

УДК 621.762

Е. В. Карпович, И. И. Карпович, А. В. Кулик

*Днепропетровский национальный университет имени Олеся Гончара*

**СРАВНИТЕЛЬНЫЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ  
ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОЛЕЙ ПРИ ЛАЗЕРНОЙ НАПЛАВКЕ  
ОДИНОЧНОГО ВАЛИКА НА ПОДЛОЖКУ И НАГРЕВА СЛОЯ  
ПОРОШКА В ТРАНСПОРТИРУЮЩЕМ ГАЗЕ**

В роботі виконано порівняльний аналіз фізичних і математичних моделей нагріву частинок порошку під час лазерного наплавлення одиночного валика на субстрат і нагрівання шару порошку в транспортуючому газі. Визначено температурні поля в шарі порошку та одиночному валику на субстраті. Показано, що нагрітий шар порошку необхідно розглядати як джерело теплоти з нерівномірним розподілом температури в радіальному напрямку.

**Ключові слова:** *коаксіальна лазерне наплавлення, джерело теплоти, металевий порошок, потік частинок.*

В работе выполнен сравнительный анализ физических и математических моделей нагрева частиц порошка при лазерной наплавке одиночного валика на подложку и нагрева слоя порошка в транспортирующем газе. Определены температурные поля в слое порошка и одиночном валике на подложке. Показано, что нагретый слой порошка необходимо рассматривать как источник теплоты с неравномерным распределением температуры в радиальном направлении.

**Ключевые слова:** *коаксиальная лазерная наплавка, источник теплоты, металлический порошок, поток частиц.*

A comparative analysis of physical and mathematical models of heating the powder particles during laser deposition of a single roller on the substrate and heating of the powder layer in the carrier gas was performed. The temperature fields in the powder layer and a single roller on the substrate are determined. It is shown that the heated layer of the powder should be considered as a heat source with an uneven temperature distribution in the radial direction.

**Keywords:** *coaxial laser deposition, heat source, metal powder, particle flow.*

Современный уровень развития науки и техники требует для создания различных конструкций применения металлов и сплавов, обладающих высокими прочностными, физическими и механическими свойствами, работающих в условиях агрессивных сред при различных температурах и нагрузках в изделиях ракетно-космической техники. В связи с этим особое значение приобретает получение функциональных изделий из такого класса материалов с минимальными затратами времени на отработку конструкции и производство готового изделия.

Наиболее перспективным методом быстрого формообразования и прототипирования изделий является объемный (3D) синтез с коаксиальной лазерной наплавкой металлических порошков. Данная технология позволяет с высокой точностью создавать детали практически любой сложности. При этом материал деталей, изготовленных коаксиальной лазерной наплавкой, имеет уровень физико-механических свойств, соответствующий или превышающий традиционным технологиям. Особенно важно, что 3D-синтез с наплавкой металлических порошков позволяет быстро изменять состав материала путем внесения в расплав разных порошков. Это дает возможность разрабатывать гибридные или градиентные металлические композиты [1, 2].

Разработкам технологии 3D - синтеза с лазерной наплавкой металлических порошков и ее внедрению в промышленность уделяется большое внимание. Однако физика этих процессов ввиду их сложности изучена недостаточно, и оптимизация параметров каждого типа установки осуществляется, в основном, эмпирическим способом.

Целью данной работы являются сравнительные теоретические исследования температурных полей при лазерной наплавке одиночного валика на подложку и нагрева слоя порошка в потоке газа.

Проведено много теоретических и экспериментальных исследований потоков газа с частицами в коаксиальном сопле при лазерной наплавке. Результаты исследований показали, что поток частиц в области действия луча имеет форму внутреннего конуса (рис. 1), угол которого соответствует углу расположения каналов в коаксиальном сопле [3, 4]. При этом скорость частиц составляет 1,5...2 м/с.

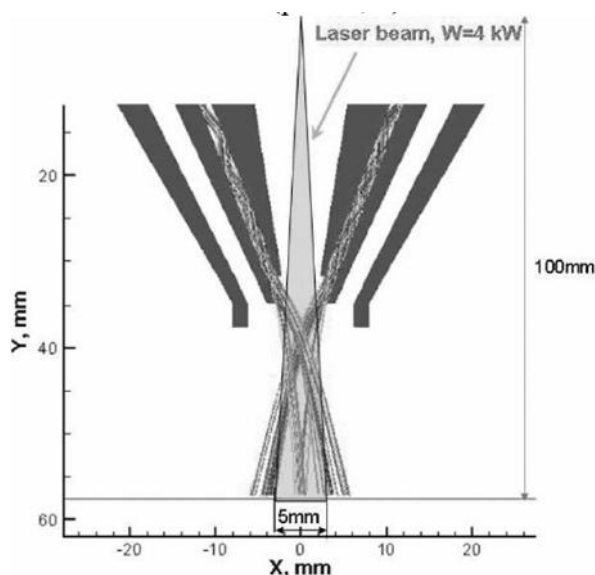


Рис. 1. Поток частиц в области действия луча

Если принять, что поток частиц является ламинарным, то можно определить время формирования нового слоя, которое будет зависеть от диаметра частиц:

$$t_c = d_q/v_{п}, \quad (1)$$

где  $t_c$  – время формирования слоя, с;  $d_q$  – диаметр частиц, м;  $v_{п}$  – скорость движения частиц, м/с.

Лазерный луч всегда будет действовать на вновь сформированный слой. Предыдущий слой, нагретый до некоторой температуры лазерным излучением, будет двигаться далее к подложке без теплообмена с другими слоями.

Время движения частиц к подложке можно определить по формуле:

$$t_{подл} = S/v_{п}, \quad (2)$$

где  $t_{подл}$  – время движения частиц до подложки, с;  $S$  – расстояние до подложки, м. Очевидно, что время формирования слоя частиц и время нагрева частиц до температуры в диапазоне значений от температуры плавления  $T_{пл}$  до температуры кипения  $T_{кип}$  должно быть меньше, чем время движения частиц до подложки.

Принимая скорость движения частиц равной 1,5 м/с, и граничные размеры частиц порошка 50 мкм =  $0,05 \cdot 10^{-3}$  м и 100 мкм =  $0,1 \cdot 10^{-3}$  м, время формирования слоя будет составлять, соответственно,  $0,03 \cdot 10^{-3}$  м/с,  $0,06 \cdot 10^{-3}$  м/с.

Применительно к наплавке сплава Inconel 718 на подложку, расположенную на расстоянии 7 мм =  $7 \cdot 10^{-3}$  м от сопла, время движения нагретого слоя частиц к подложке будет составлять  $4,6 \cdot 10^{-3}$  с.

Для определения времени нагрева слоя частиц до требуемой температуры необходимо провести дополнительные исследования.

Численный эксперимент проводился для сплава Inconel 718. Теплофизические свойства данного сплава приведены в таблице 1 [5].

Таблица 1

**Теплофизические свойства сплава Инконель 718**

Свойства	Инконель 718
Плотность, кг/м <sup>3</sup>	$8,2 \cdot 10^3$
Температура плавления, °С (К)	1336 (1609)
Температура кипения (расчетная $T_{кип} = 2T_{пл}$ ), °С (К)	2672 (3218)
Теплопроводность, Вт/м с	11,4
Теплоемкость, Дж/кг с	435
Температуропроводность, м <sup>2</sup> /с	$3,2 \cdot 10^{-6}$

Рассматривался нестационарный процесс нагрева слоя в форме конуса при действии лазерного луча диаметром 1 мм и мощностью 500 Вт (рис. 2).

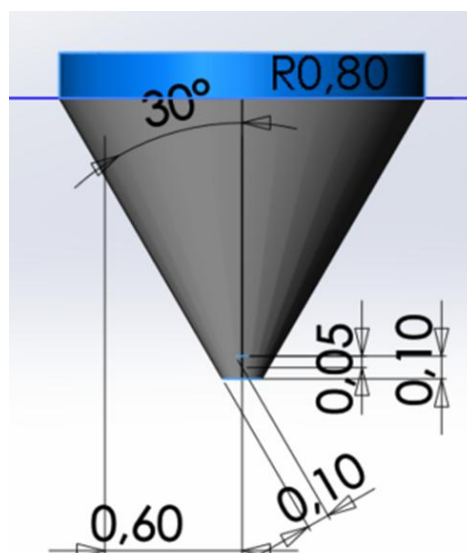


Рис. 2. Слой порошка из частиц размером 100 мкм

Тепловой поток, с учетом коэффициента отражения излучения для никеля 0,7, составляет  $1,9 \cdot 10^8$  Вт/м<sup>2</sup>.

За время движения к подложке  $4,6 \cdot 10^{-3}$  с слой частиц 100 мкм на нижней поверхности, контактирующей с подложкой, имеет температуру ниже температуры плавления  $T_{пл} = 1609$  К (рис.3).

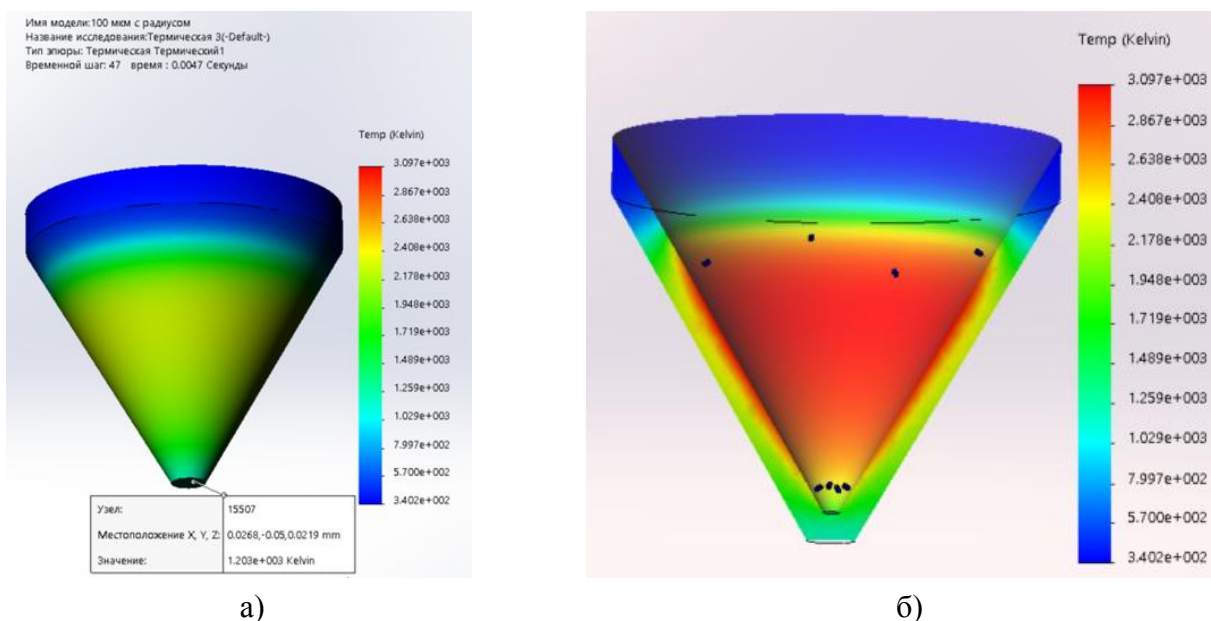
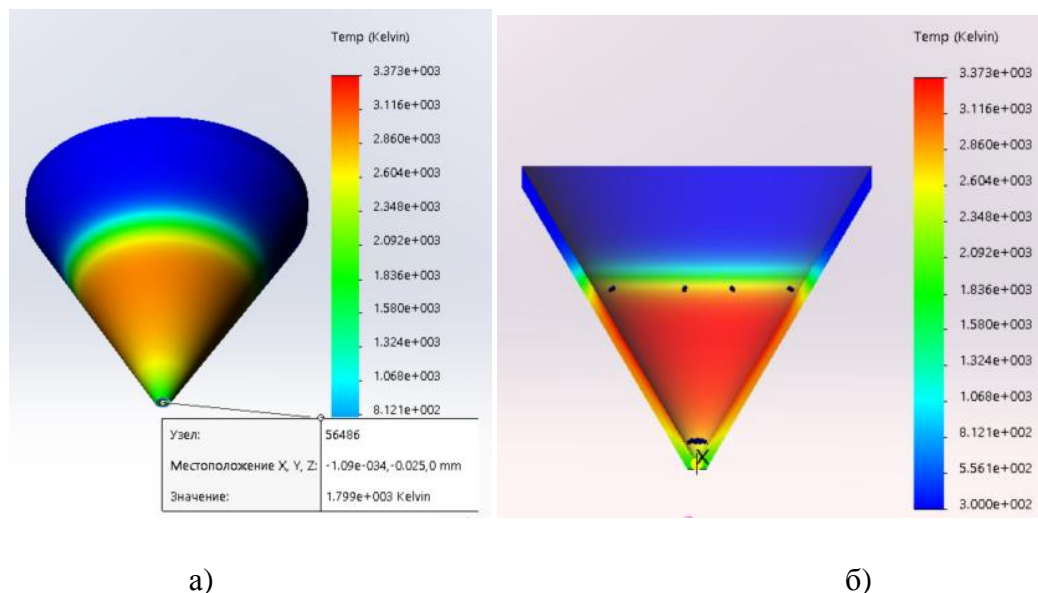


Рис. 3. Распределение температуры в слое частиц размером 100 мкм:  
а – на нижней поверхности; б – в осевом сечении слоя

Время прогрева нижней поверхности до  $T_{пл}$  составляет  $\approx 5 \cdot 10^{-3}$  с. На поверхности воздействия луча температура выше  $T_{кип} = 3218$  К и часть материала испарится. Время прогрева слоя 100 мкм по всему сечению превышает время движения частиц к подложке и частицы, расположенные у

вершины конуса, будут не полностью расплавлены и не смогут образовать прочное соединение на подложке или предварительно образованном слое. Для частиц размером 50 мкм время нагрева нижней поверхности слоя составляет  $2,8 \cdot 10^{-3}$  с, что меньше  $t_c$  и  $t_{\text{подл}}$ , и частицы расплавятся полностью (рис. 4).



**Рис. 4. Распределение температуры в слое частиц размером 50 мкм:**  
а – на нижней поверхности; б – в осевом сечении слоя

В результате проведенных исследований можно сделать вывод, что при формировании слоя порошка из частиц размером от 50 до 100 мкм, воздействию лазерного луча мощностью 500 Вт и скорости движения частиц в потоке газа 1,5 м/с не все частицы будут полностью расплавленными в момент осаждения на подложку. При этом массовая подача порошка должна составлять 15,3 г/мин, а скорость наплавки – 40 мм/с для слоя толщиной 0,5 мм (определено из формулы определения массового расхода в отчете 1).

Согласно выбранному оборудованию, максимальный массовый расход порошка составляет 11 г/мин, что соответствует времени формирования слоя  $3,6 \cdot 10^{-3}$  с для частиц размером 50 мкм и  $7,2 \cdot 10^{-3}$  с – 100 мкм. Следовательно, для полного расплавления частиц 100 мкм необходимо снижать массовый расход или скорость движения частиц в потоке.

Данные расчеты требуют экспериментальной проверки.

Результаты расчета также позволили установить, что на подложку или предварительно сформированный слой действует объемный источник теплоты, в виде расплавленного слоя, с неравномерным распределением температуры по радиусу и толщине.

На следующем этапе моделирования процесса лазерной наплавки порошка сплава Inconel 718 необходимо выполнить поэтапные исследования полей температур на подложке с учетом скорости перемещения данного источника, что позволит смоделировать процесс формирования валика и

определить время охлаждения до температуры 1000К. Также необходимо рассмотреть движение потоков газов из коаксиального сопла на подложку, определить величину защищенной зоны и время обеспечения условий защиты сформированной поверхности, которое должно быть больше или равным времени охлаждения.

Математическое исследование температурных полей при наплавке одиночного валика на подложку проводилось для сплава Инконель 718.

Геометрические размеры валика и подложки приведены на рис. 5.

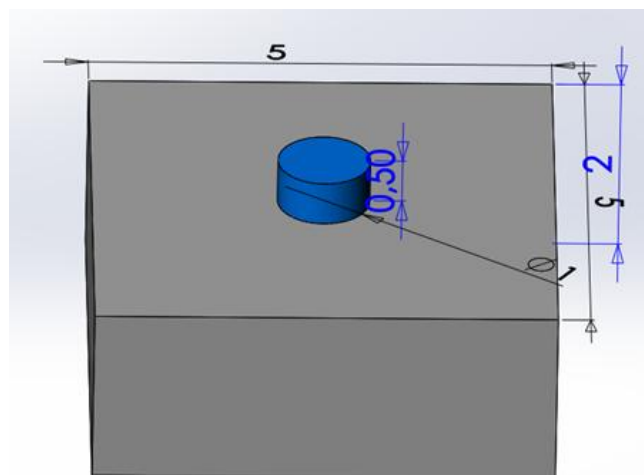


Рис. 5. Геометрическая модель одиночного валика и подложки

Размеры валика соответствуют предполагаемым параметрам наплавки при характерном времени воздействия луча на наплавляемый металл  $t_b = d_0/V$  и определяются диаметром луча лазера  $d_0 = 1$  мм и толщиной валика  $h = 0,5$  мм. Размеры подложки принимались конструктивно для обеспечения максимального приближения к допущению задачи о воздействии поверхностного источника теплоты.

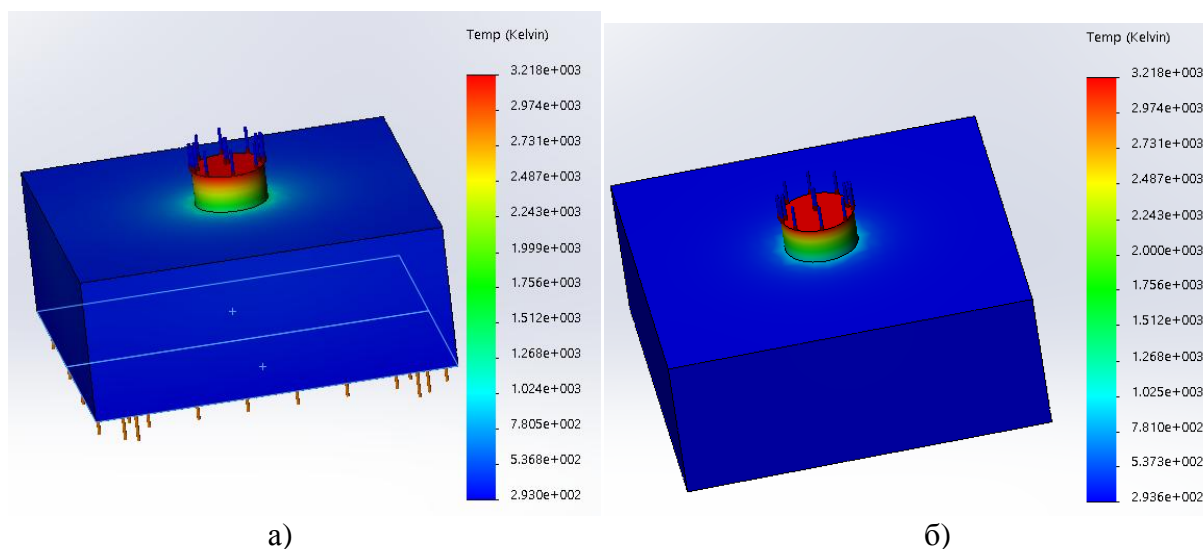
Для материала подложки также принят сплав Инконель 718.

Тепловой расчет проводился в системе SolidWorks при таких граничных условиях:

- температура на поверхности валика принималась  $T_{кип}$ ;
- температура на нижней поверхности подложки – 293 К;
- на контактных поверхностях между валиком и подложкой коэффициент теплопередачи не учитывается и предполагается глобальный контакт.

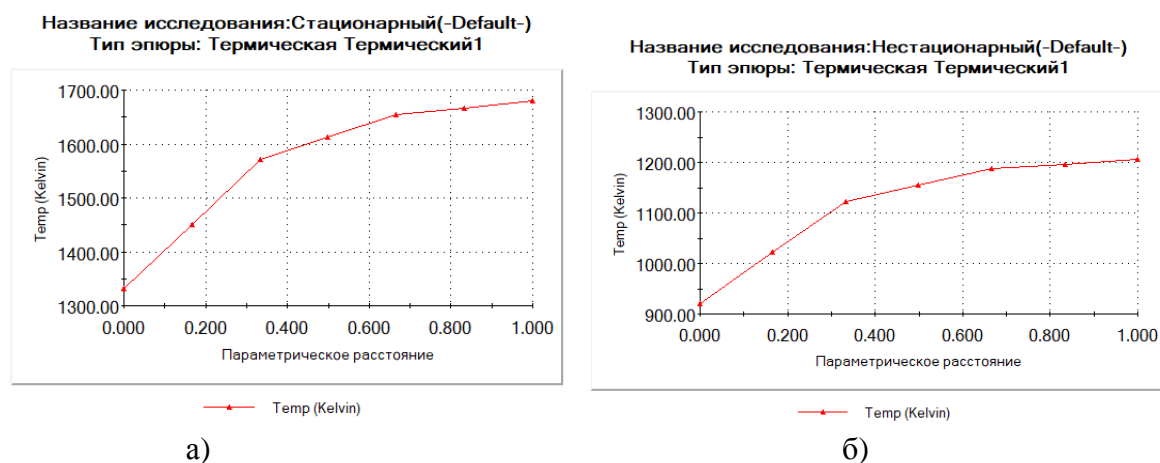
Проводился стационарный и нестационарный расчет при воздействии температуры на поверхность валика  $T_{кип}$  в течении 1 с (рис. 6).





**Рис. 6. Результаты расчета температурных полей:**  
 а – стационарный расчет; б – нестационарный расчет

Анализ полученных результатов показал, что на контактной кромке валика с подложкой в обоих вариантах температура ниже, чем  $T_{пл} = 1609$  К. Следовательно в этой зоне не будет происходить сплавления наплавленного материала с подложкой. Распределение температур в срединном сечении модели в зоне контакта нижней поверхности валика с подложкой является неравномерным (рис. 7).



**Рис. 7. Распределение температуры по радиусу валика в срединном сечении:**  
 а – стационарный расчет; б – нестационарный расчет

Согласно результатам стационарного расчета зона несплавления составляет  $0,5(d_0/2) = 0,25$  мм, соответственно, сцепление валика с подложкой происходит по диаметральной длине 0,5 мм. При нестационарном расчете в контакте валика с подложкой отсутствуют температуры равные или выше  $T_{пл}$ . Теоретический анализ показал, что для увеличения площади сплавления материала с подложкой или предыдущим слоем необходимо на поверхности

наплавляемого валика создавать температуры равные или превышающие  $T_{пл}$  материала. Следовательно, испарение является важным фактором для качественной наплавки, что необходимо учитывать как при определении массовой подачи металлического порошка, так и расчете мощности лазерного луча.

Для определения значения мощности  $P_T$  по формуле (3) необходима величина глубины проникания температурной волны вглубь сформированного слоя  $\Delta h$ . Согласно результатам стационарного расчета ее величина по оси наплавленного валика составляет  $\approx 0,03$  мм (рис. 8)

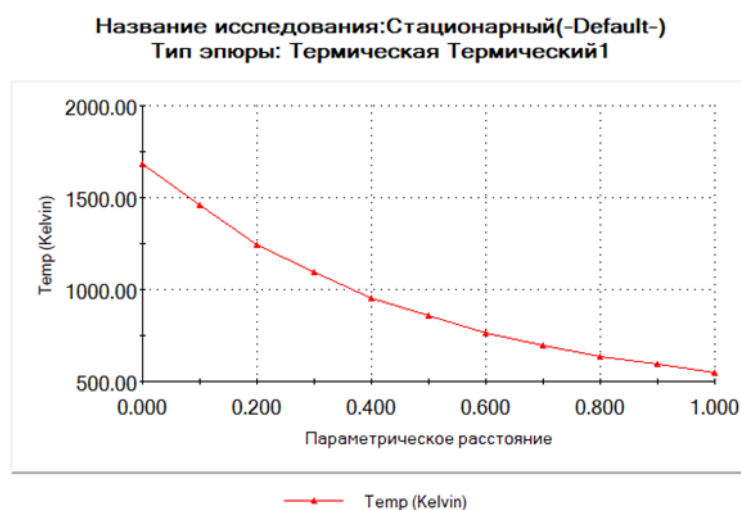


Рис. 8. Распределение температуры по высоте подложки в срединном сечении

Проведенные теоретические исследования распределения температурных полей в зоне наплавки единичного объема валика из порошка сплава Инконель 718 на подложку показали необходимость создания на поверхности наплавляемого валика температуры равной или превышающей  $T_{пл}$  материала. Испарение является необходимым фактором для качественной наплавки и данный процесс необходимо учитывать как при определении массовой подачи металлического порошка, так и расчете мощности лазерного луча.

**Выводы.** Сравнительный анализ результатов теоретических исследований температурных полей при лазерной наплавке одиночного валика на подложку и нагрева слоя порошка в потоке газа показал:

1. Для рассматриваемых физических и математических моделей нагрева слоя порошка лазерным излучением температурные поля значительно отличаются:

- нагрев слоя порошка в виде конуса, при движении в потоке газа к подложке, приводит к возникновению максимальной температуры на периферии и минимальной в центре слоя.

- при нагреве единичного объема непосредственно на подложке максимальное значение температуры находится в центральной области, а на периферии ее значение не достигает  $T_{пл}$  материала;



2. Взаимодействие потока порошка с лазерным излучением требует экспериментальной проверки.

3. Для моделирования формирования валика при лазерной наплавке нагретый слой порошка необходимо рассматривать как источник тепла с неравномерным распределением температуры в радиальном направлении.

### Библиографические ссылки

1. Шишковский И. В. Лазерный синтез функционально-градиентных мезо- структур и объемных изделий. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2009. – С. 424.

2. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук Разработка и исследование технологии выращивания объектов методом коаксиального лазерного плавления порошковых материалов, автор Ставертий А. Я. – 2017 г. – 153 с.

3. Panchenko V.Ya., Golubev V.S., Vasiltsov V.V., Galushkin M.G., Ilyichev I.N. Technologies and Physical Mechanisms of Laser 3D Synthesis of Metallic Powder Materials // X International Conf. Laser and Laser- information Technologies: Fundamental Problem and Applications”, ILLA'2009, VI International Symposium, Laser Technologies and Laser, LTL'2009 (2010), Published by OPTELA 4023 Plodiv, Bulgaria, March 2010. – P. 122–128.

4. Kovalev, O.B.; Zaitsev, A.V.; Novichenko, D.; Smurov, I. Theoretical and Experimental Investigation of Gas Flows, Powder Transport and Heating in Coaxial Laser Direct Metal Deposition (DMD) Process // Journal of Thermal Spray Technology, 2011, Vol. 20, Issue 3, pp. 465–478.

5. [https://www.bibusmetals.ru/fileadmin/materials/PDF/catalogs\\_new\\_2013/nikel/INCONEL\\_Alloy\\_718\\_RU\\_EN.pdf](https://www.bibusmetals.ru/fileadmin/materials/PDF/catalogs_new_2013/nikel/INCONEL_Alloy_718_RU_EN.pdf) – Электронный ресурс.

*Надійшла до редколегії 15.05.2019*