

СИНТЕЗ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА СИСТЕМЫ AlMg_4Sc МЕТОДОМ СЕЛЕКТИВНОГО ЛАЗЕРНОГО СПЛАВЛЕНИЯ

Зотов Борис Олегович, инженер научного проекта
Федоренко Леонид Владимирович, младший научный сотрудник
Егоров Владимир Юрьевич, инженер научного проекта
Чернышихин Станислав Викторович, заведующий лабораторией
E-mail: 1601924@edu.misis.ru

Университет науки и технологий МИСИС
г. Москва, РФ

Аннотация. В данной работе исследовано влияние технологических параметров на качество получаемых образцов сплава AlMg_4Sc методом селективного лазерного плавления. Выявлено оптимальное технологическое окно параметров процесса, при котором относительная плотность образцов достигает 99,8 %. Структура полученных образцов сплава AlMg_4Sc характеризуется наличием ванн расплава с мелкозернистой структурой, образующейся в результате высокой скорости охлаждения при кристаллизации.

Ключевые слова. Аддитивные технологии, селективное лазерное плавление, алюминиевые сплавы, Al-Mg-Sc.

Алюминиевые сплавы находят широкое применение в различных областях промышленности, таких как автомобильная, аэрокосмическая, железнодорожная и другие, благодаря универсальному сочетанию свойств алюминия, а именно высоким коррозионной стойкости, удельной прочности и плотности. Другим важным фактором распространения алюминиевых сплавов является развитие аддитивных технологий (АТ), что позволяет создавать детали со сложной геометрической формой и тонкими стенками. Наибольший интерес в качестве материала для АТ получили сплавы на основе Al-Si. Особое внимание получил сплав $\text{AlSi}_{10}\text{Mg}$. Однако применение последнего в особо ответственных изделиях ограничено недостаточным уровнем механических свойств: его предел прочности составляет около 400 МПа. В связи с вышесказанным поиск новых сплавов с улучшенными механическими свойствами является актуальной задачей.

Одним из перспективных семейств алюминиевых сплавов в АТ является Al-Sc. Легирование скандием позволяет улучшить прочностные свойства за счет образования упрочняющей фазы Al_3Sc , которая обладает близкими по значению параметрами решетки, что и матрица $\alpha\text{-Al}$. Такие параметры решетки приводят к более интенсивному зародышеобразованию $\alpha\text{-Al}$, что ведет к подавлению эпитаксиального роста столбчатых структур.

Поскольку скандий является относительно дорогим элементом, в данной работе рассматривается сплав AlMg_4Sc с содержанием скандия 0,3 масс. %. Распределение размеров частиц порошка которого лежало в диапазоне от 20 до 60 мкм. Форма частиц преимущественно сферическая, что положительно влияет на процесс селективного лазерного плавления (СЛП). Исследуемый сплав имеет следующий химический состав (масс. %): Mg 4,3; Sc 0,3; Fe и Mn 0,5; Al ост.

Процесс СЛП производился на установке AddSol D50, технические параметры которой указаны в табл. 1. 3D принтер оснащен иттербиевым волоконным лазером, а печать производится в инертной среде аргона с содержанием кислорода до 0,001 %. Для поиска технологического окна печати AlMg_4Sc были выбраны следующие режимы: мощность лазера – 300 Вт; скорость сканирования лазера – 300–750 мм/с; расстояние штриховки – 60–120 мкм; толщина слоя – 20 мкм.

Технические характеристики установки СЛП AddSol D50

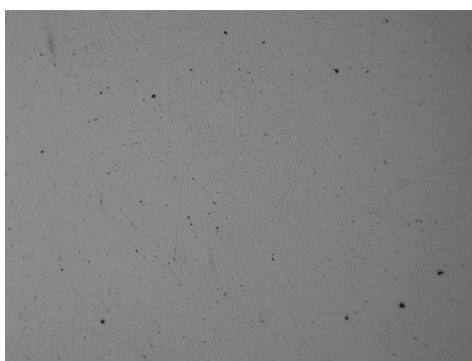
Параметр	Значение
Мощность лазера, Вт	50–400
Скорость сканирования, мм/с	100-1500
Размер фокусного пятна лазера, мкм	80
Диаметр области построения, мм	50
Высота области построения, мм	150
Длина волны лазера, мкм	1070

Представленные режимы позволяют в полной мере варьировать значения объемной плотности энергии, рассчитываемой по следующей формуле:

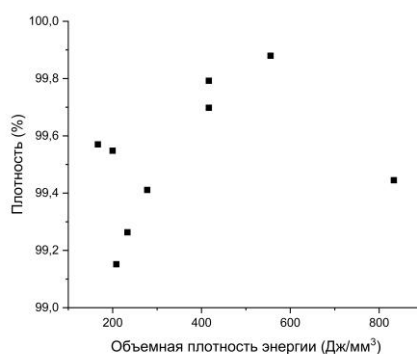
$$ED_v = \frac{P}{v \cdot h \cdot t} \quad (1)$$

где P – мощность лазера, v – скорость сканирования, h – расстояние штриховки, t – толщина слоя.

Таким образом, объемная плотность энергии варьировалась от 160 до 800 Дж/мм³. Образцы, полученные в результате синтеза, были исследованы при помощи оптической микроскопии. Микрофотография поверхности сплава AlMg₄Sc представлена на рис. 1.

Рис. 1. Микрофотография поверхности образца сплава AlMg₄Sc

По результатам металлографического анализа можно установить, что высокие плотности энергии приводят к уменьшению относительной плотности образцов, что вероятно связано с образованием слишком глубокой ванны расплава в процессе СЛП и, следовательно, с появлением дефектов по типу «замочная скважина». На рис. 2 представлена зависимость плотности образцов от объемной плотности энергии.

Рис. 2. Зависимость объемной плотности энергии от относительной плотности образцов AlMg₄Sc

В свою очередь низкая плотность энергии может приводить к дефектам недостаточного переплавления порошкового слоя с предыдущими слоями, что также вызывает несплошности в структуре (рис. 3). Анализируя полученную зависимость, можно установить, что оптимальная плотность энергии для обеспечения относительной плотности сплава AlMg₄Sc более 99,8 % лежит в диапазоне 230–280 Дж/мм³.

Для проявления микроструктуры исследуемые образцы предварительно были протравлены раствором Келлера и рассмотрены на оптическое микроскопии (рис. 3). Характерные области представляют собой следы от кристаллизации ванны расплава, появляющиеся в процессе СЛП по направлению печати (рис. 3, б). В горизонтальном же направлении отчетливо проявляются следы прохода лазера и границы ванн расплава (рис. 3, а), которые при кристаллизации образуют уникальную ультрамелкозернистую структуру, по причине быстрого охлаждения, что положительно сказывается на механических свойствах сплава. Исходя из закона Хола-Пэтча, такая ультрамелкодисперсная структура должна приводить к повышенным значениям показателей прочности.

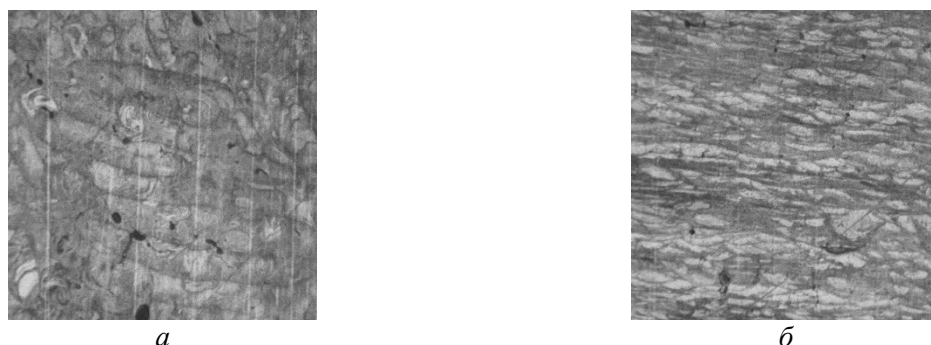


Рис. 3. Характерные дефекты сплава AlMg₄Sc, полученные методом СЛП:
а – вид сверху; б – вид сбоку

Таким образом, можно сделать следующие выводы. Было исследовано влияние технологических параметров процесса СЛП на качество напечатанных изделий. Установлен оптимальный диапазон значений объемной плотности энергии, при котором пористость образцов не превышала 0,2 %. Так, объемная энергия 250 Дж/мм³ соответствует следующим параметрам печати: скорость сканирования – 700 мм/с; мощность лазера – 350 Вт; толщина слоя – 0,2 мм; расстояние штриховки – 0,1 мм. В будущей работе планируется исследование механических свойств сплава AlMg₄Sc, изготовленного методом СЛП.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 19-79-30025, <https://rscf.ru/project/19-79-30025/>

Библиографический список

1. Aversa, A. New Aluminum Alloys Specifically Designed for Laser Powder Bed Fusion: A Review / A.Aversa [et al.] // Materials. – 2019. – Vol. 12. – № 7. – P. 1007.
2. Aboulkhair, N. T. 3D printing of Aluminium alloys: Additive Manufacturing of Aluminium alloys using selective laser melting / N. T. Aboulkhair [et al.] // Prog Mater Sci. – 2019. – Vol. 106. – P. 100578.
3. Schimbäck, D. Alloy design strategy for microstructural-tailored scandium-modified aluminium alloys for additive manufacturing / D. Schimbäck [et al.] // Scr Mater. – 2022. – Vol. 207. – P. 114277.
4. Lu, Y. Microstructural Evaluation and Tensile Properties of Al-Mg-Sc-Zr Alloys Prepared by LPBF / Y. Lu // Crystals (Basel). – 2023. – Vol. 13. – № 6. – P. 913.