

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом:

Брыкин В.А., Рипецкий А.В., Коробов К.С. Экспресс-анализ результатов входного контроля металлопорошковой композиции AlSi10Mg // Вестник ПНИПУ. Машиностроение. Материаловедение. – 2023. – Т. 25, № 4. – С. 41–50. DOI: 10.15593/2224-9877/2023.4.04

Please cite this article in English as:

Brykin V.A., Ripetsky A.V., Korobov K.S. Express analysis of incoming quality control results for AlSi10Mg metal powder composition. *Bulletin of PNRPU. Mechanical engineering, materials science*. 2023, vol. 25, no. 4, pp. 41-50. DOI: 10.15593/2224-9877/2023.4.04

ВЕСТНИК ПНИПУ. Машиностроение, материаловедение
Т. 25, № 4, 2023
Bulletin PNRPU. Mechanical engineering, materials science
<http://vestnik.pstu.ru/mm/about/inf/>

Научная статья

DOI: 10.15593/2224-9877/2023.4.04

УДК 621.793

В.А. Брыкин, А.В. Рипецкий, К.С. Коробов

Московский авиационный институт (Национальный исследовательский университет),
Москва, Российская Федерация

ЭКСПРЕСС-АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ВХОДНОГО КОНТРОЛЯ
МЕТАЛЛОПОРОШКОВОЙ КОМПОЗИЦИИ ALSi₁₀Mg

Представлены результаты экспериментальных исследований распределения размеров частиц металлопорошковой композиции AlSi10Mg. Проведен статистический контроль гранулометрического состава двух партий порошка, просеянного через сита с размером ячейки 30 и 60 мкм соответственно. По подготовленным изображениям двух просевов, полученных с помощью сканирующего электронного микроскопа (СЭМ) проведён экспресс-анализ размеров частиц порошка. Разработан программный компонент экспресс-анализа результатов входного контроля порошка по снимкам, полученным с помощью СЭМ. Представлена поэтапная схема работы программного компонента. Экспресс-анализ каждой из двух партий порошка, полученный с помощью разрабатываемой программы, позволяет визуализировать распределение гранул порошковой композиции по размерам частиц. Установлено нормальное одномодальное распределение. При увеличении размера ячейки сита с 30 до 60 мкм мода размера частиц порошка увеличивается примерно на 10 мкм (с 25,2 до 35,3 мкм), а 85-й процентиль – с 29,3 до 57,4 мкм. Представленные результаты позволяют более уверенно проводить опытно-технологические работы, связанные с прямым синтезом образцов и поиском оптимальных параметров процесса селективной лазерной плавки. Приведена оценка эффективности предлагаемого программного компонента в сравнении с ручным анализом СЭМ-изображений микроструктуры просеянного порошкового материала. Показано, что применение средств экспресс-анализа позволяет приблизительно на 24 % сократить время входного контроля партий порошкового материала по предлагаемой методике. Исходя из аппарата и методики исследования сделан вывод о повторяемости результатов и для большей выборки. Сделан вывод о возможности применения предложенного программного компонента в качестве альтернативы для других методов входного контроля (например, метода лазерной дифракции).

Ключевые слова: аддитивное производство, входной контроль, управление качеством, статистическое распределение, СЭМ, выращивание на порошковой подложке, экспресс-анализ, металлопорошковая композиция, AlSi10Mg, оптимизация технологических процессов.

V.A. Brykin, A.V. Ripetsky, K.S. Korobov

Moscow Aviation Institute (National Research University),
Moscow, Russian Federation

EXPRESS ANALYSIS OF INCOMING QUALITY CONTROL RESULTS FOR ALSi₁₀Mg METAL POWDER COMPOSITION

This paper presents the results of experimental investigations into the particle size distribution of the AlSi₁₀Mg metal powder composition. Statistical control of the granulometric composition of two powder batches, sieved through meshes of 30 and 60 μm respectively, was conducted. An express analysis of the powder particle sizes was performed using images from two sievings obtained through Scanning Electron Microscopy (SEM). A software component for the express analysis of incoming inspection results for powder, using SEM images, was developed and a step-by-step scheme of the software component operation is provided. The express analysis of each of the two powder batches, obtained using the developed program, enables the visualization of the powder composition granule distribution by particle size, revealing a normal unimodal distribution. When increasing the mesh cell size from 30 to 60 μm, the mode of the powder particle size increases by approximately 10 μm (from 25.2 to 35.3 μm), and the 85th percentile from 29.3 to 57.4 μm. The presented results facilitate more confident experimental-technological work related to the direct synthesis of samples and the search for optimal parameters of the Selective Laser Melting process. An evaluation of the efficiency of the proposed software component compared to manual analysis of SEM images of the sieved powder material microstructure is provided. It is demonstrated that the use of express analysis tools allows for approximately a 24 % reduction in the incoming inspection time of powder material batches using the proposed methodology. Based on the research apparatus and methodology, a conclusion about the repeatability of the results for a larger sample is made. A conclusion about the possibility of using the proposed software component as an alternative for other incoming inspection methods (e.g., laser diffraction method) is drawn.

Keywords: additive manufacturing, incoming quality control, quality management, statistical distribution, SEM (Scanning Electron Microscopy), powder bed fusion, express analysis, metal powder composition, AlSi₁₀Mg, technological process optimisation.

Введение

Современное состояние развития аддитивных технологий позволяет обеспечивать производство изделий сложных геометрических форм, конкурентные механические свойства, а также высокую экономическую эффективность процесса выращивания (особенно на этапе прототипирования) [1–7]. Для большинства актуальных технологий аддитивного производства изделий из металла исходное сырье для выращивания представляет собой металлопорошковую композицию – смесь гранул металлического порошка определенного гранулометрического состава и насыпной плотности [8–11]. Особенности процессов лазерной или электронно-лучевой плавки таких порошковых материалов позволяют синтезировать изделия сложных форм, не доступных для производства традиционными технологиями [12–15].

Развитие аддитивного производства в России в условиях санкционных ограничений стимулирует рост номенклатуры собственных металлопорошковых композиций для лазерной плавки [16–18]. Каждый материал, в свою очередь, требует поиска допустимых и эффективных параметров технологического процесса плавки. Тем не менее ещё до определения технологических параметров стабильность и воспроизводимость процесса обеспечивают свойства металлопорошковой композиции – гранулометрический состав, размер частицы и насыпная плотность порошка, которые определяются на этапе входного контроля [19–21].

Без средств автоматизации процесса анализа операции по контролю материала приходится проводить вручную инженеру-технологу, что значи-

тельно усложняет процесс опытных технологических работ в целом, повышая влияние человеческого фактора и затягивая общий процесс опытных технологических работ [22; 23]. Однако ряд существующих решений по автоматизации на данный момент является недоступным в силу санкционных ограничений [24; 25].

В связи с изложенным перспективным направлением исследований является усовершенствование процесса входного контроля металлопорошковых композиций аддитивного производства с использованием инструментов поддержки принятия технологических решений. Таким образом, разработка программных компонентов экспресс-анализа результатов входного контроля порошка, которая позволила бы устранить недостатки ручного контроля в условиях недоступности зарубежных программных комплексов, является актуальной задачей.

Целью настоящей работы является разработка научно-методического обеспечения автоматизированного анализа результатов входного контроля порошкового материала с целью обеспечения требуемого распределения гранул порошка по размерам и необходимой для процесса селективного лазерного плавления (СЛП) насыпной плотности материала.

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.

Таблица 1

Химический состав материала AlSi10Mg

Марка сплава	Содержание элементов, мас. %										
	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

Изображение микроструктуры порошкового материала во вторичных электронах получали с помощью сканирующего электронного микроскопа (СЭМ) TFS Quattro S (Thermo Fisher Scientific Inc., 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, NumPy и Seaborn.

Проведение экспериментов

В ходе исследования порошок был разделён на две партии и просеян через два сита с разным размером ячейки – 30 и 60 мкм. Каждая из партий была собрана и помещена на пластинку для дальнейшего изучения с помощью сканирующего электронного микроскопа.

Просев через сито с ячейкой 30 мкм (рис. 1) представлен 519 гранулами, средний диаметр – 24,135 мкм. Максимальный и минимальный диаметр элементов на СЭМ-снимке – 65,8 и 5,8 мкм соответственно.

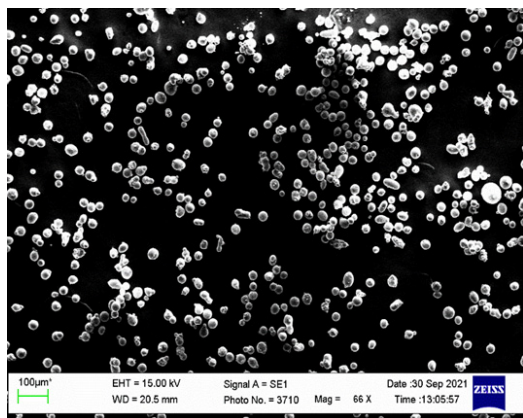


Рис. 1. СЭМ-снимок просева порошка AlSi10Mg через сито 30 мкм, увеличение – 100х, напряжение – 15 кВ

Просев через сито с ячейкой 60 мкм (рис. 2), в свою очередь, показывает более «грязную» картину. Помимо более крупных агломератов, на изображении представлены ещё артефакты, которые были отброшены в ходе обработки СЭМ-

снимков средствами разработанных программных инструментов.

Просев представлен 307 гранулами, средний диаметр – 39,868 мкм. Максимальный и минимальный диаметр элементов на СЭМ-снимке – 108,6 и 5,0 мкм соответственно.

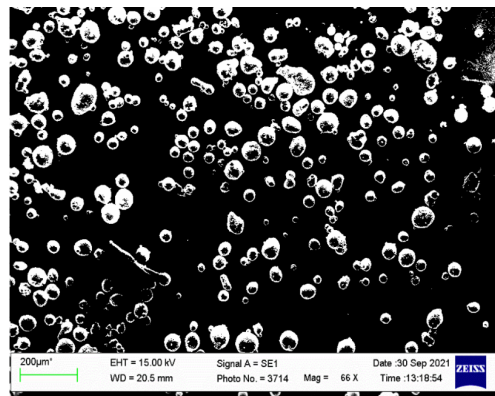


Рис. 2. СЭМ-снимок просева порошка AlSi10Mg через сито 60 мкм, увеличение – 100х, напряжение – 15 кВ

Подробный результат анализа изображений микроструктуры порошкового материала был осуществлен в разработанном средстве экспресс-анализа СЭМ-изображений.

Разработка программного компонента экспресс-анализа результатов входного контроля металлопорошковых композиций

Для реализации инструмента статистического контроля порошкового материала предложен программный компонент, основанный на бинаризации и анализе изображений, полученных с помощью СЭМ (рис. 3).

Обработка начинается с загрузки фотографии с помощью функции `io.imread` из библиотеки `skimage`. Она автоматически определяет тип изображения (PNG, JPG) и возвращает изображение в виде массива `numpy`, где каждый элемент соответствует пикселю изображения – в массив вносятся координаты пикселя и значения RGB-цветов пикселя.

RGB-изображение преобразуется в оттенки серого методом `rgb2gray` (`skimage.color`). Это происходит с помощью усреднения значения каналов RGB с учетом их весов, чтобы получить одно значение интенсивности для каждого пикселя.

Дальнейшая работа направлена на получение четкого и контрастного черно-белого изображения гранул порошка (белый цвет) на черном фоне. Сначала функция `exposure.rescale_intensity` (`skimage.exposure`) изменяет диапазон интенсивности изображения. Это устанавливает диапазон значений интенсивности для каждого пикселя от 0 до 255.

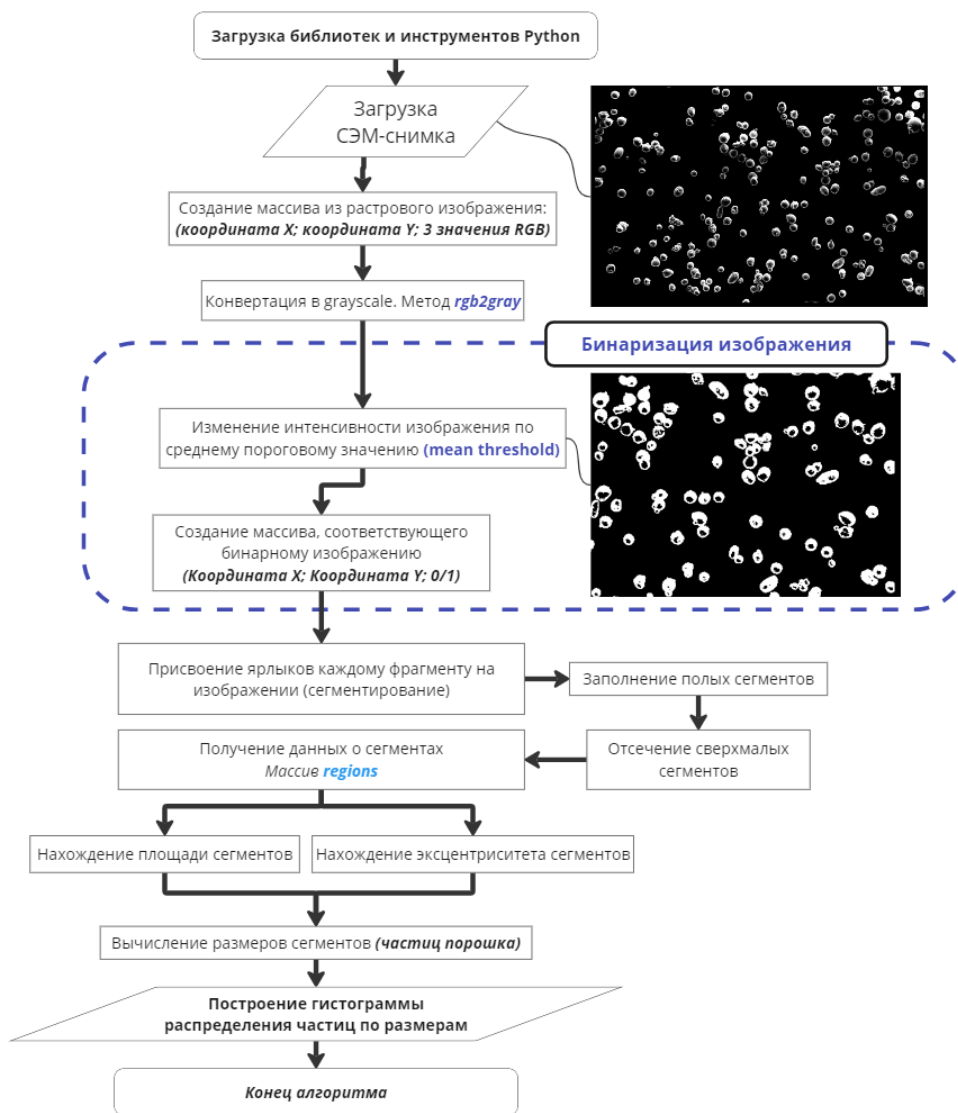


Рис. 3. Схема алгоритма программного компонента входного контроля

Поиск методов по улучшению контрастности выделения гранул порошка на черном фоне привёл к применению различных методов пороговой обработки изображений из библиотеки scikit-image для определения наиболее результативного метода бинаризации изображения (рис. 4). С точки зрения контрастности, чёткости изображения, а также сохранения деталей СЭМ-снимка был выбран метод среднего значения (mean threshold). По нему и была проведена бинаризация изображения.

Бинаризация позволяет произвести маркировку связанных областей (наборов пикселей) в изображении, которая, в свою очередь, даёт возможность работать с размерами областей-частиц напрямую.

Применение описанных инструментов и методов для обработки и анализа снимков порошка AlSi10Mg, полученных с помощью СЭМ, начинается с импорта изображений в формате PNG (рис. 5).

Изображение загружается и сохраняется в обработчик в переменной `img`. Эта переменная представляет собой массив из $i \times j$ элементов, где i – ширина изображения в пикселях, а j – его высота. Это изображение становится основой для всех последующих операций обработки.

Изображение преобразуется в оттенки серого с помощью функции `rgb2gray`, его интенсивность пересчитывается таким образом, чтобы она соответствовала диапазону `np.uint8` (значения от 0 до 255). Это делается для того, чтобы упростить последующую пороговую обработку и другие операции, которые требуют определенного диапазона интенсивности. После выполнения этих операций у обработчика готово изображение в оттенках серого с оптимизированным диапазоном интенсивности, готовое к пороговой обработке и бинаризации.

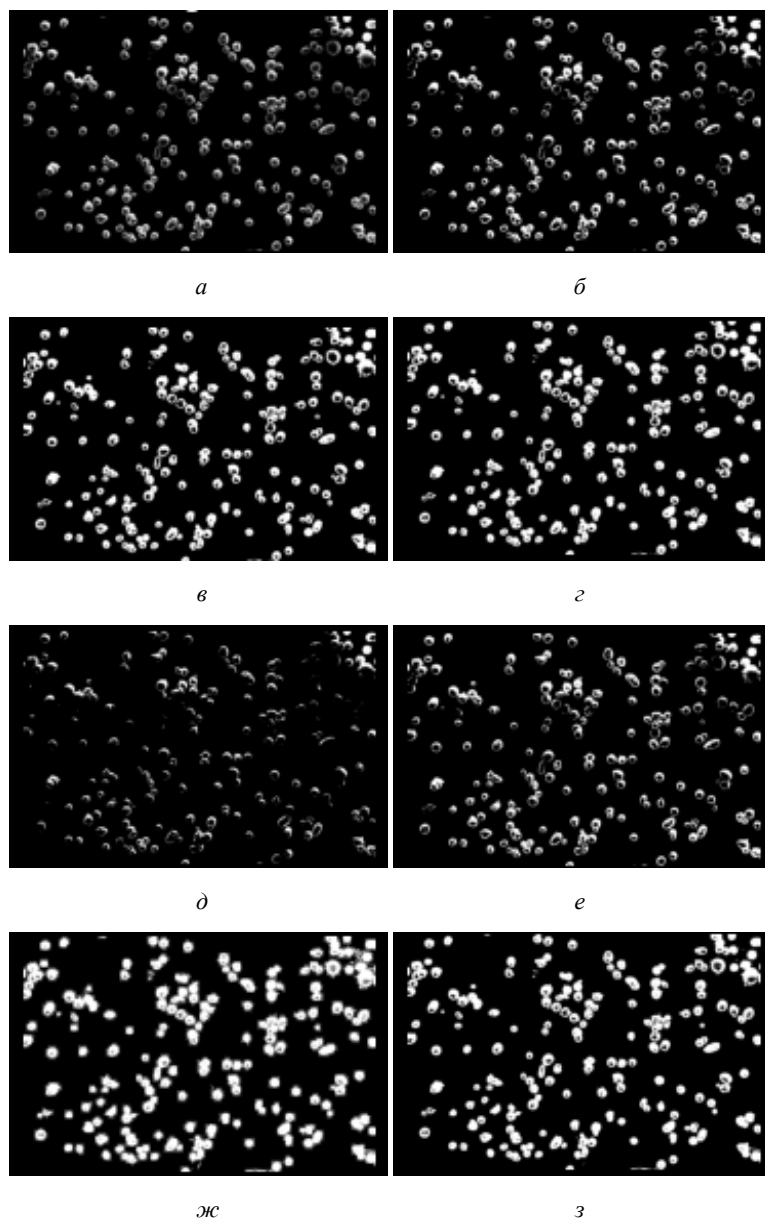


Рис. 4. Методы пороговой обработки изображений СЭМ-снимков порошка: *а* – оригинальный СЭМ-снимок; *б* – обработка методом итерации (изодаты); *в* – метод Ли; *г* – метод среднего значения; *д* – метод минимального значения; *е* – метод Оцу; *ж* – метод треугольника; *з* – метод Йена

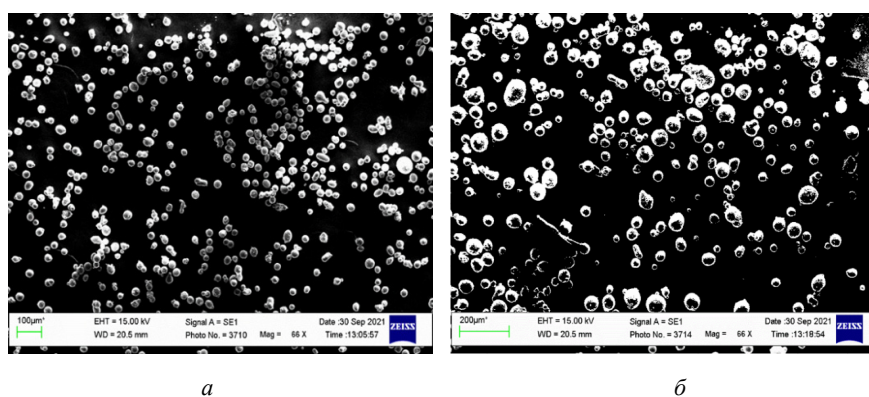


Рис. 5. СЭМ-снимки результатов просева порошка AlSi10Mg: *а* – просев через сито с ячейкой 30 мкм; *б* – просев через сито с ячейкой 60 мкм

Применение пороговой обработки методом `threshold_mean` позволяет получить бинаризованное изображение (рис. 6). Пиксели, относящиеся к частицам порошка, представляются как белые области (значение 1), а фон – как черные области (значение 0).

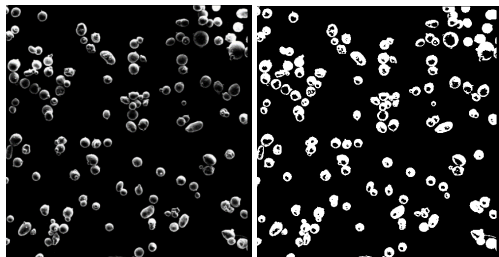


Рис. 6. Пример пороговой обработки фрагмента СЭМ-снимка с помощью метода `threshold_mean`: до (а) и после бинаризации (б)

После бинаризации изображения происходит идентификация связанных областей, присвоение им уникального маркера (`label`). Это позволяет различать отдельные частицы порошка на изображении (рис. 7).

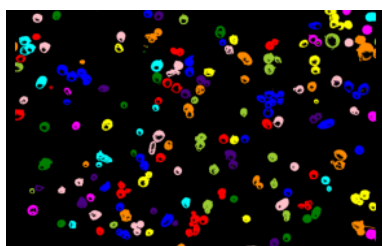


Рис. 7. Пример маркировки связанных областей с помощью функции `label`

Функция `ndimage.binary_fill_holes` из библиотеки `scipy.ndimage` устраняет отверстия в связанных областях (темные пиксели принадлежащие частицам порошка на бинаризованном изображении). С помощью последующих операций эрозии и дилатации убирается шум (рис. 8).



Рис. 8. Заполненные области, представляющие частицы порошка на изображении

Используя методы из библиотеки `skimage.measure` для каждой связанной области (`region`), находится площадь с помощью метода `region.area` и эксцентриситет методом `ge-`

`gion.eccentricity`. Это позволяет посчитать линейный размер связанной области. Этот размер приблизительно равен большой полуоси условного эллипса, описывающего связанную область. В результате вычислений строится гистограмма распределения частиц по размерам.

Результаты исследований

Анализ полученных изображений с помощью разработанных инструментов экспресс-анализа позволил определить распределение размеров частиц порошка `AlSi10Mg` по интервалам. Для сита с размером ячейки 30 мкм данные приведены в табл. 2.

Таблица 2

Анализ гранулометрического состава порошка `AlSi10Mg` (сито 30 мкм)

Номер диапазона	Диаметр гранул в диапазоне, мкм–мкм	Количество частиц в диапазоне
1	0–5	0
2	5–10	9
3	10–15	24
4	15–20	84
5	20–25	173
6	25–30	168
7	30–35	42
8	35–40	13
9	40–45	3
10	45–50	0
11	50–55	1
12	55–60	1
13	60–65	0
14	65–70	1
15	70+	0
		519

Частицы, превышающие размер ячейки сита (30 мкм), представленные в диапазонах №7, 8, 9, 11, 12 и 14, являются агломератами – мелкие частицы металлического порошка, соединенные в более крупные образования за счет адгезии.

По результатам анализа построена гистограмма распределения частиц порошка по диапазонам размеров (рис. 9).

Анализ гистограммы показывает нормальное одномодальное распределение с модой, равной 25,215 мкм. 85-й процентиль для партии порошка, просеянного через сито 30 мкм, составляет 29,363 мкм.

Для сита с размером ячейки 60 мкм порошок представлен следующим распределением (табл. 3).

Частицы, превышающие размер ячейки сита (60 мкм), представленные в диапазонах №13–15, являются агломератами.

По результатам анализа построена гистограмма распределения частиц порошка по диапазонам размеров (рис. 10).

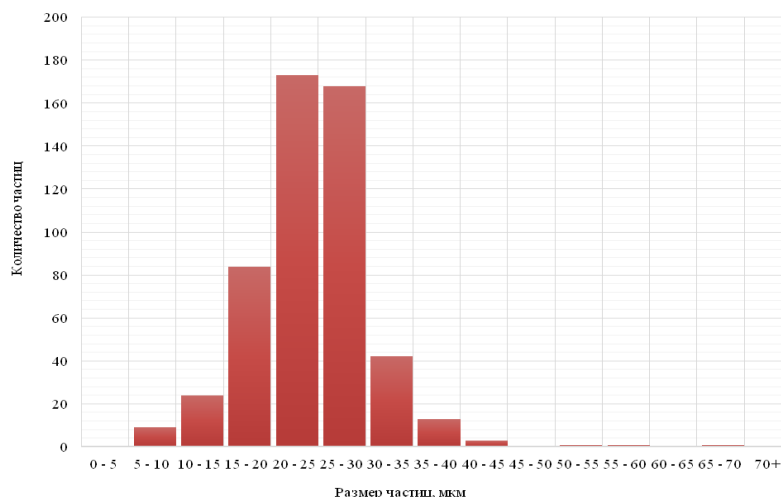


Рис. 9. Гистограмма распределения частиц порошка AlSi10Mg по размерам, просев через сито с размером ячейки 30 мкм

Таблица 3

Анализ гранулометрического состава порошка AlSi10Mg (сито 30 мкм)

Номер диапазона	Диаметр гранул в диапазоне, мкм–мкм	Количество частиц в диапазоне
1	0–5	0
2	5–10	6
3	10–15	11
4	15–20	21
5	20–25	19
6	25–30	30
7	30–35	46
8	35–40	35
9	40–45	26
10	45–50	31
11	50–55	29
12	55–60	15
13	60–65	16
14	65–70	11
15	70+	11
		307

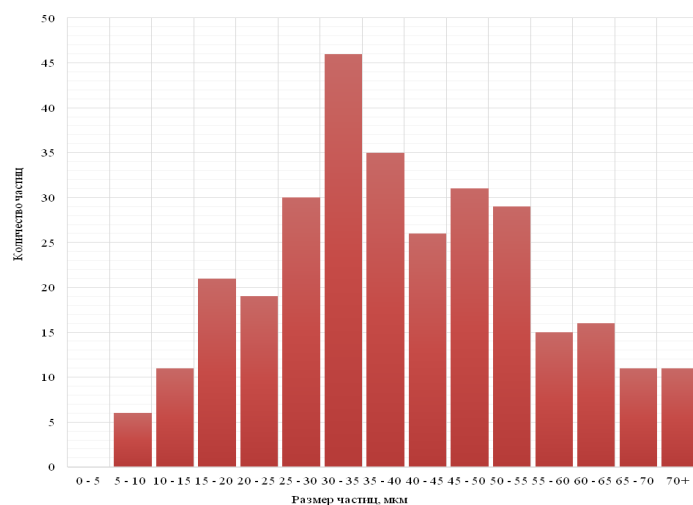


Рис. 10. Гистограмма распределения частиц порошка AlSi10Mg по размерам, просев через сито с размером ячейки 60 мкм

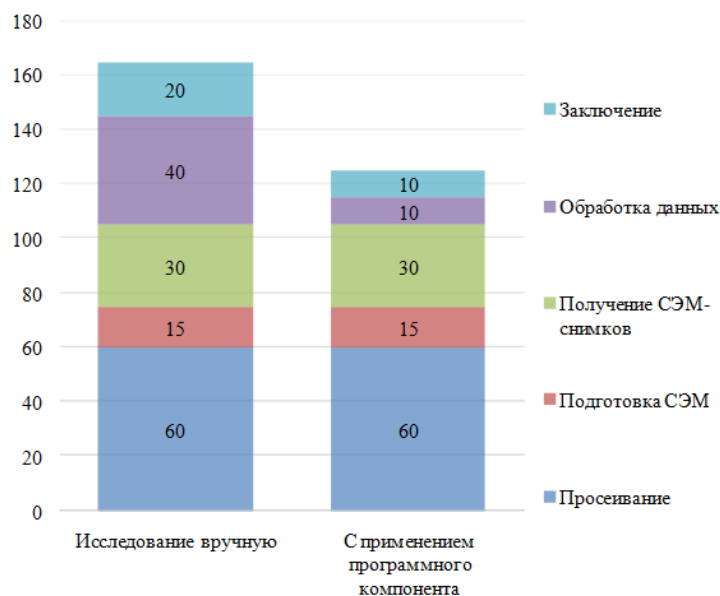


Рис. 11. Время проведения одного цикла экспериментов по входному контролю: вручную и с применением автоматизированных инструментов анализа

Анализ гистограммы показывает нормальное одномодальное распределение с модой, равной 35,344 мкм. Выбросы в правой части графика обусловлены большим количеством агломератов в диапазоне 60–75 мкм.

85-й процентиль для партии порошка, просеянного через сито 60 мкм, составляет 57,422 мкм.

Оценка эффективности предлагаемого программного компонента

Для рассмотренного входного контроля партий порошка сплава AlSi10Mg применение средств экспресс-анализа позволяет сократить этап обработки данных (изображений просеянных порошков во вторичных электронах) – статистический учёт размеров гранул порошка вручную занимает на 30 мин дольше. Экспресс-анализ позволяет получить данные не более чем за 10 мин и оперативно сделать выводы о распределении частиц по размерам (рис. 11).

С увеличением объёма данных для анализа (количества просеянного порошка) разница во времени обработки между ручным и автоматическим методами будет только увеличиваться (в том числе и из-за увеличения влияния человеческого фактора на вероятность ошибки). Несмотря на то, что существуют более эффективные методы входного контроля порошковых материалов (в том числе лазерная дифракция), программный экспресс-анализ позволяет сделать оперативные выводы о применимости порошка для печати уже за 125 мин рабочего времени специалиста, что на 24 % меньше времени ручной обработки теми же методами.

Заключение

Было проведено статистическое исследование распределения размеров частиц двух партий металлпорошковой композиции AlSi10Mg, просеянных через сита с размером ячейки 30 и 60 мкм с помощью изучения результатов просева методом анализа просевов сканирующим электронным микроскопом.

Несмотря на то, что при выбранном методе анализа порошка к исследованию представляется относительно небольшая выборка (307 и 519 частиц для двух разных просевов), методика и аппарат исследования позволяют сделать вывод о повторяемости результатов и для большей выборки или для применения других методов входного контроля (например, лазерной дифракции).

Ключевым выводом из анализа двух просевов является то, что частицы порошка распределены в соответствии с нормальным одномодальным распределением. При увеличении размера ячейки сита с 30 до 60 мкм мода размера частиц порошка увеличивается приблизительно на 10 мкм (с 25,215 до 35,344 мкм), а 85-й процентиль с 29,363 до 57,422 мкм.

Приведенные результаты гарантируют адекватную насыпную плотность 2,67 г/см³ при использовании просеянного порошка в установке селективной лазерной плавки в соответствии с паспортом материала, предоставленного ОК РУСАЛ. Это позволяет уверенно проводить опытно-технологические работы, связанные с непосредственным синтезом образцов.

Библиографический список

1. Полторан Я.Е., Ведищев К.А. 3D-печать в современной промышленности // *Аллея науки*. – 2019. – Т. 1, № 7. – С. 3–6.
2. Миронов Д.Р., Асылгужин Т.Р., Скорынина С.Е. Обзор рынка аддитивных технологий // *Интеллектуальная собственность и инновации*. – Екатеринбург, 2018. – С. 132–137.
3. Agrawal R. Sustainable design guidelines for additive manufacturing applications // *Rapid Prototyping Journal*. – 2022.
4. Елистратова А.А., Коршакевич И.С., Тихоненко Д.В. Технологии 3D-печати: преимущества и недостатки // *Актуальные проблемы авиации и космонавтики*. – 2015. – Т. 1, № 11. – С. 557–559.
5. Игнатов П.В., Павленко Т.Г. 3D-Принтеры. Преимущества и недостатки // *Физика и современные технологии в АПК*. – 2020. – С. 38–41.
6. Ford S., Despeisse M. Additive manufacturing and sustainability: an exploratory study of the advantages and challenges // *Journal of cleaner Production*. – 2016. – Vol. 137. – P. 1573–1587.
7. Rosenthal I., Stern A., Frage N. Microstructure and mechanical properties of AlSi10Mg parts produced by the laser beam additive manufacturing (AM) technology // *Metallography, Microstructure, and Analysis*. – 2014. – Vol. 3. – P. 448–453.
8. Елисов В.П., Черепанов Д.В., Рыков А.Д. 3D-Печать металлическими порошками деталей РКТ с применением ячеистых структур // *Актуальные проблемы авиации и космонавтики*. – 2022. – С. 302–304.
9. Characterization of metal powders used for additive manufacturing / J.A. Slotwinski [et al.] // *Journal of research of the National Institute of Standards and Technology*. – 2014. – Vol. 119. – P. 460.
10. Князев А.Е., Востриков А.В. Рассев порошков в аддитивном и гранульном производствах (обзор) // *Труды ВИАМ*. – 2020. – № 11 (93). – С. 11–20.
11. Остроброд Б.Е., Остроброд С.Б., Новоселова Т.В. Перспективы применения аддитивных технологий // *Наука и современность: материалы всероссийской научно-практической конф.* / ред. кол. Л.А. Светличная (отв. ред.) Т.В. Чернова; Политехнический институт (филиал) ДГТУ в г. Таганроге. – 2022. – С. 22.
12. Никифоров С.О., Павлов А.Н., Бутуханов В.А. Формирование объемных изделий из металлических порошков 3D-принтером. – М., 2022.
13. Influence of SLM on shape memory and compression behaviour of NiTi scaffolds / S. Dadbakhsh [et al.] // *CIRP annals*. – 2015. – Vol. 64, № 1. – P. 209–212.
14. Edelmann A., Dubis M., Hellmann R. Selective laser melting of patient individualized osteosynthesis plates – Digital to physical process chain // *Materials*. – 2020. – Vol. 13, № 24. – P. 5786.
15. Design and additive manufacturing of cellular lattice structures / L. Hao [et al.] // *The International Conference on Advanced Research in Virtual and Rapid Prototyping (VRAP)*. Taylor & Francis Group, Leiria. – 2011. – P. 249–254.
16. 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.

17. Поляков Р.И., Сеницына Е.И. Технология 3D-печати в условиях импортозамещения // *Инновационное развитие техники и технологий в промышленности (ИНТЕКС-2022)*. – 2022. – С. 74–76.
18. Абрамов И.В., Абрамов В.И. Центры аддитивных технологий – драйверы цифровой трансформации экономики // *Вопросы инновационной экономики*. – 2022. – Т. 12, № 3.
19. Князев А.Е. и др. Исследования технологических свойств металлопорошковых композиций титановых сплавов ВТ6 и ВТ20, полученных методом индукционной плавки и газовой атомизации // *Труды ВИАМ*. – 2017. – № 11 (59). – С. 44–53.
20. Powder bed fusion additive manufacturing using critical raw materials: A review / V.V. Popov [et al.] // *Materials*. – 2021. – Vol. 14, № 4. – P. 909.
21. Реализация системного подхода в комплексных исследованиях свойств современных 1 материалов / А.Н. Сергеев [и др.] // *Разработка учебно-методического обеспечения для внедрения инновационных методов обучения при реализации ФГОС ВО*. – 2018. – С. 352–357.
22. Characterization and control of powder properties for additive manufacturing / A. Strondl [et al.] // *Jom*. – 2015. – Vol. 67. – P. 549–554.
23. К вопросу оптимизации визуализации при изучении новых металлических материалов, полученных технологией селективного лазерного спекания / А.Н. Сергеев [и др.] // *Разработка учебно-методического обеспечения для внедрения методов обучения при реализации ФГОС ВО*. – 2018. – С. 336–343.
24. Naim O.A.M., Ermakov D.N. The specifics of the development of additive manufacturing technologies in Russia in the context of globalization: economic and technological aspects // *Journal of Positive School Psychology*. – 2023. – P. 71–82.
25. Абрамов И.В., Абрамов В.И. Перспективы и проблемы использования аддитивных технологий в России в условиях антироссийских санкций // *Техника и технология современных производств*. – 2022. – С. 3–7.

References

1. Poltoran I.A.E., Vedishchev K.A. 3D-pechat' v sovremennoi promyshlennosti [3D printing in modern industry]. *Alleia nauki*, 2019, vol. 1, no. 7, pp. 3–6.
2. Mironov D.R., Asylguzhin T.R., Skorynina S.E. Obzor rynka additivnykh tekhnologii [Intellectual property and innovation]. *Intellektual'naiia sobstvennost' i innovatsii*, Ekaterinburg, 2018, pp. 132–137.
3. Agrawal R. Sustainable design guidelines for additive manufacturing applications. *Rapid Prototyping Journal*, 2022.
4. Elistratova A.A., Korshakevich I.S., Tikhonenko D.V. Tekhnologii 3D-pechat: preimushchestva i nedostatki [3D printing technologies: advantages and disadvantages]. *Aktual'nye problemy aviatsii i kosmonavтики*, 2015, vol. 1, no. 11, pp. 557–559.
5. Ignatov P.V., Pavlenko T.G. 3D-Printery. Pre-imushchestva i nedostatki [3D Printers. Advantages and disadvantages]. *Fizika i sovremennye tekhnologii v APK*, 2020, pp. 38–41.
6. Ford S., Despeisse M. Additive manufacturing and sustainability: an exploratory study of the advantages and challenges. *Journal of cleaner Production*, 2016, vol. 137, pp. 1573–1587.

7. Rosenthal I., Stern A., Frage N. Microstructure and mechanical properties of AlSi10Mg parts produced by the laser beam additive manufacturing (AM) technology. *Metal-lography, Microstructure, and Analysis*, 2014, vol. 3, pp. 448–453.

8. Elisov V.P., Cherepanov D.V., Rykov A.D. 3D-Pечат' metallicheskimii poroshkami detalei RKT s primeneniem iacheistykh struktur [3D-Printing of RCT parts with metal powders using cellular structures]. *Aktual'nye problemy aviatsii i kosmonavtiki*, 2022, pp. 302–304.

9. Slotwinski J.A. et al. Characterization of metal powders used for additive manufacturing. *Journal of research of the National Institute of Standards and Technology*, 2014, vol. 119, pp. 460.

10. Kniazev A.E., Vostrikov A.V. Rassev poroshkov v additivnom i granul'nom proizvodstvakh (obzor) [Powder sieving in additive and granule production (review)]. *Trudy VIAM*, 2020, no. 11 (93), pp. 11–20.

11. Ostrobrod B.E., Ostrobrod S.B., Novoselova T.V. Perspektivy primeneniia additivnykh tekhnologii [Prospects for the application of additive technologies]. *Nauka i soremennost': materialy vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii*. Ed. L.A. Svetlichnaia. Politehnicheskii institut (filial) DGTU v g. Taganroge, 2022, pp. 22.

12. Nikiforov S.O., Pavlov A.N., Butukhanov V.A. Formirovanie ob'emnykh izdelii iz metallicheskih poroshkov 3D-printerom [Formation of volumetric products from metal powders by 3D printer]. Moscow, 2022.

13. Dadbakhsh S. et al. Influence of SLM on shape memory and compression behaviour of NiTi scaffolds. *CIRP annals*, 2015, vol. 64, no. 1, pp. 209–212.

14. Edelmann A., Dubis M., Hellmann R. Selective laser melting of patient individualized osteosynthesis plates – Digital to physical process chain. *Materials*, 2020, vol. 13, no. 24, pp. 5786.

15. Hao L. et al. Design and additive manufacturing of cellular lattice structures. The International Conference on Advanced Research in Virtual and Rapid Prototyping (VRAP). *Taylor & Francis Group, Leiria*, 2011, pp. 249–254.

16. Abramov I.V., Lukina Iu.D., Abramov V.I. Obespechenie razvitiia additivnykh tekhnologii v Rossii v usloviakh sanktsii [Ensuring the development of additive technologies in Russia in the context of sanctions]. *Russian Economic Bulletin*, 2022, vol. 5, no. 4, pp. 198–204.

17. Poliakov R.I., Sinitsyna E.I. Tekhnologiya 3D-pechati v usloviakh importozameshcheniia [3D printing technology under conditions of import substitution]. *Innovatsionnoe razvitie tekhniki i tekhnologii v promyshlennosti (INTEKS-2022)*, 2022, pp. 74–76.

18. Abramov I.V., Abramov V.I. Tsentry additivnykh tekhnologii – draivery tsifrovoi transformatsii ekonomiki [Additive Technology Centers - Drivers of Digital Transformation of the Economy]. *Voprosy innovatsionnoi ekonomiki*, 2022, vol. 12, no. 3.

19. Kniazev A.E. i dr. Issledovaniia tekhnologicheskikh svoystv metallopороshkovykh kompozitsii titanovykh splavov VT6 i VT20, poluchennykh metodom induktsionnoi plavki i gazovoi atomizatsii [Studies of technological properties of metal-powder compositions of titanium alloys BT6 and BT20 obtained by induction melting and gas atomization method]. *Trudy VIAM*, 2017, no. 11 (59), pp. 44–53.

20. Popov V.V. et al. Powder bed fusion additive manufacturing using critical raw materials: A review. *Materials*, 2021, vol. 14, no. 4, pp. 909.

21. Sergeev A.N. et al. Realizatsiia sistemnogo podkhoda v kompleksnykh issledovaniakh svoystv sovremennykh 1 materialov [Realization of system approach in complex researches of properties of modern 1 materials]. *Razrabotka uchebno-metodicheskogo obespecheniia dlia vnedreniia innovatsionnykh metodov obucheniia pri realizatsii FGOS VO*, 2018, pp. 352–357.

22. Strondl A. et al. Characterization and control of powder properties for additive manufacturing. *Jom.*, 2015, vol. 67. – P. 549–554.

23. Sergeev A.N. et al. K voprosu optimizatsii vizualizatsii pri izuchenii novykh metallicheskih materialov, poluchennykh tekhnologii selektivnogo lazernogo spekaniia [To the question of visualization optimization in the study of new metallic materials produced by selective laser sintering technology]. *Razrabotka uchebno-metodicheskogo obespecheniia dlia vnedreniia metodov obucheniia pri realizatsii FGOS VO*, 2018, pp. 336–343.

24. Naim O.A.M., Ermakov D.N. The specifics of the development of additive manufacturing technologies in Russia in the context of globalization: economic and technological aspects. *Journal of Positive School Psychology*, 2023, pp. 71–82.

25. Abramov I.V., Abramov V.I. Perspektivy i problemy ispol'zovaniia additivnykh tekhnologii v Rossii v usloviakh antirossiiskikh sanktsii [Prospects and problems of using additive technologies in Russia in the context of anti-Russian sanctions]. *Tekhnika i tekhnologiya sovremennykh proizvodstv*, 2022, pp. 3–7.

Поступила: 16.09.2023

Одобрена: 02.10.2023

Принята к публикации: 27.10.2023

Об авторах

Брыкин Вениамин Андреевич (Москва, Российская Федерация) – Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), инженер, benbrykin@yandex.ru.

Рипецкий Андрей Владимирович (Москва, Российская Федерация) – Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), к.т.н., доцент, a.ripetskiy@mail.ru.

Коробов Константин Сергеевич (Москва, Российская Федерация) – Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), техник, korobovks@mai.ru.

About the authors

Veniamin A. Brykin (Moscow, Russian Federation) – Moscow Aviation Institute (National Research University).

Andrey V. Ripetsky (Moscow, Russian Federation) – Moscow Aviation Institute (National Research University).

Konstantin S. Korobov (Moscow, Russian Federation) – Moscow Aviation Institute (National Research University).

Финансирование. Работа не имела спонсорской поддержки.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Вклад авторов равноценен.