

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ПОЛУЧЕНИЯ КЕРАМИЧЕСКИХ И МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВЫСОКЭНЕРГИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ ОБРАБОТКОЙ МЕТОДАМИ АДДИТИВНЫХ ПРОИЗВОДСТВ

ЯН ЮЙСИ, Б.С.ЗЕНИН

Томский политехнический университет

E-mail: yuxiyang14@gmail.com

Методы аддитивных производств (АП) могут значительно изменить современную обрабатывающую промышленность. Эта технология управляется компьютерным программированием и программным обеспечением. Простота вычислений и манипулирования данными является основным положительным моментом для развития АП. Увеличение количества исследований в области АП обусловлено необходимостью прототипирования на этапе разработки продукта. АП непосредственно участвует в процессе прототипирования, сокращая время и отходы материалов, используемых в процессе [1,2,5].

Целью данной работы является проведение сравнительного анализа условий формирования монослоя керамического и металлических порошков. методом аддитивной технологии с учетом технических параметров электронно-лучевого плавления (EBM) и селективного лазерного спекания (SLM). Необходимые для расчетов характеристики материалов приведены в таблице 1. ($k\lambda$ - коэффициент поглощения лазерного излучения)

Таблица 1 – Физические характеристики материалов

Материал	$T_{пл}, K$	$\rho, кг/м^3$	$c, Дж/кг*К$	$L, Дж/кг$	$k\lambda$
Al ₂ O ₃	2345	3990	770	139000	0.13
Титан	1941	4505	523	417000	0.45
Железо	1812	7874	450	247100	0.42
Никель	1728	8902	440	300051	0.33

Физическая модель

Упрощенные физические модели двух методов – SLM и EBM – очень мало отличаются, физическая модель в этом разделе показывает процесс аддитивного плавления высокоэнергетическим (ВЭ) лучом [3,4]. Как показано на рисунке 1 а, пятно ВЭ луча диаметром d движется со скоростью v по поверхности насыпного слоя порошка толщиной h , при этом передавая мощность W на объем порошка. Для того чтобы упростить расчет энергетических условий для формирования слоя материала, мы рассматриваем форму пятна электронного пучка как квадрат с длиной стороны, равной a , как представлено на рисунке 1 б.

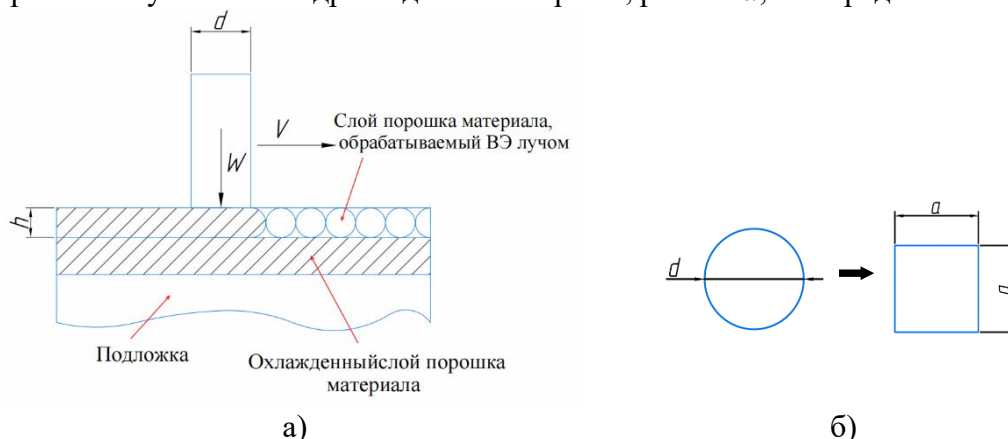


Рисунок 1 – Физическая модель процесса аддитивного плавления ВЭ лучом (а), форма пятна луча (б)

Математическая модель

В основе расчета лежит уравнение энергетического баланса: подведенное к слою порошка тепло Q , необходимое для его нагрева Q_1 и для расплавления Q_2 , обеспечивается энергией сканирующего луча $E = \Phi W t$, где t – время воздействия пятна луча на поверхность порошка.

$$Q = m c \Delta T + m L = E = \Phi W t \quad (1)$$

Для описания процесса плавления высокоэнергетическим лучом введем следующие технологические параметры обработки порошка – физические свойства материала порошка:

- W – мощность ВЭ луча; a – размер пятна ВЭ луча;
- ΔT – разность температур ($T_{пл} - T_{комн}$); da – ширина, попадающая под воздействие ВЭ луча;
- h – толщина слоя порошка; ρ – плотность порошка;
- ϑ – скорость движения ВЭ луча; c – теплоемкость порошка;
- d – диаметр пятна на мишени; L – скрытая теплота плавления.
- Φ – эффективный КПД нагрева;

С помощью основной формулы можно установить зависимость между технологическими параметрами процесса и скоростью ВЭ луча ϑ , при которой обеспечивается получение слоя расплавленного порошка материала:

$$\vartheta = \frac{\Phi * W}{\rho_0 * k_p * h * da * (c * \Delta T + L)}$$

Затем вставляем эту формулу в таблицу 2 с учетом особенностей EBM и SLM.

Таблица 2 – Математические модели и технологические параметры обработки порошка

EBM	SLM
U – ускоряющее напряжение; I – ток; η – эффективный КПД нагрева.	$k\lambda$ – коэффициент поглощения лазерного излучения материалом
$\vartheta = \frac{\eta * U * I}{\rho_0 * k_p * h * da * (c * \Delta T + L)}$	$\vartheta = \frac{k\lambda * W}{\rho_0 * k_p * h * da * (c * \Delta T + L)}$

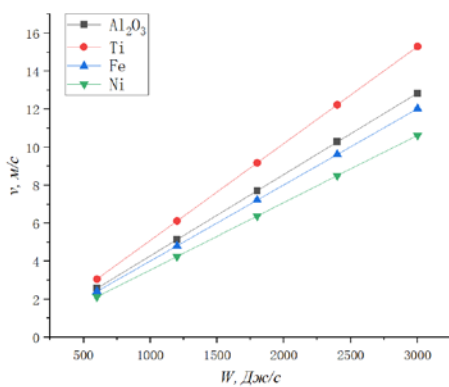
Расчеты и аналитика

Численный эксперимент проводится для условий, отвечающих установке промышленного электроннолучевого 3D принтера EBM200 и лазерного 3D-принтера SLM500, таблица 3.

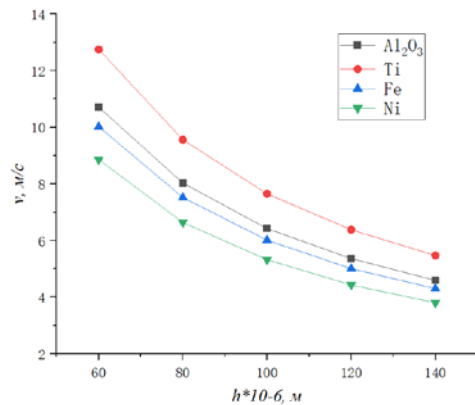
Таблица 3 – Характеристики установок EBM200 и SLM500 [5]

Тип установки	W , Вт	ϑ , м/с	d , м	U , кВ	I , мА
EBM200	3000	>1000	0.0005	60	0-50
SLM500	400+1000	>10	0.00015	-	-

Расчетные данные были получены при обработке порошка выбранных материалов двумя методами – электронно-лучевой плавки и селективного лазерного сплавления, рисунок 2.



а)



б)

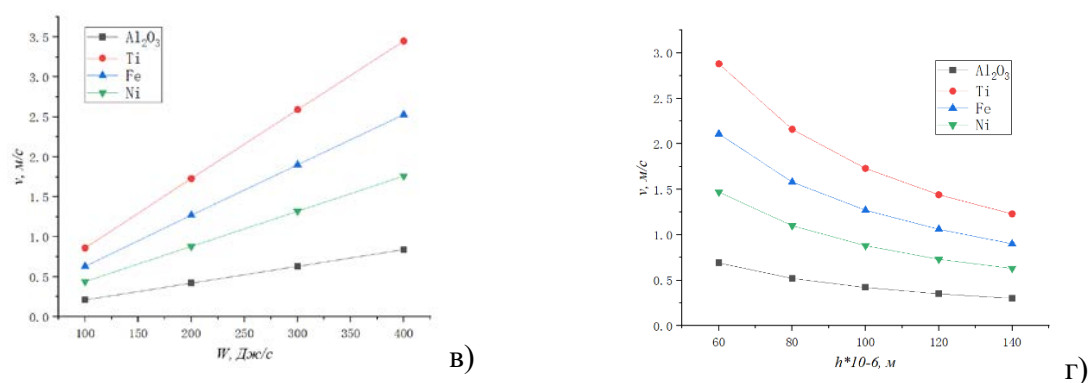


Рисунок 2 – Зависимость скорости движения электронного луча от мощности электронного луча (а), от толщины слоя порошок (б); зависимость скорости движения лазерного луча от мощности лазерного луча (в); от толщины слоя порошка (г)

По результатам расчетов можно сделать следующие выводы:

Сравнительный анализ условий получения изделий из металлических порошков и из керамики методом EBМ и SLM показывает, что необходимая скорость движения электронного луча для разных материалов одного порядка, в то время как скорость движения лазерного для керамического материала ниже, чем для металлических. Это объясняется более низким коэффициентом поглощения лазерного излучения керамикой.

Сравнительный анализ условий получения изделий из керамики методом EBМ и SLM показывает, что EBМ по сравнению с SLM имеет более высокую скорость сканирования луча благодаря высокой мощности излучателя. Кроме того, КПД лазерного луча меньше, чем КПД электронного из-за сильного отражения от металлической поверхности.

Список литературы

1. Kamal N.L.M., Bas Y. Materials and technologies in road pavements-an overview // Materials Today: Proceedings. – 2021. – Vol. 42. – P. 2660–2667.
2. Agapovichev A.V., Khaimovich A.I. et al. Multiresponse Optimization of Selective Laser Melting Parameters for the Ni-Cr-Al-Ti-Based Superalloy Using Gray Relational Analysis // Materials. – 2023. – Vol. 16(5), 2088.
3. Gusarov A.V., Smurov I. Modeling the interaction of laser radiation with powder bed at selective laser melting // Physics Procedia. – 2010. – Vol. 5. – P. 381–394.
4. Yan W., Ge W., Smith J., Lin S., Kafka O.L., Lin F., Liu W.K. Multi-scale modeling of electron beam melting of functionally graded materials // Acta Materialia. – 2016. – Vol. 115. – P. 403–412.
5. Зленко, М.А., Попович, А.А., Мутылина, И.Н. Аддитивные технологии в машиностроении. – СПб.: Издательство политехнического университета, 2013. – 212 с.