

Міт'яєв О.А., Петрашов О.С., Капустян О.Є.

СПАДКОВЕ МОДИФІКУВАННЯ ВТОРИННИХ АЛЮМІНІЄВИХ СПЛАВІВ

Низька вартість алюмінієвих ливарних сплавів зумовлює високий інтерес до пошуків нових методів її переробки. Застосування загальновідомих методів управління структурою та властивостями виливків із алюмінієвих сплавів не завжди забезпечують необхідну якість деталей, виготовлених із вторинної сировини, у зв'язку з негативним впливом шихти та домішок заліза. Мета досліджень - підвищення механічних властивостей вторинних ливарних алюмінієвих сплавів та розробка нової ресурсозберігаючої технології їх рециклінгу. Матеріалом для даного дослідження обрано сплав АК7ч і його аналог А356.2. Частина шихти була перероблена в дрібнокристалічний переплав шляхом розливання рідкого металу температурою 720 °С в воду при температурі 20°С. Експериментальні плавки з різним складом вихідної шихти, різною обробкою комплексом, що модифікує і різною концентрацією заліза проводили в електричній печі опору. Дослідження структури і контроль механічних властивостей здійснювали на зразках після термічної обробки по режиму Т6. Проведені дослідження показали що комплексне застосування модифікуючої обробки і дрібнокристалічного переплаву (МК-1 до 0,1% і МКП до 45% у складі) здатне значно підвищити механічні властивості вторинних алюмінієвих сплавів АК7ч і А356.2 ($\sigma_B > 300$ МПа, $\delta > 5\%$ і $HRB > 50$). Отримано залежності межі міцності, відносного видовження і твердості від кількості модифікуючого комплексу і дрібнокристалічного переплаву в початковій шихті. Отримані результати дозволяють застосувати комплексну технологію переробки вторинної сировини для отримання якісних виливків в промислових умовах. Використання шихтових матеріалів зі сприятливою спадковою структурою дозволяє скоротити кількість застосовуваних добавок, що модифікують, що в свою чергу значно знижує викиди газів і покращує екологічну обстановку в ливарному цеху.

Ключові слова: алюміній; інтерметалідні фази; структура; спадковість; рециклінг; модифікуюча обробка.

Постановка проблеми. Алюмінієві ливарні сплави, завдяки їх фізичним і механічним властивостям, все частіше застосовуються в машинобудуванні замість чавуну і сталі. Низька вартість вторинної сировини зумовлює високий інтерес до пошуків нових методів її переробки.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Відомо, що сплави на основі алюмінію мають спадковість, тобто структура і механічні властивості шихти певною мірою зберігаються у виливку [1,2]. Аналіз останніх досліджень показує, що якість литих алюмінієвих деталей здебільшого залежить від наступних факторів: технологічних параметрів лиття, наявності у сплаві сторонніх домішок (зокрема заліза) та розміру структурних складових шихти [3-5]. Розроблено безліч методів на розплав з метою підвищення механічних властивостей деталей, які зазвичай впливають однією з перелічених вище факторів [6]. Тому останнім часом дедалі ширше застосування знаходять технології комплексного на розплав [4,5].

Мета дослідження. Основним завданням даного дослідження була розробка ресурсозберігаючої технології переробки відходів власного виробництва зі сплавів АК7ч і А356.2, що включає обробку модифікуючим комплексом МК-1 [7] та заміну частини шихти спеціально підготовленим дрібнокристалічним переплавом.

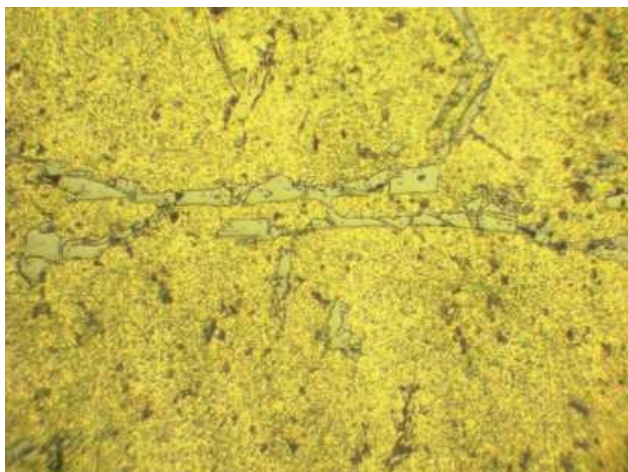
Основний матеріал дослідження. Як матеріал для цього дослідження застосовувався сплав, що складається з повернення доєвтектичних сплавів АК7ч та його закордонного

Машинобудування і зварювальне виробництво

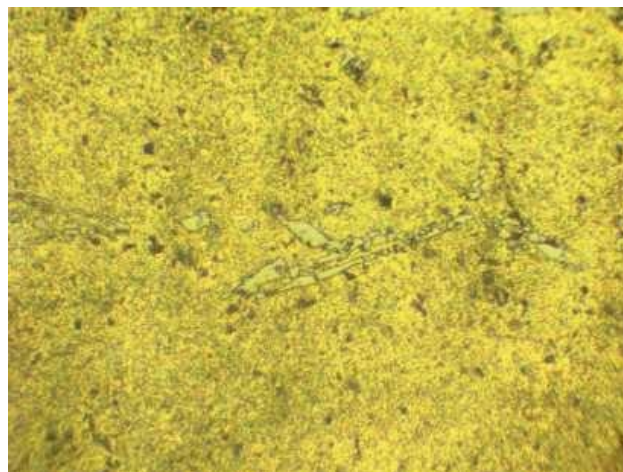
аналога А356.2 (табл. 1) у пропорціях по масі 1:1. Ця шихта мала грубу кристалічну структуру (рис. 1).

Таблиця 1 - Хімічний склад сплавів, що використовуються як шихта

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



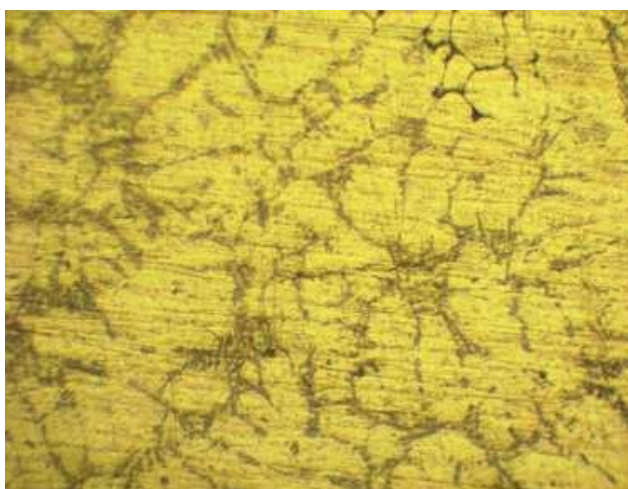
а



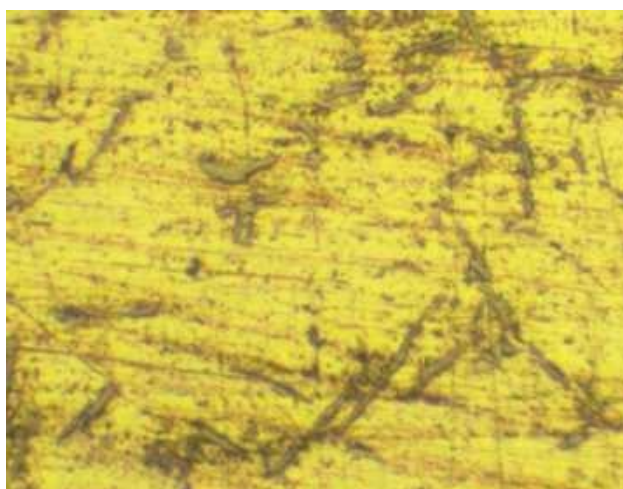
б

Рисунок 1 – Мікроструктура шихти x400: а – АК7ч; б – А356.2

Відповідно до складеного рототабельного плану повного факторного експерименту 2³ було проведено 20 дослідних плавок масою по 3 кг. Розплав готували в електричній печі опору. Частина шихти пройшла попередню переробку загартованим затвердінням шляхом розливання рідкого металу при температурі 720 °С через ємність з перфорованим дном у воду 20°С. У результаті було отримано дрібнокристалічний переплав (МКП), як гранул Ø 10...20 мм з ультрадисперсною структурою (рис. 2).



а



б

Рисунок 2 – Мікроструктура МКП: а – x400; б – x1000

Як змінні незалежні фактори було прийнято: вміст МКП у вихідній шихті від 0 до 84,1 %, вміст Fe від 0,16 до 1,84 % та кількість модифікуючого комплексу від 0,016 до 0,184 %. Вміст

Машинобудування і зварювальне виробництво

Fe у кожній плавці згідно з матрицею експерименту вирівнювався шляхом дошихтування розплаву при температурі 720 °С залізним порошком ПЖР2 [8]. Перед розливом у сталевий кокіль розплав піддавався обробці модифікуючим комплексом МК-1. Термообробку проводили за режимом Т6 згідно з ГОСТ 1583-93, після чого виготовляли шліфи для вивчення мікроструктури та зразки для механічних випробувань. Для вивчення мікроструктури використовувався оптичний мікроскоп SIGETA MM-700 зі збільшенням у 400 разів після обробки поверхні шліфу водним розчином кислот 0,5% HF+0,5% HNO₃+1,5% HCl протягом 10 с. Статистична обробка результатів проводилася з використанням методів статистичного аналізу та програми Microsoft Excel [9].

Сплави, оброблені за комплексною технологією мали структуру, що складається з алюмінієвої матриці (α -твердий розчин Si та інших домішок Al), евтектичного Si та інтерметалідних фаз Al₅FeSi, Al₃Fe, Al₂Fe [4] (рис. 3). Залежно від складу шихти, вмісту Fe та кількості застосовуваного модифікатора частинки кремнію та залізовмісних фаз змінювали свій розмір і форму, що стало основним фактором, що впливає на механічні властивості сплавів, що узгоджується з результатами робіт [3, 4, 10].

Представлені структури «зоряних» точок матриці планування експерименту відображають вплив факторів, що вивчаються, на структурні зміни і механічні властивості сплаву (рис 3, 4 і 5).

Підвищення вмісту МКП у шихті від 0 до 84,1% призвело до диспергування кремнію та інтерметалідних включень (рис. 3а, б). Збільшення концентрації Fe з 0,16 до 1,84% призводило до утворення у сплаві великої кількості витягнутих інтерметалідних фаз (див. рис. 3, г). Зростаюча присадка модифікатора МК-1 активно впливала на розмір та форму основних структурних складових.

Результати статистичної обробки дозволили отримати невідомі раніше залежності межі міцності, відносного подовження і твердості від досліджуваних чинників. Залежності мають точку екстремуму в межах області дослідження, що свідчить про раціональний вибір інтервалів варіювання факторів, що вивчаються.

Застосування шихти, що містить 30...45% МКП дозволяє підвищувати межу міцності σ_b на 30...40 МПа, відносне подовження δ на 1...2 % і твердість HRB на 2...6 од. (рис. 4). Подальше збільшення МКП у шихті призводить до зниження механічних властивостей, що ймовірно пов'язане із забрудненням сплаву оксидом алюмінію Al₂O₃.

Обробка модифікуючим комплексом МК-1 дозволяє досягти підвищення межі міцності на 15-30 МПа, відносного подовження на 1-1,3% і твердості на 7-8 од. (рис. 5). Підвищення механічних властивостей досягнуто в результаті подрібнення та зміни форми кристалів первинного кремнію та інтерметалідів (рис. 3 д, е). Зростання концентрації Fe у сплаві призвело до зниження пластичності та підвищення твердості (рис. 3, 4) на всьому інтервалі досліджень. У концентраціях до 1,0 % Fe залізо підвищувало межу міцності через зміцнення твердого розчину Al. Вищі концентрації Fe призводили до зниження σ_b внаслідок утворення витягнутих інтерметалідних фаз, що мають низький когерентний зв'язок з матрицею і виступають у ролі активного концентратора напружень, що узгоджується з отриманими раніше результатами [4, 10].

Наукова новизна та практична цінність. Вперше отримані залежності σ_b , δ , HRB від кількості МКП, Fe та модифікатора для вторинних сплавів АК7ч і А356.2. Показано нові можливості підвищення механічних властивостей вторинних силумінів, внаслідок обробки розплаву модифікуючим комплексом МК-1 у поєднанні з використанням МКП. Отримані результати дозволили застосувати розроблену комплексну технологію для отримання якісних виливків із відходів виробництва у промислових умовах.

Машинобудування і зварювальне виробництво

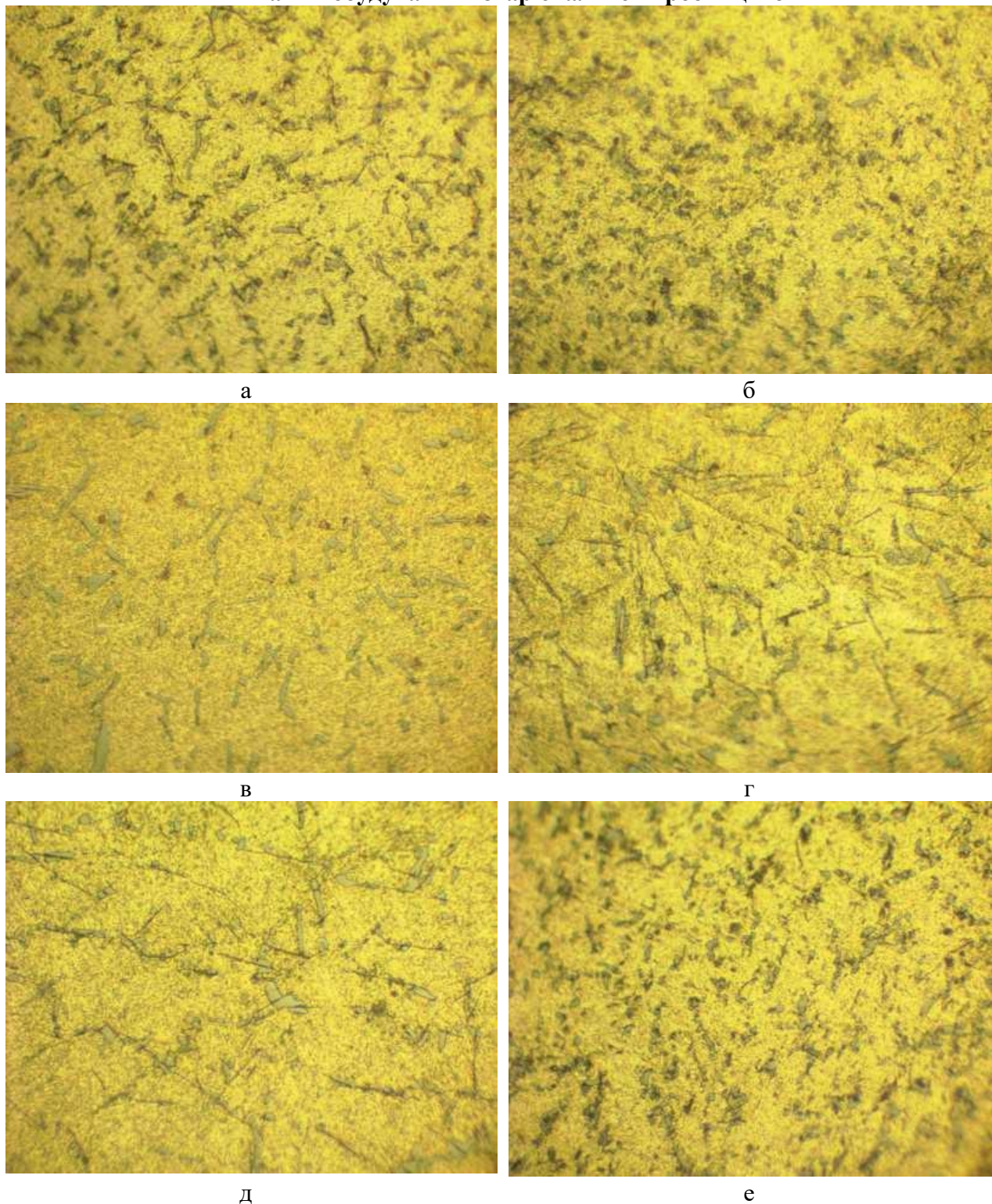


Рисунок 3 – Мікроструктура сплаву АК7ч х400: а – 0%МКП 1,0% Fe 0,1%МК-1; б – 84,1%МКП 1,0% Fe 0,1%МК-1; в – 42,05%МКП 0,16% Fe 0,1%МК-1 ; г – 42,05%МКП 1,84% Fe 0,1%МК-1; д – 42,05%МКП 1,0% Fe 0,016%МК-1 ; е – 42,05%МКП 1,0% Fe 0,184%МК -1

Машинобудування і зварювальне виробництво

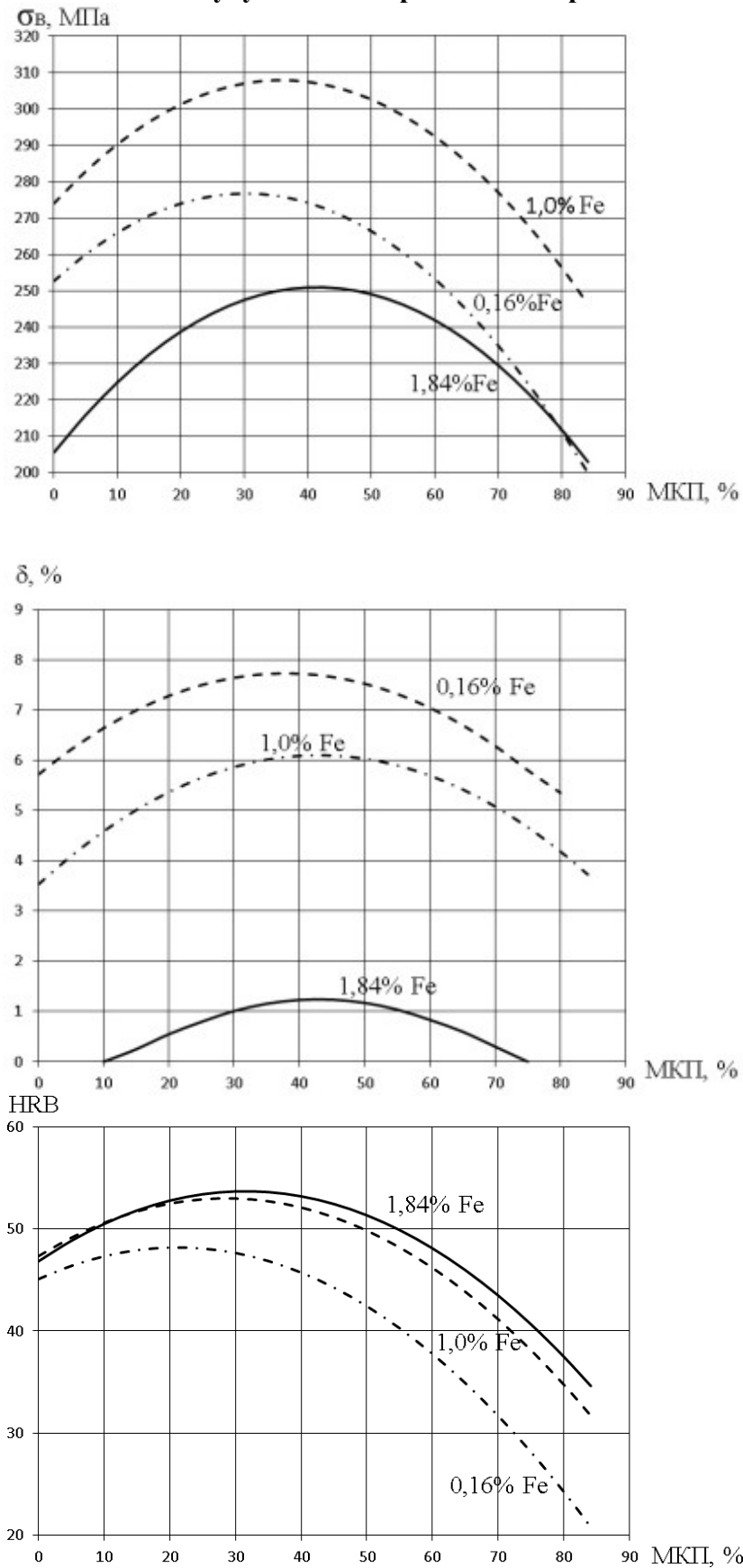


Рисунок 4 – Вплив складу шихти та концентрації Fe на механічні властивості сплаву АК7ч при обробці розплаву 0,1% МК-1

Машинобудування і зварювальне виробництво

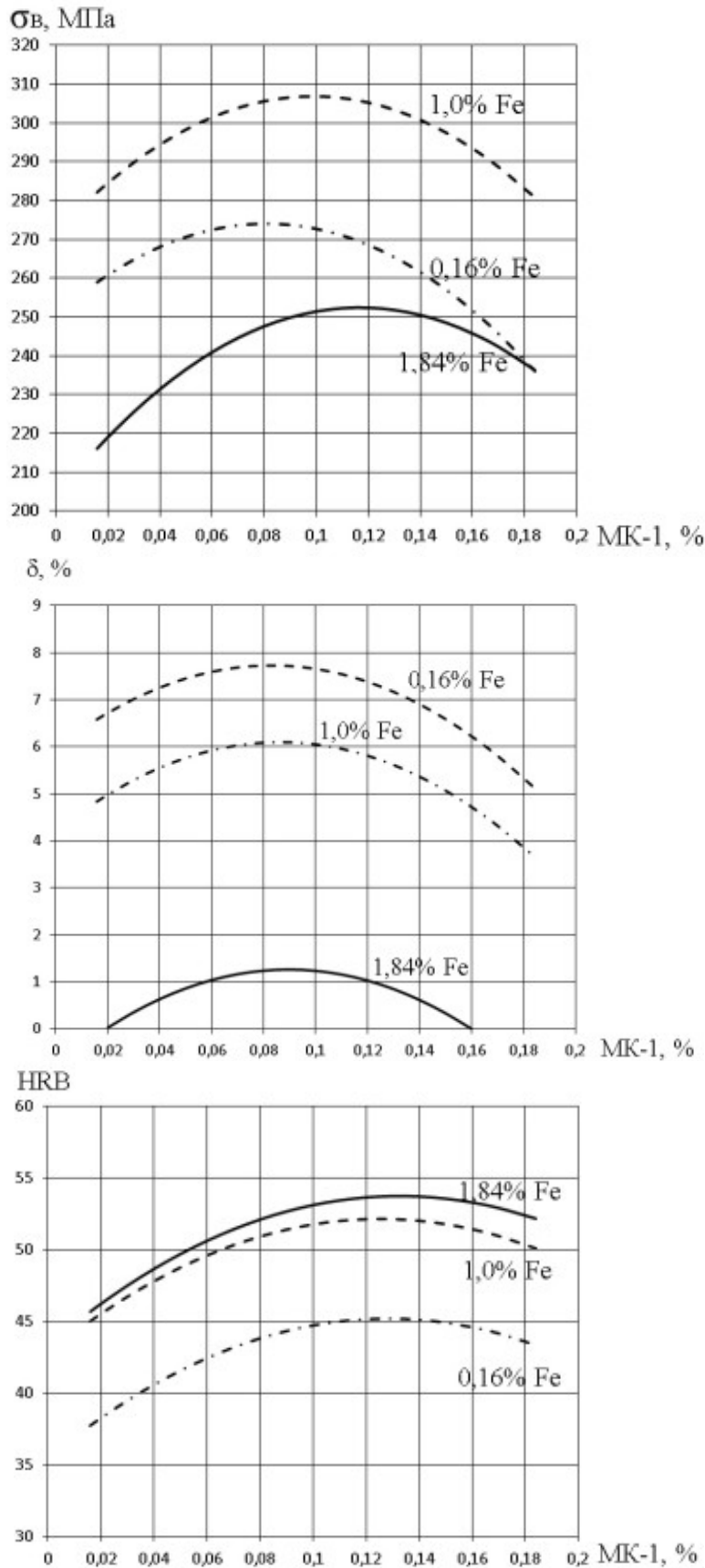


Рисунок 5 – Вплив кількості МК-1 та концентрації Fe на механічні властивості сплаву АК7ч за наявності в шихті МКП 42,05%

ВИСНОВКИ

1. Застосування загальновідомих методів управління структурою та властивостями виливків із алюмінієвих сплавів не завжди забезпечують необхідну якість деталей, виготовлених із вторинної сировини, у зв'язку з негативним впливом шихти та домішок заліза.
2. Встановлено, що отримання виливків з високими показниками механічних властивостей $\sigma_B > 300$ МПа, $\delta > 5\%$ і $HRB > 50$ для ливарних сплавів АК7ч і А356.2 можливе при застосуванні обробки МК-1 до 0,1% і МКП до 45% у складі.
3. Використання шихтових матеріалів зі сприятливою спадковою структурою дозволяє скоротити кількість застосовуваних добавок, що модифікують, що в свою чергу значно знижує викиди газів і покращує екологічну обстановку в ливарному цеху.

Список використаних джерел

1. *Марукович Е.И.* Модифицирование сплавов / *Е. И. Марукович, В. Ю. Стеценко.* – Минск : Беларуская навука, 2009. – 192с.
2. *Никитин В.И.* Развитие и применение явления структурной наследственности в алюминиевых сплавах / *В. И. Никитин, К. В. Никитин* // *Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies.* – 2014. – № 4 – с. 424-429– Режим доступа: <http://elib.sfu-kras.ru/handle/2311/13236>.
3. *Лютова О. В.* Повышение литейных свойств вторичных алюминиевых сплавов / *О. В. Лютова* // *Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна.* - 2013. - № 3. - С. 53–59. – Режим доступа: http://nbuv.gov.ua/UJRN/vdnuzt_2013_3_9.
4. *Доценко Ю. В.* Влияние комплексной технологии на свойства отливок из сплава АК7ч с повышенным содержанием железа / *Ю.В. Доценко, В.Ю. Селиверстов* // *Восточно-европейский журнал передовых технологий.* – 2011. – Вип.№ 54. – с.45–48. – Режим доступа: journals.uran.ua/eejet/article/download/2282/2086.
5. *Немененок Б.М.* Теория и практика комплексного модифицирования силуминов. – Мн.: Технопринт, 1999. – 1072с.
6. *Марукович Е.И.* Повышение эффективности модифицирования / *Е.И. Марукович, В.Ю. Стеценко* // *Литье и металлургия.* 2006. №2. С. 151-152.
7. Пат. 46094 Україна, МПК (2009) C22C1/00. Модифікувальний комплекс для алюмінієвих сплавів / *Лоза К. М., Мітяєв О. А., Волчок І. П.* (Україна); заявник та патентовласник Запорізький національний технічний університет. – № u200905914; заявл. 09.06.2009; опубл. 10.12.2009, Бюл. № 23. – 4 с.
8. ГОСТ 9849-86 Порошок железный. Технические условия. – Введ. 1987-06-30. – М.: Изд-во стандартов, 1987. — 9 с. Режим доступа: <http://vsehost.com/Catalog/19/19859.shtml>.
9. *Борздова Т.В.* Основы статистического анализа и обработка данных с применением Microsoft Excel. – Минск : ГИУСТ БГУ, 2011. – 75с.
10. *Волчок И. П.* Повышение механических свойств вторичных сплавов АК7ч и А356.2 / *И. П. Волчок, А. А. Митяев, Р. А. Фролов, К. Н. Лоза, В. В. Клочихин, В. В. Лукинов* // *Строительство. Материаловедение. Машиностроение. Серия : Стародубовские чтения.* - 2016. - Вып. 90. - С. 64–70. - Режим доступа: http://nbuv.gov.ua/UJRN/smmssc_2016_90_10.

Mityayev O. A., Petrashev O.S., Kapustian O.Ye.

HEREDITARY MODIFICATION OF SECONDARY ALUMINUM ALLOYS

The low cost of aluminum casting alloys causes high interest in the search for new methods of processing. The use of well-known methods of controlling the structure and properties of aluminum alloy castings does not always provide the required quality of parts made from secondary raw materials due to the negative impact of the charge and iron impurities. The purpose of the research is to improve the mechanical properties of secondary aluminum casting alloys and develop a new resource-saving technology for their recycling. The material for this study was the AK7ch alloy and its analogue A356.2. Part of the charge was processed into a fine-crystalline remelt by pouring liquid metal with a temperature of 720 °C into water at a temperature of 20 °C. Experimental melting with different composition of the initial charge, different treatment with a modifying complex and different iron concentration was carried out in an electric resistance furnace. The study of the structure and control of mechanical properties was carried out on samples after heat treatment in the T6 mode. The conducted studies have shown that the complex application of modifying treatment and fine-crystalline remelting (МК-1 up to 0.1% and МКР up to 45% in the composition) can significantly increase the mechanical properties of secondary aluminum alloys AK7ch and A356.2 ($\sigma_v > 300$ МПа, $\delta > 5\%$ and HRB > 50). The dependences of the tensile strength, relative elongation and hardness on the amount of modifying complex and fine-crystalline remelting in the initial charge were obtained. The obtained results allow the application of complex technology for processing secondary raw materials to obtain high-quality castings in industrial conditions. The use of charge materials with a favorable hereditary structure allows reducing the amount of modifying additives used, which in turn significantly reduces gas emissions and improves the environmental situation in the foundry.

Keywords: aluminum; intermetallic phases; structure; heredity; recycling; modifying treatment.

Стаття надійшла 12.05.2025р.

УДК 669.14.018.24

doi.org/10.31498/2522-9990292025330226

Сидоренко М.В., Фролов Р.О., Єманов М.В., Капустян О.Є.

ПЕРСПЕКТИВНІ МЕТОДИ ПІДВИЩЕННЯ КОНТАКТНОЇ ВИТРИВАЛОСТІ СТАЛІ ЕІ-347Ш

Вальниці машин нового покоління стають все більш складними виробами, до яких пред'являються високі вимоги щодо забезпечення контактної витривалості, у тому числі при підвищеній температурі. Для підвищення контактної витривалості застосовують поверхневе пластичне деформування (ППД). Одним з перспективних напрямків ППД є зміцнення мікрокульками. Більшість робіт не враховує вплив температури на контактну витривалість деталей після ППД. Метою роботи є підвищення контактної витривалості сталі ЕІ-347Ш за рахунок раціоналізації режимів зміцнення мікрокульками та скляними кульками. Випробування на контактну втому проводилися на установках МКВ-Т при температурах 20 °C і 300 °C. Всі зразки перед зміцненням піддавалися поліруванню. Для цього було спеціально розроблено пристосування, яке забезпечувало постійний тиск на зразок при