

Научная статья

УДК 536.33

## Моделирование теплопередачи при синтезе образцов методом селективного лазерного спекания

**Анастасия Сергеевна Черепанова<sup>1</sup>, Виктория Евгеньевна Мальцева<sup>2</sup>**

<sup>1,2</sup> Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б. Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия

<sup>1</sup> Институт физики металлов им. М. Н. Михеева УрО РАН, Екатеринбург, Россия

<sup>1</sup> A.S.Cherepanova@inbox.ru

**Аннотация.** Производство постоянных магнитов методом селективного лазерного спекания — перспективный метод, позволяющий локально варьировать свойства образцов и производить магниты различной геометрической формы. Для получения магнитов высокого качества необходимо понимать, каким образом магнитные свойства зависят от параметров печати. Модель разработана для изучения влияния теплопереноса на образцы и определения оптимальных параметров печати при производстве постоянных магнитов.

**Ключевые слова:** теплоперенос, аддитивное производство, постоянные магниты, селективное лазерное плавление, инфильтрация

**Благодарности.** Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (шифр «Аддитивность» № 121102900049–1); авторы выражают благодарность научному руководителю — кандидату физико-математических наук, доценту А. С. Волегову.

Original article

## Modeling of Heat Transfer in the Synthesis of Samples by Selective Laser Sintering

**Anastasiia S. Cherepanova<sup>1</sup>, Viktoria E. Maltseva<sup>2</sup>**

<sup>1,2</sup> Ural Federal University named after the first President  
of Russia B. N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia

<sup>1</sup> M. N. Mikheev Institute of Metal Physics, Ural Branch  
of the Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg, Russia

<sup>1</sup> A. S. Cherepanova@inbox.ru

**Abstract.** The production of permanent magnets by selective laser sintering is a promising method allows locally varying the properties of samples and producing magnets with different geometry. For obtain high quality magnets important to understand how the magnetic properties depend on the printing parameters. The model created for study the effect of heat transfer on samples and determine the optimal printing parameters for the production of permanent magnets.

**Keywords:** heat transfer, additive manufacturing, permanent magnets, selective laser melting, infiltration

**Acknowledgments.** The work was carried out within the framework of the state assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (code “Additivity” No. 121102900049-1); the authors express their gratitude to the scientific supervisor — candidate of physical and mathematical sciences, associate professor A. S. Volegov.

**И**нтерес к производству функциональных материалов методами аддитивного производства показывает необходимость разработки новых подходов. При изготовлении функциональных материалов принципиальное значение имеет их микроструктура. Применение классических методов производства позволяет получать необходимую микроструктуру, однако аддитивные технологии приводят к формированию другой микроструктуры. По этой причине на настоящем этапе развития аддитивного производства изделий из функциональных материалов необходимо установление связей между условиями синтеза, получаемой микроструктурой и формирующимися свойствами материалов.

С другой стороны, аддитивные технологии позволяют получать образцы и изделия из материалов практически любой формы и, что наиболее важно, позволяют локально изменять свойства образцов и определять их микроструктуру на стадии производства, что непосредственно влияет на свойства получаемых изделий. Для получения образцов высокого качества с хорошими свойствами необходимо изучить условия формирования структуры материала при селективном

лазерном спекании образцов и определить параметры печати для достижения высокого качества изделий.

В ходе работы проведены компьютерные эксперименты в среде COMSOL Multiphysics с использованием модели порошкового слоя. Порошковый слой представлял собой смесь порошка Nd–Fe–В и легкоплавкого эвтектического сплава Pr–Cu–Co. Толщина одного слоя — 50 мкм.

В ходе компьютерного эксперимента варьировались параметры лазерного луча, воздействующего на порошковый слой: мощность, радиус луча, скорость прохождения, смещение луча между последовательными проходами, и изменялся способ распределения порошка на подложке.

Проводились расчеты различных конфигураций. Изначально исследование проводилось на модели порошкового слоя, полностью состоящего из 80 % частиц Nd–Fe–В и 20 % частиц легкоплавкой эвтектики. Такое соотношение материалов, как было показано в работе Additive manufacturing of heavy rare earth free high-coercivity permanent magnets [1], позволяет получать образцы постоянных магнитов в высококоэрцитивном состоянии. В результате проведения расчетов определено, что плавление эвтектики происходит до третьего или пятого слоев из пятнадцати в зависимости от параметров лазерного луча. На первом и втором слоях также происходит переплавка материала основной магнитной фазы, что негативно сказывается на свойствах полученного магнита. Соответственно, в нижних слоях плавления легкоплавкой эвтектики не происходит, что не приводит к спеканию частиц Nd–Fe–В.

В последствие начальные условия эксперимента были изменены. Моделирование порошкового слоя производилось в определенном порядке. Нижние слои состояли только из магнита Nd–Fe–В, до пяти верхних слоев содержали 80 % Nd–Fe–В и 20 % легкоплавкой эвтектики. Предполагалось, что такая структура будет более эффективной при печати постоянных магнитов, т. к. в верхних слоях происходит плавление частиц легкоплавкой эвтектики, которые заполняют пространство между частицами Nd–Fe–В, находящимися в нижних слоях. В результате происходит эффективное разделение зерен магнитной фазы, что позволяет уменьшить межзеренное обменное взаимодействие и улучшить магнитные свойства напечатанного образца [1]. Были проведены компьютерные эксперименты при двух мощностях лазера: 52 Вт и 200 Вт, и различных скоростях: 1000 мм/с и 6000 мм/с, со-

ответственно. В каждом случае изменялось значение смещения луча: 20 мкм, 40 мкм, 60 мкм. Радиус луча — 150 мкм. Также в ходе эксперимента учитывалось отведение тепла на поверхность под порошком. Пример теплового распределения в порошковом слое, в результате воздействия лазерным лучом с параметрами 200 Вт, 6000 мм/с, радиус 150 мкм, смещение 40 мкм, представлен на рис. ниже (а).

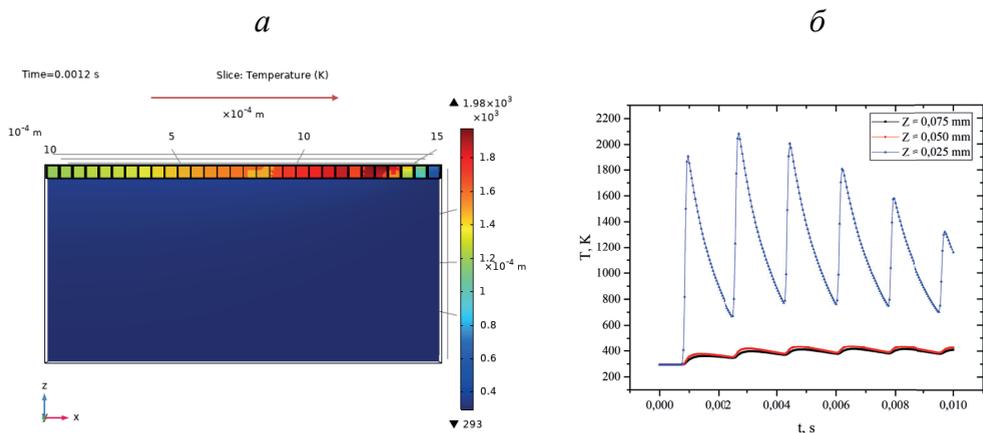


Рис. Моделирование процесса селективного лазерного спекания:  
 а — распределение тепла в порошковом слое (стрелкой изображено направление движения лазерного луча); б — график нагревания и охлаждения порошка в зависимости от времени, где  $Z$  — расстояние от поверхности

На рис. (а) наблюдается нагревание трех слоев порошка, из них лишь на втором и третьем слоях происходит плавление только легкоплавкой эвтектики. На первом слое происходит переплавка основной магнитной фазы, что негативно влияет на магнитные свойства изготовленного образца.

На рис. (б) представлены результаты исследования изменения температуры от времени при прохождении лазерного луча по поверхности с периодом 0,00175 с. Для расчета модели задана теплопроводность материала 100 Вт/(м·К).

Исследование изменения температуры проводилось в трех точках. В слое смеси Nd–Fe–В и Pr–Cu–Со, т. е. на расстоянии от поверхности 0,025 мм, и в сплаве Nd–F–В на расстоянии 0,050 м и 0,075 мм. На рисунке видно, что в основном происходит нагревание только верхнего слоя, содержащего эвтектическую фазу. Нагревание в магните

Nd–Fe–В происходит незначительное, соответственно, переплавки основной магнитной фазы не происходит, что положительно сказывается на магнитных свойствах полученного образца. Охлаждение порошка после прохода лазера в среднем происходит за 0,0015 с.

Таким образом, в ходе работы построена модель, позволяющая оценивать динамику процессов нагрева и охлаждения частиц порошка в процессе селективного лазерного спекания. Модель на основе априорных данных о связи скорости охлаждения и микроструктурой позволяет прогнозировать магнитные свойства постоянных магнитов, получаемых селективным лазерным спеканием.

#### **Список источников / References**

1. Additive manufacturing of heavy rare earth free high-coercivity permanent magnets / A. S. Volegov [et al.] // Acta Materialia. 2020. Vol. 188. P. 733–739.