

УДК 669.715

Аюпова Т.А., Носко О.А., Єлагін А.С., Коваль Д.О.

Природа інтерметаліду $Al_8Si_6Mg_3Fe$ в сплаві АК7ч, мікролегованому комплексом Ti-B-Sr

Аіурова Т.А., Носко О.А., Яєлагін А.С., Ковал Д.О.

Nature of the intermetallic $Al_8Si_6Mg_3Fe$ in the АК7ч alloy microalloyed by the Ti-B-Sr complex

Мета. Метою дослідження є визначення структури та особливостей формування залізовмісного інтерметаліду $Al_8Si_6Mg_3Fe$ в сплаві АК7ч, при комплексній дії мікролегування Ti-B-Sr та термочасової обробки розплаву. *Методика.* Об'єктом дослідження служив сплав АК7ч, мікролегований комплексом Ti-B-Sr після термочасової обробки розплаву за різними режимами. Дослідження особливостей структуроутворення інтерметаліду $Al_8Si_6Mg_3Fe$ проводили за допомогою металографічного, локального рентгеноспектрального аналізу та методом диференційно-скануючої калориметрії.

Результати. Визначений хімічний склад залізовмісного інтерметаліду $Al_8Si_6Mg_3Fe$, вивчена його морфологія та встановлена температурна залежність його об'ємної долі в сплаві АК7ч (Ti-B-Sr) від температури термочасової обробки розплаву. Встановлена причина зменшення об'ємної долі $Al_8Si_6Mg_3Fe$.

Наукова новизна. Виявлено зменшення кількості залізовмісної інтерметалідної фази $Al_8Si_6Mg_3Fe$ в сплаві АК7ч, що містить комплекс Ti-B-Sr, після термочасової обробки при 800°C.

Практична значущість. Зменшення негативного впливу заліза завдяки формуванню меншої кількості інтерметалідної сполуки $Al_8Si_6Mg_3Fe$ у структурі сплаву АК7ч, що містить комплекс Ti-B-Sr після термочасової обробки розплаву при 800°C дозволило покращити одночасно характеристики міцності і пластичності сплаву, а також його корозійну стійкість.

Ключові слова: силуміни, залізовмісні інтерметаліди, мікролегування, термочасова обробка

Objective. The aim of the study is to determine the chemical composition, structure, and peculiarities of the formation of the iron-containing intermetallic $Al_8Si_6Mg_3Fe$ in the АК7ч alloy under the combined effect of Ti-B-Sr microalloying and thermal treatment of the melt.

Methodology. The object of the study was the АК7ч alloy microalloyed with a Ti-B-Sr complex after temperature-time melt treatment under various regimes. The $Al_8Si_6Mg_3Fe$ intermetallic was studied using metallographic analysis, local X-ray spectral analysis, and differential scanning calorimetry.

Results. The chemical composition of the iron-containing intermetallic $Al_8Si_6Mg_3Fe$ was determined, its morphology was studied, and the temperature dependence of its volume fraction in the АК7ч (Ti-B-Sr) alloy as a function of temperature-time melt treatment was established. The reason for the reduction in the volume fraction of $Al_8Si_6Mg_3Fe$ was identified.

Scientific novelty. A reduction in the amount of the iron-containing intermetallic phase $Al_8Si_6Mg_3Fe$ in the АК7ч alloy containing the Ti-B-Sr complex was observed after temperature-time melt treatment at 800°C.

Practical significance. The reduction of the negative impact of iron due to the formation of a smaller amount of the intermetallic compound $Al_8Si_6Mg_3Fe$ in the structure of the АК7ч alloy containing the Ti-B-Sr complex, after temperature-time melt treatment at 800°C, simultaneously improved the strength, plasticity, and corrosion resistance of the alloy.

Keywords: silumins, iron-containing intermetallics, microalloying, thermal treatment

Вступ

Алюмінієві сплави широко та успішно застосовуються у багатьох галузях промисловості. Завдяки своїм гарним корозійним, конструкційним і технологічним властивостям, а також низькій питомій вазі, можна замінити ними більш важкі сплави. Однією з головних проблем силумінів є низька пластичність, обумовлена наявністю у структурі великих включень кристалів твердого кремнієвого розчину та інтерметалідів. Незважаючи на те, що структура та властивості силумінів добре вивчені, інформація, що стосується умов утворення та форм зростання залізовмісної інтерметалідної сполуки $Al_8Si_6Mg_3Fe$ обмежена. У зв'язку з цим дослідження впливу термочасової обробки сплаву АК7ч (Ti-B-Sr) у рідкому стані на формування інтерметаліду $Al_8Si_6Mg_3Fe$ є актуальною задачею.

Аналіз літературних даних та постановка проблеми

Механічні, технологічні та експлуатаційні характеристики алюмінієвих сплавів значною мірою залежать від їхньої структури, що набуває особливого значення для вторинних сплавів через підвищений вміст інтерметалідних фаз. Для алюмінієвих

сплавів із вторинної сировини однією з головних шкідливих домішок є залізо, яке звичайно міститься в них в кількості до 0,6%. У процесі кристалізації воно сприяє утворенню пластинчастих вкраплень, які діють як концентратори напружень. Залізовмісні інтерметаліди ($FeAl_3$, Al_5SiFe , $\alpha-(FeMn)_3Si_2Al_{15}$, $Al_8Si_6Mg_3Fe$) [1, 2] зазвичай мають значні розміри та слабкі когерентні зв'язки з матрицею, що негативно впливає на характеристики міцності та, особливо, пластичності матеріалу.

У роботах Мальцева М.В., Волчка І.П., Мазура В.І., Куцовой В.З., Пригунової А.Г. [3-6] показано, що дієвим фактором, який визначає сприятливе структуроутворення промислових силумінів і забезпечує одночасне підвищення їх міцності та пластичності, є модифікування. При цьому Пархутіком П.А., Ганієвим І.М. та ін. [7] встановлено збільшення диференціації евтектичного кремнію під час модифікування стронцієм, що супроводжується зростанням пластичності сплаву. Однак характеристики міцності такого сплаву залишаються низькими.

Вайнік Р. та ін. [8] продемонстрували високу ефективність модифікування доевтектичних силумінів бором і титаном одночасно. Таке

модифікування дозволяє подрібнити зерно заготовки, виключити появу тріщин, а також зменшити норму витрати лігатури без зниження властивостей. У зв'язку з цим важливим є з'ясування позитивного впливу потрібної лігатури титан-бор-стронцій на структуру та властивості доевтектичних силумінів. Проте в літературі недостатньо даних щодо впливу такої лігатури в малих концентраціях на структуроутворення, фазовий склад, розподіл елементів між фазами та структурними складовими, а також властивості силуміну АК7ч.

Відомо про позитивний вплив на структуру та властивості силумінів таких методів обробки розплаву, як термочасова обробка розплаву [9], обробка електричним струмом [10], плазмовим [11], гідроциркуляційним [12] і водневим [13] методами, а

також термічна обробка у твердому стані. Однак на сьогодні відсутні дані про вплив термочасової обробки розплаву силумінів у комплексі з модифікуванням потрібною лігатурою титан-бор-стронцій.

Мета і завдання досліджень

Метою дослідження є визначення особливостей формування залізовмісного інтерметаліду $Al_8Si_6Mg_3Fe$ в модифікованому комплексом Ti-B-Sr сплаві АК7ч, вивчення його складу, морфології росту та встановлення залежності його об'ємної долі від температури термочасової обробки розплаву.

Матеріали та методи дослідження

Об'єктом дослідження служив сплав АК7ч, мікролегований комплексом Ti-B-Sr після термочасової обробки розплаву за різними режимами.

Таблиця 1 – Хімічний склад дослідного сплаву АК7ч (Ti-B-Sr)

Хімічний елемент, %мас.									
Al	Si	Fe	Mg	Mn	Zn	Cu	Ti	Sr	B
Основа	7,9-8,1	0,05-0,07	1,03-1,07	0,02-0,03	0,09-0,1	0,02-0,04	0,21-0,25	0,004-0,006	0,01-0,04

Досліджувані сплави виплавляли в лабораторній печі СШОЛ-12,6/12-М3.

Суть термочасової обробки сплаву АК7ч(Ti-B-Sr) полягала в перегріві розплаву температур в інтервалі 720...900°C, перемішуванні розплаву, ізотермічній витримці протягом 30 хв та охолодженні із зазначених температур в піщаній формі.

Мікроструктуру дослідних сплавів вивчали за допомогою оптичного мікроскопа «Neophot-21» та електронного мікроскопа JSM-840. Кількісні параметри структури визначали методом Глаголева. Ідентифікацію фаз здійснювали за допомогою електронного мікроскопа JSM-840 з системою мікроаналізу «Link-860/50». Дослідження проводили в режимі вторинних електронів (SEI) і розсіяних назад електронів (BEI). Струм пучка становив 10^{-7} ... 10^{-9} А, напруга $U = 20$ кВ, час аналізу становив 100 сек, діаметр пучка 1-1,5 мкм. Аналіз проводили за допомогою програми ZAF4/FLS. Теплові ефекти фазових перетворень визначали диференціально-скануючою калориметрією за допомогою приладу NETZSCH STA-449F1 з точністю вимірювання $\pm 0,1$ °C. Мікротвердість вимірювали на мікротвердомірі ПМТ-3 при навантаженні 20 г.

Результати дослідження та їх обговорення

Структура сплаву АК7ч(Ti-B-Sr) складається з первинних дендритів α -Al твердого розчину, бінарної евтектики α -Al+ β -Si та потрібної евтектики α -Al+ β -Si+ Mg_2Si , сполуки Mg_2Si та інтерметалідів α -(FeMn) $_3Si_2Al_{15}$, β -FeSiAl $_5$, $Al_8Si_6Mg_3Fe$ [14].

Модифікування сплаву АК7ч вихідного складу комплексом Ti-B-Sr приводить до зміни морфології евтектичної складової – вона стає більш тонкодиференційованою, розмір, параметр форми евтектичного кремнію зменшується. Евтектична колонія в модифікованих сплавах складається з кристалів α -Al твердого розчину, β -Si твердого розчину та інтерметаліду Mg_2Si . Також присутні колонії, які утворилися внаслідок складних евтектико-перитектичних реакцій з утворенням фаз типу $Al_8Si_6Mg_3Fe$ (рисунк 1).

Одним із основних методів ідентифікації інтерметалідних фаз є кольорове травлення [15]. Як правило, для цього використовують 0.5% водний розчин HF. Використовують також ідентифікацію фаз за формою зростання кристалів. Недоліком цього методу є те, що деякі інтерметаліди можуть мати як однакові форми росту (голчасту, гранну), так і близьке забарвлення при травленні.

В наявній роботі визначали вміст легуючих елементів при ідентифікації інтерметалідної фази.

Результати локального рентгеноспектрального аналізу сплаву АК7ч(Ti-B-Sr) представлені на рисунках 2-4, вміст хімічних елементів в інтерметаліді $Al_8Si_6Mg_3Fe$ – в таблиці 2. З рисунку 2 виходить, що елементи-модифікатори Ti, B та Sr рівномірно розподіляються у фазах і структурних складових дослідного сплаву і не утворює окремих інтерметалідних фаз.

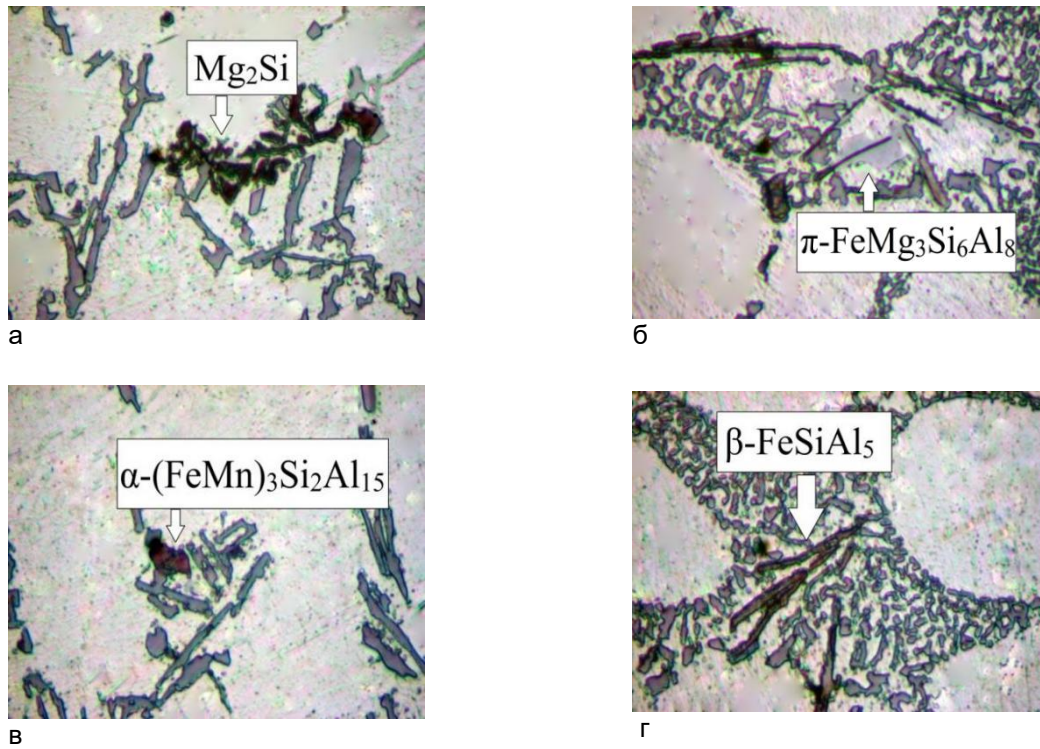


Рисунок 1 – Мікроструктура промислового сплаву АК7ч(Ti-B-Sr), ×1000

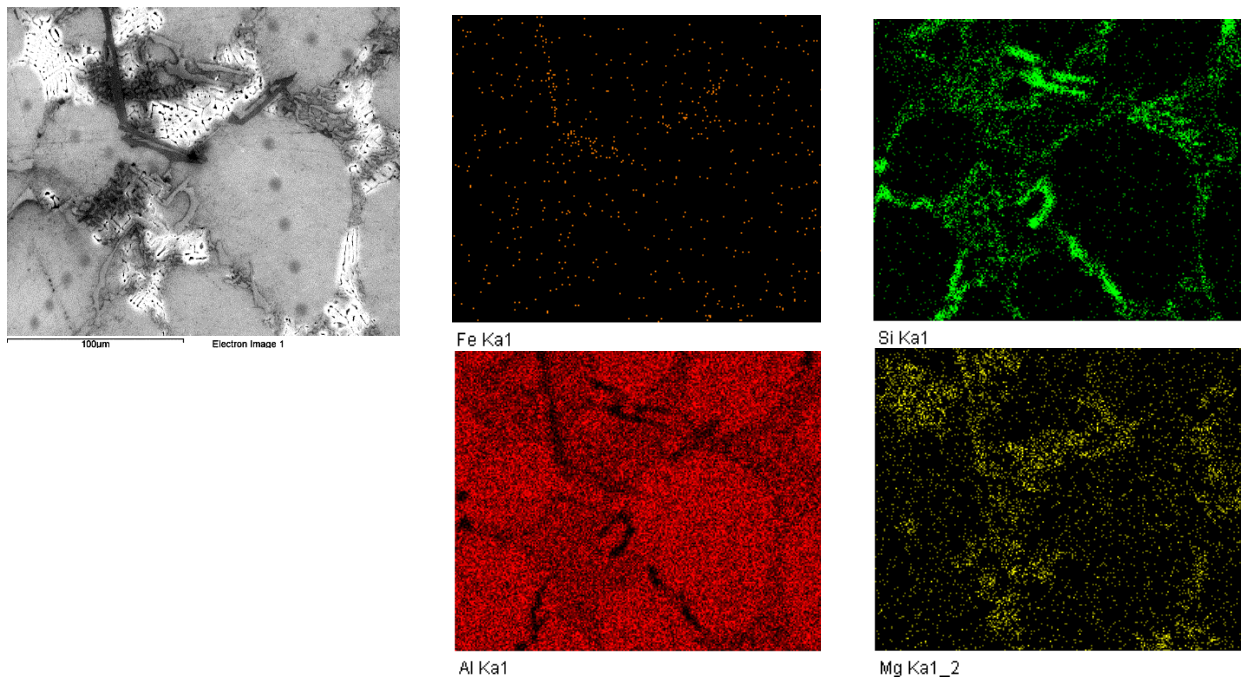
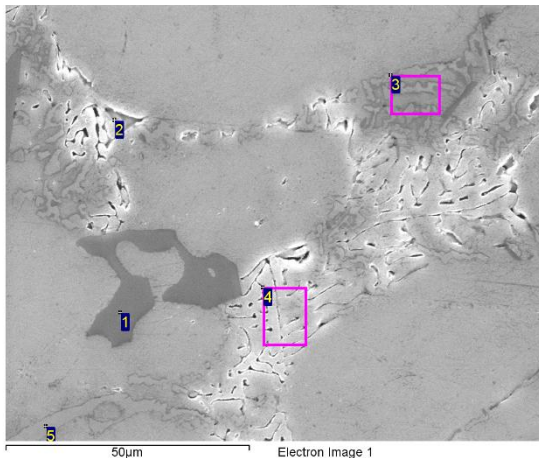


Рисунок 2 – Якісна картина розподілу елементів між структурними складовими в сплаві АК7ч(Ti-B-Sr) (ТЧО при 730°C) ×480



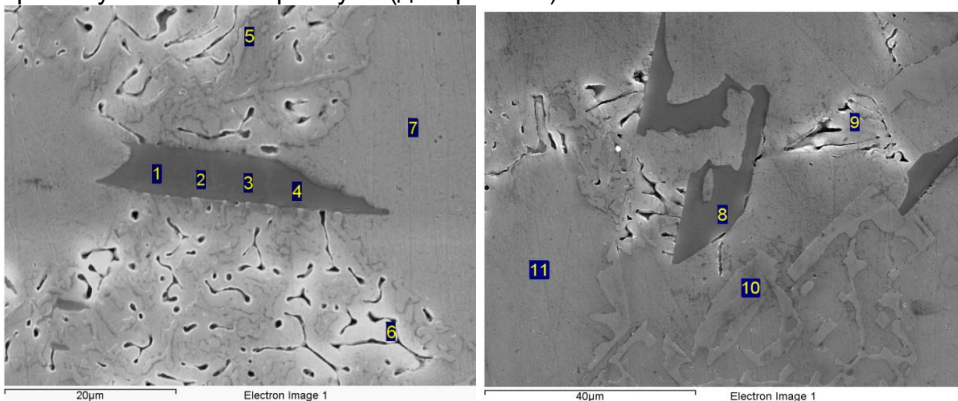
Spectrum	Mg	Al	Si	Ti	Mn	Fe	Total	Структурні складові
1	15,01	46,38	26,73	0,00	0,00	11,87	100,00	Al₈Mg₆Si₃Fe
2	0,00	97,78	2,22	0,00	0,00	0,00	100,00	α-Al
3	0,47	68,13	31,40	0,00	0,00	0,00	100,00	α-Al+β-Si
4	8,37	84,84	6,38	0,40	0,00	0,00	100,00	α-Al+Mg ₂ Si
5	0,23	44,57	54,91	0,29	0,00	0,00	100,00	α-Al+β-Si

Рисунок 3 - Розподіл хімічних елементів (мас %) у фазах та структурних складових сплаву АК7ч(Ті-В- Sr) ТЧО 720°С

За вмістом легуючих елементів у кристалах інтерметаліду світло-сірого кольору методом локального рентгеноспектрального аналізу він ідентифікований як Al₈Mg₆Si₃Fe.

Форма включень Al₈Mg₆Si₃Fe гранна, H-подібна або розгалужена без гострих кутів (див. рис. 1-4).

Методом кількісної металографії визначено об'ємну долю інтерметаліду Al₈Mg₆Si₃Fe в залежності від температури розплаву під час термочасової обробки (температури змінювалися в діапазоні 720 - 900°С, витримка складала 30 хвилин) (рисунок 5).



Spectrum	Mg	Al	Si	Ti	Mn	Fe	Zn	Total	Структурні складові
1	15,37	45,38	26,55	0,00	0,39	12,32	0,00	100,00	Al₈Mg₆Si₃Fe
2	14,90	45,66	27,91	0,00	0,50	11,02	0,00	100,00	Al₈Mg₆Si₃Fe
3	15,41	46,15	26,17	0,00	0,28	11,35	0,65	100,00	Al₈Mg₆Si₃Fe
4	14,17	47,71	26,42	0,30	0,72	10,14	0,54	100,00	Al₈Mg₆Si₃Fe
5	1,55	70,01	27,95	0,00	0,00	0,00	0,49	100,00	α-Al+β-Si
6	6,13	88,62	5,00	0,00	0,25	0,00	0,00	100,00	α-Al+Mg ₂ Si
7	0,42	98,70	0,88	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00	α-Al
8	15,24	46,47	28,09	0,00	0,00	10,21	0,00	100,00	Al₈Mg₆Si₃Fe
9	4,32	91,42	4,03	0,00	0,23	0,00	0,00	100,00	α-Al+Mg ₂ Si
10	0,20	9,45	90,01	0,00	0,00	0,34	0,00	100,00	β-Si + α-Al
11	0,33	97,60	2,07	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00	α-Al

Рисунок 4 - Розподіл хімічних елементів (мас%) у фазах та структурних складових сплаву АК7ч(Ті-В- Sr) ТЧО 800°С

Таблиця 2 – Вміст хімічних елементів в інтерметаліді $Al_8Si_6Mg_3Fe$, %мас

Mg	Si	Ti	Mn	Fe	Zn	Al
13.60-15.04	25.61-28.39	0.024-0.026	0.41-0.45	10.10-11.16	0.19-0.21	45.35-50.12

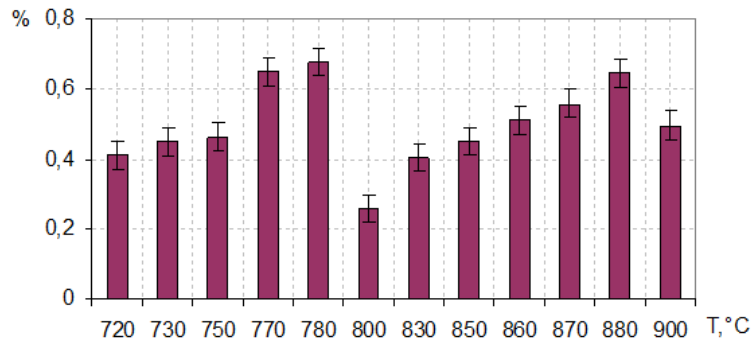


Рисунок 5 - Температурна залежність об'ємної долі інтерметаліду $Al_8Mg_6Si_3Fe$ в сплаві АК7ч (Ti-B-Sr)

При охолодженні з температури 800°C у сплаві АК7ч (Ti-B-Sr) спостерігається найменша об'ємна частка $Al_8Mg_6Si_3Fe$ – 0,26%, при температурі перегріву розплаву 780°C – 0,68%, а при 880°C – 0,65%.

Враховуючи, що ці інтерметаліди є концентраторами напружень і сприяють покриттю виробу загалом, зменшення їх кількості позитивно впливатиме на структуру сплаву.

Навпаки при температурі 880°C спостерігається найбільша об'ємна частка $Al_8Mg_6Si_3Fe$, що може несприятливо позначитися на властивостях сплаву.

Температурна залежність мікротвердості кристалів α -Al твердого розчину та евтектичної складової сплаву АК7ч(Ti-B-Sr) після термочасової обробки розплаву, корелює з даними залежності об'ємної частки $Al_8Mg_6Si_3Fe$ від температури термочасової обробки (рисунок 6).

Методом локального рентгеноспектрального аналізу встановлено, що при температурі перегріву розплаву 800°C спостерігається підвищення вмісту легуючих елементів у кристалах надлишкового α -Al твердого розчину, що зумовлює зниження об'ємної частки $Al_8Mg_6Si_3Fe$ (рисунок 7).

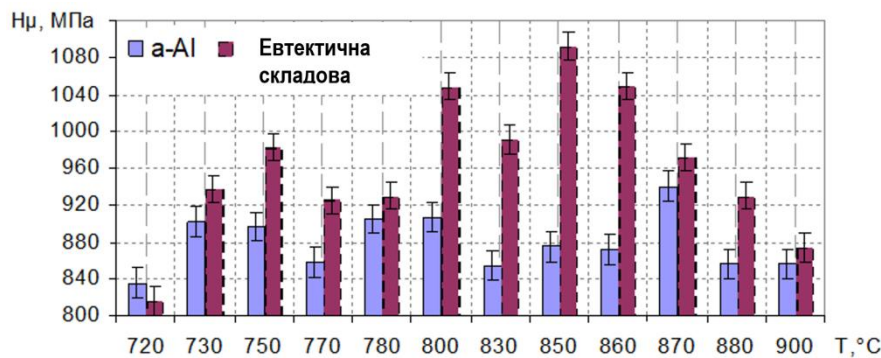


Рисунок 6 – Температурна залежність мікротвердості евтектичної складової та α -Al твердого розчину в сплаві АК7ч (Ti-B-Sr)

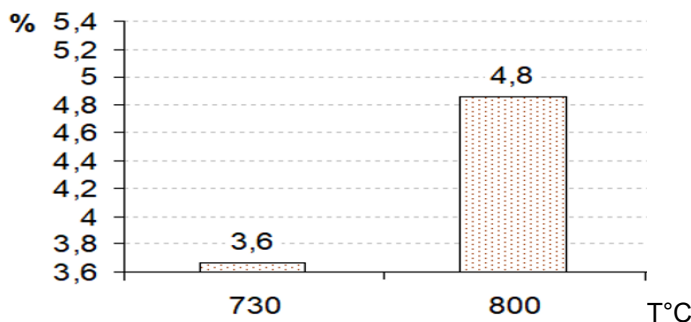
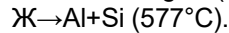
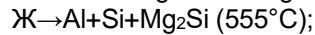


Рисунок 7 – Сумарний вміст легуючих елементів в α -Al залежно від температури термочасової обробки

Відомо, що температура 800°C є температурою структурного перетворення у мікрогрупованих атомів α -Al (Γ ЦК \leftrightarrow ОЦК) у розплаві [16]. Очевидно, цей перехід призводить до перерозподілу легуючих елементів між фазами та структурними складовими у сплаві у твердому стані. Можна очікувати, що зниження об'ємної частки інтерметалідів і утворення кристалів більш компактної форми відіграє сприятливу роль при формуванні властивостей сплаву, внаслідок зниження кількості концентративів напружень.

Розглянутий інтерметалід може формуватися внаслідок низки каскаду реакцій, що реалізуються в дослідному сплаві [17]. Для встановлення цих реакцій сплав досліджували методом диференціальної скануючої калориметрії. На кривій теплового ефекту сплаву АК7ч(Ti-B-Sr) при температурі перегріву розплаву 800°C та швидкості

охолодження/нагріву 10 K/хв присутні два додаткові піки (рисунк 8), які відповідають утворенню інтерметалідних фаз Mg_2Si та $Al_8Mg_6Si_3Fe$ за наступними реакціями:



Модифікування комплексом Ti-B-Sr призводить до зсуву температур початку та кінця кристалізації та температур реакцій 1-3. Реакції 1 та 2 реалізуються за дуже близьких температур і ефект на кривій проявляється тільки при зйомці зі швидкістю охолодження 10 K/хв. Оскільки площа піку мала, очевидно, що в інших умовах зйомки (при швидкостях 2 і 20 K/хв) при нагріванні або охолодженні тепловий ефект поглинається або зливається іншими, сильнішими реакціями, що мають дуже близькі температури їх реалізації.

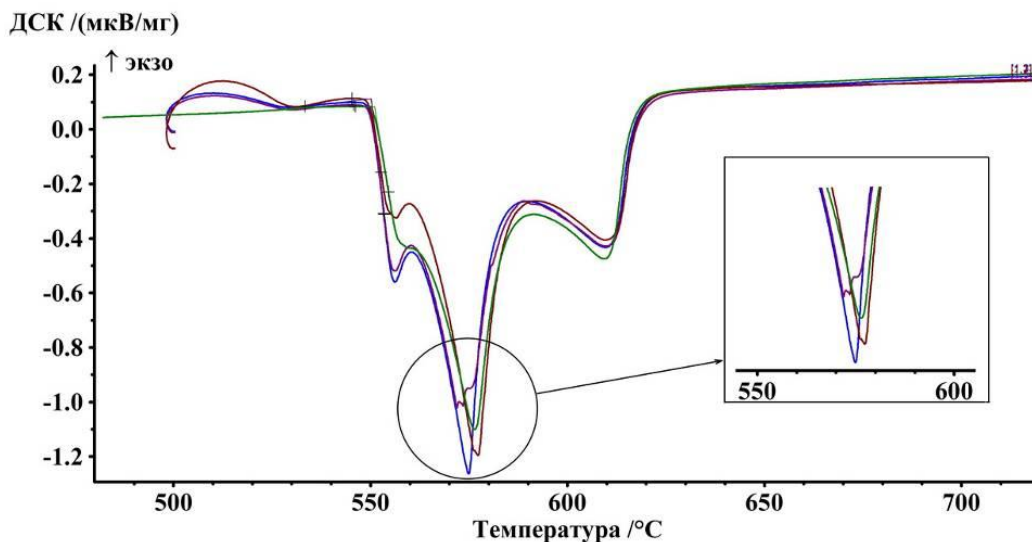


Рисунок 8 - Крива теплового ефекту сплаву АК7ч(Ti-B-Sr), швидкість плавлення 10° C/хв

Висновки

Вивчено хімічний склад, морфологію та особливості утворення залізовмісного інтерметаліду $Al_8Mg_6Si_3Fe$ в сплаві АК7ч (Ti-B-Sr).

$Al_8Mg_6Si_3Fe$ може мати гранну, H -подібну або розгалужену без гострих кутів форми росту, містить близько 14,32% Mg, 26,961%Si, 10,629% Fe та алюміній. Методом диференціальної скануючої калориметрії визначено температуру та реакцію, у відповідності до якої утворюється $Al_8Mg_6Si_3Fe$ в сплаві АК7ч (Ti-B-Sr)

Побудована температурна залежність об'ємної долі інтерметаліду $Al_8Mg_6Si_3Fe$ в сплаві АК7ч (Ti-B-Sr) від температури перегріву під час термочасової обробки. Визначене значення температури обробки, при якому виявляється мінімальна об'ємна доля $Al_8Mg_6Si_3Fe$: при перегріві розплаву до 800°C

об'ємна частка інтерметаліду $Al_8Mg_6Si_3Fe$ зменшується у 2,5 рази (0,25% при 800°C у порівнянні з 0,65...0,68% при 780...880°C).

Встановлене підвищення вмісту легуючих елементів в α -Al в результаті термочасової обробки при 800°C у 1,33 рази у порівнянні з термочасовою обробкою при 720°C (з 3,6% до 4,8%). Це явище підвищення розчинності легуючих елементів в α -Al в результаті обробки при 800°C ймовірно зумовлює зменшення об'ємної долі $Al_8Mg_6Si_3Fe$.

Зменшення об'ємної долі залізовмісного інтерметаліду $Al_8Mg_6Si_3Fe$, які є концентраторами напруги, яке супроводжується підвищенням легованості α -Al твердого розчину, дає змогу прогнозувати одночасне підвищення твердості, міцності та пластичності дослідного сплаву.

Бібліографічний опис

1. Пригунова А. Г. Роль марганцю і рідкофазного оброблення електричним струмом на формування залізовмісних фаз у доевтектичних сплавах системи Al-Si-Fe-Mn // Процеси лиття. 2020. № 3 (141). С. 13-25. ISSN 0235-5884.

2. Островская А.Е., Волчок И.П. Влияние интерметаллидных фаз на сопротивление разрушению алюминиевых сплавов // Наука и прогресс транспорта. Вестник Днепропетр. нац. ун-та жд транспорта. – 2010. – № 34. – С 211–214.
3. Мальцев М. В. Модифицирование структуры металлов и сплавов / Мальцев М. В. - М.: Metallurgy, 1964. - 213 с.
4. Комплексное модифицирование вторичных силуминов / А.А. Митяев, И.П. Волчок, Р.А. Фролов, К.Н. Лоза, О.В. Гнатенко, В.В. Лукинов // Вестн. Днепропетр. нац. ун-та железнодорож. транспорта. –2010. – Вып. № 34. – С. 87–96
5. Мазур В.И. К феноменологической теории модифицирования силуминов / В. И. Мазур // «Закономерности формирования структуры сплавов эвтектического типа: II Всез. Конф». - Днепропетровск, 1982. - С. 20 - 23.
6. Куцова В.З., Аюпова Т.А., Амбражей М.Ю. Влияние микролегирования Sr и Sc на фазовый состав и свойства АК7ч / Строительство, материаловедение, машиностроение // Сб. научн. тр. – Вып. 41, ч.1. – Днепропетровск, ПГАСА. – 2007. – С.18–30
7. Модифицирование силуминов стронцием / И.Н. Ганиев, П. А. Пархутик, А.В. Вахобов, И. Ю. Куприянова. - Минск: Наука и техника, 1985. - 143с.
8. Opticast - A method for optimized aluminum grain refinement. 2004. TMS Light Metals. Lennart Backerud, Holm Boettcher, John Courtenay, Rein Vainik. <https://www.researchgate.net/publication/265876124>
9. Мазур, В. И. Управление качеством силуминового литья с помощью термовременной обработки расплава / Мазур, В. И., Капустникова, С. В., Шпортко, А. Ю., Бондарев, С. В. // Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні, 2012 (2), С. 47-49. ISSN 1607-6885/
10. Prigunova AG, Koshelev MV, Borisov AG. Effect of unipolar pulsed electric current treatment of the melt of Al – 8 Wt-% Si – 0.7 Wt-% Fe alloy on iron-containing phases formation and mechanical properties of castings. Mater Sci Tech 2022; 38: 246–253. <https://doi.org/10.1080/02670836.2022.2037059>
11. Наривский А. В. Влияние вакуумно-плазменного рафинирования расплава на качество деформируемых алюминиевых сплавов / Наривский А.В., Найдек В.Л., Пионтковская Н. С. // Процессы литья. 2011. №3 (87). С. 3-9. ISSN 0235-5884.
12. Исследование эффективности гидроциркуляционной обработки Al-Si расплавов/ Борисов Г.П., Костюк А.И., Семенченко А.И. и др. // Производство стали в XXI веке, прогноз, процессы, технология, экология. -Киев- Днепро-дзержинск, 2000. С. 12-18.
13. Водородное рафинирование алюминиевых сплавов от твердых неметаллических включений / Ф. М. Котлярский, Г. П. Борисов, В. И. Белик и др. // Процессы литья. – 2008. – № 4. – С. 48-55.
14. Куцова В.З. Вплив модифікування сплаву АК7ч на параметри структури та механічні властивості / В.З. Куцова, А.С. Елагин // «IX Міжнародна науково-практична конференція: тези доповідей» – Дніпропетровськ. – 2009. – С. 537.
15. Баранова Л.В., Демина Е.Л. Металлографическое травление металлов и сплавов: справочник. М.: Metallurgy, 1986. 256 с.
16. Баум Б.А. Металлические жидкости. М.:Наука, 1979. 120 с.
17. Mondolfo, L.F. (1976) Aluminum Alloys: Structure and Properties. Butterworths and Co., Ltd., London, 806. <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-408-70932-3.50404-6>.

References

1. Pryhunova A. H. Rol marhantsiu i ridkofaznoho obroblennia elektrychnym strumom na formuvannia zalizovmisnykh faz u doevtektychnykh splavakh systemy Al-Si-Fe-Mn [The role of manganese and liquid-phase electric current treatment on the formation of iron-containing phases in pre-eutectic alloys of the Al-Si-Fe-Mn system]// Prosesy lyttia. 2020. № 3 (141). С. 13-25. ISSN 0235-5884.
2. Ostrovskaya A. E., Volchok I. P. Vliyaniye yntermetallydnykh faz na soprotyvlenye razrushenyiu aliumynuevyykh splavov [The influence of intermetallic phases on the fracture resistance of aluminum alloys]// Nauka y prohress transporta. Vestnyk Dnepropetr. nats. un-ta zh/d transporta. – 2010. – № 34. – S 211–214.
3. Maltsev M. V. Modyfytsyrovanye struktury metallov y splavov [Modification of the structure of metals and alloys] / Maltsev M. V. - M.: Metallurhiya, 1964. - 213 s.
4. Kompleksnoe modyfytsyrovanye vtorychnykh sylumynov [Complex modification of secondary silumins]/ A.A. Mytiaev, Y.P. Volchok, R.A. Frolov, K.N. Loza, O.V. Hnatenko, V.V. Lukynov // Vestn. Dnepropetr. nats. un-ta zheleznodorozh. transporta. –2010. – Vyp. № 34. – S. 87–96
5. Mazur V.Y. K fenomenolohycheskoi teoryy modyfytsyrovanyia sylumynov [On the phenomenological theory of modification of silumins]/ V. Y. Mazur // «Zakonomernosty formyrovanyia struktury splavov evtektycheskoho typu: II Vsez. Konf». - Dnepropetrovsk, 1982. - S. 20 - 23.
6. Kutsova V.Z., Aiupova T.A., Ambrazhei M.Iu. Vliyanye mykrolehyrovanyia Sr y Sc na fazovyi sostav y svoistva AK7ch [Influence of Sr and Sc microalloying on the phase composition and properties of AK7ch]/ Stroytelstvo, materyalovedenye, mashynostroenye // Sb. nauchn. tr. – Vyp. 41, ch.1. – Dnepropetrovsk, PHASA. – 2007. – S.18–30
7. Modyfytsyrovanye sylumynov strontsyem [Modification of silumins with strontium]/ Y.N. Hanyev, P. A. Parkhutyk, A.V. Vakhobov, Y. Yu. Kupryianova. - Mynsk: Nauka y tekhnika, 1985. - 143s.
8. L. Backerud and R. Vainik, Method for Optimized Aluminum Grain Refinement, Light Metals 2001, 951–954.
9. Mazur, V. Y. Upravlenye kachestvom sylumynovoho lytia s pomoshchiu termovremennoi obrabotky rasplava [Quality control of silumin casting using thermal treatment of the melt]/ Mazur, V. Y., Kapustnykova, S. V.,

- Shportko, A. Yu., Bondarev, S. V. // *Novi materialy i tekhnolohii v metalurhii ta mashynobuduvanni*, 2012 (2), S. 47-49. ISSN 1607-6885
10. Prigunova AG, Koshelev MV, Borisov AG. Effect of unipolar pulsed electric current treatment of the melt of Al – 8 Wt-% Si – 0.7 Wt-% Fe alloy on iron-containing phases formation and mechanical properties of castings. *Mater Sci Tech* 2022; 38: 246–253.
 11. Naryvskiy A. V. Vlyaniye vakuumno-plazmennoho rafynyrovaniya rasplava na kachestvo deformatyruemykh aliumynyevykh splavov [The influence of vacuum-plasma melt refining on the quality of deformable aluminum alloys]/ Naryvskiy A.V., Naidek V.L., Pyontkovskaia N. S. // *Protsessy lytia*. 2011. №3 (87). S. 3-9. ISSN 0235-5884.
 12. Yssledovanye efektyvnosti hydrotsyrkulyatsyonnoi obrabotky Al-Si rasplavov [Study of the effectiveness of hydrocirculation processing of Al-Si melts]/ Borysov H.P., Kostiuk A.Y., Semenchenko A.Y. y dr. // *Proyzvodstvo staly v XXI veke, prohnos, protsessy, tekhnolohyia, ekolohyia*. -Kyev- Dneprodzerzhynsk, 2000. S. 12-18.
 13. Vodorodnoe rafynyrovanye aliumynyevykh splavov ot tverdykh nemetallycheskykh vkluchenii [Hydrogen refining of aluminum alloys from solid non-metallic inclusions]/ F. M. Kotliarskiy, H. P. Borysov, V. Y. Belyk y dr. // *Protsessy lytia*. – 2008. – № 4. – S. 48-55.
 14. Kutsova V.Z. Vplyv modyfikuvannya splavu AK7ch na parametry struktury ta mekhanichni vlastyivosti [Effect of AK7h alloy modification on structural parameters and mechanical properties]/ V.Z. Kutsova, A.S. Elahyn // «IX Mizhnarodna naukovo-pratychna konferentsiia.: tezy dopovidei» – Dnipropetrovsk. – 2009. – S. 537.
 15. Baranova L.V., Demyana E.L. Metallohrafycheskoe travlenye metallov y splavov: spravochnyk [Metallographic etching of metals and alloys: reference book]. M.: Metallurhiya, 1986. 256 s.
 16. Baum B.A. *Metallycheskye zhydkosti* [Metallic liquids]. M.: Nauka, 1979. 120 s.
 17. Mondolfo, L.F. (1976) *Aluminum Alloys: Structure and Properties*. Butterworths and Co., Ltd., London, 806. <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-408-70932-3.50404-6>