

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА СЕЛЕКТИВНОГО ЛАЗЕРНОГО СПЛАВЛЕНИЯ ПОРОШКА ТИТАНОВОГО СПЛАВА ВТ6

© 2020

- А. В. Агаповичев** старший преподаватель кафедры технологий производства двигателей; Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва; agapovichev5@mail.ru
- А. В. Сотов** кандидат технических наук, научный сотрудник лаборатории «Дизайн материалов и аддитивного производства»; Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого; sotovanton@yandex.ru
- В. Г. Смелов** кандидат технических наук, доцент кафедры технологий производства двигателей; Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва; pdla_smelov@mail.ru

Разработана цифровая (конечно-элементная) модель нагрева и плавления слоя металлического порошка в условиях его нагрева лазерным потоком тепла с использованием современного стандартного программного продукта для оценки геометрических параметров ванны расплава, возникающей в процессе воздействия лазерного излучения на слой металлического порошка титанового сплава ВТ6. В модели учитывается скрытая теплота, высвобождаемая при фазовом переходе материала; плавление материала в диапазоне температур солидуса и ликвидуса; излучение и конвекция с поверхности слоя металлического порошка. Установлено, что основной причиной образования пористости в материалах, синтезируемых технологией селективного лазерного сплавления, является образование межслойных дефектов, возникающих из-за недостаточного проплавления между слоями или недостаточного перекрытия между треками. Так глубина ванны расплава должна составлять не менее 1,5 толщины слоя для синтеза плотного материала. Результаты численного моделирования позволили определить диапазон технологических параметров сканирования, при применении которых образуется ванна расплава глубиной более 75 мкм.

Аддитивные технологии; селективное лазерное сплавление; ванна расплава; математическая модель; модель двойного эллипсоида источника тепла; численное моделирование.

Цитирование: Агаповичев А.В., Сотов А.В., Смелов В.Г. Математическое моделирование процесса селективного лазерного сплавления порошка титанового сплава ВТ6 // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2020. Т. 19, № 2. С. 53-62. DOI: 10.18287/2541-7533-2020-19-2-53-62

Введение

Создание нового технологического уклада современного производства, имеющего место в настоящее время во всех развитых странах мира, фактически реализуется за счёт применения мощного компьютерного обеспечения систем автоматизированного проектирования и применения новых технологий, к числу которых относится аддитивная технология селективного лазерного сплавления (СЛС) порошковых материалов [1].

Одним из важнейших этапов разработки процессов изготовления деталей технологией СЛС, определяющим механические свойства синтезируемого материала, является выбор рациональных технологических параметров сканирования. Использование рациональных технологических параметров сканирования позволяет изготавливать детали с плотностью, близкой к 100%, и с механическими свойствами, сопоставимыми со

свойствами деталей, полученными с использованием традиционных заготовительных технологий.

Технологические параметры сканирования часто объединяют в один параметр, который называется плотностью энергии E (Дж/мм³) и определяется по формуле:

$$E = \frac{P}{Vht},$$

где P – мощность лазерного излучения, Вт; V – скорость сканирования, мм/с; h – шаг сканирования, мм; t – толщина сплавляемого слоя.

Этот параметр не имеет физического смысла, а используется для сравнения физико-механических свойств материала, синтезированного при различных технологических параметрах. В настройках аддитивных установок плотность энергии в основном задаётся такими параметрами как мощность лазерного излучения и скорость сканирования. Данные технологические параметры зависят от марки используемого материала, его размеров и формы.

Основной причиной образования пористости в материалах, синтезируемых технологией СЛС, является образование межслойных дефектов, возникающих из-за недостаточного проплавления между слоями или недостаточного перекрытия между треками (рис. 1). Форма и размеры трека напрямую зависят от применяемых технологических параметров сканирования и соответствуют геометрическим параметрам образовавшейся в результате воздействия лазерного излучения ванны расплава. Геометрическими параметрами ванны расплава являются её ширина (W) и глубина (D).

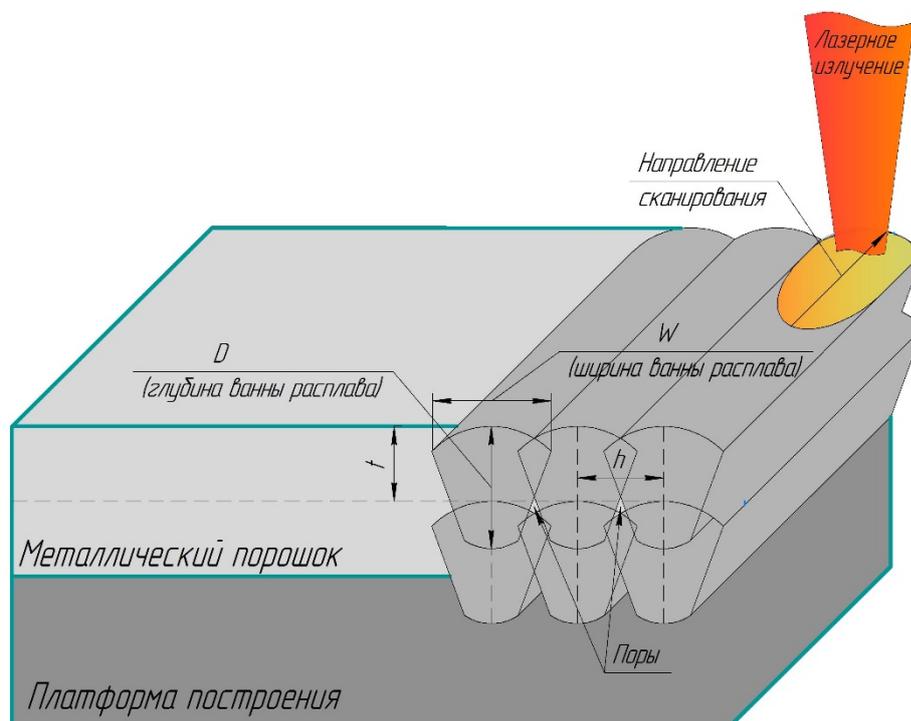


Рис. 1. Параметры сканирования технологии СЛС

Использование технологических параметров, в результате воздействия которых образуется ванна расплава шириной (W) меньше, чем шаг сканирования, может привести к возникновению пор. Шаг сканирования рекомендуется выбирать из диапазона 50...100% от ширины ванны расплава.

Также существенное влияние на пористость синтезируемого материала оказывает перекрытие между слоями. С одной стороны, необходимо обеспечивать полное сплавление нового слоя с предыдущим и при этом исключить возможность перехода плавления материала в режим «замочной скважины». При этом режиме лазерный луч локально создаёт температуру, достаточную для испарения материала. Давление испарения, создаваемое в материале, создаёт капилляр с диаметром примерно в 1,5 раза больше, чем фокус лазерного луча. Расплавленный металл протекает вокруг парового капилляра и застывает на обратной стороне. Такой тип ванны расплава очень неустойчив и может разрушаться сам по себе, часто захватывая внутрь газ. Образовавшиеся поры залегают настолько глубоко, что сплавление следующего слоя или даже повторная переплавка текущего не сможет удалить эти поры [2]. Опыт показывает, что глубина ванны расплава (D) должна составлять не менее 1,5 толщины слоя (t) для синтеза плотного материала [3-5].

Содержательная модель процесса

В качестве исходного материала при СЛС используются мелкодисперсные металлические порошки. Толщина слоя при использовании аддитивной установки SLM 280^{HL} может составлять от 20 до 100 мкм. Следовательно максимальный размер частиц порошка не должен превышать толщину слоя [6]. Из бака, в котором содержится металлический порошок, при помощи шнека металлический порошок порционно подаётся в дозатор (рекоутер). Дозатор, перемещаясь в горизонтальном направлении, доставляет металлический порошок на платформу построения и при помощи силиконового ножа разравнивает его. Излишки металлического порошка попадают в передний и задний баки. После того как слой порошка выровнен, в работу вступает лазер и при помощи системы зеркал выборочно сплавляет металлический порошок. При воздействии лазерного излучения порошок нагревается, а при приложении необходимой энергии плавится, образуя жидкую ванну. Затем жидкая ванна быстро затвердевает, тем самым образуя фрагмент детали. После того как селективное лазерное сканирование текущего слоя закончено, платформа построения при помощи поршня опускается по оси Z на величину слоя и насыпается новый слой порошка. Процесс является циклическим и повторяется до тех пор, пока изделие не будет полностью закончено (рис. 2).

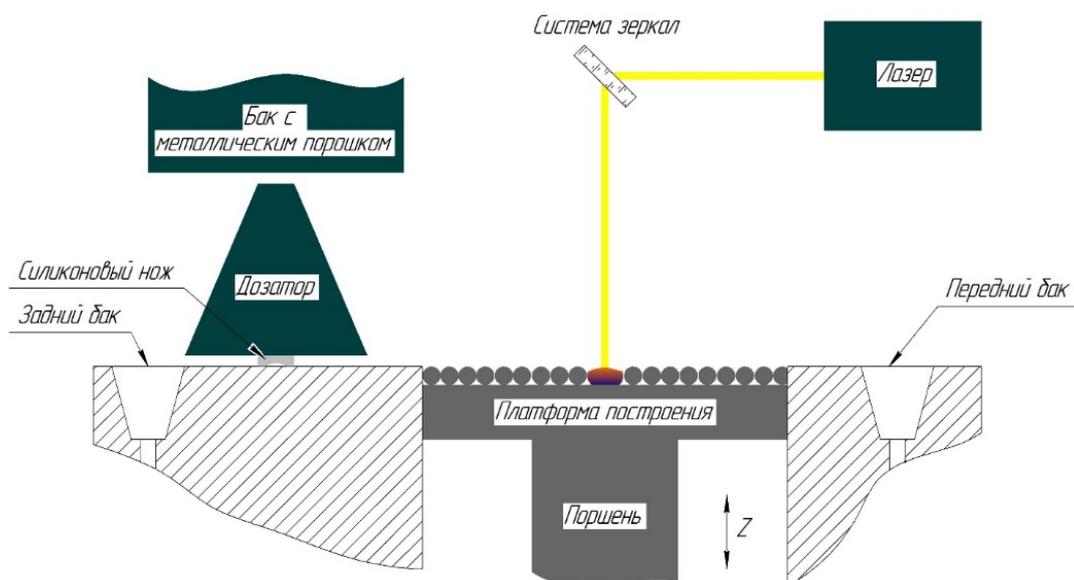


Рис. 2. Принципиальная схема процесса СЛС

Проведено исследование применяемого металлического порошка титанового сплава ВТ6. Результаты исследования показали, что порошковый материал имеет явно выраженную сферическую форму с незначительным количеством включений в виде сателлитов (рис. 3). Гранулометрический состав порошка находится в диапазоне от 5 до 55 мкм.

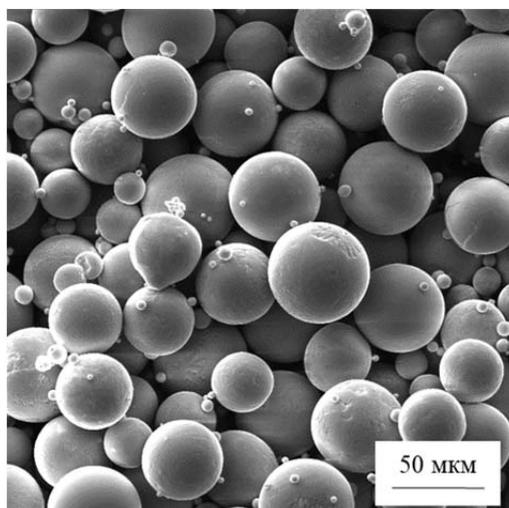


Рис. 3. Микрофотография порошка титанового сплава ВТ6

Постановка математической модели процесса

Постановка математической модели процесса СЛС должна состоять из соответствующего дифференциального уравнения теплопроводности и краевых условий, учитывающих передачу теплоты слою металлического порошка от лазерного излучения и особенности теплообмена слоя металлического порошка с окружающим пространством. Очевидно, что получение достоверных данных о распределении температурных полей в объёме тела при воздействии на него интенсивного лазерного излучения с учётом фазового перехода в диапазоне температур солидуса и ликвидуса может быть решено только численным методом с использованием современных программных продуктов. Поэтому исследование распределения температуры в слое металлического порошка в пределах сплавления одного трека выполнялось с использованием цифровой модели сплавления, разработанной на основе коммерческого программного продукта Simufact Welding компании MSC Software.

Уравнение теплопроводности для определения температуры в изотропном теле, в объёме которого может происходить выделение или поглощение тепла, используемое в программном продукте Simufact Welding, имеет вид [7]:

$$C(T) \frac{dT}{dt} + K(T)T = Q,$$

где $C(T)$ и $K(T)$ – зависящие от температуры матрицы теплоёмкости и теплопроводности; T – узловой вектор температуры; Q – вектор теплового потока.

Ввод энергии лазерного излучения, который может быть физически описан взаимодействием электромагнитного излучения с порошкообразным, жидким и твёрдым веществом, осуществляется с использованием модели двойного эллипсоида. В настоящее время модель двойного эллипсоида источника тепла является одной из наиболее

широко используемых при моделировании процессов изготовления деталей с использованием лазерного излучения [8]. В модели используется комбинированный источник тепла, состоящий из двух эллипсоидальных источников (рис. 4).

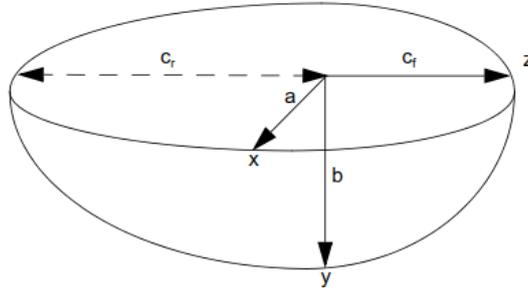


Рис. 4. Двойной эллипсоид Голдака [7]

Для точки (x, y, z) внутри переднего полуэллипсоида тепловой поток определяется как [7; 9; 10]

$$q_f(x, y, z) = \frac{6\sqrt{3}f_f P}{abc_f \pi \sqrt{\pi}} \exp\left(\frac{-3x^2}{a^2}\right) \exp\left(\frac{-3y^2}{b^2}\right) \exp\left(\frac{-3z^2}{c^2}\right), z \geq 0,$$

для точки внутри заднего полуэллипсоида тепловой поток выражается как

$$q_r(x, y, z) = \frac{6\sqrt{3}f_r P}{abc_r \pi \sqrt{\pi}} \exp\left(\frac{-3x^2}{a^2}\right) \exp\left(\frac{-3y^2}{b^2}\right) \exp\left(\frac{-3z^2}{c^2}\right), z < 0.$$

Здесь x, y, z – локальные координаты точки относительно движущегося источника тепла; a, b, c_f, c_r – наборы длин, определяющие передний и задний полуэллипсоиды соответственно; P – мощность лазерного излучения; коэффициенты пропорции f_f, f_r описывают распределение энергии в переднем и заднем полуэллипсоидах и определяются как

$$f_f = \frac{2}{(1 + c_r/c_f)}, \quad f_r = \frac{2}{(1 + c_f/c_r)}.$$

В модели учитывается скрытая теплота, высвобождаемая при фазовом переходе материала, путём табличного ввода зависящих от температуры значений теплоёмкости.

Излучение и конвекция представляют собой граничные условия модели и описывают степень потери тепла. Конвекция q описывает теплопередачу между поверхностью модели и окружающей средой с учётом коэффициента теплопередачи H , при котором тепло в основном переносится потоком газа [7]:

$$q = H(T_s - T_\infty),$$

где q, H, T_s, T_∞ – соответственно тепловой поток, коэффициент теплопередачи, неизвестная температура поверхности и температура окружающей среды.

Тепло, излучаемое в процессе СЛС, описывается следующим образом с учётом постоянной Стефана-Больцмана (σ) и коэффициента излучения для твёрдых тел (ε) [7]:

$$q = \sigma \varepsilon (T_{sa}^4 - T_{\infty a}^4),$$

где q – тепловой поток; T_{sa} , $T_{\infty a}$ – соответственно неизвестные температуры поверхности и окружающей среды.

Разработка цифровой модели сплавления

Разработанная трёхмерная цифровая модель (рис. 5) необходима для получения информации о распределении температуры во всех направлениях. Размеры цифровой модели были выбраны исходя из того условия, чтобы внутри модели могло быть установлено стационарное состояние ванны расплава с температурой выше температуры солидуса. Предполагается, что слой металлического порошка является сплошным. В соответствии с результатами гранулометрического анализа состава металлического порошка титанового сплава ВТ6 и технологических настроек аддитивной установки SLM280^{HL} толщина слоя принимается равной 50 мкм. Лазерный луч движется по поверхности слоя металлического порошка вдоль оси Y со скоростью сканирования V . В качестве конечных элементов используется 8-узловая сетка из элементов-гексаэдров, которая создана в коммерческой САЕ системе MSC Apex. Характерный размер элементов платформы построения составил 15 мкм, порошкового слоя – 10 мкм. Расчётная область состояла из 204222 узлов и 175000 элементов объёма.

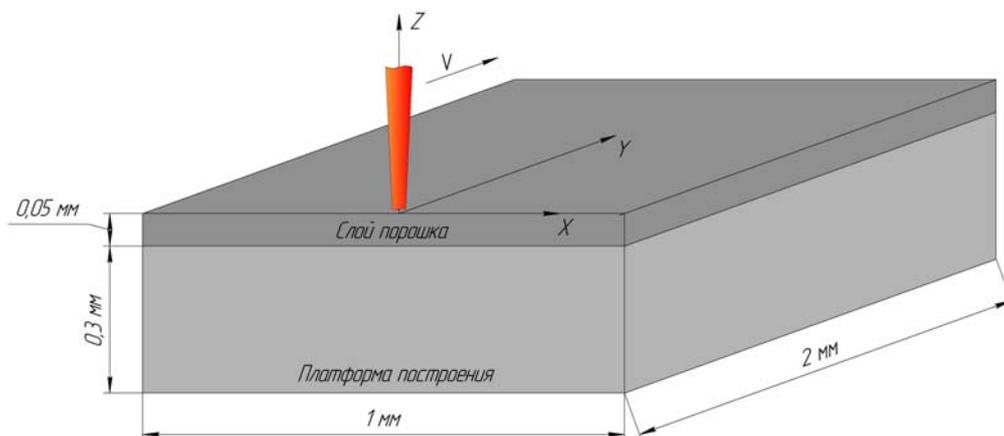


Рис. 5. Цифровая модель сплавления

Результаты численного моделирования

Распределение температуры в продольном сечении цифровой модели и на её поверхности в различные моменты времени движения лазерного луча представлено на рис. 6.

По результатам моделирования видно, что при использовании технологических параметров (мощность лазерного излучения 100 Вт, скорость сканирования 500 мм/с) в зоне воздействия лазерного излучения формируется область с температурами, превышающими температуру солидуса (для титанового сплава ВТ6 температура солидуса составляет 1590 °С, температура ликвидуса 1650 °С [11]).

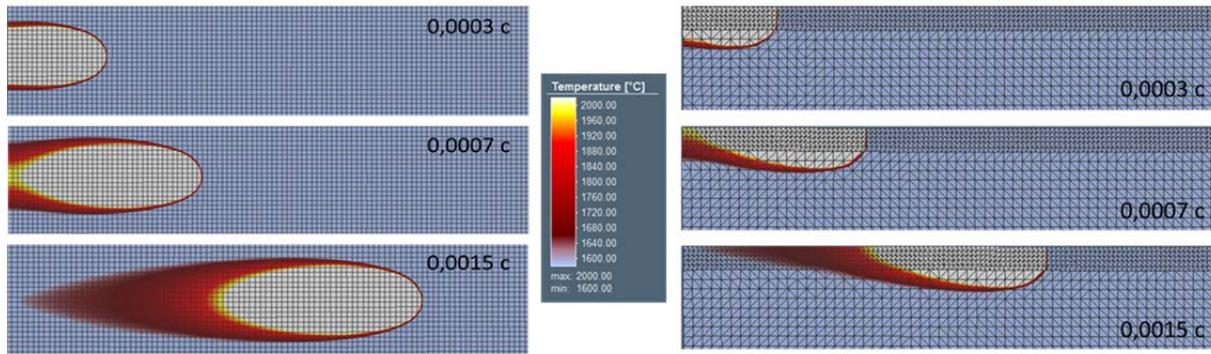


Рис. 6. Распределение температуры в продольном сечении модели в разные моменты времени

Значения геометрических параметров ванны расплава, полученные в результате численного моделирования, соотносятся со значениями, полученными в результате проведения натурных экспериментов [12; 13]. Стоит отметить, что значения геометрических параметров ванны расплава, приведённые в этих источниках, разнятся между собой. Разница в значениях может быть вызвана использованием различных аддитивных установок, использованием платформ построения, изготовленных из различных материалов, и воздействием случайных факторов.

Использование технологических параметров (мощность лазерного излучения 100 Вт, скорость сканирования в диапазоне от 500 до 1000 мм/с) следует признать не-рациональным, так как глубина ванны расплава, образующейся в результате их воздействия, меньше 1,5 слоёв (75 мкм).

Использование других технологических параметров (мощность лазерного излучения 200 ...300 Вт, скорость сканирования 500...1000 мм/с) позволяет получить ванну расплава глубиной более 75 мкм.

Заключение

Проведено численное моделирование распределения температурных полей в объёме тела при воздействии на него интенсивного лазерного излучения при использовании различных технологических параметров сканирования. Результаты численного исследования диапазона рациональных технологических параметров сканирования позволили определить геометрические параметры ванны расплава для исследуемого материала. Определён диапазон технологических параметров (мощность и скорость сканирования), при которых образуется ванна расплава глубиной более 75 мкм.

Дальнейшие исследования будут направлены на уточнение значений технологических параметров сканирования из установленного диапазона путём исследования и контроля свойств материала в соответствии с ГОСТ Р 57910-2017 «Материалы для аддитивных технологических процессов. Методы контроля и испытаний металлических материалов сырья и продукции».

Библиографический список

1. Богданович В.И., Гиорбелидзе М.Г., Сотов А.В., Проничев Н.Д., Смелов В.Г., Агаповичев А.В. Математическое моделирование процессов плавления порошка в технологии селективного лазерного сплавления // Известия Самарского научного центра РАН. 2017. Т. 19, № 4. С. 105-114.
2. Qiu C., Adkins N.J.E., Hassanin H., Attallah M.M., Essa K. In-situ shelling via selective laser melting: Modelling and microstructural characterisation // Materials & Design. 2015. V. 87. P. 845-853. DOI: 10.1016/j.matdes.2015.08.091
3. Ali H., Ma L., Ghadbeigi H., Mumtaz K. In-situ residual stress reduction, martensitic decomposition and mechanical properties enhancement through high temperature powder bed pre-heating of selective laser melted Ti6Al4V // Materials Science & Engineering: A. 2017. V. 695. P. 211-220. DOI: 10.1016/j.msea.2017.04.033
4. Heeling T., Cloots M., Wegener K. Melt pool simulation for the evaluation of process parameters in selective laser melting // Additive Manufacturing. 2017. V. 14. P. 116-125. DOI: 10.1016/j.addma.2017.02.003
5. Meiners W., Wissenbach K., Poprawe R. Direct generation of metal parts and tools by selective laser powder remelting (SLPR) // International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics. 1998. DOI: 10.2351/1.5059149
6. Kurzynowski T., Chlebus E., Kuźnicka B., Reiner J. Parameters in selective laser melting for processing metallic // High Power Laser Materials Processing: Lasers, Beam Delivery, Diagnostics, and Applications. 2012. V. 8239. DOI: 10.1117/12.907292
7. Marc® 2016. Volume A: Theory and User Information. MSC Software Corporation, 2016. 967 p.
8. Kumar C., Das M., Biswas P. A 3-D finite element analysis of transient temperature profile of laser welded Ti-6Al-4V alloy // Lasers Based Manufacturing. 2015. P. 421-440. DOI: 10.1007/978-81-322-2352-8_21
9. Goldak J., Chakravarti A., Bibby M. A new finite element model for welding heat sources // Metallurgical Transactions B. 1984. V. 15, Iss. 2. P. 299-305. DOI: 10.1007/BF02667333
10. Zinovieva O., Zinoviev A., Ploshikhin V. Three-dimensional modeling of the microstructure evolution during metal additive manufacturing // Computational Materials Science. 2018. V. 141. P. 207-220. DOI: 10.1016/j.commatsci.2017.09.018
11. Илларионов А.Г., Попов А.А. Технологические и эксплуатационные свойства титановых сплавов: учебное пособие. Екатеринбург: Уральский федеральный университет, 2014. 137 с.
12. Gong H., Gu H., Zeng K., Dilip J.J.S., Pal D., Stucker B., Christiansen D., Beuth J., Lewandowski J. Melt pool characterization for selective laser melting of Ti-6Al-4V pre-alloyed powder // 25th Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium (August, 4-6, 2014, Austin, USA).
13. Dilip J.J.S., Zhang S., Teng C., Zeng K., Robinson C., Pal D., Stucker B. Influence of processing parameters on the evolution of melt pool, porosity, and microstructures in Ti-6Al-4V alloy parts fabricated by selective laser melting // Progress in Additive Manufacturing. 2017. V. 2, Iss. 3. P. 157-167. DOI: 10.1007/s40964-017-0030-2

MATHEMATICAL MODELING OF THE PROCESS OF SELECTIVE LASER MELTING OF Ti-6Al-4V TITANIUM ALLOY POWDER

© 2020

- A. V. Agapovichev** Senior Lecturer of the Department of Engine Production Technology; Samara National Research University, Samara, Russian Federation; agapovichev5@mail.ru
- A. V. Sotov** Candidate of Science (Engineering), Researcher at the Design of Materials and Additive Manufacturing Laboratory; Peter the Great Saint Petersburg Polytechnic University, Saint Petersburg, Russian Federation; sotovanton@yandex.ru
- V. G. Smelov** Candidate of Science (Engineering), Associate Professor of the Department of Engine Production Technology; Samara National Research University, Samara, Russian Federation; pdla_smelov@mail.ru

A digital (finite element) model has been developed for heating and melting of a layer of metal powder under conditions of its heating by a laser heat flux using a modern standard software product for assessing the geometric parameters of a molten bath brought about by the action of laser radiation on a layer of Ti-6Al-4V titanium alloy metal powder. The model takes into account latent heat released during the phase transition of the material; melting of the material in the temperature range of solidus and liquidus; radiation and convection from the surface of a layer of metal powder. It has been established that the formation of interlayer defects arising from inadequate penetration between layers or insufficient overlap between tracks is the main reason for the formation of porosity in materials synthesized by selective laser melting technology. So the depth of the molten bath should be at least 1.5 of the layer thickness for the synthesis of dense material. The results of numerical simulations made it possible to determine the range of technological scanning parameters upon application of which a melt pool with a depth of more than 75 μm is formed.

Additive technologies; selective laser melting; melt pool; mathematical model; double ellipsoid model of a heat source; numerical simulation.

Citation: Agapovichev A.V., Sotov A.V., Smelov V.G. Mathematical modeling of the process of selective laser melting of Ti-6Al-4V titanium alloy powder. *Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering*. 2020. V. 19, no. 2. P. 53-62. DOI: 10.18287/2541-7533-2020-19-2-53-62

References

1. Bogdanovich V.I., Giorbelidze M.G., Sotov A.V., Pronichev N.D., Smelov V.G., Agapovichev A.V. Mathematical modeling of powder melting process in selective laser melting technology. *Izvestiya Samarskogo Nauchnogo Tsentra RAN*. 2017. V. 19, no. 4. P. 105-114. (In Russ.)
2. Qiu C., Adkins N.J.E., Hassanin H., Attallah M.M., Essa K. In-situ shelling via selective laser melting: Modelling and microstructural characterization. *Materials & Design*. 2015. V. 87. P. 845-853. DOI: 10.1016/j.matdes.2015.08.091
3. Ali H., Ma L., Ghadbeigi H., Mumtaz K. In-situ residual stress reduction, martensitic decomposition and mechanical properties enhancement through high temperature powder bed pre-heating of selective laser melted Ti6Al4V. *Materials Science & Engineering: A*. 2017. V. 695. P. 211-220. DOI: 10.1016/j.msea.2017.04.033
4. Heeling T., Cloots M., Wegener K. Melt pool simulation for the evaluation of process parameters in selective laser melting. *Additive Manufacturing*. 2017. V. 14. P. 116-125. DOI: 10.1016/j.addma.2017.02.003

5. Meiners W., Wissenbach K., Poprawe R. Direct generation of metal parts and tools by selective laser powder remelting (SLPR). *International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics*. 1998. DOI: 10.2351/1.5059149

6 Kurzynowski T., Chlebus E., Kuźnicka B., Reiner J. Parameters in selective laser melting for processing metallic. *High Power Laser Materials Processing: Lasers, Beam Delivery, Diagnostics, and Applications*. 2012. V. 8239. DOI: 10.1117/12.907292

7. Marc® 2016. Volume A: Theory and User Information. MSC Software Corporation, 2016. 967 p.

8. Kumar C., Das M., Biswas P. A 3-D finite element analysis of transient temperature profile of laser welded Ti-6Al-4V alloy. *Lasers Based Manufacturing*. 2015. P. 421-440. DOI: 10.1007/978-81-322-2352-8_21

9. Goldak J., Chakravarti A., Bibby M. A new finite element model for welding heat sources. *Metallurgical Transactions B*. 1984. V. 15, Iss. 2. P. 299-305. DOI: 10.1007/BF02667333

10. Zinovieva O., Zinoviev A., Ploshikhin V. Three-dimensional modeling of the microstructure evolution during metal additive manufacturing. *Computational Materials Science*. 2018. V. 141. P. 207-220. DOI: 10.1016/j.commatsci.2017.09.018.

11. Illarionov A.G., Popov A.A. *Tekhnologicheskie i ekspluatatsionnye svoystva titanovykh splavov: uchebnoe posobie* [Fabrication and performance characteristics of titanium alloys: training manual]. Ekaterinburg: Ural Federal University Publ., 2014. 137 p.

12. Gong H., Gu H., Zeng K., Dilip J.J.S., Pal D., Stucker B., Christiansen D., Beuth J., Lewandowski J. Melt pool characterization for selective laser melting of Ti-6Al-4V pre-alloyed powder. *25th Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium (August, 4-6, 2014, Austin, USA)*.

13. Dilip J.J.S., Zhang S., Teng C., Zeng K., Robinson C., Pal D., Stucker B. Influence of processing parameters on the evolution of melt pool, porosity, and microstructures in Ti-6Al-4V alloy parts fabricated by selective laser melting. *Progress in Additive Manufacturing*. 2017. V. 2, Iss. 3. P. 157-167. DOI: 10.1007/s40964-017-0030-2