

ПІДВИЩЕННЯ ЯКОСТІ АЛЮМІНІЄВИХ СПЛАВІВ МЕТОДАМИ МОДИФІКУВАННЯ

Наталія Іванівна Цокур

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8968-3543>

Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара, Дніпро

Наталія Євграфівна Калініна

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3810-6778>

Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара, Дніпро

Вступ

Після численних теоретичних та експериментальних робіт, присвячених алюмінієвим сплавам та розробці високоміцних сплавів системи Al-Zn-Mg тривалий час вважали, що подальше підвищення властивостей міцності алюмінієвих сплавів неможливе [1]. Проте в останні два десятиліття досягнуто успіхів завдяки легуванню сплавів скандієм [4]. У зв'язку з цим стало можливим подальше підвищення комплексу властивостей алюмінієвих сплавів та отримання дисперсних структур зі зміцнюючими фазами.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ

Таким чином, метою цієї роботи було теоретичне обґрунтування вибору скандію як мікролегуючого і модифікуючого елемента для підвищення властивостей міцності алюмінієвих сплавів.

МАТЕРІАЛИ І МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Матеріалом дослідження був деформований алюмінієвий сплав В95 системи Al-Zn-Mg-Cu хімічного складу, % мас.: 8,2 - Zn; 1,9 - Mg; 1,7 - Cu; 0,04 - Mn; 0,7 - Zr; 0,12 - Si; 0,01 - Ti; Інше. Скандій вводили у вигляді лігатури з розрахунку 0,2...0,3% мас. Після розплавлення шихти та охолодження виливків проводили їх деформацію та термоміцнівальну обробку. Вивчення мікроструктури та механічних властивостей сплаву проводили за стандартними методиками.

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Найбільшою міцністю нині володіють сплави системи Al-Zn-Mg-Cu. Однак приховані резерви підвищення міцності алюмінієвих

сплавів закладені у мікролегуванні скандієм та перехідними металами [3]. Мікролегування скандієм дозволило як підвищити міцність і пластичність сплавів, а й поліпшити технологічні властивості: зварюваність і оброблюваність, і навіть корозійні властивості [2].

Промислові алюмінієві сплави є багатокомпонентними системами, тому легування скандієм має особливості, зумовлені взаємодією скандію з легуючими елементами, що входять до складу сплавів.

Скандій – хімічний елемент III групи періодичної системи, температура плавлення – 1540°C, щільність – 3020 кг/м³, поліморфний метал. Електронна конфігурація атома скандію відповідає 3d¹ 4s². Розчинність скандію в алюмінії становить 0,3% мас., а в лігатурі присутній інтерметалід Al₃Sc, розміри якого повинні бути не більше 20 нм, щоб розчинитися в розплаві.

Аналіз діаграми стану Al-Sc [3] дозволив встановити що, незначний температурний інтервал кристалізації (5°C); помітна гранична розчинність 0,4% ваг; пологий ліквідус заевтектичних сплавів. Все це дає підставу припустити можливість утворення пересичених твердих розчинів скандію в алюмінії за відносно невисоких швидкостей кристалізації, близьких до промислових умов отримання сувоїв [4]. Значна гранична розчинність при евтектичній температурі різко зменшується зі зниженням температури, що свідчить про можливість зміцнення сплавів за рахунок термічної обробки.

В результаті загартування сплавів системи Al-Sc, що містять 0,3% скандію, від температури 620°C різкого охолодження зі швидкістю 100°C/с і вище не відбувається розпаду твердого розчину з виділенням частинок інтерметаліду Al₃Sc. У процесі старіння загартованих металів виділяються вторинні частки Al₃Sc. Оптимальна температура старіння становить 300°C. Оскільки в складнолегованих сплавах алюмінію температура плавлення нижче 600°C, загартування передплавильних температур не призводить в цих сплавах до перекладу скандію в твердий розчин. Утворення вторинних виділень Al₃Sc можливе шляхом старіння металу після швидкої кристалізації, також шляхом деформаційного старіння [2].

Особливість впливу скандію на метали алюмінію пояснюється електронною будовою скандію. Істотно більшу розчинність скандію у більшості елементів періодичної системи пов'язують зі значно меншим значенням атомного радіусу скандію, зумовленого його електронною будовою.

У роботі встановлено, що сплави системи AlSc мають високий ефект штучного старіння. Вивчення кінетики процесу розпаду показало пересичення твердого розчину, отриманого при кристалізації аналогічно старіння металу після загартування. Під час розпаду

твердого розчину скандію в алюмінії виділяються частинки стабільної фази Al_3Sc . Вони зароджуються гомогенно, виділяються у дисперсному вигляді та є повністю когерентними матрицями. Основна дія скандію полягає у підвищенні властивостей міцності за рахунок утворення дисперсних продуктів розпаду твердого розчину скандію в алюмінії і збереженні в термічно оброблених напівфабрикатах стабільної структури з дрібними субзернами. Для отримання максимального ефекту при легуванні алюмінієвих сплавів скандієм необхідно враховувати особливості взаємодії скандію з алюмінієм, легуючими елементами та домішками, а також кінетику фазових та структурних перетворень у алюмінієвих сплавах, що містять скандій.

Вміст скандію має бути таким, щоб при литті злитків основна його частина фіксувалася в пересиченому твердому розчині, який потім розпадається при подальших технологічних нагріваннях злитків і напівфабрикатів з утворенням дисперсних фаз, що забезпечують при термічній обробці формування дрібної субзерненої структури з високою стійкістю проти рекристалізації матриці з допомогою дисперсійного твердіння. При великій швидкості охолодження твердий розчин скандію в алюмінії схильний до аномального пересичення з концентрацією скандію в алюмінії близько 0,6% [5,6]. Тому максимальний зміцнюючий ефект в деформованих напівфабрикатах досягається при вмісті в алюмінії та його сплавах 0,6% Sc. Однак це справедливо тільки для напівфабрикатів в лабораторних умовах, коли вдається обмежити розпад і коагуляцію продуктів розпаду пересиченого твердого розчину скандію в алюмінії. У виробничих умовах зливки та напівфабрикати піддаються тривалим високотемпературним нагріванням, при цьому розпад пересиченого твердого розчину проходить повністю, а продукти розпаду сильно коагулюють. В результаті, ефект від введення 0,6% Sc втрачається. Це пов'язано з тим, що твердий розчин скандію в алюмінії нестійкий, і швидкість розпаду його на кілька порядків перевищує швидкість розпаду твердих розчинів інших перехідних металів в алюмінії. Для зменшення ступеня розпаду твердого розчину та обмеження коагуляції продуктів розпаду вміст скандію доцільно обмежити до 0,25-0,5% [7].

Після кристалізації проводили гомогенізацію злитків при 470°C протягом 8 год, що значно впливало на формування однорідної структури і стабілізацію властивостей. У процесі гомогенізації сплаву В96, модифікованого скандієм, крім розчинення надлишкових фаз та вирівнювання концентрації твердого розчину основних компонентів в алюмінії, з великою швидкістю відбувається розпад твердого розчину Sc в алюмінії. Температурно-часові умови гомогенізації вибирали виходячи з даних диференціального термічного аналізу та

статистичної обробки результатів механічних випробувань.

Вивчення мікро- та макроструктури серійних та модифікованих зливок сплаву В95 показало більш однорідну структуру модифікованих злитків та подрібнення зерна з 140 мкм до 50...60 мкм. Модифіковані зливки мали практично нульову пористість у вигляді дрібних блискучих ділянок ($<0,02 \text{ мм}^2$) у зламах технологічних проб. Підвищення якості литого модифікованого металу далось взнаки підвищенням механічних властивостей деформованих заготовок (табл. 1).

Механічні властивості зразків сплаву визначали у стані гарту та штучного старіння (110°C , 4ч + 160°C , 8ч). Мікроструктура негомogenізованих злитків сплаву В95 мала грубу дендритну будову - твердого розчину з великими виділеннями інтерметалідних фаз по межах дендритних осередків. Після гомогенізації збільшилася дисперсність дендритів, розмір дендритного осередку порівняти з розміром зерна, тобто 40...50 мкм. Інтерметалідні фази (Al_3Sc , FeAl_3 , Al_3CuMg , MgZn_2) дисперсно та рівномірно розподілені в обсязі зерен. Деформація призвела до волокнистої структури; причому неоднорідні великі фази вихідного металу утворили рядки підвищеної травимості, а зерна твердого розчину алюмінію мали знижену травність. Ця неоднорідність призвела до анізотропії властивостей міцності вихідного сплаву. В результаті модифікування скандієм смуг різнотравності не спостерігали і анітропія за характеристиками міцності зменшилася.

Таблиця 1 — Механічні властивості сплаву В95

Стан	$\sigma_{\text{в}}$, МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %
Вихідний зливок	280	240	12,5
Модифікований зливок	340	290	11,0
Вихідний профіль	560	490	8,0
Модифікований профіль	620	570	7,5

ВИСНОВКИ

На основі вітчизняних та зарубіжних досліджень, аналізу фізико-хімічних властивостей елементів обґрунтовано вибір скандію як мікролегуючого та модифікуючого елемента високоміцних алюмінієвих сплавів. Наведено основні критерії модифікуючої здатності скандію та його переваги перед перехідними металами. Розроблено технологію введення Al-Sc-лігатури в алюмінієвий розплав. Оптимізовано кількість скандію 0,2...0,3% (мас.). Для ефективного модифікування запропоновано температурні параметри термозміцнювальної обробки сплаву В95. Досягнуто однорідну дисперсну структуру заготовок з

високим комплексом механічних властивостей.

Як мікролегуєуючий та модифікуючий елемент високоміцного алюмінієвого сплаву В95 запропоновано скандій. Проведено аналіз природи та фізико-механічних властивостей Sc. Визначено критерії властивостей Sc як модифікатора Al-сплавів. Проведено аналіз фазової діаграми Al-Sc, на підставі чого скориговані температури загартування та старіння металу. Проведені дослідні плавки сплаву В95 у вихідному стані та з добавками Sc-лігатури. У модифікованих зразках отримана дисперсна структура та підвищений рівень властивостей міцності.

ПОСИЛАННЯ

1. Вплив дресування на структуру і властивості гарячекатаної листової сталі для холодної штамповки / В. Куцова та ін. System technologies. 2021. Т. 5, № 136. С. 46–57. URL: <https://doi.org/10.34185/1562-9945-5-136-2021-05> (дата звернення: 17.05.2023).

2. Мильман Ю. В. Исследование физической природы низкотемпературной хрупкости металлов группы хрома : автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук. Киев, 1965. 17 с.

3. Saunders N. CALPHAD (calculation of phase diagrams): A comprehensive guide. Oxford : Pergamon, 1998. 479 p.

4. Technology improvement of the titanic alloy term strengthening treatment / М. Грекова et al. Information systems, mechanics and control. 2017. No. 17. P. 61–67. URL: <https://doi.org/10.20535/2219-3804152016108140> (date of access: 17.05.2023).

5. Патент України на корисну модель № 82163, МПК С22С 19/03. Комплексний модифікатор нікелевих сплавів / Н. С. Калініна, А. С. Калиновська, В. Т. Калінін, З. В. Віліщук, Т. В. Носова. – № 201300612 Заявл. 17.01.2013; Опубл. 25.07.2013 // Бюл. №14.

6. Special features of the phase composition and structure of aluminum alloys modified by refractory nanocompositions Kalinina, N., D. Glushkova, A. Voronkov, A. Sanin, A. Kalinin, T. Nosova, O. Bondarenko Functional materials, 27, №3, 2020. – P. 508-512.

7. Hardening the input edges of the turbine blades by electric spark alloying Калініна Н. С., Глушкова Д. Б., Гринченко О. П., Воронков А. И., Носова Т. В. Питання атомної науки и техніки. – Харків: ННЦ ХФТ, 2019, №2. - С.145-154.