

# Индукционный нагрев сопла 3D принтера с FDM технологией

Ю. А. Шилова

Пермский национальный исследовательский  
политехнический университет  
marissaspiritte@mail.ru

И. И. Безукладников

Пермский национальный исследовательский  
политехнический университет  
fantomtk@yandex.ru

Г. В. Бельский

Санкт-Петербургский государственный электротехнический  
университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)  
???@yandex.ru

**Аннотация.** Технология моделирования методом наплавления – одна из технологий 3D печати, которая используется во многих областях человеческой деятельности. Результатом данной технологии является выдавливание некоторого материала через сопло экструдера. Резистивный нагрев – это контактный метод нагрева, который используется в большинстве настольных 3D принтеров с технологией FDM. Индукционный нагрев, относящийся к бесконтактным методам нагрева и позволяющий нагреть точно заданный промежуток проводника до высокой температуры за короткий промежуток времени, является альтернативным способом нагрева. Сложное управление нагревом препятствует широкому распространению индукционного нагрева в области 3D печати. Однако, существуют очевидные преимущества, такие как уменьшение тепловой массы экструдера, устранение многочисленных термоизолирующих компонентов и другие, для использования индукционного нагрева в этой области. В статье мы предлагаем использовать альтернативный подход к процессу печати, основанный на использовании индукционного метода для нагрева рабочей части сопла экструдера.

**Ключевые слова:** индукционный нагрев; экструдер; сопло; моделирование методом наплавления

## I. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время человечество достигло такой стадии развития, на которой работы являются наиболее интересными и полезными продуктами человеческой мысли. Некоторые компании разрабатывают роботов похожих на людей, другие производят роботов, которые помогают людям и облегчают трудные задачи в различных областях человеческой деятельности. 3D принтеры не только создают детали для машин и устройств, созданных человеком, но и воспроизводят сами себя. Существует несколько технологий 3D печати. Моделирование методом наплавления – одна из технологий 3D печати, которая

используется во многих областях человеческой деятельности. Результатом этой технологии является выдавливание некоторого материала через сопло экструдера. Различные методы нагрева могут быть использованы в моделях 3D принтеров массового производства. Резистивный нагрев – это контактный метод нагрева, который используется в большинстве настольных 3D принтеров с технологией FDM. Однако, резистивный нагрев имеет два основных недостатка. Во-первых, резистивный нагрев не может обеспечить равномерный нагрев филамента по всей длине сопла экструдера. Во-вторых, нагрев материала для печати занимает большое количество времени, что еще больше увеличивает длительное время процесса печати. Индукционный нагрев, относящийся к бесконтактным методам нагрева и позволяющий нагреть точно заданный промежуток проводника до высокой температуры за короткий промежуток времени, является альтернативным способом нагрева. Несмотря на высокую скорость достижения требуемой температуры и точность полученных результатов, достижение эффективного индукционного нагрева является сложной задачей в устройствах с относительно небольшими размерами. Сложное управление нагревом препятствует широкому распространению индукционного нагрева в области 3D печати. Однако, существуют очевидные преимущества, такие как уменьшение тепловой массы экструдера, устранение многочисленных термоизолирующих компонентов и другие, для использования индукционного нагрева в этой области. В статье мы предлагаем использовать альтернативный подход к процессу печати, основанный на использовании индукционного метода для нагрева рабочей части сопла экструдера.

## II. ПРЕДЫДУЩИЕ РАБОТЫ

Существует большой набор литературы по методу нагрева материала, в основе которого лежит индукционный нагрев, областей применения этого метода и трудностей возможного использования [1–5]. В статье [6]

Эта работа выполнена в рамках проектной части государственного задания № 9.9697.2017 / БЧ «Разработка технологических оснований для технологии гибридных присадок с подачей проволоочного электрода».

автор предлагает определять изменение температуры на основе изменения сопротивления ферромагнитного материала. Получение точного измерения температуры является сложной задачей. Процедура измерений в области 3D печати имеет три недостатка. Во-первых, уровень мощности стабилен и выбирается сенсорным управлением. Для этого требуется много времени, что является одним из критических параметров процесса нагрева. Во-вторых, измерение выполняется следующим образом: каждые 3 секунды питание отключается, а микроконтроллер посылает сигнал о переключении катушки связи со схемы силовой электроники к измерительной цепи. Затем микроконтроллер начинает измерять события пересечения нуля в течение 20 мс и только после того (20 мс), когда колебательная цепь достигла устойчивого состояния. После того, как персональный компьютер фиксирует данные о частоте и температуре, катушка снова подключается к цепи силовой электроники. В результате возникает разница в нескольких миллисекундах между измерениями. Трехмерная печать важна в каждый момент времени, так как процесс нагрева выполняется при очень высоких температурах и, по возможности, в кратчайшие моменты времени. В-третьих, этот метод применяется к постоянным изменениям, но в 3D печати необходимо измерять температуру не только материала, находящегося в постоянном движении, но и температуру движущегося филамента.

В статье [7] авторы проводят эксперименты по нагреву широко используемого сопла FDM. Моделирование резистивного нагрева использует тепловую задачу, которая возникает при использовании индуктивного нагрева. Однако для использования индуктивного нагрева требуется и другая задача, такая как электромагнитная проблема.

В 2017 году Ральф Стирлинг, Люк Чилсон и Алекс Инглиш запатентовали индукционный нагреватель для экструдера [8]. Однако равномерность распределения тепла не может быть достигнута, так как в этом случае магнитное поле будет проходить перпендикулярно соплу.

Через две недели был выдан другой патент для определения различных форм катушки индукционного нагрева. Каждая предлагаемая форма индуктора имеет как преимущества, так и недостатки.

### III. МЕТОДОЛОГИЯ

В этой статье мы предлагаем рассмотреть вопросы, связанные с оптимизацией равномерного процесса индукционного нагрева путем выбора наиболее оптимальной формы индуктора.

Как упоминалось выше, изменение температуры сопла методами индукционного нагрева включает в себя две: электромагнитную и температурную задачи.

Температурную задачу можно описать по формуле:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} - \nabla \lambda \nabla T = \begin{cases} Q & \text{в области нагевания сопла,} \\ 0 & \text{в других областях модели} \end{cases} \quad (1)$$

где  $\rho = \rho(T)$ ,  $C_p = C_p(T)$ ,  $\lambda = \lambda(T)$  – плотность, удельная теплоемкость и теплопроводность материала в соответствующей среде в зависимости от температуры  $T$  (соответственно);  $Q$  – удельная мощность источника тепла, обеспечивающая индукционный нагрев рабочей зоны вихревыми токами.

Электромагнитную задачу можно описать системой дифференциальных уравнений:

Для пространства, занимаемого рабочим телом:

$$j\omega\sigma\dot{\mathbf{A}} + \nabla \times (\mu_0^{-1} \nabla \times \dot{\mathbf{A}}) \quad (2)$$

Для пространственной области, содержащей  $i$ -я катушка индуктивности:

$$j\omega\sigma\dot{\mathbf{A}} + \nabla \times (\mu_0^{-1} \nabla \times \dot{\mathbf{A}}) = \frac{\sigma \dot{U}_i}{2\pi r} \quad (3)$$

Для космической области, занятой концентратором магнитного потока

$$j\omega\sigma\dot{\mathbf{A}} + \nabla \times (\mu_0^{-1} \nabla \times \dot{\mathbf{A}}) = \frac{\sigma \dot{U}_k}{2\pi r} \quad (4)$$

Для окружающего воздуха

$$\nabla \times (\mu_0^{-1} \nabla \times \dot{\mathbf{A}}) = 0 \quad (5)$$

где  $\sigma$  – электропроводность материала (сплав 40 x 13, медь, концентратор, выполненный из железосодержащего полимерного композита, воздух);  $\omega$  – угловая частота;  $j$  – единичное мнимое число;  $\mu_0$  и  $\epsilon_0$  – магнитная и электрическая диэлектрическая проницаемость вакуума соответственно;  $\mu_0 = 1.256 \cdot 10^{-6}$ ,  $\epsilon_0 = 8.85 \cdot 10^{-12}$  Ф/м;  $J_\phi$  – плотность тока в индукторе;  $r$  – радиальная координата;  $S_i$  – площадь поперечного сечения индуктора;  $S_k$  – площадь поперечного сечения концентратора;  $U_i$  – изначально неизвестное падение напряжения на  $i$ -й катушке индуктивности;  $U_k$  – ускоренное падение напряжения в концентраторе.

Первоначальные эксперименты проводились на прототипе, оригинальная форма которого может быть представлена следующим образом.

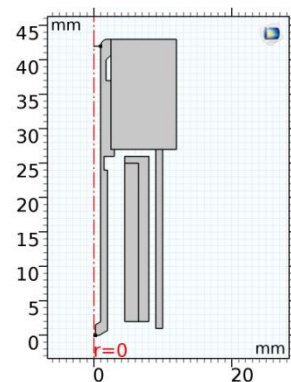


Рис. 1. Изображение системы индукционного нагрева для 3D сопла FDM

Частота нагрева = 121 кГц была экспериментально определена в статье [10]. Оптимальное равномерное распределение температуры по всей нагреваемой поверхности, представленное на рис. 2, было достигнуто на этой частоте. Вертикально расположенная температура сопла показана синей линией. Красная линия показывает температуру сопла, повернутого на 1 градус.

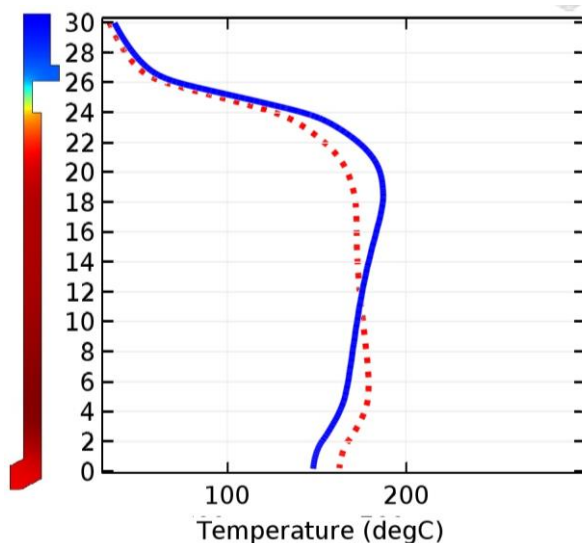


Рис. 2. Распределение температуры при  $f = 121$  кГц. Время нагрева  $t = 4$  с.

Для определения оптимальной формы индуктора мы меняем исходный образец следующим образом:

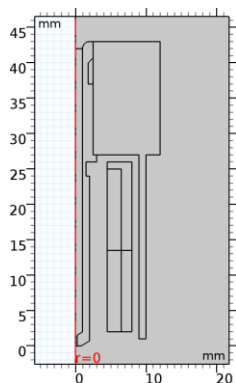


Рис. 3. Модифицированная форма индуктора

Таким образом, мы строим две абсолютно одинаковые катушки. Такой подход позволяет анализировать влияние расстояния между катушками и расстояния от нагретой поверхности до катушки на равномерность нагрева.

#### IV. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Для моделирования процесса индукционного нагрева была выбрана платформа COMSOL Multiphysics 5.3. Физические модули, необходимые для экспериментов, – это магнитное поле и теплопередача в твердых веществах для измерения температуры. В таблице представлены основные материалы, используемые элементами модели.

Таблица 1. ВХОДНЫЕ ДАННЫЕ МНОГОФИЗИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

| Индуктор                                  |  |
|---|--|
| Материал                                  | медь:<br>электропроводность - $5,998 \cdot 10^7$ См / м<br>относительная магнитная<br>диэлектрическая проницаемость - 1<br>относительная электрическая проницаемость - 1   |
| Количество витков                         | 20   |
| Внутренний диаметр, мм                    | 9  |
| Внешний диаметр, мм                       | 13   |
| height, mm                                | 23   |
| Мощность источника напряжения, В          | 24   |
| Частота колебаний, кГц                    | 5..150   |
| ток, А                                    | 15   |
| Концентратор магнитного потока            |  |
| Материал                                  | железосодержащий полимерный композит:<br>основой является теплопроводящее изолирующее силиконовое соединение KPTD-1-5<br>наполнитель представляет собой порошок железа<br>электропроводность - $0,004$ См / м<br>относительная магнитная<br>диэлектрическая проницаемость - 200<br>относительная электрическая проницаемость - 3,6 |
| Внутренний диаметр, мм                    | 13   |
| Внешний диаметр, мм                       | 15   |
| высота, мм                                | 24   |
| Цилиндрическая оправка, корпус экструдера |  |

#### A. Расстояние между катушками

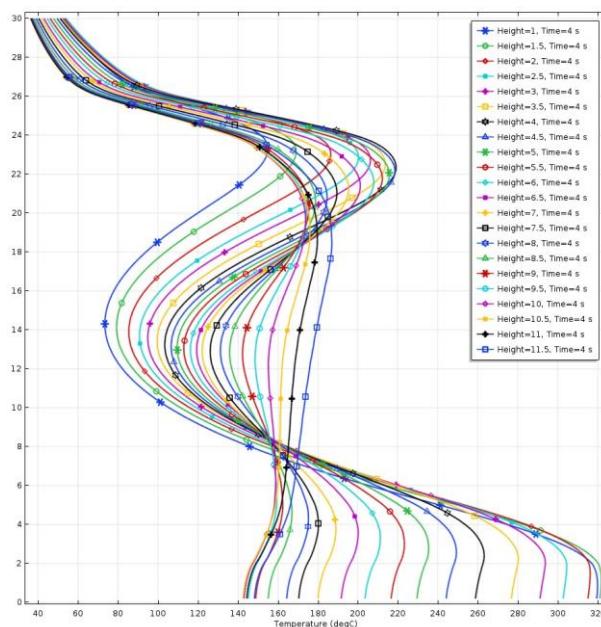


Рис.4. Зависимость температурной кривой от высоты катушки

На рис. 4 показано, что наиболее линейаризованные температурные кривые характерны при высоте каждой катушки от 11 до 11,5 мм. Кроме того, расстояние между катушками увеличивает отклонение кривых. Поэтому в следующем эксперименте мы оставляем наилучшие два

расстояния между катушками и отбрасываем все другие результаты.

#### Б. Расстояние между катушками и соплом от прототипа

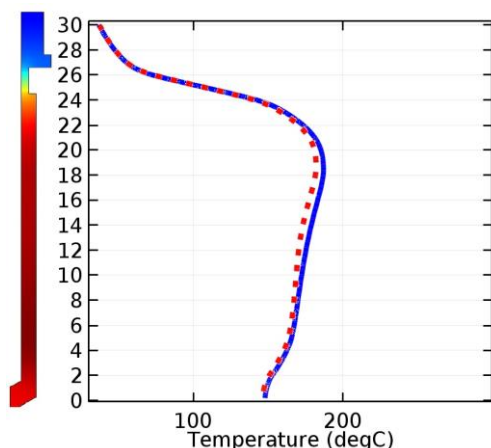


Рис. 5. Распределение температурных кривых 4,5 мм.

На рис. 5 показана температурная кривая одной катушки, которая расположена на расстоянии 4,5 мм (синяя линия) и температурная кривая двух катушек, каждая из которых расположена на том же расстоянии. Количество катушек слегка влияет на форму кривой температуры, когда катушки расположены, как показано на рис. 5.

#### В. Уменьшение расстояния

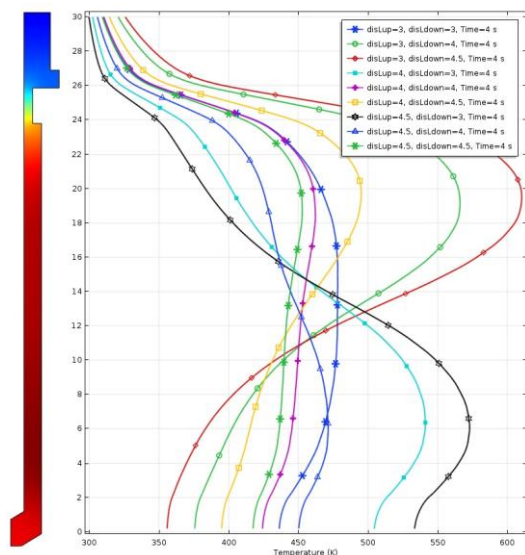


Рис. 6. Температурные кривые на расстоянии менее 4,5 мм

На рис. 6 показано, что наиболее линеаризованные температурные кривые характерны варианту, когда обе катушки расположены на одинаковом расстоянии от сопла. Кроме того, разница расстояний 1 мм значительно

изменяет изгиб кривой температуры в одном или другом направлении. А также, увеличение числа шагов для изменения расстояния между катушками и соплом не позволило достичь максимальной линейности этой кривой.

#### Г. Увеличение расстояния

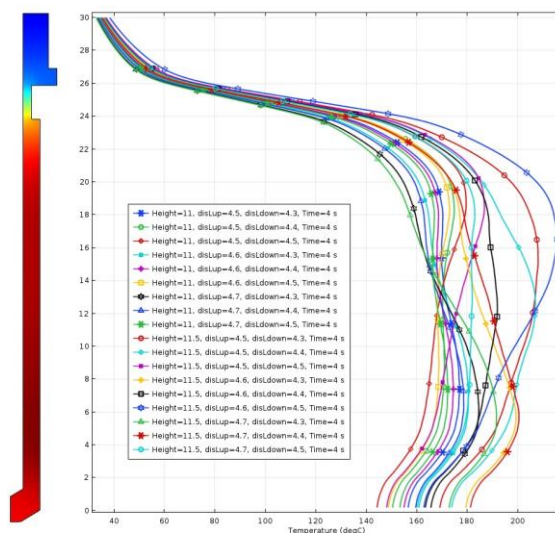


Рис. 7. Температурные кривые на расстоянии от 4,5 до 4,7 мм.

На рис. 7 показаны формы кривых температуры, каждая из которых характеризуется высотой катушки от 11 до 11,5 мм, при этом расстояние между катушками и соплом составляет от 4,5 до 4,7 мм. Как показано на рисунке, температурная кривая, построенная с такими параметрами: высота каждой катушки равна 11,5 мм, расстояние между верхней катушкой и соплом составляет 4,7 мм, а расстояние между нижней катушкой и соплом составляет 4,5 мм, почти линейна.

#### В. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты моделирования показали, что увеличение расстояния между катушками и соплом более 4,8 мм резко снижает температуру нагрева сопла. Кроме того, повышение температуры нагрева связано с некоторой зависимостью от расстояния до катушки. Однако была получена наиболее эффективная форма температурной кривой на расстоянии, близком к максимально допустимому значению расстояния. Следующим этапом моделирования является рассмотрение зависимости равномерности нагрева от изменения тока в каждой катушке. В этой статье мы смоделировали нагрев сопла, не перемещая пластик через него. Однако на самом деле пластик движется вдоль сопла и переносит с собой тепло. Поэтому нижняя часть сопла нагревается намного сильнее, чем мы показали в наших экспериментах. Когда мы меняем ток в каждой катушке индивидуально, мы можем влиять на температуру нагрева сопла. Такие действия позволяют учитывать тепло, передаваемое пластиком.

# СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Simpson P.G. Induction heating: coil and system design. McGraw-Hill, 1960.
- [2] Bukhanov V.M. et al. SKIN-EFFEKT [Skin Effect]. // Bukhanov V.M., Glushkova T.M., Matynin A.V., Saletskiy A.M., Kharabadze D.E. Moscow, 2011. 12 p.
- [3] Zinn S., Semiatin S. L. Elements of induction heating: design, control, and applications. ASM International, 1988. P. 335.
- [4] Chennakesava P., Narayan Y.S. Fused deposition modeling-insights //International Conference on Advances in Design and Manufacturing (ICAD&M'14). 2014. P. 1345-1350.
- [5] Rudnev V., Loveless D., Cook R. and Black M. (2003), Handbook of induction heating, Marcel Dekker, Inc.
- [6] Franco C. et al. Inductive sensor for temperature measurement in induction heating applications //IEEE Sensors Journal. 2012. T. 12. №. 5. С. 9961003.
- [7] T. Hofstaetter et al. Simulation of a downsized fdm nozzle //COMSOL Conference 2015. 2015.
- [8] R.L. Stirling, L. Chilson, A.English. Inductively heated extruder heater : пат. 9596720 США. – 2017. (Stirling, Ralph L., Luke Chilson, and Alex English. "Inductively heated extruder heater." U.S. Patent No. 9,596,720. 14 Mar. 2017.)
- [9] M. Elserman, J.A. Versteegh, E. Zalm. Inductive nozzle heating assembly: пат. 20170094726 США. 2017. (Martijn Elserman, Johan Andreas Versteegh, Erik van der Zalm. " Inductive nozzle heating assembly." U.S. Patent No. 20170094726. 30 Mar. 2017.)
- [10] I.I. Bezukladnikov, D.N. Trushnikov, Yu.A. Shilova, A.A. Yuzhakov, "Optimization of induction heating of fdm 3d printer nozzle", unpublished.