

**НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
ФІЗИКО-ТЕХНОЛОГІЧНИЙ ІНСТИТУТ МЕТАЛІВ ТА СПЛАВІВ**

НЕБОЖАК Іван Анатолійович

УДК 621.74.045.072.2:669.13:669.715

**ІНОКУЛЮВАННЯ ЛИВАРНИХ СПЛАВІВ З ВИКОРИСТАННЯМ
ДИСПЕРСНО-НАПОВНЕНОЇ МОДЕЛІ, ЩО ГАЗИФІКУЄТЬСЯ**

Спеціальність: 05.16.04 – Ливарне виробництво

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня

кандидата технічних наук

Київ-2024

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана у Фізико-технологічному інституті металів та сплавів Національної академії наук України, м. Київ.

Науковий керівник:

доктор технічних наук, професор
Шинський Олег Йосипович
Фізико-технологічний інститут металів та сплавів НАН України, завідувач відділу фізико-хімії ливарних процесів

Офіційні опоненти:

доктор технічних наук, доцент
Іванов Валерій Григорович
Національний університет «Запорізька політехніка» МОН України, м. Запоріжжя
завідувач кафедри машин й технології ливарного виробництва

кандидат технічних наук
Лук'яненко Іван Віталійович
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» МОН України, м. Київ
доцент кафедри ливарного виробництва

Захист відбудеться «19» вересня 2024 року об 11 годині 00 хвилин на засіданні Спеціалізованої вченої ради Д 26.232.01 із захисту дисертацій Фізико-технологічного інституту металів та сплавів НАН України за адресою: Україна, 03142, м. Київ, б-р Академіка Вернадського, 34/1.

З дисертацією можна ознайомитися у науково-технічній бібліотеці Фізико-технологічного інституту металів та сплавів НАН України за адресою: Україна, 03142, м. Київ, б-р Академіка Вернадського, 34/1.

Автореферат розісланий «11» серпня 2024 року.

Вчений секретар Спеціалізованої вченої ради Д 26.232.01,
кандидат технічних наук



(підпис)

Ж.В. Пархомчук

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. У багатьох галузях народного господарства для реалізації сучасних технологічних процесів часто потрібні вироби із металу, фізико-механічні й спеціальні властивості яких були б неоднорідними по поверхні чи об'єму. Це зумовлено, перш за все, умовами експлуатації деталі, її собівартістю та деякими іншими чинниками. Такому комплексу різноманітних, а іноді й полярно протилежних вимог, відповідають лише вироби із диференційованими та спеціальними властивостями (ВДСВ), оскільки одночасно усі ці властивості не може мати жодна монолітна деталь. Проте, виготовлення ВДСВ традиційними методами (механічним з'єднанням, зварюванням, спаюванням, наплавленням, напиленням, термічною й хіміко-термічною обробками, тощо) – у цілому процес тривалий та неекономічний.

Виробництво ВДСВ литтям дозволяє уникнути вказаних недоліків. Найперспективнішим методом виготовлення ВДСВ є ЛГМ-процес, оскільки головна особливість його – застосування моделі, що газифікується (ГМ), яка не виймається перед заповненням ливарної форми (ЛФ) металом, визначає основні переваги цього технологічного процесу у порівнянні з іншими способами лиття. Крім того, ГМ можна отримувати у порожнині прес-форми із гранульованого модельного матеріалу (у більшості випадків – пінополістиролу). Ці обставини дозволили вводити до складу ГМ дисперсні присадки, і тим самим вирішити двоєдину задачу – здійснювати інокулювання матричного розплаву у «порожнині» ЛФ та проводити утилізацію пиловидних відходів феросплавної галузі. Імпантування інокуляторів у «тіло» ГМ на практиці зводиться до холодного плакування поверхні гранул модельного матеріалу дисперсними феросплавами перед їх задуванням або засипанням до порожнини прес-форми.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами, грантами. Дисертація виконана відповідно до плану проведення науково-дослідних робіт у ФТІМС НАН України, а саме: № 1.6.5.480 «Розробка методів оптимізації і керування процесами структуроутворення і якістю виливків на базі методів імплантації модифікуючих, легуючих та армуючих компонентів у формі з газифікованою піномоделлю», 2001...2004 р.р. (№ ДР 0205U004497); № III-4-02.501 «Створення теоретичних основ і технологічних методів підвищення об'ємних і поверхневих властивостей литих виробів з чорних і кольорових сплавів», 2002...2006 р.р. (№ ДР 0207U006017); № III-17.04.536 «Розробка теоретичних і технологічних основ одержання виливків з керованою структурою і властивостями у ливарних формах з диференційованими теплофізичними характеристиками», 2004...2008 р.р. (№ ДР 0209U008369); № III-32-07.568 «Теоретичні і технологічні основи одержання одно- і багатошарових литих армованих конструкцій біологічного захисту з корозійностійких, високоміцних, легованих чавунів і сталей для атомних електростанцій, перевезення і захоронення радіоактивних відходів з використанням радіоактивного металу зони відчуження Чорнобильської АЕС», 2007...2009 р.р. (№ ДР 0212U005040); № III-19-18-683 «Наукові та технологічні засади створення високопродуктивних ливарних процесів одержання литих конструкцій із залізвуглецевих і кольорових сплавів та розробка концепції ливарних роторно-конвеєрних комплексів», 2018...2020 р.р. (№ ДР 0118U003787).

Мета і завдання досліджень. Метою цієї дисертаційної роботи є інокулювання ливарних сплавів (сталі, чавунів, *Si*-латуні й *Al*-сплавів) з використанням дисперсно-

наповненої газмоделі (ДНГМ) та отримання ВДСВ [литих армованих конструкцій, литих композиційних матеріалів (ЛКМ)] на їх основі. Для досягнення поставленої мети потрібно вирішити низку науково-технічних і практичних задач, які б дозволили удосконалити основи теорії ЛГМ-процесу з поправкою на ДНГМ, а також відпрацювати прогресивну технологію промислового інокулювання матричного розплаву у «порожнині» ЛФ при виробництві реальних виливків із сталей і сплавів, а саме:

1. Провести аналіз літературних даних за темою дисертації, розкрити стан питання на сьогоднішній день та вибрати основні напрями досліджень.
2. Розробити комплексну методикау дослідження впливу гідро-, газодинаміки й технологічних параметрів ЛГМ-процесу на показники засвоєння дисперсного інокулятора (ДІ) рідким металом, структуру та властивості литих зразків.
3. З'ясувати вплив гідро-, газодинаміки ЛГМ-процесу на показники засвоєння *Si* матричним розплавом, а також визначити параметри мікроструктури і твердість сірого чавуну марки СЧ300 в контрольній площині піддослідних виливків.
4. Довести залежність коефіцієнта засвоєння *Si* рідким металом від його концентрації у сірому чавуні марки СЧ300 після процесу графітуючого модифікування та вмісту дисперсного феросиліцію марки ФС75 у «тілі» ГМ.
5. Обґрунтувати вплив показників засвоєння *Si* матричним розплавом на параметри мікроструктури сірого чавуну марки СЧ300.
6. Виявити залежність твердості чавунних виливків від показників засвоєння *Si* рідким металом і параметрів мікроструктури сірого чавуну марки СЧ300.
7. З використанням регресійного аналізу результатів повнофакторного експерименту з'ясувати вплив технологічних параметрів ЛГМ-процесу на показники засвоєння *Si* матричним розплавом, параметри мікроструктури сірого чавуну марки СЧ300 та його твердість, визначену за шкалою Брінелля.
8. Шляхом сфероїдируючого модифікування структури чавуну, а також інокулювання рідкого металу дисперсним ферохромом марки ФХ650А, порошками *Si* та феросиліцію марок ПМС-К та ФС75, відповідно, дисперсними феротитаном марки ФТи70С1 й ферованадієм марки ФВд40У0,75 одержати зразки високоміцного чавуну марки ВЧ500-7, а також жаростійкого *Cr*-чавуну марки ЧХ1, сірого чавуну марок СЧ200 та СЧ250, й зносостійкої складнолегованої сталі марки 75ХФТЛ, відповідно.
9. Із застосуванням ДНГМ та діафрагми з цинкованої бляхи із конструкційної вуглецевої сталі марки Ст3, вклеєної між ними, отримати дослідно-експериментальний взірець двомірного ЛКМ системи СЧ300-Ст3-ЧХ3 та вивчити макро-, мікроструктуру й твердість його функціональних шарів.
10. Шляхом армування ливарних *Al*-сплавів марок АК12М2МгН та АК12 у «порожнині» ЛФ за ЛГМ-процесом одержати зразки нульмірного ЛКМ системи *Al-FeCr*, а потім дослідити їх мікроструктуру, механічні й триботехнічні характеристики.
11. З використанням ГМ, наповненої дисперсною σ -фазою, отримати взірці нульмірного ЛКМ системи *Cu-FeCr* та довести ефективність армування ливарної *Si*-латуні марки ЛЦ16К4 у «порожнині» ЛФ за ЛГМ-процесом.
12. Провести математичну обробку експериментальних даних та вивести емпіричні рівняння, які б аналітично описували ті чи інші функціональні залежності, інтерпретовані у графічній формі, а також розкрити механізм процесу інокулювання ливарних сплавів з використанням ДНГМ.

13. Задатись хімічним складом ливарних сталей і сплавів у вихідному стані та визначитись з технологією процесу їх приготування.

14. Розрахувати економічну ефективність процесу інокулювання розплавів сталі, чавуну і кольорових металів у «порожнині» ЛФ за ЛГМ-процесом.

15. Відлити дослідно-експериментальну партію заготовок реальних деталей для виробничих випробувань та подальшого їх впровадження у виробництво.

Об'єкт дослідження. Процеси інокулювання *Fe-C*-сплавів і сплавів кольорових *Me* з використанням ДНГМ, а саме: графітізуюче та сфероїдизуюче модифікування структури чавунів феросиліцієм марки ФС75 та комплексним сфероїдизуючим модифікатором марки ФСМг7, відповідно; легування сталі й чавунів феротитаном марки ФТи70С1, ферованадієм марки ФВд40У0,75 й ферохромом марки ФХ650А, *Cu*-порошком марки ПМС-К, відповідно; армування ливарної *Si*-латуні та ливарних *Al*-сплавів інтерметалідом *FeCr*.

Предмет дослідження. Закономірності засвоєння ДІ матричним розплавом, структура, механічні й триботехнічні властивості сірих чавунів марок СЧ200, СЧ250, СЧ300; *Cr*-чавунів зі спеціальними властивостями марок ЧХ1, ЧХ3; високоміцного чавуну марки ВЧ500-7; зносостійких низьколегованих сталей марок 70ХЛ, 75ХФТЛ; двомірного ЛКМ системи *СЧ300-См3-ЧХ3*, нульмірних ЛКМ систем *Al-FeCr* та *Cu-FeCr*, отриманих за допомогою ДНГМ; а також контрольних виливків *Al*-сплавів марок АК12М2МгН, АК12 й *Si*-латуні марки ЛЦ16К4.

Методи досліджень. Достовірність результатів виконаної дисертації була забезпечена застосуванням стандартних та оригінальних методик, реалізація яких здійснювалась завдяки використанню сучасного лабораторного обладнання та устаткування. Зокрема, металографічний аналіз (МГА) виливків проводили за допомогою оптичного мікроскопа «Neofot» (ФРН). Вимірювання мікротвердості АФ й *Me*-матриці ЛКМ системи *Al-FeCr* та основи базових *Al*-сплавів марок АК12М2МгН й АК12 здійснювали за стандартною методикою, регламентованою ГОСТ 9450-76. Як вимірювальний прилад було використано мікротвердомір моделі «ПМТ-3». Хімічний склад інтерметалідної АФ та *Me*-матриці нульмірного ЛКМ системи *Al-FeCr* до і після процесу сполучення зазначених компонентів між собою визначали шляхом рентгеноспектрального мікроаналізу (РСМА). Дослідження мікроструктури нульмірних ЛКМ систем *Cu-FeCr*, *Al-FeCr* та сплавів, на основі яких вони були отримані, здійснювали за допомогою растрового електронного мікроскопа-мікроаналізатора «РЭММА-102» (РФ). Хімічний склад ливарних сплавів у роботі визначали із застосуванням рентгенофлуоресцентного аналізу (РФА) згідно ДСТУ 4784:1997 (ГОСТ 28033-89); Як вимірювальний прилад, при цьому, було використано рентгенофлуоресцентний спектрометр моделі «VRA-20» (ФРН). Випробування отриманого матеріалу на зношування в умовах сухого тертя проводили за допомогою лабораторної установки (машини тертя) моделі «М22М», а зміну маси досліджуваних зразків контролювали шляхом їх зважування на аналітичних терезах моделі «Radwag XAS 100/С». Математичну обробку масиву експериментальних даних й графічну інтерпретацію результатів поставлених у процесі виконання дисертаційної роботи експериментів здійснювали за сприяння провідних фахівців відділу математичних методів досліджень та інформаційно-комп'ютерних технологій ФТІМС НАН України, і

не тільки. Це стало можливим завдяки вдалому застосуванню: «ChemCAD», «Grapher», «MathCAD», «MatLab», «Microsoft Excel», «Microsoft Word», «Origin-PRO», «Paint», «PhotoShot», «Surfer» та інших програмних пакетів.

Наукова новизна отриманих результатів. При досягненні здобувачем мети цієї дисертаційної роботи та виконанні завдання досліджень ним особисто одержано результати, які мають практичне й науково-технічне значення:

1. Запропоновано комплексну методику дослідження впливу гідро-, газодинаміки ЛГМ-процесу на показники засвоєння Si рідким металом, доведено зміну параметрів мікроструктури сірого чавуну марки СЧ300 та його твердості у контрольній площині литих зразків, а також встановлено, що коефіцієнт засвоєння Si матричним розплавом менший за більшого вмісту дисперсного феросиліцію марки ФС75 у «тілі» ГМ, що нівелюється тривалістю існування рідкої фази.

Концентрацію легуючого елемента (ЛЕ) та елемента-модифікатора (ЕМ), у тому числі Si , раніше досліджували на 3-х горизонтах у 6-ти точках (з лівого боку та по центру вилівка), а концентрація ЛЕ та ЕМ з правого боку вважалась умовно такою як і з лівого, що не завжди відповідало дійсності. У нашому випадку концентрацію Si було також визначено на 3-х горизонтах, але у 9-ти точках (з лівого боку, по центру та з правого боку литого зразка). У 9-ти точках було досліджено і мікроструктуру сірого чавуну марки СЧ300, а не лише в центрі вилівка як це робили раніше. Залежність коефіцієнта засвоєння Si рідким металом від вмісту феросиліцію марки ФС75 у «тілі» ДНГМ раніше не встановлена.

2. Проведено регресійний аналіз результатів повнофакторного експерименту, на основі якого вперше встановлено функціональний зв'язок технологічних параметрів ЛГМ-процесу з показниками засвоєння Si матричним розплавом, параметрами мікроструктури сірого чавуну марки СЧ300 та його твердістю.

Дослідження, що проводилися у даному напрямку раніше, носили виключно пошуковий характер і зводилися лише до вивчення зміни концентраційного поля Si у контрольній площині литих зразків. Вплив технологічних параметрів ЛГМ-процесу на $[Si]_m$, $k_{[Si]}$, $[П]$, $[Ф]$, $[Fe_3C]$, $[ПГ]$, $l_{ПГ}$ та $НВ$ матеріалу до цього не досліджували.

3. Удосконалено методику процесів графітизуючого й сфероїдизуючого модифікування чавуну, легування матричного розплаву дисперсним ферохромом марки ФХ650А, порошками міді марки ПМС-К, ферованадію марки ФВд40У0,75 та феротитану марки ФТи70С1, що дозволило розширити уявлення про особливості структуроутворення сірого й високоміцного чавунів марок СЧ250 й ВЧ500-7, відлити жаростійкий Cr-чавун марки ЧХ1, сірий чавун марки СЧ200 з перлітно-феритною основою та зносостійку складнолеговану сталь марки 75ХФТЛ, відповідно, а також визначити їх механічні й триботехнічні характеристики.

У порожнину прес-форми раніше задували пінополістирол, змішаний з дисперсною присадкою, що було причиною нерівномірності розподілу останньої в об'ємі ДНГМ. У нашому випадку гранули пінополістиролу були плаковані ДІ.

4. Виявлено перехідну зону товщиною 0,15...0,18 мм між функціональними шарами двомірного ЛКМ системи СЧ300-См3-ЧХ3, встановлено раніше невідомі залежності макро-, мікроструктури і твердості композитного вилівка від гідро-, газодинаміки ЛГМ-процесу, що дало змогу констатувати дифузійний характер зв'язку між АФ й Fe-матрицею, обґрунтувати його структуру та властивості.

До цього литі армовані конструкції та ЛКМ системи *Me-AФ* за такою методикою не отримували. Виливки подібного класу, зазвичай, одержували у піщано-глинистих формах, формах із рідкоплинних самотверднучих сумішей, тощо.

5. Вперше розкрито механізм композиційного зміцнення поршневого *Al*-сплаву марки АК12М2МгН та силуміну евтектичного складу марки АК12 дисперсним інтерметалідом *FeCr*, який базується на адгезійно-механічному типі зв'язку АФ з *Al*-матрицею, що забезпечує оптимальну мікроструктуру та високі механічні й триботехнічні характеристики нульмірного ЛКМ системи *Al-FeCr*.

Композиційні матеріали отримували раніше традиційними методами, такими як: порошкова металургія, просочення, екструзія, осадження та інші. З використанням ДНГМ нульмірні ЛКМ системи *Al-FeCr* до цього не одержували.

6. Доведено можливість армування ливарної *Si*-латуні марки ЛЦ16К4 дисперсним інтерметалідом *FeCr*, що дозволило вперше отримати нульмірний ЛКМ системи *Cu-FeCr*, який має оптимальну мікроструктуру, номінальну твердість та вищі чим у контрольної вилівка триботехнічні властивості.

При виробництві композитів типу нульмірного ЛКМ системи *Cu-FeCr* застосовуються ті ж самі методи, що і в розглянутому раніше випадку. Армування *Cu*-сплавів дисперсним інтерметалідом *FeCr* за ЛГМ-процесом ще не здійснювали.

Особистий внесок здобувача. Основні наукові положення, викладені у роботі [1–32], та отримані експериментальні дані як і висновки, яких дійшов здобувач, належать йому безпосередньо. Особистий внесок дисертанта полягає також у розробці методик вивчення ефективності процесу інокулювання ливарних сплавів [1–16], тобто впливу гідро-, газодинаміки ЛГМ-процесу на показники засвоєння ДІ матричним розплавом, параметри мікроструктури та властивості піддослідних виливків, а також методики визначення характеру зв'язку АФ з *Me*-матрицею в структурі нульмірного ЛКМ системи *Al-FeCr*. Автору дисертації належить ідея математичної обробки результатів експерименту та виведення ним емпіричних рівнянь [4–6, 8–11, 14–16].

Практичне значення отриманих результатів. Одержані при виконанні поставленої задачі ливарні сплави у машинобудуванні можуть бути використані як конструкційні матеріали. Область їх можливого застосування наведена нижче:

1. *СЧ300 + ФС75, СЧ250 + ФС75*: деталі машин і механізмів загального призначення (корпусні деталі); декоративно-прикладне й художнє литво.

2. *СЧ200 + ПМС-К*: елементи гідравлічних систем, що працюють в умовах надлишкового тиску (корпуси насосів, клапанів, гідророзподільювачів, гідрозамків); деталі машин і механізмів, які експлуатують при підвищених динамічних навантаженнях (канатні блоки, намоточні барабани, шків, шестерні, зірочки).

3. ЧХ1 ДСТУ 8851:2019: у теплотехніці для виготовлення елементів пічної апаратури, що знаходиться під впливом підвищених температур (дверцята твердопаливних котлів, колосникові решітки, футерівка камер згорання).

4. ВЧ500-7 ДСТУ 3925:1999: деталі машин та механізмів, які працюють в умовах високих механічних навантажень [корпуси підшипників, колінчаті вали, шатуни, штоки двигунів внутрішнього згорання (ДВЗ) й поршневих компресорів].

5. 75ХФТЛ ТУ 4112-78269737-001-2005: зносостійкі елементи бетонозмішувачів, млинів, дробарок (лопатки, скребки, футерівка, розмельні тіла, бронеплити).

6. ЛКМ системи *Al-FeCr*: деталі машин й механізмів, які працюють в умовах аб-

разивного зношування й сухого тертя (корпуси і робочі колеса насосів та вентиляторів для, відповідно, перекачування й вентиляції абразивного середовища; вузли тертя; захисні покриття з підвищеною зносостійкістю; ведучі і ведені колеса стрічкових пилорам), а також високих контактних навантажень (зірочки ланцюгових передач, шестерні шестерних насосів й зубчастих передач, поршні ДВЗ і компресорів).

7. ЛКМ системи *СЧ300-Ст3-ЧХ3*: деталі машин та механізмів, у яких в умовах сухого тертя й абразивного зношування працює лише одна поверхня (форми для виготовлення цегли, циліндри ДВЗ і компресорів, борошномельні валки).

На замовлення ТОВ «НВК «Агропромдеталь» відпрацьовано технологію інокулювання ливарних сплавів і впроваджено у промислове виробництво дослідно-експериментальну партію реальних виливків із сірого чавуну марки СЧ300 ДСТУ 8833:2019, жаро-, зносостійкого *Cr*-чавуну марки ЧХ3 ДСТУ 8851:2019, а також нульмірного ЛКМ системи *Al-FeCr*. Механічна обробка придатного литва та виробничі випробування готових деталей були здійснені на потужностях ПП «НТП «Кварц», які потім були реалізовані ТОВ «Українська спецкомпанія». Впровадження результатів дисертаційної роботи у виробництво підтверджено відповідними актами.

Апробація матеріалів дисертації. Результати виконаної роботи доповідалися та / або були представлені здобувачем на [17–28]: Міжнародному науково-технічному конгресі «Литейное производство в новом веке – как победить в конкуренции». Київ, 2002; Міжнародному науково-технічному конгресі «Литейное производство: высококачественные отливки на основе эффективных технологий». Київ, 2004; III Міжнародному конгресі по трибології «WTC-2005». Вашингтон, 2005; Міжнародному науково-технічному конгресі «Экономический путь к высококачественному литью». Київ, 2005; XII Міжнародній науково-практичній конференції «Литьє-2016». Запоріжжя, 2016; XIV Міжнародній науково-практичній конференції «Литво. Металургія. 2018». Запоріжжя, 2018; XVII Міжнародній науково-практичній конференції «Литво. Металургія. 2021». Запоріжжя, 2021; XV Міжнародній науково-технічній конференції «Нові матеріали і технології в машинобудуванні». Київ, 2023; XIX Міжнародній науково-практичній конференції «Литво. Металургія. 2023». Харків, 2023; XII Всеукраїнській науково-технічній конференції з міжнародною участю «Процеси механічної обробки, верстати та інструмент: збірник наукових праць». Житомир, 2023; XX Міжнародній науково-практичній конференції «Литво. Металургія. 2024». Харків, 2024.

Публікації. За матеріалами дисертації опубліковано 16 статей у фахових виданнях України та зарубіжжя, 1 патент України на корисну модель, 15 тез доповідей у збірниках міжнародних науково-практичних конференцій і конгресів різного рівня. Усі статті дисертанта надруковані у співавторстві.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається із вступу, 5 розділів, висновків, списку використаних джерел (614 найменувань на 46 сторінках), 5 додатків (на 39 сторінках), містить 56 таблиць (на 33 сторінках), 48 рисунків (на 52 сторінках). Основний текст дисертаційної роботи викладено на 143 сторінках. Загальний обсяг дисертації становить 303 сторінки.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

Вступ розкриває суть проблеми на сьогоднішній день, дає можливість дисертанту обґрунтувати її актуальність, дозволяє йому визначити предмет та об'єкт дос-

ліджень, дає змогу сформулювати мету роботи й основні завдання, які необхідно виконати для її досягнення. У вступі представлена наукова новизна та практична цінність результатів дисертації, викладено особистий внесок здобувача при виконанні роботи й апробації отриманих ним результатів, а також показано їх зв'язок з основними науковими планами, темами, програмами та грантами.

У першому розділі дисертації здобувачем проведено глибокий аналіз літературних даних щодо сучасних технологій одержання ВДСВ, який дозволив йому дійти певних висновків і вибрати основні напрями досліджень. Розглянуто фізико-хімічні й технологічні аспекти процесів легування, мікролегування та модифікування *Fe-C*-сплавів і сплавів кольорових *Me*. Максимум уваги приділено композиційному зміцненню ливарних сталей і сплавів та виробництву армованих виливків, підкреслено практичну цінність об'ємного легування, мікролегування, модифікування та армування металу у «порожнині» ЛФ за ЛГМ-процесом. Автором виконаної дисертаційної роботи зроблено акцент на: основах теорії й технології ЛГМ-процесу; термодеструкції ГМ з імплантованими до неї дисперсними присадками; фізико-хімічній взаємодії ДІ з матричним розплавом; розкрито механізм процесу інокулювання *Fe-C*-сплавів і сплавів кольорових *Me* за допомогою ДНГМ.

Другий розділ дисертаційної роботи присвячений плануванню й постановці серії експериментів при інокулюванні ливарних сплавів у «порожнині» ЛФ за ЛГМ-процесом. У цьому розділі представлені методи виконання поставлених завдань та їх порівняльна характеристика. Тут є відомості щодо методів досліджень і математичної обробки експериментальних даних, наведена інформація про сировину та матеріали, які використовувались дисертантом для досягнення ним наміченої мети.

Для інокулювання ливарних сплавів були використані порошки комплексного сфероїдизуючого модифікатора марки ФСМг7 ДСТУ 3362:1996 (ТУ 14-5-14-134-86), феросиліцію марки ФС75 ДСТУ 4127:2002, ферохрому марки ФХ650А ДСТУ ISO 4552-1:2010, ферованадію марки ФВд40 У0,75 ДСТУ ISO 4552-2:2010, феротитану марки ФТи70С1 ДСТУ 4761:2009, інтерметаліду *FeCr* та конопатковий стабілізований *Si*-порошок марки ПМС-К ГОСТ 4960:2017. Усі порошкові матеріали, окрім ПМС-К ГОСТ 4960:2017, який виробляють у промислових масштабах методом електrolітичного осадження, були отримані в лабораторних умовах.

Дисперсний інтерметалід *FeCr* отримали з литих зразків високохромистого сплаву на основі *Fe*. Для цього кусковий матеріал був попередньо відпалений у лабораторній муфельній печі моделі «СНО-2,5.5.2,5/13,6 И1» на предмет утворення й виділення σ -фази із твердого розчину *Cr* в *Fe*, подрібнено у лабораторній шоківій дробарці моделі «Вібротехнік ЩД-10 6411-00013» та просіяно через сита. Коротка характеристика інтерметалідної АФ така: температура відпалювання – 1073 К, час ізотермічної витримки – 3600 с; дисперсність – 20...100 мкм, форма частинок – скалкова, фактор нерівності – 2...5.

ЛЕ та ЕМ виробляють у промислових масштабах на феросплавних заводах. Їх постачають кінцевому споживачу у вигляді кусків або ж гранул діаметром від 5 до 50 мм. Як і в попередньому випадку, феросплави було подрібнено у лабораторній шоківій дробарці моделі «Вібротехнік ЩД-10 6411-00013» та просіяно через сита. Хімічний склад ДІ регламентовано відповідними нормативними документами.

Порошок заданої дисперсності вдалося отримати завдяки ситовому аналізу.

Для цього було використано набір лабораторних сит із плетеної дротяної тканини, що регламентовано ДСТУ EN 233-2:201_ (EN 233-2:1995, IDT). Середню дисперсність часток комплексного сфероїдизуючого модифікатора марки ФСМг7, феросиліцію марки ФС75, ферохрому марки ФХ650А, феротитану марки ФТи70С1, ферованадію марки ФВд40У0,75 та σ -фази визначали за формулою [14, 15]:

$$\langle d \rangle = \frac{\sum_{i=1}^n m_i d_i}{\sum_{i=1}^n m_i}, \quad (1)$$

де m_i – маса i -тої фракції порошкоподібної σ -фази, кг; d_i – середнє арифметичне дисперсності частинок σ -фази в i -тій фракції, $\times 10^{-6}$ м.

В залежності від розміру часток, порошки ЛЕ, ЕМ та АФ, у нашому випадку, являють собою суміш порошків 2-х неповних груп. Такими групами є тонкий порошок (10...40 мкм) й порошок середньої крупності (40...250 мкм).

Як ГМ майбутніх литих зразків із $Fe-C$ -сплавів і сплавів кольорових Me без присадки, так і ДНГМ (рис. 1, 2), були виготовлені автоклавним методом. Для виготовлення ГМ обох типів було використано бісерний пінополістирол, який, у свою чергу, отримали з ливарного полістиролу [раціональна формула: $(C_8H_8)_n$; густина – 1069...1125 кг/м³] марки «STMMA-FD» (Castchem, КНР). Даний полістирол був спеціально розроблений для технології «Lost Foam», тобто ЛГМ-процесу. Дисперсність його гранул залежить, перш за все, від марки й у вихідному стані знаходиться, зазвичай, у діапазоні від 250 до 900 мкм. Формою ГМ в усіх випадках є плита (пластина), а їх розміри, з технологічних та економічних міркувань, знаходяться в діапазоні, мм: довжина – 80...100, ширина – 5...15, висота – 120...300.

ДНГМ двомірного ЛКМ системи $C4300-Cm3-ЧХ3$ також має форму плити, і складається із 3-х окремо виготовлених частин – 2-х ДНГМ, склеєних між собою діафрагмою із бляхи. Перша ДНГМ являє собою ГМ, наповнену дисперсним феросиліцієм марки ФС75, друга – дисперсним ферохромом марки ФХ650А. Бляха виготовлена із конструкційної вуглецевої сталі марки Ст3 ДСТУ 2651:2005, покритої шаром Zn товщиною 6...10 мкм. Для склеювання компонентів ДНГМ між собою було використано універсальний водо-, морозостійкий клей «Еліт-Дракон» (ПП «Дивоцвіт», Україна). Характеристика ДНГМ та її окремих елементів, а також модельних матеріалів є аналогічними тим, які були розглянуті у попередніх випадках.

Методика виготовлення елементів ливникової системи, складання модельних комплектів та нанесення на їх поверхню протипригарного покриття, а також формотворення й підготовка ЛФ до її заповнення матричним розплавом не є оригінальною методикою. Для захисту майбутніх виливків від пригару було використано протипригарну фарбу наступного хімічного складу, % (об. частка): пірофіліт {хімічна формула: $Al_2[Si_4O_{10}](OH)_2$ } або дистен-силіманіт {хімічна формула: $Al_2[SiO_4]O$ } – 30,0...50,0; бентоніт {основний компонент бентоніту [60,0...70,0 % (мас. частка)] – монтморилоніт, хімічна формула: $Al_2[Si_4O_{10}](OH)_2 \cdot nH_2O$ } – 10,0...20,0; декстрин кислотний [раціональна формула: $(C_6H_{10}O_5)_n$] – 10,0...20,0; вода технічна (хімічна формула: H_2O) – решта. Щоб запобігти процесу бродіння у теплу пору року до складу протипригарного покриття вводять додатково альгінат натрію (раціональна формула: $C_6H_7O_6Na$) у кількості 0,3...4,0 % від маси готового покриття.

Залежність структури й властивостей ливарних сплавів від процесу інокулю-

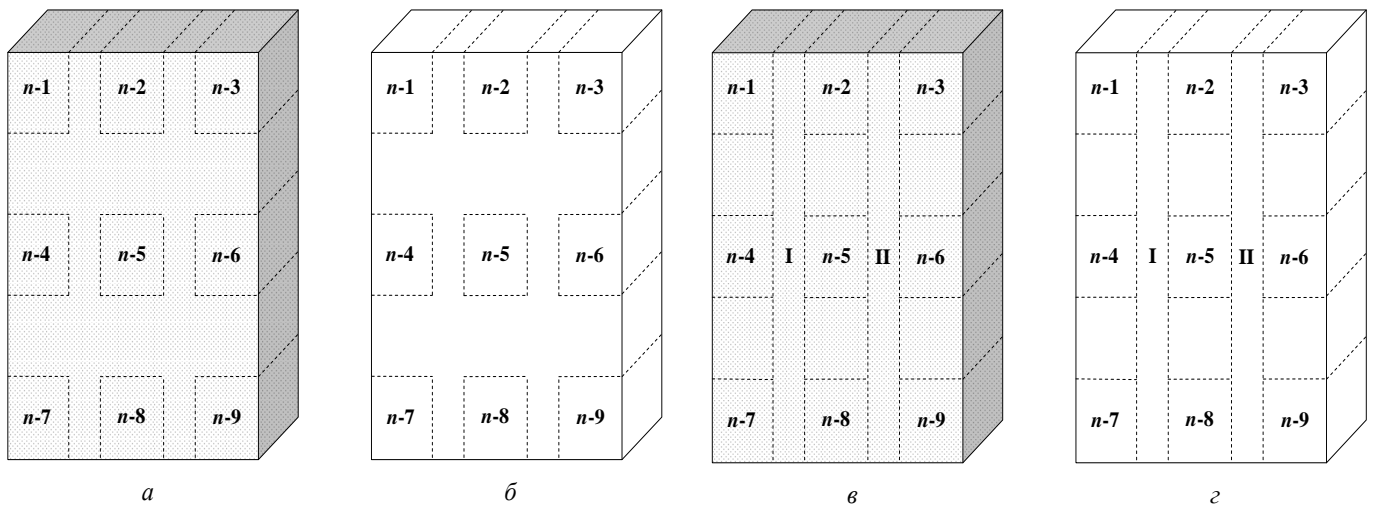


Рисунок 1 – Схема розмітки та порізки підослідних (а, в) й контрольних (б, з) виливків на темплети для вивчення розподілу Si та структури сірого чавуну марки СЧ300 в об'ємі литих зразків ($n-1...n-9$), а також твердості (I, II, $n-1...n-9$) матеріалу виливків

вання відповідного матричного розплаву за допомогою ДНГМ досліджували за оригінальною методикою, запропонованою спеціалістами ФТІМС НАН України та здобувачем особисто. Для цього підослідні виливки (див. рис. 1, 2) були попередньо розмічені й порізані на темплети, із яких потім виготовили шліфи для МГА, зразки для механічних випробувань і проби (рис. 3) для визначення хімічного складу матеріалу литих зразків. Разом із тим, дисертантом зроблено акцент на використанні стандартних методик. Випробування досліджуваного матеріалу на зношування в умовах сухого тертя здійснювали за допомогою лабораторної установки (машини тертя) моделі «М22М». Вплив технологічних параметрів ЛГМ-процесу на показники засвоєння Si матричним розплавом, параметри мікроструктури сірого чавуну марки СЧ300 й твердість підослідних виливків вивчали із застосуванням методу регре-

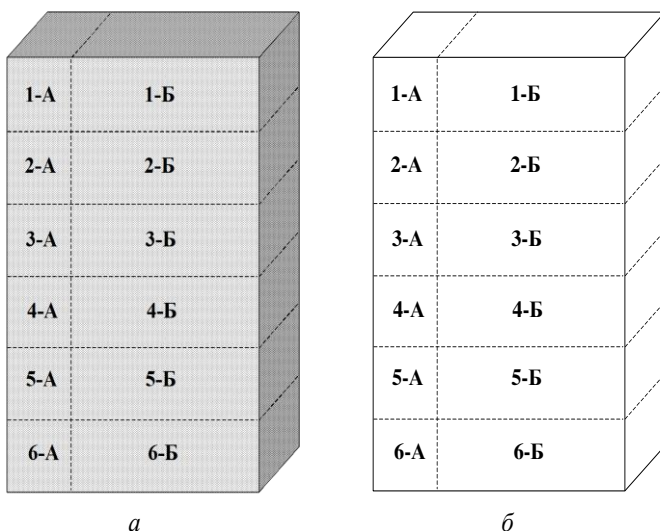


Рисунок 2 – Схема розмітки й порізки литих зразків на темплети для вивчення структури (1-А...6-А) та властивостей (1-Б...6-Б) досліджуваного матеріалу по висоті підослідних виливків: а – нульмірний ЛКМ системи $Al-FeCr$; б – АК12

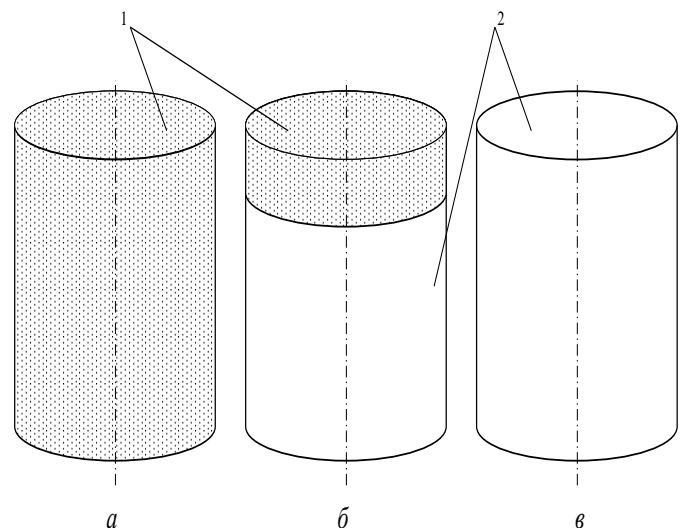


Рисунок 3 – Проби для визначення хімічного складу основних структурних складових нульмірного ЛКМ системи $Al-FeCr$ до (б, в) й після (а) процесу армування: а – нульмірний ЛКМ системи $Al-FeCr$; б – АК12 + $FeCr$; в – АК12; 1 – нульмірний ЛКМ системи $Al-FeCr$ ($FeCr$); 2 – АК12

сійного аналізу, про що мова піде далі.

При графітизуючому модифікуванні чавунного розплаву дисперсним феросиліцієм марки ФС75 здобувачем використано ортогональний план експерименту 1-го порядку. Дослідження проводили за методом повнофакторного експерименту. Кількість необхідних випробувань (табл. 1) у кожній серії для 4-х незалежних факторів було визначено за допомогою математичної залежності наступного вигляду [9]:

$$k = 2^n, \quad (2)$$

де n – число незалежних факторів, у нашому випадку $n = 4$ ($C_{\text{ФС75}}^{\text{ГМ}}$ – вміст дисперсного феросиліцію марки ФС75 у «тілі» моделі, що газифікується, $\rho_{\text{ГМ}}$ – густина пінополістиролу, $v_{\text{Ме}}^{\text{ЛФ}}$ – швидкість формозаповнення, $T_{\text{Ме}}^0$ – температура заливання),

Таблиця 1 – Варіювання незалежних факторів

Рівень фактора	Технологічні параметри ЛГМ-процесу			
	$C_{\text{ФС75}}^{\text{ГМ}}$, % (мас. част.)	$\rho_{\text{ГМ}}$, кг/м ³	$v_{\text{Ме}}^{\text{ЛФ}}$, $\times 10^{-3}$ м/с	$T_{\text{Ме}}^0$, К
<i>min</i>	0,2	20	25	1523
<i>max</i>	1,0	50	50	1753

і становило 16. Варіювання кожного фактора (див. табл. 1) здійснювали на 2-х рівнях.

Можливість армування сплавів кольорових *Me* дисперсним інтерметалідом *FeCr* вивчали на прикладі ливарної *Si*-латуні марки ЛЦ16К4 й ливарних *Al*-сплавів марок АК12М2МгН та АК12. У результаті отримали зразки нульмірних ЛКМ систем *Cu-FeCr* й *Al-FeCr*, які працюють на зношування в умовах сухого тертя. Матеріал контртіла – сталь 40Х ДСТУ 4738:007. Мікроструктуру, механічні й триботехнічні властивості композитних виливків та відповідних пар тертя досліджували за схемою, наглядно представленою на рис. 2. Випробування досліджуваного матеріалу на зношування в умовах сухого тертя, як і в попередньому випадку, здійснювали завдяки лабораторній установці (машині тертя) моделі «М22М».

Визначення характеру зв'язку між інтерметалідною АФ й *Me*-матрицею нульмірного ЛКМ системи *Al-FeCr* зводилося до визначення хімічного складу його структурних складових до і після армування. Для цього (див. рис. 2), із нульмірного ЛКМ системи *Al-FeCr* за допомогою кутової шліфмашинки було вирізано 1, а з контрольної вилівки – 2 темплети. Потім на токарно-гвинторізному верстаті моделі «16К20» із цих темплетів були виточені проби (див. рис. 3) циліндричної форми, на торцьову поверхню однієї з яких, за допомогою електропровідного клею, було нанесено шар дисперсного інтерметаліду *FeCr* товщиною 1...2 мм. Пробі мали форму циліндра із розмірами, мм: висота – 10; діаметр – 15. Електропровідний клей було виготовлено на основі клею «ПВА-3М», до складу якого потім добавили порядку 5 % (мас. частка) пилоподібного графіту. Хімічний склад інтерметалідної АФ й *Me*-матриці нульмірного ЛКМ системи *Al-FeCr* до і після процесу сполучення зазначених компонентів між собою визначали із застосуванням РСМА та РФА, відповідно.

У третьому розділі досліджено закономірності розподілу домішок у рідких і твердіючих *Fe-C*-сплавах та їх вплив на структуру, механічні й спеціальні властивості литих зразків. Для цього досліджено ефективність модифікування чавунних розплавів дисперсними феросиліцієм марки ФС75 і ферохромом марки ФХ650А, а та-

кож *Сi*-порошком марки ПМС-К; вивчено можливість сфероїдируючого модифікування чавунного розплаву комплексним модифікатором марки ФСМг7 при отриманні високоміцного чавуну марки ВЧ500-7; одержано тестові зразки зносостійкої складнолегованої сталі марки 75ХФТЛ та двомірного ЛКМ системи СЧ300-См3-ЧХЗ, а потім досліджено їх мікроструктуру і триботехнічні характеристики; з'ясовано механізм процесу інокулювання *Fe-C*-сплавів за допомогою ДНГМ.

Експериментально доведено, що у контрольній площині литих зразків показники засвоєння *Si* матричним розплавом змінюються залежно від довжини і висоти піддослідного виливка, а також місця підведення матричного розплаву до «порожнини» ЛФ. Графічна інтерпретація експериментальних даних на практиці довела, що по мірі збільшення відстані від місця підведення рідкого *Me* до «порожнини» ЛФ $[Si]_m$ (рис. 4) й $k_{[Si]}$ (рис. 5) зростають, а твердість матеріалу (рис. 8), натомість, знижується. Разом із тим, результати МГА показали, що віддалення від живильника призводить до того, що мікроструктура литих зразків [рис. 7 (а)] дедалі більше набуває ознак мікроструктури сірого чавуну марки СЧ300, у той час коли мікроструктура контрольного виливка [див. рис. 7 (б)] є характерною для мікроструктури білого чавуну (БЧ).

Такий перепад $[Si]_m$ у контрольній площині литих зразків зумовлений гідро-, газодинамікою ЛГМ-процесу. Це зводиться до того, що у «порожнині» ЛФ мають місце циркуляційні (конвективні й гідродинамічні) потоки. Ці потоки виникають під дією $grad T$ – з одного боку, та гідродинаміки процесу формозаповнення – з іншого. Енергія конвективних потоків є незначною, тому вони здатні викликати перепад $[Si]_m$, який, за порядком, можна прирівняти до перепаду, що має місце по ширині виливків. На відміну від конвективних, гідродинамічні потоки *Me*-розплаву мають велику E_{kin} , яка «деформує» концентраційне поле *Si* у напрямку руху чавунного розплаву, і призводить до перепаду $[Si]_m$ у контрольній площині литих зразків. Зі збільшенням висоти виливків енергія цих потоків поступово знижується, і це призводить до того, що концентраційне поле *Si* вирівнюється, і навіть дещо послаблюється.

Оскільки, коефіцієнт засвоєння *Si* матричним розплавом було отримано як відношення різниці концентрацій *Si* в розплаві сірого чавуну після і до процесу модифікування феросиліцієм марки ФС75 до вмісту цього графітуючого ЕМ в ДНГМ, яке було, у загальному випадку, представлене співвідношення вигляду [2, 6, 8]:

$$k_{[Si]} = \frac{[Si]_m - [Si]_0}{C_{Si}^{ГМ}}, \quad (3)$$

де $[Si]_m$, $[Si]_0$ – концентрації кремнію в розплаві сірого чавуну марки СЧ300, відповідно, після й до процесу графітуючого модифікування, % (мас. частка); $C_{Si}^{ГМ}$ – концентрація кремнію (від маси литого зразка) у моделі, що газифікується, % (мас. частка),

то поверхні відгуку, що відображають зміну $k_{[Si]}$ матричним розплавом у контрольній площині литих зразків, ідентичні поверхням відгуку описаним вище, а відтак їх графічна інтерпретація (див. рис. 5) детального аналізу та обговорення не потребує.

Результати проведених досліджень дозволили з'ясувати, що $k_{[Si]}$ для сірого чавуну марки СЧ300 залежить не лише від $[Si]_m$ в об'ємі виливка, але й від $C_{Si}^{ГМ}$ у «тілі» ГМ. Графічна інтерпретація (рис. 6) експериментальних даних представлена нижче.

МГА мікроструктури чавуну, модифікованого дисперсним феросиліцієм марки, ФС75, показав, що у контрольній площині цього виливка переважає мікроструктура

сірого чавуну перлітного класу [див. рис. 7 (а)], який відповідає марці СЧ300. Порівняльна характеристика мікроструктури контрольного зразка [див. рис. 7 (б)] показала,

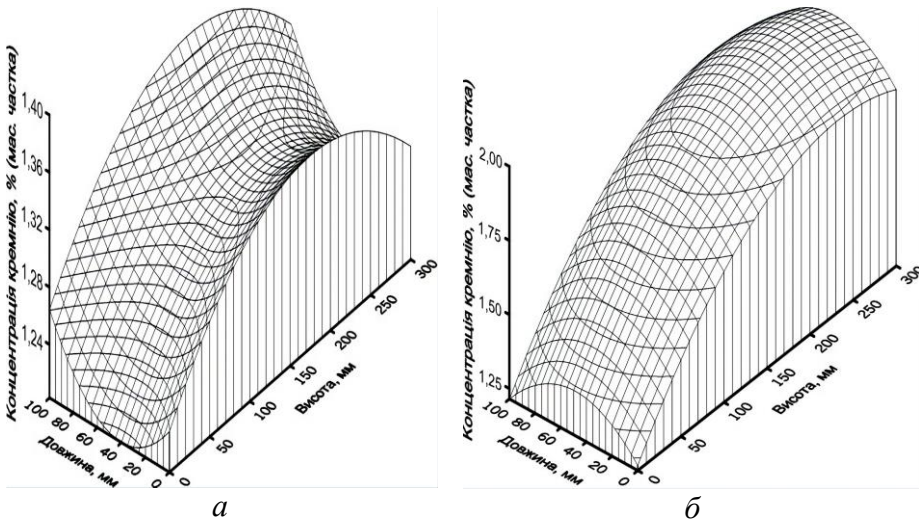


Рисунок 4 – Зміна концентрації кремнію у контрольній площині досліджуваних виливків з індексами: а – «9»; б – «14»

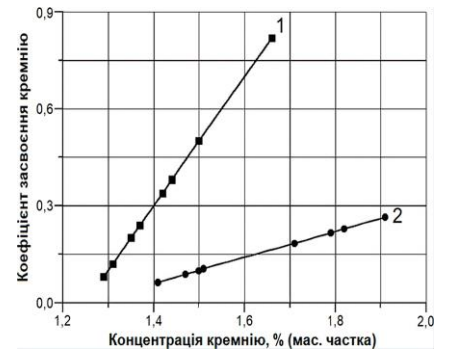


Рисунок 6 – Вплив концентрації Si у газомоделі й виливку на коефіцієнт його засвоєння: 1 – 0,15 %; 2 – 0,75 %

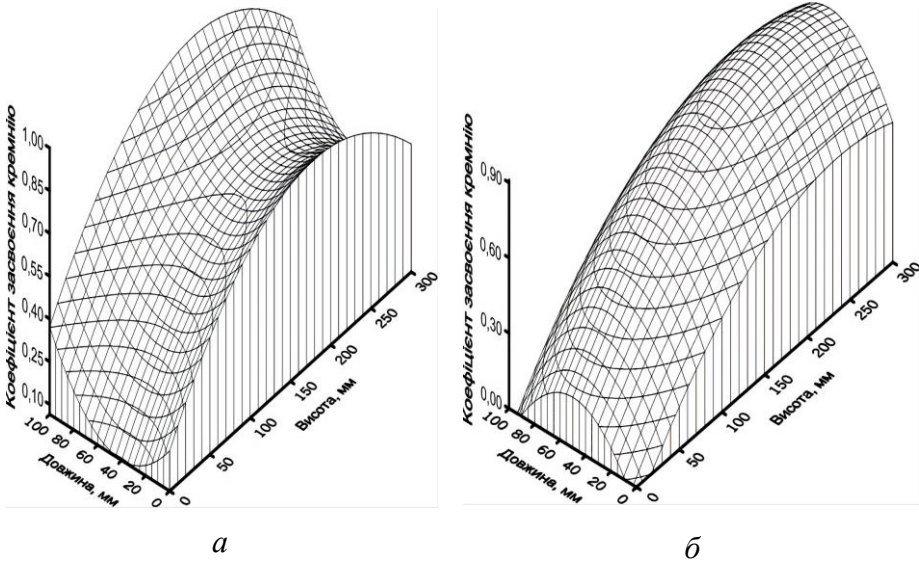


Рисунок 5 – Розподіл коефіцієнта засвоєння кремнію у контрольній площині литих зразків з індексами: а – «9»; б – «14»

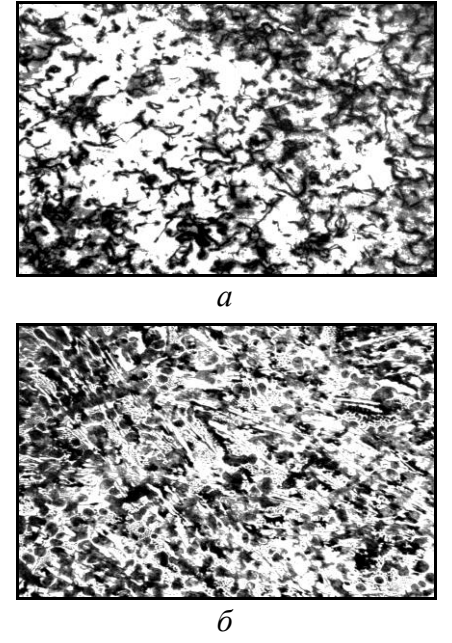


Рисунок 7 – Мікроструктура (×100) литих зразків: 1 – піддослідного; 2 – контрольного

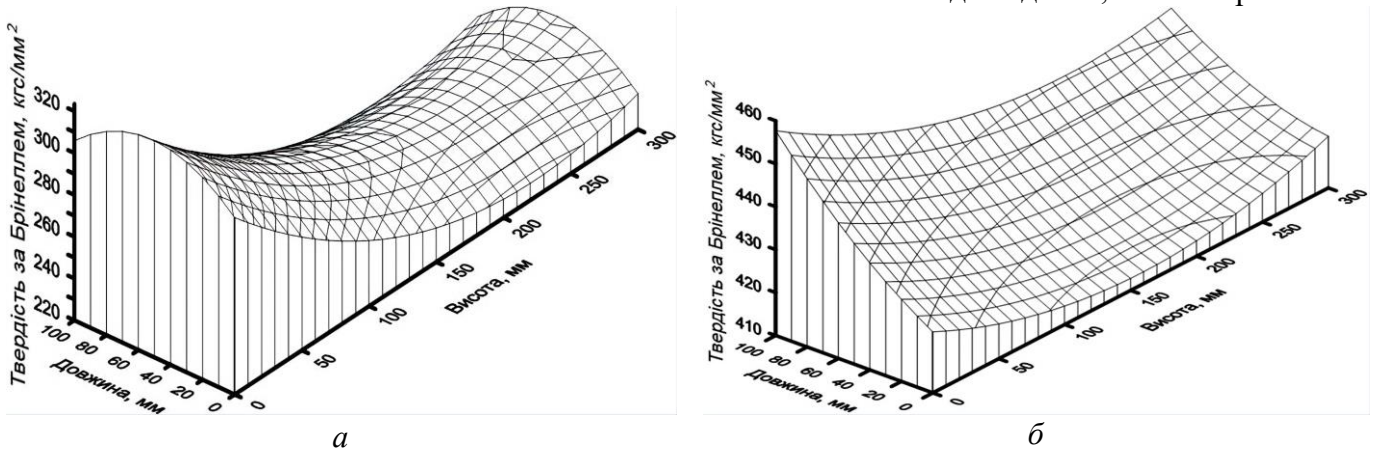


Рисунок 8 – Залежність твердості сірого (а) та білого (б) чавунів у контрольній площині литих зразків, відповідно, з індексами: а – «14»; б – «К»

що морфологія структурних складових в усіх темплетах майже однакова. Разом із тим, МГА піддослідного й контрольного виливків, помічених індексами «14» й «К», відповідно, доводить доцільність графітізуючого модифікування тонкостінних литих зразків із сірого чавуну марки СЧ300 дисперсним феросиліцієм марки ФС75.

Графічна інтерпретація експериментальних даних [див. рис. 8 (а)] дозволила з'ясувати, що $HV_{СЧ300} = f(H_B, a_B)$. Так, для виливка з індексом «14» характерною особливістю є підвищена твердість ($HV_{СЧ300}$) у нижній його частині. По мірі зростання висоти (H_B) литого зразка HV матеріалу спочатку знижується, а потім, починаючи із 220 мм, поступово підвищується. Очевидно також, що HV чавунних виливків залежить і від їх довжини (a_B), причому залежність носить яскраво виражений характер.

Шляхом графічної інтерпретації [див. рис. 8 (б)] результатів поставленого експерименту було встановлено, що $HV_{БЧ} = \varphi(H_B, a_B)$. Варто зазначити, що HV матеріалу контрольного зразка майже не залежить від його висоти (H_B), проте довжина (a_B) виливка сильно впливає на твердість БЧ, тобто $HV_{БЧ}$. Зростання висоти (H_B) контрольного зразка призводить до того, що HV матеріалу спочатку поступово зменшується, досягаючи мінімально значення на висоті 150 мм, а потім знову збільшується. На відміну від виливка з індексом «14», у якого HV , перш за все, залежить від $[Fe_3C]$, зміна HV матеріалу у контрольній площині литого зразка з індексом «К» відбувається незалежно від кількості структурно вільного Fe_3C . Залежність $HV_{БЧ}$ від висоти (H_B) та довжини (a_B) контрольного виливка визначається умовами кристалізації матричного розплаву, й понад усе, носить статистичний характер.

Встановлено також, що HV литих зразків, у першу чергу, залежить від $[Si]_m$ та $k_{[Si]}$. Графічна інтерпретація результатів проведених досліджень (рис. 9) показала, що їх HV на інтервалі від 1,25 % (мас. частка) до 1,91 % (мас. частка) Si «падає» від 321 кгс/мм² до 229 кгс/мм². Подібна залежність існує також і між $k_{[Si]}$ й HV литих зразків. Зокрема, збільшення $k_{[Si]}$ від 0,00 до 0,88 призводить до плавного зниження HV чавунного виливка від 321 кгс/мм² до 229 кгс/мм². В обох випадках лінії тренда ($R^2 = 0,8515$; $R^2 = 0,8524$; відповідно) співвідношень фізичних величин, які були зведені у формі таблиць, являють собою поліноми 3-го порядку.

В процесі виконання роботи досліджено вплив технологічних параметрів ЛГМ-процесу на показники засвоєння Si матричним розплавом, мікроструктуру досліджуваного чавуну та його твердість. Результати експерименту показали, що між незалежними факторами, тобто технологічними параметрами ЛГМ-процесу, і концентрацією Si й коефіцієнтом його засвоєння, параметрами мікроструктури і твердістю матеріалу існує функціональний зв'язок, який також заданий у табличній формі.

Щоб з'ясувати його характер, було проведено регресійний аналіз результатів повнофакторного експерименту та отримано низку відповідних рівнянь регресії. Це, зазвичай, лінійні рівняння, які, у загальному випадку, мають вигляд [9, 10]:

$$[Si]_m \cdot k_{[Si]} \cdot [П] \cdot [\Phi] \cdot [Fe_3C] \cdot [ПГ] \cdot l_{ПГ} \cdot HV = A \left(C_{ФС75}^{ГМ}, \rho_{ГМ}, V_{Me}^{ЛФ}, T_{Me}^0 \right) + B, \quad (4)$$

де $[П]$, $[\Phi]$, $[Fe_3C]$, $[ПГ]$ – кількості перліту, фериту, структурно вільного цементиту та пластинчастого графіту, відповідно, % (за площею); $l_{ПГ}$ – довжина включень пластинчастого графіту, мкм; HV – твердість, що визначена за шкалою Брінелля, кгс/мм²; A – кутовий коефіцієнти регресії; B – вільний член ($B = const$).

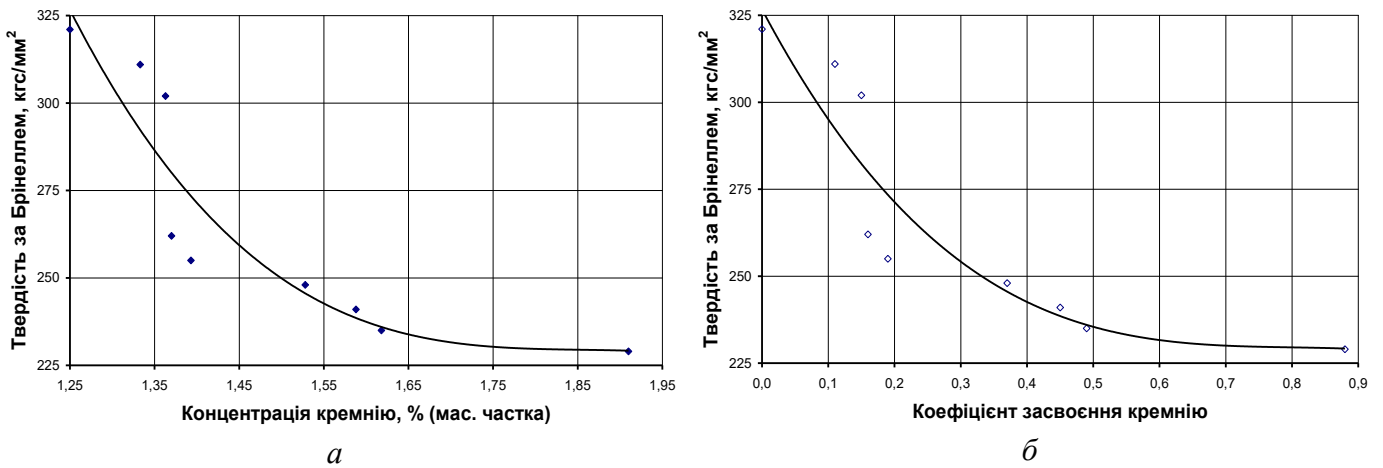


Рисунок 9 – Вплив показників засвоєння кремнію на твердість сірого чавуну: *a* – концентрації кремнію $\{HB = f([Si]_{\text{м}})\}$, *б* – коефіцієнта засвоєння кремнію $\{HB = \varphi(k_{[Si]})\}$

Графічна інтерпретація (рис. 10) рівнянь регресії (4), отриманих внаслідок математичної обробки експериментальних даних, дає можливість уявити характер залежностей $k_{[Si]}$, $[Fe_3C]$, $l_{ПГ}$ та HB литих зразків від $C_{\text{ФС75}}^{\text{ГМ}}$, $\rho_{\text{ГМ}}$, $v_{\text{Ме}}^{\text{ДФ}}$ й $T_{\text{Ме}}^0$. Такий вплив технологічних параметрів ЛГМ-процесу на $k_{[Si]}$, $[Fe_3C]$, $l_{ПГ}$ й HB сірого чавуну марки СЧ300 пояснюється залежністю мікроструктури чавунних виливків від $C_{\text{ФС75}}^{\text{ГМ}}$, $\rho_{\text{ГМ}}$, $v_{\text{Ме}}^{\text{ДФ}}$ й $T_{\text{Ме}}^0$. Мікроструктура піддослідного матеріалу, у свою чергу, визначає його HB .

Крім графітуючого модифікування структури сірих чавунів марок СЧ300 та СЧ250 дисперсним феросиліцієм марки ФС75 вдалося легування й модифікування чавунного розплаву конопатковим стабілізованим *Si*-порошком марки ПМС-К, дисперсним ферохромом марки ФХ650А й комплексним сфероїдизуючим модифікатором марки ФСМг7, відповідно, а також мікролегування розплаву зносостійкої *Cr*-сталі марки 70ХЛ дисперсними ферованадієм марки ФВд40У0,75 та феротитаном марки ФТи70С1 одночасно. У результаті отримали виливки із сірого чавуну марки СЧ200 з феритно-перлітною основою, жаростійкого *Cr*-чавуну марки ЧХ1, високоміцного чавуну марки ВЧ500-7, а також зносостійкої складнолегованої сталі марки 75ХФТЛ. У подальшому сталеві виливки піддали термічній обробці (ТО) (табл. 2). Із застосуванням ДНГМ було одержано також двовірний ЛКМ системи СЧ300-См3-ЧХ3.

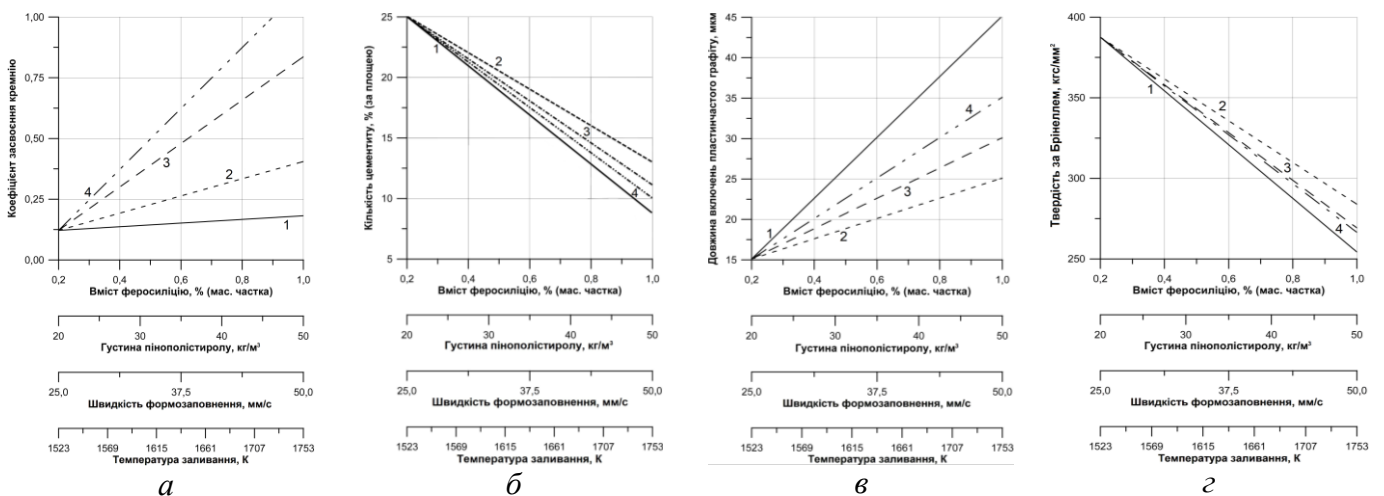


Рисунок 10 – Залежність коефіцієнта засвоєння кремнію (*a*), кількості цементиту (*б*), довжини включень пластинчастого графіту (*в*) й твердості (*г*), визначеної за шкалою Брінелля, від технологічних параметрів ЛГМ-процесу

Таблиця 2 – Механічні характеристики сталевих виливків

Індекс виливка	Марка сталі	Режим термічної обробки					Механічні властивості			
		гартування			відпуск		σ_b , МПа	δ_5 , %	НВ, кгс/мм ²	a_n , Дж/см ²
		T_n , К	τ_{IV} , с	ГС	T_n , К	τ_{IV} , с				
001 (1)	70ХЛ	–	–	–	–	–	0546,8	9,95	362,5	25,0
002 (2)	75ХФТЛ	–	–	–	–	–	0684,7	4,67	415,4	12,5
003 (3)	75ХФТЛ	1333	1200	В + М	473	3600	1045,2	0,00	635,3	73,4

Примітки: ГС – гартуюче середовище, В – вода, М – масло

Основними критеріями оцінки ефективності процесу інокулювання *Fe-C*-сплавів є показники засвоєння ДІ, тобто концентрація ЛЕ чи ЕМ у сталі або чавуні та коефіцієнт його засвоєння матричним розплавом. Від цих показників залежать

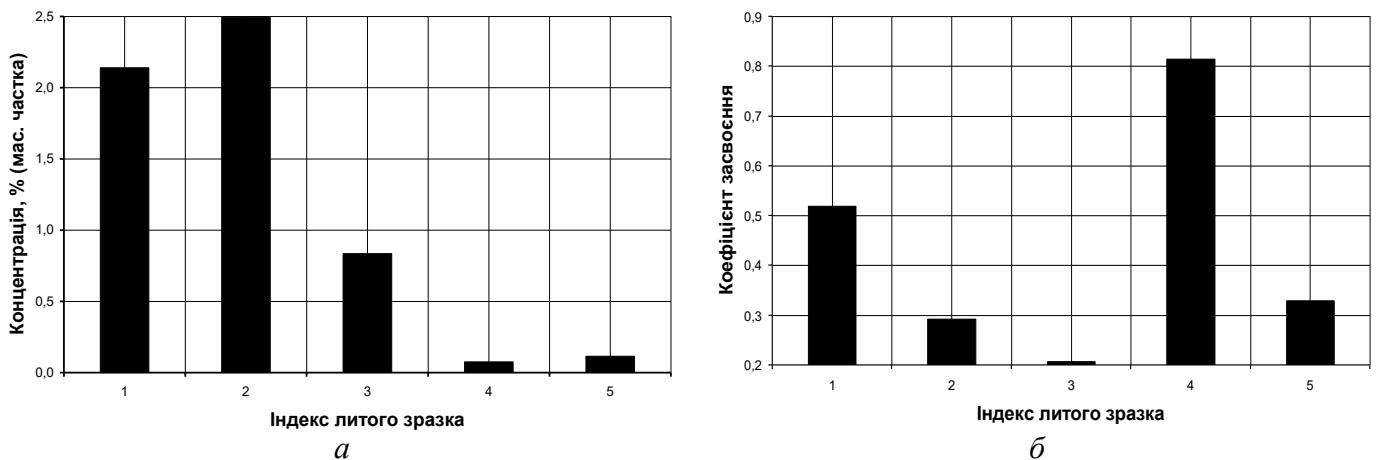
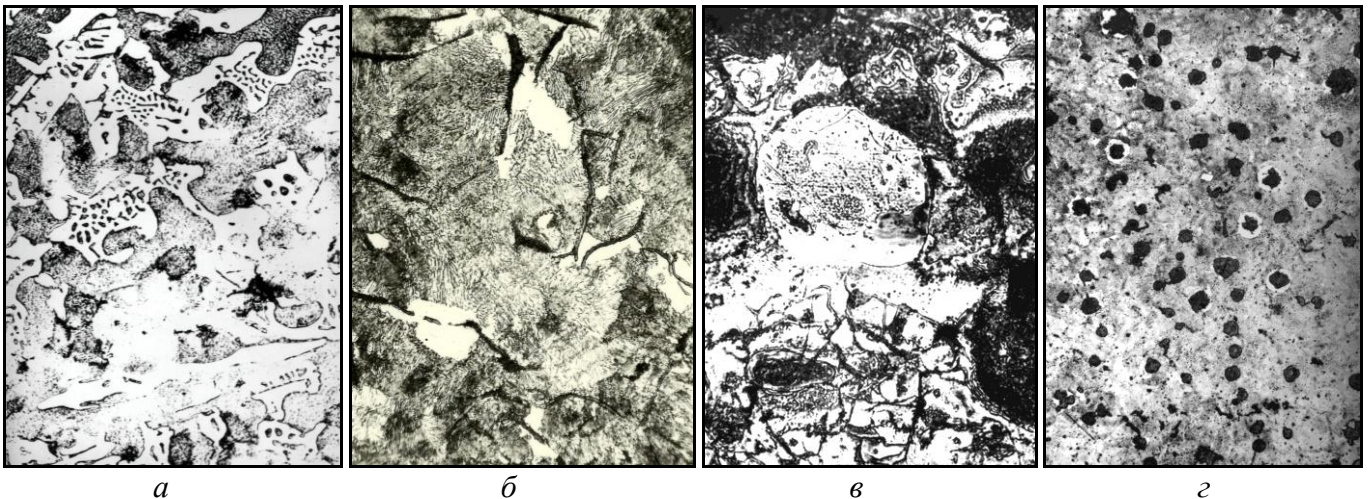


Рисунок 11 – Показники засвоєння елементів із дисперсно-наповненої моделі, що газифікується: *a* – концентрація у виливку, *b* – коефіцієнт засвоєння матричним розплавом;

1 – Si, 2 – Cu, 3 – Cr, 4 – V, 5 – Ti

структура, а в результаті, і властивості піддослідних виливків, про що вже згадувалося раніше. Графічна інтерпретація результатів проведених досліджень (рис. 11) у вигляді стовпчастих гістограм наглядно представлена нижче.

Експериментально доведено, що чавунні зразки мають оптимальну мікроструктуру [рис. 12 (а–д)] та номінальну твердість (рис. 13), а мікроструктура сталевого литва [див. рис. 12 (е–ж)], його механічні (див. табл. 2) й триботехнічні (табл. 3) ха-



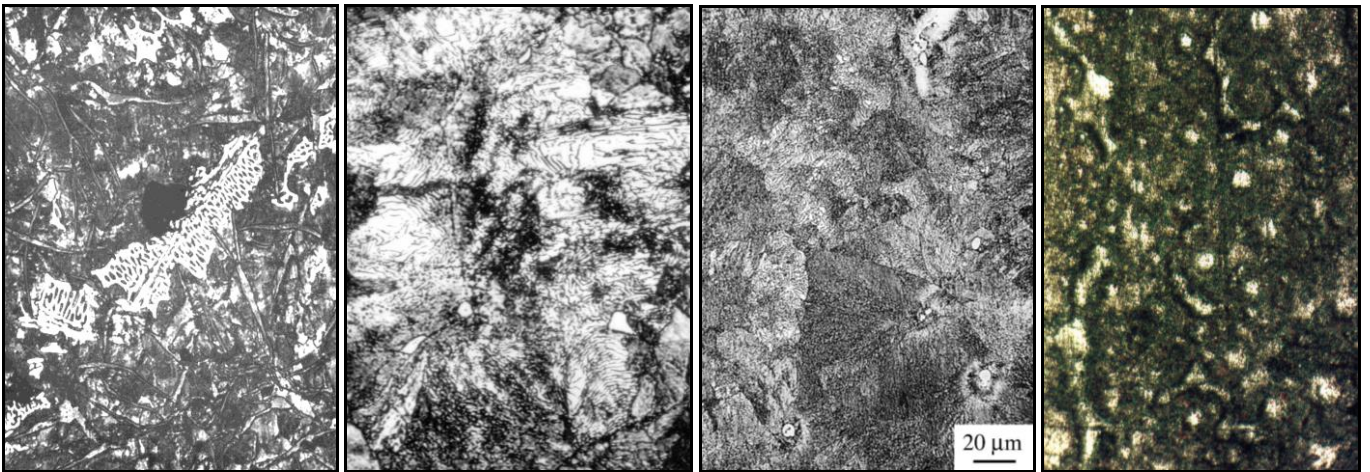


Рисунок 12 – Мікроструктура [$\times 500$ (а, б, е, е); $\times 400$ (е); $\times 100$ (г, ж); $\times 200$ (д)] литих зразків: а – БЧ; б – чавун СЧ250; е – чавун СЧ200; г – чавун ВЧ500-7; д – чавун ЧХ1; е – сталь 70ХЛ (без ТО); е – сталь 75ХФЛЛ (без ТО); ж – сталь 75ХФЛЛ (гартування + відпуск)

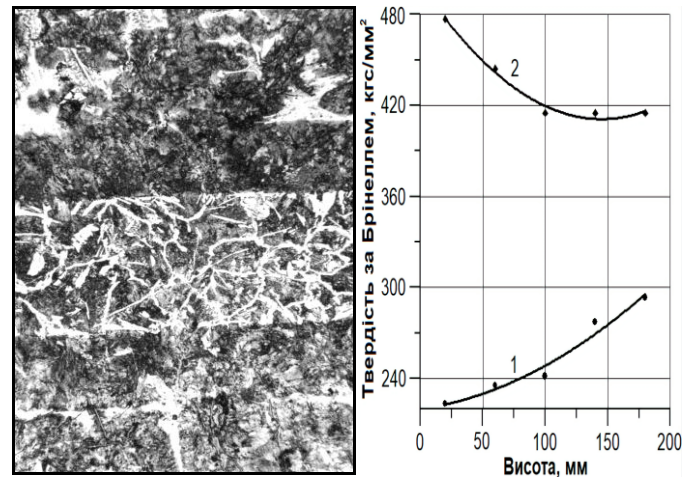
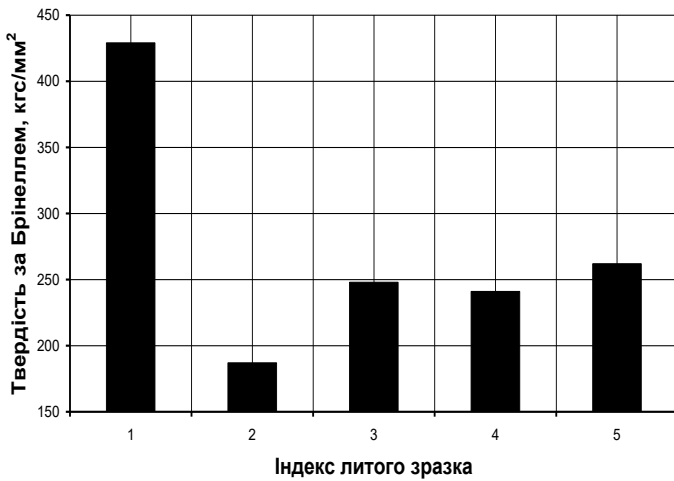


Рисунок 13 (лівий) – Твердість матеріалу досліджуваних виливків: 1 – БЧ; 2 – чавун СЧ250; 3 – чавун СЧ200; 4 – чавун ВЧ500-7; 5 – чавун ЧХ1
Рисунок 14 (середній) – Мікроструктура ($\times 200$) двомірного ЛКМ системи СЧ300-См3-ЧХ3
Рисунок 15 (правий) – Вплив висоти композитного виливка на твердість функціональних шарів двомірного ЛКМ системи СЧ300-См3-ЧХ3: 1 – чавун СЧ300; 2 – чавун ЧХ3

рактеристики відповідають ТУ 4112-78269737-001-2005. Результати МГА (рис. 14) показали, що в структурі двомірного ЛКМ системи СЧ300-См3-ЧХ3 мають місце першопочаткові границі розділу суміжних фаз та перехідні зони між сусідніми функціональними шарами. Наявність обабіч діафрагми із поцинкованої бляхи перехід-

Таблиця 3 – Триботехнічні характеристики сталевих виливків та відповідних пар тертя ковзання

Індекс виливка	Марка сталі	Параметри процесу випробування					Триботехнічні властивості			
		$\tau_f, \times 10^3$ с	$S, \times 10^{-1}$ см ²	$n_{КТ},$ об./хв.	$N,$ кгс	$l,$ км	$i_q, \times 10^{-4}$ мг/см ² ·км·с	$I_{КТ},$ мг/см ² ·км	$I_q,$ мг/см ² ·км	f
001 (1)	70ХЛ	6,0	5,024	1000,0	0,250	10,0	1,659	0,348	0,995	0,609
002 (2)	75ХФЛЛ						1,310	0,119	0,786	0,666
003 (3)	75ХФЛЛ						0,730	0,617	0,438	0,589

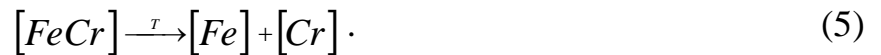
Примітки: КТ – контртіло, τ_f – тривалість випробування, $n_{КТ}$ – частота обертання контртіла, i_q – швидкість зносу литого зразка, $I_{КТ}$ – спрацювання матеріалу контртіла

них зон товщиною 0,15...0,18 мм говорить про те, що зв'язок у системі *CЧ300-Ст3-ЧХЗ* носить дифузійний характер.

Графічна інтерпретація експериментальних даних (рис. 15) дозволила з'ясувати, що твердість функціональних шарів двомірного ЛКМ системи *CЧ300-Ст3-ЧХЗ* залежить від висоти композитного вилівка. Це є наслідком впливу гідро-, газодинаміки ЛГМ-процесу на концентрацію ДІ, а в кінцевому результаті, і на твердість матеріалу литих зразків, визначену за шкалою Брінелля.

Четвертий розділ присвячений дослідженню можливості армуванню сплавів кольорових *Me* дисперсним інтерметалідом *FeCr* у «порожнині» ЛФ за ЛГМ-процесом. У цьому розділі вивчено мікроструктуру ливарної *Si*-латуні марки ЛЦ16К4 та ливарних *Al*-сплавів марок АК12М2МгН й АК12, композиційно зміцнених σ -фазою з використанням ДНГМ. Досліджено вплив гідро-, газодинаміки ЛГМ-процесу на механічні й триботехнічні властивості досліджуваних матеріалів, розкрито механізм процесу інокулювання сплавів на основі *Cu* та *Al* за допомогою ДНГМ.

Із застосуванням МГА встановлено, що мікроструктура нульмірного ЛКМ системи *Al-FeCr* (рис. 16) є оптимальною, а контрольного вилівка (рис. 17) – відповідає мікроструктурі поршневого *Al*-сплаву марки АК12М2МгН, на основі якого цей композит було отримано. Оскільки, за результатами МГА в структурі ливарної *Si*-латуні марки ЛЦ16К4 (рис. 18), інокульованої дисперсним інтерметалідом *FeCr*, наявні колонії та поодинокі включення ДІ (рис. 19), а температура *Cu-Zn*-розплаву під час формозаповнення значно перевищує 1093 К, то σ -фаза перетворюється у твердий розчин *Cr* в *Fe* і, в даному випадку, в системі *Me-розплав – ДІ* має місце термодисоціація молекул інтерметалідної АФ, а відтак протікає хімічна реакція [13]:



Візуалізація результатів проведених досліджень (рис. 20) дозволила з'ясувати, що по мірі збільшення висоти литого зразка концентрації *Fe* та *Cr* у ливарній *Si*-латуні марки ЛЦ16К4 поступово зростають. Графічна інтерпретація експериментальних даних (рис. 21) показала, що між концентраціями *Fe* й *Cr* також існує функціональний зв'язок. Це пояснюється тим, що структуроутворення латунних вилівок відбувається, перш за все, під впливом гідро-, газодинаміки ЛГМ-процесу, на яку накладається ще й концентрація *Fe* у сплаві вихідного складу, а нелінійний характер таких співвід-

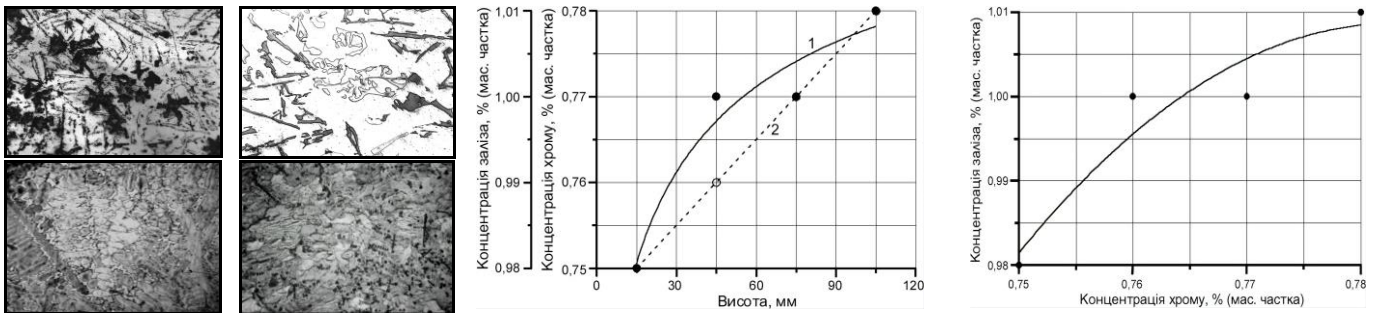


Рисунок 16 (1-й верхній) – Мікроструктура ($\times 100$) нульмірного ЛКМ системи *Al-FeCr*

Рисунок 17 (2-й верхній) – Мікроструктура ($\times 100$) поршневого *Al*-сплаву марки АК12М2МгН

Рисунок 18 (1-й нижній) – Мікроструктура ($\times 250$) ливарної *Si*-латуні марки ЛЦ16К4

Рисунок 19 (2-й нижній) – Мікроструктура ($\times 250$) нульмірного ЛКМ системи *Cu-FeCr*

Рисунок 20 (середній) – Розподіл $[Fe]_a$ та $[Cr]_a$ по висоті латунного вилівка: 1 – $[Fe]_a$; 2 – $[Cr]_a$

Рисунок 21 (правий) – Залежність $[Fe]_a$ в ливарній *Si*-латуні марки ЛЦ16К4 від $[Cr]_a$ в ній

ношень (див. рис. 20, 21) лише підтверджує зроблене раніше припущення.

Графічна інтерпретація результатів поставленого експерименту та їх математична обробка на практиці довели, що механічні й триботехнічні характеристики досліджуваних матеріалів (рис. 22) залежать від висоти литих зразків. Такий тип залежностей пояснюється впливом концентрацій Fe та Cr в латунних виливках (див. рис. 21), які (концентрації Fe й Cr), у свою чергу, залежать від гідро-, газодинаміки ЛГМ-процесу і вони також розподілені по висоті литих зразків.

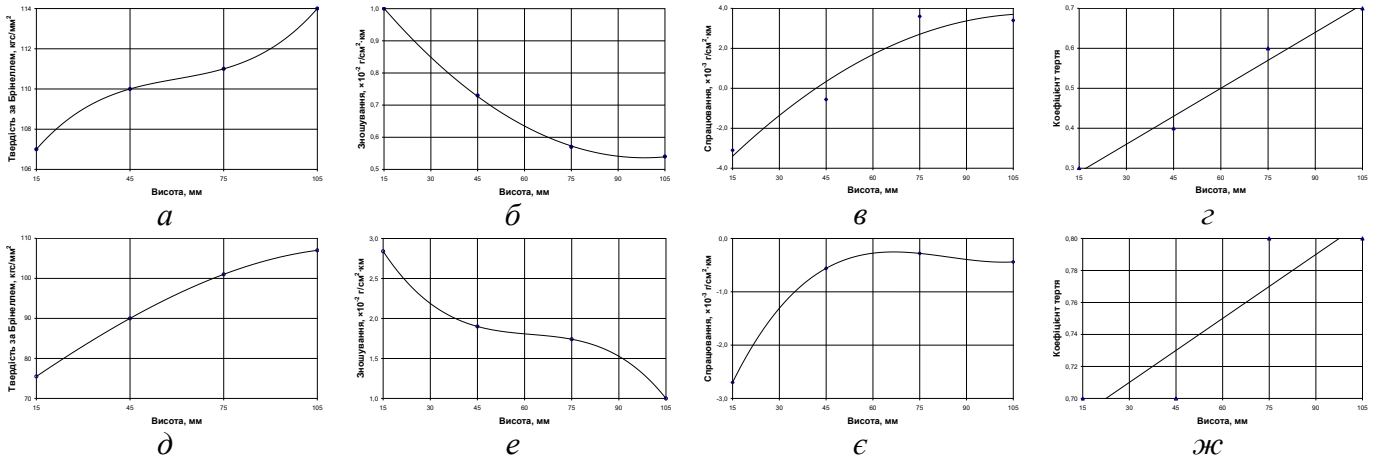


Рисунок 22 – Розподіл механічних (а, д) й триботехнічних (б...г, е...ж) властивостей нульмірного ЛКМ системи $Cu-FeCr$ (а...г) та ливарної Si -латуні марки ЛЦ16К4 (д...ж) по висоті досліджуваних виливків

Результати МГА досліджуваних матеріалів показали, що топографія й морфологія евтектичних та інших виділень і включень Me -матриці нульмірного ЛКМ системи $Al-FeCr$ (рис. 23) й основи силуміну евтектичного складу марки АК12 (рис. 24) в усіх темплетах майже однакові. Разом із тим, середня дисперсність (d_{AF}) і питома кількість включень (n_{AF}) інтерметалідної АФ (рис. 25) змінюються в залежності від висоти композитного виливка. Аналіз результатів проведених досліджень дозволив дійти висновку, що висота литих зразків впливає на мікротвердість основних структурних складових (рис. 26) як досліджуваного композиту, так і ливарного Al -сплаву, на основі якого нульмірний ЛКМ системи $Al-FeCr$ був отриманий.

Графічна інтерпретація експериментальних даних (рис. 27) дозволила з'ясувати, що між висотою литих зразків та механічними характеристиками нульмірного ЛКМ системи $Al-FeCr$ й базового Al -сплаву марки АК12 існує яскраво виражена функціональна залежність. В усіх випадках, механічні властивості і триботехнічні характеристики досліджуваних виливків та відповідних пар тертя (рис. 28) є номінальними у нижній (0...100 мм) та верхній (200...300 мм) їх частинах.

Огляд зламу зразків ЛКМ системи $Al-FeCr$ після їх розриву показав, що руйнування носить крихкий інтеркристалітний характер, чого не можна сказати про контрольний виливок. Для остаточного підтвердження цього припущення необхідно щоб виконувалася умова крихкого руйнування матеріалу, за якого руйнівне напруження було б не меншим запропонованого Г.І. Белявським та Є.П. Шалуновим, тобто [3, 14]:

$$\sigma_f = \frac{4 \mu \gamma}{\alpha k \sqrt{l}}, \quad (6)$$

де σ_f – напруга зародження тріщини, МПа; μ – модуль зрушення, МДж/м²; γ – ефективна поверхнева енергія тріщини, МДж/м²; α – частка енергії дислокації, МДж/м; k

– коефіцієнт пропорційності, $m^{-0,5}$; l – довжина смуги ковзання, м.

Механічні випробування литих зразків показали, що σ_6 та δ_5 нульмірного ЛКМ системи $Al-FeCr$, в середньому, на 17,5 МПа та 1,9 % нижчі тих самих властивостей контрольного Al -сплаву марки АК12, відповідно, у той час як HV композитного виливка є на 12,8 кгс/мм² вищою HV відповідного базового сплаву. Проте, δ_5 й HV нульмірного ЛКМ системи $Al-FeCr$, відповідно, на 0,3 % більше δ_5 за лиття під тиском й на 24,7 кгс/мм² перевищує HV за всіх інших способів лиття ливарного Al -сплаву марки АК12, регламентованих ДСТУ 2839:1994.

Експериментально доведено, що триботехнічні властивості досліджуваних матеріалів залежать від висоти піддослідних виливків. Графічна інтерпретація (див. рис. 28) результатів проведених досліджень наведена далі за текстом.

Для візуалізації у ФТІМС НАН України була створена фізична модель ЛГМ-процесу з поправкою на ДНГМ та виведено рівняння теплового балансу системи Me -розплав – ГМ – ДІ – ЛФ, а також зроблено акцент на конвективну складову процесу масоперенесення ДІ в об'ємі металічної ванни, що описано за допомогою напівемпіричного диференційного рівняння конвективної дифузії [4]:

$$-\frac{\partial}{\partial x}(v_{Me} C_{ди} S) dx df = v_{Me} C_{ди} S df - \left(v_{Me} + \frac{\partial v_{Me}}{\partial x} dx \right) \left(C_{ди} + \frac{\partial C_{ди}}{\partial x} dx \right) \left(S + \frac{\partial S}{\partial x} dx \right), \quad (7)$$

де x – координата лінійного простору, м; v_{Me} – швидкість течії матричного розплаву у «порожнині» ливарної форми, м/с; $C_{ди}$ – концентрація твердих часток дисперсного інокулятора у матричному розплаві, кг/м³; S – відносна кількість матричного розплаву у двофазній зоні; f – площа поперечного перерізу ливарної форми у напрямку, перпендикулярному конвективному потоку матричного розплаву, м².

У п'ятому розділі наведено хімічний склад дослідно-експериментальних сплавів (чавунів, сталей, Si -латуні, Al -сплавів) та коротко описана технологія їх приготування, охарактеризовано модельні й шихтові матеріали. Розділ присвячено металургійним параметрам ЛГМ-процесу і техніко-економічним показникам (ТЕП) при інокулюванні $Fe-C$ -сплавів та сплавів кольорових Me із застосування ДНГМ.

Вихідний сплав, мікроструктура і твердість якого відповідають сірому чавуну марки СЧ300, виплавлено в індукційній тигельній печі моделі «ИЧТ-016». Хімічний склад досліджуваного матеріалу наведено далі за текстом, % (мас. частка): C – 3,10; Si – 1,25; Mn – 0,74; S – 0,12; P – 0,20; Fe – решта.

Щоб отримати нульмірний ЛКМ системи $Al-FeCr$ було приготовлено ливарний Al -сплав марки АК12. Досліджуваний матеріал виплавили у тигельній печі опору моделі «САТ-025-И2». Хімічний склад цього матеріалу наведено далі за текстом, % (мас. частка): Si – 11,00; Mg – 0,03; Cu – 1,11; Mn – 0,37; Ni – 0,03; Ti – 0,06; Fe – 0,50; Cr – 0,02; Al – решта. Як АФ досліджуваного композиту, у цій дисертації був використаний дисперсний інтерметалід $FeCr$, більш відомий у сплавах системи $Fe-Cr$ як σ -фаза, у кількості 10 % від маси контрольного виливка.

Показники економічної ефективності процесу інокулювання чавунів та ливарних Al -сплавів у «порожнині» ЛФ за ЛГМ-процесом, які наведені у табл. 4 представленій нижче, були отримані завдяки використанню пилоподібних відходів феросплавної галузі. Собівартість додаткового легування сірого чавуну марки СЧ200 феритно-перлітного класу конопатковим стабілізованим Si -порошком марки ПМС-К

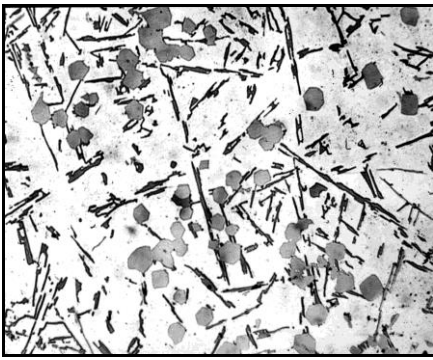


Рисунок 23 – Фрагмент мікроструктури (×200) нульмірного ЛКМ системи *Al-FeCr*



Рисунок 24 – Фрагмент мікроструктури (×200) ливарного *Al*-сплаву (силуміну евтектичного складу) марки АК12

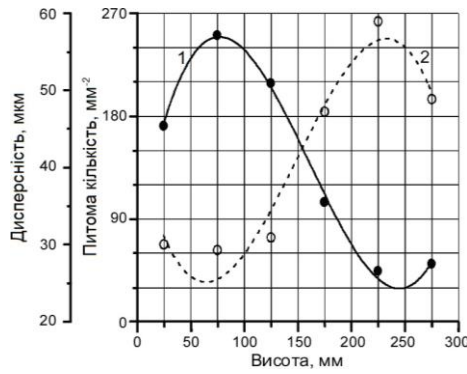


Рисунок 25 – Вплив висоти виливка на мікроструктуру ЛКМ системи *Al-FeCr*: 1 – дисперсність часток АФ; 2 – питома кількість включень інтерметаліду *FeCr*

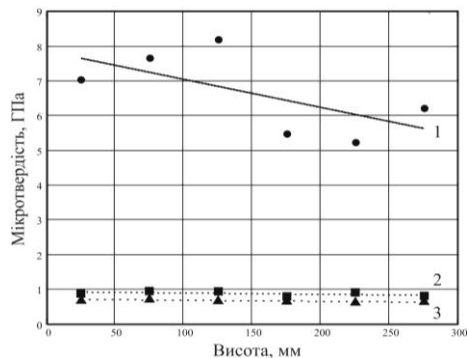


Рисунок 26 – Залежність мікротвердості структурних складових нульмірного ЛКМ системи *Al-FeCr* (1, 3) й ливарного *Al*-сплаву марки АК12 (2) від висоти литого зразка: 1 – інтерметалідна АФ; 2, 3 – *Al*-матриця

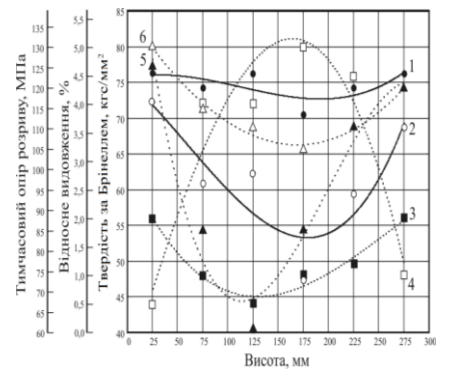


Рисунок 27 – Зміна механічних властивостей ЛКМ системи *Al-FeCr* (1, 3, 5) й *Al*-сплаву марки АК12 (2, 4, 6) по висоті виливка: 1, 2 – *HV*; 3, 4 – δ_5 ; 5, 6 – σ_e

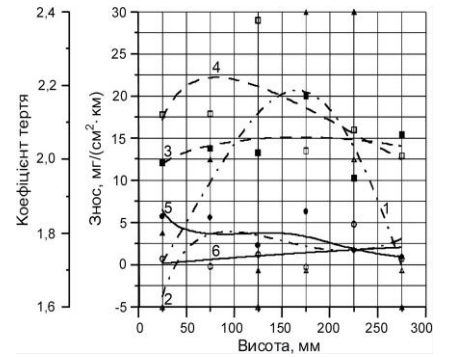


Рисунок 28 – Вплив висоти виливка на: 1, 2 – коефіцієнти тертя ковзання пар ЛКМ системи *Al-FeCr* – Сталь 40X та Сплав АК12 – Сталь 40X, відповідно; 3, 4 – зношування, відповідно, ЛКМ системи *Al-FeCr* й *Al*-сплаву марки АК12; 5, 6 – спрацювання контртіла, що працює у парі з ЛКМ системи *Al-FeCr* та *Al*-сплавом марки АК12, відповідно

здобута з поправкою на те, що вартість порошку (за даними ФТІМС НАН України) на 20 % більша кускової міді. Зразки нульмірного ЛКМ системи *Al-FeCr* були одер-

Таблиця 4 – Собівартість* [ПДВ (20 %), врахований] придатного литва

Тип досліджуваного виливка	Собівартість в залежності від технології (методу) інокулювання, грн./т			
	ДНГМ	Ківш	КВ	РК
СЧ300 + ФС75	043.350,00	051.300,00	–	050.910,00
СЧ200 + ПМС-К	044.250,00	051.510,00	–	051.120,00
ЧХ1 ДСТУ 8851:2019	043.650,00	052.110,00	–	051.810,00
ЧХ3 ДСТУ 8851:2019	042.960,00	054.210,00	–	053.400,00
ВЧ500-7 ДСТУ 3925:1999	052.050,00	061.110,00	–	060.720,00
ЛКМ системи <i>Al-FeCr</i>	114.174,00	–	130.020,00	130.200,00
ЛКМ системи <i>СЧ300-См3-ЧХ3</i>	043.270,00	–	–	051.420,00

*Результати ФТІМС НАН України станом на 1 червня 2019 року

жані так само, як і сірого чавуну марки СЧ200 з феритно-перлітною основою.

ВИСНОВКИ

На підставі результатів проведених досліджень виявлено закономірності впливу теплофізичних й фізико-хімічних процесів, які відбуваються в системі *Me-розплав – ДНГМ – ЛФ* [10, 13], на розподіл легуючих елементів (ЛЕ) та елементів-модифікаторів (ЕМ) у рідких і твердіючих залізовуглецевих сплавах (*Fe-C*-сплавах) [10], що, у свою чергу, дозволило дисертанту з'ясувати їх вплив на структуру, механічні й спеціальні властивості матеріалу в об'ємі литих зразків. Піддослідними матеріалами були різновиди ливарних сталей і сплавів. Виявлено також особливості структуроутворення та умови формування механічних і триботехнічних характеристик виливків із сплавів кольорових металів (ливарних *Al*-сплавів й ливарної *Si*-латуні), армованих дисперсним інтерметалідом *FeCr* [13]. Експериментально доведено ефективність інокулювання ливарних сплавів за допомогою дисперсно-наповненої газмоделі (ДНГМ) з метою одержання виробів (виливків) з диференційованими та спеціальними властивостями (ВДСВ). До таких ВДСВ належать литі композиційні матеріали (ЛКМ) та литі армовані конструкції. Виходячи із цих міркувань, здобувач дійшов висновків, які дали йому змогу визначитись у наступному:

1. Проведено глибокий аналіз накопичених літературних даних, розкрито стан питання на сьогоднішній день та визначено основні напрями досліджень, що зводилися до інокулювання сплавів чорних і кольорових металів у «порожнині» ливарної форми (ЛФ) за ЛГМ-процесом.

2. Запропоновано методику дослідження впливу гідро-, газодинаміки ЛГМ-процесу на показники засвоєння дисперсного інокулятора (ДІ) матричним розплавом {концентрацію ДІ в піддослідному матеріалі ($[E]_i$), коефіцієнт засвоєння ДІ рідким металом ($k_{[E]}$)}, параметри мікроструктури литих зразків {кількість перліту ($[П]$), кількість фериту ($[Ф]$), кількість структурно вільного цементиту ($[Fe_3C]$), кількість пластинчастого графіту ($[ПГ]$), довжину включень пластинчастого графіту ($l_{ПГ}$), дисперсність армуючої фази ($d_{AФ}$), питому кількість включень армуючої фази ($n_{AФ}$)}, механічні [тимчасовий опір розриву (σ_e), відносне видовження (δ_5), твердість (*НВ*), ударну в'язкість (a_n)] й триботехнічні [швидкість зносу виливка (i_q), зношування литого зразка (I_q), спрацювання контртіла ($I_{КТ}$), коефіцієнт тертя ковзання контактної пари (f)] властивості ливарних сталей і сплавів, а також залежності концентрації *Si* в сірому чавуні після графітизуючого модифікування його структури ($[Si]_m$), коефіцієнта засвоєння *Si* матричним розплавом ($k_{[Si]}$), $[П]$, $[Ф]$, $[Fe_3C]$, $[ПГ]$, $l_{ПГ}$ та *НВ* литих зразків від технологічних параметрів ЛГМ-процесу, тобто вмісту дисперсного феросиліцію марки ФС75 у «тілі» газмоделі ($C_{ФС75}^{ГМ}$), густини модельного матеріалу ($\rho_{ГМ}$), швидкості формозаповнення ($v_{Me}^{ЛФ}$) й температури заливання (T_{Me}^0).

3. Експериментально доведено, що під впливом гідро-, газодинаміки ЛГМ-процесу, показники засвоєння ДІ рідким металом, структура та властивості ливарних сплавів змінюються у контрольній площині піддослідних виливків. Так, наприклад, для сірого чавуну хімічний склад, мікроструктура і твердість якого є характерними для марки СЧ300 ДСТУ 8833:2019, зазначені характеристики набувають значень: $[Si]_m = 1,25...1,91$ % (мас. частка); $k_{[Si]} = 0,00...0,88$; $[П] = 59...90$ % (за площею); $[Ф] = 0...4$ % (за площею); $[Fe_3C] = 1...40$ % (за площею); $[ПГ] = 1...5$ % (за

площею); $l_{ПГ} = 15...45$ мкм; $HB = 229...321$ кгс/мм². Результати рентгенофлуоресцентного (РФА) та металографічного аналізів (МГА), а також механічних випробувань литих зразків показали, що, крім розглянутого вище сірого чавуну марки СЧ300, Fe-C-сплави мають оптимальну структуру й номінальну твердість, які відповідають сірим чавунам марок СЧ200, СЧ250 ДСТУ 8833:2019, високоміцному чавуну марки ВЧ500-7 ДСТУ 3925:1999, жаростійкому Cr-чавуну марки ЧХ1 ДСТУ 8851:2019 та жаро-, зносостійкому Cr-чавуну марки ЧХ3 ДСТУ 8851:2019, а також зносостійким низьколегованим сталям марок 70ХЛ й 75ХФТЛ ТУ 4112-78269737-001-2005. Структура та властивості ливарних Al-сплавів марок АК12М2МгН й АК12 ДСТУ 2839:1994, як і ливарної Si-латуні марки ЛЦ16К4 ГОСТ 17711-93, армованих дисперсною σ -фазою, є характерними для нульмірних ЛКМ систем Al-FeCr та Cu-FeCr. Для сплавів цієї групи $k_{[E]} \approx 0,25...1,00$.

4. Як і при литті сталей і чавунів традиційними способами, між показниками засвоєння ДІ матричним розплавом ($[E]_i$ й $k_{[E]}$), параметрами мікроструктури ливарних сплавів ($[П]$, $[Ф]$, $[Fe_3C]$, $[ПГ]$, $l_{ПГ}$, $d_{AФ}$, $n_{AФ}$) та їх властивостями (σ_6 , δ_5 , HB , a_n , i_q , $I_{КТ}$, I_q , f) існує функціональний зв'язок, що доводить ефективність їх (сталей і чавунів) інокулювання у «порожнині» ЛФ за ЛГМ-процесом. Для усіх функціональних залежностей, заданих у табличній формі, $R^2 \approx 0,95$.

5. Результати експерименту показали, що між незалежними факторами, тобто технологічними параметрами ЛГМ-процесу ($C_{ФС75}^{ГМ}$, $\rho_{ГМ}$, $v_{Me}^{ЛФ}$, T_{Me}^0), показниками засвоєння Si рідким металом ($[Si]_m$ та $k_{[Si]}$), параметрами мікроструктури сірого чавуну марки СЧ300 ($[П]$, $[Ф]$, $[Fe_3C]$, $[ПГ]$, $l_{ПГ}$) й HB литих зразків також існує функціональний зв'язок, який заданий у табличній формі. Щоб з'ясувати його характер, було проведено регресійний аналіз результатів повнофакторного експерименту та виведено відповідні рівняння регресії. Ці рівняння можна виразити лінійними рівняннями, які мають вигляд: $[Si]_m \cdot k_{[Si]} \cdot [П] \cdot [Ф] \cdot [Fe_3C] \cdot [ПГ] \cdot l_{ПГ} \cdot HB = A \left(C_{ФС75}^{ГМ}, \rho_{ГМ}, v_{Me}^{ЛФ}, T_{Me}^0 \right) + B$.

Варіювання кожного фактора здійснювалось на 2-х рівнях: $C_{ФС75}^{ГМ} = 0,2...1,0$ % (мас. частка); $\rho_{ГМ} = 20...50$ кг/м³; $v_{Me}^{ЛФ} = 25...50$ мм/с; $T_{Me}^0 = 1523...1753$ К. Графічна інтерпретація рівнянь регресії показала, що приріст незалежних факторів призводить до підвищення $[Si]_m$ й $k_{[Si]}$, сприяє збільшенню $[П]$, $[ПГ]$ та $l_{ПГ}$, а також є причиною зменшення $[Ф]$, $[Fe_3C]$ і зниження HB . В залежності від співвідношення технологічних параметрів ЛГМ-процесу характеристики, які регламентовані ДСТУ 8833:2019, набувають значень: $[Si]_m = 1,262...1,820$ % (мас. частка); $k_{[Si]} = 0,08...0,77$; $[П] = 69...93$ % (за площею); $[Ф] = 0...4$ % (за площею); $[Fe_3C] = 4...25$ % (за площею); $[ПГ] = 2...5$ % (за площею); $l_{ПГ} = 15...45$ мкм; $HB = 187...388$ кгс/мм².

6. З'ясовано, що металургійна обробка відповідного чавунного розплаву Si-порошком марки ПМС-К, дисперсними феросиліцієм марки ФС75, комплексним сфероїдизуючим модифікатором марки ФСМг7 та ферохромом марки ФХ650А забезпечила піддослідним виливкам оптимальну мікроструктуру й номінальну HB , а мікролегування розплаву зносостійкої Cr-сталі марки 70ХЛ дисперсними ферованадієм марки ФВд40У0,75 та феротитаном марки ФТи70С1 одночасно, з подальшою термічною обробкою (ТО), дозволило покращити механічні властивості уже складнолегованої сталі марки 75ХФТЛ на 75,3...193,6 %, а зносостійкість – на 56,0 %.

7. Наявність в структурі двомірного ЛКМ системи *СЧ300-Ст3-ЧХ3* розмитих меж розділу суміжних фаз та перехідних зон між дотичними функціональними шарами товщиною 0,15...0,18 мм вказує на існування в даній системі дифузійного зв'язку, у той час коли зв'язок інтерметалідної АФ з *Me*-матрицею в структурі нульмірного ЛКМ системи *Al-FeCr* носить адгезійно-механічний характер.

8. Встановлено, що *HV* нульмірного ЛКМ системи *Al-FeCr* на 12,8 кгс/мм² перевищує *HV* контрольного вилівка, а триботехнічні властивості композитного вилівка на 15,0...20,0 % більші аналогічних характеристик ливарних *Al*-сплавів марок АК12М2МгН та АК12. Крім того, *HV* нульмірного ЛКМ системи *Cu-FeCr*, в середньому, на 18,3 % перевищує аналогічну характеристику ливарної *Si*-латуні марки ЛЦ16К4, а триботехнічні властивості – на 33,3...62,0 %.

9. З позиції фундаментальних положень природничих наук розкрито механізм процесу інокулювання сплавів чорних і кольорових металів за допомогою ДНГМ. Для цього було використано створену у ФТІМС НАН України фізичну модель ЛГМ-процесу з поправкою на ДНГМ та виведене рівняння теплового балансу системи *Me-розплав – ДНГМ – ЛФ* [10, 13], а також зроблено акцент на конвективну складову процесу масоперенесення ДІ в об'ємі металічної ванни.

10. Собівартість придатного литва (*СЧ200, СЧ300, ВЧ500-7, ЧХ1, ЧХ3*, нульмірний ЛКМ системи *Al-FeCr*, двомірний ЛКМ системи *СЧ300-Ст3-ЧХ3*), отриманого шляхом інокулювання ливарних сталей і сплавів у «порожнині» ЛФ за ЛГМ-процесом, є на 15,5...26,2 % нижчою собівартості литва, одержаного традиційними способами, а економічний ефект, в середньому, становить 10.557,45 грн./т.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

а) В яких опубліковані основні наукові результати дисертаційної роботи

1. Гаврилук В.П., Шинский О.И., Ткачук И.В., Небожак И.А. Исследование возможности получения монолитных износостойких композиционных отливок и двухслойных отливок с износостойким композиционным слоем по ЛГМ-процессу. *Процессы литья*. 2000. № 3. С. 86–91.

2. Небожак І.А., Суменкова В.В., Ткачук І.В., Шинський О.Й. Особливості структуроутворення СЧ30, модифікованого ФС75 у «порожнині» ливарної форми за ГАМОЛІВ-процесом. *Металознавство та обробка металів*. 2001. № 4. С. 43–49.

3. Небожак И.А., Шинский О.И., Гаврилук В.П., Панасенко Д.Д. Механические свойства изотропных литых композиционных материалов системы [Al – FeCr], полученных методом литья по газифицируемым моделям. *Процессы литья*. 2004. № 2. С. 83–87.

4. Небожак І.А., Новицький В.Г., Шинський О.Й., Гаврилук В.П. Триботехнічні властивості сплаву АК12, армованого дисперсним інтерметалідом FeCr. *Металознавство та обробка металів*. 2004. № 2. С. 62–70.

5. Небожак І.А., Суменкова В.В., Шинський О.Й., Онищук О.О. Використання дисперсно-наповнених моделей, що газифікуються, для отримання чавунних вилівок. *Металознавство та обробка металів*. 2005. № 4. С. 19–22.

6. Небожак И.А., Суменкова В.В., Шинский О.И. Исследование эффективности внутриформенного модифицирования отливок из серого чугуна ферросилици-

ем при литве по газифицируемым дисперсно-наполненным моделям. *Процессы литья*. 2008. № 5. С. 50–56.

7. **Небожак И.А.**, Пилипенко Т.К., Суменкова В.В., Шинский О.И. Микроструктура модифицированных ферросилицием чугуновых отливок, полученных с помощью газифицируемых дисперсно-наполненных моделей. *Процессы литья*. 2009. № 3. С. 17–23.

8. **Небожак И.А.**, Суменкова В.В., Шинский О.И., Бабюк В.Д., Жидков Е.А. Эффективность графитизирующего модифицирования серого чугуна с помощью дисперсно-наполненной газифицируемой модели. *Литье и металлургия*. 2015. № 4. С. 56–66 (ISSN 1683-6065; режим доступа: <https://lim.bntu.by/jour/article/view/709>, РБ).

9. **Небожак И.А.**, Суменкова В.В., Шинский О.И. Влияние технологических параметров ЛГМ-процесса на эффективность графитизирующего модифицирования серого чугуна в «полости» литейной формы. *Металл и литье Украины*. 2016. № 5 (276). С. 9–17; режим доступа: <http://dspace.nbu.gov.ua/bitstream/handle/123456789/162954/02-Nebozhak.pdf?sequence=1> (категорія «В»).

10. **Небожак І.А.**, Калюжний П.Б., Суменкова В.В., Шинський О.Й. Вплив технологічних параметрів ЛГМ-процесу на мікроструктуру сірого чавуну, модифікованого дисперсним феросиліциєм у «порожнині» ливарної форми. *Процеси литья*. 2020. № 2 (140). С. 53–64; режим доступа: <https://doi.org/10.15407/plit2020.02.053>.

11. **Небожак І.А.**, Дерев'янку О.В. Структура литого композиційного матеріалу системи [Al – FeCr], отриманого з використанням дисперсно-наповненої моделі, що газифікується. *Метал та литья України*. 2021. Т. 29, № 1 (324). С. 70–80; режим доступа: <https://doi.org/10.15407/scin15.04.005> (категорія «Б», DOAJ).

12. **Небожак І.А.**, Небожак Я.І., Пересенчук В.В., Шинський О.Й. Дослідно-експериментальна партія виливків, отриманих за допомогою дисперсно-наповнених моделей, що газифікуються. *Метал та литья України*. 2021. Т. 29, № 4 (327). С. 78–84; режим доступа: <https://doi.org/10.15407/steelcast2021.04.078> (категорія «Б», DOAJ).

13. **Небожак І.А.**, Дерев'янку О.В., Верховлюк А.М., Каніболоцький Д.С. Характер зв'язку армуючої фази з матрицею в литому композиційному матеріалі системи [Al – FeCr] та механізм процесу армування ливарних Al-сплавів за ЛГМ-процесом. *Метал та литья України*. 2022. Т. 30, № 4 (331). С. 36–47; режим доступа: <https://doi.org/10.15407/steelcast2022.04.036> (категорія «Б», DOAJ).

14. **Nebozhak I.A.**, Derev'yanko O.V., Verkhovliuk A.M., Kanibolotsky D.S., Novytskyi V.H. Influence Of Microstructure Parameters Of [Al – FeCr] Cast Composite Material, Obtained In The «Volume» Of Foundry Mold Using Lost-Foam Casting Process, On Its Mechanical Characteristics. *Metal and Casting of Ukraine*. 2023. Vol. 31, No 2 (333). P. 51–61; режим доступа: <https://doi.org/10.15407/steelcast2023.02.051> (категорія «Б», DOAJ).

15. **Небожак І.А.**, Новицький В.Г., Дерев'янку О.В., Каніболоцький Д.С., Верховлюк А.М. Залежність триботехнічних властивостей литого композиційного матеріалу системи [Al – FeCr], отриманого з використанням дисперсно-наповненої газмоделі, від параметрів його мікроструктури. *Метал та литья України*. 2023. Т. 31, № 3 (334). С. 8–20; режим доступа: <https://doi.org/10.15407/steelcast2023.03.008> (категорія «Б», DOAJ).

16. **Nebozhak I.A.**, Novytskyi V.G., Dzevin Ie.M., Verkhovliuk A.M. The Structure and Properties of G-CuZn15Si4 Cast Brass After Inoculation of Its Melt with Dispersed FeCr Intermetallic Component. *Metallofizika i Noveishie Tekhnologii*. 2024.

Vol. 46, No 5. P. 385–413; режим доступу: <https://doi.10.15407/mfint.46.05.0385> (Категорія «А»; Scopus, WoS, Q3).

б) Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації

17. **Небожак І.А.** Особенности структурообразования железоуглеродистых и цветных сплавов, обработанных ферродобавками в «полости» литейной формы по ГАМОЛИВ-процессу. *Литейное производство в новом веке – как победить в конкуренции*: тезисы докл. Междунар. науч.-тех. конгресса. Киев: Редакция журнала «Процессы литья» при участии МП «Информлитьё», 2002. С. 13–14.

18. **Небожак І.А.** Влияние армирования дисперсным интерметаллидом FeCr, имплантированным в газифицируемую модель, на структуру и триботехнические свойства сплава АК12. *Литейное производство: высококачественные отливки на основе эффективных технологий*: тезисы докл. Междунар. науч.-тех. конгресса. Киев: Редакция журнала «Процессы литья» при участии МП «Информлитьё», 2004. С. 86–87.

19. **Небожак І.А.,** Суменкова В.В. Технології отримання точних виливків із чавуну за моделями, що газифікуються, наповненими дисперсною легуючою та модифікуючою фазою. *Экономический путь к высококачественному литью*: тезисы докл. Междунар. науч.-тех. конгресса. Киев: Редакция журнала «Процессы литья» при участии МП «Информлитьё» и ООО «НПО «Лидер-К», 2005. С. 100–102.

20. **Ivan A. Nebozhak,** Viktor G. Novytskyu, Oleg I. Shynsky, Vladimir P. Navryliuk. Wear Rate Of Aluminum Alloys Reinforced By Means Of Dispersed Intermetallic Compound Fe-Cr Under Dry Friction. *Proceedings Of WTC2005 World Tribology Congress III: Proceedings Of WTC2005 (September 12–16, 2005, Washington, D.C., USA)*. Washington: WTC2005-63062, 2005. P. 1–2 (ISBN 0791842010, 978-079184201-0; режим доступу: <https://conferencetoolbox.org/wtc05>, США).

21. **Небожак І.А.** Влияние армирования дисперсным интерметаллидом FeCr, имплантированным в газифицируемую модель, на структуру и механические свойства сплава АК12. *Литьё-2016*: тезисы докл. XII Междунар. науч.-практ. конф. Запорожье, 2016. С. 166–168.

22. **Небожак І.А.** Вплив технологічних параметрів ЛГМ-процесу на ефективність графітізуючого модифікування сірого чавуну у «порожнині» ливарної форми. *Литво. Металургія. 2018*: тези доп. XIV Міжнар. наук.-практ. конф. (22–24 трав. 2018 р., м. Запоріжжя) / під заг. ред. д.т.н., проф. О.І. Пономаренко. Запоріжжя: АА Тандем, 2018. С. 146–148; ISBN 978-966-488-169-9, режим доступу: https://nmetau.edu.ua/file/litvo__metallurgiya_2018.pdf.

23. **Небожак І.А.,** Шинський О.Й. Параметри трибоструктури ЛКМ системи [Al – FeCr], отриманого за допомогою дисперсно-наповненої газомоделі. *Литво. Металургія. 2021*: тези доп. XVII Міжнар. наук.-практ. конф. (18–20 трав. 2021 р., м. Запоріжжя) / під заг. ред. д.т.н., проф. О.І. Пономаренко. Запоріжжя: АА Тандем, 2021. С. 128–130; ISBN 978-966-488-169-9, режим доступу: https://nmetau.edu.ua/file/lite._metallurgiya._2021.pdf.

24. **Небожак І.А.,** Шинський О.Й. Характер зв'язку між структурними складовими ЛКМ системи [Al – FeCr], отриманого у «порожнині» ливарної форми за ЛГМ-процесом. *Литво. Металургія. 2021*: тези доп. XVII Міжнар. наук.-практ. конф. (18–20 трав. 2021 р., м. Запоріжжя) / під заг. ред. д.т.н., проф. О.І. Пономаренко. Запорі-

жжя: АА Тандем, 2021. С. 131–134; ISBN 978-966-488-169-9, режим доступу: https://nmetau.edu.ua/file/lite._metallurgiya._2021.pdf.

25. **Небожак І.А.**, Суменкова В.В., Шинський О.Й. Залежність показників засвоєння кремнію матричним розплавом від технологічних параметрів ЛГМ-процесу. *Литво. Металургія. 2021: тези доп. XVII Міжнар. наук.-практ. конф. (18–20 трав. 2021 р., м. Запоріжжя) / під заг. ред. д.т.н., проф. О.І. Пономаренко. Запоріжжя: АА Тандем, 2021. С. 135–139; ISBN 978-966-488-169-9, режим доступу: https://nmetau.edu.ua/file/lite._metallurgiya._2021.pdf.*

26. **Nebozhak I.A.**, Derev'yanko O.V., Verkhovliuk A.M. Research Of The Possibility Of Obtaining A Two-dimensional Cast Composite Material Of The System «Gray Cast Iron – Steel – Heat-resistant Cast Iron». *Литво. Металургія. 2023: тези доп. XIX Міжнар. наук.-практ. відеоконф. (10–12 жовт. 2023 р., м.м. Харків–Київ) / Під заг. ред. д.т.н., проф. Пономаренко О.І. Харків: НТУ «ХП», 2023. С. 21–23; ISBN 978-966-488-169-9, режим доступу: <https://doi.org/10.15407/foundry-metallurgy-2023>.*

27. **Небожак І.А.**, Каніболоцький Д.С., Дерев'янку О.В., Верховлюк А.М. Вплив показників засвоєння кремнію матричним розплавом на структуру та властивості сірого чавуну, модифікованого з використанням дисперсно-наповненої моделі, що газифікується. *Литво. Металургія. 2023: тези доп. XIX Міжнар. наук.-практ. відеоконф. (10–12 жовт. 2023 р., м.м. Харків–Київ) / Під заг. ред. д.т.н., проф. Пономаренко О.І. Харків: НТУ «ХП», 2023. С. 148–152; ISBN 978-966-488-169-9, режим доступу: <https://doi.org/10.15407/foundry-metallurgy-2023>.*

28. **Небожак І.А.**, Сергієнко Р.А., Верховлюк А.М., Щерецький О.А., Биба Є.Г., Каніболоцький Д.С., Бабюк В.Д., Жидков Є.А. Спеціальні властивості ливарних сталей та високоентропійних сплавів. *Процеси механічної обробки, верстати та інструмент: збірник наукових праць: тези доп. XIII Всеукр. наук.-техн. конф. з міжнар. участю. (9–10 лист. 2023 р., м. Житомир). Житомир: ДУ «Житомирська політехніка», 2023. С. 19–23; ISBN 978-966-683-630-7, режим доступу: <https://conf.ztu.edu.ua/protsesy-mekhanichnoyi-obrobky-verstaty-ta-instrument/>.*

в) Які додатково відображають наукові результати дисертаційної роботи

29. Суменкова В.В., Ликов М.П., Бубликов В.Б., **Небожак І.А.** Модифікуюча суміш: пат. 41197 Україна: МПК (2009) С22С 35/00. u200814224; заявник та власник ФТІМС НАН України; заявл. 10.12.2008; опубл. 12.05.2009, Бюл. № 9. 6 с.

30. **Небожак І.А.**, Дерев'янку О.В., Верховлюк А.М. Дослідження по отриманню двомірного литого композиційного матеріалу системи [СЧ300 – Ст3 – ЧХ3]. *Нові матеріали і технології в машинобудуванні: тези доп. XV Міжнар. наук.-техн. конф. (27–28 квіт. 2023 р., м. Київ) / під заг. ред. к.т.н., доц. Р.В. Лютого. Київ: НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського», 2023. С. 246–247; ISSN 2524-0544, режим доступу: https://foundry.kpi.ua/wp-content/uploads/2023/06/conferenziya_2023.pdf.*

31. Derev'yanko O.V., **Nebozhak I.A.**, Istomina T.I. Manufacturing Of Composite Material Of Abrasives Composition – Metal Binder Using SPS-Technology. *Литво. Металургія. 2023: тези доп. XIX Міжнар. наук.-практ. відеоконф. (10–12 жовт. 2023 р., м.м. Харків–Київ) / Під заг. ред. д.т.н., проф. Пономаренко О.І. Харків: НТУ «ХП», 2023. С. 14–16; ISBN 978-966-488-169-9, режим доступу: <https://doi.org/10.15407/foundry-metallurgy-2023>.*

32. Derev'yanko O.V., **Nebozhak I.A.** Sherwood's Criterion Is An Indicator For

The Efficiency Of Interaction Processes Between Composite Mixture Components Under Electro-Thermal Action. *Литво. Металургія. 2024*: тези доп. XX Міжнар. наук.-практ. конф. (28–30 трав. 2024 р., м.м. Харків–Київ) / Під заг. ред. д.т.н., проф. Пономаренко О.І. Харків: НТУ «ХП», 2024. С. 80–83; ISBN 978-617-05-0490-6, режим доступу: <https://doi.org/10.15407/foundry-metallurgy-2024>.

АНОТАЦІЯ

Небожак І.А. Інокулювання ливарних сплавів з використанням дисперсно-наповненої моделі, що газифікується. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю: 05.16.04 «Ливарне виробництво». – Фізико-технологічний інститут металів та сплавів Національної академії наук України, м. Київ, 2024 р.

Дисертаційна робота присвячена інокулюванню залізовуглецевих сплавів феросплавами та іншими матеріалами (феросиліцієм марки ФС75, *Si*-порошком марки ПМС-К, комплексним сфероїдизуючим модифікатором марки ФСМг7, ферохромом марки ФХ650А, ферованадієм й феротитаном марок ФВд40У0,75 й ФТи70С1, відповідно) за допомогою дисперсно-наповненої моделі, що газифікується. У роботі досліджено вплив гідро-, газодинаміки ЛГМ-процесу на показники засвоєння *Si* розплавом сірого чавуну марки СЧ300, вивчено особливості структуроутворення чавунних виливків, доведено залежність твердості отриманого матеріалу від довжини та висоти литих зразків. Методом регресійного аналізу експериментальних даних встановлено вплив технологічних параметрів ЛГМ-процесу на концентрацію *Si* у чавуні і коефіцієнт його засвоєння матричним розплавом; кількості структурно вільного Fe_3C , перліту, фериту, пластинчатого графіту та довжини його включень в структурі сірого чавуну марки СЧ300; а також на твердість чавунних виливків. Автором отримано також сірі чавуни марок СЧ250 й СЧ200, високоміцний чавун марки ВЧ500-7, жаростійкий *Cr*-чавун марки ЧХ1, зносостійку складнолеговану сталь марки 75ХФТЛ, а також двомірний литий композиційний матеріал системи СЧ300-См3-ЧХ3. Експериментально доведено, що піддослідні матеріали мають оптимальну мікроструктуру та високі механічні й триботехнічні властивості.

Дисертація спрямована також на композиційне зміцнення й армування ливарної *Si*-латуні марки ЛЦ16К4, ливарних *Al*-сплавів марок АК12М2МгН та АК12 дисперсним інтерметалідом *FeCr* у «порожнині» ливарної форми за ЛГМ-процесом. На прикладі механічних і триботехнічних характеристик литих зразків автором виконаної дисертаційної роботи доведено ефективність композиційного зміцнення ливарної *Si*-латуні марки ЛЦ16К4. Здобувачем встановлено залежність мікроструктури нульмірного литого композиційного матеріалу системи *Al-FeCr* від довжини та висоти композитних виливків. У роботі доведено вплив гідро-, газодинаміки ЛГМ-процесу на механічні й триботехнічні властивості ливарних *Al*-сплавів марок АК12М2МгН та АК12, композиційно зміцнених дисперсним інтерметалідом *FeCr*. Встановлено тип зв'язку між інтерметалідною армуючою фазою та *Al*-матрицею, а також доведено залежність механічних і триботехнічних характеристик литих зразків від параметрів мікроструктури нульмірного литого композиційного матеріалу системи *Al-FeCr*.

Ключові слова: армування; інокулювання; дисперсно-наповнена модель, що газифікується; композиційне зміцнення; ЛГМ-процес; легування; ливарний сплав; матричний розплав; мікролегування; модифікування; «порожнина» ливарної форми.

ABSTRACT

Nebozhak I.A. Inoculation of cast alloys using a dispersed-filled, gasifying model. – Qualifying scientific work on manuscript rights.

Dissertation for the degree of candidate of technical sciences in specialty: 05.16.04 «Foundry production». – Physical and Technological Institute of Metals and Alloys of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, 2024.

The dissertation is devoted to the inoculation of iron-carbon alloys with ferroalloys and other materials (ferrosilicon of the ФС75 type, copper powder of the ПМС-К type, complex spheroidizing modifier of the ФСМг7 type, ferrochrome of the ФХ650А type, ferrovandium and ferrotitanium of the ФВд40У0,75 and ФТи70С1 types, respectively) by using of dispersed-filled model, which is gasifying. In the work, the influence of hydro- and gasdynamics of the LFC-process on the indicators of *Si* solving in molten gray cast iron of the СЧ300 type was studied. The peculiarities of the structure formation of iron castings were studied. And the dependence of the hardness of the obtained material on the length and height of the cast samples was proved. The influence of the technological parameters of the LFC-process on the concentration of *Si* in cast iron and the coefficient of its solving in the matrix melt was established by the method of regression analysis of experimental data. The amount of structurally free Fe_3C , pearlite, ferrite, lamellar graphite from length of its inclusions in the structure of gray cast iron brand СЧ300 and on the hardness of iron castings was studied also. The author also obtained gray cast iron СЧ250 and СЧ200 types, high-strength cast iron ВЧ500-7 type, heat-resistant cast iron ЧХ1 type, wear-resistant complex alloy steel 75ХФТЛ type, as well as two-dimensional CCM of the СЧ300-См3-ЧХ3 system. It has been experimentally proven that the test materials have an optimal microstructure and high mechanical and tribotechnical properties.

The aimed of this dissertation also is composite strengthening and reinforcement of cast brass of the ЛЦ16К4 type, cast *Al*-alloys of the АК12М2МгН and АК12 types with dispersed intermetallic *FeCr* in the inside of «volume» of the casting mold according to the LFC-process. Using the example of the mechanical and tribotechnical characteristics of cast samples, the author of the dissertation work has proven the effectiveness of composite strengthening of cast brass of the ЛЦ16К4 type. The established the dependence of the microstructure of the zero-dimensional CCM of the *Al-FeCr* system on the length and height of the composite castings by dissertation student. The paper proves the effect of hydro- and gasdynamics of the LFC-process on the mechanical and tribotechnical properties of foundry *Al*-alloys of АК12М2МгН and АК12 types, compositionally strengthened with dispersed intermetallic *FeCr*. The type of connection between the intermetallic reinforcing phase and the *Al*-matrix was established, and the dependence of the mechanical and tribotechnical characteristics of the cast samples on the microstructure parameters of the zero-dimensional CCM of the *Al-FeCr* system was proved.

Keywords: reinforcement; inoculation; dispersed-filled, gasifying model; composite strengthening; LFC-process; alloying; foundry alloy; matrix melt; microalloying; modification; «volume» of the casting mold.