які використовує промисловість. У центрі мас кожної моделі було встановлено датчик, який в режимі реального часу фіксував значення температури розплаву, який піддавали моделюванню. Для набору додаткових даних за часом кристалізації температури заливки розплаву для виконання комп'ютерного моделювання змінювали від 1300 °С до 1500 °С з кроком 50 °С (рис. 17).

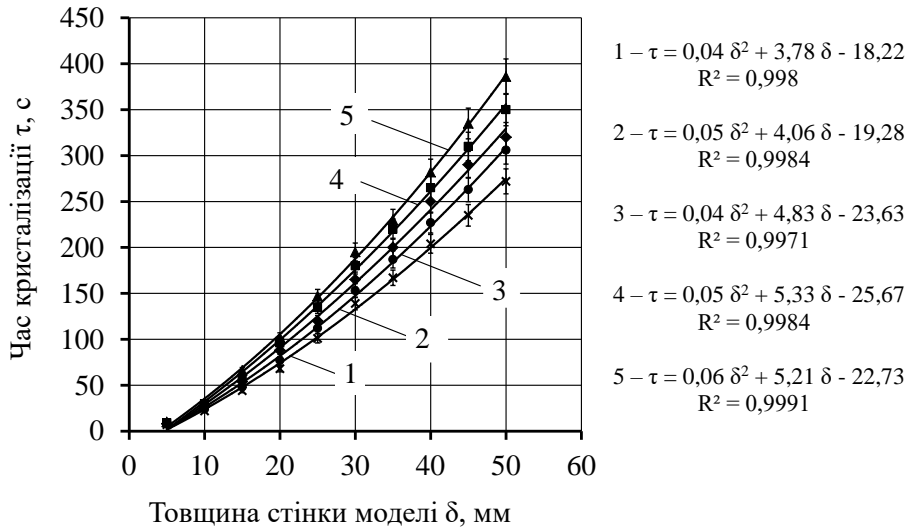


Рисунок 17 – Вплив товщини стінки моделі на час кристалізації при різних температурах заливання: 1 – 1300 °С; 2 – 1350 °С; 3 – 1400 °С; 4 – 1450 °С; 5 – 1500 °С

За отриманими результатами встановлено, що за температури заливання 1300 °С першого шару вилівка товщиною 25 мм час його

кристалізації становить близько 100 с, що дає право стверджувати: за такого витримування між заливаннями гарантовано не може відбуватися гідродинамічне перемішування чавунів у ливарній формі. Відсутність перемішування чавунів є важливою умовою виготовлення вилівка з диференційованими властивостями. Таким же чином можна визначити час кристалізації вилівків з товщинами стінок у досліджуваному діапазоні за вищих температур заливання. Для перевіряння отриманих результатів і виконання подальших експериментів встановлено тимчасові інтервали між етапами заливання 30, 60, 90 й 120 с.

Виконаними експериментами встановлено, що диференціація структури у вилівку й властивостей металу в ньому забезпечуються інтервалом між послідовними заливаннями біля 60 с і вище, що підтверджено механічними властивостями окремих шарів та їх структурними складовими (рис. 18, 19).

Витримування між етапами заливання понад 120 с призводить до того, що на поверхні залитої першої порції розплаву утворюється оксидна плівка, яка призводить до часткового роз-шарування вилівка площиною з'єднання шарів після вибивання з форми. Крім того, випромінювання тепла відкритою поверхнею розплаву сприяє втраті міцності формувальної суміші, розташованої над розплавом, її відшаруванню та осипанню на дзеркало, що призводить до утворення дефектів у вигляді піщаних раковин між шарами чавунів за такого інтервалу витримування.

З метою встановлення товщини перехідної зони досліджено вплив температури заливання форм від 1380 до 1460 °С і часу витримування між етапами заливання. Температурно-часовими параметрами процесу встановлено зміну товщини перехідного шару в двошарових вилівках (рис. 20). Так, із збільшенням часу витримування від 60 до 240 с товщина перехідної зони зменшується внаслідок охолодження першого шару залитого чавуну й зменшення глибини його



підплавлення другою порцією металу. Очевидно, що цього недоліку можна позбутися підвищенням температури цієї порції. Установлено, що з підвищенням температури металу другої порції від 1380 до 1460 °С за часу витримання між заливаннями 90 с товщина перехідного шару зростає від 0,2 до 0,4 мм.

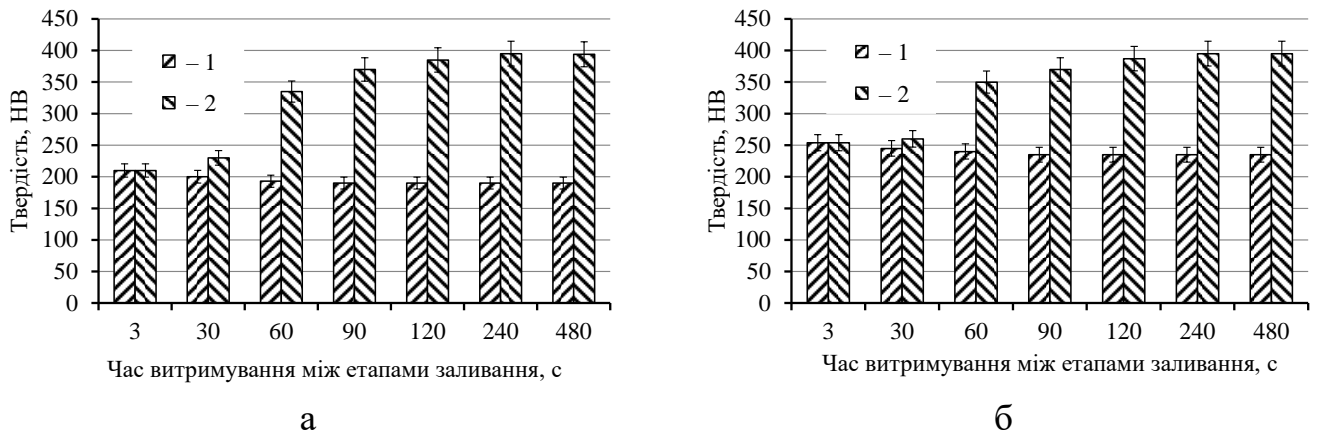


Рисунок 18 – Твердість поверхонь двошарових виливків з шарами сірий-білий (а) та високоміцний-білий (б): 1 – сірий або високоміцний чавун; 2 – білий чавун

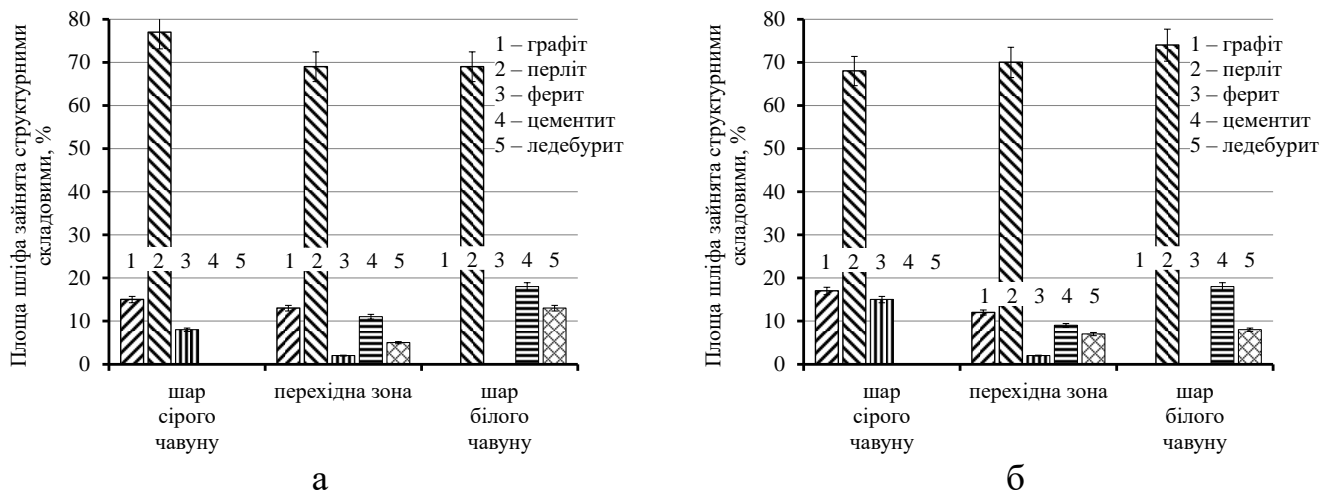


Рисунок 19 – Структурні складові чавуну в двошарових виливках з шарами сірий-білий (а) та високоміцний-білий (б)

Очевидно, що для одержання якісних виливків, які можуть працювати тривалий час в умовах інтенсивного зношування, необхідно використовувати такі параметри технологічного процесу: температура розплаву перед заливанням першого шару вилівка має знаходитися в межах від 1300 до 1350 °С, а перед доливанням другого шару – в межах від 1440 до 1460 °С за часу витримання між етапами заливання 60-120 с.

Для усунення недоліків попередньої технології та її спрощення розроблено новий спосіб виготовлення двошарових чавунних виливків, сутність якого полягає в заливанні розплаву в ливарну форму, де він піддається внутрішньоформовому обробленню перед заповненням порожнини форми. Для забезпечення диференціації структури шарів, у порожнину форми попередньо вставляється зовнішній



холодильник. Матеріалом холодильника обрано сірий чавун товщиною 10-50 мм з кроком 10 мм. Товщину вилівка змінювали в такому ж діапазоні.

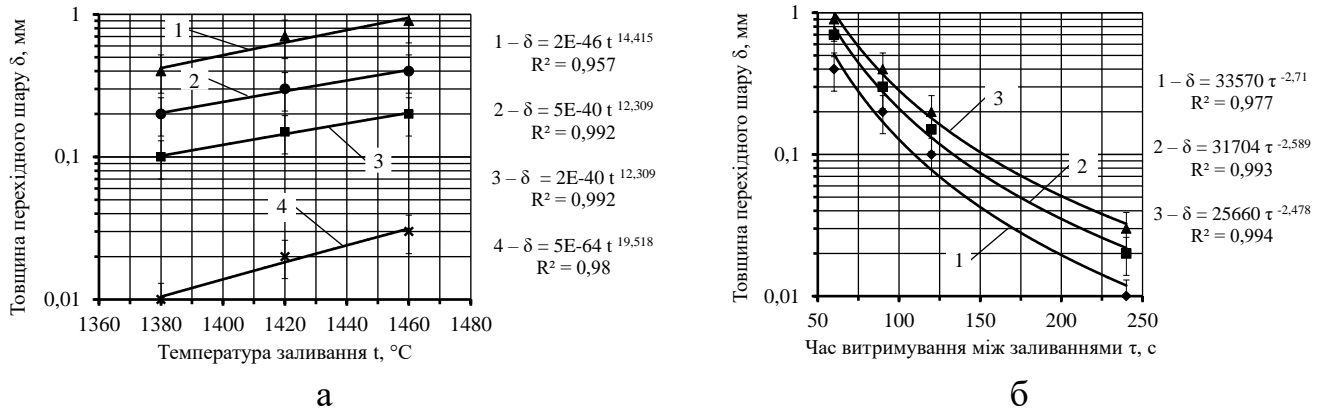


Рисунок 20 – Залежність товщини перехідного шару виливків від температури заливання (а): 1 – 60 с; 2 – 90 с; 3 – 120 с; 4 – 240 с та часу витримування між заливаннями (б): 1 – 1380 °С; 2 – 1420 °С; 3 – 1460 °С

За результатами моделювання визначено глибину, на яку виливок кристалізується з вибіленням за усіма варіантами, встановлено математичні залежності впливу товщини холодильника й вилівка на глибину вибілення (рис. 21) й побудовано номограми для прогнозування глибини вибілення у виливках (рис. 22), які дають змогу вибрати товщину зовнішнього холодильника для вилівка з визначеною товщиною стінок, що забезпечує формування зносостійкого робочого шару залежно від умов експлуатації литої деталі.

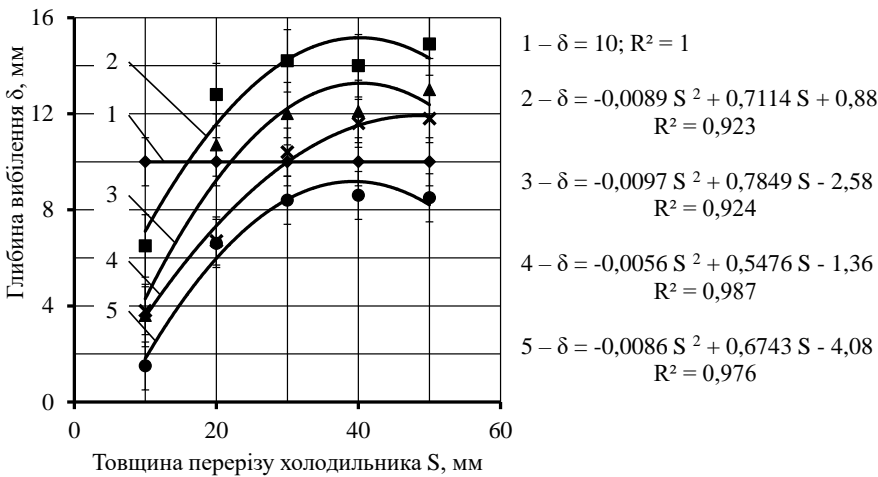


Рисунок 21 – Вплив товщини перерізу холодильника на глибину вибілення для виливків із різною товщиною: 1 – 10 мм; 2 – 20 мм; 3 – 30 мм; 4 – 40 мм; 5 – 50 мм

Аналізом результатів досліджень установлено, що після сфероїдизуваль-

ного модифікування вихідного чавуну переріз вилівка товщиною 10 мм кристалізується монолітними з наскрізним вибіленням із перлітно-цементитною мікроструктурою й дрібнодисперсними вкрапленнями графіту кулястої форми. У перерізах виливків товщиною від 20 до 50 мм відбувається диференціація структури та властивостей між протилежними їх поверхнями. При цьому шар вилівка з вибіленого чавуну з боку зовнішнього холодильника формується товщиною від 1,5 до 14,9 мм.

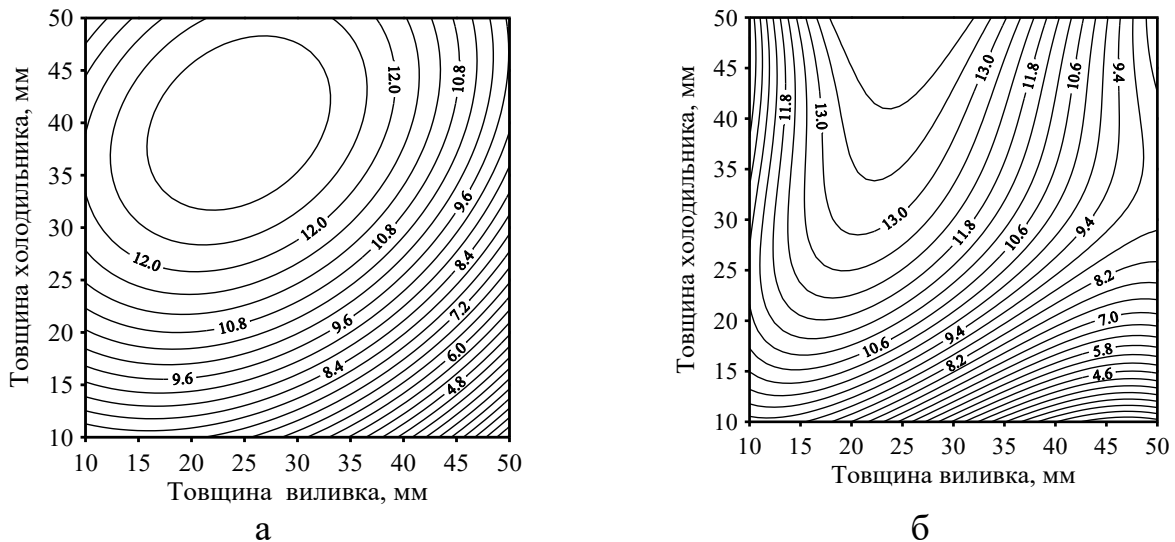


Рисунок 22 – Номограми для прогнозування глибини вибілення у двошарових чавунних виливках з шарами сірий-білий (а) та високоміцний-білий (б)

У таких же перерізах виливків з боку піщано-глинястої форми сплав на товщину 10-40 мм кристалізується з світло-сірим зламом, характерним для високоміцного чавуну з кулястим графітом.

Мікроструктура чавуну складається з перлітно-феритної металевої матриці з вкрапленнями графіту кулястої форми, без евтектичних карбідів заліза.

Твердість поверхонь виливків з модифікованого чавуну товщиною 10-50 мм в литому стані з боку холодильника знижується від 430 до 380 НВ внаслідок виокремлення графіту кулястої форми. З боку піщано-глинястої форми твердість поверхонь стінок з високоміцного чавуну знижується від 430 до 260 НВ внаслідок збільшення розміру графітових вкраплень та частки фериту у перлітній металевій матриці. Для виливків з поєднанням шарів білого та сірого чавуну твердість відповідних поверхонь знижується від 430 до 415 НВ, а з боку піщано-глинястої форми – від 430 до 245 НВ.

Отримані експериментальні дані на натурних виливках з використанням зовнішнього холодильника товщиною 30 мм і виливків товщинами 10, 20, 30, 40 і 50 мм співпадають з результатами комп'ютерного моделювання, що підтверджує перспективність використання у виробничих умовах розробленої технології.

Для підтвердження перспективності використання у виробничих умовах розроблених технологій досліджено зносостійкість робочих шарів виливків з різною структурою металу. Еталоном, числове значення відносної зносостійкості якого прийнято за 1, використано зразок із низьколегованого хромистого чавуну марки ЧХЗ за ГОСТ 7769-82. Вибір чавуну обумовлено його широким застосуванням для роботи деталей в екстремальних умовах зношування.

Аналізом результатів дослідження відносної зносостійкості робочого шару вибіленого чавуну двошарового виливка, виготовленого за технологією поетапного заливання ливарної форми встановлено, що його зносостійкість знаходиться на рівні зносостійкості еталонного зразка (рис. 23). Це можна пояснити утворенням схожої структури металевої матриці та карбідів однакового цементитного ( $Me_3C$ ) типу.

Утворення карбідів типу  $Me_3C$  за вмісту хрому в низьколегованих чавунах від 2 до 3% узгоджується із літературними даними.

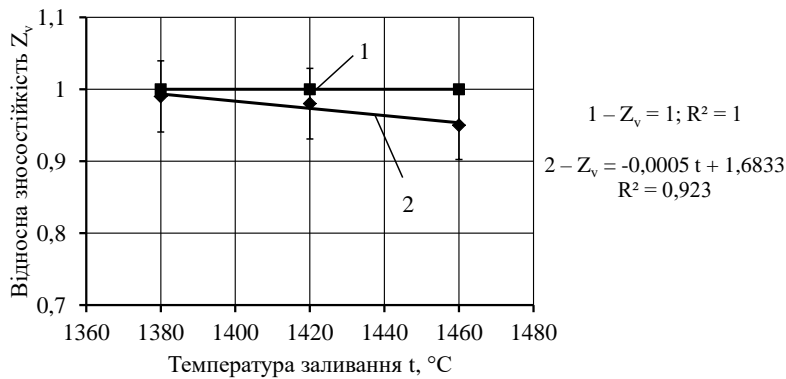


Рисунок 23 – Відносна зносостійкість робочого шару виливка, отриманого за технологічним варіантом із поетапним заливанням форми: 1 – еталон із хромистого чавуну; 2 – робочий шар із білого чавуну двошарового виливка

Підвищення температури заливання розплаву від 1380 до 1460 °C призводить до незначного зниження зносостійкості зразка, що, ймовірно, пояснюється сильнішим прогріванням частини робочого шару виливка до температур, достатніх для проходження незначної релаксації внутрішніх напружень.

Результатами визначення відносної зносостійкості зразків із виливків, виготовлених за технологічним варіантом виготовлення із заливанням на зовнішній чавунний холодильник, встановлено прямо пропорційну залежність від товщини холодильника та обернено пропорційну – від товщини стінки виливка в досліджених діапазонах (рис. 24).

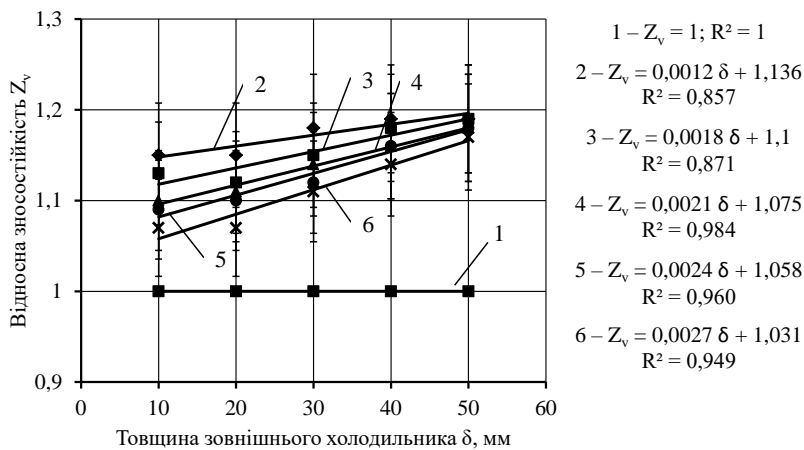


Рисунок 24 – Відносна зносостійкість робочого шару із білого чавуну виливків різної товщини, виготовлених за технологічним варіантом заливання на зовнішній чавунний холодильник: 1 – еталон із хромистого чавуну; 2 – виливок товщиною 10 мм; 3 – виливок товщиною 20 мм; 4 – виливок товщиною

30 мм; 5 – виливок товщиною 40 мм; 6 – виливок товщиною 50 мм

Підвищена на 10-20% зносостійкість зразків у порівнянні з еталоном пояснюється орієнтацією карбідних вкраплень у металевій матриці в напрямку, перпендикулярному до фронту кристалізації. Така просторова орієнтація структурних складових чавуну властива для виливків, кристалізація яких відбувається із підвищеною швидкістю охолодження, що в цьому разі забезпечується застосуванням зовнішнього чавунного холодильника.

## ВИСНОВКИ

1. За результатами дослідження впливу вуглецю та кремнію на структуроутворення в чавунних виливках з різною товщиною їх перерізів для подальших досліджень визначено такі чавуни: схильний до кристалізації за метастабільною діаграмою хімічного складу, мас. %: C = 2,8-3,0; Si = 0,45-0,50; Mn = 0,4-0,6; P – до 0,12; S – до 0,02; решта залізо з вуглецевим еквівалентом  $C_e = 2,94-3,15$  % й схильний до кристалізації за стабільною діаграмою хімічного складу, мас. %: C = 3,4-3,6; Si = 2,2-2,4; Mn = 0,4-0,6; P – до 0,12; S – до 0,02; решта залізо з вуглецевим еквівалентом  $C_e = 4,13-4,4$ %. Установлено, що для внутрішньоформового графітувального модифікування необхідно використовувати феросиліцій ФС75 розміром фракцій 1-5 мм у кількості 2 % від маси розплаву, який піддають обробленню, а для сфероїдизувального – феросилікомагнієвий модифікатор ФСМг7 тих же фракцій і кількості.

2. Установлено, що застосування внутрішньоформового модифікування для отримання вибіленого та графітузованого чавунів на відміну від ковшового запезпечує формування необхідних структур у чавунних виливках, сприяє стабільній кристалізації металу в тонких перерізах вилівка без вибілення на відміну від ковшового модифікування. Доказано, що за однакового хімічного складу вихідних чавунів у литому стані мають місце суттєві відмінності в мікроструктурі, що змінює механічні властивості металу в перерізах ступінчастих проб, особливо в перерізах товщиною 5, 10 і 20 мм.

3. За результатами моделювання встановлено час кристалізації чавунних виливків різного хімічного складу та товщини й визначено основні технологічні параметри процесу виробництва шаруватих литих деталей поетапним заливанням ливарної форми: температура заливання першого шару має бути в межах від 1300 до 1350 °C; температура доливання другого шару – від 1440 до 1460 °C; час витримування між етапами заливання – від 60 до 120 с.

4. Визначено закономірності формування мікроструктури в перехідній зоні двошарових чавунних виливків, виготовлених способом послідовного заливання через незалежні ливникові системи. Установлено, що в мікроструктурі перехідної зони можливе формування половинчастого чавуну, мікроструктуру якого складають вкраплення пластинчастого графіту та цементиту в перлітній металевій матриці для вилівка з поєднанням шарів білого та сірого чавунів, а для вилівка з поєднанням шарів білого та високоміцного чавунів – вкраплення кулястого та вермикулярного графіту й цементиту в перлітній металевій матриці.

5. Вперше встановлено залежності між температурами заливання розплаву та часом витримування між заливанням і розмірами перехідних шарів у двошарових чавунних виливках товщиною до 50 мм. Показано, що при зменшенні температури заливання розплаву від 1460 до 1380 °C та збільшенні часу витримування між заливанням від 3 до 480 с товщина перехідного шару у виливках, які виготовлено послідовним заливанням через незалежні ливникові системи вихідного розплаву чавуну та його внутрішньоформового модифікування, зменшується з 1,0 до 0,01 мм.

6. Моделюванням процесів заливання розплавів у форму та їх кристалізації з використанням зовнішнього чавунного холодильника встановлено температурно-

часові параметри технологічного процесу виготовлення чавунних виливків з диференційованими властивостями, що дало змогу побудувати номограми для прогнозування глибини вибілення у виливках залежно від товщини стінок виливка та холодильника. Результати моделювання перевірено на реальних технологіях виготовлення двошарових виливків і встановлено, що твердість поверхонь виливків товщиною 10-50 мм у литому стані з боку чавунного холодильника знижується від 450 до 380 НВ через виокремлення вкраплень графіту кулястої форми, а з боку піщано-глинястої форми – від 450 до 260 НВ через збільшення розміру графітових вкраплень і частки фериту в перлітній металевій матриці.

7. Вперше одержано залежності впливу товщини зовнішнього чавунного холодильника та товщини виливка на глибину вибіленого шару в двошарових чавунних виливках масою до 10 кг. Установлено, що мінімальна глибина вибілення 1,5 мм забезпечується під час застосування холодильника товщиною 10 мм у виливку товщиною 50 мм, а максимальна – 14,9 мм із холодильником товщиною 50 мм у виливку товщиною 20 мм. Побудовано номограми для прогнозування глибини вибілення робочого шару чавунного виливка за рахунок підбору відповідних геометричних параметрів зовнішнього чавунного холодильника та виливка.

8. Установлено, що зносостійкість робочого шару вибіленого чавуну двошарового виливка, виготовленого за технологією поетапного заливання ливарної форми знаходиться на рівні зносостійкості еталонного зразка, виготовленого із зносостійкого чавуну ЧХЗ, а зносостійкість робочого шару зразків, виготовлених за технологічним варіантом використання зовнішнього чавунного холодильника, на 10-20 % вища в порівнянні з еталонним зразком й знаходиться в прямо пропорційній залежності від товщини холодильника та обернено пропорційній – від товщини стінки виливка.

9. Розроблено та успішно апробовано технології виготовлення двошарових чавунних виливків в умовах ливарної лабораторії промислового типу та на підприємствах України.

### **СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ:**

1. Фесенко М. А. 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.10-15.

*Лук'яненко І. В. – систематизував отримані дані та приймав участь в обробленні результатів.*

2. Kosiachkov V. O. The Time Factor in the Spheroidizing and Graphitizing Modification and Cast Iron Crystallization / V. O. Kosiachkov, M. A. Fesenko, E. V. Fesenko, I. V. Lukianenko // *Materials Science. Non-equilibrium Phase Transformations*. – 2016. – № 2. – С. 25-29.

*Лук'яненко І. В. – систематизував отримані дані та приймав участь у обговоренні результатів та написанні статті.*

3. Фесенко М. А. Влияние способа модифицирования на структуру и свойства высокопрочного чугуна с шаровидным графитом в литом состоянии / М. А. Фесенко, Е. В. Фесенко, В. А. Косячков, И. В. Лукьяненко // *Вестник*

Донбасской государственной машиностроительной академии. – 2016. – № 1 (37). – С. 96-101.

*Лук'яненко І. В. – приймав участь у обробці експериментальних даних, підготував статтю до друку.*

4. Лукьяненко И. В. Особенности технологического процесса изготовления двухслойных чугуновых отливок с дифференцированными свойствами / И. В. Лукьяненко // Процеси лиття. – 2019. – № 2 (134). – С. 15-20.

5. Лукьяненко И. В. Исследование процессов дифференциации структуры чугуновых отливок методом компьютерного моделирования / И. В. Лукьяненко // Металл и литье Украины. – 2019. – № 1-2. – С. 41-46.

6. Лукьяненко И. В. Исследование технологических параметров процесса получения чугуновых отливок для работы в условиях износа / И. В. Лукьяненко // Металл и литье Украины. – 2019. – № 3-4. – С. 34-40.

7. Патент № 126086 U2017 11757, B22D27/00. Спосіб виготовлення багатшарових литих деталей / Фесенко М. А., Лук'яненко І. В., Погребняк І. О. – Заявл. 01.12.2017; опубл. 11.06.2018, Бюл. № 11, 2018.

8. Косячков В. О., Лук'яненко І. В. Фактори часу в процесі сфероїдизувального та графітизувального модифікування і кристалізації чавуну / Литве. Металлургия. 2014 : матеріали Х Міжнародної науково-практичної конференції (20-23 мая 2014 года). – Запоріжжє : ЗТПП, 2014. – С. 137-138.

9. Косячков В. О., Михалевич Д. О., Лук'яненко І. В. Вплив кремнію та модифікування магнієм на структуроутворення чавуну під час кристалізації / Нові матеріали і технології в машинобудуванні : матеріали VI Міжнародної науково-технічної конференції (20-21 травня 2014 року). – Київ : НТУУ „КПІ”, 2014. – С. 66-67.

10. Фесенко М. А., Косячков В. О., Фесенко А. М., Михалевич Д. О., Лук'яненко І. В. Метод виготовлення двошарових чавунних виливків / Нові матеріали і технології в машинобудуванні : матеріали VII Міжнародної науково-технічної конференції (21-22 травня 2015 року). – Київ : НТУУ „КПІ”, 2015. – С. 142.

11. Фесенко Е. В., Лукьяненко И. В., Фесенко М. А., Ямшинский М. М. Способ изготовления чугуновых отливок с дифференцированной структурой и свойствами / Неметалеві вкраплення і гази у ливарних сплавах : матеріали XIV Міжнародної науково-технічної конференції (6-9 жовтня 2015 року). – Запоріжжя : ЗНТУ, 2015. – С. 99-101.

12. Фесенко М. А., Фесенко А. М., Фесенко К. В., Лук'яненко І. В. Дослідження процесу отримання двошарових виливків методом фізичного моделювання / Спеціальна металургия: вчора, сьогодні, завтра : матеріали XIV Всеукраїнської науково-практичної конференції (19 квітня 2016 року). – Київ : НТУУ «КПІ», 2016. – С. 955-962.

13. Фесенко М. А., Косячков В. А., Фесенко А. Н., Фесенко Е. В., Лукьяненко И. В. Способ получения износостойких двухслойных чугуновых литых деталей / Литве. Металлургия. 2016 : материалы XII Международной научно-практической конференции (24-26 мая 2016 года). – Запоріжжє : ЗТПП, 2016. – С. 221-222.

14. Фесенко М. А., Цыгановский К. В., Фесенко Е. В., Лукьяненко И. В. Новый способ изготовления двухслойных чугуновых отливок для работы в условиях ударно-абразивного износа / Нові матеріали і технології в машинобудуванні : матеріали VIII Міжнародної науково-технічної конференції (30-31 травня 2016 року). – Київ : НТУУ „КПІ”, 2016. – С. 142-143.

15. Фесенко М. А., Фесенко А. М., Фесенко К. В., Лук'яненко І. В. Способи отримання литих шаруватих деталей / Матеріали для роботи в екстремальних умовах – 6 : матеріали VI Міжнародної наукової конференції (01-02 грудня 2016 року). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2016. – С. 326-328.

16. Фесенко М. А., Фесенко Е. В., Лукьяненко И. В. Технология получения чугуновых отливок с твердой износостойкой поверхностью и вязкой ударостойкой частью из одного расплава / Уральская школа молодых металлургов : сборник материалов XVII Международной научно-технической Уральской школы-семинара металлургов – молодых ученых (5-9 декабря 2016 года). – Екатеринбург : Уральский федеральный университет, 2016. – С. 323-326.

17. Фесенко М. А., Лук'яненко І. В. Комп'ютерне моделювання способу виробництва двошарових литих деталей / Нові матеріали і технології в машинобудуванні : матеріали IX Міжнародної науково-технічної конференції (30-31 травня 2017 року). – Київ : НТУУ „КПІ”, 2017. – С. 186-187.

18. Фесенко М. А., Лук'яненко І. В. Розроблення технології отримання чавунних виливків з робочою зносостійкою та в'язкою монтажними частинами / Перспективні технології, матеріали і обладнання у ливарному виробництві : матеріали VI Міжнародної науково-технічної конференції (25-28 вересня 2017 року). – Краматорськ : ДДМА, 2017. – С. 78-80.

19. Фесенко М. А., Лук'яненко І. В. Спосіб виготовлення чавунних деталей з диференційованою структурою та властивостями / Прикладні науково-технічні дослідження : матеріали II Міжнародної науково-практичної конференції (03-05 квітня 2018 року). – Івано-Франківськ : Прикарпатський національний університет ім. В. Стефаника, 2018. – С. 146.

20. Фесенко М. А., Лук'яненко І. В., Кошіль А. В. Комп'ютерне моделювання процесу виготовлення двошарових чавунних виливків з одного вихідного розплаву / Нові матеріали і технології в машинобудуванні : матеріали X Міжнародної науково-технічної конференції (24-25 квітня 2018 року). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018. – С. 107-108.

21. Фесенко М. А., Лук'яненко І. В. Розроблення режимів лиття процесу виготовлення двошарових чавунних виливків із одного базового розплаву / Нові матеріали і технології в машинобудуванні : матеріали X Міжнародної науково-технічної конференції (30-31 травня 2019 року). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. – С. 109-110.

## АНОТАЦІЯ

Лук'яненко І. В. Особливості виробництва двошарових виливків із модифікованих у ливарній формі чавунів. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.16.04 – ливарне виробництво. – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» МОН України, Київ, 2020.

У дисертаційній роботі вирішено актуальну науково-прикладну проблему – розроблено наукові засади та технології виготовлення двошарових чавунних виливків для роботи в екстремальних умовах з застосуванням внутрішньоформового модифікування одного розплаву замість трудомісткої традиційної технології виробництва таких же виливків з використанням двох розплавів різного хімічного складу, виплавлених в окремих плавильних агрегатах.

За результатами вивчення впливу вуглецю та кремнію на процеси структуроутворення в чавунних виливках з різною товщиною їх перерізів для подальших досліджень визначено хімічний склад чавунів, які схильні до кристалізації за метастабільною та стабільною діаграмою. Встановлено технологічні параметри виготовлення двошарових чавунних виливків за технологією поетапного заливання та із використанням зовнішнього чавунного холодильника.

Розроблено та успішно апробовано технології виготовлення двошарових чавунних виливків в умовах ливарної лабораторії промислового типу та на підприємствах України.

**Ключові слова:** абразивне зношування, білий чавун, внутрішньоформове модифікування, високоміцний чавун, двошаровий чавунний виливок, диференційовані властивості, перехідна зона, реакційна камера, сірий чавун, твердість.

## АННОТАЦИЯ

Лукьяненко И. В. Особенности производства двухслойных отливок из модифицированных в литейной форме чугунов. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.16.04 – литейное производство. – Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского» МОН Украины, Киев, 2020.

В диссертационной работе решена актуальная научно-прикладную проблему - разработаны научные основы и технологии изготовления двухслойных чугунных отливок для работы в экстремальных условиях с применением внутрiformенного модифицирования одного расплава вместо трудоемкой традиционной технологии производства таких же отливок с использованием двух расплавов различного химического состава, выплавленной в отдельных плавильных агрегатах.

По результатам изучения влияния углерода и кремния на процессы структурообразования в чугунных отливках с разной толщиной их сечений для дальнейших исследований определены химические составы чугунов, склонных к кристаллизации по метастабильной и стабильной диаграмме. Установлены технологические параметры изготовления двухслойных чугунных отливок по



технологии поэтапной заливки и с использованием внешнего чугунного холодильника.

Разработаны и успешно апробированы технологии изготовления двухслойных чугунных отливок в условиях литейной лаборатории промышленного типа и на предприятиях Украины.

**Ключевые слова:** абразивный износ, белый чугун, внутриформенное модифицирование, высокопрочный чугун, двухслойный чугунный отливка, дифференцированные свойства, переходная зона, реакционная камера, серый чугун, твердость.

### ABSTRACT

Lukianenko I. V. Specifics of production of two-layer castings made of in-mold modified cast irons. – The manuscript.

The thesis for Candidate of Technical Sciences degree by speciality 05.16.04 – foundry. – National technical university of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Ministry of Education and Science of Ukraine, Kyiv, 2020.

In the dissertation work the actual scientific and applied problem is solved – scientific bases and technologies of manufacturing of two-layer cast iron castings for work in extreme conditions with application of in-mold modification of one melt instead of labor-consuming traditional technology of production of the same castings with use of two melts of different chemical composition are developed.

According to the results of studying the influence of carbon and silicon on the processes of structure formation in cast iron castings with different thickness of their sections for further research, the following cast irons were determined: prone to crystallization according to the metastable diagram of chemical composition, wt. %: C = 2.8-3.0; Si = 0.45-0.50; Mn = 0.4-0.6; P - up to 0.12; S - up to 0.02; the remaining iron with a carbon equivalent of  $C_e = 2.94-3.15\%$  and is prone to crystallization according to a stable diagram of the chemical composition, wt. %: C = 3.4-3.6; Si = 2.2-2.4; Mn = 0.4-0.6; P - up to 0.12; S - up to 0.02; the remaining iron with a carbon equivalent of  $C_e = 4.13-4.4\%$ .

The use of the in-mold modification to obtain a chilled and graphitized cast iron in contrast to the ladle provides for the formation of the necessary structures in iron casting, contributes to stable crystallization of metal in a thin section castings without chilling unlike ladle modification. It is proved that due to the same chemical composition of the initial cast iron, there are significant differences in the microstructure, which changes the mechanical properties of the metal in the sections of step samples, especially in sections with a thickness of 5, 10 and 20 mm.

According to the simulation results, the crystallization time of cast iron castings of different chemical composition and thickness was determined and the main technological parameters of the process of production of layered cast parts were determined by gradual pouring of the mold: pouring temperature of the first layer from 1300 to 1350 °C; the topping temperature of the second layer from 1440 to 1460 °C; holding time between stages of pouring from 60 to 120 s.

The temperature-time parameters of the technological process of manufacturing cast iron castings with differentiated properties were established by modeling the processes of

pouring melts into molds and their crystallization using an external cast iron chiller, which allowed to build nomograms to predict the depth of chilling in castings depending on thickness. The simulation results were tested on real technologies of manufacturing two-layer castings and it was found that the hardness of cast surfaces 10-50 mm thick in the cast state from the cast iron chiller decreases from 450 to 380 HB due to the separation of spherical graphite, and from the sandy-clay form - from 450 to 260 HB due to the increase in the size of graphite inclusions and the proportion of ferrite in the pearlitic metal matrix.

The regularities of microstructure formation in the transition zone of two-layer cast iron castings made by the method of sequential pouring through independent casting systems are determined. It is established that the microstructure of the transition zone can vary from half-cast iron with patches of lamellar graphite and cementite in the pearlitic metal matrix for casting with a combination of layers of white and gray cast iron to cast iron with patches of spherical and vermicular graphite and cementite in the pearlite white and high-strength cast iron.

The dependences of the influence of the thickness of the external cast iron chiller and the thickness of the casting on the depth of the bleached layer in two-layer cast iron castings weighing up to 10 kg were obtained. It is established that with increasing the thickness of the chiller and the thickness of the casting to 50 mm, the depth of bleaching varies from 1.5 to 14.9 mm.

It is established that the wear resistance of the working layer of bleached cast iron two-layer casting, made by the technology of gradual pouring of the mold using in-mold modification, is at the level of wear resistance of the reference sample of wear-resistant cast iron from «ЧХ3» grade, and wear resistance it is 10-20% higher in comparison with the reference sample and is directly proportional to the thickness of the chiller and inversely proportional to the wall thickness of the casting.

Technologies for the production of two-layer cast iron castings in the conditions of the industrial-type foundry laboratory and at the enterprises of Ukraine have been developed and successfully tested.

**Key words:** abrasive wear, white cast iron, in-mold modification, ductile cast iron, two-layer cast iron casting, differentiated properties, transition zone, reaction chamber, gray cast iron, hardness.