



# Исследование формирования структуры наплавочных валиков при лазерном выращивании из порошка сплава AlSi10Mg

А. Д. Еремеев, Д. В. Волосевич  
Санкт-Петербургский морской технический университет,  
Санкт-Петербург, Россия

В статье описана методика изготовления технических образцов AlSi10Mg методом лазерной наплавки. Изучено влияние структуры и дефектов на механическую прочность данного сплава при производительности процесса в 1 кг / ч и 1,5 кг / ч. Приведены механические испытания для выращенных образцов. С уменьшением мощности лазерного излучения наблюдалось уменьшение дендритных ячеек структуры с 204 мкм до 46 мкм. На образце с увеличенными ячейками структуры и наличием дефектов наблюдалось существенное понижение механической прочности поперечных образцов.

**Ключевые слова:** аддитивное производство, лазерная наплавка, алюминиевые сплавы, макроструктура

Статья получена: 07.09.2021

Статья принята: 21.09.2021

## ВВЕДЕНИЕ

Для аддитивного производства используют разные материалы, начиная от пластика [1] и композитных материалов [2] и заканчивая широким

# Study of the Formation of the Structure of Laser Tracks During Laser Growing From AlSi10Mg Alloy Powder

A. D. Ereemeev, D. V. Volosevich  
Saint Petersburg Marine Technical University,  
Saint Petersburg, Russia

The article describes a technique for manufacturing technical samples of AlSi10Mg by laser cladding. The effect of structure and defects on the mechanical strength of this alloy was studied at a process productivity of 1 kg / h and 1.5 kg / h. Mechanical tests for the grown samples are presented. With a decrease in the laser radiation power, a decrease in the dendritic cells of the structure from 204  $\mu\text{m}$  to 46  $\mu\text{m}$  was observed. On a sample with enlarged structure cells and the presence of defects, a significant decrease in the mechanical strength of transverse samples was observed.

**Key words:** additive manufacturing, laser cladding, aluminum alloys, macrostructure

Received on: 07.09.2021

Accepted on: 21.09.2021

## INTRODUCTION

Various materials are used for additive manufacturing, ranging from plastics [1] and composite materials [2] to a wide range of various metal alloys based on iron, nickel, titanium, including aluminum. Today, aluminum alloys are essential for the additive production of innovative parts in various fields: aerospace technology [3-4], military technology [5], load-bearing elements of automobile bodies [6] and others. Their high significance is associated with the peculiarities of the physicochemical properties of aluminum alloys: high thermal conductivity, low density, plasticity, and corrosion resistance. At the same time, pure aluminum has a low mechanical strength of 80-100 MPa. There-

спектром различных металлических сплавов на основе железа, никеля, титана, в том числе и алюминия. На сегодняшний день алюминиевые сплавы имеют важное значение для аддитивного производства инновационных деталей в различных областях: аэрокосмическая техника [3–4], военная техника [5], несущие элементы автомобильных корпусов [6] и другие. Их высокая значимость связана с особенностями физико-химических свойств алюминиевых сплавов: высокая теплопроводность, малая плотность, пластичность, коррозионная стойкость. В то же время чистый алюминий имеет малую механическую прочность 80–100 МПа. Поэтому в производстве широко применяются сплавы алюминия, легированные медью, магнием, кремнием и т.д. для повышения прочностных свойств.

Одним из широко применяемых материалов в аддитивном производстве является алюминиевый сплав AlSi10Mg. Наиболее распространенным способом наплавки этого материала является селективное лазерное спекание [7–9]. Одним из основных препятствий для широкого распространения этой технологии является ее сравнительно низкая производительность до 0,1 кг/ч, так как время создания небольшой модели может варьироваться от нескольких часов до нескольких дней. Метод прямого лазерного выращивания может существенно повысить производительность процесса наплавки за счет возможности большего переправления материала в единицу времени (от 1 кг/ч и более).

Но с увеличением производительности велика вероятность появления внутренних дефектов в виде пор, несплавлений и межкристаллических трещин. Основной задачей стал поиск баланса между производительностью лазерной наплавки алюминиевого порошка AlSi10Mg и увеличением механических свойств за счет получения оптимальной структуры и уменьшения количества дефектов.

### МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Образцы из алюминиевого сплава AlSi10Mg были сделаны на технологическом комплексе прямого лазерного выращивания (рис. 1.1), состоящий из волоконного лазера ЛС-3 (IPG Photonics, USA) мощностью до 3 кВт с лазерной головкой D-30L (IPG Photonics, USA), оснащенной четырехструнным соплом. Позиционирование и процесс наплавки производились с помощью шести-

fore, in production, aluminum alloys alloyed with copper, magnesium, silicon, etc. are widely used to increase the strength properties.

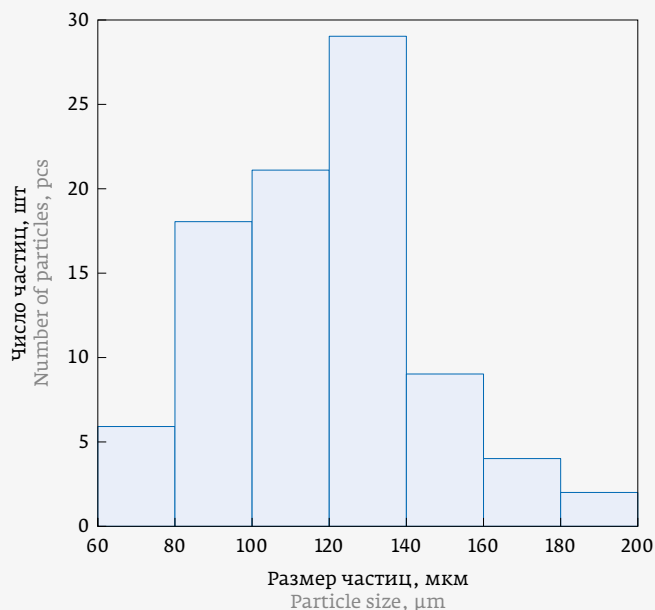
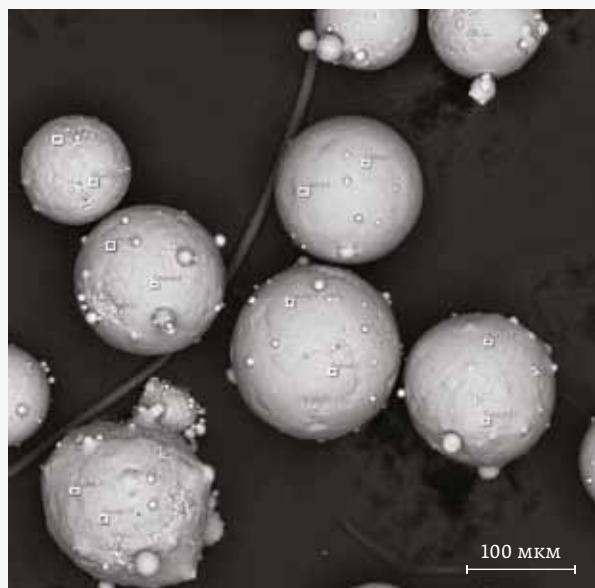
One of the widely used materials in additive manufacturing is the aluminum alloy AlSi10Mg. The most common method of cladding this material is selective laser sintering [7–9]. One of the main obstacles to the widespread use of this technology is its relatively low productivity up to 0.1 kg/h, since the time for creating a small model can vary from several hours to several days. The direct laser growth method can significantly increase the productivity of the cladding process, due to the possibility of a larger transfer of material per unit of time (from 1 kg/h and more).

But with an increase in productivity, the likelihood of the appearance of internal defects in the form of pores, lack of fusion and intercrystalline cracks is high. The main task was to find a balance between the productivity of laser cladding of AlSi10Mg aluminum powder and an increase in mechanical properties, due to obtaining an optimal structure and reducing the number of defects.



Рис. 1.1. Роботизированный технологический комплекс «ИЛИСТ-Л»

Fig. 1.1. Robotic technological complex "ILIST-L"



**Рис. 1.2.** Порошок AlSi10Mg: а) частицы порошка; б) гистограмма частиц  
**Fig. 1.2.** AlSi10Mg powder: а) powder particles; б) particle histogram

осевого промышленного робота M-20iB/25 (Fanuc, Япония).

Наплавка образцов происходила в герметичной камере в атмосфере защитного газа – аргона. В качестве наплавочного материала был выбран порошок марки AlSi10Mg, фракции 63–125 мкм. Состав порошка и его гистограмма представлены в табл. 1.1 и рис. 1.2.

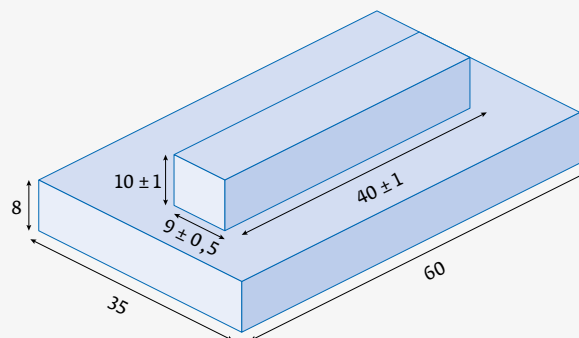
Гранулометрический состав порошка составлял 60–200 мкм, частицы порошка имели сферическую форму с удовлетворительным качеством поверхности, а химический состав соответствовал ГОСТ 1583-93.

В эксперименте были проведены две серии образцов с различным варьированием параметров режима (табл. 1.2).

Серии экспериментов отличались по производительности режимов: 1 кг/ч и 1,5 кг/ч, а также разными значениями мощности лазерного излучения. Наплавка производилась в один проход, с разворотом последующего слоя на 180 градусов. Образцы выращивались последовательно: вначале первый валик для всех образцов, потом второй валик для всех образцов и т.д. Смещение по высоте между слоями 0,8 и 0,6 мм. Пауза между соседними валиками 15 с. Размер стандартного образца представлен на рис. 1.3.

### EXPERIMENTAL TECHNIQUE

Samples of aluminum alloy AlSi10Mg were made on a direct laser growing technological complex (Fig.1.1) consisting of an LS-3 fiber laser (IPG Photonics, USA) with a power of up to 3 kW with a D-30L laser head (IPG Photonics, USA) equipped with a four-string nozzle. Positioning and cladding were carried out using a six-axis industrial robot M-20iB/25 (Fanuc, Japan).



**Рис. 1.3.** Схема габаритов образа и подложек  
**Fig. 1.3.** Diagram of the dimensions of the image and substrates

**Таблица 1.1.** Химический состав материала AlSi10Mg  
**Table 1.1.** Chemical composition for grade AlSi10Mg (AlSi10Mg)

Массовая доля химических элементов, масс.% Mass fraction of chemical elements, wt%											
Al	Mg	Si	Mn	Fe	Zr+Ti	Cu	Zn	Ni	Pb	Sn	Be
ост.	0,17–0,30	8–10,5	0,2–0,5	до 0,6–1	0,15	0,3	0,3	0,1	0,05	0,01	0,10

**Табл. 1.2.** Технологические режимы выращенных образцов  
**Tab. 1.2.** Technological modes of grown samples

№ серии Series No.	№ образца Sample No.	Мощность, кВт Power, kWt	Скорость наплавки, мм/с Cladding speed, mm/s	Ширина валика, мм Track width, mm	Диаметр пятна, мм Spot diameter, mm	Смещение по высоте, мм Height offset, mm	Производительность процесса, кг/ч Process productivity, kg/h
1	1.1	1,6	20	2	1,8	0,6	1
	1.2	1,8					
	1.3	2,0					
2	2.1	1,6	25	2,5	2,6	0,8	1,5
	2.2	1,8					
	2.3	2,0					

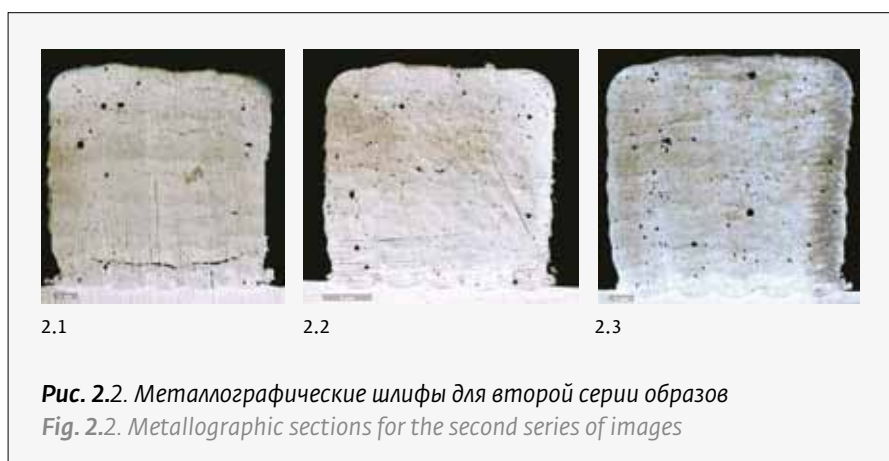
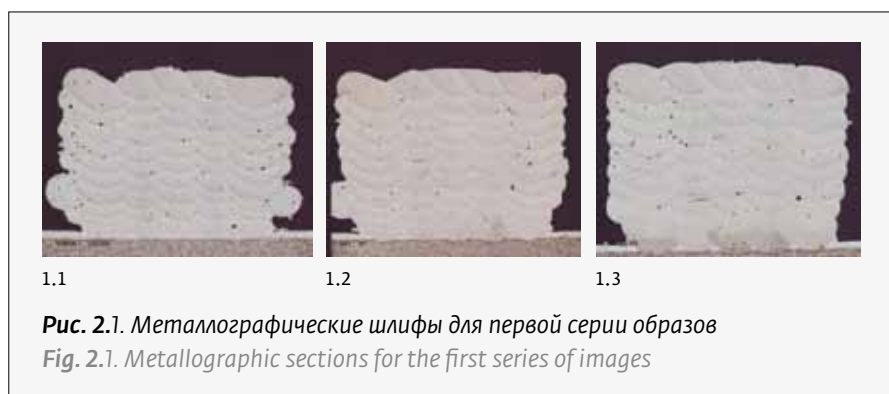
Образцы, полученные в ходе исследования, изучались в поперечном сечении с помощью металлографического микроскопа Leica DMI8 (Leica Microsystems, Германия), предназначенного для контроля качества металлов. В качестве реактива для травления был выбран следующий: 50 мл H<sub>2</sub>O, 1 мл HF, 2 мл HNO<sub>3</sub>. Время травления составило 20 с.

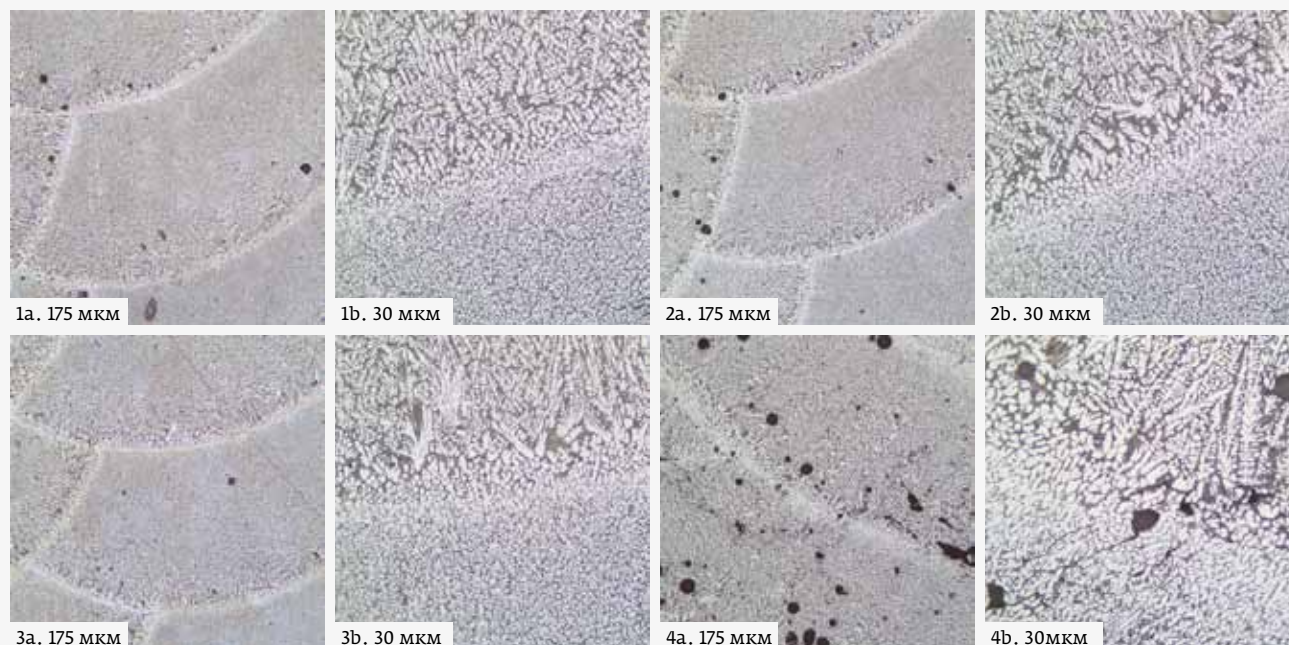
Механические испытания проводились на универсальной испытательной машине Zwick Roell Z100 (Zwick Roell, Ульм, Германия) по два образца для каждого направления.

### ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

#### Металлографические исследования

На рис. 2.1 и 2.2 представлены результаты металлографического исследования.





**Рис. 2.3.** Фотографии структур для сплава AlSi10Mg: образец № 1.1 (1а, 1b); образец № 1.2 (2а, 2b); образец № 1.3 (3а, 3b); образец № 2.2 (4а, 4b)

**Fig. 2.3.** Photographs of structures for the AlSi10Mg alloy: sample No. 1.1 (1a, 1b); sample No. 1.2 (2a, 2b); sample No. 1.3 (3a, 3b); sample No. 2.2 (4a, 4b)

Результат анализа шлифов показал, что в образцах первой серии присутствуют поры в количестве менее 1% от площади сечения шлифов. В образцах второй серии, кроме пор, площадь которых составляет до 5% от площади сечения, присутствуют несплавления и межкристаллические трещины.

После анализа дефектов для образцов первой серии и образца № 2.2 второй серии получены изображения макроструктуры (рис. 2.3).

### Макроструктура

На рис. 2.3 представлены оптические микрофотографии поперечных сечений наплавленных образцов первой серии и образца № 2.2 из второй серии. Образцы демонстрируют структуру, типичную для доэвтектических сплавов системы Al-Si, содержащую, как видно из рис. 2.4, первичный  $\alpha$ -Al и эвтектику Al-Si.

Структура образца имеет периодический характер: на границе наплавленного валика образуются дендриты, которые затем сменяются мелкоячеистой структурой. Дендритные структуры ориентированы к центру валиков, причем размер дендритных областей уменьшается с увеличением мощности лазерного излучения и состав-

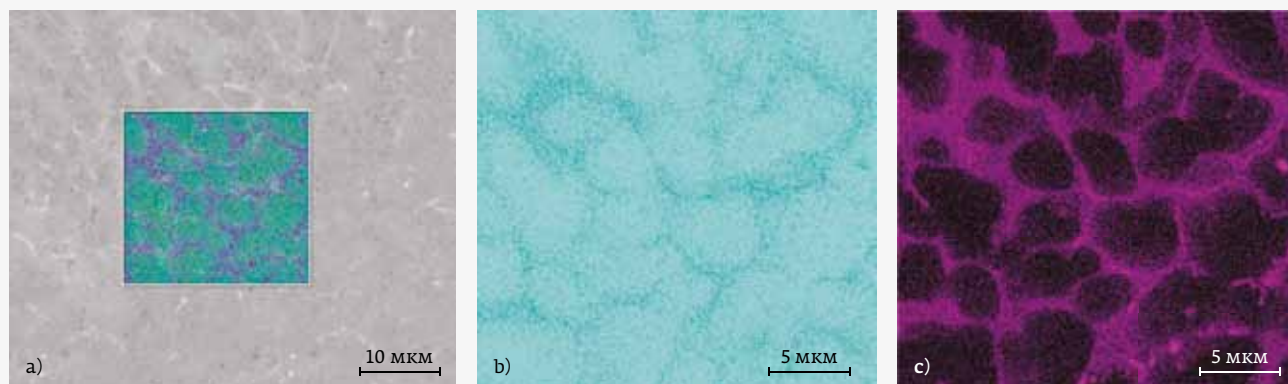
The cladding of the samples was carried out in a hermetically sealed chamber in an atmosphere of protective gas – argon. AlSi10Mg powder, 63–125  $\mu\text{m}$  fraction was chosen as the cladding material. The composition of the powder and its histogram are presented in Table 1.1 and Fig. 1.2.

The particle size distribution of the powder was 60–200  $\mu\text{m}$ , the powder particles had a spherical shape with a satisfactory surface quality, and the chemical composition corresponded to GOST 1583–93.

In the experiment, two series of samples were carried out with different variation of the mode parameters (Table 1.2).

The series of experiments differed in the productivity of the modes: 1 kg/h and 1.5 kg/h, as well as in different values of the laser radiation power. The cladding was carried out in one pass, with the next layer turning by 180 degrees. The samples were grown sequentially, first the first track for all samples, then the second track for all samples, etc. Height offset between layers 0.8 and 0.6 mm. Pause between adjacent tracks 15 s. The size of the standard sample is shown in Fig. 1.3.

The samples obtained in the course of the study were examined in cross-section using a Leica DMi8



**Рис. 2.4.** Карта распределения химических элементов: общая (а), Al (b), Si (с)  
**Fig. 2.4.** Map of distribution of chemical elements: general (a), Al (b), Si (c)

ляет 145, 82 и 46 мкм для образцов первой серии при мощностях 1600, 1800 и 2000 Вт и 228, 184 и 140 мкм для второй серии соответственно. Преимущественно мелкая ячеистая структура имеет равноосный характер с размером ячеек 1,79 мкм, 1,83 и 1,85 мкм при мощностях 1600, 1800, 2000 Вт и 5,34 мкм, 5,16 и 5,2 мкм для второй серии.

Такое увеличение ячеек может быть связано с тем, что при увеличении пятна и скорости процесса падает плотность энергии, следовательно, уменьшается температурный градиент. В верхней части наплавленных слоев, где скорость теплоотвода выше, наблюдаются ячейки, близкие к равноосному формированию. Размер дендритных ячеек в структуре, например для литейных алюминиевых сплавов, играет суще-

metallographic microscope (Leica Microsystems, Germany), designed to control the quality of metals. The following was chosen as the etching reagent: 50 ml H<sub>2</sub>O, 1 ml HF, 2 ml HNO<sub>3</sub>. The etching time was 20 s.

Mechanical tests were carried out on a Zwick Roell Z100 universal testing machine (Zwick Roell, Ulm, Germany), two samples for each direction.

## DISCUSSION OF THE RESULTS

### Metallographic research

Figures 2.1 and 2.2 show the results of metallographic examination.

The result of the analysis of thin sections showed that the samples of the first series contain pores, in an amount of less than 1% of the sectional area of the

**Табл. 2.1.** Результаты механических испытаний для режима № 2.2

**Tab. 2.1.** Mechanical test results for mode No. 2.2

Образец Sample	Направление Direction	$d_0$ , мм $d_0$ , mm	$S_0$ , мм <sup>2</sup> $S_0$ , mm <sup>2</sup>	$L_0$ , мм $L_0$ , mm	$E_{\text{мод}}$ , ГПа $E_{\text{mod}}$ , GPa	$\sigma_{0,2}$ , МПа $\sigma_{0,2}$ , MPa	$F_{\text{max}}$ , МПа $F_{\text{max}}$ , MPa	Z, % Z, %
Оранжевый Orange	поперек across	4,96	19,32	25,00	87,7	69,9	76,2	0
Зеленый Green	поперек across	4,96	19,32	25,00	45,8	–	54,3	0
Красный Red	вдоль along	4,96	19,32	25,00	60,6	150	220	2
Желтый Yellow	вдоль along	4,97	19,40	25,00	82,3	142	216	3

ственную роль в конечных свойствах изделия: алюминиевые сплавы, у которых мелкодисперсная структура, показывают более высокие показатели по механическим и технологическим свойствам по сравнению с более грубодисперсной структурой таких же материалов. Кроме этого, наличие большого количества пор и несплавлений существенно влияют на механические свойства.

### Механические испытания

На рис. 2.5 представлен пример образцов, выращенных для механических испытаний. Результаты механических испытаний для образца № 2.2 приведены в табл. 2.1 и рис. 2.6.

Из результатов видно, что если в продольном направлении величина прочности примерно аналогична литейным материалам, то на разрыв образца поперек показатели существенно меньше. Причинами таких значений прочности являются наличие большого количества пор, несплавлений, наличие межкристаллических трещин, а также увеличенные дендритные ячейки структур.

### Выводы

По результатам исследования были сделаны следующие выводы:

- Проведены эксперименты по наплавке технических образцов из порошка  $AlSi10Mg$ . Выяснено, что на более производительном режиме в 1 кг/час наблюдается межкристаллические трещины и несплавления, а также поры до 5% от площади сечения образца.
- Получены результаты по влиянию мощности лазерного излучения на формирование структуры в процессе наплавки алюминиевого порошка  $AlSi10Mg$ . Установлены зависимости размеров дендритных ячеек и их формы от мощности лазерного излучения.
- Проведен анализ влияния структур, полученных в процессе лазерной наплавки алюминиевых порошков на механические свойства. Выяснено, что уменьшение ячеек дендритной структуры положительно влияет на механические свойства.



**Рис. 2.5.** Образцы для механических испытаний из порошка  $AlSi10Mg$   
*Fig. 2.5. Samples for mechanical tests from  $AlSi10Mg$  powder*

thin sections. In the samples of the second series, in addition to pores, which are up to 5% of the cross-sectional area, lack of fusion and intercrystalline cracks are present.

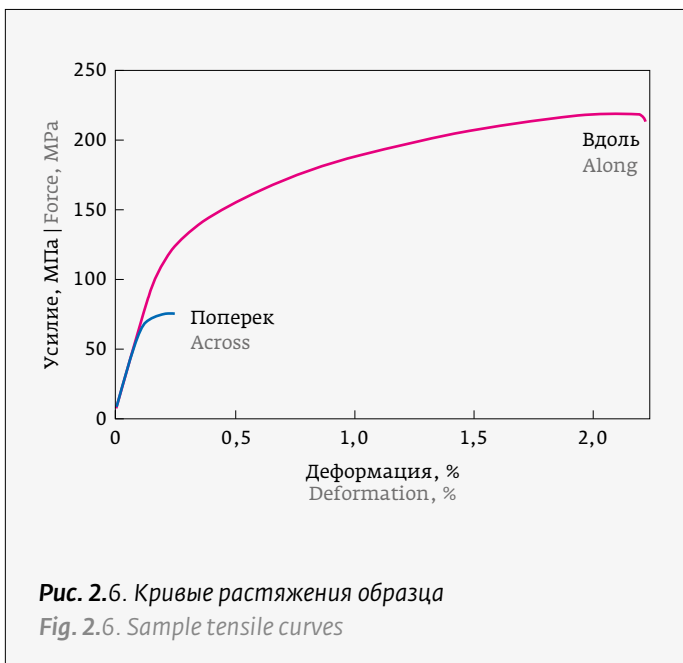
After the analysis of defects, images of the macrostructure were obtained for the samples of the first series and sample No. 2.2 of the second series (Fig. 2.3).

### 2.2. Macrostructure

Fig. 2.3 shows optical micrographs of cross-sections of cladding specimens of the first series and specimen No. 2.2 from the second series. The samples demonstrate a structure typical for hypoeutectic alloys of the Al-Si system, containing, as can be seen from Fig. 2.4, primary  $\alpha$ -Al and Al-Si eutectic.

The structure of the specimen has a periodic character: dendrites are formed at the boundary of the laser track, which are then replaced by a fine-cellular structure. The dendritic structures are oriented towards the center of the tracks, and the size of the dendritic regions decreases with increasing laser power and is 145, 82, and 46  $\mu m$  for the samples of the first series at powers of 1600, 1800, and 2000 W and 228, 184, and 140  $\mu m$  for the second series, respectively. The predominantly fine cellular structure is equiaxed with a cell size of 1.79; 1.83 and 1.85 microns at powers of 1600, 1800, 2000 W and 5.34; 5.16 and 5.2  $\mu m$  for the second series.

Such an increase in the cells may be due to the fact that with an increase in the spot and the rate of the process, the energy density decreases, therefore, the temperature gradient decreases. In the upper



Обнаруженные дефекты на одном из образцов существенно понизили его механические свойства по сравнению со свойствами литейных заготовок.

part of the cladding layers, where the rate of heat removal is higher, cells close to equiaxial formation are observed. The size of the dendritic cells in the structure, e.g., for cast aluminum alloys, plays a significant role in the final properties of the product. The aluminum alloys with a finely dispersed structure show higher mechanical and technological properties in comparison with the coarser structure of the same materials. In addition, the presence of a large number of pores and lack of fusion significantly affects the mechanical properties.

### 2.3. Mechanical tests

In fig. 2.5 shows an example of specimens grown for mechanical testing. The results of mechanical tests for sample No. 2.2 are shown in Table 2.1 and 2.6.

It can be seen from the results that if in the longitudinal direction the value of strength is approximately similar to casting materials, then the tensile strength of the sample across, the indicators are significantly lower. The reasons for such strength values are the presence of a large number of pores, lack of fusion, the presence of intercrystalline cracks, as well as increased dendritic cells of the structures.



<http://www.laseroptics.ru>

[conference@laseroptics.ru](mailto:conference@laseroptics.ru)

Тел.: +7 (812) 323 6348

Факс: +7 (812) 334 0824

## XX Международная конференция

### «ОПТИКА ЛАЗЕРОВ»

### ICLO 2022

г. Санкт-Петербург, Россия, 20-24 июня 2022 г.

Твердотельные лазеры  
Высокомощные лазеры  
Полупроводниковые материалы, лазеры и устройства  
Управление лазерным излучением  
Сверхсильные поля и сверхбыстрые процессы  
Лазеры и системы для визуализации,  
зеленой фотоники и устойчивого развития  
Нелинейная фотоника  
Оптические наноматериалы  
Лазеры на свободных электронах  
Нелинейная и квантовая интегральная оптика  
Биофотоника

Выставка

Официальный язык конференции – английский





## БЛАГОДАРНОСТЬ

Исследование проводилось в рамках конкурса на лучшие проекты фундаментальных научных исследований, выполняемых молодыми учеными, обучающимися в аспирантуре. Грант № 19-38-90267 «Исследование формирования структуры наплавленных валиков при лазерном выращивании из порошка сплава AlSi10Mg» выполнялся при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований.

## REFERENCES

1. Lammens N., Kersemans M., Ives De Baere, W. Van Paeppegem. On the visco-elasto-plastic response of additively manufactured polyamide-12 (PA-12) through selective laser sintering. *Polymer Testing*. February 2017; 57: 149–155.
2. D. Gu, H. Wang, F. Chang, D. Dai, P. Yuan, Y.-C. Hagedorn. Selective laser melting additive manufacturing of TiC / AlSi10Mg bulk-form nanocomposites with tailored microstructures and properties. *Procedia of the 8th international conference on photonic technologies LANE*. 2014;56:108–116.
3. Luis Henrique Santos, Weslei Patrick Teodo'sio Sousa, Sara Silva Ferreira de Dafe', Pedro Ame'rico Magalhaes Junior. Microstructural characterization and mechanical behavior analysis of 7075-T6 aluminum subjected to simulated lightning strikes. *Chinese Journal of Aeronautics*. 6 September 2020.
4. Tessaleno Devezas. Trends in aviation: rebound effect and the struggle composites x aluminum. *Technological Forecasting & Social Change*. 2020;160: 120241.
5. Christian C. Rotha, Teresa Frasn, Dirk Mohr. Dynamic perforation of lightweight armor: Temperature-dependent plasticity and fracture of aluminum 7020-T6. *Mechanics of Materials*. 2020;149: 103537.
6. Pranav Dev Srivivas, Charoo M. S. Application of Hybrid Aluminum Matrix Composite in Automotive Industry. *Materials Today: Proceedings*. 2019;18: 3189–3200.
7. Brandl E., Heckenberger U., Holzinger V., Buchbinder D. Additive manufactured AlSi10Mg samples using selective laser melting (SLM): microstructure, high cycle fatigue, and fracture behavior. *Materials and Design*. 2012;34:159–169.
8. Read N., Wang W., Essa K., Attallah M. A. Selective laser melting of AlSi10Mg alloy: process optimisation and mechanical properties development. *Materials and Design*. 2015;65:417–424.
9. Aboulkhair N. T., Everitt N. M., Ashcroft I., Tuck C. Reducing porosity in AlSi10Mg parts processed by selective laser melting. *Additive Manufacturing*. 2014;1: 77–86.

## АВТОРЫ

Еремеев Алексей Дмитриевич, e-mail: Eremeev.ad@mail.ru; исследователь, инженер СПбГМТУ; www.smtu.ru; Санкт-Петербург, Россия. Область интересов: аддитивные технологии, материаловедение. ORCID: 0000-0003-1987-769X

Волосевич Дарья Владимировна, e-mail: dasha.volosevich@mail.ru; инженер СПбГМТУ, www.smtu.ru; Санкт-Петербург, Россия. Область интересов: аддитивные технологии, материаловедение. ORCID: 0000-0002-2288-2935

## ВКЛАД АВТОРОВ

Еремеев А.Д.: концепция эксперимента и его проведение, анализ результатов; Волосевич Д.В.: металлографические исследования, исследование макроструктуры, механические испытания.

## КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Оба автора участвовали в написании рукописи согласно вкладу каждого из них в общий эксперимент и анализ его результатов. Авторы гарантируют оригинальность результатов и заявляют об отсутствии конфликта интересов.

## CONCLUSIONS

Based on the results of the study, the following conclusions were made:

- Experiments on the cladding of technical specimens from AlSi10Mg powder have been carried out. It was found that at a more productive mode of 1 kg/h, intercrystalline cracks and lack of fusion are observed, as well as pores up to 5% of the cross-sectional area of the sample.
- Results on the effect of laser radiation power on the formation of a structure during cladding of AlSi10Mg aluminum powder have been obtained. Dependences of the sizes of dendritic cells and their shape on the power of laser radiation have been established.
- The analysis of the influence of structures obtained in the process of laser cladding of aluminum powders on the mechanical properties is carried out. It was found that a decrease in the cells of the dendritic structure has a positive effect on the mechanical properties. Defects found on one of the samples significantly reduced its mechanical properties in comparison with the properties of casting blanks.

## ACKNOWLEDGEMENTS

The research was carried out within the framework of a competition for the best projects of fundamental scientific research carried out by young scientists studying in graduate school. Grant No. 19-38-90267 “Investigation of the formation of the structure of laser tracks during laser growth from AlSi10Mg alloy powder” was carried out with the financial support of the Russian Foundation for Basic Research.

## AUTHORS

Eremeev Alexey Dmitrievich, e-mail: Eremeev.ad@mail.ru; researcher, engineer of Saint Petersburg Marine Technical University (SMTU); www.smtu.ru; Saint Petersburg, Russia. Area of interest: additive technologies, materials science. ORCID: 0000-0003-1987-769X

Volosevich Darya Vladimirovna, e-mail: dasha.volosevich@mail.ru; engineer of Saint Petersburg Marine Technical University (SMTU), www.smtu.ru; Saint Petersburg, Russia. Area of interest: additive technologies, materials science. ORCID: 0000-0002-2288-2935

## CONTRIBUTION OF AUTHORS

Eremeev A.D.: the concept of the experiment and its implementation, analysis of the results; Volosevich D.V.: metallographic studies, macrostructure studies, mechanical tests.

## CONFLICT OF INTERESTS

Both authors participated in the writing of the manuscript according to the contribution of each of them to the overall experiment and the analysis of its results. The authors guarantee the originality of the results and declare that there is no conflict of interest.

23-27 | 05 | 2022

Россия, Москва,  
ЦВК «ЭКСПОЦЕНТР»



22-я международная  
специализированная  
выставка

# МЕТАЛЛОБРАБОТКА

«Оборудование,  
приборы и инструменты  
для металлообрабатывающей  
промышленности»



МИНПРОМТОРГ  
РОССИИ



[www.metobr-expo.ru](http://www.metobr-expo.ru)

12+ Реклама

ЭКСПОЦЕНТР