

УДК 620.22, 66.017, 67.017

Влияние добавок Fe и Zr на свойства алюминиевого сплава системы Al–Ce

Ибатуллин Радмир Вадимович

radmir.ibatullin.engineer@gmail.com

Пучков Юрий Александрович(*)

putchkov_bmstu@mail.ru

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Аннотация. Изучены структура, механические и коррозионные свойства перспективного жаропрочного сплава Al–7Ce–0,7Fe–0,1Zr полученного методом селективного лазерного плавления (СЛП). Сплав исследован после СЛП и отжига. После СЛП и отжига сплав имеет дендритное строение. После отжига в междендритном пространстве появляются многочисленные мелкодисперсные выделения. Отжиг понижает твердость на тридцать единиц по шкале Роквелла со 100 до 70 HRB. После СЛП наблюдается анизотропия коррозионных свойств, стойкость к общей коррозии сопоставима с коррозионной стойкостью сплава СЛП сплава Al–Si–Mg.

Ключевые слова: аддитивные технологии, селективное лазерное плавление, сплавы системы Al–Ce, порошковые материалы, легирование редкоземельным и переходными металлами, жаропрочные алюминиевые сплавы, сплав системы Al–Ce–Fe–Zr, увеличение механических свойств при комнатной температуре

Study of properties and characteristics of aluminum heat-resistant alloy Al–7Ce–0.7Fe–0.7Zr

Ibatullin Radmir Vadimovich

radmir.ibatullin.engineer@gmail.com

Puchkov Yuri Alexandrovich(*)

putchkov_bmstu@mail.ru

BMSTU, Moscow, Russia

Abstract. The corrosion and mechanical properties at room temperature of an aluminum powder material from an alloy of the Al–Ce–Fe–Zr system obtained by layer-by-layer synthesis have been studied. It has been revealed that the new alloy has corrosion properties comparable to those of the Al–Si–Mg system. It has been established that the material has a dispersed structure inside the tracks after SLP (Selective Laser Melting). After annealing, the formation of a dendritic columnar grain structure is observed. The formation of inclusions in the dendritic space after heat treatment was revealed. A decrease in hardness after annealing was found due to the alloy acquiring a more stable matrix structure. The tracks range in width from 100 to 150 μm , and the height ranges from 40 to 50 μm . A decrease in corrosion properties after annealing was noted.

Keywords: additive technologies, SLM technologies, powder materials, heat-resistant aluminum alloys, alloying of REM and TM, alloy Al–Ce–Fe–Zr system, increase in mechanical properties at room temperature

Введение. Сплавы системы Al–Ce обладают повышенной термостабильностью [1–4]. Однако при комнатных температурах фаза $\text{Al}_{11}\text{Ce}_3$ оказывает незначительный упрочняющий эффект.

Для измельчения фазы $Al_{11}Ce$ и повышения механических и физических характеристик предлагается легирование переходными металлами, в частности такими как Fe и Zr [2, 4, 5]. При введении Fe наблюдается фазы $Al_{10}Ce_2Fe$, вызывающий увеличение прочности и пластичности [5]. Введение в сплав железа позволяет использовать при его выплавке не находящий применения алюминиевый скраб, с повышенным содержанием железа [5]. Среди редкоземельных металлов церий имеет наименьшую стоимость. Поэтому сплавы системы Al–Ce–Fe–Zr являются перспективными, но их структура, механические и коррозионные свойства изучены недостаточно.

Целью работы — изучение структуры, твердости и коррозионных свойств СЛП-сплава Al–7Ce–0,7Fe–0,1Zr (% масс).

Материалы и методы исследования. Алюминиевые образцы из сплава Al–7Ce–0,7Fe–0,1Zr, выращенные методом селективного лазерного плавления (СЛП). Часть образцов была отожжена. После СЛП и отжига образцы были распилены на пластины $20 \times 20 \times 4$ мм на станке Discotom-100.

Твердость представлена в шкале Роквелла (HRB).

Для анализа микроструктуры шлифы травили в реактиве Келлера (водный раствор 1,5 % HCl, 2,5 % HNO_3 , 0,5 % HF) и исследовали на световом микроскопе Olympus GX1.

Коррозионные исследования проводили с применением потенциостата IPC-Pro-MF. Исследования проводились в 0,02 %-ном растворе NaCl в дистиллированной воде. В качестве электрода сравнения использовался хлорсеребряный электрод, в качестве вспомогательного платиновый. Поляризационные диаграммы снимали с поверхности площадью $1,8 \text{ см}^2$. Показатели общей коррозии рассчитаны методом поляризационного сопротивления.

Фазовый состав был изучен с помощью дифрактометра «Дрон–4–07», полученные данные обработаны с помощью программы “Match!”.

Результаты. На шлифе видны границы сварочных ванн полукруглой формы (рис. 1, а, б). Ширина треков составляет 100–150 мкм, а высота колеблется в пределах 40–50 мкм. После отжига (рис. 1, в, г) в междендритном пространстве выделились дисперсные выделения интерметаллидов.

На каждом из образцов значения твердости были сняты пятикратно, и взято среднее арифметическое. У образцов исходного состояния твердость выше на тридцать единиц по школе Роквелла (табл. 1). В табл. 1 приведены значения твердости после СЛП и отжига в различных плоскостях. Отжиг снижает твердость образцов с 100 до 71 HRB.

Таблица 1

Твердость алюминиевых образцов

Состояние	Плоскость	Номер образца	Значения по Бринеллю (НВ)
Исходное	ZX	1	103
	XY	2	100
Отожженное	ZX	3	71
	XY	4	71

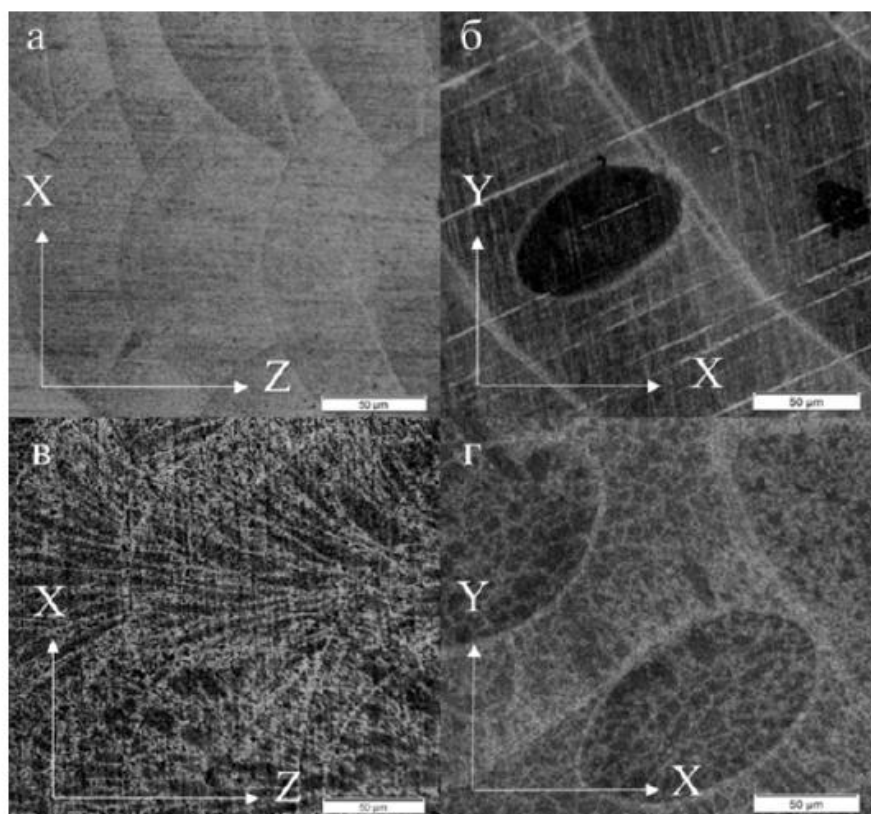


Рис. 1. Микроструктура СЛП сплавов:

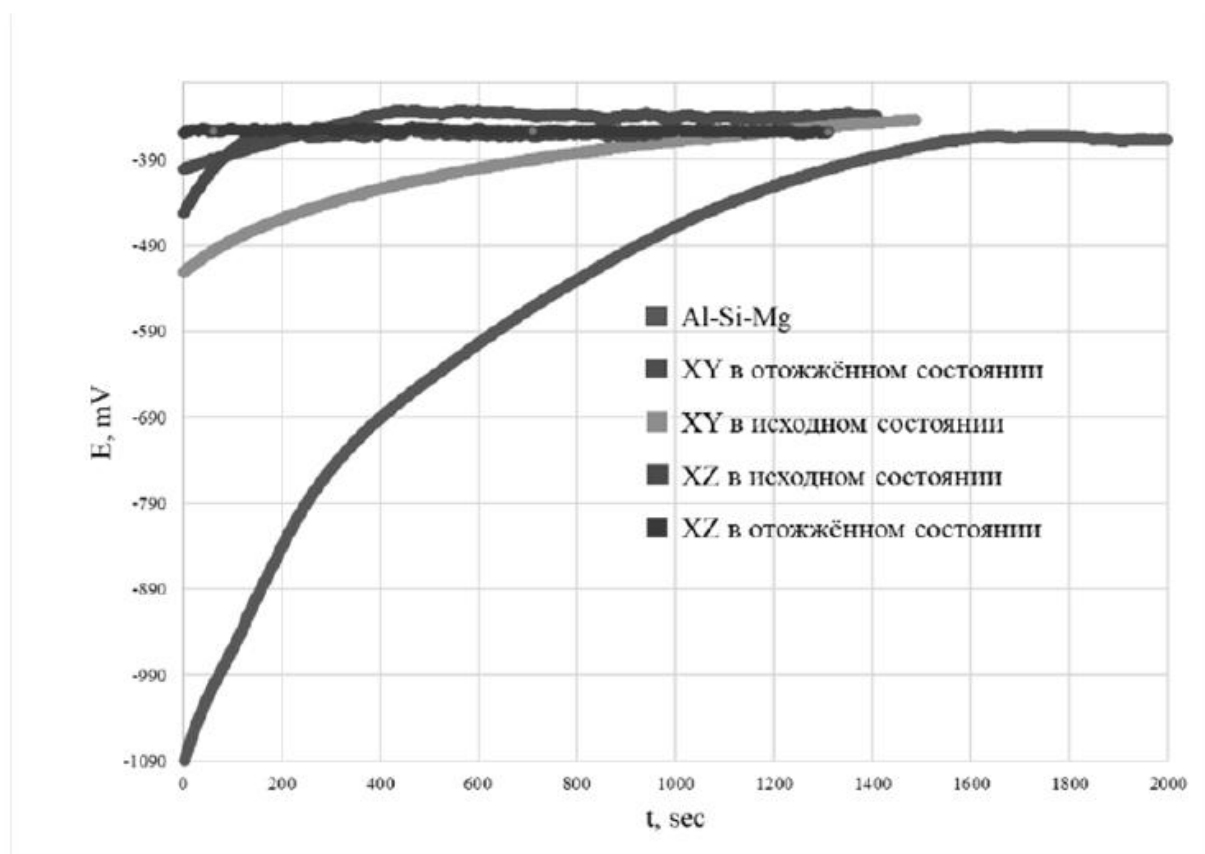
а — плоскость XZ, исходное состояние; б — плоскость XY, исходное состояние;
в — плоскость XZ, отожженное состояние; г — плоскость XY, отожженное состояние; ($\times 500$)

В исходном состоянии наблюдается анизотропия коррозионных свойств, по стойкости к общей коррозии сплав Al–7Ce–0,7Fe–0,1Zr не уступает СЛП сплавам системы Al–Si–Mg (рис. 2). Отжиг снижает коррозионную стойкость.

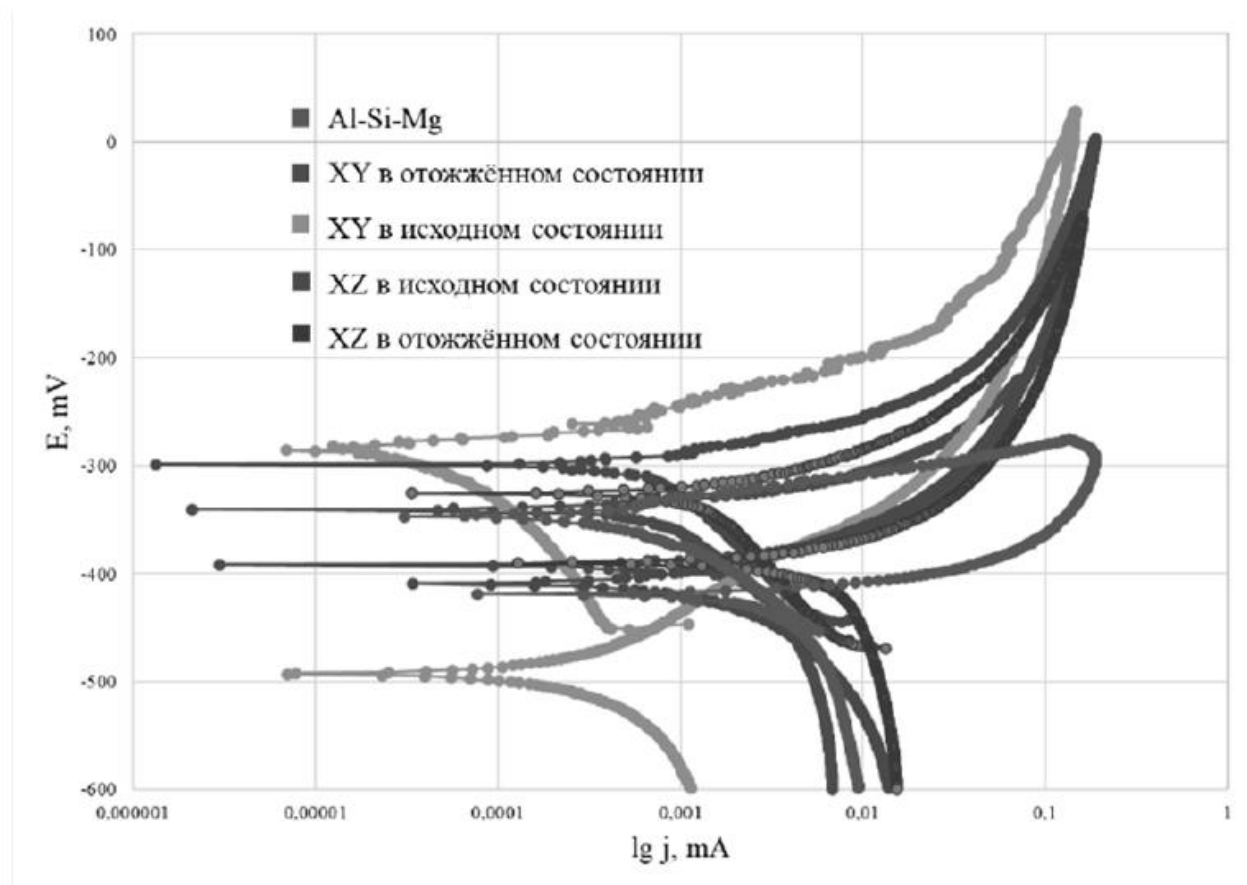
Таблица 2

Коррозионные характеристики образцов

Коррозионные характеристики	Al–7Ce–0,7Fe–0,1Zr				AlSi ₁₀ Mg
	Исходное состояние		Отожженное остояние		
	XZ (1)	XY (2)	XY (3)	XZ (4)	–
Линейный показатель коррозии K _П , мкм/год	8,97	0,6	10,5	17,2	7,18
Группа стойкости к коррозии	Весьма стойк	Совершен но стойк	Стойк	Стойк	Весьма стойк
Балл коррозии	Балл 3	Балл 1	Балл 4	Балл 4	Балл 3
Потенциал коррозии E _{кор} (мВ)	–409,22	–493,23	–391,7	–390	–360
Плотность тока корро- зии j _{кор} (А/см ²)	0,8	0,05	1,0	1,6	0,5



а



б

Рис. 2. Зависимость $E(t)$ (а) и $E(j)$ (б) образцов СЛП сплавов состава Al–7Ce–0,7Fe–0,7Zr

Обсуждение полученных результатов. В результате быстрых скоростей охлаждения сварочной ванны образуется мелкодисперсная структура сплава.

На рис. 1, в, г видны столбчатые дендриты, на границах которых выделились тугоплавкие интерметаллиды $Al_{11}Ce_3$ — аномально пересыщенный твердый раствор распался с выделением дисперсных (порядка 0,05–0,1 мкм) интерметаллидных фаз церия в сплаве и коагуляции первичных и эвтектических выделений [7, 8].

В связи с получаемой сплавом более устойчивой структурного состояния сплава твердость упала на тридцать единиц по шкале Роквелла.

Сплав системы Al–Ce–Fe–Zr на два балла более стоек к общей коррозии, чем силуминовый сплав. После отжига коррозионные свойства сплава Al–7Ce–0,7Fe–0,1Zr ухудшаются в связи с распадом сплава, и выпадением интерметаллидов.

Заключение. Размер треков достигает в ширину от 100 до 150 мкм, а высота колеблется в пределах от 40 до 50 мкм. Отмечено снижение коррозионных свойств после отжига. Поры критического размера (> 15 мкм) и пережоги не выявлены.

Железо в размере 0,7 % и цирконий в размере 0,1 % не оказывают негативного влияния на коррозионные свойства алюминиевого сплава с содержанием Ce в размере семи процентов. Значение твердости материала из сплава системы Al–Ce–Fe–Zr сопоставима с твердостью силуминов после наплавки методом СЛП, и составляет HRB 100.

В результате отжига перенасыщенный сплав распадается с выделением интерметаллидов на границах фаз, что сказывается на твердости и коррозионных свойствах сплава.

Показано, что сплав Al–7Ce–0,7Fe–0,1Zr лучше на два балла по стойкости к общей коррозии.

Анализируя полученные данные, можно сказать, что сплав Al–7Ce–0,7Fe–0,1Zr, изготовленный методом СЛП, имеет хорошие коррозионные и свойства при комнатной температуре, и сопоставим по твердости с силуминами после СЛП.

Список источников

- [1] Белов Н.А., Золоторевский В.С. Особенности микроструктуры и фазовый состав литейных сплавов системы Al–Ce–Fe–Ni–Zr. *Российский химический журнал (ЖРХО им. Д.И. Менделеева)*, 2001, т. XLV, № 5–6, с. 15–22.
- [2] Weiss D. Improved High-Temperature Aluminum Alloys Containing Cerium. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2019, vol. 28, pp. 1903–1908. <https://doi.org/10.1007/s11665-019-3884-2>
- [3] Qin G., Lv X., Li K. et al. Excellent mechanical properties and corrosion resistance of Al–Ce–Zr alloys. *Scientific reports*, 2025, vol. 15, art. no. 21965. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-04817-4>
- [4] Weiss D. High-Performance Aluminum Castings Containing Rare Earth Elements. *Rare Earth Metals and Minerals Industries*, 2024, pp. 343–357. <https://doi.org/10.1007/978-3-031-31867-2>

-
- [5] Moodispaw M.P., Cinkilic E., Miao J. et al. The Beneficial Effect of Iron in Aluminum-Cerium-Based Cast Alloys. *Metall Mater Trans A*, 2024, vol. 55, pp. 1351–1362. <https://doi.org/10.1007/s11661-024-07333-8>
- [6] Chernyshikhin S.V., Dzidziguri E.L. Fedorenko, L.V. et al. Structure and Mechanical Properties of Al–Ce–Fe Alloy Synthesized by LPBF Method. *Metals and Materials International*, 2024, vol. 30, pp. 3184–3201. <https://doi.org/10.1007/s12540-024-01698-6>
- [7] Бондарев Б.И., Шмаков Ю.В. *Технология производства быстрозакристаллизованных алюминиевых сплавов*. Москва, ВИЛС, 1997, 237 с.
- [8] Добаткин В.И., Елагин В.И., Федоров В.М. *Быстрозакристаллизованные алюминиевые сплавы*. Москва, ВИЛС, 1995, 341 с.