

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЗАПОРІЗЬКА ПОЛІТЕХНІКА»



**ФРОЛОВ РОМАН ОЛЕКСАНДРОВИЧ**

УДК:669.017:669.714.1

**ПІДВИЩЕННЯ МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ВТОРИННИХ  
СИЛУМІНІВ КОМПЛЕКСНОЮ ТЕХНОЛОГІЄЮ МОДИФІКУВАННЯ**

05.02.01 – матеріалознавство

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

Запоріжжя - 2025

Дисертацією є рукопис.

Роботу виконано в Національному університеті «Запорізька політехніка» Міністерства освіти і науки України

**Науковий керівник:** доктор технічних наук, професор **МІТЯЄВ ОЛЕКСАНДР АНАТОЛІЙОВИЧ**, Національний університет «Запорізька політехніка», завідувач кафедри «Композиційні матеріали, хімія та технології».

#### **Офіційні опоненти:**

доктор технічних наук, професор **ГЛУШКОВА ДІАНА БОРИСІВНА**, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, завідувач кафедри технології металів та матеріалознавства, заслужений діяч науки і техніки України.

доктор технічних наук, професор **ЛАУХІН ДМИТРО ВЯЧЕСЛАВОВИЧ**, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», професор кафедри конструювання, технічної естетики і дизайну.

Захист відбудеться «07» 03.2025 року о 13 - 30 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д17.052.01 у Національному університеті «Запорізька політехніка» за адресою: 69011, м. Запоріжжя, вул. Університетська, 64, ауд. 253.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Національного університету «Запорізька політехніка» за адресою: 69011, м. Запоріжжя, вул. Університетська, 64, та на сайті університету у розділі «Наука» – «Постійно діюча спеціалізована рада».

Автореферат розіслано «06» 02.2025 р.

В.о. вченого секретаря  
спеціалізованої вченої ради  
доктор технічних наук, професор



С. Б. Беліков

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Економічні, екологічні та енергетичні аспекти виробництва первинного алюмінію накладають суттєве обмеження на можливості швидкого зростання виробництва для забезпечення критично важливих галузей економіки. Україна, втративши власне виробництво первинного алюмінію, потреби промисловості в алюмінієвих сплавах задовольняє шляхом валютних закордонних закупівель або за рахунок рециклінгу лому і відходів виробництва. Постійний ріст обсягів виробництва вторинних алюмінієвих сплавів є загально-світовою тенденцією. Технологіям підвищення якості вторинних, а отже забруднених різноманітними домішками, алюмінієвих сплавів приділяється значна увага і вони не втрачають своєї актуальності впродовж тривалого часу. Суттєвий внесок в підвищення якості вторинних силумінів зроблено представниками наукової школи Волчка І.П.: Мітяєвим О.А., Лютовою О.В., Скуйбідю О.Л. та Широкобоковою Н.В. Ними удосконалена технологічна схема первинної переробки лому та доведено, що для вторинних сплавів потрібна двостадійна схема обробки рідкого металу - експериментальним флюсом в процесі плавки та модифікатором на стадії виробництва вилівка. Слід відзначити, що значний внесок в удосконалення технології виробництва вилівок з вторинної сировини належить науковим школам Глушкової Д.Б., Осташа О.П., Пригунової А.Г., Калініної Н.Е., Куцовой В.З, та ін. Використання вторинних силумінів набуває особливо важливого значення в умовах дії воєнного стану і, пов'язаною з ним, нестабільністю імпорتنих поставок.

У зв'язку з цим, дисертація присвячена вирішенню важливої науково-практичної задачі – розробці комплексної технології отримання високоміцних вилівок із вторинних силумінів за допомогою удосконалення процесів модифікування і залучення механізму впливу спадковості шихти. У роботі виконано аналіз сучасних вітчизняних та закордонних методів впливу на розплав для отримання дрібнозернистої структури і високого рівня механічних властивостей.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Основні етапи роботи виконувалися в рамках господарчо-договірних робіт №2914 «Підвищення фізико-механічних властивостей алюмінієвих сплавів для фасонного лиття деталей відповідального призначення» та №2917 «Розробка та промислова апробація технології виробництва алюмінієвих сплавів з інвертованою структурою для фасонного лиття деталей відповідального призначення» між Запорізьким національним технічним університетом та АТ «МОТОР СІЧ» державний реєстраційний номер №0117U004757. Окремі дослідження дисертації виконувалися відповідно до плану науково-дослідних робіт НУ «Запорізька політехніка» ДБ №02918 «Розробка процесів нано- та мікрomodифікування конструкційних матеріалів» та ДБ №02911 «Дослідження та підвищення механічних, технологічних та службових властивостей конструкційних матеріалів» у яких автор був виконавцем за тематичними планами в період з 2018 по 2024 роки.

**Мета і завдання роботи.** Мета роботи - підвищення механічних властивостей доевтектичного вторинного силуміну АК7ч та його закордонного аналогу А356.2 за допомогою комплексної технології модифікування та дослідження впливу

спадковості металу в результаті його модифікування дрібнокристалічною шихтою (ДКШ).

**Для досягнення мети дисертаційного дослідження необхідно було вирішити наступні задачі:**

- зробити порівняння впливу  $K_2ZrF_6$  (заводська технологія) та розробленого раніше модифікувального комплексу МК-1, який складається з S,  $Na_2CO_3$ ,  $K_2CO_3$ , SiC,  $K_2TiF_6$ ,  $KBF_4$ , на структуру та механічні властивості вторинного силуміну АК7ч, А356.2;
- розробити методику отримання дрібнокристалічної шихти зі сприятливими спадковими властивостями;
- дослідити комплексний вплив модифікувального комплексу МК-1 та спадковості дрібнокристалічної шихти на структуру та механічні властивості вторинних силумінів АК7ч, А356.2;
- провести дослідно-промислове випробування технології комплексної обробки модифікатором МК-1 та дрібнокристалічною шихтою.

**Об'єкт дослідження** – процеси структуроутворення виливків із вторинних силумінів АК7ч та А356.2 при комплексному обробленні розплавів модифікатором з додаванням дрібнокристалічної шихти.

**Предмет дослідження** – структура, механічні властивості вторинних алюмінієвих сплавів АК7ч та А356.2 з різним вмістом заліза, що отримані за різними варіантами технологічної обробки модифікатором і дрібнокристалічною шихтою.

**Методи досліджень:** спектральний аналіз хімічного складу сплавів, оптична мікроскопія, рентгеноспектральний, рентгеноструктурний та фрактографічний аналізи, визначення механічних властивостей (міцності, пластичності, твердості).

**Наукова новизна:**

1. Вперше встановлено характер впливу модифікувального комплексу МК-1 на структуру та властивості вторинних сплавів АК7ч вітчизняного та А356.2 закордонного виробництва відповідно. Експериментально підтверджено, що оптимальна кількість модифікувального комплексу МК-1, призводить до покращення характеристик структури (диспергізація та рівномірне розповсюдження структурних складових, придбання фазами сприятливої морфології, зниження пористості) та підвищення рівня властивостей. Показано, що необхідна для покращення якості вторинних силумінів кількість модифікувального комплексу визначається початковою концентрацією заліза в сплавах.

2. Розширено уявлення та отримано нові дані щодо впливу стану шихти на спадковість структури і властивостей вторинних силумінів АК7ч та А356.2. Встановлено характеристики сприятливої мікроструктури дрібнокристалічної шихти (розмір зерен  $\alpha$ -твердого розчину у середньому 10...15 мкм, розмір евтектичного кремнію і інтерметалідних включень 1...2 мкм), що виготовлена за експериментальною технологією нагартувального отвердіння при високій швидкості охолодження розплаву.

3. Вперше показано, що під впливом саме спадкового модифікування вторинного сплаву АК7ч дрібнокристалічною шихтою відбуваються зміни його мікроструктури, які супроводжуються зменшенням розміру зерен  $\alpha$ -твердого розчину

у 1,5...2,5 рази, евтектичного кремнію у 1,2...1,7 разів і інтерметалідних фаз у 1,3...1,9 разів відповідно. Виявлено, що спадкове модифікування дрібнокристалічною шихтою забезпечує рівномірний розподіл всіх структурних складових за об'ємом виливка, без зміни морфології включень.

4. Вперше, на підставі аналізу результатів комплексної технології модифікування вторинних силумінів АК7ч та А356.2, отримано залежності, що описують вплив концентрації заліза у сплавах, вмісту дрібнокристалічної шихти у вихідних матеріалах і кількості модифікувального комплексу МК-1 на їх механічні властивості. Встановлено, що показники механічних властивостей  $\sigma_B$ ,  $\delta$ , HRB мають екстремальні значення.

5. Розширено уявлення та отримано додаткові дані щодо механізмів впливу на характеристики мікроструктури та фазовий склад вторинних силумінів АК7ч та А356.2 технології комплексного модифікувального оброблення.

**Обґрунтованість і достовірність наукових положень, висновків і рекомендацій** забезпечується коректним застосуванням сучасних методів досліджень; узгодженістю отриманих експериментальних результатів і наукових положень з загальноприйнятими матеріалознавчими уявленнями про структуру і механічні властивості силумінів; дослідно-промисловою перевіркою результатів, що отримано у роботі.

#### **Практична значущість отриманих результатів:**

1. Встановлено, що існуюча технологія переробки відходів власного виробництва з використанням в якості модифікатору сполуки  $K_2ZrF_6$  на АТ «МОТОР СІЧ» не завжди дозволяла отримувати якісні виливки із сплавів АК7ч та А356.2. Запропоновано використання рафінувально-модифікувального комплексу МК-1, визначено та надано рекомендації з його необхідної кількості до застосування.

2. Розроблено технологію отримання дрібнокристалічної шихти зі сприятливою спадковою мікроструктурою ТП «Технологія отримання дрібнокристалічної шихти алюмінієвих сплавів», використання якої дозволяє значно зменшити витрати на закупівлю закордонних чушкових первинних сплавів.

3. Застосування комплексної обробки розплавів модифікатором МК-1 та дрібнокристалічною шихтою дозволило розширити області використання вторинних алюмінієвих сплавів із концентрацією до 1,84% заліза для виливків відповідального призначення замість первинних сплавів.

4. Показано, що комплексний підхід до модифікування вторинних силумінів дозволяє скоротити кількість застосовуваних модифікувальних комплексів при збереженні стабільно високого рівня механічних властивостей виливків.

5. Зменшення витрат на первинну сировину, а також зниження шкідливих викидів за рахунок впровадження комплексної технології обробки вторинних сплавів, вирішують проблему утилізації відходів власного виробництва.

**Особистий внесок здобувача.** Здобувачем безпосередньо виконані основні теоретичні та експериментальні дослідження щодо визначення впливу рафінувально-модифікувальної обробки та спадковості шихти на мікроструктуру та механічні властивості вторинних алюмінієвих сплавів АК7ч і А356.2. Розроблено технологію отримання дрібнокристалічної шихти. У спільних публікаціях здобувачеві належить:

- постановка цілей та задач роботи [1, 5, 6, 8];
- проведення усіх дослідних плавок, описаних у розділах 3 і 4 [2-5, 7-12];
- підготовка та виготовлення шліфів для вивчення мікроструктури та дослідних зразків для визначення механічних властивостей [1-5, 7-12];
- статистична обробка та представлення результатів досліджень [2-4, 7-12];
- формулювання висновків [2-4, 7-12].

**Апробація результатів роботи.** Основні результати роботи доповідалися на: міжнародній науково-практичній конференції «Проблеми і перспективи розвитку залізничного транспорту» (м. Дніпропетровськ, 2014р.); XVII-й міжнародній молодіжній науково-практичній конференції «Людина і космос» (м. Дніпропетровськ, 2015р.); на XXVI та XXVII міжнародних науково-практичних конференціях «Стародубівські читання. Проблеми сучасного матеріалознавства» (м. Дніпропетровськ, 2016 та 2017 рр.); на X-их міжнародних молодіжних науково-технічних читаннях ім А.Ф. Можайського (м. Запоріжжя - м. Приморськ, 2017р.); на XVIII-й міжнародній науковій конференції «Теплотехніка, енергетика та екологія в металургії» (м. Дніпро, 2017р.); на науково-практичній конференції студентів, викладачів, науковців, молодих учених і аспірантів «Тиждень науки» (м. Запоріжжя, 2018р.).

**Публікації.** За результатами досліджень опубліковано 11 наукових робіт, з них 6 статей у спеціалізованих фахових виданнях України, 1 стаття у періодичному науковому виданні країни ЄС, 4 тез та матеріалів міжнародних і вітчизняних наукових конференцій.

**Обсяг роботи.** Дисертація складається з анотації, вступу, 5 розділів, висновків, списку використаних джерел, додатків. Загальний обсяг роботи становить 137 сторінок. Матеріали дисертації проілюстровано 10 таблицями, 29 рисунками; список використаних джерел налічує 108 найменувань на 11 сторінках. Робота містить 7 додатків на 12 сторінках.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

**У вступі** обґрунтована актуальність теми дисертаційного дослідження, показано зв'язок з науковими програмами та планами, викладено мету і задачі роботи, сформульовано наукову новизну і практичне значення отриманих результатів.

**У першому розділі** виконано аналіз робіт що висвітлюють сучасні методи отримання виливків із вторинних силумінів. Виявлено, що на теперішній час, розроблено безліч методів впливу на розплав, серед яких можна виділити обробку розплаву імпульсним електричним струмом, обробку магнітними полями та імпульсами, ультразвуком, спадкове та домішкове модифікування. Питанням спадковості шихти алюмінієвих сплавів присвячені роботи таких авторів як Мітяєв О.А., Калініна Н.Е., Куцова В.З., Wang Q.G., Скребцов А.М. Виявлено, що відсутня єдина наукова думка на процеси структуроутворення при модифікуванні, особливо обмежені літературні данні по застосуванню комплексних методів обробки, тобто при поєднанні двох і більше методів впливу на розплав. Зроблено висновок, що для досягнення необхідного рівня механічних властивостей виливків із

вторинних силумінів з високим вмістом домішок необхідно застосовувати додаткові механізми впливу.

У другому розділі наведено методику виконання досліджень. У якості предмету для вивчення використовувалися евтектичні сплави АК7ч, А356.2 та їх зворот у вигляді литників. Для приготування дослідних сплавів у лабораторних умовах використовували електричну піч опору. Для приготування сплавів в умовах виробництва використовували шахтну газову піч з графітовим тиглем ТГГ-150. Лабораторні плавки проходили під покривним флюсом NaCl : KCl у співвідношенні 1 : 1 кількістю 2 мас. %, засипаним на дно тигля. Заводська технологія полягала в обробці розплаву при температурі 720 °С модифікатором  $K_2ZrF_6$  шляхом замішування його на дзеркалі чистого металу. Експериментальна технологія полягала в обробці розплаву модифікувальним комплексом МК-1. Контроль температури здійснювався за допомогою хромель-алюмелевої термопари та аналогово-цифрового перетворювача МАХ6675. Тривалість витримання сплаву після закінчення модифікувальної обробки до кінця розливу не більше трьох годин. З металу кожної плавки в кокіл відливали призматичний виліток масою 3 кг. Після термічної обробки за режимом Т6 (гартування 535 °С ± 10°С, час витримки 5 годин, охолодження у воді 20°С + повне штучне старіння 170 °С ± 10°С протягом 8 годин) згідно ДСТУ 2839-94 виготовляли шліфи для вивчення мікроструктури і зразки для механічних випробувань на розривній машині МР-100 за ДСТУ ISO 6892-1:2019. Для аналізу хімічного складу кожної плавки використовували іскровий спектрометр «SPECTROLAB», що дозволило визначати склад за 20-ма елементами з точністю ±0,0001 мас. %. Металографічний аналіз структури металу проводили на оптичних мікроскопах МІМ-8 та «SIGETA ММ-700». Для чіткого виявлення інтерметалідних включень поверхню шліфів обробляли водним розчином кислот 0,5%HF+0,5%HNO<sub>3</sub>+1,5%НСl впродовж 10 с. Рентгеноспектральний мікроаналіз фаз проводили на растровому сканувальному мікроскопі РЕМ-106И. Ідентифікацію фаз проводили за допомогою рентгеноструктурного аналізу на дифрактометрі ДРОН-1 в CuKα фільтрувальному випромінюванні за стандартною методикою. Фрактографічний аналіз поверхні руйнування проводили на зламах зразків, які використовувалися для визначення границі міцності і пластичності.

Третій розділ присвячено оптимізації переробки відходів А356.2 і АК7ч у високоякісні сплави. Хімічний склад шихти наведено у таблиці 1.

Таблиця 1 – Хімічний склад сплавів, що використовувалися у якості шихти

Сплав	Вміст елементів, мас. %						
	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti
АК7ч	6,25	0,35	0,05	0,02	0,31	0,03	0,01
АК7ч зворот	6,72	0,60	0,05	0,08	0,32	0,02	0,01
А356.2	6,21	0,07	0,01	0,02	0,36	0,01	0,11
А356.2 зворот	7,07	0,11	0,02	0,02	0,23	0,03	0,07

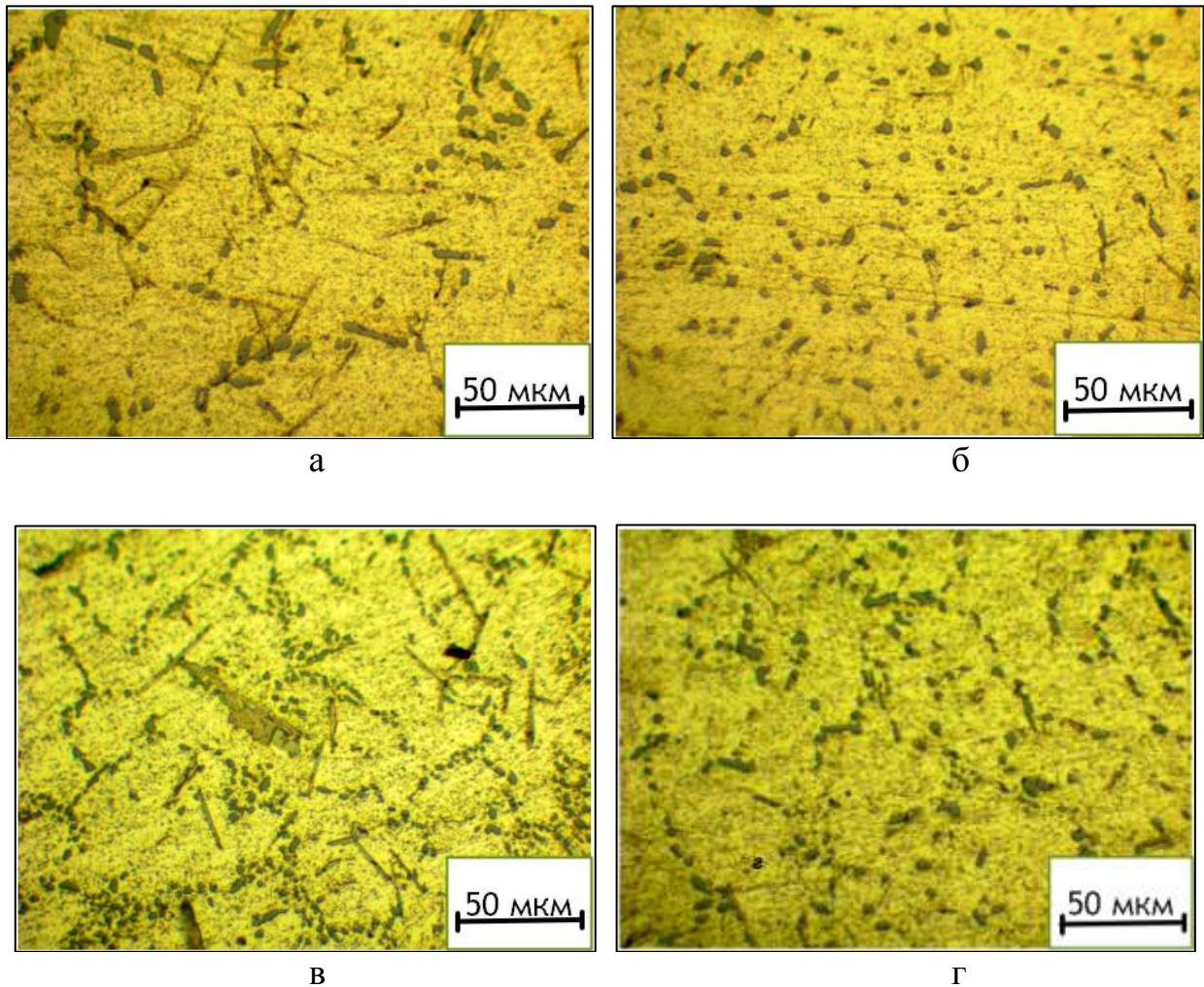
В ході роботи проводили порівняння заводської технології обробки (1,0 мас. %  $K_2ZrF_6$ ) і експериментальної з застосуванням модифікувального комплексу МК-1. Різна кількість і вид застосованого модифікувального комплексу пояснюється різною концентрацією заліза у цих сплавах. Характеристика цих варіантів представлена у таблиці 2.

Таблиця 2 – Характеристика дослідних плавів

№ плавки	Сплав	Склад шихти	Модифікувальна обробка розплаву (720°C)
1	АК7ч	100% зворот АК7ч	1,0 мас. % $K_2ZrF_6$
2	АК7ч	100% зворот АК7ч	0,15 мас. % МК-1
3	А356.2	100% зворот А356.2	1,0 мас. % $K_2ZrF_6$
4	А356.2	100% зворот А356.2	0,10 мас. % МК-1
5	АК7ч+А356.2	50% перв. АК7ч 50% зворот А356.2	0,05 мас.% МК-1
6			0,10 мас.% МК-1
7			0,15 мас.% МК-1
8	А356.2+АК7ч	50% перв. А356.2 50% зворот АК7ч	0,05 мас.% МК-1
9			0,10 мас.% МК-1
10			0,15 мас.% МК-1

Метою проведення плавів №1...№4 було визначення впливу технології обробки сплаву на рівень його механічних властивостей. З урахуванням високого вмісту заліза (0,60%) і низьким вмістом титану (0,01%) у звороті сплаву АК7ч, було погоджено рішення обробляти сплав підвищеною кількістю модифікувального комплексу МК-1 (0,15 мас. %). З урахуванням досить невисокого вмісту заліза (0,11%) у звороті сплаву А356.2, було прийнято рішення щодо обробки сплаву 0,10 мас. % МК-1.

Мікроструктури сплавів, отриманих за заводською технологією (плавки №1, 3), характеризувалися неповним ступенем модифікування кремнію і наявністю значної кількості великих залізовмісних інтерметалідних фаз несприятливої морфології, що містили залізо (рис. 1 а, в). Пластинчасті інтерметалідні фази, з високими значеннями параметра форми  $\lambda$  (відношенням максимальної довжини фази до її ширини), є активними концентраторами напружень, що негативно позначалися на рівні механічних властивостей алюмінієвих сплавів.



а - плавка №1 1,0 мас. %  $K_2ZrF_6$ ; б - плавка №2 0,15 мас. % МК-1;  
в - плавка №3 1,0 мас. %  $K_2ZrF_6$ ; г - плавка №4 0,1 мас. % МК-1

Рисунок 1 – Мікроструктура сплавів дослідних плавкок; x500

Експериментальна технологія (плавки №2, №4) забезпечувала модифікування всіх структурних складових та їхній досить рівномірний розподіл в об'ємі металу (рис. 1 б, г). Водночас слід зазначити, що сплави плавкок №№ 3, 4 мали найнижчий з усіх експериментальних вміст заліза (0,11 %), у зв'язку з чим, можливо, кількість модифікувального комплексу на рівні 0,10 мас. % була зовеликою і було можливе виникнення ефекту «перемодифікування».

Плавки №№ 5...10 проводили з метою визначення оптимальної кількості модифікувального комплексу МК-1 для сплавів, отриманих змішуванням первинної та вторинної шихти. Змішування відходів виробництва з первинними сплавами доволі розповсюджений метод їх утилізації і переробки. Середньозважений вміст Fe склав 0,23 і 0,34 мас. %.

Результати механічних випробувань представлені на рисунку 2. При отриманні сплавів за експериментальною технологією, виключно на вторинній шихті (плавки №2, 4), досягнуто границю міцності 235,4 і 265,3 МПа, відносне видовження 2,04 та 2,64 %, НВ 962,0 та 847,1 відповідно. Експериментальна технологія забезпечувала рівень механічних властивостей відповідно до ДСТУ 2839-94, але для

оптимізації необхідно було проведення подальших досліджень. Результати механічних випробувань для сплавів виготовлених за стандартною заводською технологією на вторинній шихті (плавки №1, 3), засвідчили границю міцності 229,2 і 252,2 МПа, відносне видовження 0,81 і 2,71 %, НВ 892,0 і 828,6 відповідно.

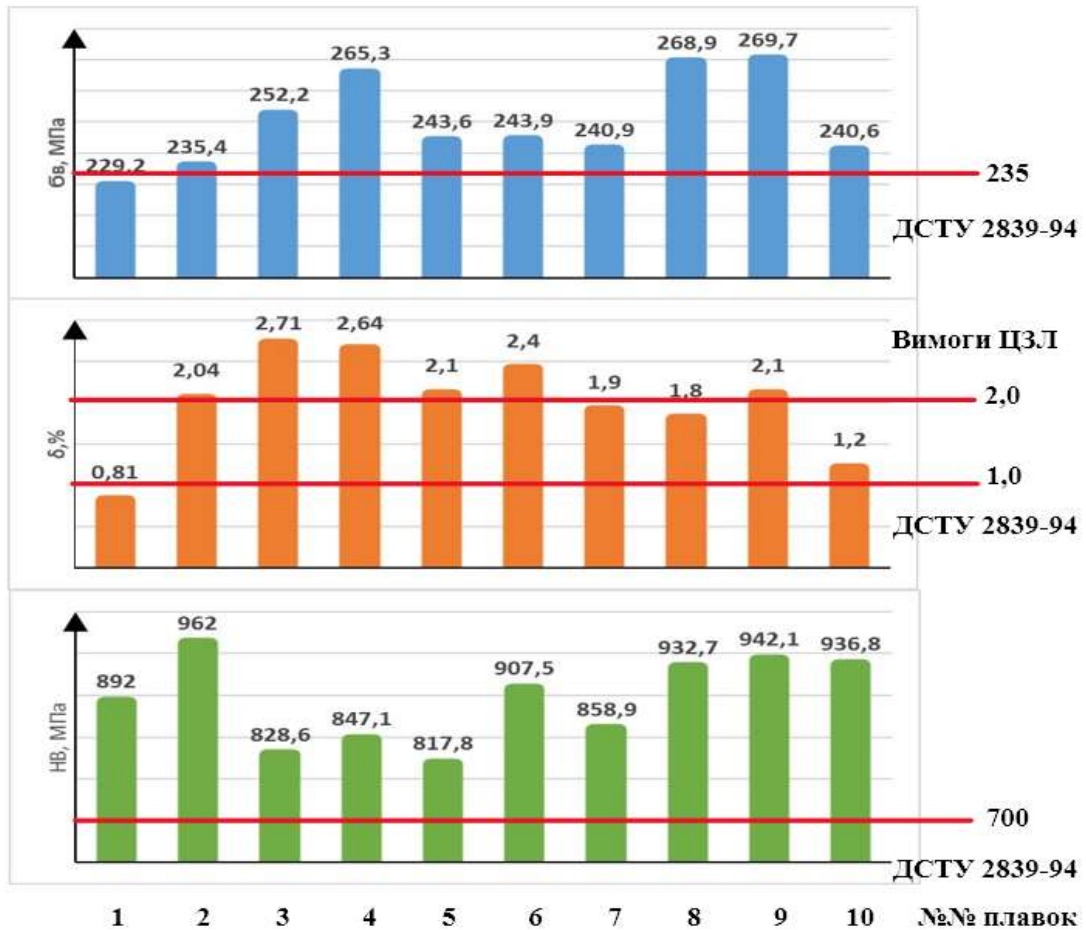
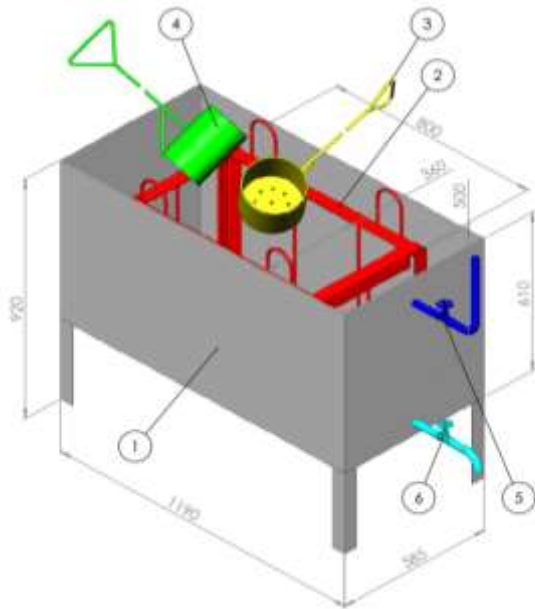


Рисунок 2 – Механічні властивості дослідних плавок №№ 1...10

Високий рівень механічних властивостей плавки №№3, 4 пояснюється найнижчою концентрацією заліза серед усіх досліджуваних варіантів. Обробка модифікувальним комплексом  $K_2ZrF_6$  забезпечила навіть більш високу пластичність ніж обробка модифікувальним комплексом МК-1. Це також опосередковано вказує на виникнення ефекту «перемодифікування» і підкреслює необхідність уточнення концентрації заліза в сплаві перед застосуванням активних модифікувальних препаратів.

Оскільки сплави використовуються для виготовлення виливків відповідального призначення, то центральна заводська лабораторія висувала більш жорсткі вимоги до пластичності на рівні 2,0 % (див. рис. 2). Незважаючи на те, що сплави експериментальних плавки із середньозваженим вмістом заліза 0,23 та 0,34 % (№№ 5...10), оброблені 0,05 та 0,15 мас. % МК-1 цілком задовольняли вимоги пластичності  $\delta \geq 1,0$  % за ДСТУ 2839-94, обробка модифікувальним комплексом МК-1 у таких кількостях, також не є оптимальною з точки зору висунутих вимог до механічних властивостей.

У четвертому розділі описано технологію виготовлення швидко охолодженої дрібнокристалічної шихти, її вплив на структуру і властивості вторинного сплаву АК7ч та проведено дослідження комплексної технології застосування модифікувального комплексу МК-1 та ДКШ на сплавах АК7ч з різною концентрацією заліза.



1 - бак-охолоджувач; 2 - уловлювач;  
3 - ємність з перфорацією; 4 - ківш;  
5 - кран для подачі охолоджувальної рідини;  
6 - кран для відводу охолоджувальної рідини

Рисунок 3 – Зовнішній вигляд установки для отримання дрібнокристалічної шихти

Основу шихти плавок для виготовлення дрібнокристалічної шихти складали зворот АК7ч і зворот А356.2 у співвідношенні 1:1, тобто дрібнокристалічна швидко охолоджена шихта мала той же склад, що і при виробництві деталей. При її приготуванні вихідну шихту плавлять у чавунному футерованому тиглі під покривним флюсом (50 мас. % NaCl + + 50 мас. % KCl). Кількість флюсу становила 2% від маси розплаву. Після плавлення при температурі  $720 \pm 5^\circ\text{C}$  розплав через ємність з перфорованим дном (діаметр отворів 8 мм) заливали до резервуару з водою (ємність приблизно 160 л). Температура води становила  $22...25^\circ\text{C}$  (рис. 3).

Перфорована ємність забезпечила отримання однакової за фракційним складом (рис. 4) швидко охолодженої дрібнокристалічної шихти із позитивними спадковими властивостями.

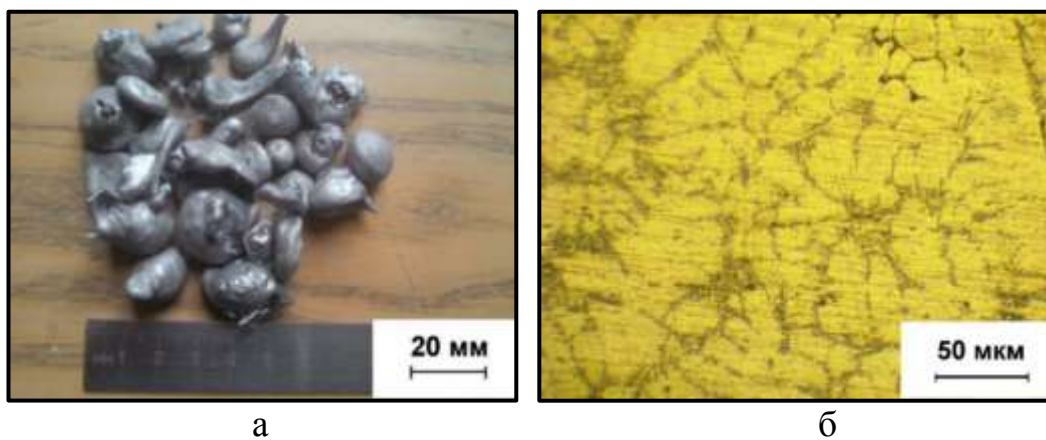


Рисунок 4 – Зовнішній вигляд (а) і мікроструктура (б) дрібнокристалічної шихти

Мікроструктура ДКШ мала високу ступінь однорідності з рівномірним розподіленням усіх фаз по поверхні шліфа. Дифрактометричні дослідження дрібнокристалічної шихти (рис. 5) підтвердили наявність у сплаві фаз  $\alpha$ -Al та евтектичного Si. Розмір зерна алюмінію становив у середньому 10...15 мкм, а розмір евтектичного кремнію 1...2 мкм. Включення інтерметалідів було важко ідентифікувати та відрізнити від кремнієвої фази за зовнішнім виглядом. Враховуючи високу ступінь спадковості алюмінієвими сплавами структури та властивостей було прийнято рішення використати ДКШ у якості присадки до основної шихти з наступною оптимізацією її кількості.

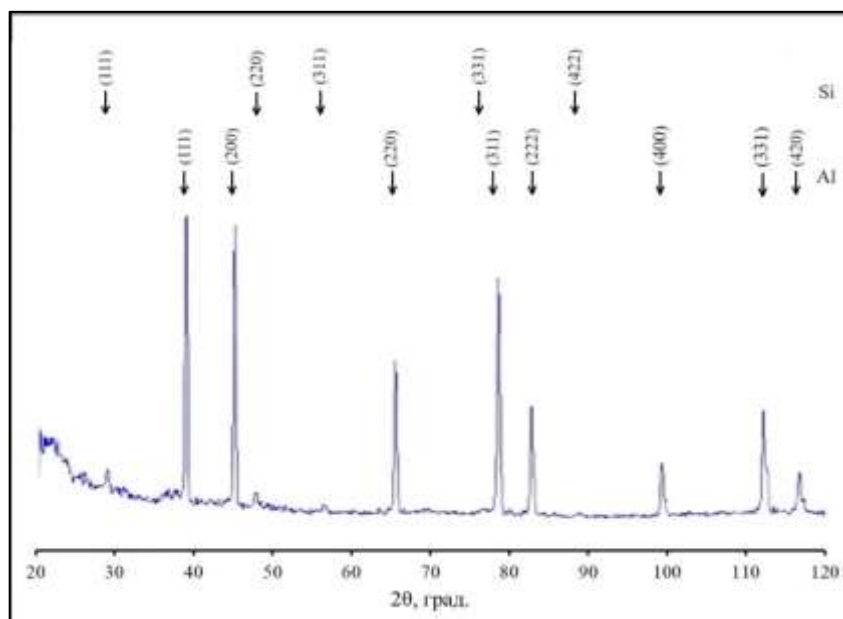


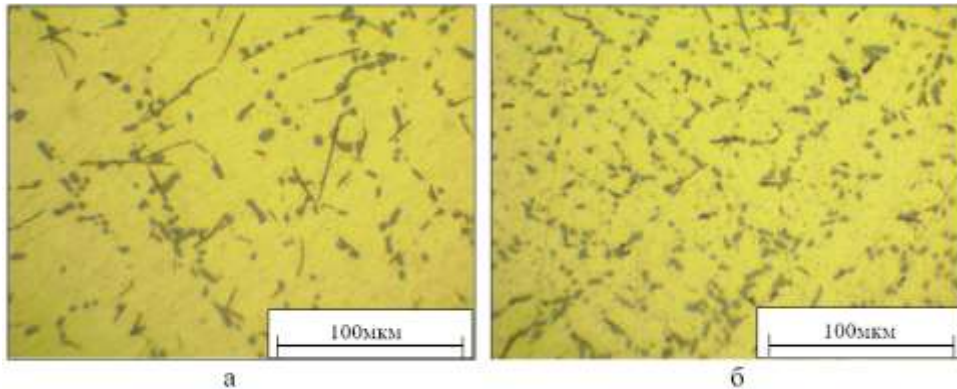
Рисунок 5 – Дифрактограма дрібнокристалічної шихти вторинного сплаву (AK7ч + A356.2)

Завдяки високій швидкості охолодження дифракційні максимуми характерні для інтерметалідних фаз  $\beta$ -подібного типу не спостерігали. Очевидно, що невеликої кількості інтерметалідів у ДКШ не достатньо для чіткої реєстрації відбивань від ґраток вказаних інтерметалідних фаз.

Для перевірки позитивного впливу механізму спадковості ДКШ, було проведено дві дослідні плавки із 100 мас. % звороту АК7ч. Перша плавка використовувалась як базовий варіант для порівняння, другу проводили на звороті сплаву АК7ч, після чого додавали ДКШ у кількості 33,3 мас. % на дзеркало розплавленого металу, розплав доводили до температури 720 °С, знімали шлак та розливали до кокілю.

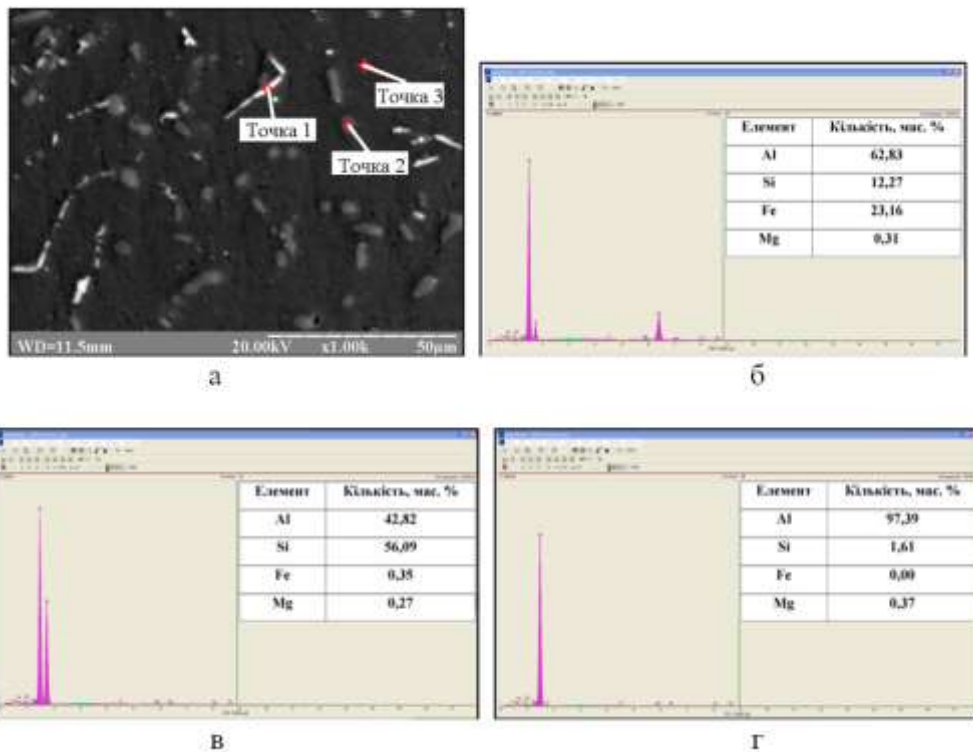
Мікроструктури представлені на рисунку 6 засвідчили, що додавання лише дрібнокристалічної шихти до сплаву АК7ч навіть без додаткової модифікувальної обробки дозволяють у 1,5...2,5 рази зменшити розмір зерен  $\alpha$ -твердого розчину алюмінію, у 1,2...1,7 разів зменшити розмір кристалів кремнію та рівномірно розподілити їх по всьому об'єму виливка. Середній розмір інтерметалідних фаз також зменшився приблизно у 1,3...1,9 разів, без зміни форми і вигляду включень. Зміни

мікроструктури пов'язані із тим, що кристалізація починалась одночасно із багатьох центрів, які мали високу ступінь спорідненості із алюмінієм та гарно змочувались розплавом, не створюючи надлишкової енергії поверхневого натягу.



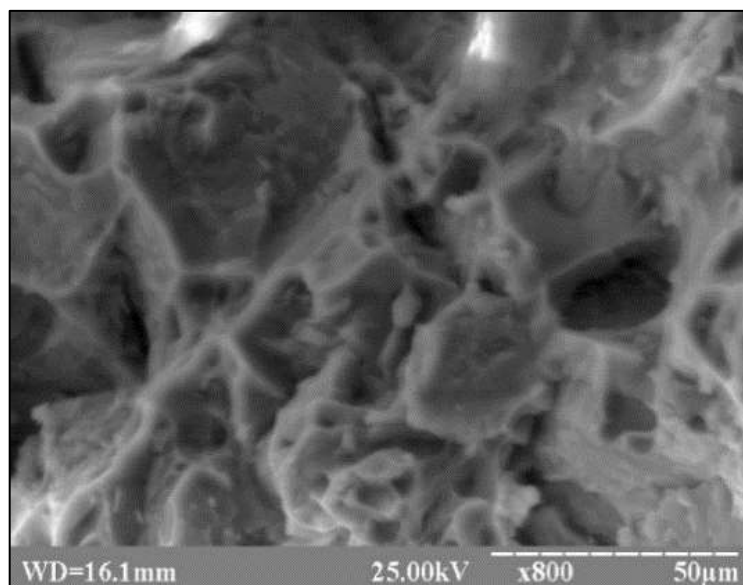
а – варіант №1: АК7ч без обробки; б – варіант №2: АК7ч + 33,3 мас. % ДКШ  
Рисунок 6 – Мікроструктури дослідних сплавів АК7ч

Було проведено рентгеноспектральні дослідження фаз, що були візуально виявлені та ідентифіковані як кремній та інтерметаліди у мікроструктурі на електронному сканувальному мікроскопі при збільшенні в 1000 раз (рис.7). Спектрограми підтверджують хімічний склад фаз, які раніше ідентифікували лише за зовнішнім видом, морфологією і хімічним складом сплаву.

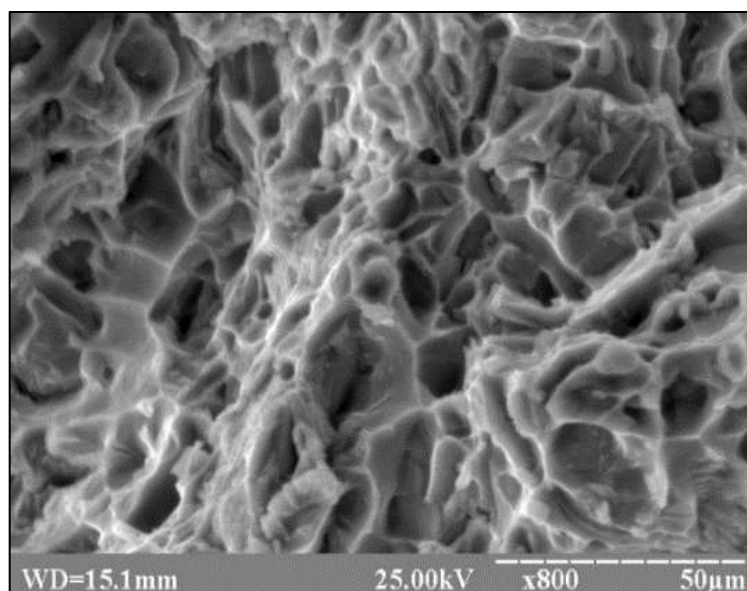


а – мікроструктура сплаву АК7ч (x1000) з відміченими точками аналізу;  
б,в,г – спектрограми та хімічний склад фаз точок 1, 2 і 3 відповідно  
Рисунок 7 – Результати рентгеноспектрального мікроаналізу  
сплаву АК7ч з 33,3 мас. % ДКШ

Результати механічних випробувань засвідчили, що спадкова дія ДКШ дозволяє отримувати більш дисперсну мікроструктуру та в значній мірі підвищує пластичність до 3,7%. Незначне зниження середніх значень границі міцності до 292 МПа та твердості до 106 НВ пояснюється тим, що з ДКШ, до сплаву, ймовірно, потрапляє більша кількість оксидів та води. Дослідження фрактограм зламів зразків (рис. 8) для визначення границі міцності і показників пластичності, також свідчили про підвищення енергоємності руйнування при додаванні до сплаву ДКШ.



а



б

а – варіант №1: АК7ч без обробки; б – варіант №2: АК7ч + 33,3 мас. % ДКШ

Рисунок 8 – Фрактограми поверхонь руйнувань зразків для визначення границі міцності і пластичності, x800

Для побудови математичної моделі впливу дрібнокристалічної шихти, вмісту заліза та модифікувальної обробки на механічні властивості силуміну АК7ч всі експерименти виконані згідно з матрицею повного факторного експерименту  $2^3$ , а саме рототабельного плану центрального композиційного планування (табл.3). Для того щоб варіант плавки за хімічним складом відповідав матриці планування експерименту розплав дошихтовувався залізним порошком ПЖ-2 до повного його розчинення.

Таблиця 3 – Кодування факторів при дослідженні області оптимуму за допомогою центрального композиційного рототабельного уніформ-планування другого порядку,  $K=3$

Інтервали варіювання та рівні факторів		Фактори, що вивчаються		
		$X_1$ , мас. % ДКШ	$X_2$ , мас. % Fe	$X_3$ , мас. % МК-1
Інтервал варіюв.	1,0	25	0,5	0,05
	1,682	42,05	0,841	0,0841
Нульовий рівень	$X_0=0$	42,05	1,0	0,1
Нижній рівень	-1,0	17,05	0,5	0,05
Верхній рівень	+1,0	67,05	1,5	0,15
Зіркові точки	-1,682	0	0,159	0,0159
	+1,682	84,1	1,841	0,1841

Отримані рівняння, що описують залежність механічних властивостей від вмісту ДКШ ( $X_1$ ), концентрації заліза в сплаві ( $X_2$ ) та кількості присадки модифікувального комплексу МК-1( $X_3$ ), мають наступний вигляд:

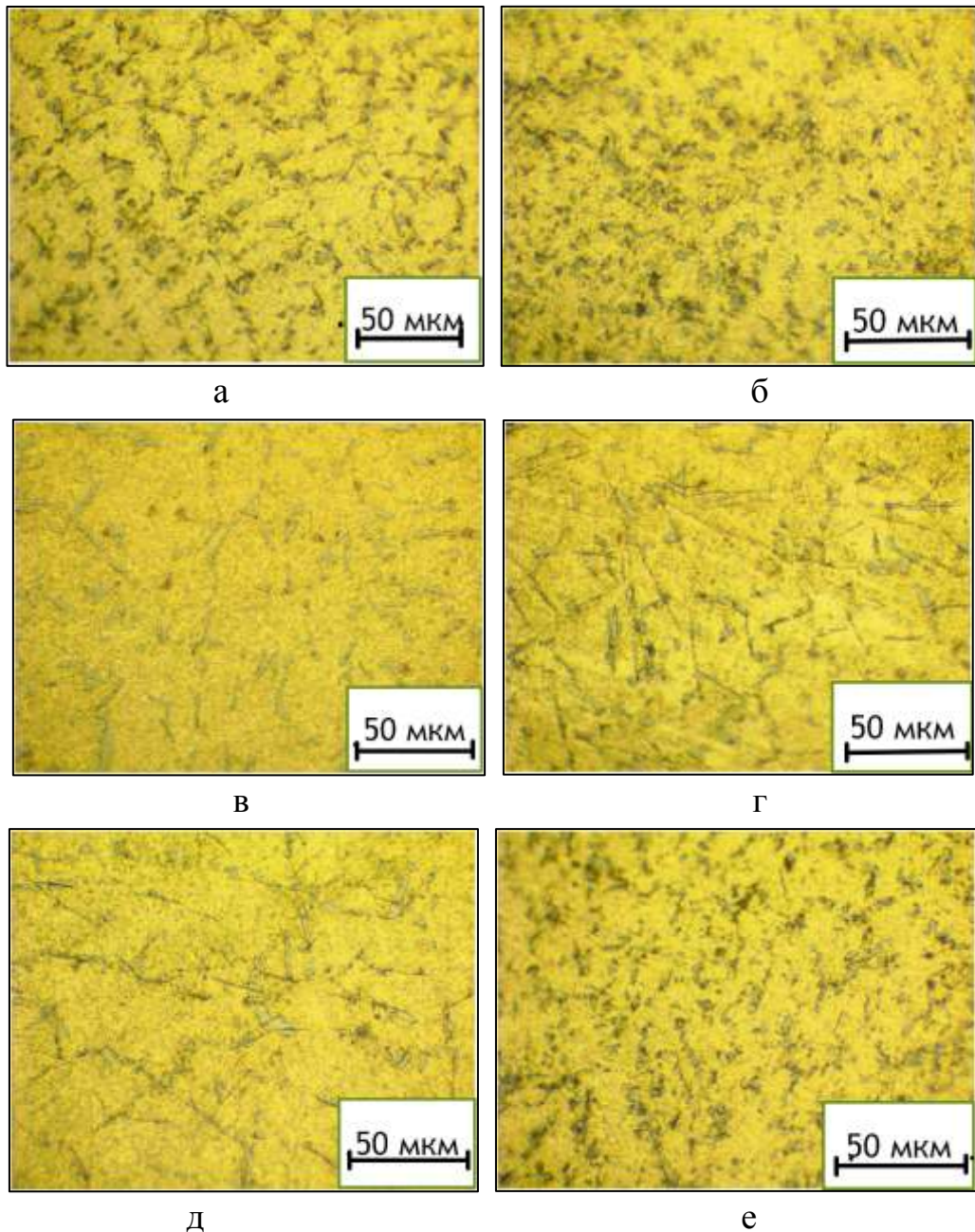
$$\text{Бв} = 215,85 + 1,6 \cdot X_1 + 83,97 \cdot X_2 + 579,58 \cdot X_3 + 0,353 \cdot X_1 \cdot X_2 - 0,626 \cdot X_1 \cdot X_3 + 152,5 \cdot X_2 \cdot X_3 - 0,026 \cdot X_1^2 - 63,34 \cdot X_2^2 - 3568,84 \cdot X_3^2; \quad (1)$$

$$\delta = 4,65 + 0,09 \cdot X_1 + 0,52 \cdot X_2 + 26,67 \cdot X_3 + 0,36 \cdot X_1 \cdot X_3 + 2,0 \cdot X_2 \cdot X_3 - 0,0014 \cdot X_1^2 - 2,27 \cdot X_2^2 - 255,4 \cdot X_3^2; \quad (2)$$

$$\text{HRB} = 28,65 + 0,40 \cdot X_1 + 10,15 \cdot X_2 + 191,27 \cdot X_3 + 0,085 \cdot X_1 \cdot X_2 - 0,917 \cdot X_1 \cdot X_3 - 4,15 \cdot X_2 \cdot X_3 - 0,007 \cdot X_1^2 - 4,27 \cdot X_2^2 - 592,68 \cdot X_3^2 \quad (3)$$

Аналіз рівнянь (1 - 3) демонструє, що можливе отримання виливків з високими показниками механічних властивостей  $\text{Бв} > 300$  МПа,  $\delta > 5\%$  і  $\text{HRB} > 50$  при застосуванні у складі шихти до 42,05 мас. % ДКШ та модифікувальної обробки 0,1 мас. % МК-1.

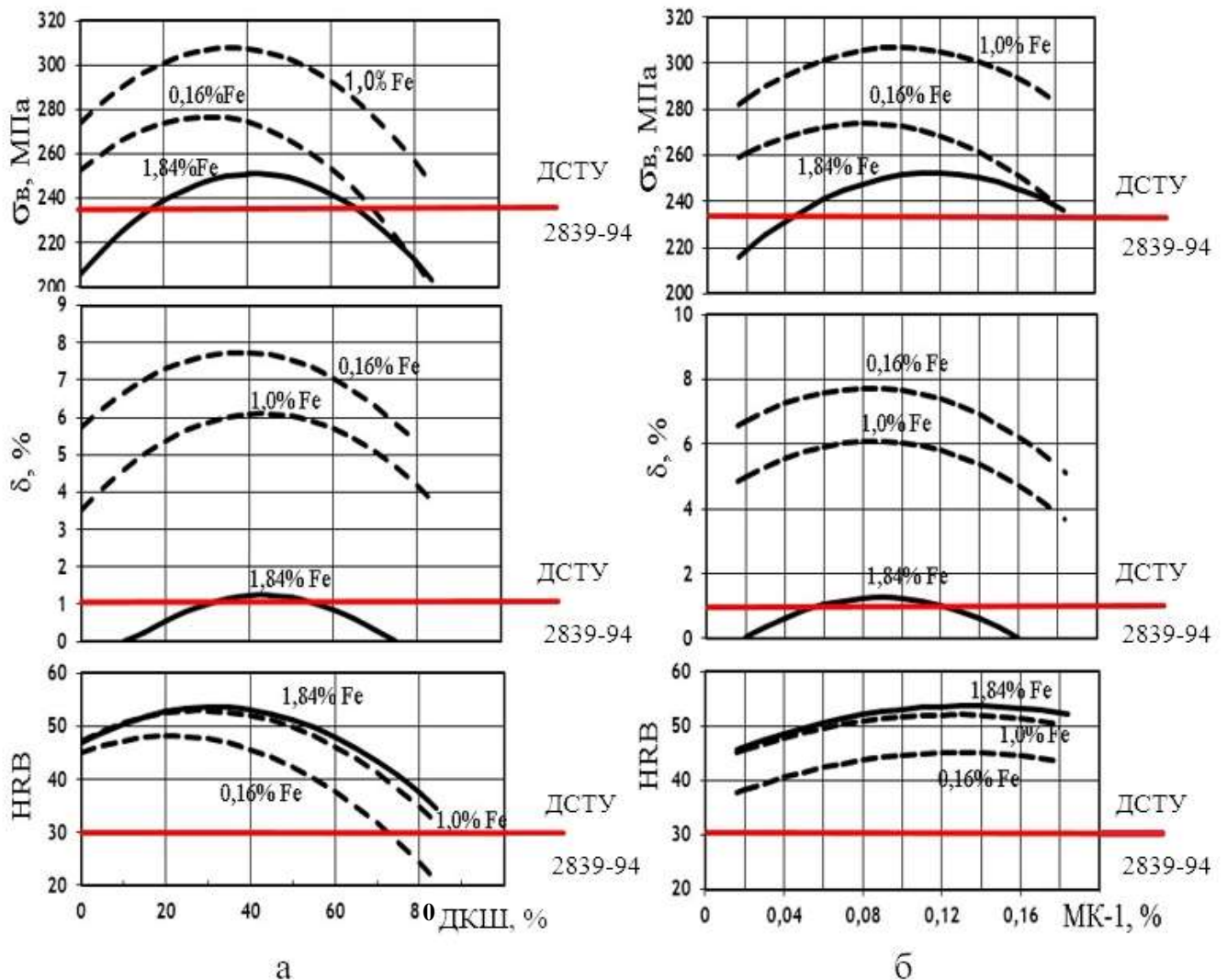
Представлені структури "зоряних" точок матриці планування експерименту (рис. 9) відображають вплив досліджуваних чинників на структурні зміни та механічні властивості сплаву. Підвищення вмісту ДКШ в шихті від 0 до 84,1 % призвело до диспергування кремнію та інтерметалідних включень (див. рис. 9 а, б). Збільшення концентрації Fe з 0,16 до 1,84 % призводило до утворення в сплаві великої кількості видовжених інтерметалідних фаз (див. рис. 9 в, г). Зростаюча присадка модифікатора МК-1 активно впливала на розмір і форму основних структурних складових (див. рис. 9 д, е).



а - 0 мас. % ДКШ 1,0 мас. % Fe 0,1 мас. % МК-1; б - 84,1 мас. % ДКШ 1,0 мас. % Fe 0,1 мас. % МК-1;  
 в - 42,05 мас. % ДКШ 0,16 мас. % Fe 0,1 мас. % МК-1; г - 42,05 мас. % ДКШ 1,84 мас. % Fe 0,1 % МК-1;  
 д - 42,05 мас. % ДКШ 1,0 мас. % Fe 0,016 мас. % МК-1; е - 42,05 мас. % ДКШ 1,0 мас. % Fe 0,184 мас. % МК-1

Рисунок 9 - Мікроструктура сплаву АК7ч, х400

Застосування шихти, що містить 30...45 мас. % ДКШ дає змогу підвищувати границю міцності  $\sigma_B$  на 30...40 МПа, відносно подовження  $\delta$  на 1...2 % і твердість HRB на 2...6 од. (рис. 10). Подальше збільшення ДКШ у шихті призводить до зниження механічних властивостей, що, ймовірно, пов'язано із забрудненням сплаву оксидом алюмінію. Обробка модифікувальним комплексом МК-1 дає змогу досягти підвищення границі міцності на 15...30 МПа, відносного подовження на 1,0...1,3 % і твердості на 7...8 од. (див. рис. 10). Зростання концентрації Fe у сплаві призвело до зниження пластичності та підвищення твердості у всьому інтервалі досліджень. При концентраціях до 1,0 мас. % залізо підвищувало границю міцності внаслідок зміцнення  $\alpha$ -твердого розчину. Вищі концентрації Fe призводили до зниження  $\sigma_B$  унаслідок утворення витягнутих інтерметалідних фаз, які мають низький когерентний зв'язок із матрицею і виступають у ролі активних концентраторів напружень, що узгоджується з отриманими раніше результатами.



а - при постійній присадці модифікатора МК-1 0,1 мас. %; б - при наявності в шихті ДКШ у кількості 42,05 мас. %

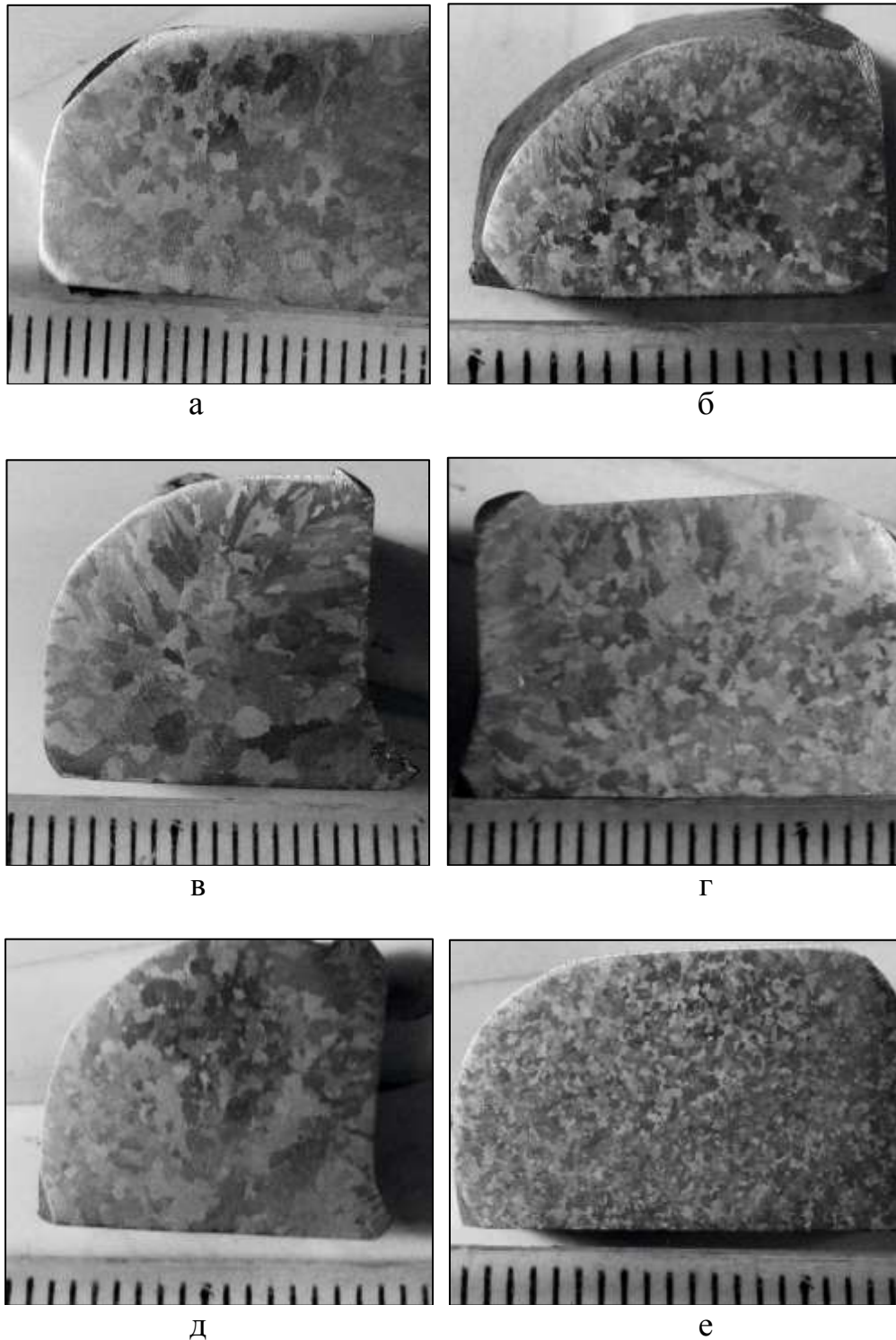
Рисунок 10 – Вплив концентрації Fe на механічні властивості дослідного сплаву

**П'ятий розділ** присвячено промисловій апробації комплексної технології модифікувальної обробки в умовах цеха №1 АТ «МОТОР СІЧ» при виготовленні деталі 05943200001-01 «Тарілотримач». У якості матеріалу для виготовлення деталей використовувався зворот сплаву АК7ч. При проведенні експерименту в промислових умовах було застосовано комплексне поетапне оброблення сплаву за різними варіантами. Було виготовлено серії деталей, зі сплаву що відповідає початковій стадії приготування розплаву без модифікувальної обробки, з додаванням 35% ДКШ та з додаванням 35% ДКШ і обробкою модифікувальним комплексом МК-1 у кількості 0,05 мас. %. Деталі для кожного варіанту обробки відливали за різною технологією, з додатковим примусовим підпресуванням і без. Контроль макро- і мікроструктур проводили на шліфах, що були виготовлені із відповідальних зон поперечного перетину деталей (рис. 11).



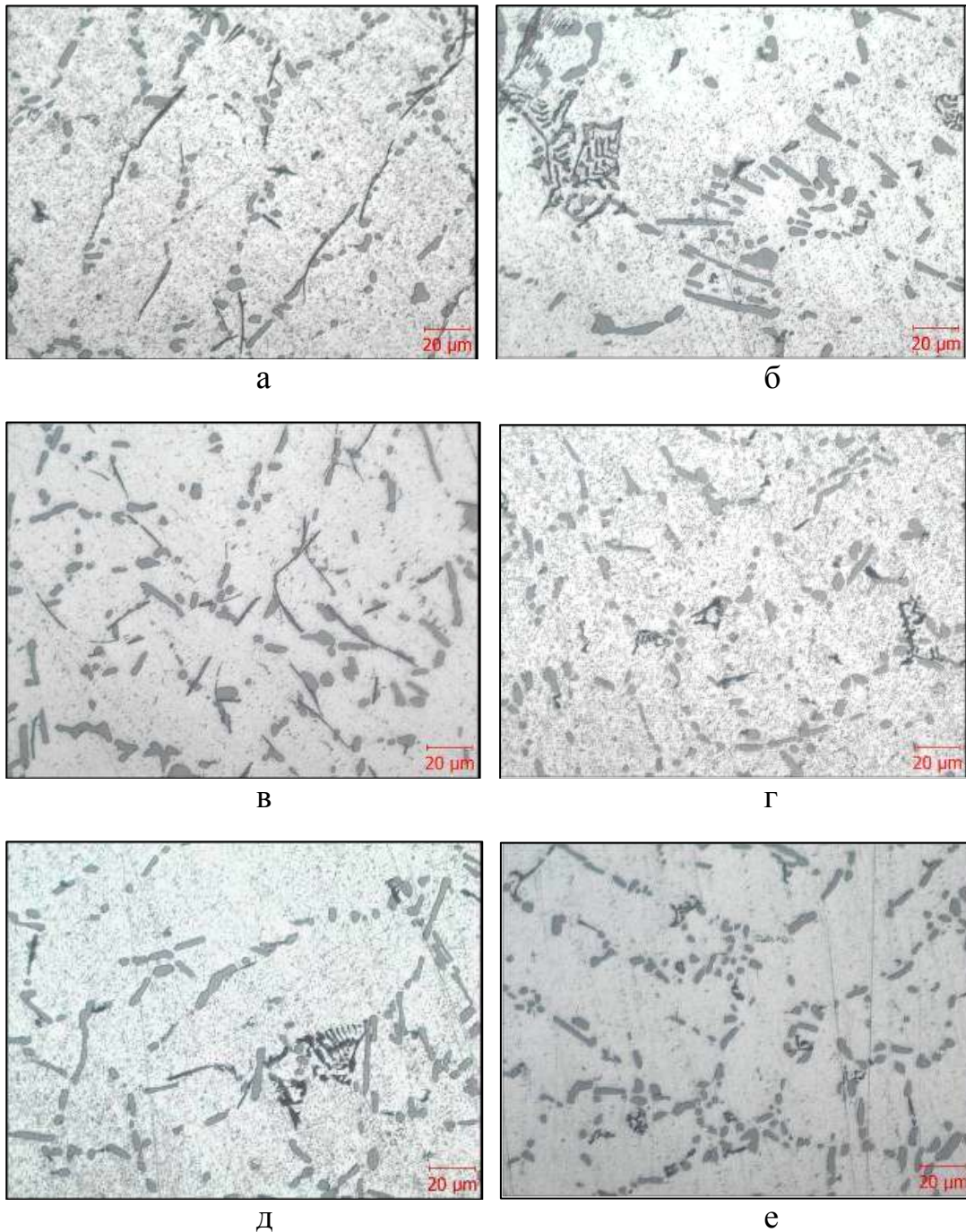
Рисунок 11 – Вигляд деталей «Тарілотримач»

Після виготовлення деталей та зразків вони піддавались термічному обробленню за режимом Т5 (загартування + неповне штучне старіння) згідно з ДСТУ 2839-94. Аналіз макроструктури (рис.12) дослідних деталей демонструє переваги використання технології комплексного оброблення розплаву вторинного сплаву АК7ч при виготовленні деталей «Тарілотримач». Так додавання до розплаву ДКШ спричиняє помірне подрібнення макроструктури (див. рис. 12 а, в). Наступне оброблення розплаву модифікувальним комплексом МК-1 окрім подрібнення зерен забезпечує стабільно рівновісну структуру за перетином макрошліфа (див. рис. 12 д). Додаткове примусове підпресування при гравітаційному литті у кокіль деталей забезпечило отримання покращеної щільної структури (див. рис. 12, б, г, е). Найкращу макроструктуру мають деталі, що виготовлено за комплексною технологією. Пористість металу всіх технологічних варіантів виготовлення виливків не перевищувала 1-й бал за ДСТУ 2839-94.



а, в, д – без додаткового підпресування; б, г, е – з додатковим підпресуванням  
Рисунок 12 - Макроструктура дослідних деталей, х1

Мікроструктура деталей, що виготовлені за класичною технологією без додаткового оброблення, складалась з алюмінієвої матриці, доволі компактних включень евтектичного кремнію та витягнутих пластинчастих інтерметалідних  $\beta$ -фаз  $Al_5FeSi$  з середньою довжиною 30...40 мкм (рис. 13 а, б). Також доволі явно проглядалася наявність дендритів, а структура виглядала неоднорідною (див. рис. 13 а).



а, в, д – без додаткового підпресування; б, г, е – з додатковим підпресуванням  
Рисунок 13 – Мікроструктура деталей «Тарілкотримач»

Додавання до розплаву 35 мас. % ДКШ забезпечило отримання інвертованої структури сплаву з доволі дрібними та компактними включеннями евтектичного кремнію, що рівномірно розповсюджений за об'ємом. Також відбулося зменшення розмірів залізовмісних пластинчастих інтерметалідних  $\beta$ -фаз в середньому до 20...30 мкм, однак зміни їх форми не спостерігали (див. рис. 13 в). Вплив оброблення розплаву модифікувальним комплексом МК-1 позначився на морфології залізовмісних  $\beta$ -фаз, які набули більш компактної та розгалуженої форми, що за своїм зовнішнім виглядом нагадують «китайські ієрогліфи» (див. рис. 13 д).

В усіх технологічних варіантах виготовлення деталей з підпресуванням (див. рис. 13 б, г, е), на поверхні шліфа майже відсутні голкоподібні та пластинчасті інтерметаліди. Загалом структура характеризувалась як доволі однорідна, дрібнодисперсна та інвертована, котра, за канонами матеріалознавства, забезпечує найбільш стабільний та високий комплекс механічних властивостей. При наявності відповідного обладнання та у випадках коли це дозволяють розміри і форма деталей, необхідно застосовувати примусове підпресування.

Термічна обробка за режимом T5 була продиктована технологією виготовлення деталі «Тарілкотримач». Механічні властивості сплаву АК7ч для варіанту без обробки становили:  $\sigma_{\text{B}} = 200$  МПа,  $\delta = 3,2\%$ , НВ 110; з додаванням 35 мас. % ДКШ:  $\sigma_{\text{B}} = 210$  МПа,  $\delta = 4,5\%$ , НВ 105; та з додаванням 35 мас. % ДКШ і 0,05 мас. % МК-1:  $\sigma_{\text{B}} = 230$  МПа,  $\delta = 5,2\%$ , НВ 102. Механічні властивості за кожним технологічним варіантом добре узгоджуються зі структурою сплавів. Отримання у виливках інвертованої структури дозволило забезпечити необхідний рівень міцності та досягти значного підвищення пластичності (у 1,63 рази). За отриманими результатами була рекомендована до впровадження технологія комплексної обробки сплаву, з використанням 35 мас. % ДКШ та обробкою 0,05 мас. % модифікувальним комплексом МК-1.

## ВИСНОВКИ

На підставі аналізу технічної літератури та власних експериментальних даних показана можливість підвищення механічних і службових властивостей алюмінієвих сплавів, у тому числі і вторинних, за рахунок отримання інвертованої структури. Вирішено задачу з пошуку універсального та дешевого способу отримання виливків із алюмінієвих сплавів, в тому числі і вторинних, з високим рівнем властивостей.

Отримана регресійна модель, що описує вплив кількості ДКШ, вмісту заліза в сплаві та кількості модифікувального комплексу МК-1, при обробленні розплаву, на характеристики міцності, пластичності та твердості алюмінієвих сплавів. Перевірка даних аналітичної оптимізації у лабораторних умовах підтвердила отримання інвертованої структури у дослідних сплавах та високий рівень їх властивостей. Комплексна взаємодія ДКШ та МК-1 дозволила отримувати деталі з більш високими механічними властивостями внаслідок формування структури з рівномірним розподілом фаз та зміною морфології залізовмісних інтерметалідів.

Результати проведених досліджень дозволили зробити наступні висновки:

1. Заводська технологія обробки алюмінієвих сплавів забезпечує заданий відповідно до ДСТУ 2839-94 рівень механічних властивостей лише за умови використання первинних шихтових матеріалів, досить чистих за домішками. Використання за заводською технологією у якості модифікатора  $\text{K}_2\text{ZrF}_6$  у кількості не менше ніж 1,0 мас. % забезпечує досить стабільне модифікування евтектичного кремнію і  $\alpha$ -твердого розчину, але не впливає на зміну морфології та характеру розподілу залізовмісних інтерметалідних фаз. Високий вміст значної кількості великих за розмірами інтерметалідних фаз несприятливої морфології є основною

причиною низького рівня властивостей сплавів, що отримані з низькосортної шихти з підвищеним вмістом домішок.

2. Модифікувальний комплекс МК-1 сильно впливає на морфологію кремнію і залізовмісних фаз, при цьому його кількість необхідно погоджувати з концентрацією Fe в сплаві для отримання оптимальних структури і механічних властивостей. При обробці розплаву модифікувальним комплексом МК-1 можливе отримання якісних виливків з шихти, що складається із 100% вторинної сировини сплаву АК7ч з вмістом Fe до 0,60 мас. %.

3. Розроблено просту в реалізації та низьковартісну технологію з отримання дрібнокристалічної шихти АК7ч нагартувальним отвердінням для використання її у якості добавки при спадковому модифікуванні. Мікроструктура ДКШ характеризується розміром зерен  $\alpha$ -твердого розчину алюмінію у середньому 10...15 мкм та розміром евтектичного кремнію 1...2 мкм.

4. Встановлено, що за допомогою комплексного застосування 0,1 мас. % модифікувального комплексу МК-1 та 35 мас. % дрібнокристалічної шихти можливо отримувати якісне литво навіть на сплавах, що мають концентрацію заліза до 1,84 мас. %, тобто значно вищу ніж допустима за ДСТУ 2839-94 для виливків, котрі відлито у кокіль. Раніше вплив спадковості оцінювався лише для первинних сплавів.

5. Застосування розробленої технології комплексного модифікування дозволить розширити номенклатуру деталей відповідального призначення для яких можуть бути застосовані вторинні сплави без втрати якості. Це дозволить скоротити витрати на придбання імпорتنих матеріалів на 37,0...39,5%, що, в свою чергу, знижує собівартість виготовлення виробів на 20...30%.

6. Комплексне модифікування вторинних силумінів продемонструвало не лише покращення механічних характеристик виливків, але й позитивний екологічний ефект. Зменшення витрат на сировину, а також зниження шкідливих викидів у процесі модифікування, сприяють зниженню загальної екологічної навантаженості виробництва та вирішують проблему утилізації відходів власного виробництва.

## ПЕРЕЛІК ОПУБЛІКОВАНИХ РОБІТ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

### Статті у фахових наукових виданнях

1. Frolov R.O., Mityayev O.A., Petrashov O.S., Glotka O.A. Modification of the return silumin АК7ch with a fine crystalline charge. *Journal of Science*. Lyon. 2024. №54. P. 35–40. DOI: 10.5281/zenodo.11550476.

2. Мітяєв О.А., Волчок І.П., Фролов Р.О., Повзло В.М., Петрашов О.С. Підвищення властивостей вторинного силуміну АК12М2МгН наномодифікуванням. *Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні*. 2022. № 2. С. 88–92. DOI: 10.15588/1607-6885-2022-2-14.

3. Волчок І.П., Мітяєв О.А., Фролов Р.О., Круліковська О.О., Ванярха Т.В. Підвищення якості вторинних силумінів в умовах сучасного виробництва. *Вісник Харківського національного автомобільно-дорожнього університету*. Харків. 2020. Вип. 91. С. 105–110. DOI: 10.30977/BUL.2219-5548.2020.91.0.105.

4. Фролов Р.О., Волчок І.П., Мітяєв О.А., Лукінов В.В. Формування структури та властивостей литих деталей зі сплаву АК7ч з використанням комплексної обробки. *Металознавство та термічна обробка металів*. 2019. № 2 (85). С. 62–66. DOI: 10.30838/J.PMNTM.2413.230419.61.295.

5. Волчок І.П., Мітяєв О.А., Фролов Р.О., Сахно О.С. Енергоєфективна технологія отримання алюмінієвих сплавів. *Теплотехніка, енергетика та екологія в металургії: колективна монографія*. У двох книгах. – Книга друга / Під загальною редакцією д.т.н., проф. Ю.С. Проїдака. – Дніпро: Нова ідеологія, 2017. [рос.]. С. 272–275.

6. Фролов Р.О., Мітяєв О.А., Волчок І.П., Петрашов О.С. Спадкове модифікування вторинних алюмінієвих сплавів. *Будівництво, матеріалознавство, машинобудування. Стародубівські читання*. 2017. Вип. 95. [рос.]. С. 142–148.

7. Мітяєв О.А., Волчок І.П., Фролов Р.О., Лоза К.Н., Гнатенко О.В., Лукінов В.В. Комплексне модифікування вторинних силумінів. *Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна*. 2014. № 6 (54). [рос.]. С. 87–96. DOI: 10.15802/stp2014/33180.

#### **Інші публікації, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації**

8. Фролов Р.О., Волчок І.П. Підвищення механічних властивостей вторинного силуміну АК8МЗ. *Людина і космос : збірник тез доп. XVII міжнар. молодіжної наук.-практ. конф., м. Дніпропетровськ, 8–10 квітня 2015 р. Дніпропетровськ, 2015*. С. 299.

9. Волчок І.П., Мітяєв О.А., Фролов Р.О., Лоза К.Н., Клочихін В.В., Лукінов В.В. Підвищення механічних властивостей вторинних сплавів АК7ч та А356.2. *Будівництво, матеріалознавство, машинобудування. Стародубівські читання*. 2016. Вип. 90. [рос.]. С. 64–70.

10. Фролов Р.О., Сахно О.С., Рижова О.В. Підвищення механічних властивостей вторинного алюмінію спадковим модифікуванням. *X Міжнар. молод. наук.-техн. читання ім. О.Ф. Можайського*. (Запоріжжя-Приморськ, 15–17 травня 2017 г.). Запоріжжя: АТ «МОТОР СІЧ», 2017. [рос.]. С. 207–208.

11. Фролов Р.О., Мітяєв О.А., Сахно О.С. Вплив складу шихти на структуру та властивості доевтектичного сплаву АК7. *Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту : матеріали 77 міжнар. наук.-практ. конф. (Дніпро, 11–12 травня 2017 р.)*. Дніпро: ДНУЗТ, 2017. С. 310–311.

#### **АНОТАЦІЯ**

**Фролов Р.О. «Підвищення механічних властивостей вторинних силумінів комплексною технологією модифікування».** – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.02.01 – Матеріалознавство. Національний університет «Запорізька політехніка» МОН України, м. Запоріжжя, 2025.

Дисертація присвячена розробці комплексної технології отримання виливків із вторинних силумінів за допомогою удосконалення процесів модифікування і

залучення механізму впливу спадковості шихти. Досліджено вплив обробки модифікувальних комплексів  $K_2ZrF_6$  та МК-1 на вторинні сплави АК7ч та А356.2. Доведена можливість отримання високої якості литва на сплавах з концентрацією заліза до 0,6 мас. %.

Розширено уявлення про вплив спадковості шихти для вторинних сплавів АК7ч, А356.2. Розроблено технологію отримання дрібнокристалічної шихти із сприятливою мікроструктурою для спадкового модифікування. За допомогою комплексного застосування модифікувальної обробки та дрібнокристалічної шихти отримано, для вторинного силуміну АК7ч, виливки у кокіль з рівнем механічних властивостей, що задовольняють вимоги ДСТУ 2839-94 при перевищенні вмісту Fe у 1,84 рази.

**Ключові слова:** алюміній; силумін; вторинні сплави; структуроутворення; інтерметалідні фази; міцність; пластичність; твердість; факторний аналіз; шихта; спадковість; модифікувальна обробка; термічна обробка.

## SUMMARY

**Frolov R.O. «Increasing the mechanical properties of secondary silumins by complex modification technology».** – on the rights of the manuscript.

The dissertation is intended for a candidate degree in engineering science by specialty 05.02.01 - Materials Science. National University Zaporizhzhia Polytechnic, Ministry of Education and Science of Ukraine, Zaporizhzhia, 2025.

The content of the dissertation. The dissertation is devoted to solving an important scientific and practical problem – the development of the complex technology for producing castings from secondary silumins by improving modification processes and involving the mechanism of influence of the charge heredity. The paper analyses modern domestic and foreign methods of influencing the melt to obtain a fine-grained structure and a high level of mechanical properties. In this work spectral analysis of the chemical composition of the alloys, optical microscopy, X-ray spectral, X-ray diffraction, fractographic analyses, as well as determination of mechanical properties (strength, ductility, hardness) were used.

The effect of treatment with modifying complexes  $K_2ZrF_6$  and МК-1 on secondary alloys АК7ch and А356.2 was studied. The possibility of obtaining high quality castings from alloys with iron concentrations up to 0.6 wt. %. The understanding of the impact of charge heredity on secondary alloys АК7ch and А356.2 was expanded. The technology of producing a fine-crystalline charge with a favourable microstructure for hereditary modification with a cross-sectional size dendrite of  $\alpha$ -solid aluminium solution of 10...15  $\mu\text{m}$  and a size of eutectic silicon and intermetallic inclusions of 1...2  $\mu\text{m}$  was developed. With the help of the complex application of modifying treatment and fine-crystalline charge, for secondary silumin АК7ch, the mold castings with the level of mechanical properties that meet the requirements of DSTU 2839-94, at an excess of Fe content by 1.84 times were obtained. The regression equations obtained for the first time demonstrate the possibility of obtaining castings with high mechanical properties  $\sigma_B > 300 \text{ MPa}$ ,  $\delta > 5\%$  and  $\text{HRB} > 50$  when used in the charge up to 42.05 wt. % fine-crystalline charge and modifying treatment of 0.1 wt. % МК-1. The application of such complex processing allows expanding the range of parts made from the foundry return.

The positive effect of external pressure on the macro and microstructure of parts cast using the complex modification technology has been demonstrated. This effect will reduce the cost of purchasing primary materials, which will reduce the cost of manufacturing products by 20...30% and solve the problem of waste disposal.

**Keywords:** aluminium; silumin; secondary alloys; structure formation; intermetallic phases; strength; plasticity; hardness; factor analysis; charge; heredity; modifying treatment; heat treatment.