

УДК 004.65

МИКРОДУГОВОЕ ОКСИДИРОВАНИЕ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА ПОСЛЕ 3D ПЕЧАТИ

С. К. КИСЕЛЕВА¹, Н. Ю. ДУДАРЕВА², А. Р. АРСЛАНОВ³

¹kiseleva.sk@ugatu.su, ²dudareva.nyu@ugatu.su, ³og_as_car@mail.ru

¹⁻³ ФГБОУ ВО «Уфимский университет науки и технологий» (УУНИТ)

Поступила в редакцию 24.04.2023

Аннотация. В рамках данной работы рассматривается влияние структуры, полученной в результате лазерного селективного плавления на качество упрочненного слоя, сформированного методом микродугового оксидирования. Показано, что методом МДО можно сформировать качественное покрытие на образцах детали из алюминиевого сплава АК9 после 3D печати.

Ключевые слова: алюминиевые сплавы, микродуговое оксидирование, аддитивные технологии, пористость, микротвердость.

ВВЕДЕНИЕ

От большинства деталей механизмов и машин требуется сочетание высокой удельной прочности, износостойкости и коррозионной стойкости. Таким требованиям, как известно, отвечают детали из алюминиевых сплавов с керамическими покрытиями, формируемыми методом микродугового оксидирования (МДО). МДО покрытия обладают высокой микротвердостью, коррозионной стойкостью, теплостойкостью и износостойкостью.

В последнее время для изготовления деталей из алюминиевых сплавов все чаще применяются аддитивные технологии 3D печати. Несмотря на значительную востребованность, технологию 3D печати для алюминиевых сплавов удалось отработать относительно недавно, и сейчас это направление активно развивается.

Наибольшую популярность приобрела технология 3D печати по методу SLM (селективного лазерного плавления). В последние годы (7–10 лет) появились научные исследования, направленные на изучение структуры Al сплавов, формируемых методом SLM [1, 2]. Материал таких деталей характеризуется мелкозернистой однородной структурой.

Как известно, структура сплава оказывает влияние на толщину, пористость, микротвердость и коррозионную стойкость МДО-покрытий [3, 4]. Установлено, что мелкозернистая структура алюминиевого сплава, прошедшего обработку интенсивной пластической деформацией кручением (ИПДК), способствует формированию МДО-покрытий с повышенной микротвердостью и толщиной, но с низкой коррозионной стойкостью [5, 6]. Однако анализ литературы показал, что исследования о влиянии структуры материала деталей, полученных методом SLM, на свойства МДО-покрытий, на настоящий момент отсутствуют.

В связи с этим целью данной работы является исследование влияния структуры алюминиевого сплава образца, сформированного по аддитивной технологии 3D печати на структуру и свойства МДО-покрытий.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве материала исследования был выбран доэвтектический алюминиевый сплав АК9 (Al-8...11%Si – 1% Cu – 0,2...0,4% Mg – 0,2...0,5%Mn) после 3D-печати (ГОСТ 1583-93). Исходный образец представлял собой деталь, полученную методом 3D печати.

Обработке методом МДО подвергались образцы в виде круглых пластин, вырезанных из детали. Предварительной промывке и обезжириванию поверхность перед обработкой не подвергалась. МДО проводили в стандартном растворе жидкого стекла Na_2SiO_3 и гидроксида калия КОН. Температура электролита не превышала 52 °С. Процесс МДО по времени осуществляли до полного окончания искрения на обрабатываемой поверхности.

Микроструктуру алюминиевого сплава после 3D печати изучали с помощью оптического микроскопа «Olympus GX51». Параметры микроструктуры оценивали по стандартным методикам с вероятностной статистической ошибкой не более 5% [7].

Для оценки толщины покрытий проводили съемку изображений системы «сплав АК12Д-покрытие» с помощью растрового электронного микроскопа (РЭМ) «JEOL JSM 6490LV» при увеличении 300. Съемку вели в режиме обратных рассеянных электронов. Перед съемкой образцы заливали в жидкую эпоксидную смолу, и после отверждения проводили их установку в колонну микроскопа.

Просмотр и съемку пор в МДО-слоях также вели на растровом электронном микроскопе. Объемную долю пор определяли точечным методом наложением квадратной сетки на изображение структуры.

Твердость МДО-слоев по Виккерсу определяли на микротвердомере «Struers Duramin», для чего на подготовленные образцы накладывали нагрузку 100 граммов в течение 10 секунд.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

На рис. 1а представлена микроструктура образцов синтезированной детали из алюминиевого сплава АК9 после 3D печати. Микроструктура представляет собой так называемые треки – следы прохождения луча лазера. Средний поперечный размер треков составляет 85 ± 5 мкм, продольный – 97 ± 5 мкм. Внутреннее строение треков представляет собой ячейки, состоящие из твердого раствора на основе алюминия и равномерно распределенных частиц кремния волокнистого типа [8].



Рис. 1. Микроструктура сплава АК9 после 3D печати

После обработки поверхности образцов методом микродугового оксидирования были получены три образца с покрытиями. Внешний вид образцов со сформированными МДО-слоями представлен на рис. 2. Как видно, покрытия характеризуются однородным белым цветом. Один из трех образцов не был плотно прикреплен к проводу, и поэтому МДО-обработке не подвергся. В дальнейших исследованиях данный образец не использовали.

Толщина слоя, полученного в результате МДО, оказалась неоднородной по поверхности образцов (рис. 3). Средняя толщина МДО-слоя составила $t_{cp} = 155 \pm 8$ мкм.

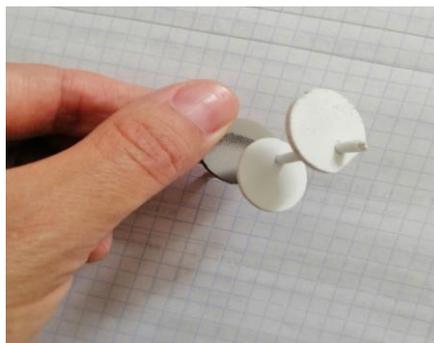


Рис. 2. Внешний вид образцов сплава АК9 после МДО обработки

МДО-покрытие получилось пористым. В структуре имеются небольшие круглые поры, цепочки пор, а также поры крупных размеров. Распределение пор неоднородное по толщине покрытия (рис. 3). Как известно [9], МДО-слой состоит из трех подслоев. Первый, так называемый технологический подслой, характеризуется повышенной шероховатостью и пористостью, а также невысокой твердостью и износостойкостью. Основной рабочий подслой содержит фазу $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ – корунд, который характеризуется пониженной пористостью и высокой твердостью. В зоне соединения металла и покрытия образуется так называемый переходный подслой.

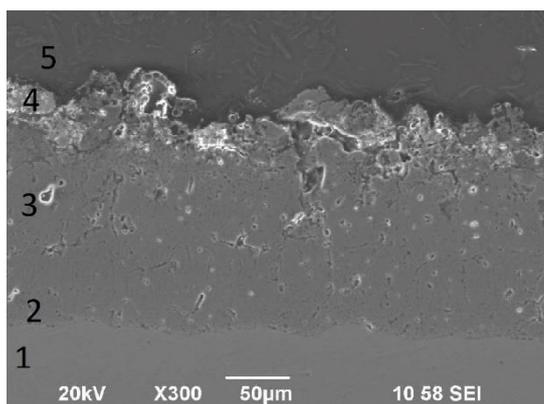


Рис. 3. Изображение МДО-слоя:

1 – металл; 2 – переходный подслой; 3 – основной подслой; 4 – технологический подслой;
5 – эпоксидная смола, РЭМ

Результаты качественного анализа изображения МДО-слоя, полученные в настоящей работе, подтверждают формирование аналогичных подслоев. В структуре отчетливо наблюдается образование переходного подслоя (область 2 на рис. 3), на всей протяженности которого отмечены округлые поры небольшого размера. Примыкающий к нему основной слой (область 3 на рис. 3) характеризуется неоднородным распределением пор. Технологический подслой (область 4 на рис. 3) состоит из большой объемной доли крупных пор.

Таблица 1

Микротвердость МДО-покрытия

Подслой	Переходный	Основной	Технологический
Микротвердость, HV	1000	1230	800

Распределение микротвердости по толщине покрытия неоднородно (табл. 1). Как видно, максимальное значение приходится на основной слой, который, как было отмечено выше, характеризуется пониженной пористостью. В целом общий характер распределения

пористости и микротвердости по толщине покрытия соответствует зависимостям, представленным ранее в литературе [5, 6, 8].

ВЫВОДЫ

- 1) В результате МДО-процесса было сформировано покрытие на образце детали из алюминиевого сплава АК9 после 3D печати.
- 2) Максимальное значение микротвердости приходится на основной слой МДО покрытия.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Schmidtke K., Palm F., Hawkinsb A., Emmelmann C. Process and Mechanical Properties: Applicability of a Scandium modified Al-alloy for Laser Additive Manufacturing // *Physics Procedia*. 2011. 12. 369-374.
2. Bartkowiak K., Ullricha S., Frickb Th., Schmidt M. New Developments of Laser Processing Aluminium Alloys via Additive Manufacturing Technique // *Physics Procedia*. 2011. 12. 393-401.
3. Kiseleva S.K., Zainullina L.I., Abramova M.M., Pinegina A. A., Dudareva N.Y. and Alexandrov I.V. Effect of Microstructure of Al-Si-alloy on the Quality of the Layer Formed with Micro-Arc Oxidation Method // *Journal of Engineering Science and Technology Review*. 2015. 8 (6). 6-9.
4. Кристал М. М., Рюмкин М. О. Влияние исходной структуры Al-Si сплавов на свойства, получаемых методом микродугового окисления оксидных слоев и торможение частицами кремния роста оксидного слоя // *Материаловедение*. 2008. №12. С. 50-61.
5. Dudareva N., Zaynullina L., Kiseleva S., Abramova M. The influence of alloy microstructure on corrosion resistance and other properties of coatings formed by microarc oxidation // *Materials Chemistry and Physics*. 2022. 288. 126379.
6. Киселева С. К., Зайнуллина Л. И., Абрамова М. М., Пинегина А. А., Дударева Н. Ю., Александров И. А. Влияние микроструктуры Al-Si-сплава на качество слоя, полученного методом микродугового окисления // *Вестник УГАТУ*. 2015. Т.19. №2 (68). С. 1-6.
7. Салтыков С. А. Стереометрическая металлография. М.: Металлургия, 1976. 271 с.
8. Liu X., Zhaoa C., Zhoub X., Shen Zh., Liu W. Microstructure of selective laser melted AlSi10Mg alloy // *Materials and Design* 2019. 168. 107677.
9. Тихоненко В. В., Шкилько А. М. Метод микродугового окисления // *Восточно-европейский журнал передовых технологий*. 2012. 2/13 (56). С. 13-18.

ОБ АВТОРАХ

КИСЕЛЕВА Светлана Камильевна, доц. каф. материаловедения и физики металлов. Дипл. инж.-м-вед (УГАТУ, 2000). Канд. техн. наук в области титановых сплавов (ИПСМ, 2007). Иссл. в обл. наноматериалов.

ДУДАРЕВА Наталья Юрьевна, доц. каф. двигателей внутреннего сгорания. Дипл. инж. по технол. машиностроения (УГАТУ, 1994). Канд. техн. наук в обл. тепловых двигателей (УГАТУ, 1999), доктор техн. наук в области нанотехнологий и наноматериалов (УГАТУ, 2019)

АРСЛАНОВ Аскар Рустемович, студент каф. материаловедения и физики металлов

METADATA

Title: Micro-arc oxidation of aluminum alloy after 3d printing

Authors: S.K. Kiseleva, N.Y. Dudareva, A.R. Arslanov

Affiliation:

¹ Ufa University of Science and Technology (UUST), Russia.

Email: ¹ kiseleva.sk@ugatu.su, ² dudareva.nyu@ugatu.su, ³ og_as_car@mail.ru

Language: Russian.

Source: Molodezhnyj Vestnik UGATU (scientific journal of Ufa University of Science and Technology), no. 3 (29), pp. 86-90, 2023. ISSN 2225-9309 (Print).

Abstract: The influence of the structure obtained as a result of selective laser melting on the quality of the hardened layer formed by the microarc oxidation method is considered in the framework of this work. It is shown that the MAO method can form a high-quality coating on samples of a part made of AK9 aluminum alloy after 3D printing.

Key words: aluminum alloys, microarc oxidation, additive technologies, porosity, microhardness

About authors:

KISELEVA, Svetlana Kamilevna, associate Professor of the Dep. of Materials Science and Physics of Metals. Dipl. Engineer (USATU, 2000). Cand. of Tech. Sc. (IMSP, 2007).

DUDAREVA, Natalya Yurievna, associate Professor of the Department of Internal Combustion Engines. Dipl. Eng. degree in mechanical engineering Technology, metalcutting machines and tools (USATU). Cand. of tech. sc. in the field of aluminum pistons (USATU, 1999), doctor of tech. sciences in the field of microarc oxidation (USATU, 2019).

ARSLANOV, Askar Rustemovich, student of the Dep. of Materials Science and Physics of Metals