

УДК 669.715

DOI: 10.30977/BUL.2219-5548.2023.103.0.117

ВПЛИВ МОДИФІКУВАННЯ ДИСПЕРСНИМИ НАНОКОМПОЗИЦІЯМИ НА СТРУКТУРУ ТА ВЛАСТИВОСТІ ЛИВАРНИХ СИЛУМІНІВ

Давидюк А. В., Калініна Н. Є., Поліжко С. О.

Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара

Анотація. Запропоновано склад комплексного модифікатора на основі порошків $Mg_2Si+SiC$, розміром часток 50...100 нм плазмохімічного синтезу. Розглянуто технологічний процес модифікування алюмінієвих розплавів комплексним модифікатором, визначено його температурно-часові параметри. Модифіковані сплави мають однорідну дисперсну мікроструктуру та більшу рідинотекучість, ніж сплави у вихідному стані.

Ключові слова: ливарний силумін, модифікування, комплексний модифікатор, структура, механічні властивості.

Вступ

Питання підвищення якості та експлуатаційних властивостей виробів авіакосмічної техніки не може бути вирішено без розроблення нових і вдосконалення вже наявних технологічних процесів виробництва сплавів на основі алюмінію.

Ливарні алюмінієві сплави застосовують для виготовлення відливок, які належать до складу турбонасосних агрегатів, турбін. До таких виробів висувуються вимоги щодо герметичності, комплексу механічних властивостей та стабільності розмірів. Під час розроблення перспективних алюмінієвих сплавів із заданими властивостями важливим етапом є процес плавки та оброблення рідких розплавів. Саме на цих стадіях технологічного процесу можна найбільш ефективно використовувати операцію модифікування розплавів.

Аналіз публікацій

У сучасній металургії з'являються нові типи модифікаторів алюмінієвих сплавів. У роботах В. З. Куцовой, В. А. Костіна [3, 4] наведені процеси розроблення сучасних модифікаторів – тугоплавких металів та композицій різноманітних систем, до яких належать Ta, Zr, Sc, Ti, а також карбід-нітриди та карбонітриди.

У роботі В. І. Большакова та в деяких закордонних виданнях [5–7] проаналізовано теоретичні основи одержання конструкційних сплавів з використанням нанодисперсних складових, однак не розглянуті способи використання нанодисперсних композицій у конструкційних деформованих алюмінієвих сплавах, тому тема нашого дослідження є на сьогодні актуальною як в теоретичному, так і практичному аспектах для використання

сплавів системи Al – Si в авіації та ракетно-космічній техніці.

Складність вирішення проблеми полягає не лише в покращенні якості ливарних сплавів, але і в розробленні рекомендацій щодо досягнення стабільності хімічного складу, подрібнення структури, підвищення механічних та технологічних властивостей відливок.

Проаналізувавши публікації вітчизняних та закордонних вчених, можна дійти висновку, що тематика цієї роботи є актуальною та має теоретичне й практичне значення.

Мета та постановка завдання

Мета роботи – аналіз впливу модифікування дисперсними композиціями на подрібнення структури та підвищення комплексу механічних властивостей ливарних силумінів.

Завдання роботи:

1 розробити склад комплексного нанодисперсного модифікатора на основі тугоплавких сполук;

2 розробити технологічний процес модифікування ливарних сплавів АЛ4 та АЛ4С комплексним модифікатором;

3 дослідити структуру ливарних алюмінієвих сплавів до і після процесу модифікування;

4 визначити комплекс механічних властивостей сплавів АЛ4 та АЛ4С до і після процесу модифікування із зазначенням ступеня модифікування.

Результати досліджень та їх обговорення

Матеріалами дослідження є ливарні алюмінієві сплави системи Al – Si, сплави АК9 (АЛ4) та АЛ4С. Хімічний склад досліджуваного сплаву наведено в табл. 1.

Таблиця 1 – Хімічний склад сплавів АК9 (АЛ4) та АЛ4С

Сплав	Середній вміст елемента, % мас.					
	Al	Si	Sb	Cu	Zn	Mn
АК9 (АЛ4)	основа	9,0	0,2	до 0,3	до 0,3	0,4
АЛ4С	основа	9,1	0,2	до 0,3	до 0,3	0,45

Діаграму впливу Al–Si наведено на рис. 1. Кремній є основним легуючим елементом ливарних силумінів сплавів АК9 (АЛ4) та АЛ4С, які відповідно до діаграми впливу мають фазовий склад, подібний до евтектичного. Під час модифікування точка діаграми незначною мірою зміщується вліво і ці сплави стають доевтектичними [8].

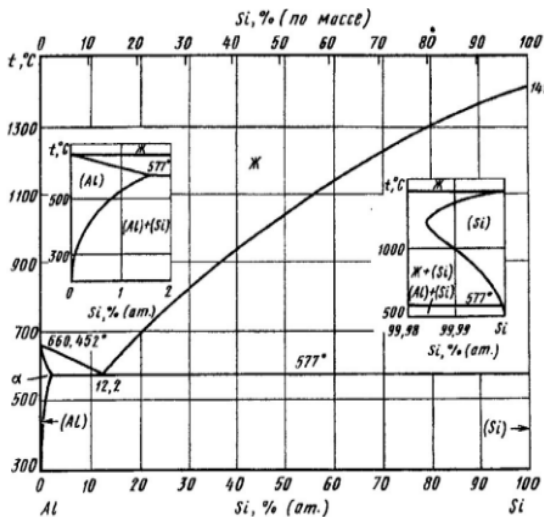


Рис. 1. Діаграма впливу Al – Si

Подвійні діаграми системи Al – Si визначаються у вузькій двофазній області α +Si. Під час кристалізації доевтектичних сплавів завдяки вузькому інтервалу в двофазній області усувається дендритна ліквіація в сплавах. Доєвтектичні сплави АК9 (АЛ4), АЛ4С в процесі кристалізації зазнають евтектичного перетворення, завдяки чому в них зберігаються частка евтектичної складової у структурі, що забезпечує рідинну текучість та технологічні властивості під час експлуатації [9–10].

У сплаві АЛ4С мікролегуючим елементом є сурма Sb в кількості 0,20 %. Сурма здійснює функцію для утворення дисперсної зміцнювальної фази AlSb, яка знаходиться в алюмінієвому твердому розчині.

Технологія модифікування нанодисперсними композиціями полягає в додаванні

порошків комплексного наномодифікатора $Mg_2Si+SiC$ до алюмінієвого розплаву. Суміш нанопорошків, розміром часток 50...100 нм $Mg_2Si + SiC$, отриманих плазмохімічним синтезом, змішували декілька годин у спеціальному атриторі з послідовним пресуванням таблеток модифікатора на автоматичному пресі. Отримані таблетки підлягали відпалу в захисній атмосфері аргону.

Як демонструють дослідження, оптимальна кількість модифікатора складала 0,10 % від загальної маси алюмінієвого розплаву. Кількість навіски модифікатора додавали до кристалізатора після розплавлення основної шихти сплаву. Температура модифікування становила $735 \pm 5^\circ C$, час модифікування дорівнював 5 хвилинам. Після розплавлення розплав виливали в кокіль і у форми для дослідних зразків.

На рис. 2 наведено вид брикету комплексного модифікатора.

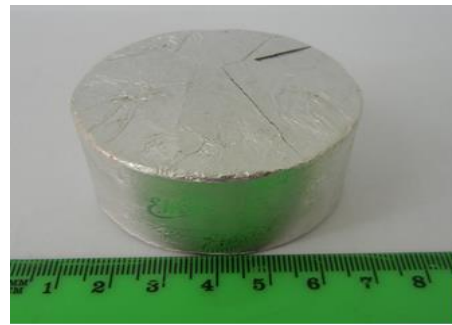


Рис. 2. Брикет модифікатора

Методи досліджень

Основною технологічною властивістю ливарних силумінів є рідко текучість, тобто здатність металевого розплаву заповнювати порожнину ливарної форми. Вона визначається довжиною ділянки розплаву та вимірюється в мм. Рідинотекучість визначають методом пруткової проби. Чим більшою є довжина залитого прутка, тим вищою є рідинотекучість. Для сплаву АЛ4 у вихідному стані $l = 346$ мм, для модифікованого сплаву $l = 374$ мм. Для сплаву АЛ4С у вихідному стані $l = 375$ мм, для модифікованого $l = 388$ мм.

Визначали такі характеристики механічних властивостей досліджуваних сплавів: міцнісні властивості $\sigma_{0,2}$ і σ_B ; пластичність – відносне подовження δ ; ударна в'язкість КСУ. Міцнісні та пластичні властивості визначали на стандартних циліндричних зразках на розривній машині. Випробування на ударну в'язкість здійснювали на стандартних зразках Менаже на маятниковому копрі.

Мікроструктуру дослідних сплавів досліджували на оптичних мікроскопах МІМ-8М та Neophot-2, у вихідному та модифікованому станах. Мікроструктура сплаву АЛ4 наведена на рис. 3.

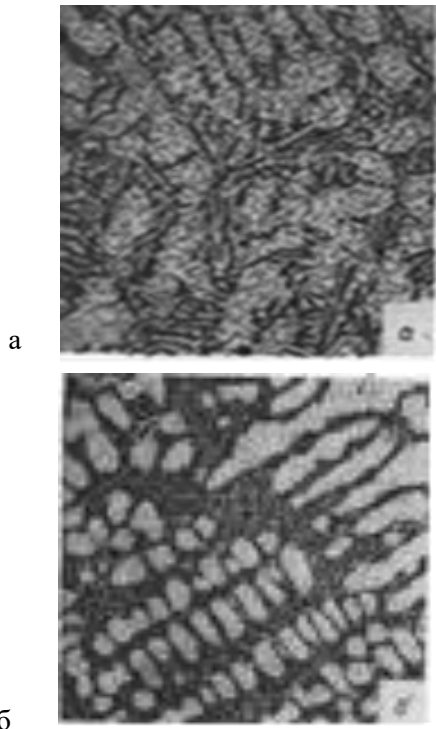


Рис. 3. Мікроструктура сплаву АЛ4, $\times 200$: а – у вихідному стані; б – у модифікованому стані.

Відповідно до рисунку, у модифікованому стані спостерігається дисперсна структура дендритів α – Al з твердого розчину та кристалів кремнію.

Результати випробувань механічних властивостей досліджуваних сплавів АЛ4 та АЛ4С наведено в табл. 2.

Відповідно до результатів, міцнісні властивості в модифікованому стані збільшуються на 9–12 %, пластичність – на 3 %, ударна в'язкість – на 20–30 %.

Таблиця 2 – Результати механічних випробувань досліджуваних сплавів

Сплав	$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_b , МПа	δ , %	КСУ, МДж/м ²
АЛ4 вихідн.	203	240	3,5	0,10
АЛ4 модиф.	228	265	3,6	0,12
АЛ4С вихідн.	215	248	3,8	0,10
АЛ4С модиф.	240	270	3,9	0,13

Для сплаву АЛ4 міцнісні властивості збільшились на σ_b – 10 %, $\sigma_{0,2}$ – 12%, пластичність δ – 3%, ударна в'язкість КСУ – 20 %.

Для сплаву АЛ4С міцнісні властивості збільшились на σ_b – 9 %, $\sigma_{0,2}$ – 11 %, пластичність δ – 3 %, ударна в'язкість КСУ – 30 %.

На зразках сплавів АЛ4 та АЛ4С, розміром 25 x 25 мм, здійснювали процес вимірювання твердості за Брінеллем.

Результати вимірювання наведені в табл. 3.

Таблиця 3 – Результати випробувань твердості за Брінеллем зразків до та після модифікування

Сплав	d відбитка, мм	Твердість, НВ
АЛ4 вихідн.	2,10	70,6
АЛ4 модиф.	2,0	76,3
АЛ4С вихідн.	2,05	72,4
АЛ4С модиф.	2,02	74,3

У таблиці наведені середні значення твердості НВ трьох зразків за навантаження 250 кг. У модифікованих зразках сплаву АЛ4 твердість збільшилася на 6,9 %, а в зразках АЛ4С – на 4,8 %.

Отримані дані вимірювання твердості узгоджуються з результатами випробувань міцнісних властивостей сплавів до та після модифікування.

Висновки

1 на основі діаграми впливу Al–Si обґрунтовано вибір ливарних алюмінієвих сплавів для модифікування наноконпозиціями;

2 запропоновано склад комплексного модифікатора на основі порошоків Mg₂Si + SiC, розміром часток 50...100 нм, отриманих плазмохімічним синтезом;

3 розроблено технологічний процес модифікування алюмінієвих розплавів комплексним модифікатором, визначено рідинотекучість сплавів АЛ4 та АЛ4С до і після модифікування. Отримано збільшення рідинотекучості сплавів у модифікованому стані;

4 у модифікованих сплавах отримано більш однорідну структуру матричного твердого розчину з дисперсними виділеннями частинок кремнію;

5 у модифікованих сплавах збільшено міцнісні властивості: σ_b – на 9–10 %; $\sigma_{0,2}$ – на 11–12 % за умови збереження рівня пластичності. Ударна в'язкість модифікованих сплавів збільшена на 20–30 %. Під час досліджень структури та властивостей ливарних

сплавів АЛ4 та АЛ4С доведено ефект модифікування нанодисперсними композиціями.

Література

1. Мільман Ю. В. Вплив скандію на структуру механічних властивостей й опір корозії сплавів алюмінію. Прогресивні матеріали та технології. Київ: Академперіодика, 2013. С. 335–360.
2. Мільман Ю. В., Коржова Н. П., Сірко А. І. Неорганічні матеріали. Метали і технології. Київ: Наукдумка, 2008. С. 52–68.
3. Gradl, P., Mireles, O., Andrews, N. Introduction to Additive Manufacturing for Propulsion Systems. AIAA Propulsion and Energy Forum 2019. Indianapolis, IN. August 20. 2019. P. 345–350.
4. Influence of temperature of thermal processing on intercrystalline corrosion resistance of welded joints / Kalinina N. E., Hlushkova D. B., Dzhur Y. O., Khodyrev S. Ya. Journal of Chemistry and Technologies. 2020. 28(1). P. 34–41.
5. Su MN, Young B, Gardner L. Testing and Design of Aluminum Alloy Cross Sections in Compression. J Struct Eng. 2015. 140(9).
6. Костін В. А., Григоренко Г. М., Жуков В. В. Модифіковані структури зварних з'єднань високоміцних низьколегованих сталей наночастинками тугоплавких металів. Будівництво, матеріалознавство, машинобудування. 2016. Вип. 89. С. 93–98.
7. Іщенко А. Я. Алюмінієві високоміцні сплави для зварних конструкцій. Прогресивні матеріали і технології. Київ: Академперіодика, 2013. С. 50–82.
8. Алюміній та сплави на його основі / Куцова В. З. та ін. Дніпропетровськ: Пороги, 2014. 136 с.
9. Большаков В. І., Куцова В. З., Котова Т. В. Наноматеріали і нанотехнології. Дніпропетровськ, 2016. 245 с.
10. Структура, властивості та використання конструкційних наноматеріалів: монографія / Калініна Н. Є. та ін. Львів: Простір-М, 2017. 385 с.

References

1. Milman Yu. V. The influence of scandium on the structure, mechanical properties and corrosion resistance of aluminum alloys. Progressive materials and technologies. Kyiv: Akademperiodika, 2013. P. 335–360.
2. Milman Y. V., Korzhova N. P., Sirko A. I. Inorganic materials. Metals and technologies. Kyiv: Naukdumka, 2008. Pp 52–68.
3. Gradl, P., Mireles, O., Andrews, N. Introduction to Additive Manufacturing for Propulsion Systems. AIAA Propulsion and Energy Forum 2019. Indianapolis, IN. August 20. 2019. P. 345–350.
4. Influence of temperature of thermal processing on intercrystalline corrosion resistance of welded joints / Kalinina N. E., Hlushkova D. B.,

- Dzhur Y. O., Khodyrev S. Ya. Journal of Chemistry and Technologies. 2020. 28(1). P. 34–41.
5. Su MN, Young B, Gardner L. Testing and Design of Aluminum Alloy Cross Sections in Compression. J Struct Eng. 2015. 140(9).
6. Kostin V. A., Grigorenko G. M., Zhukov V. V. (2016). Modification of the structure of welds of high-strength low-alloy steels with nanoparticles of refractory metals. Construction, materials science, mechanical engineering. No. 89. 93–98.
7. Ishchenko A. Ya. High-strength aluminum alloys for welded structures. Progressive materials and technologies: [Text]. Kyiv: Akademperiodika, 2013. Pp. 50–82.
8. Aluminum and alloys based on it / Kutsova V. Z. et al. (2014). Dnipropetrovsk, 2014. 136 p.
9. Bolshakov V. I., Kutsova V. Z., Kotova T. V. Nanomaterials and nanotechnologies. Dnipropetrovsk, 2016. 245 p.
10. Structure, properties and use of structural nanomaterials: monography / Kalinina N. E., Nikiforchyn H. M., Kalinin O. V., Marukha V. I. Lviv, Prostir-M, 2017. 385 p.

Давидюк Анжела Вікторівна, аспірантка, кафедра ракетно-космічних та інноваційних технологій ДНУ імені Олеса Гончара, вул. Наукова, 1, Дніпро, 49000, Україна, телефон +380674355821, anzhela8848@gmail.com,

Калініна Наталія Євграфівна, д.т.н. проф., кафедра ракетно-космічних та інноваційних технологій ДНУ імені Олеса Гончара, вул. Наукова, 1, Дніпро, 49000, Україна, телефон +38 0955502800, kalinina.dnu@gmail.com,

Полішко Сергій Олексійович, к.т.н. доцент кафедри ракетно-космічних та інноваційних технологій ДНУ імені Олеса Гончара, вул. Наукова, 1, Дніпро, 49000, Україна, телефон +380676338683, polishkopsa@gmail.com.

The effect of modification with nanocompositions on the structure and properties of foundry silumins

Abstract. Problem. The difficulty of solving the problem lies not only in the improved quality of casting alloys, but also in the development of recommendations for achieving stability of the chemical composition, refining the structure, and increasing the mechanical and technological properties of castings. **Goal.** The goal of the work is to achieve a stable dispersed structure and increase the complex of mechanical properties of foundry silumins. **Methodology.** Based on the Al – Si influence diagram, the choice of cast aluminum alloys for modification with nanocompositions is substantiated. The technology of modification with nanodisperse compositions consisted in introducing powders of the complex nanomodifier $Mg_2Si + SiC$ into the aluminum melt. A mixture of $Mg_2Si + SiC$ nanopowders with a particle size of 50...100 nm,

obtained by plasma chemical synthesis, was mixed for several hours in a special attritor with successive pressing of modifier tablets on an automatic press. **Results.** The technological process of modifying aluminum melts with a complex modifier was developed, the temperature and time parameters of the process were determined. Brinell hardness was measured on samples of AL4 and AL4C alloys, 25 x 25 mm in size. As a result of the obtained data, it is observed that in the modified samples of the AL4 alloy, the hardness increased by 6.9 %, and in the AL4C samples – by 4.8 %. The obtained hardness measurement data are consistent with the results of testing the strength properties of alloys before and after modification. **Originality.** In the modified alloys, a higher fluidity than in the initial state and a homogeneous dispersed microstructure were obtained. **Practical value.** In the modified alloys, an increase in strength properties was achieved: σ_v by 9–10 %; $\sigma_{0.2}$ by 11–12%, while maintaining the level of plasticity. The impact strength of modified alloys is significantly increased by 20–30 %. As a result of the

conducted studies of the structure and properties of cast alloys AL4 and AL4C, the effect of modification with nanodisperse compositions was confirmed.

Key words: foundry silumin, modification, complex modifier, structure, mechanical properties.

Davydiuk Anzhela, postgraduate student, Department of Rocket, Space and Innovative Technologies,, Oles Honchar National University, vul. Naukova 1, Dnipro 49000, Ukraine, phone +380674355821,

anzhela8848@gmail.com,

Kalinina Natalia, Ph.D. Prof., Department of Rocket, Space and Innovative Technologies,, Oles Honchar National University, vul. Naukova 1, Dnipro 49000, Ukraine, phone +38 0955502800,

kalinina.dnu@gmail.com,

Polizhko Serhiy, Ph.D. docent, Department of Rocket, Space and Innovative Technologies, Oles Honchar National University, vul. Naukova 1, Dnipro 49000, Ukraine, phone +380676338683, polishkopsa@gmail.com.
