

УДК 658.5: 621.762.06

МОДЕЛЬ ЭЛЕМЕНТАРНОЙ ПОРОШКОВОЙ ЯЧЕЙКИ ДЛЯ ВИРТУАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПРОЦЕССА СЕЛЕКТИВНОГО ЛАЗЕРНОГО СПЛАВЛЕНИЯ ПРИ 3D-ПЕЧАТИ ПОРОШКАМИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ СПЛАВОВ

Щербак Р.Д.

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
г. Минск, Республика Беларусь

Солодухин И.А. – канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры физики
Кузнечик О.О. – зав. группой участка 3D-печати Института
порошковой металлургии имени академика О.В.Романа

Аннотация. В статье указана актуальность развития аддитивных технологий, в целом, и использующих процесс селективного лазерного спекания при 3D-печати порошками, в частности. Приведена технологическая схема такой печати и алгоритм её выполнения. Исходя из анализа результатов численного моделирования и основ порошковой металлургии, предложена модель элементарной порошковой ячейки, учитывающей такие физико-механические свойства порошкового слоя, как его насыпная плотность и плотность утряски, а также наличие просвета. Рекомендовано использовать предлагаемую модель элементарной ячейки при проведении виртуальных исследований процессов СЛС, используемых при осуществлении 3D-печати порошками металлических сплавов, чтобы повысить точность расчётов необходимых режимов её выполнения.

Ключевые слова. Аддитивные технологии, селективное лазерное сплавление (СЛС), порошковый слой, насыпная плотность, плотность утряски, элементарная порошковая ячейка.

Введение. Известно, что в Беларуси, как и в США, а также странах БРИКС, ЕС и СНГ, в настоящее время особое внимание уделяется развитию аддитивного производства и, в частности, используемым на нём аддитивным технологиям трёхмерной цифровой печати (3D-печати) селективным лазерным сплавлением (СЛС) порошков металлических сплавов [1–3]. Как следует из анализа работ [1–10], процессы 3D-печати методом СЛС являются родственными по отношению к металлургическим сварочным процессам, поэтому в современных программных средствах подготовки к такой 3D-печати, как правило, используются результаты решения численными методами тепловой задачи движущегося по поверхности твёрдого тела точечного источника, под которым понимается фокальное пятно лазерного излучения. Однако, при практическом решении такой задачи в настоящее время не учитывается фактическое структурно-фазовое состояние наносимого на платформу 3D-печати порошкового слоя как сыпучего материала [11, 12], у которого имеется насыпная плотность (ею порошок обладал, когда находился в бункере подачи), плотность утряски (плотность порошка на платформе 3D-печати), и просвет (ею порошок обладает в обоих случаях). При решении тепловой задачи о подвижном точечном источнике все эти понятия заменяются одним показателем пористости порошкового тела, что ограничивает точность решения такой задачи. Способствовать повышению точности решения этой задачи может выделение в сформованном на платформе 3D-печати порошковым слое виртуальной ячейки, состоящей из частиц металлического сплава, для которой применимы такие понятия, как насыпная плотность, плотность утряски и просвет. Целью данной работы является определение такой ячейки, которая учитывает эти показатели, характеризующие физико-механические свойства порошковых сыпучих материалов, для виртуальных исследований численными методами [4–8] процесса СЛС порошков металлических сплавов при 3D-печати.

1. Модельное представление и анализ процесса СЛС металлических порошков при 3D-печати. Как следует из анализа работ [1–3], исследуемый процесс 3D-печати схематично (рис. 1) можно описать следующим алгоритмом действий.

1) Сначала, платформа подачи 7 (рис. 1) выдвигает из бункера порошок 5 на определённую высоту Δh_1 , по отношению к столу, на котором перед платформой подачи 7 в своём крайнем положении находится скрепер 4, имеющий роликовые катки.

2) После окончания выдвигания порошкового слоя, скрепер 4 начинает сдвигать его в направлении платформы 3D-печати 8. Во время этого сдвига, эта платформа с ранее насыпанной частью порошка и полученного из него путём СЛС изделия 6, опускается вниз по отношению к столу на определённую глубину Δh_2 , образуя нишу относительно его поверхности.

3) При пересечении этой ниши скрепером 4 большая часть сдвигаемого порошка 5 попадёт именно туда и уплотнится под воздействие вращающихся катков скрепера, а оставшаяся меньшая – в приёмник, который на типовой схеме (рис. 1) не показан.

4) После пересечения скрепером 4 платформы 3D-печати 8 он останавливается на короткий промежуток времени (1-2 с), после чего начинает своё движение в исходное состояние. После завершения вторичного прокатывания валками уже сформованного на платформе 3D-печати 8 порошкового слоя включается лазер 1, а вместе с ним и двухкоординатная угловая система поворота зеркал 2, которая программно отклоняет и проецирует на сформованный порошковый слой с помощью F-Theta-линзы 3 сфокусированное лазерное излучение в начальную точку трека перемещения своего фокального пятна. Движение этого пятна по треку с задаваемой мощностью лазерного излучения обеспечивается с помощью программного управления лазером 1 и двухкоординатной угловой системой поворота зеркал 2.

5) После завершения движения фокального пятна лазерного излучения по первому треку, происходит программный скачкообразный переход к следующему, и такие переходы совершаются до тех пор, пока этими треками не будет заполнена с заданным коэффициентом перекрытия вся площадь программно заданного сечения послойно-получаемого в процессе 3D-печати изделия.

6) Вышеперечисленные пункты 1–5 последовательно выполняются до тех пор, пока процесс 3D-печати не будет завершён.

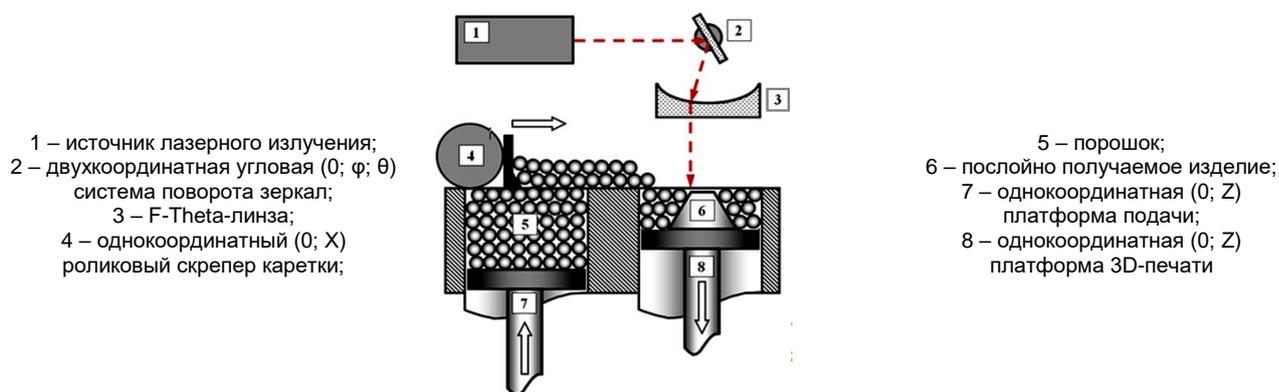


Рисунок 1 – Типовая функциональная схема СЛС металлических порошков при 3D-печати

2. Принимаемые допущения и обоснование выбора из порошкового слоя элементарной ячейки для проведения виртуальных исследований процесса СЛС. Как показал анализ работ [4–9], и это отмечалось в водной части, в настоящее время, процессы СЛС, используемые при 3D-печати порошками металлических сплавов, относят к родственным процессам точечной сварки, поэтому в современных программных средствах подготовки к такой 3D-печати, как правило, используются результаты решения тепловой задачи движущегося по поверхности твёрдого тела точечного источника (рис. 2), под которым понимается фокальное пятно лазерного излучения.

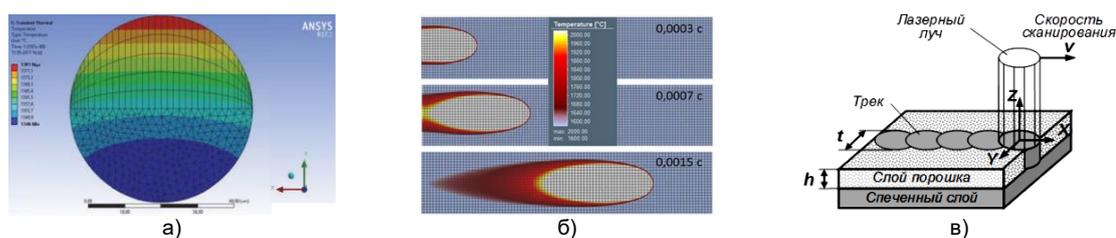


Рисунок 2 – Наиболее распространённые модели СЛС фокальным пятном лазерного излучения

Из анализа работ [4–9] следует, что изучение численными методами процесса СЛС, как точечного перемещения фокального пятна лазерного излучения по поверхности порошкового слоя, начинается с точечного стационарного нагрева этим пятном либо порошковой частицы (рис. 2 а), группы из двух-трёх частиц или некоторой точечной элементарной области порошкового слоя, границы которой определены размером фокального пятна (рис. 2 б, в), т. е. с определения температуры нагрева при нулевой скорости его перемещения. Учтём это в дальнейшем.

Представленные в работах [1–6] модели процесса СЛС, как отмечалось выше, не отражают напрямую такие физико-механические свойства порошкового слоя как насыпная плотность, плотность и просвет, которыми он, безусловно, обладает [6, 11, 12]. При выделении с учётом этого элементарной области сплавления этого слоя при стационарном воздействии фокального пятна, структура порошкового слоя толщиной Δh_2 , формируемого на поверхности платформы 3D-печати, будет соответствовать приведённой на рис. 3 схеме.



а) вид с боку проецируемого фокального пятна; б) вид сверху проецируемого фокального пятна;
 Φ – проецируемый фокальным пятном общий поток лазерного излучения: $\Phi = \Phi_1 + \Phi_2$, где Φ_1 и Φ_2 – верхний и нижний ярус
 Рисунок 3 – Взаимодействие потока лазерного излучения с двухъярусной элементарной порошковой ячейкой

Согласно принятому допущению (рис. 3), проецируемый фокальным пятном поток лазерного излучения Φ на элементарную порошковую ячейку при взаимодействии с ней будет распадаться на два частных потока Φ_1 и Φ_2 , из которых первый, Φ_1 , будет поглощаться (и частично рассеиваться) на первом (верхнем) ярусе, а второй, Φ_2 , – на втором (нижнем) ярусе. Согласно зависимости Слихтера [6, 11], относительные величины двух частных потоков ($\psi_1 = \Phi_1/\Phi$ и $\psi_2 = \Phi_2/\Phi$) будут связаны с такими величинами, как просвет (Ξ) и угол (α) наклона элементарной ячейки, следующим образом:

$$\psi_1 = 1 - \Xi = \frac{\pi}{4 \cdot \sin(\alpha)} \quad \psi_2 = \Xi = 1 - \frac{\pi}{4 \cdot \sin(\alpha)}. \quad (1)$$

Теперь учтём, что при взаимодействии с порошковой поверхностью металлических сплавов из-за возможного отражения частный поток Φ_1 будет не полностью поглощаться частицами дисперсной фазы, входящими в состав верхнего яруса. При этом из-за возможных внутренних многократных отражений частный поток Φ_2 , наоборот, будет практически полностью поглощен частицами дисперсной фазы, входящими в состав верхнего и нижнего ярусов [6, 11]. Исходя из этого, в дальнейшем под ψ_1 будем понимать ψ .

Если предположить [6–10], что поверхностная плотность потока (q_Φ) лазерного излучения, в определенной степени, является однородной, то её поглощаемую часть в поверхностном порошковом слое можно выразить через поверхностную плотность q_0 и одновременно с этим учесть оказываемое на этот порошковый слой световое давление (p_{red}), используя закон Бугера:

$$q_0(\xi) = q_\Phi \cdot \psi \cdot (1 - R_{ref}) \cdot \exp\left(-\int_0^\xi \chi(\xi) d\xi\right); \quad p_{red} = \frac{2 \cdot R_{ref} \cdot q_\Phi}{c} \cdot \psi \cdot \exp\left(-\int_0^\xi \chi(\xi) d\xi\right), \quad (2)$$

где ξ – глубина поглощения излучения; R_{ref} – коэффициент отражения; ψ – определяется согласно выражению (1); χ – коэффициент линейного поглощения; c – скорость света.

Учитывая малую глубину ($\xi \sim 10^{-8}$ – 10^{-7} м) проникновения света в металлы по отношению к диаметру частиц дисперсной фазы, и полагая, что проецируемая на них часть потока лазерного излучения является однородной, следует ожидать, что в приповерхностном слое толщиной ξ этих частиц возникнет первичный тепловой источник. Этот источник способен вызвать не только нагрев, но и лазерную абляцию металла с поверхности частиц дисперсной фазы.

Поглощаемая частицами дисперсной фазы энергия лазерного излучения будет переходить в тепловую энергию, способствующую изменению не только температуры находящегося в контактной зоне металла, но и его агрегатного состояния. Если необходимо добиться устойчивости образующихся при этом расплавленных металлических контактов, то следует обеспечить выполнение условия, при котором тепловая энергия (W_Q), вводимая в расплав, не превосходит энергию сил его поверхностного натяжения:

$$P_{LR} \cdot (1 - \Xi) \cdot \psi = \frac{d}{dt} W_Q \leq \frac{d}{dt} (\sigma_s \cdot S_\chi), \quad (3)$$

где P_{LR} – мощность лазерного излучения; S_χ – площадь расплавленной поверхности.

На данном этапе проводимых исследований выражения (1)–(3) позволяют учитывать при варьирования мощности лазерного излучения влияние на протекание процесса СЛС активируемых стационарным потоком лазерного излучения, ограниченного размерами фокального пятна, механизмов твёрдофазного и жидкофазного спекания частиц [6, 11, 12], входящих в состав элементарной порошковой ячейки. Вместе с этим, также следует отметить:

1) Количество частиц порошка (8 шт.) в элементарной ячейке было установлено исходя из того, что у большинства использующих процесс СЛС 3D-принтеров [1–3] минимально устанавливаемый диаметр фокального пятна соответствует $D_F = 0,1$ мм, а наиболее востребованной порошковой фракцией является та, у которой фракционный состав соответствует диаметрам частиц металлического сплава $D_f \leq 45$ мкм, не менее 80 % частиц имеют округлую, близкую к шарообразной форму, относительное отклонение их диаметров от $D_f = 45$ мкм, не выходит за пределы 10 %.

2) Приведенная на рис. 3 элементарная порошковая ячейка обладает не только просветом, но и характерной для сыпучих материалов насыпной плотностью (рассчитывается исходя из отношения массы частиц к объёму элементарной ячейки, укладка которой близка к ортогональной [6, 11], т.е. при $\alpha \rightarrow 90^\circ$), а также плотностью утряски (рассчитывается также для элементарной ячейки, укладка которой [6, 11] близка к гексагональной, т.е. $\alpha \rightarrow 60^\circ$). Наиболее близкой к насыпной плотности обладает выдвигаемый платформой подачи 7 порошок 5 на высоту Δh_1 (рис. 1), а наиболее близкой к плотности утряски – порошок после формования на платформе 3D-печати.

Данная работа, в дальнейшем, будет продолжена в направлении решения тепловой задачи сначала с неподвижным точечным источником, способным расплавить элементарную порошковую ячейку, а затем и с подвижным точечным тепловым источником, движущимся по поверхности порошкового слоя, состоящей из множества элементарных порошковых ячеек.

Заключение. Исходя из анализа технологической схемы, алгоритма осуществления 3D-печати порошками металлических сплавов с помощью СЛС и фракционного состава этих порошков, предложена модель элементарной порошковой ячейки для виртуального исследования численными методами режимов такой печати. Рассмотрены зависимости, которые позволяют учитывать влияние на протекание процесса СЛС механизмов твёрдофазного и жидкофазного спекания частиц, входящих в состав такой порошковой ячейки, активируемых стационарным потоком лазерного излучения, ограниченного размерами фокального пятна.

Список использованных источников:

1. Технологии и оборудование аддитивного производства: учеб. пособие / А.И. Голоднов, С.Н. Злыгостев, И.Е. Фурман. – Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2022. – 128 с.
2. Рудской А.И. Аддитивные технологии: учеб. пособие / А.И. Рудской [и др.] – СПб: С.-Петербург. политехн. ун-т Петра Великого, 2017. – 251 с.
3. Тарасова Т.В. Аддитивное производство: учеб. пособие – М.: Станкин, 2019. – 196 с.
4. Богданович В.И. Математическое моделирование процессов плавления порошка в технологии селективного лазерного сплавления / В.И. Богданович [и др.] // Известия Самарского научного центра Российской академии наук, 2017. – Т. 19. – № 4. – С. 105–114.
5. Агаповичев А.В. Математическое моделирование процесса селективного лазерного сплавления порошка титанового сплава ВТ6 / А.В. Агаповичев, А.В. Сотов, В.Г. Смелов // Машиностроение и машиноведение, 2020. – Т. 19. – № 2. – С. 53–62.
6. Минько Д.В. Теория и практика получения функционально-градиентных материалов импульсными электрофизическими методами / Д.В. Минько, К.Е. Белявин, В.К. Шелег. – Минск: БНТУ, 2020. – 450 с.
7. Взаимодействие лазерного излучения с металлами / А.М. Прохоров [и др.]. – Бухарест: Academiei; М.: Наука, 1988. – 537 с.
8. Бледнова Ж.М. Моделирование температурного поля при лазерной наплавке материала с памятью формы на основе никелида титана / Ж.М. Бледнова, М.А. Степаненко // Научный журнал КубГАУ, 2015. – №107(03). – С. 1–19.
9. Васильцов В.В. Послойная лазерная наплавка металлических порошков: аналитическая теория и эксперимент / В.В. Васильцов [и др.] // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Серия «Машиностроение», 2012. – С. 69–77.
10. Григорьянц А.Г. Технологические процессы лазерной обработки: учебник / А.Г. Григорьянц, И.Н. Шиганов, А.И. Мисюров. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. – 664 с.
11. Белов С.В. Пористые проницаемые материалы: Справочное издание / С.В. Белов [и др.]. – М.: Металлургия, 1987. – 335 с.
12. Осокин Е.Н. Процессы порошковой металлургии. Версия 1.0 / Е.Н. Осокин, О.А. Артемьева. – Красноярск: ИПК СФУ, 2008. – 421 с.

UDC 658.5: 621.762.06

A MODEL OF AN ELEMENTARY POWDER CELL FOR VIRTUAL STUDIES OF THE SELECTIVE LASER MELTING PROCESS IN 3D PRINTING OF METAL ALLOY POWDERS

Shcherbak R.D.

*Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics
Minsk, Republic of Belarus*

*Saladukhin I.A. – PhD in Physics and Mathematics, Associate Professor, Department of Physics
Kuznechik O.O. – Head of the 3D Printing Section, Powder Metallurgy Institute*

Abstract. The article highlights the relevance of additive technologies development in general and those employing the selective laser melting process in 3D printing of powders in particular. A technological scheme of such printing and an algorithm for its implementation are presented. Based on the analysis of numerical simulation results and the fundamentals of powder metallurgy, a model of an elementary powder cell is proposed, taking into account such physical and mechanical properties of the powder layer as its bulk density and tap density, as well as the presence of voids. It is recommended to use the proposed model of an elementary cell in virtual studies of SLM processes used in 3D printing of metal alloy powders to improve the accuracy of calculations of the necessary operating modes.

Keywords. *Additive manufacturing, selective laser melting (SLM), powder layer, bulk density, tap density, elementary powder cell.*