

КОНСТРУКЦІЙНІ І ФУНКЦІОНАЛЬНІ МАТЕРІАЛИ

STRUCTURAL AND FUNCTIONAL MATERIALS

УДК 629.76:669.018

Давидюк А. В.

аспірантка кафедри ракетно-космічних та інноваційних технологій Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара, м. Дніпро, Україна,
e-mail: anzhela8848@gmail.com, ORCID: 0009-0004-3688-3455

ЗМІНА СТРУКТУРИ ТА ВЛАСТИВОСТЕЙ АЛЮМІНІЄВИХ СПЛАВІВ ПРИ МОДИФІКУВАННІ ПОРОШКОВИМИ КОМПОЗИЦІЯМИ

Мета роботи. Встановити вплив модифікування порошковими композиціями на структуру та механічні властивості ливарних та деформованих алюмінієвих сплавів.

Методи дослідження. Металографічний аналіз, стеріометрична металографія, випробування міцносних та пластичних властивостей, ливарних сплавів АЛ4, АЛ4С системи Al-Si та деформованих сплавів 1545 системи Al-Mg-Sc, 2219 системи Al-Cu-Mn у вихідному та модифікованому стані.

Отримані результати. Проведені плавки сплавів АЛ4, АЛ4С, 1545, 2219 у вихідному стані та з обробкою розплавів комплексним нанодисперсним модифікатором силіциду магнію Mg_2Si і карбиду кремнію SiC з розміром часток від 50...100 нм. Визначено оптимальний вміст $Mg_2Si+SiC$ (0,10 %) для підвищення $\sigma_{0,2}$ алюмінієвих сплавів. Досягнуто подріблення зеренної структури литих сплавів у 1,6 рази. Встановлено залежності розміру частинок та кількості модифікатора на механічні властивості сплавів. У промислових експериментах встановлено найбільш ефективний розмір часток $Mg_2Si+SiC$ для підвищення $\sigma_{0,2}$ сплаву АЛ4, АЛ4С з 115 до 135 МПа у литому стані. Підвищення міцносних властивостей модифікованих сплавів складає 18 % в порівнянні з вихідним станом.

Наукова новизна. Отримано подальший розвиток, уявлення про вплив модифікування розплавів на параметри структури та властивостей алюмінієвих сплавів. Запропоновано використання нанодисперсного комплексного модифікатора $Mg_2Si+SiC$ з розміром часток 50...100 нм. Підтверджено, що використання комплексних нанодисперсних модифікаторів дозволяє активно впливати на структуру та механічні властивості алюмінієвих сплавів.

Практична цінність. Експериментально доведено, що раціональна кількість введеного комплексного модифікатора складає 0,10 % від маси розплави. Досягнуто значне подрібнення зеренної структури та підвищення міцносних властивостей ливарних та деформованих алюмінієвих сплавів в результаті модифікування.

Ключові слова: алюмінієві сплави, модифікування, структура, механічні властивості, порошкові нанодисперсні композиції.

Вступ

Створення порошкових матеріалів безпосередньо пов'язано з розробкою і застосуванням нанотехнологій. На установках плазмохімічного синтезу можна отримувати широкий спектр нанодисперсних сполук, а саме: карбіди, нітриди, карбонітриди, силіциди різних елементів (Si, Al, Ti, V, Mo, W та ін.), а також нанодисперсні порошки чистих металів [1–3].

У вітчизняній ракетно-космічній техніці широко застосовують нержавіючі сталі, ливарні і деформовані алюмінієві та магнієві сплави, ливарні нікелеві сплави. Для деталей ракетно-космічної техніки (РКТ) можуть бути корисні перспективні напрямки з обробки наномодифікаторами сплавів різних систем легування [4–6].

Аналіз досліджень та публікацій

Коротко оцінити та узагальнити роботи попередніх та останніх публікацій, в яких розпочато

вирішення даної проблеми. Відобразити основні етапи розвитку наукової думки з розв'язуваної проблеми, виділити невирішені раніше частини загальної проблеми та визначити місце статті у вирішенні проблеми, обґрунтувати вибір напряму досліджень. Даний розділ уточнює, конкретизує, доповнює та розширює матеріал введення, служить його обґрунтуванням та поясненням.

Шляхом критичного аналізу та узагальненого порівняння з відомими рішеннями проблеми коротко обґрунтувати актуальність (ступінь важливості в даний момент і в даній ситуації) та доцільність роботи.

Мета роботи

Встановити вплив модифікування порошковими композиціями на зеренну структуру та механічні властивості промислових ливарних та деформованих алюмінієвих сплавів.

Матеріал і методика досліджень

Матеріалом дослідження є алюмінієві сплави системою Al-Si, Al-Mg-Sc, Al-Cu-Mn, АЛ4, АЛ4С, 1545, 2219. Запропоновано модифікування алюмінієвих сплавів дисперсним порошком $Mg_2Si+SiC$ розміром часток до 100 нм. Дисперсний $Mg_2Si+SiC$ отримано методом плазмохімічного синтезу. Проведені дослідно-промислові плавки алюмінієвих сплавів. Досліджено структуру та механічні властивості сплавів у литому та деформованому стані.

З урахуванням принципу про кристалографічну і розмірну відповідність ізоморфності кристалічних решіток алюмінію і тугоплавких сполук [7, 8] встановили, що модифікаторами алюмінієвих сплавів можуть бути карбіди кремнію, ніобію і танталу, а також карбіди і нітриди титану, цирконію, гафнію і ванадію. Як ефективний модифікатор ливарних алюмінієвих сплавів запропоновано нанодисперсний порошок карбіду кремнію SiC розміром часток до 100 нм [5], який отримано методом високотемпературного плазмохімічного синтезу [4].

Карбід кремнію існує у двох алотропічних модифікаціях: $\beta-SiC$ і $\alpha-SiC$. Кристали $\beta-SiC$ мають кубічну будову з алмазоподібною решіткою сфалериту з параметром $a = 0,4360$ нм [9]. Кристали $\alpha-SiC$ у широкій межі проявляють політипізм. В основі їх будови існує гексагональна і ромбоїдрична решітки. Хімічний склад тонкодисперсного $\beta-SiC$, мас. %: 68,5 Si; 30,5 C; 1,0 N. Перехід $\beta-SiC \rightarrow \alpha-SiC$ відбувається при 2100 °С і супроводжується зміною об'єму на 0,06 %.

В якості модифікатора обрано порошкову суміш нанодисперсних частинок Mg_2Si і SiC , згідно відповідності основним критеріям модифікування [2,6]: подібності кристалічних ґраток, нерозчинності тугоплавких сполук в алюмінієвому розплаві, значна різниця температур плавлення. Нанодисперсні частинки карбіду кремнію та силіциду магнію розмірами до 100 нм є ефективними геттерами, матеріалами з розвиненою вільною поверхнею [9, 10].

Високі фізико-механічні характеристики $\beta-SiC$ пояснюються міжатомним зв'язком. Атоми в карбіді кремнію пов'язані між собою ковалентним зв'язком, який є найбільш сильним у природі і обумовлює в кристалах високу температуру плавлення, твердість і хімічну тривкість. Кристал $Mg_2Si+SiC$ складається з атомів двох видів, що мають різну спорідненість до електрону, причому атом кожного сорту оточений чотирма атомами іншого сорту. Тому поряд з ковалентним зв'язком тут є деяка частка гетерополярного зв'язку [8].

Дія нерозчинних додатків, ізоморфних до алюмінію, аналогічність впливу розчинних елементів дотримується лише тоді, коли кількість нерозчинного додатку перевищує кількість кристалів, що утворилися довільно за тих самих умов [11, 13]. Таким чином, зі збільшенням кількості нерозчинного додатку, зокрема частинок карбіду кремнію, розмір зерна спочатку зменшується, а потім буде постійним.

Механізм впливу порошкових частинок карбіду кремнію на формування структури доєвтектичних алюмінієвих сплавів під час кристалізації полягає в тому, що основна їх маса виштовхується фронтом кристалізації в рідку фазу та бере участь у подрібненні структурних складових сплаву [12, 14, 15]. Частинки карбіду кремнію сприяють також дисперсному зміцненню сплаву, так як дисперсні фази є додатковими бар'єрами для переміщення дислокацій, а отже, підвищують характеристики міцності ливарних алюмінієвих сплавів.

Результати досліджень та їх обговорення

Проведені дослідно-промислові плавки ливарних АЛ4, АЛ4С та деформованих 1545, 2219 сплавів. Плавку проводили на стаціонарній електропечі опору для плавки алюмінію САТ-0,16, яка призначена для плавлення та підтримання температури розплавленого алюмінію та його сплавів перед заливкою в форми. Після розплавлення шихтових матеріалів вводили навіску комплексного модифікатора у вигляді порошкової суміші наночастинок Mg_2Si і SiC . Після витримки розплаву з модифікатором розливали в кокиль та металеві форми для дослідних зразків.

Мікроструктуру дослідних сплавів вивчали на оптичних мікроскопах МІМ-8М та Neophot-2, у вихідному та модифікованому станах. Мікроструктура сплаву АЛ4 наведено на рис. 1.

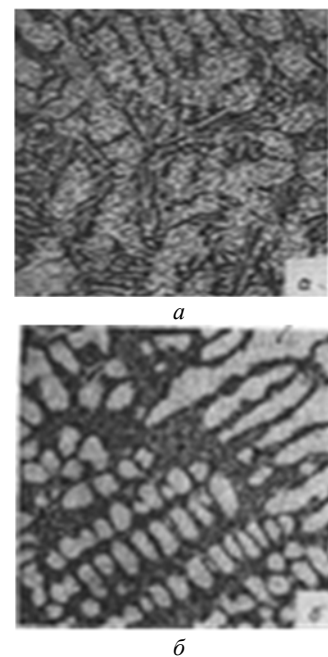


Рисунок 1. Мікроструктура сплаву АЛ4, $\times 200$: а – у вихідному стані; б – у модифікованому стані

В модифікованих зразках сплаву АЛ4 досягнуто значне подрібнення зернової структури до 150 мкм, у немодифікованому сплаві середній розмір зерна становить 240 мкм. Подрібнення структури модифікованих зразків сприяло підвищенню міцносних властивостей ливарного сплаву.

На механічні властивості алюмінієвих сплавів суттєво впливають розміри частинок зміцнювальної фази. Промислові експерименти з застосуванням дисперсних частинок порошкової суміші силіциду магнію та карбіду кремнію Mg_2Si і SiC у широкому діапазоні розмірів від 50 до 100 нм виявили, що зі зменшенням розмірів частинок порошків до 100 нм межа міцності сплаву АЛ4, АЛ4С зростає з 115 до 135 МПа.

Для визначення оптимальної кількості модифікатора карбіду кремнію виконали промислові плавки та випробування зразків, що пройшли термічну обробку за режимом Т6 (гартування і штучне старіння).

Для комп'ютерної обробки даних складу сплавів і вмісту модифікаторів використали програму Microsoft Excel. Аналіз результатів засвідчив, що модифікування частинками карбіду кремнію в кількості 0,1 мас. % при достатньому рівні пластичності (δ) сплаву АЛ4, АЛ4С (рис. 2) за одночасного збільшення межі міцності (σ_B) і межі плинності ($\sigma_{0,2}$).

Подальше збільшення кількості модифікатора $Mg_2Si+SiC$ від 0,10 до 0,25% в сплаві АЛ4, АЛ4С суттєво не впливає на механічні властивості, а за вмісту більше 0,25% $Mg_2Si+SiC$ незначно знижується параметр σ_B (рис. 3).

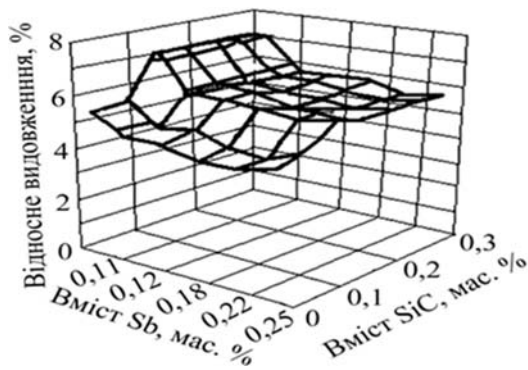


Рисунок 2. Зміна відносного видовження модифікованого сплаву АЛ4С залежно від вмісту SiC

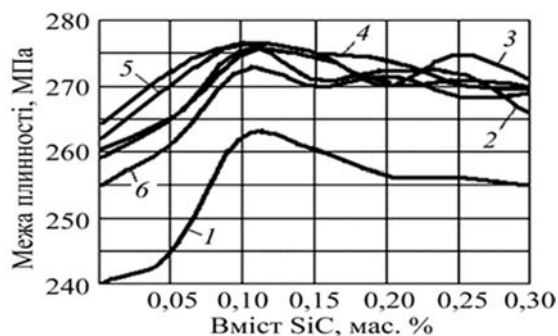


Рисунок 3. Залежність межі плинності модифікованого сплаву АЛ4С від вмісту SiC за різного вмісту Sb:
1 – 0%; 2 – 0,11; 3 – 0,12; 4 – 0,18; 5 – 0,22; 6 – 0,25 %

Незначне зниження межі плинності сплаву АЛ4, АЛ4С спостерігали під час введення більше 0,1 мас. % модифікатора SiC.

Таким чином, механічні характеристики ливарного алюмінієвого сплаву АЛ4, АЛ4С значно підвищуються з введенням у розплав 0,1 мас. % нанодисперсних частинок карбіду кремнію. Якість ливарних алюмінієвих сплавів під час модифікування залежить від багатьох чинників: природи дисперсної фази, температури розплаву, режимів його перемішування під час введення частинок. Під час вивчення впливу температури на ступінь засвоєння тугоплавких частинок $Mg_2Si+SiC$ встановлено, що за певної для даного розплаву температури спостерігається максимум засвоєння частинок. Характерною особливістю результатів досліджень, виконаних з різними тугоплавкими композиціями в алюмінієвих сплавах, є досягнення максимуму засвоєння частинок за нижнього значення температури розплавів.

Висновки

1. Проведено промислові плавки сплавів ливарних АЛ4, АЛ4С та деформованих 1545, 2219 у вихідному стані та з обробкою розплавів порошковими композиціями.
2. Запропоновано склад комплексного порошкового модифікатора на основі Mg_2Si та SiC з розміром часток від 50...100 нм, отриманих плазмохімічним синтезом.
3. Досягнуто значне подрібнення зеренної структури модифікованих сплавів у 1,6 рази. Підвищення механічних властивостей при збереженні рівня пластичності.
4. Встановлено залежності розміру часток та кількості модифікатора на механічні властивості алюмінієвих сплавів.
5. Досягнуто підвищення міцносних властивостей модифікованих сплавів на 18 %, при збереженні рівня пластичності.

Список літератури

1. Большаков В. І. Наноматеріали і нанотехнології / Большаков В. І., Куцова В. З., Котова Т. В. – Дніпропетровськ : ПДАБА, 2016. – 220 с.
2. Структура, властивості та використання конструкційних наноматеріалів : монографія / Калініна Н. Є., Никифорчин Г. М., Калінін О. В. та ін. – Львів : Простір, 2017. – 304 с.
3. Мільман Ю. В. Вплив скандію на структуру механічні властивості і опір корозії сплавів алюмінію. Прогресивні матеріали та технології. Том 1. / Мільман Ю. В. – К. : Академперіодика, 2003. – С. 335–381.
4. Мільман Ю. В. Скандієвий ефект підвищення міцності алюмінієвих сплавів / Мільман Ю. В., Лоцко Д. В., Сірко А. І. // Збірник наукових праць 3-го міжнародного семінару. Сучасні проблеми міцності. – К. : Наукова думка, 1999. – С. 277–283.
5. Кузін О. А. Металознавство та термічна обробка металів : підручник / Кузін О. А., Яцюк Р. А. – Львів : Афіша, 2002. – 304 с.

6. Аллюміній та сплави на його основі / В. З. Куцова, Н. Е. Погребна, Т. С. Хохлова та ін. – Дніпропетровськ : Пороги, 2004. – 136 с.
7. Костін В. А. Модифіковані структури зварних з'єднань високоміцних низьколегованих сталей наночастинками тугоплавких металів / Костін В. А., Григоренко Г. М., Жуков В. В. // Будівництво, матеріалознавство, машинобудування. – 2016. – Вип. 89. – С. 93–98.
8. Milman Yu. V. Influence of scandium on the structure, mechanical properties and corrosion resistance of aluminum alloys. *Advanced materials and technologies* / Milman Yu. V. – Kyiv : Academic Periodicals, 2003. – Vol. 1. – P. 125–134.
9. Young- Domd K. The effect of grain refining and oxide inclusion on the fluidity of AL-4,5Cu-0,6Mn and A356 alloys / Young- Domd K., Zin-Hyoung L. // *Mater. Sci. and Eng.* – 2003. – № 12. – P. 372–376.
10. Special features of the phase composition and structure of aluminium alloys modified by refractory nanocompositions / Kalinina N., D. Glushkova, A. Voronkov et al. // *Functional materials*, 27. – 2020. – № 3. – P. 508–512.
11. Effects of pre-deformation on the microstructures and corrosion behavior of 2219 aluminum alloys / Lu Y., Wang J., Li X. et al. // *Materials Science and Engineering.* – 2018. – No 723. – P. 204–211.
12. Структура, властивості та використання конструкційних наноматеріалів : монографія / Калініна Н. Є., Никифорчин Г. М., Калінін О. В. – Львів : Проспир-М, 2017. – 304 с.
13. Калінін О. В. Особливості впливу модифікування на структуру та властивості ливарних алюмінієвих сплавів / Калінін О. В., Щурко З. В. // *Системне проектування та аналіз характеристик аерокосмічної техніки.* – Дніпро : Видавництво «Ліра», 2017. – С. 16–21.
14. Перспективи поліпшення властивостей вторинних ливарних сплавів системи Al-Si з використанням процесу модифікування / Доценко Ю. В., Селівьоров В. Ю., Насонов Д. М., Насонов М. М. // *Матеріали Міжнародної науково-технічної конференції «Інформаційні технології в металургії та машинобудуванні».* ІТММ, 2021. – С. 28–32. DOI: <https://doi.org/10.34185/1991-7848.itmm.2021.01.022>
15. Куцова В. З. Вплив мікролегування на структуру сплаву АК7і / Куцова В. З. // *Будівництво, матеріалознавство машинобудування : сб. наук. пр. – Вип. 36. – Дніпропетровськ : ПГАСА, 2006. – С. 201–209.*

Одержано 16.02.2024

CHANGES IN THE STRUCTURE AND PROPERTIES OF ALUMINIUM ALLOYS WHEN MODIFIED WITH POWDER COMPOSITIONS

Davidyuk A.

Postgraduate student of the Department of Rocket, Space and Innovative Technologies of Oles Honchar Dnipro National University, Dnipro, Ukraine, e-mail: anzhela8848@gmail.com, ORCID : 0009-0004-3688-3455

Purpose. To determine the effect of modification with powder compositions on the structure and mechanical properties of cast and deformed aluminium alloys.

Research methods. Metallographic analysis, stereometric metallography, testing of strength and plastic properties of cast alloys AL4, AL4C of the Al-Si system and deformed alloys 1545 of the Al-Mg-Sc system, 2219 of the Al-Cu-Mn system in their original and modified state.

Results. Meltings of AL4, AL4C, 1545, 2219 alloys were carried out in the initial state and with melt treatment with a complex nano-disperse modifier of magnesium silicide Mg_2Si and silicon carbide SiC with a particle size of 50...100 nm. The optimal content of $Mg_2Si+SiC$ (0.10%) for increasing $\sigma_{0.2}$ of aluminium alloys was determined. A 1.6-fold reduction in the grain structure of cast alloys was achieved. The dependence of the particle size and the amount of the modifier on the mechanical properties of the alloys was established. In industrial experiments, the most effective particle size of $Mg_2Si+SiC$ was established for increasing $\sigma_{0.2}$ of AL4, AL4C alloy from 115 to 260 MPa in the as-cast state. The increase in the strength properties of the modified alloys is 44 % compared to the original state.

Scientific novelty. Further development, insight into the influence of melt modification on the parameters of the structure and properties of aluminium alloys was obtained. The use of nanodispersed complex modifier $Mg_2Si+SiC$ with a particle size of 50...100 nm is proposed. It has been confirmed that the use of complex nanodisperse modifiers allows you to actively influence the structure and mechanical properties of aluminium alloys.

Practical value. It has been experimentally proven that the rational amount of the introduced complex modifier is 0.10% of the mass of the melt. A significant grinding of the grain structure and an increase in the strength properties of cast and deformed aluminium alloys were achieved as a result of the modification.

Key words: aluminium alloys, modification, structure, mechanical properties, powder nanodisperse compositions.

References

1. Bolshakov V. I., Kutsova V. Z., Kotova T. V. (2016). *Nanomaterials and nanotechnologies*, 2016, 220.
2. Kalinin N. E., Nikyforchyn H. M., Kalinin O. V. et al. (2017). *Structure, properties and use of structural nanomaterials* : Monograph, Lviv: Prostir, 304.
3. Milman Yu.V. (2003). The influence of scandium on the structure, mechanical properties and corrosion resistance of aluminum alloys. *Progressive materials and technologies*, 1, Kyiv : Aka-demperiodika, 2003, 335–381.
4. Milman Y. V., Lotsko D. V., Sirko A. I. (1999). The scandium effect of increasing the strength of aluminum alloys (text)/ Collection of scientific papers of the 3rd international seminar. *Modern problems of strength*. Kyiv: Naukova dumka, 277–283.
5. Kuzin O. A., Yatsyuk R. A. (2002). *Metallurgy and heat treatment of metals* : Textbook. Lviv: Afisha, 304.
6. V. Z. Kutsova, N. E. Pogrebna, T. S. Khokhlova et al. (2004). *Aluminium and alloys based on it*. Dnipropetrovsk: Porogy, 136.
7. Kostin V. A., Grigorenko H. M., Zhukov V. V. (2016). Modified structures of welded joints of high-strength low-alloy steels with nanoparticles of refractory metals. *Construction, materials science, new construction machines*, 89, 93–98.
8. Milman, Yu.V. (2003). Influence of scandium on the structure, mechanical properties and corrosion resistance of aluminum alloys. *Advanced materials and technologies*. Kyiv: Academic Periodicals, 125–134.
9. Young- Domd K., Zin-Hyoung L. (2003). The effect of grain refining and oxide inclusion on the fluidity of AL-4,5Cu-0,6Mn and A356 alloys. *Mater. Sci. and Eng.*, 12372–376.
10. Kalinina, N., D. Glushkova, A. Voronkov, A. Sanin, A. Kalinin, T. Nosova, O. Bondarenko (2020). Special features of the phase composition and structure of aluminium alloys modified by refractory nanocompositions *Functional materials*, 27, 3, 2020, 508–512.
11. Lu Y., Wang J., Li X., Li W., Li, R., Zhou D. (2018). Effects of pre-deformation on the microstructures and corrosion behavior of 2219 aluminum alloys. *Materials Science and Engineering*, 723, 204–211.
12. N. E. Kalinina, H. M. Nikyforchyn, O. V. Kalinin, V. I. Marukha, V. I. Kyrylov (2017). *Structure, properties and use of structural nanomaterials*. Lviv : Prostir-M, 304.
13. Kalinin O. V., Shchurko Z. V. (2017). Peculiarities of the influence of modification on the structure and properties of cast aluminum alloys. *System design and analysis of aerospace engineering characteristics*. Dnipro : “Lira” Publishing House, 16–21.
14. Yu. V. Dotsenko, V. Yu. Selivyorstov, D. M. Nasonov, and M. M. Nasonov (2021). Prospects for improving the properties of secondary foundry alloys of the Al-Si system using the modification process. *Materials of the International Scientific and Technical Conference “Information Technologies in Metallurgy and Mechanical Engineering”*. ITMM, 28–32. DOI: <https://doi.org/10.34185/1991-7848.itmm.2021.01.022>
15. Kutsova V. Z. (2006). The influence of microalloying on the structure of the AK7i alloy. *Construction, materials science of new construction machines* : Sat. of science, 36. Dnipropetrovsk : PGASA, 201–209.