

- 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.

Литературные данные показали, что благоприятный эффект для полного сплавления частиц порошка и подложки достигается при дополнительном подогреве подложки до температуры $t_{пл} = 300$ °С. Толщина наносимого слоя порошка ($h_{пл}$) определяется прежде всего средним размером частиц порошка, а так же их формой. При этом необходимо учитывать тот факт, что чем меньше толщина слоя наносимого порошка, тем точнее получится геометрия образца, и более полно будут сплавляться частицы порошка. Предварительные эксперименты показали, что минимально возможная толщина порошкового слоя, при которой наносимый слой будет формироваться равномерно и с максимальной плотной упаковкой составляет $h_{пл} = 25$ мкм. Диаметр пятна лазерного излучения определяется техническими характеристиками фокусирующей оптики и на всех экспериментах он составлял $d_{лн} = 0,1$ мм. Расстояние между сплавляемыми треками, равного шагу сканирования порошка определяется диаметром $d_{лн}$ и должно обеспечивать перекрытие соседних треков на 40–60 % и их сплавление. Поэтому величина шага сканирования $S = 0,09$ мм.

К динамическим параметрам процесса СЛП относятся: режим излучения лазера; скорость сканирования лазера; мощность падающего на поверхность лазерного излучения [6–8]. Поисковые эксперименты проведены при постоянной мощности $P = 80$ Вт или импульсной мощности лазера $P = 100$ Вт, модуляции $m = 5000$ Гц и при неизменных параметрах режима, а именно: шаг сканирования $S = 90$ мкм, толщина порошкового слоя $t = 25$ мкм и варьируемая скорость сканирования луча лазера $V = 100, 200, 300, 400$ мм/с.

Образцы квадратной формы со стороной 10 мм построены на подложках из алюминия в предварительно нагретой до 300 °С и заполненной после предварительного вакуумирования аргоном камере. Металлографические образцы были приготовлены путем проведения стандартной механической шлифовки и полировки на алмазных пастах для получения полированного поперечного сечения

Качественная поверхностная оценка прочности сформированных образцов, проводимая при подготовке образцов механической шлифовкой показала, что образец, полученный при постоянной мощности лазера – 80 Вт, скорости сканирования лучом лазера – 300 мм/с, шаге сканирования – 90 мкм, толщине слоя порошка – 25 мкм имел наименьшую расположенность к разрушению, что косвенно указывает на более высокую прочность, в сравнении с остальными образцами. Образцы, полученные при постоянной мощности и остальных неизменных параметрах режима, качественно показали лучшую прочность, чем образцы, полученные при импульсном режиме. В процессе шлифования выкрашивались, анализ микроструктуры показал наличие в большом количестве нерасплавленного порошка. Поэтому далее принято было решение проводить эксперименты только в режиме постоянной мощности лазера.

Оптимизация параметров режима при изготовлении деталей методом селективного лазерного плавления часто требует контроля ключевых параметров процесса, включая мощность лазера P , скорость сканирования лучом лазера V , шаг сканирования S и толщина порошкового слоя t , которая создает плотность энергии E (Дж/мм³), которая определяется уравнением: $E = P/V \cdot S \cdot t$. Для оценки влияния скорости сканирования лазерным излучением на процесс СЛП были изготовлены плоские образцы в форме квадратов со стороной 10×10 мм и толщиной 2 мм. При постоянных параметрах режима: $P = 90$ Вт, $s = 90$ мкм, $h = 25$ мкм, скорость сканирования изменялась следующим образом: $v = 100, 200, 300, 400$ мм/с. Энерговклад, соответственно был равен: 400, 200, 133,3 и 100 Дж/мм³. В результате была получена панель образцов, рисунок 1.

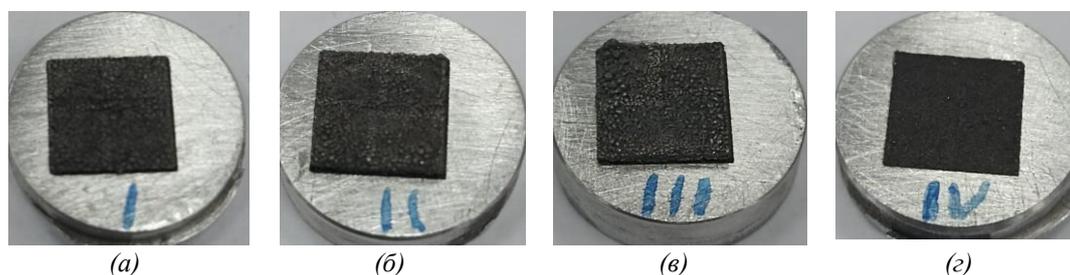


Рис. 1. Оптические изображения поверхности образцов, полученных методом СЛП из порошка после механической активации длительностью 1 час: а – образец № 1, $E = 400$ Дж/мм³; б – образец № 2, $E = 200$ Дж/мм³, в – образец № 3, $E = 133,3$ Дж/мм³, г – образец № 4, $E = 100$ Дж/мм³

Предварительный эксперимент показал, что при скорости сканирования выше 300 мм/с происходит отслоение образца от подложки, а при скорости выше 400 мм/с образцы отрываются от подложек полностью. Причиной этому служит высокая скорость движения ванны расплава, вследствие чего вновь образующиеся порции расплавленного металла не успевают разогреть подложку и сплавиться с ней.

При этом на скоростях ниже 100 мм/с происходит образование крупных капель металла на поверхности образца, что связано с перегревом ванны жидкого сплава.

Внешний вид шлифованных поверхностей сформированных образцов № 1, 2, 3 при разных увеличениях представлен в таблице 1. Можно видеть, что во всех образцах присутствует пористость. Наблюдаются закрытые поры, имеющие округлую форму, а также развитая сетка открытых взаимосвязанных пор. При крупных увеличениях в отдельных образцах наблюдались термические трещины.

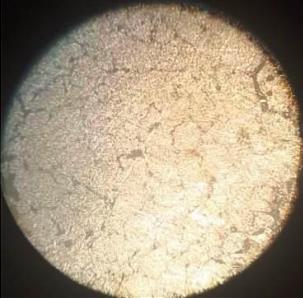
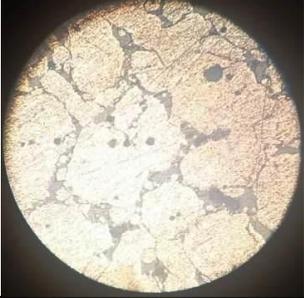
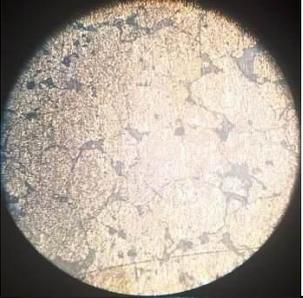
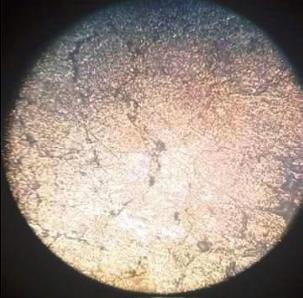
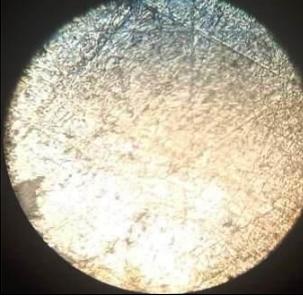
Анализ оптических изображений шлифов показывает, что наименьшую пористостью в рамках данного поискового эксперимента имеет образец, сформированный при параметрах $P = 90$ Вт, $v = 300$ мм/с.

Заключение

В результате эксперимента установлено, что снижение скорости лазерного излучения уменьшает коробление образцов из-за термических напряжений, а также происходит улучшение качества поверхности образцов, размер капель металла на поверхности существенно уменьшается. 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°.

Таблица 1

Внешний вид шлифованных поверхностей

Увеличение	Скорость сканирования		
	$v = 100$ мм/с	$v = 200$ мм/с	$v = 300$ мм/с
×20			
×50			
×200			

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. В.В. Чебодаевой, Гусевой Т.С.

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

Список использованных источников:

1. Влияние режимов селективного лазерного воздействия на пористость образцов из порошков кобальта, хрома и молибдена / Н.А. Сапрыкина, А.А. Сапрыкин, Ю.П. Шаркеев [и др.] // Вестник Брянского государственного технического университета. – 2021. – № 8 (105). – С. 22–28.
2. Синтез трехкомпонентного сплава на основе алюминия методом селективного лазерного плавления / Н.А. Сапрыкина, В.В. Чебодаева, А.А. Сапрыкин [и др.] // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2022. – Т. 24. – № 4. – С. 151–164.
3. Olakanmi E.O. A review on selective laser sintering/melting (SLS/SLM) of aluminium alloy powders: Processing, microstructure, and properties / E.O. Olakanmi, R.F. Cochrane, K.W. Dalgarno // Prog. Mater. Sci. – 2015. – 74. – P. 401–477.
4. Effect of heat treatment on AlSi10Mg alloy fabricated by selective laser melting: Microstructure evolution, mechanical properties and fracture mechanism / W.Li, S.Li, J.Liu // Mater. Sci. Eng. A. – 2016. – 663. – P. 116–125.
5. Damage mechanisms in selective laser melted AlSi10Mg under as built and different post-treatment conditions / L. Zhao, J.G.S. Macías, L.P. Ding [et al.] // Mater. Sci. Eng. A. – 2019. – 764. – Article 138210.
6. 3D printing of high-strength aluminium alloys / J.H. Martin, B.D. Yahata, J.M. Hundley [et al.] // Nature. – 2017. – 549. – P. 365–369.
7. Microstructure and mechanical properties of Al-12Si and Al-3.5Cu-1.5Mg-1Si bimetal fabricated by selective laser melting / P. Wang, C.S. Lao, Z.W. Chen [et al.] // J. Mater. Sci. Technol. – 2020. – 36. – P. 18–26.
8. Microstructure characterization of SLMprocessed Al-Mg-Sc-Zr alloy in the heat treated and HIPed condition / A.B. Spierings, K. Dawson, P. Dumitraschkewitz [et al.] // Addit. Manuf. – 2018. – 20. – P. 173–181.

ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ТРУБОПРОВОДА С ГИБКОЙ ОПОРОЙ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ В ОСЛОЖНЕННЫХ УСЛОВИЯХ ВЕЧНОЙ МЕРЗЛОТЫ

В.Ю. Тимофеев^{2,а}, к.т.н., доц., П.В. Бурков¹, д.т.н., проф., В.П. Бурков¹, ст. преп., С.П. Буркова¹, к.т.н., доц.

¹Национальный исследовательский Томский политехнический университет,

634050, г. Томск, пр. Ленина 30

²Юргинский технологический институт (филиал)

Национального исследовательского Томского политехнического университета

652055, Кемеровская область, г. Юрга, ул. Ленинградская, 26

E-mail: ^а tv-yitpri@mail.ru

Аннотация. В статье приведено исследование жесткой и гибкой опор надземных трубопроводов. Проведено исследование напряженно-деформированного состояния трубопровода методом конечных элементов при воздействии на него нагрузок, вызванных последствием эксплуатации в вечной мерзлоте. Приведено обоснование преимуществ разработанной конструкции гибкой опоры перед жесткой опорой.

Ключевые слова: трубопроводный транспорт, напряженно-деформированное состояние, гибкая опора, численный эксперимент, осложненные условия

Abstract: The paper presents a study of rigid and flexible supports for above-ground pipelines. The stress-strain state of a pipeline has been investigated by the finite element method under the influence of loads caused by the consequences of operation in permafrost. The paper substantiates the advantages of the developed design of the flexible support over the rigid support.

Keywords: pipeline transport, strain-stress state, flexible support, numerical experiment, challenging condition.

Одним из ключевых факторов стабилизации и развития экономики РФ является стабильная и безаварийная работа трубопроводного транспорта. Смена рынков сбыта нефти и газа обуславливают необходимость строительства нового и реновацию уже существующего трубопроводного транспорта, а также дальнейшего совершенствования технологий и оборудования, обеспечивающих их доставку потребителю. Большинство месторождений нефти и газа в РФ расположены в районах Крайнего севера и Сибири, в которых осложненные условия вечной мерзлоты широко распространены.