

3. ЭКОРОС: официальный сайт. – Иваново. – URL: <https://usp68.ru/> (дата обращения: 01.012.2023). – Текст: электронный.
4. Аверьянова В. Перемешивающие устройства для лабораторий и производства / В. Аверьянова // Сырье и Упаковка. – Текст: электронный – 2011. – URL: <https://cosmetic-industry.com/peremeshivayushhie-ustrojstva-dlya-laboratorij-i-proizvodstva.html> (дата обращения: 21.03.2024).
5. АТК 24.201.17-90. Мешалки типы, параметры, конструкция, основные размеры и технические требования: дата введения 1991-01-01/ Разработки тяжелого машиностроения СССР. – Москва : Стандартиформ, 1990. – 34 с.
6. Hoefken Marcus About the Design of Mixing Systems or Anaerobic and Anoxic Basins for Large Wastewater Treatment Plants / Marcus Hoefken // Инженерный вестник. – 2019. – № 5. – С. 50–56.
7. Патент 2 683 078. РФ. Перемешивающее устройство: 06 06 2018 / Р.Ш. Абиев, А.Н. Григорьева.
8. Вулкан Пумпен: официальный сайт. – Санкт-Петербург. – URL: <https://vpumpen.ru/meshalki/giperbolicheskaya-meshalka> (дата обращения: 20.01.2024). – Текст: электронный.
9. Ziroth. This Genius Propeller Will Change Transport Forever: YouTube: видео. – URL: <https://www.youtube.com/watch?v=MGy8jvf-DZ0> (дата обращения: 01.012.2023).
10. Integrated WAAM-Subtractive Versus Pure Subtractive Manufacturing Approaches: An Energy Efficiency Comparison / G. Campatelli, F. Montecchi, G. Venturini, [et al.] // Int. J. of Precis. Eng. and Manuf.-Green Tech. 7, 1–11 (2020). – URL: <https://doi.org/10.1007/s40684-019-00071-y> (дата обращения: 01.012.2023). – Текст: электронный.

ВЛИЯНИЕ СОДЕРЖАНИЯ МАГНИЯ В АЛЮМИНИЕВОМ СПЛАВЕ НА ПОРИСТОСТЬ ОБРАЗЦА, ПОЛУЧЕННОГО МЕТОДОМ СЕЛЕКТИВНОГО ЛАЗЕРНОГО ПЛАВЛЕНИЯ

Н.А. Сапрыкина¹, к.т.н., доц., А.А. Сапрыкин¹, к.т.н., доц., В.В. Чебодаева², к.т.н.

¹Юргинский технологический институт (филиал) Томского политехнического университета, 652055, Кемеровская область, г.Юрга, Ул. Ленинградская, 26, тел. (38451) 7-77-61

*²Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук 634055, Томская область, г. Томск, Академический пр., 2/4
e-mail: saprikina@tpu.ru*

Аннотация: Технология селективного лазерного плавления позволяет получать образцы высокой плотности из металлических порошковых материалов за счет оптимизации условий процесса и высокой гибкости проектирования послойного изготовления изделий на основе трехмерных моделей автоматизированного проектирования. В данном исследовании образцы из подготовленной композиции порошков алюминия Al, кремния Si и магния Mg получены методом селективного лазерного плавления на следующих режимах: шаг сканирования $S = 0,08$ мм, мощность лазера $P = 90$ Вт, скорость сканирования лучом лазера $V = 225$ мм/с, толщина слоя $h = 0,025$ мм в следующих массовых соотношениях: AlSi8Mg3, AlSi8Mg5, AlSi8Mg10. Исследования показали влияние содержания магния на плотность структуры образца, полученного методом селективного лазерного плавления. Увеличение доли магния в смеси порошков от 3 до 10 % приводит к уплотнению структуры образца и уменьшению количества пор, равномерному распределению магния.

Abstract: Selective laser melting technology makes it possible to obtain high-density samples from metal powder materials by optimizing process conditions and high flexibility in designing layer-by-layer production of products based on three-dimensional computer-aided design models. In this study, samples from a prepared composition of aluminum Al, silicon Si and magnesium Mg powders were obtained by selective laser melting in the following modes: scanning step $S = 0.08$ mm, laser power $P = 90$ W, scanning speed with a laser beam $V = 225$ mm/s, layer thickness $h = 0.025$ mm in the following mass ratios: AlSi8Mg3, AlSi8Mg5, AlSi8Mg10. Studies have shown the influence of magnesium content on the density of the structure of a sample obtained by selective laser melting. Increasing the proportion of magnesium in the powder mixture from 3 to 10 % leads to compaction of the sample structure and a decrease in the number of pores, uniform distribution of magnesium.

Ключевые слова: селективное лазерное плавление (СЛП); сплавы на основе алюминия; аддитивное производство; магний.

Keywords: selective laser melting (SLM); aluminum alloys; additive manufacturing; magnesium.

Технология селективного лазерного плавления (СЛП) позволяет получать образцы высокой плотности из металлических порошковых материалов за счет оптимизации условий процесса и высокой гибкости проектирования послойного изготовления изделий на основе трехмерных (3D) моделей автоматизированного проектирования (САПР) [1]. С развитием этой технологии производственные процессы переходят от традиционных методов получения деталей к процессам аддитивных технологий в таких отраслях промышленности, как аэрокосмическая и медицинская. В литературе описано большое количество исследований по получению сплава и изделий на основе алюминия AlSi8Mg, изготовленного методом СЛП. Приведена оценка механических свойств, микроструктуры [2–5], описана характеристика структуры в зависимости от стратегии сканирования, рассмот-

рена корреляции между механическими свойствами образцов SLM, подвергнутых условиям термообработки [6, 75]. Однако имеется мало сообщений о влиянии содержания магния на плотность структуры образца и распределение магния в образце, полученном методом селективного лазерного плавления.

В данном исследовании образцы из подготовленной композиции порошков алюминия Al, кремния Si и магния Mg [8, 9] получены методом СЛП на следующих режимах: шаг сканирования $S = 0,08$ мм, мощность лазера $P = 90$ Вт, скорость сканирования лучом лазера $V = 225$ мм/с, толщина слоя $h = 0,025$ мм в следующих массовых соотношениях: AlSi8Mg3, AlSi8Mg5, AlSi8Mg10. Исследования плотности структуры образца проведены на растровом электронном микроскопе LEO EVO в ЦКП «Нанотех» ИФПМ СО РАН. Условия съемки: ускоряющее напряжение – 20 кВ, ток пучка – 1,5-2,2 нА, фокусное расстояние 8,5–9 мм, увеличение – 100–2000. Исследование элементного состава поверхности образца проводили на приставке к микроскопу для энергодисперсионного анализа Oxford Instruments INCA350.

На рисунке 1 приведены растровые электронные изображения (РЭМ), полученные в результате съемки образца при увеличениях 500 и 1000.

Образцы, полученные при массовых соотношениях магния AlSi8Mg3, AlSi8Mg5 характеризуются наличием многочисленных пор и плотной структуры между порами (рис. 1, а–г).

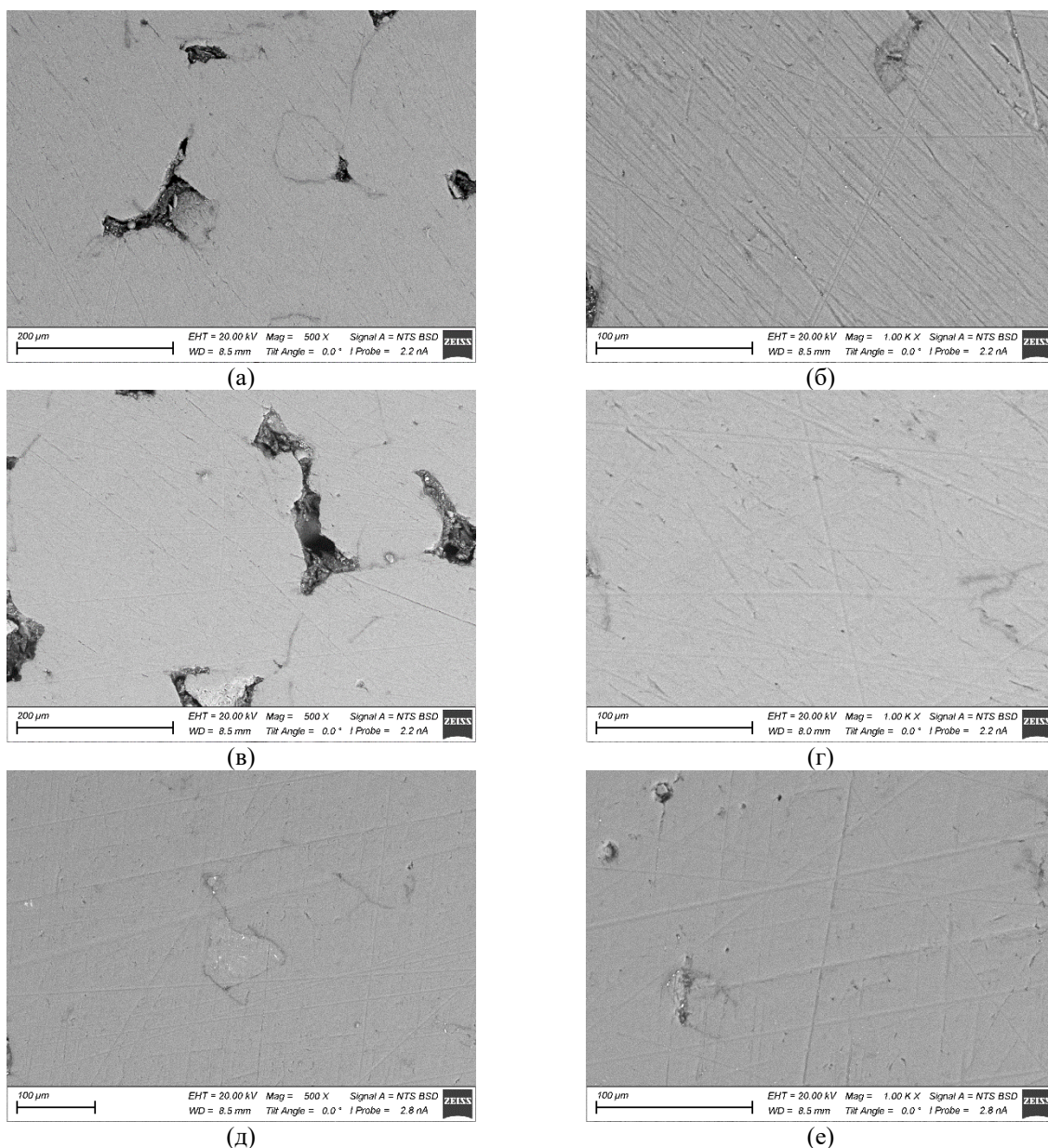
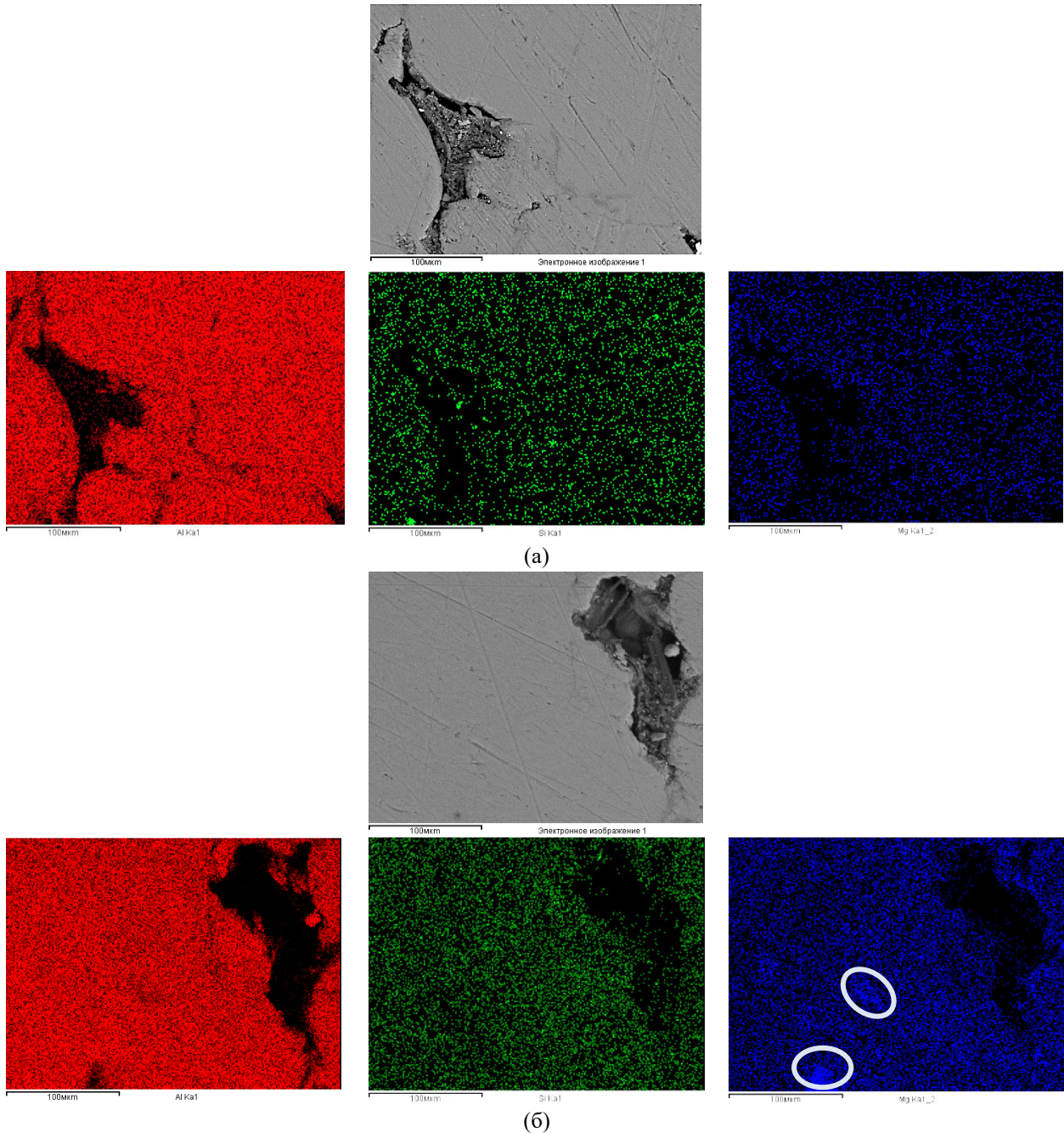


Рис. 1. РЭМ-изображения образцов, полученных при разных массовых соотношениях элементов Al, Si, Mg:
а, б – AlSi8Mg3, в, г – AlSi8Mg5, д, е – AlSi8Mg10

Увеличением доли порошка магния до 10 % приводит к уплотнению структуры образца и уменьшению количества пор на поверхности образца (рис. 1, д, е).

На рисунке 2 приведены РЭМ-изображения и карты распределения элементов (Al, Mg, Si) образцов, полученных при разных массовых соотношениях. Алюминий и кремний во всех образцах распределены равномерно и однородно (рис. 2). При этом в образце с 5% порошка магния на поверхности наблюдаются области высокой концентрации магния (рис. 2, б). С повышением доли порошка магния распределение магния в образце становится более однородным (рис. 2, в).



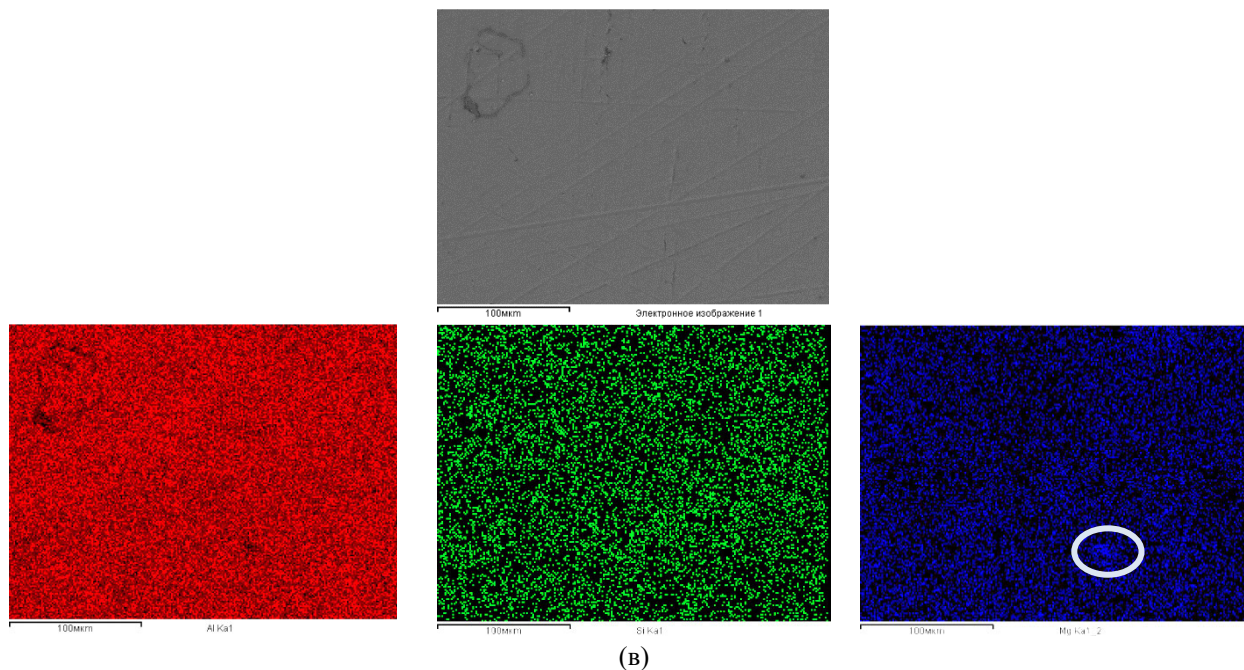


Рис. 2. РЭМ-изображения и карты распределения элементов (Al, Mg, Si) образцов, полученных при разных массовых соотношениях: а – AlSi8Mg3, б – AlSi8Mg3, в – AlSi8Mg3

Результаты проведенных исследований наглядно показывают влияние содержания магния на плотность структуры образца, полученного методом селективного лазерного плавления. Увеличение доли магния в смеси порошков от 3 до 10 % приводит к уплотнению структуры образца и уменьшению количества пор, равномерному распределению магния.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-29-01491, <https://rscf.ru/project/22-29-01491/>.

Список использованных источников:

1. Herzog D. Additive manufacturing of metals / D. Herzog, V. Seyda, E. Wycsick, C. Emmelmann // *Acta Mater*, 2016. – P. 371–392.
2. Manfredi D. From powders to dense metal parts: characterization of a commercial AlSiMg alloy processed through direct metal laser sintering / D. Manfredi, F. Calignano, M. Krishnan, R. Canali, E.P. Ambrosio, E. Atzeni // *Materials*, 2013. – P. 856–869.
3. Rosenthal I. Microstructure and mechanical properties of AlSi10Mg parts produced by the laser beam additive manufacturing (AM) technology / I. Rosenthal, A. Stern, N. Frage // *Metallogr. Microstruct. Anal.*, 2014. – P. 448–453.
4. Zaretsky E. Dynamic response of AlSi10Mg alloy fabricated by selective laser melting / E. Zaretsky, A. Stern, N. Frage // *Mater. Sci. Eng. A*, 2017. – P. 364–370.
5. Trevisan F. On the selective laser melting (SLM) of the AlSi10Mg alloy: process, microstructure, and mechanical properties / F. Trevisan, F. Calignano, M. Lorusso, J. Pakkanen, A. Aversa, E.P. Ambrosio, M. Lombardi, P. Fino // *Materials*, 2017. – P. 76–99.
6. Thijs L. Fine-structured aluminium products with controllable texture by selective laser melting of pre-alloyed Al-Si10Mg powder / L. Thijs, K. Kempen, J.P. Kruth, J.V. Humbeeck // *Acta Mater.*, 2013. – P. 1809–1819.
7. Wu J. Microstructure and strength of selectively laser melted AlSi10Mg / J. Wu, X.Q. Wang, W. Wang, M.M. Attallah, M.H. Loretto // *Acta Mater*, 2016. – P. 311–320.
8. Saprykina N. Synthesis of a three-component aluminum-based alloy by selective laser melting / N. Saprykina, V. Chebodaeva, A. Saprykin, Y.P. Sharkeev, E. Ibragimov, T. Guseva // *Obrabotka Metallov*, 2022. – P. 151–164. – DOI: 10.17212/1994-6309-2022-24.4-151-164.
9. Saprykina N. Optimization of selective laser melting modes of powder composition of the AlSiMg system / N. Saprykina, V. Chebodaeva, A. Saprykin, Y.P. Sharkeev, E. Ibragimov, T. Guseva // *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2024. – P. 22–37. – DOI: 10.17212/1994-6309-2024-26.1-22-37.