

СУМІЖНІ ГАЛУЗИ

УДК 669.715

DOI: 10.30977/BUL.2219-5548.2023.103.0.211

ЗМІНА СТРУКТУРИ ТА МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ АЛЮМІНІЄВОГО СПЛАВУ СИСТЕМИ Al-Mg-Sc УНАСЛІДОК ОБРОБЛЕННЯ КОМПЛЕКСНИМ НАНОМОДИФІКАТОРОМ

Давидюк А. В., Поліжко С. О.

Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара

Анотація. Метою роботи є дослідження впливу комплексного наномодифікатора на зміну структури та механічних властивостей алюмінієвого сплаву 1545 системи Al-Mg-Sc. Матеріалом дослідження є деформований алюмінієвий сплав 1545 системи Al-Mg-Sc. Уперше запропоновано використання нанодисперсного комплексного модифікатора $Mg_2Si+SiC$ з розміром частинок 50...100 нм.

Ключові слова: алюмінієвий сплав; скандій; модифікування; мікролегування; структура; міцнісні властивості.

Вступ

Після численних теоретичних та експериментальних робіт, присвячених алюмінієвим сплавам і розробленню високоміцних сплавів системи Al-Mg-Sc, тривалий час вважали, що подальше підвищення властивостей міцності алюмінієвих сплавів неможливе. Проте в останні два десятиліття досягнуто успіхів завдяки легуванню сплавів скандієм. У зв'язку з цим стало можливим подальше підвищення комплексу властивостей алюмінієвих сплавів та отримання дисперсних структур зі зміцнювальними фазами.

Аналіз публікацій

Вивчено структуру й механічні властивості модифікованого сплаву. У роботах Ю. Мільмана [1, 2] завдяки комплексу досліджень підтверджено мікролегуючу та модифікуючу дію скандію в Al-розплаві, відпрацьовано технологію введення скандію в розплав, оптимізовано кількість Sc. Сплави системи Al/Sc мають високий ефект штучного старіння.

Вивчення кінетики процесу розпаду показало пересичення твердого розчину, отриманого в процесі кристалізації. Під час розпаду твердого розчину скандію в алюмінії виділяються частинки стабільної фази Al_3Sc [3–5].

У роботах В. Костіна й А. Іщенко [6, 7] розглянуто переваги скандію перед іншими легуючими та мікролегуючими елементами високоміцних алюмінієвих сплавів. Наведено способи зварювання виробів аерокосмічної техніки алюмінієвих сплавів зі скандієм з отриманням стабільних характеристик механічних властивостей.

У праці В. Куцової [8] наведено класифікацію алюмінієвих сплавів і способи їх термозміцнювального оброблення для стабілізації структури й властивостей. Але в сплавах системи Al-Mg-Sc не розглянуто способи модифікування розплавів.

Дослідження В. Большакова [9] присвячено теоретичним основам отримання конструкційних сплавів із використанням нанодисперсних складників. Однак автор не розглянув способи застосування нанодисперсних композицій у конструкційних деформованих алюмінієвих сплавах. Отже, тема нашої роботи є вчасною та актуальною як у теоретичному, так і практичному плані, а саме для використання сплавів системи Al-Mg-Sc в авіації та ракетно-космічній техніці.

Мета та постановка завдання

Мета роботи – дослідити вплив комплексного наномодифікатора на зміну структури та механічних властивостей алюмінієвого сплаву 1545 системи Al-Mg-Sc.

Результати досліджень та їх обговорення

Матеріалом дослідження є деформований алюмінієвий сплав 1545 системи Al-Mg-Sc. Хімічний склад цього сплаву наведено в табл. 1.

Таблиця 1 – Хімічний склад сплаву 1545

Сплав	Хімічний склад, % мас.					
	Al	Si	Mg	Cu	Sc	Zn
1545	основа	-	5,7	0,1	0,3	0,15

Сплав 1545 є перспективним матеріалом для використання в конструкціях авіаційної та ракетно-космічної техніки.

У роботі запропоновано оброблення алюмінієвого розплаву комплексним нанодисперсним модифікатором на основі силіциду складу, Mg_2Si та SiC . Склад тугоплавкого комплексного наномодифікатора обрано з огляду на критерії відповідності модифікатора металевій основі сплаву: високої температури плавлення, відповідності фізико-хімічній природі елементів, подрібненості кристалічної будови модифікатора та алюмінієвого сплаву, малої різниці атомних радіусів елементів. На міцнісні властивості алюмінієвих сплавів суттєво впливають розміри частинок зміцнювальної фази. Дослідно-промислові експерименти проводили із застосуванням дисперсних частинок $Mg_2Si+SiC$ у діапазоні розмірів 50–100 нм. Досліджено зміни структури сплаву 1545 до та після модифікування.

У процесі дослідно-промислових експериментів проведено механічні випробування для визначення міцнісних властивостей під час розтягування зразків із різним вмістом комплексного модифікатора.

Промислові алюмінієві сплави є багатокомпонентними системами, тому легування скандієм має особливості, зумовлені взаємодією скандію з легуючими елементами, що містяться у сплавах.

Скандій – хімічний елемент III групи періодичної системи, порядковий номер 21. Єдиний стабільний ізотоп Sc^{45} . Sc – метал із температурою плавлення – 1540 °C та кипіння – 2700 °C, щільність – 3020 кг/м³. До температури 1334 °C стабільною є гексагональна щільно упакована кристалічна ґратка з параметрами $a = 0,3309$ нм і $c = 0,5268$ нм, вища за цю температуру – об'ємноцентрована ґратка з параметром $a = 0,4541$ нм. Скандій належить до перехідних металів, що визначаються наявністю декількох валентних електронів на ns -енергетичному рівні за умови незаповненого електронами $(n-1)d$ рівні. Розподіл електронів на зовнішніх електронних оболонках скандію – $3d^14s^2$. Діаграма стану $Al-Sc$ зображена на рис. 1 [1].

Подвійна система $Al-Sc$ містить чотири інтерметалідні сполуки: Al_3Sc , Al_2Sc , $AlSc$ та $AlSc_2$. У рівновазі з α -твердим розчином алюмінію перебуває інтерметалід Al_3Sc , що утворюється внаслідок перитектичної реакції за температури 1327 °C.

Якщо вміст скандію 0,55 %, відбувається евтектична реакція: $Ж \leftrightarrow \alpha-Al + Al_3Sc$. Температура евтектичної реакції становить 655 °C. Кристалічні ґратки інтерметаліду Al_3Sc , ізоморфна ґратка алюмінію в разі незначного збільшення її параметра на ~ 1,5 %.

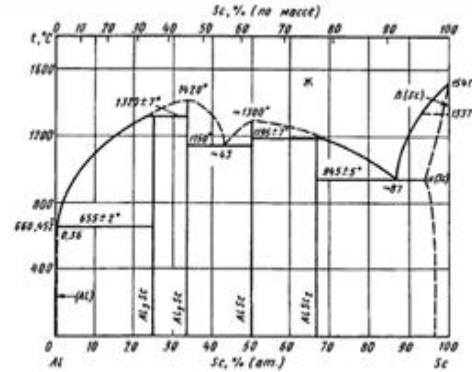


Рис. 1. Діаграма впливу $Al-Sc$

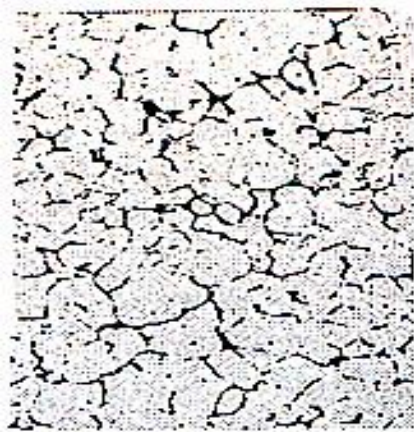
Гранична розчинність скандію у твердому алюмінії становить 0,3 % мас. Підвищення швидкості охолодження в процесі кристалізації призводить до розширення ділянки α -твердого розчину, гранична розчинність скандію за умови швидкості охолодження 100 °C/с зростає до 0,6 %, а за швидкості 10⁶ °C/с – 5,2 %.

Скандій, що використовується як мікролегуючий елемент в алюмінієвих сплавах, виявився найбільш ефективним перехідним металом з усіх раніше відомих щодо цієї групи алюмінієвих сплавів. Виділення фази Al_3Sc дисперсніші (1–10 нм), ніж інтерметаліди інших металів. Це пояснюється тим, що висока стабільність дисперсних виділень фази Al_3Sc більшою мірою впливає на формування комірчастої структури деформованих напівфабрикатів. Введення легуючого елемента в алюмінієвий сплав є ефективним для утворення з алюмінієм тугоплавкої інтерметалідної фази Al_3Sc з температурою плавлення 1320 °C та модифікуючу дію, що сприяє поліпшенню структури сплаву.

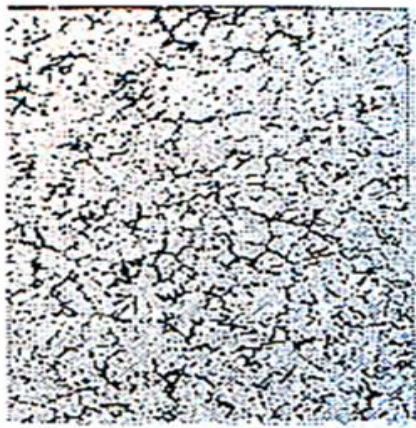
Технологія модифікування нанодисперсними композиціями полягала у введенні порошків комплексного наномодифікатора $Mg_2Si+SiC$ в алюмінієвий розплав. Суміш нанопорошків розміром частинок 50...100 нм $Mg_2Si+SiC$, отриманих плазмохімічним синтезом, змішували декілька годин у спеціальному атриторі з послідовним пресуванням таблеток модифікатора на автоматичному пресі. Отримані таблетки підлягали відпалюванню в захисній атмосфері аргону. Як пока-

зали дослідження, оптимальна кількість модифікатора становила 0,10 % від загальної маси алюмінієвого розплаву. Кількість навіски модифікатора вводили на дно кристалізатора після розплавлення основної шихти сплаву. Температура модифікування становила 745 °С, час – 5 хв. Після розплавлення розплав виливали в кокіль і форми для дослідних зразків.

Металографічне дослідження мікроструктури сплаву 1545 до і після модифікування виконано на дослідних зразках. Мікроструктуру сплаву наведено на рис. 2.



а



б

Рис. 2. Мікроструктура литого сплаву 1545 до (а) і після модифікування (б), $\times 100$

Неодночасне виникнення центрів кристалізації та різна швидкість зростання зерен зумовлюють різнозернистість полікристалічних тіл: у якому обсязі металу є зерна, що відрізняються від середньої величини в більший або менший бік. Різнозернистість – шкідливе явище, особливо для виробів відповідального призначення, що використовуються в умовах підвищених напруг і температур [10].

У роботі визначено, що розмір зерна сплаву 1545 до модифікування становив 15,6 мм², після модифікування – 5,7 мм². Як видно з наведених показників, унаслідок модифікування досягнуто подрібнення зеренної структури сплаву 1545 в 2,7 раза.

У цьому дослідженні проведено термоміцніювальне оброблення модифікованих зразків сплаву 1545. Таке оброблення передбачає гартування та штучне старіння внаслідок загартування сплаву системи *Al-Mg-Sc*, що містить 0,3 % скандію від температури 620 °С, різкого охолодження зі швидкістю 100 °С/с. Не відбувається розпаду твердого розчину з виділенням частинок інтерметаліду *Al₃Sc*. У процесі штучного старіння загартованих зразків виділяються вторинні частинки *Al₃Sc*. Оптимальна температура штучного старіння становить 300 °С протягом 5 год.

Особливість впливу скандію пояснюється його електронною будовою. Істотно вищу розчинність скандію в більшості елементів періодичної системи пов'язують зі значно меншим значенням атомного радіуса скандію [1].

Результати визначення міцнісних властивостей зразків сплаву 1545 до та після модифікування наведено в табл. 2.

Таблиця 2 – Міцнісні властивості $\sigma_{0,2}$, σ_e сплаву 1545 до і після модифікування

№ плавки	Вміст <i>Mg₂Si</i> , <i>SiC</i> , %	$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_e , МПа
1	вихідний стан	344	384
2	0,05	376	415
3	0,10	408	446
4	0,15	365	407

Виявлено, що максимальні значення $\sigma_{0,2}$ і σ_e відповідають оптимальному вмісту порошкової композиції: 0,10 % з подальшим збільшенням модифікатора, міцнісні властивості знижуються, водночас підвищення міцнісних властивостей модифікованого сплаву становить 12...18 % порівняно з вихідним станом.

Висновки

1. На основі вітчизняних і зарубіжних досліджень, аналізу фізико-хімічних властивостей елементів обґрунтовано вибір скандію як мікролегуючого елемента високоміцних алюмінієвих сплавів. Наведено основні кри-

терії здатності скандію та його переваги перед перехідними металами.

2. Уперше запропоновано використання нанодисперсного комплексного модифікатора $Mg_2Si+SiC$ з розміром частинок 50...100 нм. Проаналізовано фазовий склад сплаву системи $Al-Mg-Sc$ відповідно до діаграми стану.

3. Розроблено технологію модифікування алюмінієвого розплаву комплексним модифікатором.

4. Досягнуто однорідну структуру модифікованого сплаву 1545 із розміром зерна в 2,7 раза меншим порівняно з вихідним станом. Запропоновано режим термозміцнювального оброблення модифікованого сплаву.

5. Установлено, що максимальні значення $\sigma_{0,2}$ і σ_e відповідають оптимальному вмісту порошкової композиції: 0,10 % з подальшим збільшенням модифікатора, міцнісні властивості знижуються, у цьому разі підвищення міцнісних властивостей модифікованого сплаву становить 12...18 % порівняно з вихідним станом.

Література

1. Мільман Ю.В. Вплив скандію на структуру механічні властивості і опір корозії сплавів алюмінію. Прогресивні матеріали та технології. Том 1. – Київ: Академперіодика, 2013. – С. 335-360.
2. Мільман Ю.В., Коржова Н.П., Сірко А.І. Алюміній та його сплави (текст)/ Неорганічні матеріали. Метали і технології - Київ: Naukdumka, 2008 - Т.2., кн.1-с. 52-68.
3. Gradl, P., Mireles, O. and 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., D.B. Hlushkova, Y.O. Dzhur, S. Ya. Khodyrev, V.T. Kalinin, S.A. Polishko // 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 високоміцнісні сплави для зварних конструкцій // Прогресивні матеріали і технології: [Текст] / Київ: Академперіодика, 2013-т.1.- ст. 50-82.
8. Куцова В. З., Погребна Н. Е., Хохлова Т. С. та ін. Алюміній та сплави на його основі. Дніпропетровськ: Пороги, 2014. 136 с.
9. Большаков В.І., Куцова В.З., Котова Т.В. Наноматеріали і нанотехнології, Д.: Дніпропетровськ, 2016. – 245 с.
10. Калініна Н.Є., Нікіфорчин Г.М., Калінін О.В., Маруха В.І., Кирилів В.І. // Монографія. Структура, властивості та використання конструкційних наноматеріалів// Львів.. Простір-М, 2017. – 385 с.

References

1. Yu.V. Milman. The influence of scandium on the structure, mechanical properties and corrosion resistance of aluminum alloys. Progressive materials and technologies. Volume 1. - Kyiv: Akadempriodika, 2013. - P. 335-360.
2. Y.V. Milman, N.P. Korzhova, A.I. Sirko. Aluminum and its alloys (text)/ Inorganic materials. Metals and technologies - Kyiv: Naukdumka, 2008 - T.2., book 1-p. 52-68.
3. P. Gradl, O. Mireles, N. Andrews. 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., D.B. Hlushkova, Y.O. Dzhur, S. Ya. Khodyrev, V.T. Kalinin, S.A. Polishko // Journal of Chemistry and Technologies. 2020, 28(1), P.34-41.
5. 7. M.N. Su, B. Young, L. Gardner. Testing and Design of Aluminum Alloy Cross Sections in Compression // J Struct Eng. 2015, N 140(9), p.
6. 8. 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. A.Ya. Ishchenko High-strength aluminum alloys for welded structures // Progressive materials and technologies: [Text] / Kyiv: Akadempriodika, 2013-t.1 - st. 50-82.
8. Kutsova V. Z., Pohrebna N. E., Khokhlova T. S., et al. (2014). Aluminum and alloys based on it. Dnipropetrovsk.
9. Bolshakov V.I., Kutsova V.Z., Kotova T.V. Nanomaterials and nanotechnologies, D.: Dnipropetrovsk, 2016. – 245 p.
10. Kalinina N.E., Nikiforchyn H.M., Kalinin O.V., Marukha V.I., Kyryliv V.I. // Monography. Structure, properties and use of structural nanomaterials// Lviv, Prostir-M, 2017. – 385 p.

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

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

Changes in the structure and mechanical properties of the aluminum alloy of the Al-Mg-Sc system as a result of treatment with a complex nanomodifier

Abstract. Problem. On the basis of domestic and foreign research, analysis of physicochemical properties of elements, the choice of scandium as a microalloying element of high-strength aluminium alloys is substantiated. The main criteria for the ability of scandium and its advantages over transition metals are given. **Goal.** The purpose of the work is to study the influence of a complex nanomodifier on the change in the structure and mechanical properties of aluminium alloy 1545 of the Al-Mg-Sc system. **Methodology.** For the first time, the treatment of aluminium melt with a complex nanodisperse modifier of the composition $Mg_2Si+SiC$ was proposed. The strength properties of aluminium alloys are significantly influenced by the size of the particles of the strengthening phase. Industrial experiments using dispersed particles of $Mg_2Si+SiC$ in a wide range of sizes of 50–100 nm.

Results. The technology of modifying aluminium melt with a complex modifier has been developed.

Originality. A homogeneous structure of the modified alloy 1545 with a grain size 2.7 times smaller than the original state was achieved. **Practical value.** In the work, the grain size was determined and it was established that the grain size of alloy 1545 was 15.6 mm^2 before modification, and 5.7 mm^2 after modification. As can be seen from the given data, as a result of the modification, the grain structure of alloy 1545 was crushed by 2.7 times. It was established that the maximum values of $\sigma_{0.2}$ and σ_v correspond to the optimal content of the powder composition: 0.10 % with a further increase of the modifier, the strength properties decrease, while the increase in the strength properties of the modified alloy is 12...18 % compared to the initial state.

Key words: aluminium alloy; scandium; modification; microalloying; structure; strength properties.

Davydiuk Anzhela¹, postgraduate student, rocket-space and innovative technologies, Oles Honchar National University, Str. Naukova, 1, Dnipro, 49000, Ukraine, phone +380674355821, anzhela8848@gmail.com.

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