

МЕТАЛЛУРГИЯ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

Научная статья

УДК 67.017

URL: <https://vestnikmai.ru/publications.php?ID=180662>

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОРИСТОСТИ, МОРФОЛОГИИ МИКРОСТРУКТУРЫ И МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ИЗДЕЛИЙ, ПОЛУЧЕННЫХ СЕЛЕКТИВНОЙ ЛАЗЕРНОЙ ПЛАВКОЙ ПОРОШКА СПЛАВА AlSi10Mg

Вениамин Андреевич Брыкин^{1✉}, Андрей Владимирович Рипецкий², Константин Сергеевич Коробов³

^{1, 2, 3} Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет),

Москва, Россия

¹ benbrykin@yandex.ru ✉

² a.ripetskiy@mail.ru

³ korobovks@mai.ru

Аннотация. Представлены результаты экспериментальных исследований пористости, морфологии микроструктуры объемных образцов, а также результаты испытаний на растяжение образцов, выращенных методом селективной лазерной плавки из порошка сплава AlSi10Mg. Установлены эффективные технологические параметры процесса выращивания. Предложено компоновочное решение для синтеза объемных образцов для исследования пористости. Разработан программный компонент экспресс-анализа пористости образцов по снимкам, полученным методом рентгеновской компьютерной томографии. Приведена оценка эффективности предлагаемой методики.

Ключевые слова: аддитивное производство, оптимизация параметров аддитивного производства, исследование характеристик микроструктуры, селективная лазерная плавка металлопорошковых композиций, прочность, микроструктура и пористость аддитивно изготовленных изделий, экспресс-анализ физико-механических свойств

Для цитирования: Брыкин В.А., Рипецкий А.В., Коробов К.С. Исследование пористости, морфологии микроструктуры и механических характеристик изделий, полученных селективной лазерной плавкой порошка сплава AlSi10Mg // Вестник Московского авиационного института. 2024. Т. 31. № 2. С. 193–205.
URL: <https://vestnikmai.ru/publications.php?ID=180662>

METALLURGY AND MATERIAL SCIENCE

Original article

STUDYING POROSITY, STRUCTURE MORPHOLOGY AND MECHANICAL CHARACTERISTICS OF THE PRODUCTS OBTAINED BY SELECTIVE LASER MELTING OF THE AlSi10Mg ALLOY POWDER

Veniamin A. Brykin^{1✉}, Andrei V. Ripetskii², Konstantin S. Korobov³

^{1, 2, 3} Moscow Aviation Institute (National Research University),

Moscow, Russia

¹ benbrykin@yandex.ru ✉

² a.ripetskiy@mail.ru

³ korobovks@mai.ru

Abstract

The current level of manufacturing technologies development, the additive manufacturing from metal powders by Selective Laser Melting (SLM) in particular, allows obtaining high production functional products with unique properties. However, the expanding range of materials and SLM equipment leads to prolonged cycles of technological work in search for optimal process parameters and increases the production cost. Additive manufacturing plays an important role in the aviation and space-rocket industry. Time reduction on experimental cycles of R & D helps accelerating implementation of additive technologies and reduce product cost. It stipulates the necessity of the technological procedures and experiments funnel automation.

The presented study examines an experiment on elementary volumes melting of the cubes (cube samples) and identification of optimal SLM process parameters for the AlSi10Mg powder in terms of porosity, sample microstructure morphology and mechanical characteristics obtained under the specified technological parameters. The issue of the software component development for the samples express analysis, allowing determining automatically the most solid samples and technological parameters sets corresponding to them was considered additionally.

The metal powder composition for the study was AlSi10Mg alloy powder produced by the UC RUSAL company. The samples were manufactured in the Addsol D50 installation, with the control routine developed with the MAI developed "PKTTP" software complex. The metallographic samples were prepared with the equipment from the Struers company. The samples porosity study was being conducted with the Nordson DAGE NT500 XD7600NT Ruby X-ray computer tomography installation. The samples microstructure was studied as well with the TFS Quattro S scanning electron microscope (SEM).

The authors proposed a layout solution, allowing synthesize 120 sample-cubes with the wide variation of the SLM process parameters in a single run of the Addsol D50 installation. The proposed solution allows significant acceleration of the process (up to 200%) of the volumetric samples synthesis on the installations with the small plot area (up to 50mm).

A software component for the express analysis of the cube sample porosity, based on the images obtained through the X-ray computer tomography (RCT) was developed with the Python language and tools from the libraries such as Scikit-image (skimage), Matplotlib, and Seaborn. The program receives a set of "raw" images from the RCT installation, processes each image computing the volume of voids and discontinuities of each layer, and then computes the total volume of pores/discontinuities in the sample, determining thereby the sample relative density.

For the samples with minimal porosity, a microstructure study was conducted with the SEM to analyze the metallographic section of these samples. The least porous samples (with relative density of 99.5% and higher), manufactured with the minimum layer height (30 μm), exhibit a homogeneous dendritic-cellular microstructure. The average grain size does not exceed 1-2 μm , which, combined with the slight grain orientation in the direction of sample growth, indicates relatively high strength of the items manufactured under the corresponding parameters, as confirmed by tensile test results.

Parameters of the SLM technological process [325 W, 900 mm/s, 30 μm] for achieving the uniform fine grained microstructure (1-2 μm), as well as relative density of the samples of 99.7%, tensile limit of 341.5 MPa and relative elongation of 2.65% were determined for the studied metal-powder composition of the AlSi10Mg alloy with the developed software component and domestic Addsol D50 installation.

Elemental composition maps of the studied sections for a series of samples were obtained. Results of the mechanical tensile tests of the samples manufactured according to selected technological parameters have been added, with a comparison of mechanical properties and SLM process parameters.

It is assumed that the total time reduction of the R & D cycle of additive manufacturing by the proposed means of express analysis of experimental results will allow faster transition to the process of high-tech products serial additive manufacturing in high-performance sectors of industry (such as aviation and aerospace industries).

Keywords: additive manufacturing, additive manufacturing parameters optimization, study of microstructure characteristics, selective laser melting of metal-particle compositions, strength, microstructure and porosity of additively manufactured products, express analysis of physical and mechanical properties

For citation: Brykin V.A., Ripetskii A.V., Korobov K.S. Studying Porosity, Structure Morphology and Mechanical Characteristics of the Products Obtained by Selective Laser Melting of the AlSi10Mg Alloy Powder. *Aerospace MAI Journal*, 2024, vol. 31, no. 2, pp. 193-205. URL: <https://vestnikmai.ru/publications.php?ID=180662>

Введение

Мировой уровень развития аддитивного производства показывает, что заготовки, полученные из различных металлопорошковых композиций, в том числе и методом селективной лазерной плавки (СЛП), широко применяются в качестве полностью функциональных изделий [1–6]. У технологии СЛП есть такие преимущества, как высокий коэффициент использования материала [7], возможность создания изделий уникальных геометрически и технологически сложных форм [8], получение высоких комплексных прочностных характеристик [9] а также высокая эффективность технологии на этапах прототипирования [10]. Все эти особенности обеспечиваются технологическими параметрами процесса. В настоящее время для каждого 3D-принтера, работающего по технологии СЛП с выбранной порошковой композицией, необходим уникальный набор технологических параметров, который обеспечил бы низкую пористость и высокие механические характеристики изделий [11]. При смене материала или проведении пусконаладочных работ для нового оборудования этап поисковых работ может затягиваться на недели. Стратегия развития аддитивных технологий в России к 2030 году [12, 13] предполагает значительный рост номенклатуры оборудования и материалов для синтеза изделий, что, несомненно, приведет к необходимости автоматизации долгих технологических процедур поиска оптимальных параметров [14, 15].

Полная схема опытных работ по оптимизации параметров технологического процесса селективной лазерной плавки представляет собой последовательность экспериментов, в ходе которых из всего набора параметров отбираются допустимые для конкретных установки и металлопорошковой композиции [16]. Такие эксперименты можно представить в виде перевернутой пирамиды: от исследования единичных треков с нанесением металлического порошкового материала до исследования процесса формирования объемных объектов и их механических характеристик.

Одним из важнейших этапов этой последовательности является печать объемных образцов с целью исследования их пористости и морфологии микроструктуры, а также печать и испытания образцов для исследования механических характеристик. Поиск эффективных параметров, обе-

спечивающих минимальную пористость и высокие механические свойства, требует соответствующей квалификации от инженера-технолога [17–19]. В то же время достижение требуемого качества вырабатываемого изделия может быть обеспечено путем анализа как можно большего числа экспериментов [4], выполняемых без каких-либо средств автоматизации, экспресс-анализа или систем поддержки принятия технологических решений. Практика внедрения аддитивного производства в авиационную и ракетно-космическую промышленность показывает, что затягивание экспериментального этапа научно-исследовательских, опытно-конструкторских и технологических работ (НИОКТР) аддитивного производства приводит к значительному росту стоимости изделий, изготавливаемых аддитивно [20, 21].

Перспективным направлением исследований является усовершенствование процесса технологической подготовки аддитивного производства методом селективной лазерной плавки с использованием инструментов поддержки принятия технологических решений. Таким образом, разработка программных компонентов экспресс-анализа результатов опытных технологических работ (ОТР) по поиску эффективных параметров процесса, которая позволила бы устранить недостатки поискового этапа работ при смене материала или запуске установки 3D-печати, является актуальной задачей.

Цель настоящей работы – разработка научно-методического обеспечения автоматизированного подбора технологических параметров процесса СЛП металлопорошковых композиций с целью достижения высоких характеристик относительной плотности, механических свойств за минимальное время.

Материалы и методы решения задачи

В качестве металлопорошковой композиции (МПК) для исследования был взят порошок сплава AlSi10Mg производства компании «Российский алюминий» (ОК РУСАЛ, г. Москва, Россия). Материал поставляется в виде сферического порошка с размером частиц от 20 до 63 мкм. Химический состав (табл. 1) и морфология гранул контролируются поставщиком материала.

Объемные образцы-кубы изготавливали на установке селективной лазерной плавки Addsol D50

Таблица 1

Химический состав материала AlSi10Mg

Марка сплава	Содержание элементов, % по массе										
	Si	Al	Fe	Mn	Ni	Cu	Mg	Zn	Pb	Ti	Sn
AlSi10Mg	11,00	87,10	0,55	0,45	0,05	0,05	0,45	0,1	0,05	0,15	0,05

(ООО «Титан–Авангард», Россия), управляющую программу для которой разрабатывали в программном комплексе «ПКТПП» (МАИ, Россия). В качестве инертной среды для обеспечения процесса плавки использовали газ аргон, очищенный методом каталитического гидрирования, соответствующий ГОСТ 10157-2016 (объемная доля кислорода не более 0,0007%). Использовали 45%-й интервал диапазона допустимых для установки Addsol D50 параметров процесса СЛП: мощность варьировали от 220 до 400 Вт (с шагом в 25 Вт), скорость сканирования – от 200 до 1400 мм/с (с шагом 170 мм/с). Для каждой комбинации «мощность–скорость» были изготовлены образцы с разной высотой слоя – 30, 50, 70 и 90 мкм.

Микроструктуру полученных образцов изучали на поперечных шлифах образцов-кубов после травления посредством погружения в реагент Келлера на 15 секунд. Шлифы изготовляли на оборудовании фирмы Struers (Дания).

Механические свойства исследовали на универсальной электромеханической машине Instron 5969 (Illinois Tool Works Inc., США). Образцы для испытаний на растяжение по ГОСТ 1497-84 изготовляли и испытывали в количестве 3 шт. для каждого набора исследуемых параметров.

Внутреннюю структуру и пористость синтезированных образцов объемных объектов исследовали с использованием компьютерного томографа Nordson DAGE NT500 XD7600NT Ruby (Nordson DAGE Inc., Великобритания). Результаты томографии обрабатывали в свободно распространяемом программном обеспечении muVGL 3.5 (Volume Graphics GmbH, Германия). Также микроструктуру образцов изучали с помощью сканирующего электронного микроскопа (СЭМ) TFS Quattro S (Thermo Fisher Scientific Inc., США). Химический состав структурных составляющих исследовали с помощью системы энергодисперсионной спектроскопии Bruker QUANTAX (Bruker Corporation, США).

Программные инструменты и средства экспресс-анализа, необходимые для решения поставленной исследовательской и оптимизационной задачи, были подготовлены в среде разработки Microsoft Visual Studio. Программный код написан на языке Python. Для реализации программного компонента для визуализации данных использовалась библиотека Scikit-image (skimage), Matplotlib и Seaborn.

Изготовление образцов для исследования пористости

Было отобрано 60 различных сочетаний мощности P , скорости V и высоты слоя h для изготовления образцов-кубов. С целью экономии машинного

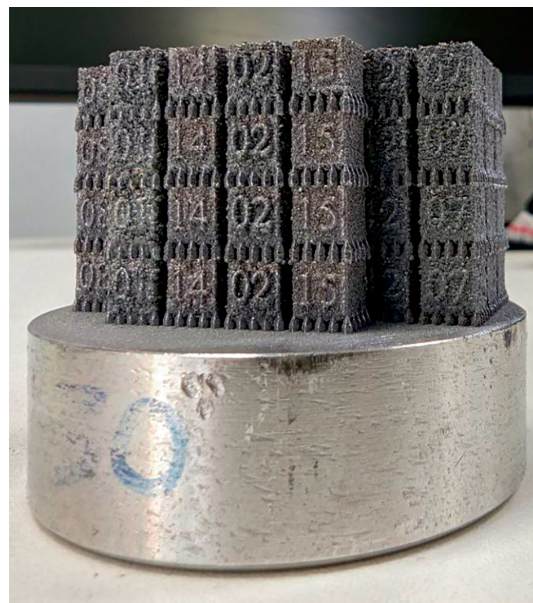


Рис. 1. Предложенное размещение 120 образцов на платформе установки AddSol D50

времени, расходуемого инертного газа и порошкового материала было предложено размещение (компоновка) образцов друг над другом с печатью промежуточного поддерживающего материала высотой 1 мм между ними.

Для организации параллельного проведения исследований на поперечных шлифах и с привлечением методов компьютерной томографии (КТ) изготовляли по два образца для каждого набора параметров. Таким образом, было получено 120 образцов (рис. 1).

Предложенное размещение образцов позволяет исследовать по два образца за один снимок рентгеновской компьютерной томографии (РКТ) (рис. 2). С учетом экономии времени на установку образца и калибровку оборудования время анализа результатов эксперимента сокращается до 30–50 минут (в 2–2,5 раза) на один образец-куб.



Рис. 2. Пример установки образцов в зажим томографа Nordson DAGE N500 XD7600NT Ruby

Таблица 2

Параметры образцов, изготовленных для исследования пористости в томографе

№ башни	Мощность излучения, Вт	Скорость сканирования, мм/с	Энерговклад, Дж/мм ³		
			<i>h</i> = 50 мкм	<i>h</i> = 70 мкм	<i>h</i> = 90 мкм
3	325	900	150,5	150,5	150,5
6	350	300	486,1	486,1	486,1
8	350	900	162,0	162,0	162,0
10	350	1500	97,2	97,2	97,2
13	375	900	173,6	173,6	173,6

Для дополнительной экономии времени, затрачиваемого на этот этап, были исследованы образцы с энерговкладом в диапазоне от 32 до 486 Дж/мм³, что составляет 92,5% интервала параметров изготовленных образцов (табл. 2).

Данные, полученные методом томографии, были проанализированы с помощью разработанного программного компонента экспресс-анализа объемных образцов. Для образцов, выращенных по предложенным векторам технологических параметров (табл. 2), были изготовлены шлифы, изученные с помощью сканирующего электронного микроскопа. Таким образом, подготовлена библиотека изображений морфологии микроструктуры образцов, охватывающая 41,6% интервала всех

допустимых параметров или 92,5% интервала параметров, дающих непрерывный единичный трек при селективной лазерной плавке металлопорошковой композиции сплава AlSi10Mg на отечественной установке Addsol D50.

Разработка программного компонента экспресс-анализа пористости образцов

Исходным материалом для работы программы-обработчика являются снимки в формате «.raw». Ниже представлена логика реализации программного компонента и схема алгоритма его работы (рис. 3).

После импорта необходимых библиотек и модулей Python (imageProcessor, Pandas, OS, Matplotlib

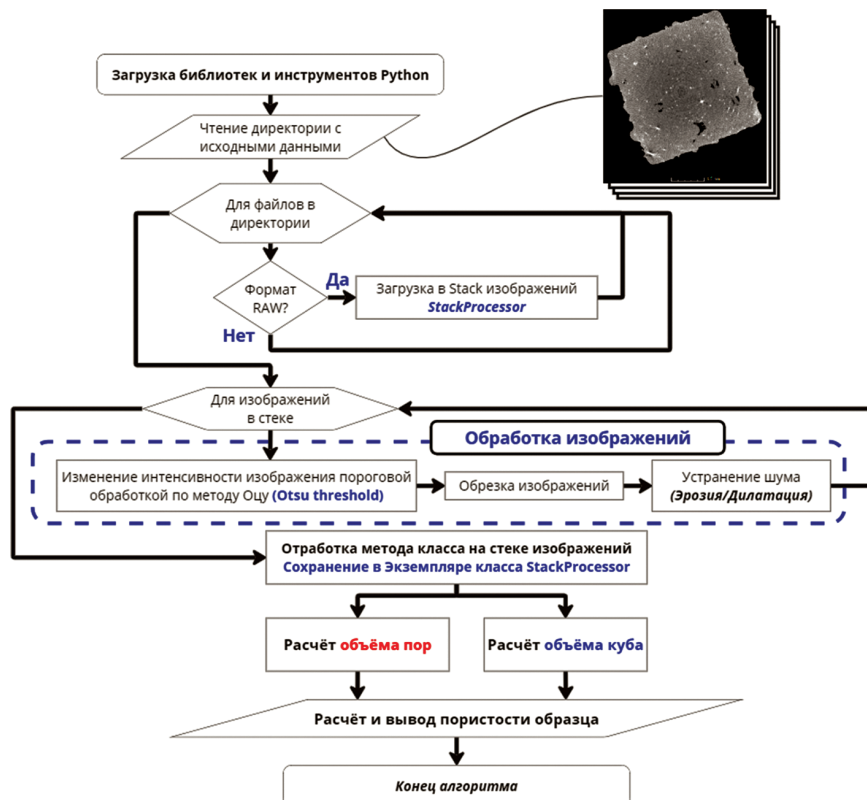


Рис. 3. Блок-схема алгоритма программного компонента

и NumPy) программный модуль запрашивает адрес директории с raw-файлами, полученными с помощью РКТ. Файл сохраняется в переменной input_path. Дополнительно указываются ширина и высота изображений формата “.raw” в переменных width и height.

Создается пустая таблица формата DataFrame с названием df_towers, которая будет использоваться для хранения результатов анализа каждого образца кубика. Каждая строка таблицы представляет один образец и содержит информацию об объеме его пор, объеме всего куба и относительной плотности.

Программа начинает итерацию (последовательный перебор) по всем файлам в указанном каталоге input_path. Для каждого файла с расширением «.raw» (предполагается, что это данные КТ) проводится набор операций, описанных в классах StackReader, ImageProcessor и StackProcessor: соответственно чтение КТ-снимка, обработка изображений и обработка стека изображений, при-

надлежащих одному кубу. В первую очередь в стек (экземпляр класса StackProcessor) выгружаются все изображения, принадлежащие одному образцу. Далее работа проводится уже внутри стека. Каждый следующий в стеке КТ-снимок загружается и бинаризуется с помощью пороговой обработки – используется метод Отцу для получения порогового значения (рис. 4).

Лишняя площадь снимка (черные фрагменты изображения вокруг слоя куба) отрезаются с помощью ограничивающего прямоугольника. Связанные белые участки куба на изображении маркируются с помощью функции skimage.Label(). Маркировка (labeling) позволяет выделить отдельные площади бинаризованного изображения, относящиеся к кубу без пор, и посчитать их площадь, необходимую для определения объема синтезированного материала (рис. 5,а). Точно таким же образом маркируются и области, которые относятся к порам в каждом отдельном сечении (рис. 5,б).

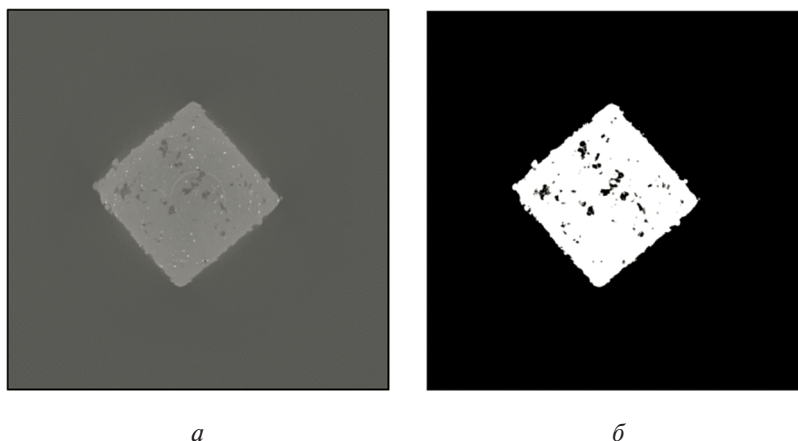


Рис. 4. Пример обработки одного из КТ-снимков куба с помощью метода Отцу: до (а) и после (б) бинаризации

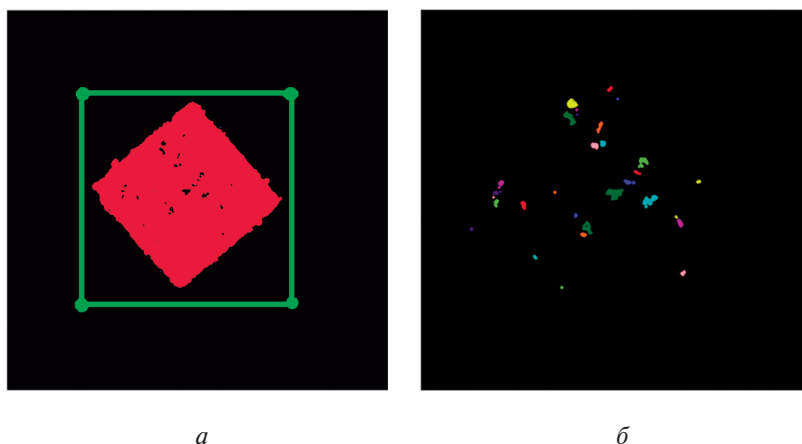


Рис. 5. Работа с бинаризованным изображением куба: а – обрезка и маркировка областей; б – выделенные сегменты, относящиеся к порам образца

После завершения процедуры с отдельным слоем-картинкой стека, процесс повторяется, пока алгоритм не пройдет весь стек КТ-снимков. Результаты сохраняются, определяется относительная плотность образца и выводится в таблицу Microsoft Excel, где с ней уже работает оператор или инженер-технолог установки аддитивного производства.

После томографии средний размер стека по одному образцу занимает 2 ГБ памяти на жестком диске компьютера. Анализ такого стека с помощью разработанного программного компонента экспресс-анализа объемных образцов позволил оперативно установить пористость образцов – обработка 5 стеков (8000 срезов с шагом 12,5 мкм) заняла около 24 мин.

Анализ результатов исследований

Результатом обработки в программном компоненте экспресс-анализа объемных образцов стали систематизированные значения пористости образцов (табл. 3).

Исследованные образцы обладают относительной плотностью от 88,6 до 99,7%. Образцом с максимальной пористостью стал куб из серии

№ 10 (350 Вт, 1500 мм/с) с высотой слоя 90 мкм – его пористость составила 11,4%. Образцом с самой высокой относительной плотностью стал куб из ряда № 3 (325 Вт, 900 мм/с) с высотой слоя 30 мкм.

Полученные значения позволяют выделить три вектора параметров технологического процесса СЛП (табл. 4) для дальнейшей работы – печати образцов для механических испытаний.

Анализ данных из открытых источников позволяет заключить, что относительная плотность образцов не менее 97% обеспечивает высокую воспроизводимость результатов по физико-механическим характеристикам (для предела прочности – не менее 270 МПа). Таким образом, при реализации СЛП возможно использование дополнительных режимов с параметрами (табл. 5), обеспечивающими баланс между более высокой скоростью синтеза (за счет увеличения высоты слоя) и механическими характеристиками.

Результаты механических испытаний (табл. 6) показывают, что у образцов для испытаний на растяжение, которые изготовлены по параметрам, обеспечивающим пористость не выше 3%, и получены по установленным технологическим режимам СЛП, среднее значение предела прочности не опускается

Таблица 3
Результаты исследования пористости объемных образцов

№ куба	Мощность, Вт	Скорость, мм/с	Энерговклад, Дж/мм ³	Пористость	Относительная плотность
10.1	350	1500	97,2	0,30%	99,50%
10.2	350	1500	58,3	4,29%	95,71%
10.3	350	1500	41,7	6,69%	93,31%
10.4	350	1500	32,4	11,22%	88,78%
13.1	375	900	173,6	3,34%	96,66%
13.2	375	900	104,2	3,68%	96,32%
13.3	375	900	74,4	4,10%	95,90%
13.4	375	900	57,9	6,69%	93,31%
3.1	325	900	150,5	0,50%	99,70%
3.2	325	900	90,3	2,22%	97,78%
3.3	325	900	64,5	3,85%	96,15%
3.4	325	900	50,2	5,86%	94,14%
6.1	350	300	486,1	3,68%	96,32%
6.2	350	300	291,7	3,85%	96,15%
6.3	350	300	208,3	2,48%	97,52%
6.4	350	300	162,0	2,85%	97,15%
8.1	350	900	162,0	1,15%	98,85%
8.2	350	900	97,2	2,99%	97,01%
8.3	350	900	69,4	5,30%	94,70%
8.4	350	900	54,0	6,76%	93,24%

Таблица 4

Образцы, выбранные по относительной плотности выше 99%

№	Мощность, Вт	Вектор технологических параметров			Относительная плотность, %
		Скорость сканирования, мм/с	Высота слоя, мкм	Шаг штриховки, мкм	
10.1	350	1500	30	80	97,222
3.1	325	900			150,463
8.1	350	900			162,037

Таблица 5

Образцы, выбранные по относительной плотности выше 97% (но ниже 99%)

№	Мощность, Вт	Вектор технологических параметров			Относительная плотность, %
		Скорость сканирования, мм/с	Высота слоя, мкм	Шаг штриховки, мкм	
6.3	350	300	70	80	208,333
6.4	350	300	90		162,037
8.2	350	900	50		97,22
3.2	325	900	50		90,278

Таблица 6

Механические свойства образцов, выращенных по отобраным параметрам

№	Вектор параметров		Относительная плотность	Механические характеристики		
	[мощность, Вт; скорость мм/с; высота слоя, мкм]	Энерговклад, Дж/мм ³		Предел прочности, МПа	Предел текучести, МПа	Среднее относительное удлинение
10.1	[350; 1500; 30]	97,222	99,5%	$\frac{318,2 - 326,9}{321,7}$	$\frac{235,5 - 242,8}{238,8}$	1,78%
3.1	[325; 900; 30]	150,463	99,7%	$\frac{317,8 - 327,2}{323,0}$	$\frac{225,6 - 236,2}{230,3}$	2,65%
8.1	[350; 900; 30]	162,037	98,85%	$\frac{319,4 - 324,4}{320,9}$	$\frac{240,3 - 246,3}{242,9}$	2,06%
6.3	[350; 300; 70]	208,333	97,52%	$\frac{295,5 - 300,3}{297,3}$	$\frac{206,8 - 212,0}{210,3}$	4,80%
3.2	[325; 900; 50]	90,278	97,78%	$\frac{295,3 - 300,6}{297,8}$	$\frac{218,5 - 232,9}{226,1}$	5,91%
8.2	[350; 900; 50]	97,222	97,01%	$\frac{281,3 - 284,5}{282,6}$	$\frac{211,0 - 225,3}{219,7}$	5,44%
6.4	[350; 300; 90]	162,037	97,15%	$\frac{286,8 - 297,4}{292,8}$	$\frac{200,8 - 206,3}{203,4}$	6,57%

ниже 282,6 МПа, среднее значение предела текучести – не ниже 203,4 МПа.

Результаты сканирующей электронной микроскопии образцов с минимальной пористостью – ниже 1% (3.1 и 10.1 в табл. 6) – показывают сплошную однородную дендритно-ячеистую микроструктуру с незначительной ориентировкой зерен в направлении роста образцов. Средний размер зерен не превышает 1–2 мкм, что видно на снимках, полученных СЭМ (рис. 6). Такая микроструктура свидетельствует о высокой прочности изделий, изготовленных по соответствующим параметрам, что подтверждается результатами испытаний на растяжение.

С другой стороны, образцы с более высокой пористостью (6.3 и 3.2 в табл. 6) характеризуются увеличенным размером зерен – до 2–4 мкм. На шлифах заметна преимущественная ориентация зерен в направлении выращивания (рис. 7).

Образцы с такой микроструктурой обладают меньшей прочностью, но более высокой пластичностью. Увеличенная протяженность зерен и их ориентация обеспечивают более высокие значения

относительного удлинения в направлении роста, что также подтверждено результатами механических испытаний.

Увеличение высоты слоя порошка при выращивании изделий требует увеличения размеров ванны расплава, что обуславливает уменьшение температурных градиентов в процессе лазерной экспозиции порошка сплава AlSi10Mg и, как следствие, способствует укрупнению зерен твердого раствора на основе алюминия (α – Al). Фаза кремния содержится преимущественно в эвтектике (Al + Si), окаймляющей зерна α – Al (светлые области на рис. 6 и 7).

С помощью системы энергодисперсионной спектроскопии (ЭДС) получены элементные карты состава исследуемых участков поверхности шлифа (табл. 7). Они позволяют определить номенклатуру состава, абсолютное количество атомов, концентрацию и массовую долю каждого отдельного компонента на снимке.

Полученные данные могут быть полезны при дальнейшем изучении влияния технологических параметров процесса СЛП на распределение струк-

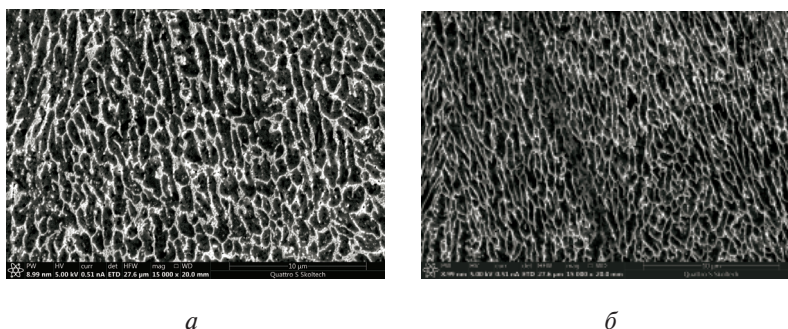


Рис. 6. СЭМ-снимки микроструктуры образцов с пористостью не выше 1%:

a – образец 3.1: 325 Вт, 900 мм/с, слой 30 мкм, 50,5 Дж/мм³, относительная плотность – 99,7%.

Предел прочности (средний) – 323,0 МПа; относительное удлинение (среднее) – 2,65%.

б – образец 10.1: 350 Вт, 1500 мм/с, слой 30 мкм, 97,2 Дж/мм³, относительная плотность – 99,5%.

Предел прочности (средний) – 321,7 МПа; относительное удлинение (средний) – 1,78%

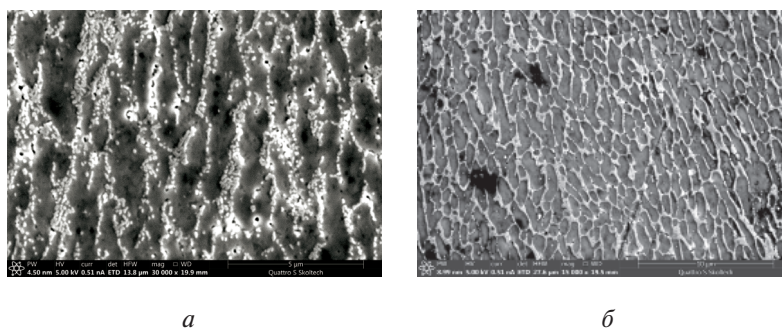


Рис. 7. СЭМ-снимки микроструктуры образцов с пористостью не свыше 3%:

a – образец 6.3: 350 Вт, 300 мм/с, слой 70 мкм, 208,3 Дж/мм³, относительная плотность – 97,52%.

Предел прочности (средний) – 297,3 МПа; относительное удлинение (среднее) – 4,80%.

б – образец 3.2: 325 Вт, 900 мм/с, слой 50 мкм, 90,3 Дж/мм³, относительная плотность – 97,78%.

Предел прочности (средний) – 297,8 МПа; относительное удлинение (среднее) – 5,91%

Таблица 7

Элементная карта состава участка поверхности шлифа образца № 10.1

Элемент	Атомный номер	Нетто	Доля компонента (норм.), % по массе	Концентрация компонента, % от количества атомов	Абсолютная погрешность (1 σ), %	Относительная погрешность, (1 σ), %
Al	13	1315558	78,69	79,27	3,38	4,79
Si	14	143391	20,60	19,93	0,88	4,78
Mg	12	14262	0,71	0,79	0,06	9,16

турных составляющих в выращиваемых образцах и изделиях.

Определение эффективности предлагаемой методики

Для оценки эффективности разработанных программных компонентов автоматического анализа результатов экспериментов и эффекта от предложенных конструктивно-технологических решений по организации работ был дополнительно проведен анализ результатов вручную и оценено время исследования объемных образцов без оптимизации компоновки.

Применение предложенного конструктивно-технологического решения (компоновки) при печати объемных образцов друг над другом позволило изготовить четыре партии образцов в одном запуске установки Addsol D50, разместив их на небольшой платформе диаметром 50 мм. четыре запуска установки позволили бы изготовить такое же количество образцов за 7 ч работы вместо 5 ч работы установки. Основной эффект компоновки достигается благодаря более удачной установке образцов в зажим рентгеновского компьютерного томографа. Особенности камеры РКТ позволяют производить съемку двух образцов за один раз, что существенно (в три раза) сокращает время на получение снимков внутренней структуры образца.

Если рассматривать полученные результаты только с точки зрения анализа данных РКТ, то применение программных средств экспресс-анализа позволяет сократить время анализа на 80 мин (7%). Особое значение приобретает использование разработанного отечественного программного комплекса для обработки RAW-данных компьютерной томографии. Это не только обеспечивает независимость от иностранных программных решений, таких как MuVGL, но и позволяет полностью понимать и контролировать процесс обработки данных, что является критически важным для обеспечения большей точности и надежности результатов в будущих работах. Представленные на рис. 8 диаграммы для конкретной установки и порошкового матери-

ала позволяют оценить эффективность предлагаемой методики и конструктивно-технологических решений в рамках всего цикла работ по поиску эффективного набора параметров СЛП (рис. 8).

При этом исследуется 92,5% от потенциально эффективных векторов технологических параметров СЛП. Это позволяет уверенно утверждать, что при попытке ускорить процесс опытных работ и сократить программу экспериментов в соответствии с предлагаемой методикой инженером-технологом не будет пропущен эффективный набор технологических параметров процесса печати.

Автоматизация процесса подбора параметров позволяет снизить влияние человеческого фактора и риски возникновения ошибок, которые вызваны необходимостью выполнения анализа значительных объемов данных, полученных в ходе выращивания и исследования большого количества образцов. В перспективе это даст возможность либо расширить диапазон исследований (в случае, если возможный на конкретном оборудовании диапазон параметров это позволяет), либо уменьшить шаг изменения параметров, что увеличивает число образцов для анализа и повышает точность поиска.

Уменьшение времени, затрачиваемого на экспериментальные циклы в рамках общего НИОКТР аддитивного производства, позволяет быстрее перейти к процессу серийного аддитивного производства изделий, что особенно важно для оперативного и экономически эффективного внедрения наукоемких изделий в высокопроизводительных секторах промышленности, таких как авиационная и ракетно-космическая отрасли.

Выводы

По результатам исследований разработан программный компонент экспресс-анализа объемных образцов, позволяющий определить наиболее эффективные с точки зрения сплошности структуры образцы и соответствующие им векторы технологических параметров процесса СЛП.

В результате экспериментальных исследований (в том числе и с применением разработанного программного компонента):

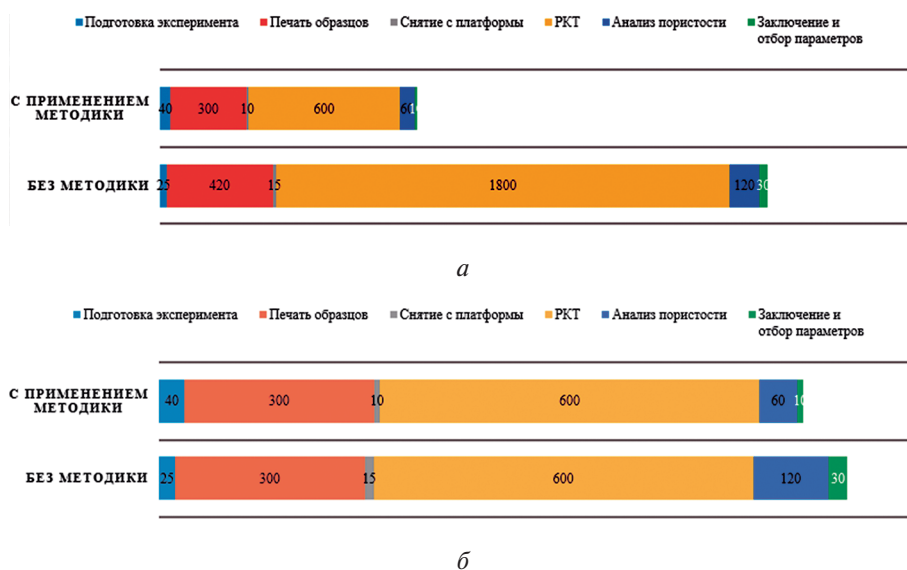


Рис. 8. Сравнение времени, затрачиваемого на цикл экспериментов по поиску эффективного набора параметров процесса СЛП: а – эффект от применения оптимизированной компоновки и программных средств; б – эффект от применения только программных средств

1. Предложено компоновочное решение, позволяющее синтезировать 120 образцов-кубов при широком варьировании параметров процесса СЛП в рамках одного запуска установки Addsol D50. Предложенное решение позволяет значительно (до 200%) ускорить процесс синтеза объемных образцов на установках с малой областью построения (до 50 мм).

2. Для исследованной металлопорошковой композиции сплава AlSi10Mg и отечественной установки Addsol D50 определены параметры технологического процесса СЛП (325 Вт; 900 мм/с; 30 мкм) для достижения однородной мелкозернистой (1–2 мкм) микроструктуры, а также относительной плотности образцов 99,7%, предела прочности на разрыв 341,5 МПа и относительного удлинения 2,65%.

Получены данные механических испытаний образцов на растяжение, изготовленных по отобраным технологическим параметрам – мощности излучения, скорости сканирования и высоте слоя при печати. Приведено сопоставление механических свойств и параметров процесса СЛП.

Список источников

1. Alberth S. Forecasting technology costs via the experience curve—myth or magic? // *Technological Forecasting and Social Change*. 2008. Vol. 75. No. 7, pp. 952–983. DOI: 10.1016/j.techfore.2007.09.003
2. Миронов Д.Р., Асылгузин Т.Р., Скорынина С.Е. Обзор рынка аддитивных технологий // *Интеллектуальная собственность и инновации: Сборник трудов X международной научно-практической конференции*

(26 апреля 2018; Екатеринбург). Екатеринбург: Изд-во УрФУ, 2018. С. 132–137.

3. Селов В.Г., Кокарева В.В., Чупин П.В., Дмитриев Д.Н. Проектирование технологического процесса селективного лазерного сплавления жаропрочного сплава для изготовления горелочного устройства // *Вестник Московского авиационного института*. 2023. Т. 30. № 1. С. 131–141. DOI: 10.34759/vst-2023-1-131-141
4. Дмитриева М.О., Мельников А.А., Носова Е.А., Кяримов Р.Р., Кржевицкий Г.Е. Исследование формирования микроструктуры титанового сплава ВТ6 при изготовлении крыльчатки компрессора малоразмерного газотурбинного двигателя методами аддитивных технологий // *Вестник Московского авиационного института*. 2023. Т. 30. № 2. С. 196–203. DOI: 10.34759/vst-2023-2-196-203
5. Баякин А.В., Скуратов Д.Л., Хаймович А.И., Олейник М.А. Применение прямого лазерного сплавления металлических порошков из жаропрочных сплавов в двигателестроении // *Вестник Московского авиационного института*. 2021. Т. 28. № 3. С. 202–217. DOI: 10.34759/vst-2021-3-202-217
6. Шувалова А.М., Филимонов А.С., Галиновский А.Л. Исследование возможности применения технологии селективного лазерного спекания для изготовления аэродинамических моделей // *Вестник Московского авиационного института*. 2023. Т. 30. № 2. С. 46–50. DOI: 10.34759/vst-2023-2-46-50
7. Huang R., Riddle M.E., Graziano D. et al. Environmental and economic implications of distributed additive manufacturing: The case of injection mold tooling // *Journal of Industrial Ecology*. 2017. Vol. 21. No. S1, pp. 130–143. DOI: 10.1111/jiec.12641

8. Agrawal R. Sustainable design guidelines for additive manufacturing applications // *Rapid Prototyping Journal*. 2022. Vol. 28. No. 7, pp. 1221–1240. DOI: 10.1108/RPJ-09-2021-0251
9. Алексеев В.В., Бобров А.Н., Калугин К.С. Исследование комплексных прочностных характеристик моделей газовых турбин, изготовленных аддитивными методами // *Вестник Московского авиационного института*. 2019. Т. 26. № 2. С. 43–50.
10. Чемодуров А.Н. Применение аддитивных технологий в производстве изделий машиностроения // *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*. 2016. № 8–2. С. 210–217.
11. Song B., Dong S., Liao H., Coddet C. Process parameter selection for selective laser melting of Ti6Al4V based on temperature distribution simulation and experimental sintering // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2012. Vol. 61, pp. 967–974. DOI: 10.1007/s00170-011-3776-6
12. Абрамов И.В., Абрамов В.И. Перспективы и проблемы использования аддитивных технологий в России в условиях антироссийских санкций // *Техника и технология современных производств: Сборник статей III Всероссийской научно-практической конференции (25–26 апреля 2022; Пенза)*. Пенза: Изд-во Пензенский ГАУ, 2022. С. 3–7.
13. Абрамов И.В., Лукина Ю.Д., Абрамов В.И. Обеспечение развития аддитивных технологий в России в условиях санкций // *Russian Economic Bulletin*. 2022. Т. 5. № 4. С. 198–204.
14. Ripetskii A.V., Brykin V.A., Mikhailova E.V. et al. Automation of the single-track study for L-PBF additive manufacturing processes (for AlSi10Mg powder) // XVI International Scientific and Practical Conference “State and Prospects for the Development of Agribusiness - INTERAGROMASH 2023” (01–05 марта 2023; Rostov-on-Don, Russia). – Rostov-on-Don: EDP Sciences, 2023. Vol. 413: 04016. DOI: 10.1051/e3sconf/202341304016
15. Kempen K., Yasa E., Thijs L. et al. Microstructure and mechanical properties of Selective Laser Melted 18Ni-300 steel // *Physics Procedia*. 2011. Vol. 12. Part A, pp. 255–263. DOI: 10.1016/j.phpro.2011.03.033
16. Trevisan F., Calignano F., Lorusso M. et al. On the selective laser melting (SLM) of the AlSi10Mg alloy: process, microstructure, and mechanical properties // *Materials*. 2017. Vol. 10. No. 1. DOI: 10.3390/ma10010076
17. Yadroitsev I., Bertrand P., Smurov I. Parametric analysis of the selective laser melting process // *Applied Surface Science*. 2007. Vol. 253. No. 19, pp. 8064–8069. DOI: 10.1016/j.apsusc.2007.02.088
18. Yadroitsev I., Gusarov A.V., Yadroitsava I. et al. Single track formation in selective laser melting of metal powders // *Journal of Materials Processing Technology*. 2010. Vol. 210. No. 12, pp. 1624–1631. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2010.05.010
19. Гришин Д.В. Разработка эффективных форм кадрового обеспечения производственного процесса в авиационной отрасли // *Вестник Московского авиационного института*. 2018. Т. 25. № 1. С. 209–219.
20. Хачатурян К.С., Пономарева С.В., Шведов А.Ю. Стратегическое планирование внедрения прорывных технологий в ракетно-космическую промышленность // *Информационно-экономические аспекты стандартизации и технического регулирования*. 2019. № 2 (48). URL: http://iea.gosinfo.ru/ieastr_2019_02/#2019_02_Page15
21. Найм У.А.М., Ермаков Д.Н., Мельников В.М., Казенков О.Ю. Перспективы применения аддитивных технологий в России в отраслевом ракурсе (на примере авиационной промышленности) // *Computational nanotechnology*. 2022. Т. 9. № 2. С. 56–66. DOI: 10.33693/2313-223X-2022-9-2-56-66

References

1. Alberth S. Forecasting technology costs via the experience curve—myth or magic? *Technological Forecasting and Social Change*, 2008, vol. 75, no. 7, pp. 952–983. DOI: 10.1016/j.techfore.2007.09.003
2. Mironov D.R., Asylguzhin T.R., Skorynina S.E. *Materialy X Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii “Intellektual'naya sobstvennost' i innovatsii” (26 April 2018; Ekaterinburg)*. Ekaterinburg, UrFU, 2018, pp. 132–137.
3. Smelov V.G., Kokareva V.V., Chupin P.V., Dmitriev D.N. Technological process design for selective laser fusion of a heat-resistant alloy for the burner device manufacturing. *Aerospace MAI Journal*, 2023, vol. 30, no. 1, pp. 131–141. DOI: 10.34759/vst-2023-1-131-141
4. Dmitrieva M.O., Mel'nikov A.A., Nosova E.A., Kyari-mov R.R., Krzhevitskii G.E. Studying the VT16 titanium alloy microstructure forming while compressor impeller manufacturing of the small-sized gas turbine engine by additive technologies methods. *Aerospace MAI Journal*, 2023, vol. 30, no. 2, pp. 196–203. DOI: 10.34759/vst-2023-2-196-203
5. Balyakin A.V., Skuratov D.L., Khaimovich A.I., Oleinik M.A. Direct laser fusion application for powders for heat resistant alloys in engine building. *Aerospace MAI Journal*, 2021, vol. 28, no. 3, pp. 202–217. DOI: 10.34759/vst-2021-3-202-217
6. Shuvalova A.M., Filimonov A.S., Galinovskii A.L. Studying the possibility of selective laser sintering technology application for aerodynamic models manufacturing. *Aerospace MAI Journal*, 2023, vol. 30, no. 2, pp. 46–50. DOI: 10.34759/vst-2023-2-46-50
7. Huang R., Riddle M.E., Graziano D. et al. Environmental and economic implications of distributed additive manufacturing: The case of injection mold tooling. *Journal of Industrial Ecology*, 2017, vol. 21, no. S1, pp. 130–143. DOI: 10.1111/jiec.12641

8. Agrawal R. Sustainable design guidelines for additive manufacturing applications. *Rapid Prototyping Journal*, 2022, vol. 28, no. 7, pp. 1221-1240. DOI: 10.1108/RPJ-09-2021-0251
9. Alekseev V.V., Bobrov A.N., Kalugin K.S. Study of complex strength characteristics of gas turbine odels fabricated by additive methods. *Aerospace MAI Journal*, 2019, vol. 26, no. 2, pp. 43-50.
10. Chemodurov A.N. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki*, 2016, no. 8-2, pp. 210-217.
11. Song B., Dong S., Liao H., Coddet C. Process parameter selection for selective laser melting of Ti6Al4V based on temperature distribution simulation and experimental sintering. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2012, vol. 61, pp. 967-974. DOI: 10.1007/s00170-011-3776-6
12. Abramov I.V., Abramov V.I. Perspektivy i problemy ispol'zovaniya additivnykh tekhnologiy v Rossii v usloviyakh antirossiyskikh sanktsiy. *Tekhnika i tekhnologiya sovremennykh proizvodstv: sbornik statey III Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii (25–26 April 2022; Penza)*. Penza, Penzenskii GAU, 2022. pp. 3–7.
13. Abramov I.V., Lukina Yu.D., Abramov V.I. *Russian Economic Bulletin*, 2022, vol. 5, no. 4, pp. 198-204.
14. Ripetskii A.V., Brykin V.A., Mikhailova E.V. et al. Automation of the single-track study for L-PBF additive manufacturing processes (for AlSi10Mg powder). *XVI International Scientific and Practical Conference "State and Prospects for the Development of Agribusiness - INTERAGROMASH 2023"* (01–05 March 2023; Rostov-on-Don, Russia). Rostov-on-Don, EDP Sciences, 2023, vol. 413: 04016. DOI: 10.1051/e3sconf/202341304016
15. Kempen K., Yasa E., Thijs L. et al. Microstructure and mechanical properties of Selective Laser Melted 18Ni-300 steel. *Physics Procedia*, 2011, vol. 12, part A, pp. 255-263. DOI: 10.1016/j.phpro.2011.03.033
16. Trevisan F., Calignano F., Lorusso M. et al. On the selective laser melting (SLM) of the AlSi10Mg alloy: process, microstructure, and mechanical properties. *Materials*, 2017, vol. 10, no. 1. DOI: 10.3390/ma10010076
17. Yadroitsev I., Bertrand P., Smurov I. Parametric analysis of the selective laser melting process. *Applied Surface Science*, 2007, vol. 253, no. 19, pp. 8064-8069. DOI: 10.1016/j.apsusc.2007.02.088
18. Yadroitsev I., Gusarov A.V., Yadroitsava I. et al. Single track formation in selective laser melting of metal powders. *Journal of Materials Processing Technology*, 2010, vol. 210, no. 12, pp. 1624-1631. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2010.05.010
19. Grishin D.V. Development of effective forms of production process stuffing in aircraft building industry. *Aerospace MAI Journal*, 2018, vol. 25, no. 1, pp. 209-219.
20. Khachatryan K.S., Ponomareva S.V., Shvedov A.Yu. *Informatsionno-ekonomicheskiye aspekty standartizatsii tekhnicheskogo regulirovaniya*, 2019, no 2 (48). URL: http://iea.gosinfo.ru/ieastr_2019_02/#2019_02_Page15
21. Naym U.A.M., Ermakov D.N., Mel'nikov V.M., Kazenkov O.Yu. *Computational nanotechnology*, 2022, vol. 9, no. 2, pp. 56–66. DOI: 1033693/2313-223X-2022-9-2-56-66

Статья поступила в редакцию 12.01.2024; одобрена после рецензирования 12.03.2024; принята к публикации 14.03.2024.
The article was submitted on 12.01.2024; approved after reviewing on 12.03.2024; accepted for publication on 14.03.2024.