

**ИССЛЕДОВАНИЕ МОРФОЛОГИИ И ФАЗОВОГО СОСТАВА
ПОРОШКОВ АЛЮМИНИЯ, КРЕМНИЯ И МАГНИЯ**

Н.А. Сапрыкина^{1а}, к.т.н., доц., А.А. Сапрыкин¹, к.т.н., доц., В.В. Чебодаева², к.т.н.

¹Юргинский технологический институт (филиал)

*Национального исследовательского Томского политехнического университета
652055, Кемеровская область, г. Юрга, ул. Ленинградская, 26*

*²Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук
634055, Томская область, г. Томск, Академический пр., 2/4*

E-mail: ^аsaprikina@tpu.ru

Аннотация: В статье приведены характеристики исходных порошков алюминия, кремния и магния для создания сплава Al-Si-Mg методом селективного лазерного плавления. Описаны результаты исследований морфологии поверхности частиц порошков, идентификации фаз.

Ключевые слова: селективное лазерное плавление (SLM); металлические порошки; аддитивное производство; морфология поверхности, идентификация фаз.

Abstract: The article presents the characteristics of the initial powders of aluminum, silicon and magnesium for the creation of the Al-Si-Mg alloy by selective laser melting. The results of studies of the morphology of the surface of powder particles and phase identification are described.

Keywords: selective laser melting (SLM); metal powders; additive manufacturing; surface morphology, phase identification.

В последние годы многие исследования сосредоточены на оптимизации режимов селективного лазерного плавления порошковых металлических сплавов, преимущественно имеющих сферическую форму.

Не изученным остается вопрос формирования сплава в процессе СЛП из металлических порошковых материалов, имеющих форму, отличную от сферической [1]. Характеристики порошка меняют свойства, как на стадии подготовки порошковой композиции, так и в процессе СЛП от воздействий окружающей среды, механического и теплового воздействия. Все это влияет на качество получаемых изделий [2–4]. Для определения оптимальных режимов СЛП необходимо знать распределение частиц порошка по размеру и химическому составу поверхностного слоя частиц-порошинок. Загрязнение порошков является основной проблемой в СЛП процессе, особенно при обработке высокореактивного компонента, как магний, титан и алюминий, и их сплавы. Длительное нахождение порошков на воздухе приводит к их окислению и как следствие, к нестабильному процессу СЛП [57]. Оксидные пленки препятствуют смачиванию поверхности порошинок и являются причиной возникновения пористости. Следовательно, для понимания процесса образования сплава в процессе СЛП необходимо знать исходные данные порошков, которые существенно влияют на качество получаемых изделий.

Исходным материалом для создания порошковой композиции Al-Si-Mg использовали несферические порошки алюминия, кремния и магния. Были приобретены: алюминиевый порошок ПА-4, изготовленный по ГОСТ 6058–73, порошок кремния ГОСТ 2169–69 и магниевый порошок МПФ-4 ГОСТ 6001–79. Порошки имеют различие в температурах плавления, плотности, теплопроводности и др. Температура плавления алюминия (660 °С), кремния (1414 °С) и магния (650 °С), плотность (у алюминия 2,7 г/см³, у кремния 2,35 г/см³, магния 1,74 г/см³). При этом теплоемкости алюминия, кремния, магния близки друг к другу. Молярная теплоемкость алюминия – 24,35 Дж/(К•моль), кремния – 20,16 Дж/(К•моль), магния – 24,9 Дж/(К•моль) теплопроводность при комнатной температуре алюминия – 237 Вт/(м•К), кремния – 149 Вт/(м•К), магния – 156 Вт/(м•К). Приобретен особо чистый Аргон 5.0 для формирования порошковой композиции в шаровой мельнице и изготовления модельных образцов методом селективного лазерного плавления. Для получения порошковой композиции методом механического легирования изготовлена шаровая мельница [8].

Морфология поверхности частиц порошка исследована на растровом электронном микроскопе LEO EVO 50 XVP в ЦКП «Нанотех» ИФПМ СО РАН. Условия съемки: ускоряющее напряжение – 20 кВ, ток пучка – 1–2 нА, фокусное расстояние 8,5–10 мм, увеличение x100–2000. Элементный состав поверхности образца проведен на приставке к микроскопу для энергодисперсионного анализа Oxford Instruments INCA350. Порошок алюминия представляет собой конгломераты из частиц неправильной формы с размерами 1–20 мкм и более крупных частиц размерами 30–140 мкм (рис. 1 а, б).

Порошок магния представлял собой смесь отдельных частиц с «чешуйчатой» структурой, имеющих размеры в диапазоне 30–400 мкм (рис. 1 в, г), у частиц была неправильная форма с грубой текстурой поверхности, что приводит к снижению сыпучести. Элементный состав порошка соответствует магнию при наличии кислорода не более 2 мас. %.

Порошок кремния состоял из конгломератов размером 0,5–45 мкм (рис. 1 д, е). Доля крупных конгломератов в порошке не превышала 15 об. %.

Исследования методом рентгеновской дифракции осуществлялись на рентгеновском дифрактометре ДРОН-7 (Буревестник, Россия) в CoK_α -излучении ($\lambda = 0,1789$ нм). Напряжение, подаваемое на рентгеновскую трубку, составило 35 кВ, сила тока – 22 мА. Съемка осуществлялась в симметричной геометрии по схеме Брегга-Брентано (2θ - 2θ) в угловом диапазоне 2θ 10–165° с шагом сканирования 0,05°, с вращением образца. Время экспозиции в каждой точке составляло 5 с. Для проведения исследований методом рентгеновской дифракции, в связи с вертикальной фиксацией образца на гониометре дифрактометра, порошинки склеивались прозрачным цапонлаком в форме из винипласта.

На рисунках 2–4 приведены рентгеновские дифрактограммы от с образцов порошков магния, алюминия и кремния соответственно выполненной идентификацией фаз. Фазовые составы соответствуют чистым элементам Al, Si, Mg.

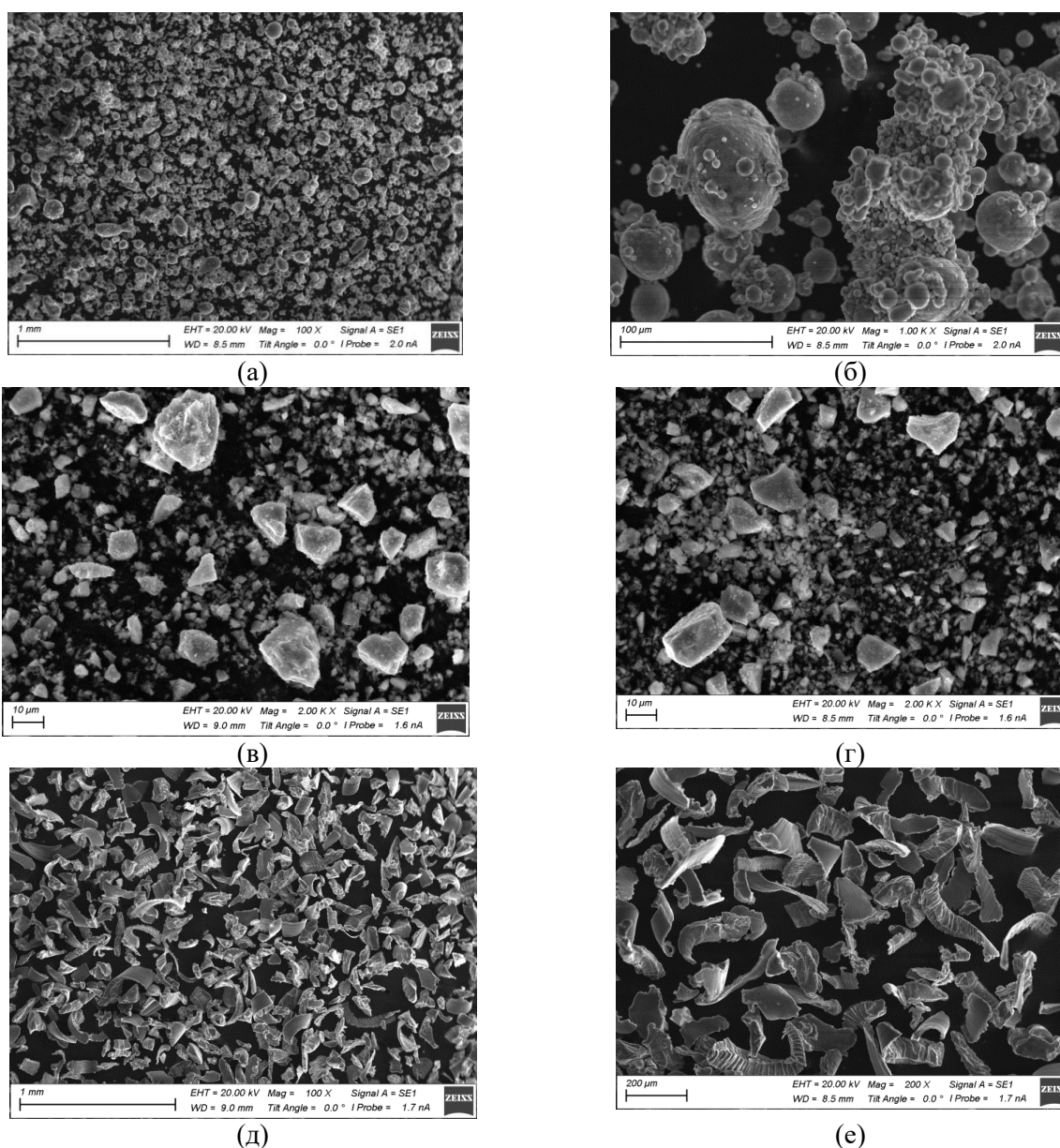


Рис. 1. РЭМ-изображения порошков алюминия (а, б), кремния (в, г) и магния (д, е)

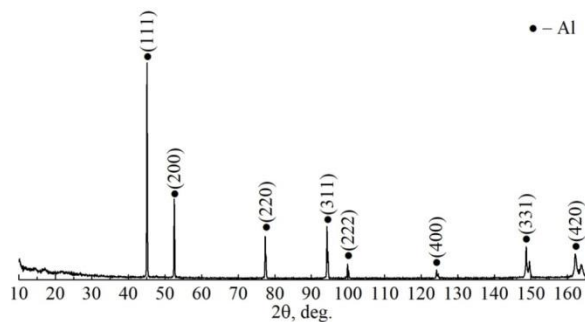


Рис. 2. Рентгеновская дифрактограмма образца порошка алюминия

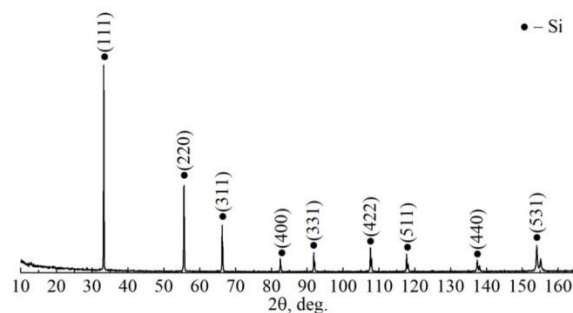


Рис. 3. Рентгеновская дифрактограмма образца порошка кремния

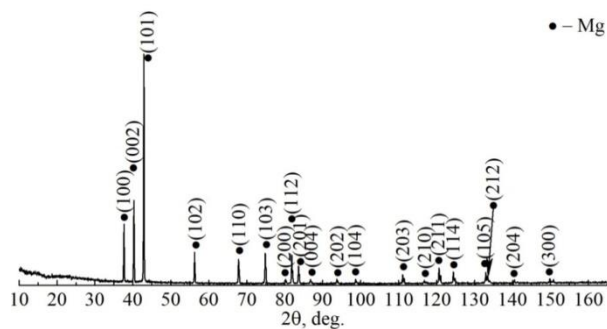


Рис. 4. Рентгеновская дифрактограмма образца порошка магния

Заключение

Результаты проведенных исследований показывают, что исходные порошки алюминия, кремния и магния однофазны, подходят для получения порошковой композиции и сплава Al-Si-Mg методом селективного лазерного плавления

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

Благодарности. Авторы выражают благодарность д.ф.-м.н., профессору Ю.П. Шаркееву, к.т.н. М.А. Химич, к.т.н. Е.А. Ибрагимову.

«Исследования выполнены с использованием оборудования ЦКП «Нанотех» ИФПМ СО РАН» и в Томском материаловедческом центре коллективного пользования.

Список использованных источников:

1. Lu Z. Thermodynamic description of the quaternary Al-Si-Mg-Sc system and its application to the design of novel Sc-additional A356 alloys Mater / Z. Lu, L.J. Zhang // Des. – 2017. – 116. – P. 427–437.
2. American Society for Metals and ASM International. Handbook Committee. ASM Handbook: nonferrous Alloys and Specialpurpose Materials. Properties and Selection. – 1992. – Vol 2.

- Rosenthal I. Heat treatment effect on the mechanical properties and fracture mechanism in AlSi10Mg fabricated by additive manufacturing selective laser melting process / I. Rosenthal, R. Shneck, A. Stern // *Materials Science and Engineering*. – 2018, – Volume 729. – P. 310–322.
- Aboulkhair N.T. 3D printing of aluminium alloys: Additive manufacturing of aluminium alloys using selective laser melting / N.T. Aboulkhair, M. Simonelli, L. Parry, I. Ashcroft, C. Tuck // *Prog. Mater. Sci.* – 2019. – 106. – Article 100578.
- Song B. Comparative study of performance comparison of AlSi10Mg alloy prepared by selective laser melting and casting / B. Song, Q. Yan, Y.S. Shi. // *J. Mater. Sci. Technol.* – 2020. – Vol. 41. – 199–208.
- Wang M. Effects of annealing on the microstructure and mechanical properties of selective laser melted AlSi7Mg alloy / M. Wang, B. Song, Q.S. Wei, Y.J. Zhang, Y.S. Shi // *Mater. Sci. Eng. A.* – 2019. – 739. – P. 463–472.
- Post heat treatment of additive manufactured AlSi10Mg: on silicon morphology, texture and small-scale properties / F. Alghamdi, X. Song, A. Hadadzadeh // *Mater. Sci. Eng. A. [et al.]* – 2020. – 783. – Article 139296.
- Синтез трехкомпонентного сплава на основе алюминия методом селективного лазерного плавления / Н.А. Сапрыкина, В.В. Чебодасва, А.А. Сапрыкин [и др.] // *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*. – 2022. – Т. 24, № 4. – С. 151–164.

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ УСЛОВИЙ, РЕЖИМОВ И ПАРАМЕТРОВ
ПОСЛОЙНОГО ЛАЗЕРНОГО ПЛАВЛЕНИЯ КОМПОЗИТНОГО ПОРОШКА
АЛЮМИНИЙ-КРЕМНИЙ-МАГНИЙ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ОБРАЗЦОВ**

*Н.А. Сапрыкина^а, к.т.н., доц., А.А. Сапрыкин, к.т.н., доц., Е.А. Ибрагимов, к.т.н.
Юргинский технологический институт (филиал)
Национального исследовательского Томского политехнического университета
652055, Кемеровская область, г. Юрга, ул. Ленинградская, 26
E-mail: ^аsaprikina@tpu.ru*

Аннотация: В статье приведены исследования по определению условий и параметров режима селективного лазерного плавления (СЛП) композитного порошка алюминий-кремний-магний для получения образцов. Оптимальными параметрами режима, позволяющего получить образцы являются: шаг сканирования $s = 90$ мкм, толщина порошкового слоя $h = 25$ мкм, мощность лазера $P = 90$ Вт, скорость сканирования луча лазера $v = 300$ мм/с, защитная атмосфера – аргон, материал подложки – алюминий, температура подогрева $t = 300$ °С.

Ключевые слова: селективное лазерное плавление (СЛП); порошок алюминий-кремний-магний; аддитивное производство; параметры режима, эксперимент.

Abstract: The article presents studies on determining the conditions and parameters of the mode of selective laser melting (SLM) of an aluminum-silicon-magnesium composite powder to obtain samples. The optimal parameters of the mode for obtaining samples are: scanning step $s = 90$ μm , powder layer thickness $h = 25$ μm , laser power $P = 90$ W, laser beam scanning speed $v = 300$ mm/s, protective atmosphere – argon, substrate material – aluminum, heating temperature $t = 300$ °С.

Keywords: selective laser melting (SLP); aluminum-silicon-magnesium powder; additive manufacturing; mode parameters, experiment.

В работе описаны исследования по определению условий, режимов и параметров селективного лазерного плавления (СЛП) композитного порошка алюминий-кремний-магний для получения образцов. Выращивание образцов осуществлялось на установке селективного лазерного плавления ВАРИСКАФ-100МВС, разработанной и изготовленной в Юргинском технологическом институте (филиале) Томского политехнического университета совместно с Лабораторией физики наноструктурных биоконструктивов Института физики прочности и материаловедения СО РАН. Необходимо определить диапазон технологических параметров СЛП при которых на подложках будут сформированы образцы заданной геометрии, достаточно прочные и плотные для проведения дальнейших исследований [1, 2].

Параметры процесса СЛП обуславливаются как возможностями экспериментальной установки, так и используемым материалом. При этом параметры СЛП условно можно разделить на статические (неизменные) и динамические (изменяемые) [3–5].

Статические параметры. Так как в состав композитного порошка входят металлы, активно взаимодействующие с кислородом в атмосфере, то в качестве защитной среды процесса выбран инертный газ аргон. Основой получаемого сплава является алюминий, поэтому для наиболее полного сплавления первых слоев получаемых образцов, в качестве материала для изготовления подложек был выбран алюминий.