

Научная статья

УДК 621.762

URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=186878>

EDN: <https://www.elibrary.ru/WBWBVJ>

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕРМОМЕХАНИКИ ПРОЦЕССА СЕЛЕКТИВНОГО ЛАЗЕРНОГО ПЛАВЛЕНИЯ ПОРОШКОВ РАЗЛИЧНОГО ГРАНУЛОМЕТРИЧЕСКОГО СОСТАВА

Т.Л. Нгуен, В.Н. Добрянский[✉], Л.Н. Рабинский

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)», г. Москва, Россия [✉]dobryanskijvn@mai.ru

Цитирование: Нгуен Т.Л., Добрянский В.Н., Рабинский Л.Н. Исследование термомеханики процесса селективного лазерного плавления порошков различного гранулометрического состава // Труды МАИ. 2025. № 145. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=186878>

Аннотация. В данной работе представлены результаты исследования влияния гранулометрического состава порошков сплава AlSi10Mg на процесс его селективного лазерного плавления и термомеханику процесса. Показано влияние среднего размера частиц на морфологию ванны расплава и дефектность ее структуры в экспериментах на уровне единичных треков, получаемых методом селективного лазерного плавления. Исследования проводились для порошков со средним размером частиц от 20 до 70 мкм, полученных просеиванием стандартного порошка, в широком диапазоне варьирования скоростей (0,1-1,98 м/с) и мощностей (40-400 Вт) лазерного источника. Анализировалось влияние гранулометрического состава металлопорошковой композиции на глубину и ширину ванны расплава, появление эффекта глубокого проплавления, комкования и нестабильного плавления, а также появления дефектов в виде

трещин. По результатам исследования вида сверху и поперечных шлифов единичных треков построены карты процесса, отражающие характерные диапазоны параметров, соответствующих различным типам морфологии единичных треков, а также появления трещин. По результатам анализа начала проплавления порошкового слоя, полученного из композиции различной гранулометрии, была установлена зависимость величины потребной для плавления энергии от среднего размера частиц слоя и решена обратная задача идентификации эффективных коэффициентов поглощения и теплопроводности порошкового слоя.

Ключевые слова: селективное лазерное плавление, гранулометрический состав, параметры плавления, единичный трек, ванна расплава, трещина.

Финансирование: работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (код проекта FSFF20230004).

INVESTIGATION OF THE THERMOMECHANICS OF THE SELECTIVE LASER MELTING PROCESS FOR POWDERS WITH DIFFERENT PARTICLE SIZE DISTRIBUTIONS

T.L. Nguyen, V.N. Dobryanskiy , L.N. Rabinskiy

Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russia

 dobryanskijvn@mai.ru

Citation: Nguyen T.L., Dobryanskiy V.N., Rabinskiy L.N. Investigation of the thermomechanics of the selective laser melting process for powders with different particle size distributions // Trudy MAI. 2025. No. 145. (In Russ.). URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=186878>

Abstract. This paper presents the results of a study on how the particle size distribution of AlSi10Mg alloy powders affects the laser powder bed fusion process and its thermomechanics. The influence of the median particle size on melt-pool morphology and structural defect formation was demonstrated in single-track experiments. The research was conducted on powders with an average particle size d_{50} ranging from 20

to 70 μm , obtained by sieving a standard powder, across a wide range of laser scanning speeds (0.1-1.98 m/s) and laser powers (40-400 W). The effects of powder granulometry on melt-pool depth and width, the onset of deep penetration (keyhole) melting, balling and unstable melting regimes, as well as the formation of defects in the form of cracks, were analyzed. Based on the results from top-view and cross-sectional analysis of the single tracks, processing maps were constructed, reflecting the characteristic parameter ranges corresponding to different types of single-track morphology. Analysis of the initial melting of the powder bed with different granulometries established the dependence of the energy required for melting on the average particle size of the powder layer and solved the inverse problem of identifying the effective absorption coefficients and thermal conductivity of the powder bed. **Keywords:** laser powder bed fusion, granulometric composition, melting parameters, single track, melt pool, cracks

Funding: The work was carried out with the financial support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (project code FSFF-2023-0004).

Введение

Селективное лазерное плавление (СЛП) является одной из наиболее перспективных технологий аддитивного производства, позволяющей создавать квазиготовые сложные функциональные изделия из металлических порошков [16]. Подбор технологических параметров печати для получения изделий с оптимальными физико-механическими свойствами и минимальным уровнем остаточных напряжений является трудоемкой задачей, особенно при учёте вариативности и нестабильности свойств порошков, применяемых в аддитивном производстве. Под каждый новый порошок требуется проводить отдельные исследования, направленные на подбор оптимальных параметров его сплавления. Влияние оказывает в том числе средний размер частиц порошка и его распределение. Использование мелкодисперсных порошков имеет практический интерес при изготовлении тонкостенных деталей. Минимально достижимый размер детали, как правило, определяется диаметром лазерного луча и толщиной слоя порошка [7, 8], а наличие мелких частиц порошка улучшает кинетику консолидации из-за меньшего количества энергии, необходимой для

расплавления частиц порошка [9], повышает поглощательную способность порошкового слоя [9, 10], что имеет высокое практическое значение [11].

Поэтому исследование параметров плавления порошков различного гранулометрического состава является актуальной задачей.

Материалы и методы

Подготовка и характеристика порошков

В работе был исследован алюминий-порошок марки АСП-45 AlSi10Mg/ASP45 AlSi10Mg (ТУ 1791-011-49421776-2016), произведенный компанией «Российский алюминий» (ОК РУСАЛ, г. Москва, Россия). Заявленный производителем номинальный размер частиц лежит в диапазоне от 20 мкм до 63 мкм, средний размер 35 мкм, химический состав представлен в таблице ниже (табл. 1).

Таблица 1

Химический состав исходного порошка сплава AlSi10Mg

Содержание элементов, %

Al	Si	Mg	Fe	Ti	Cu	Mn	O
87,5-89,7	9-11	0,2-0,45	≤0,35	≤0,15	≤0,05	≤0,45	≤0,08

Исходный порошок был рассеян на вибрационном грохоте Analysette 3 (Fritsch, Германия) через комплектные сита с размером ячеек 20 мкм, 32 мкм, 40 мкм и 50 мкм.

Гранулометрический состав контролировался методом лазерной дифракции на анализаторе Analysette 22 (Fritsch, Германия). Морфология частиц исследовалась с помощью растровой электронной микроскопии (РЭМ) на микроскопе EVO-40 (Carl Zeiss, Германия). Химический состав определялся методами энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии (ЭДС) свободно насыпанных образцов и поперечных шлифов частиц. Текучесть и насыпная плотность порошков измерялись согласно ГОСТам 20899-98 и 19440-94 соответственно. Для определения температуры плавления проводился

синхронный термический анализ (СТА) на установке NETZSCH STA 449 F1 (Jupiter, Германия).

Эксперимент по сплавлению единичных треков

Эксперименты проводились на установке AddSol D50 (ООО «ТитанАвангард», Москва, Россия), работающей по технологии селективного лазерного плавления с иттербийевым волоконным лазером мощностью 400 Вт (IPG Photonics), длиной волны 1064 нм и размером лазерного пятна 80 мкм.

Единичные треки длиной 4 мм наносились на алюминиевую подложку при варировании мощности лазера от 40 до 400 Вт с шагом 36 Вт и скорости сканирования от 100 до 1980 мм/с с шагом 235 мм/с. Толщина порошкового слоя для всех экспериментов составила 60 мкм. Всего было исследовано 99 режимов для каждого из типов порошка.

Морфология и дефектность единичных треков исследовалась сверху с помощью оптического микроскопа Saike Digital SK2700HDMI-AF (Saike, Китай), далее были подготовлены поперечные шлифы единичных треков и исследована их морфология с помощью конфокального лазерного микроскопа Olympus LEXT OLS5000 (OLYMPUS, Япония).

Результаты и обсуждение Характеристики порошков

Результаты исследования гранулометрии и морфологии подготовленных порошков приведены на рис. 1-2 и в табл. 2.

Таблица 2

Гранулометрические параметры используемого порошка

Тип порошка	D10, мкм	D50, мкм	D90, мкм	SPAN
П0 (стандарт)	33,6	48,5	69,7	0,75
П1	17,2	25,8	38,6	0,83
П2	27,1	32,4	38,8	0,36
П3	35,7	41,8	48,8	0,31
П4	42,5	53,7	67,9	0,47
П5	53,9	65,9	80,5	0,4

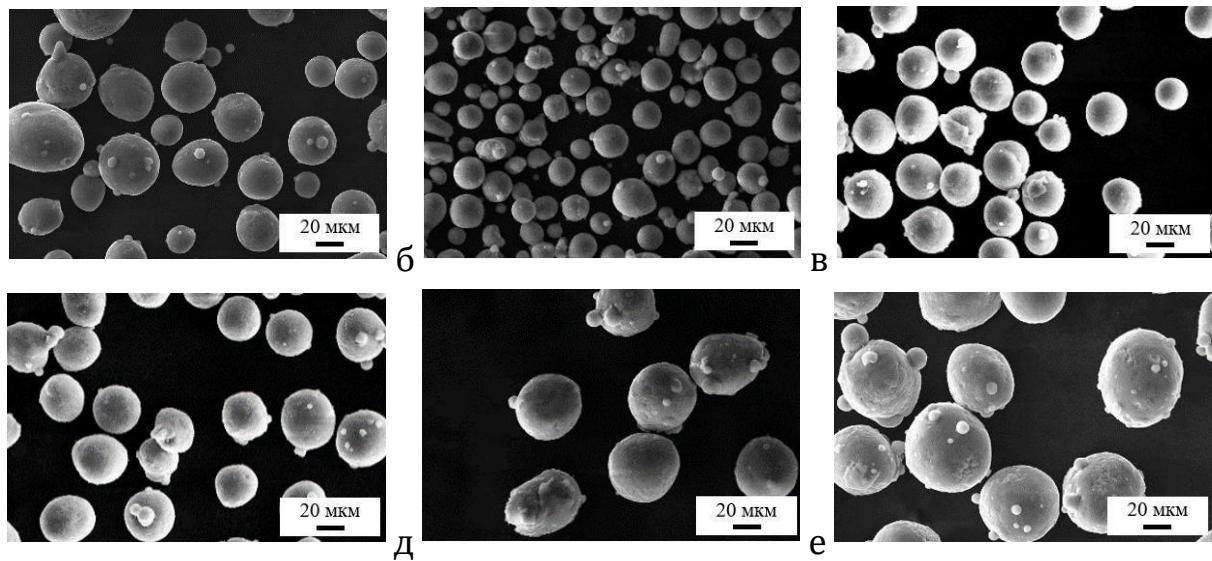


Рисунок 1 – Микроснимки стандартного порошка AlSi10Mg (а) и его просеянных фракций П1 (б), П2 (в), П3 (г), П4 (д), П5 (е)

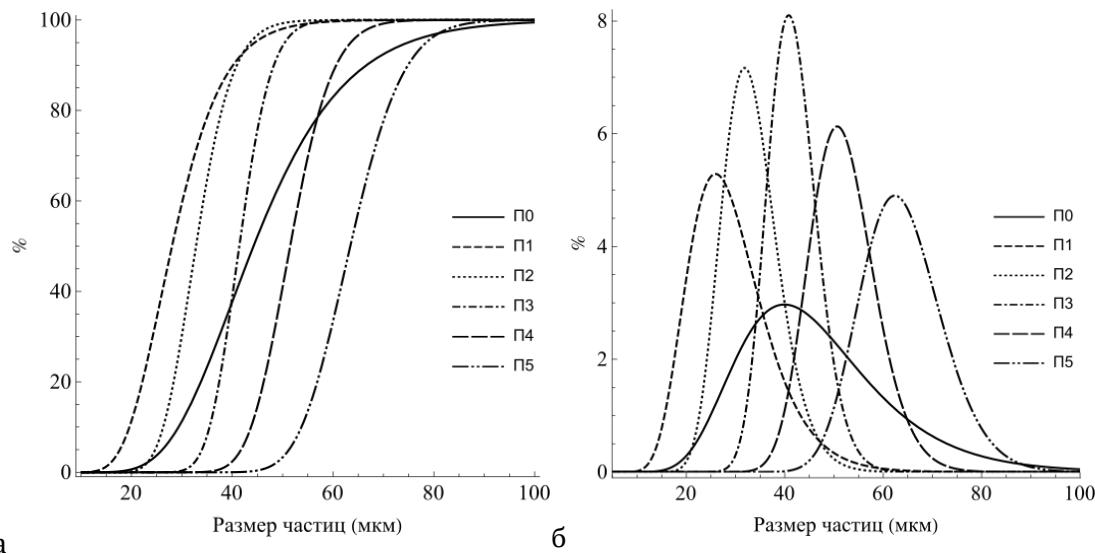


Рисунок 2 – Кумулятивное распределение размеров частиц стандартного порошка AlSi10Mg (П0) и его просеянных фракций (П1-П5) с различным средним размером частиц, (а) интегральное распределение, (б) дифференциальное распределение

Химический анализ выявил четкую тенденцию к увеличению содержания кремния с ростом среднего размера частиц. Содержание кремния по данным ЭДС

свободно насыпанных образцов увеличилось с 11,5 вес.% для порошка П1 до 13,1 вес.% для порошка П5. Подробно этот вопрос подробно изложен в работе [12].

Насыпная плотность порошков варьировалась незначительно (от 1,42 г/см³ для П1 до 1,45 г/см³ для П5). При этом текучесть существенно улучшалась с увеличением размера частиц: время истечения 50 г порошка через калиброванную воронку уменьшилось со 104,5 с для порошка П2 до 48,5 с для порошка П5. Порошок П1 демонстрировал очень низкую текучесть, вплоть до остановки течения.

Синхронный термический анализ не выявил существенного влияния гранулометрии на температуру плавления, которая для всех порошков составляла около 576 °С.

Анализ плавления единичных треков 1. Начало проплавления порошкового слоя

Первой задачей было определение минимального энерговклада, необходимого для проплавления порошкового слоя толщиной 60 мкм и формирования трека, сплавленного с подложкой. Анализ показал, что для каждого порошка проплавление начинается при определенном уровне линейной плотности энергии E_l (Дж/мм). Средние значения линейной плотности энергии для каждого из порошков приведены в табл. 3.

Установлено, что порошки с меньшим размером частиц требуют значительно меньшего энерговклада для начала проплавления порошкового слоя. Так, для порошка П1 средний энерговклад составил 0,042 Дж/мм, тогда как для порошка П5 – 0,16 Дж/мм, что почти в 4 раза выше. Это свидетельствует о существенном влиянии гранулометрического состава на поглощательную способность и эффективную теплопроводность порошкового слоя.

Таблица 3

Средние значения линейной плотности энергии начала проплавления

П0 (стандарт)	0,08
---------------	------

П1	0,042	Тип порошка	E_l (Дж/мм)
П2	0,064		
П3	0,083		
П4	0,119		
П5	0,160		

2. Морфология ванны расплава единичных треков

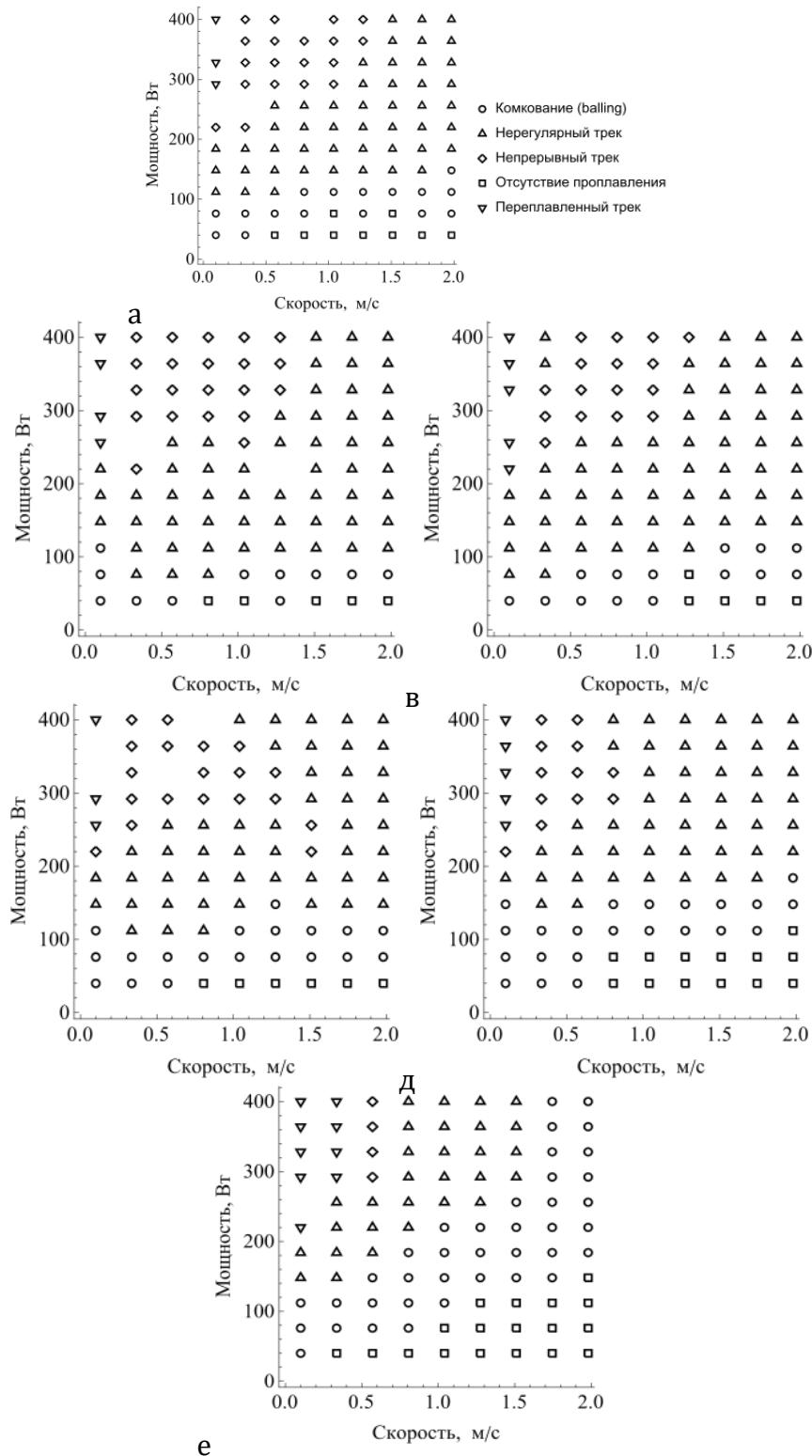
Анализ вида сверху и поперечных шлифов позволил классифицировать треки по морфологии и наличию различных эффектов (табл. 4).

Таблица 4

Тип анализа	Наименование категории	Категории поперечных шлифов	
		Критерий	
По виду сверху	Отсутствие проплавления	Трек не сформирован	
	Непрерывный трек	Сплошной полностью сформированный трек	
	Нерегулярный трек	Нестабильный, прерывистый трек со вытянутыми сегментами.	
	Комкование (balling)	Нестабильный, прерывистый трек со сферическими сегментами.	
	Переплавленный	Характерные уплощенные единичные треки с шириной более 1,5 диаметра лазерного пятна	
Отсутствие проплавления	Неглубокое	Отсутствие ванны расплава проплавления	
	проплавление	Отношение глубины к ширине (D/W) меньше	
	Нормальный трек	0,35	
		0,35 > D/W > 0,75	

На рис. 3
представлены
процесса,
по
анализа вида
поперечных

и
карты
построенные
результатам
сверху и
шлифов



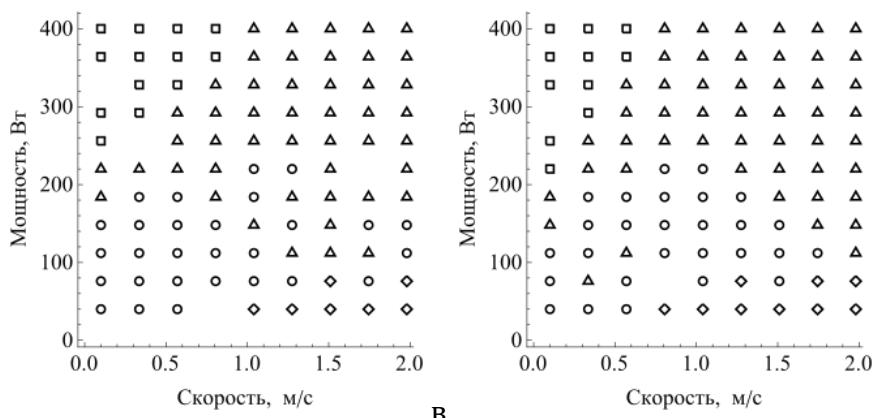
соответственно. Отсутствующие на карте точки характеризуют параметры, при которых избыток энергии привел к нестабильности процесса и горению порошкового слоя.

Г

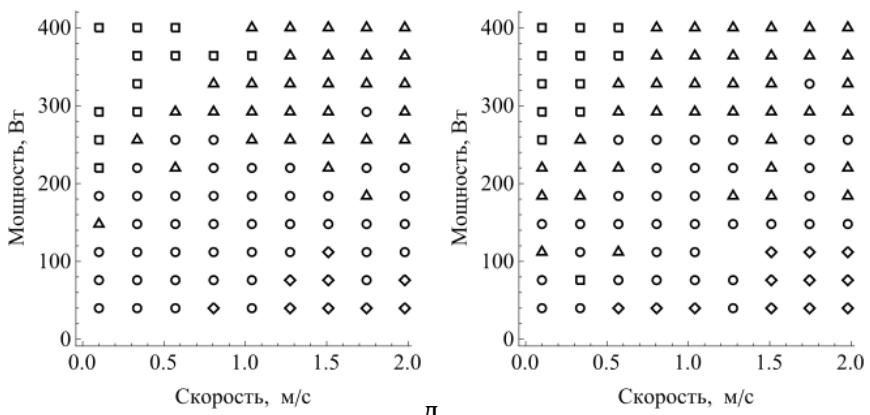


Рисунок 3 – Карты построенные по анализа вида П1 (б), П2 (в), П3 (г), П4 (д), П5 (е)

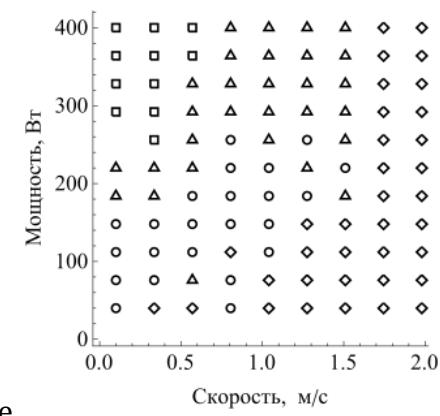
процесса, результатам сверху: П0 (а),



в



д



е

б

Г

Рисунок 4 – Карты процесса, построенные по результатам анализа поперечных шлифов:
П0 (а), П1 (б), П2 (в), П3 (г), П4 (д), П5 (е)

Анализируя карты, можно сделать вывод, что с увеличением среднего размера частиц расширяется диапазон параметров, при котором проплавление не происходит. Это коррелирует с данными по минимальному энерговкладу. Зона проявления эффекта комкования расширяется с уменьшением размера частиц. Для мелких порошков (П1, П2) комкование наблюдалось в диапазоне мощностей (40-76 Вт), тогда как для крупных порошков это эффект был менее выражен. Диапазон параметров, при которых формируется визуально непрерывный и сплошной трек, сужается с увеличением размера частиц. Для порошка П1 непрерывные треки получались в широком диапазоне мощностей и скоростей, а для порошка П5 лишь при высоких мощностях (>292 Вт) и низких скоростях (~ 570 мм/с). Эффект глубокого проплавления наблюдался для всех порошков в схожих диапазонах параметров (высокие мощности и низкие скорости). При энерговкладе более 700 Дж/м влияние размера частиц на морфологию ванны расплава нивелировалось.

3. Оценка эффективных теплофизических свойств порошкового слоя

На основе данных о начале проплавления и с применением аналитической модели подвижного теплового источника с гауссовым распределением в безразмерном виде [13] была решена обратная задача идентификации эффективных коэффициентов поглощения и теплопроводности порошкового слоя.

Результаты оптимизации показали, что широко применяемые теоретические оценки для коэффициента поглощения порошка (например, $\lambda/100$ или $\lambda/2$, где λ – теплопроводность сплава) не позволяют достоверно описать экспериментальные данные. Найденные значения среднего коэффициента поглощения для порошкового слоя AlSi10Mg составили $\lambda/4\dots\lambda/5$.

Установлена четкая зависимость коэффициента поглощения от гранулометрического состава (рис. 5). С уменьшением размера частиц поглощающая способность слоя значительно возрастает: для порошка П1 составляет 0,45, а для порошка П5 – 0,15. Это объясняется увеличением удельной поверхности и эффектом многократного переотражения излучения в слое из мелких частиц, что приводит к большему поглощению энергии.

Полученные значения эффективных теплофизических свойств были верифицированы путем сопоставления теоретических оценок глубины и ширины проплавления с экспериментальными данными для широкого диапазона параметров. Показана хорошая корреляция, подтверждающая адекватность предложенной методики.

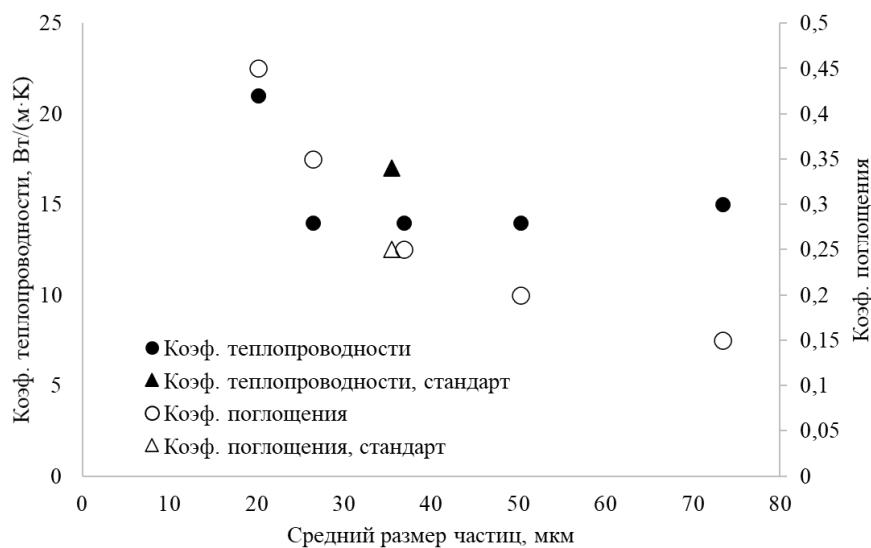


Рисунок 5 – Полученные значения эффективных коэффициентов поглощения и теплопроводности порошкового слоя

4. Термомеханическая интерпретация карт дефектности при СЛП порошков различной гранулометрии

Формирование дефектов единичных треков при селективном лазерном плавлении определяется не только локальной морфологией ванны расплава, но и термонапряжённым состоянием зоны термоциклирования. В условиях высоких градиентов температуры и неравномерного охлаждения возникают существенные тепловые деформации, которые при наличии ограничений (жёсткая подложка, неравномерное распределение температур в объёме, различная степень проплавления, остивающие быстрее «берега» ванны расплава)

приводят к появлению растягивающих напряжений и могут инициировать микротрешины. В качестве базовой модели температурного поля в окрестности движущегося лазерного пятна в работе применяется решение Розенталя для точечного источника на поверхности полупространства [13]. В подвижной системе координат температура представляется функцией мощности источника P , скорости сканирования v , теплофизических характеристик материала (Cp) и расстояния до рассматриваемой точки R . При этом классическая постановка не учитывает коэффициент поглощения лазерного излучения, что принципиально важно для порошкового слоя, так как параметры сильно зависят от гранулометрии частиц. Для более корректного описания распределения энергии в пятне нагрева используется модель распределённого по Гауссу источника. Ключевым механизмом влияния гранулометрического состава на термомеханические эффекты является изменение эффективных теплофизических свойств порошкового слоя, так как они напрямую влияют на величину подводимой к слою энергии и, следовательно, параметры термоцикла (максимальную температуру, градиенты температур, скорости охлаждения), определяющие уровни тепловых деформаций. Установлено, что учёт распределения теплового потока изменяет теоретические оценки геометрии ванны расплава: снижает оценку глубины проплавления и увеличивает ширину по сравнению с точечным источником, что также может влиять на трещинообразование. Экспериментально установлено, что появление трещин при плавлении единичных треков характеризуется определённым диапазоном отношения глубины ванны расплава к ее ширине D/W от 0.29 до 1.13, причем $D/W < 0.29$ трещины гарантированно не наблюдаются (рис. 6).

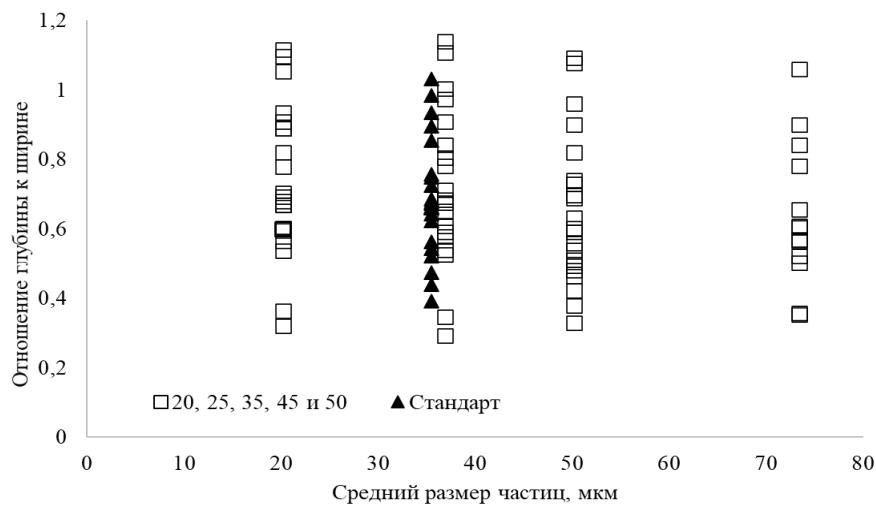


Рисунок 6 – Отношения глубины ванны расплава к ее ширине при появлении трещины

Выводы

Проведенные исследования выявили, что фракции порошка AlSi10Mg, полученные путем рассева, различаются по своему химическому составу. Согласно данным энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии, выполненной на свободно насыпанных образцах, увеличение размера частиц сопровождается ростом содержания кремния.

Были выявлены четкие закономерности влияния гранулометрического состава металлопорошковой композиции на формирование ванны расплава единичных треков. Экспериментально подтверждено, что размер частиц оказывает значительное влияние на величину энерговклада, необходимого для получения сплошного и непрерывного единичного трека: порошки с более крупными частицами требуют повышенных затрат энергии. При этом установлено, что в режимах с высоким энерговкладом (свыше 700 Дж/м) влияние дисперсности порошка на морфологию ванны расплава становится несущественным.

На основе результатов сплавления единичных треков с применением стандартных моделей подвижных тепловых источников была разработана и апробирована методика оценки средних эффективных коэффициентов теплопроводности и поглощения порошкового слоя сплава AlSi10Mg в рабочем диапазоне температур СЛП. Аналогичным образом была разработана и верифицирована методика оценки эффективного коэффициента поглощения,

которая продемонстрировала его сильную зависимость от дисперсности порошкового слоя.

Установлено влияние гранулометрии на дефектность структуры единичных треков. Появление трещин при плавлении единичных треков характеризуется определённым диапазоном отношения глубины ванны расплава к ее ширине D/W от 0.29 до 1.13.

Можно заключить, что средний размер частиц порошка существенно влияет на процесс его плавления и требует учета при подборе оптимальных параметров плавления металлопорошковых композиций. Уменьшение среднего размера частиц позволяет получать тонкостенные изделия, а при одновременном увеличении поглощательной способности порошкового слоя даёт возможность изготовления изделий из высокоотражающих высокопроводящих материалов, что может иметь большую практическую значимость при создании элементов авиационно-космической техники.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest The authors declare no conflict of interest.

Список источников

1. Herzog D. et al. Additive manufacturing of metals //Acta Materialia. – 2016. – Т. 117. – С. 371-392. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2016.07.019>
2. Rabinskii L. N., Tokmakov D. I., Solyaev Y. O. Manufacture of the transceiver housing for an active phased array antenna with built-in cooling channels by selective laser melting //Russian Engineering Research. – 2019. – Т. 39. – С. 785-788. DOI: <https://doi.org/10.3103/S1068798X19090168>
3. DebRoy T. et al. Additive manufacturing of metallic components- process, structure and properties //Progress in materials science. – 2018. – Т. 92. – С. 112-224. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2017.10.001>

4. Aboulkhair N. T. et al. 3D printing of Aluminium alloys: Additive Manufacturing of Aluminium alloys using selective laser melting //Progress in materials science.– 2019. – T. 106. – C. 100578. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2019.100578>

5. Brock L. et al. Relative performance of additively manufactured and cast aluminum alloys //Journal of Materials Engineering and Performance. – 2021. – T. 30. –

C. 760-782. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11665-020-05403-7>

6. Trevisan F. et al. On the selective laser melting (SLM) of the AlSi10Mg alloy:

process, microstructure, and mechanical properties //Materials. – 2017. – T. 10. – №. 1.

– C. 76. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma10010076>

7. Tiberto D. et al. Additive manufacturing of copper alloys: influence of process parameters and alloying elements //Materials science and technology. – 2019. – T. 35. – №. 8. – C. 969-977. DOI: [10.1080/02670836.2019.1600840](https://doi.org/10.1080/02670836.2019.1600840)

8. Tan J. H., Wong W. L. E., Dalgarno K. W. An overview of powder granulometry on feedstock and part performance in the selective laser melting process

//Additive Manufacturing. – 2017. – T. 18. – C. 228-255.

DOI: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2017.10.011>

9. Simchi A. The role of particle size on the laser sintering of iron powder //Metallurgical and Materials Transactions B. – 2004. – T. 35. – C. 937-948. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11663-004-0088-3>

10. Niu H. J., Chang I. T. H. Selective laser sintering of gas and water atomized high speed steel powders //Scripta Materialia. – 1999. – T. 41. – №. 1. – C. 25-30. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1359-6462\(99\)00089-5](https://doi.org/10.1016/S1359-6462(99)00089-5)

11. Aboulkhair N. T. et al. Reducing porosity in AlSi10Mg parts processed by selective laser melting //Additive manufacturing. – 2014. – T. 1. – C. 77-86. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2014.08.001>

12. Dobryanskiy V. N. et al. Influence of mean particle size on chemical composition of AlSi10Mg powders //Nanoscience and Technology: An International Journal. – 2025. – T. 16. – №. 3. DOI: [Influence of mean particle size on chemical composition of AlSi10Mg powders](https://doi.org/10.1007/s11665-020-05403-7)

13. Eagar T. W. et al. Temperature fields produced by traveling distributed heat sources //Welding journal. – 1983. – T. 62. – №. 12. – C. 346-355. URL: <https://eagar.mit.edu/publications/Eagar036.pdf>

References

1. Herzog D. et al. Additive manufacturing of metals //Acta Materialia. – 2016. – T. 117. – C. 371-392. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2016.07.019>
2. Rabinskii L. N., Tokmakov D. I., Solyaev Y. O. Manufacture of the transceiver housing for an active phased array antenna with built-in cooling channels by selective laser melting //Russian Engineering Research. – 2019. – T. 39. – C. 785-788. DOI: <https://doi.org/10.3103/S1068798X19090168>
3. DebRoy T. et al. Additive manufacturing of metallic components–process, structure and properties //Progress in materials science. – 2018. – T. 92. – C. 112-224. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2017.10.001>
4. Aboulkhair N. T. et al. 3D printing of Aluminium alloys: Additive Manufacturing of Aluminium alloys using selective laser melting //Progress in materials science. – 2019. – T. 106. – C. 100578. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2019.100578>
5. Brock L. et al. Relative performance of additively manufactured and cast aluminum alloys //Journal of Materials Engineering and Performance. – 2021. – T. 30. – C. 760-782. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11665-020-05403-7>
6. Trevisan F. et al. On the selective laser melting (SLM) of the AlSi10Mg alloy: process, microstructure, and mechanical properties //Materials. – 2017. – T. 10. – №. 1. – C. 76. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma10010076>

7. Tiberto D. et al. Additive manufacturing of copper alloys: influence of process parameters and alloying elements //Materials science and technology. – 2019. – Т. 35. – №. 8. – С. 969-977. DOI: [10.1080/02670836.2019.1600840](https://doi.org/10.1080/02670836.2019.1600840)

8. Tan J. H., Wong W. L. E., Dalgarno K. W. An overview of powder granulometry on feedstock and part performance in the selective laser melting process //Additive Manufacturing. – 2017. – Т. 18. – С. 228-255. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2017.10.011>

9. Simchi A. The role of particle size on the laser sintering of iron powder //Metallurgical and Materials Transactions B. – 2004. – Т. 35. – С. 937-948. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11663-004-0088-3>

10. Niu H. J., Chang I. T. H. Selective laser sintering of gas and water atomized high speed steel powders //Scripta Materialia. – 1999. – Т. 41. – №. 1. – С. 25-30. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1359-6462\(99\)00089-5](https://doi.org/10.1016/S1359-6462(99)00089-5)

11. Aboulkhair N. T. et al. Reducing porosity in AlSi10Mg parts processed by selective laser melting //Additive manufacturing. – 2014. – Т. 1. – С. 77-86. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2014.08.001>

12. Dobryanskiy V. N. et al. Influence of mean particle size on chemical composition of AlSi10Mg powders //Nanoscience and Technology: An International Journal. – 2025. – Т. 16. – №. 3. DOI: [Influence of mean particle size on chemical composition of AlSi10Mg powders](#)

13. [Eagar T. W. et al. Temperature fields produced by traveling distributed heat sources //Welding journal. – 1983. – Т. 62. – №. 12. – С. 346-355. URL: https://eagar.mit.edu/publications/Eagar036.pdf](#)

Информация об авторах

Туан Лонг Нгуен, аспирант, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)», г. Москва, Россия; email: kqvn.nguyenlong@gmail.com

Василий Николаевич Добрянский, инженер, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)», г. Москва, Россия; e-mail: dobryanskijvn@mai.ru

Лев Наумович Рабинский, профессор, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)», г. Москва, Россия; e-mail: rabinskiy@mail.ru

Information about the authors

Tuan Long Nguyen, graduate student, Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russia; e-mail: kqvn.nguyenlong@gmail.com

Vasiliy N. Dobryanskiy, engineer, Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russia; e-mail: dobryanskijvn@mai.ru

Lev N. Rabinskiy, professor, Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russia; e-mail: rabinskiy@mail.ru

Получено 24 ноября 2025 • Принято к публикации 20 декабря 2025 • Опубликовано 30 декабря 2025
Received 24 November 2025 • Accepted 20 December 2025 • Published 30 December 2025
