

УДК 681.53

DOI: 10.22213/2410-9304-2020-3-110-117

Применение вихретокового метода контроля в контуре управления температурой процесса трехмерной печати

А. А. Осколков, аспирант, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия

И. И. Безукладников, кандидат технических наук, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия

Д. Н. Трушников, доктор технических наук, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия

Данная статья посвящена трехмерной печати по технологии FFF/FDM. Большинство существующих на рынке FDM 3D-принтеров используют косвенный резистивный метод нагрева сопла и стандартные термоэлектрические методы контроля температуры, что обуславливает высокую тепловую инерционность системы нагрева и невозможность обеспечения достаточной скорости и точности контроля температуры. Невозможность управления температурой сопла в процессе печати приводит к непостоянному качеству межслоевого спекания и неоднородности внутреннего объема напечатанных изделий. Для минимизации или устранения перечисленных недостатков предлагается индукционная система нагрева сопла минимальной тепловой массы. При этом для контроля температуры сопла предлагается резонансный (вихретоковый) метод. Высокие скоростные и мощностные характеристики предлагаемой системы делают актуальной задачу разработки контура управления температурой сопла.

В модуле Simulink пакета Matlab была разработана имитационная модель контура управления температурой сопла. Определены передаточные функции индукционной системы нагрева сопла и цепи обратной связи.

Были определены коэффициенты ПИД-регулятора и его период дискретизации, обеспечивающие нулевую статическую ошибку, величину перерегулирования в 1 %, что позволяет избежать перегрева материала в процессе экструзии. Достигнуто время выхода системы на установившийся режим в 1 с, что удовлетворяет требованиям скоростного нагрева и охлаждения сопла в процессе печати. Получены хорошие запасы устойчивости системы по фазе и амплитуде.

Предложена реализация описанной системы и подход к ее применению в процессе трехмерной печати с использованием платы контроллера DuetWifi. Создан испытательный стенд и проведены эксперименты, подтверждающие высокие скоростные и точностные характеристики разработанного метода контроля и управления температурой сопла в процессе трехмерной печати.

Ключевые слова: FFF, FDM, 3D-печать, индукционный нагрев, вихретоковый контроль, контур управления, регулирование, ПИД, имитационная модель, передаточная функция.

Введение

Технология трехмерной печати методом послойного наплавления (fused deposition modeling, FDM) [1, 2] заключается в построении объекта на основе цифровой модели с помощью нанесения расплавленного полимерного материала слой за слоем на рабочий стол через нагреваемое сопло экструдера.

В большинстве существующих принтеров, работающих по технологии FDM, используется косвенный резистивный нагрев. Высокая тепловая инерционность такой системы нагрева, а также низкая скорость и точность работы температурных датчиков (термопары, термисторы, пирометрия) не позволяют осуществлять регулировку температуры в процессе печати, что приводит к непостоянному качеству межслоево-

го спекания и неоднородности внутреннего объема изделия.

В данном исследовании предлагается использовать метод индукционного нагрева для устранения присущих FDM/FFF технологии трехмерной печати недостатков. В ряде исследований представлены системы индукционного нагрева сопла для трехмерной печати по технологии FDM/FFF [3–9], однако они обладают значительной тепловой инерционностью и качественно мало отличаются от стандартных систем, использующих резистивный нагрев.

Индукционный нагрев – это метод бесконтактного нагрева, при котором в электропроводящей среде, находящейся в переменном магнитном поле, индуцируются вихревые токи, при протекании которых в объеме среды выделяется тепло [10].

Бесконтактность индукционного метода нагрева позволяет изолировать нагреватель от сопла минимальной тепловой массы. При использовании сопла минимальной тепловой массы совместно с индукционным нагревателем большой мощности (масса горячей части < 1 г, толщина стенок сопла 0,5 мм, пиковая мощность нагревателя 700 Вт) возникает проблема высокоскоростного измерения текущей температуры [11]. В данном исследовании используется резонансный (вихретоковый) метод измерения температуры, основанный на анализе ряда температурно-зависимых параметров в процессе индукционного нагрева. Ранее удалось устранить основные присущие такому методу контроля недостатки, а также обеспечить беспроводное малоинерционное измерение температуры непосредственно в процессе индукционного нагрева.

Целью настоящего исследования является разработка автоматической системы управления температурой индукционного сопла с применением вихретокового (резонансного) метода контроля температуры в процессе трехмерной печати.

Разработка имитационной модели контура управления температурой

В представленном научном исследовании осуществляется нагрев индукционным методом сопла малой тепловой массы, что предъявляет повышенные требования к точности и скорости регулирования. Результатом кратковременного превышения допустимого уровня мощности, подаваемой на индуктор, может являться как необратимая деформация сопла, так и выгорание полимерного или композиционного материала. Для выбора параметров системы регулирования необходима идентификация индукционного нагревателя с проводящим соплом для FDM/FFF 3D-принтера как объекта регулирования с их последующим встраиванием в структурную модель системы регулирования в среде MATLAB [12].

В ряде исследований представлены системы управления индукционным нагревом, однако они предназначены для работы с электрическими печами сопротивления [13, 14]. Такие системы обладают значительной тепловой инерцион-

ностью, а к скорости и точности регулирования температуры в таких печах не предъявляются высокие требования.

На рис. 1 представлена функциональная схема, поясняющая сущность метода управления температурой сопла. В установке трехмерной печати, содержащей нагревательный индуктор 1, в который устанавливается сопло 2 для трехмерной печати, в процессе синтеза объекта с помощью генератора ВЧ 3 задается мощность индуктора 1 и осуществляется нагрев сопла 2, в результате чего происходит изменение электрических параметров сопла 2, что приводит к изменению параметров токового сигнала цепи индуктора 1. Для регистрации токового сигнала устанавливается вторичная измерительная катушка 4. Токовый сигнал поступает на блок регистрации и обработки 5, где преобразуется в величину Temp, т. е. в значение текущей температуры сопла. После этого информация об измеренной температуре Temp передается на блок ПИД-регулирования 6, где происходит сравнение с предустановленным значением pv_temp и вычисляется новое значение управляющего сигнала Con, поступающее на генератор ВЧ 3.

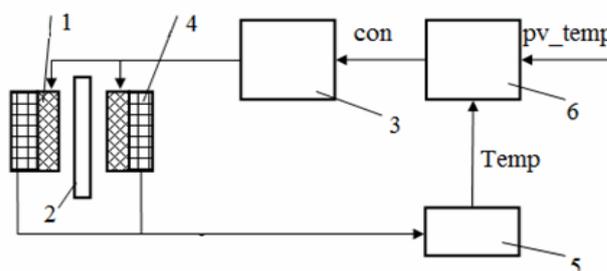


Рис. 1. Функциональная схема системы автоматического управления температурой сопла

Для расчета параметров регулятора и анализа устойчивости системы управления в режиме стабилизации применялось имитационное моделирование функционирования системы управления в среде прикладного программного обеспечения MatlabSimulink. Структурная схема системы автоматического управления температурой сопла в режиме стабилизации приведена на рис. 2.

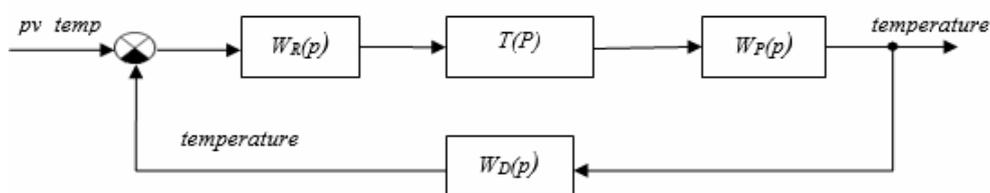


Рис. 2. Структурная схема системы управления температурой сопла

В качестве входного воздействия рассматривается заданное значение температуры pv_temp , в качестве выходной величины ее текущее значение $temperature$. Для реализации данного метода регулирования на базе микроконтроллера STM32 требуется использовать дискретный ПИД-регулятор. $W_R(p)$ – передаточная функция дискретного ПИД-регулятора, представленная формулами (1) и (2). В среде MatlabSimulink был выбран дискретный ПИД-регулятор, позволяющий определить требуемые коэффициенты по результатам моделирования, не прибегая к дополнительным расчетам. Его передаточная функция представлена формулой (3).

$$W_R(p) = \frac{q_0 \times z^2 + q_1 \times z + q_2}{z(z-1)}, \quad (1)$$

$$q_0 = k_n + \frac{k_d}{T}; \quad q_1 = -k_n + k_n \times T - \frac{2k_d}{T}; \quad q_2 = \frac{k_d}{T}; \quad (2)$$

где T – период дискретизации регулятора; k_n – пропорциональный; k_d – дифференциальный; k_i – интегральный коэффициент.

$$W_R(p) = P + \frac{I \times T}{z-1} + \frac{D(z-1)}{T \times z}, \quad (3)$$

где T – период дискретизации регулятора; P – пропорциональный, D – дифференциальный, I – интегральный коэффициент.

$W_D(p)$ – передаточная функция безынерционного резонансного датчика температуры. Данная передаточная функция может быть выражена коэффициентом усиления равным единице.

Объектом регулирования выступает индукционный нагреватель с соплом, которые пред-

ставляют собой аperiodическое звено второго порядка и имеют передаточную функцию $W_P(p)$, устанавливающую взаимосвязь между мощностью индуктора и температурой сопла. Передаточная функция представлена формулой

$$W_P(p) = \frac{k_0}{(T_1s+1)(T_2s+1)}, \quad (4)$$

где k_0 – коэффициент передачи; T_1 – постоянная времени индуктора; T_2 – постоянная времени обработки данных измерений.

Коэффициент передачи k_0 представлен на схеме в виде звена $T(P)$, описывающего связь между температурой сопла и мощностью индуктора. Данная связь описывается уравнением (5), вычисленным в ходе регрессионного анализа данных, полученных в результате моделирования процесса выхода системы на установившееся значение для различных значений мощности индуктора в среде математического моделирования ComsolMultiphysics:

$$T(P) = 0,0210656 \times x^2 - 0,097871 \times x + 24,8171222. \quad (5)$$

Постоянная времени индуктора $T_1 = 0,55$ с также была установлена в ходе моделирования в среде ComsolMultiphysics как время достижения температуры уставки в 300°C при импульсном воздействии с максимальной мощностью индуктора в 700 Вт, что представлено на рис. 3. Желаемая температура была выбрана как средняя температура экструзии используемых в настоящее время полимерных материалов для трехмерной печати.

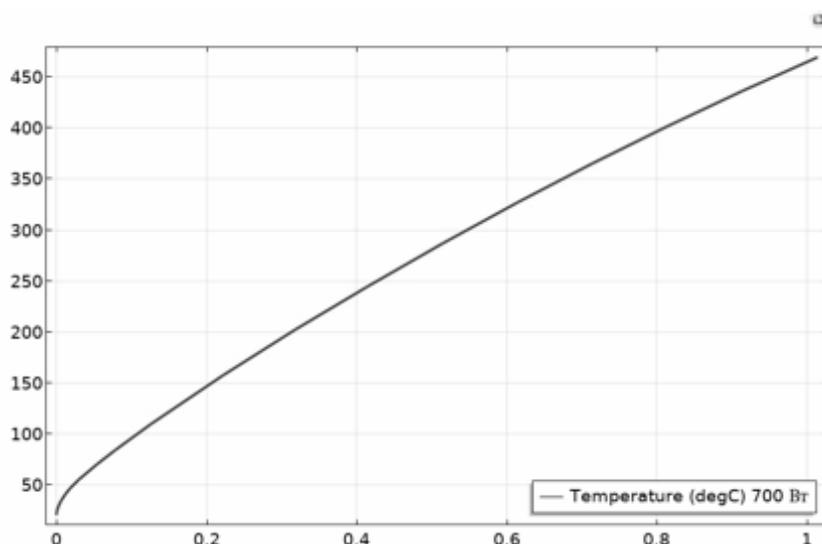


Рис. 3. Реакция системы на импульсное воздействие

Постоянная времени обработки данных измерений $T_2 = 0,03$ с рассчитывалась как сумма временных затрат процессора на реализацию таких алгоритмов, как oversampling, фильтр экспоненциального скользящего среднего, преобразование величины регистрируемого токового сигнала в temperature.

Период дискретизации регулятора T был выбран равным времени T_2 , необходимому на получение нового значения переменной temperature.

Реализация системы автоматического управления температурой сопла на базе среды прикладного программного обеспечения Matlab-Simulink представлена на рис. 4.

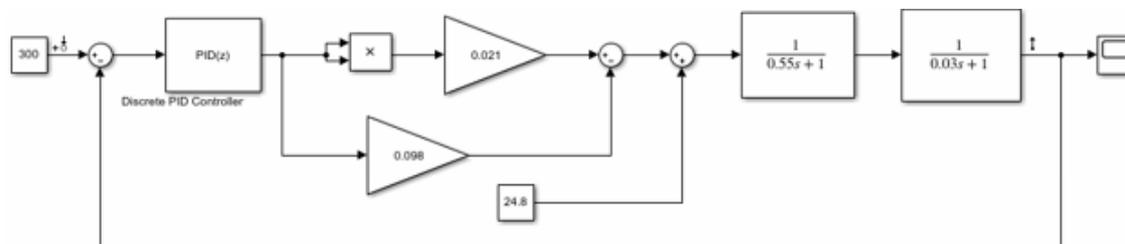


Рис. 4. Система управления температурой сопла на базе модуля Simulink

Анализ и синтез системы регулирования проводился известными методами теории непрерывных систем управления. График переходного процесса в разомкнутой системе, полученный в ходе имитационного моделирования с помощью MatlabSimulink, показан на рис. 5.

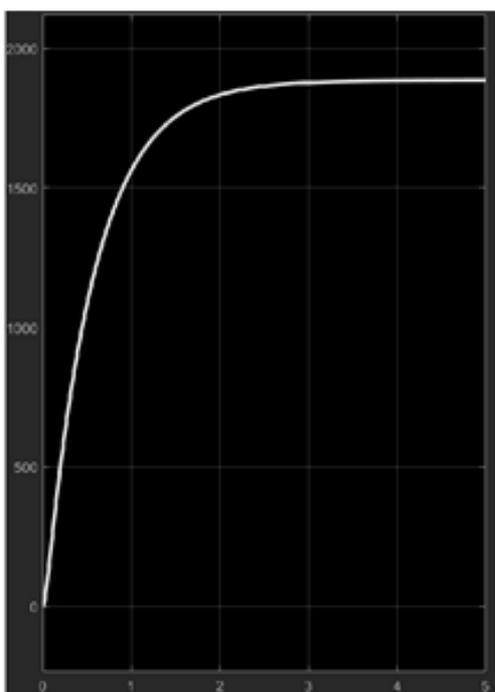


Рис. 5. Переходный процесс в разомкнутой системе

Коэффициенты P , I , D передаточной функции ПИД-регулятора после вычисления и подстройки составили 0,75; 2,275; 0,0065 соответственно.

Логарифмическая амплитудная и фазовая характеристики разомкнутой системы, построенные в среде MatlabSimulink, представлены на

рис. 6 и демонстрируют устойчивость замкнутой системы. Запас устойчивости по фазе составляет $55,8^\circ$, по амплитуде 14,7 дБ. На рис. 6, б представлена переходная характеристика процесса в замкнутой системе.

Время выхода системы на установившееся значение составляет 1 с, максимальное перерегулирование меньше 1 %, статическая ошибка равняется нулю.

Экспериментальное подтверждение результатов исследования

Для подтверждения результатов проведенного исследования авторами был создан лабораторный стенд из источника питания с $U = 24$ В, $I_{\max} = 30$ А и платы управления STM32F334R8. Индуктор был намотан 20 витками медного литцендрата с $d = 0,8$ мм в 2 слоя и включен в колебательный контур по топологии LCL. Данный колебательный контур с заранее определенной резонансной частотой в 120 кГц был подключен к генератору ВЧ.

Для интеграции разработанного устройства на базе микроконтроллера STM32 с платой контроллера DuetWifi программное обеспечение RepRapFirmware было модифицировано для осуществления функции передачи данных по протоколу CAN.

Необходимость внесения модификаций в программное обеспечение RepRapFirmware связана с ограничением минимального времени цикла ПИД-регулирования в 1 с, установленным разработчиками.

Схематичное представление интеграции разработанного устройства с платой контроллера 3D-принтера представлено на рис. 7.

Внешний вид горячей части экспериментального экструдера приведен на рис. 8.

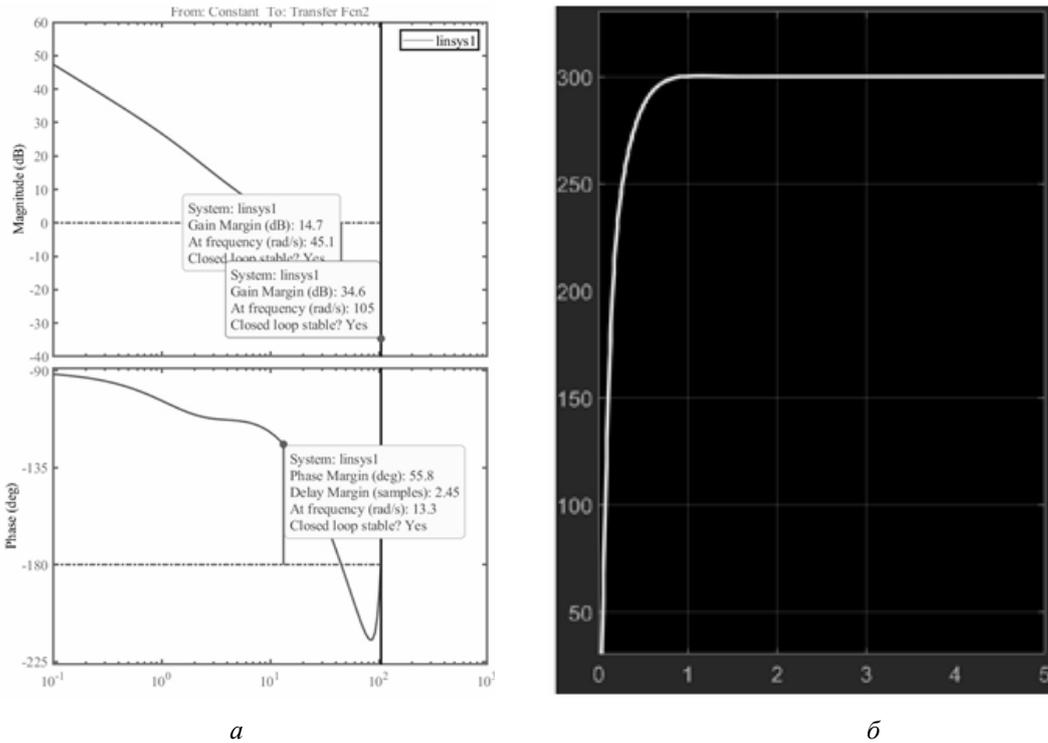


Рис. 6. Характеристики системы: *а* – амплитудная и фазовая характеристики разомкнутой системы; *б* – переходный процесс в замкнутой системе

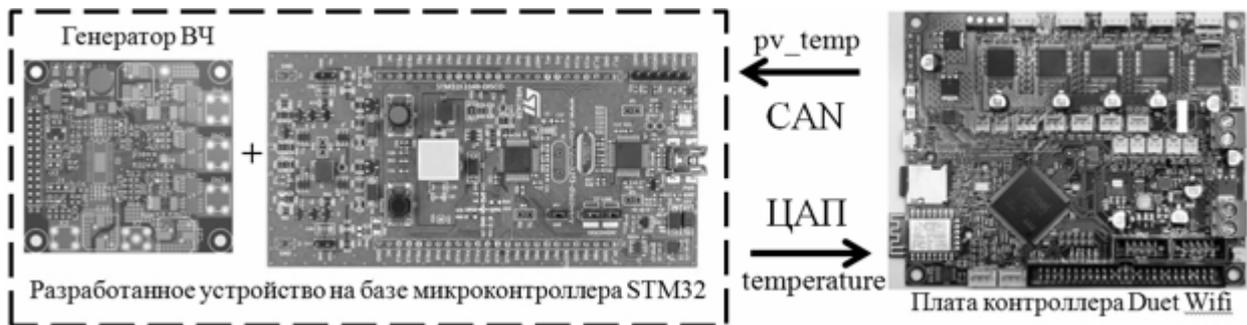


Рис. 7. Интеграция разработанного устройства с платой контроллера DuetWifi



Рис. 8. Индукционный нагреватель в корпусе-радиаторе

Было проведено несколько экспериментов, целью которых являлась оценка точности поддержания заданной температуры в процессе экструзии полимерного материала. Для эксперимента был в качестве тестового материала

выбран нейлон, т. к. данный полимер отличается значительной чувствительностью к температуре экструзии. Отклонения температуры на 5–10 градусов приводят к изменению цвета изделия, образованию видимых пузырей и расслоению. Была осуществлена печать нескольких экземпляров тестового изделия (рис. 9, параллелепипед с основанием 30×30 мм, высотой 5 мм).

Результаты проведенного эксперимента показали значительное увеличение качества печати (отсутствие трещин и расслоений, паразитных истечений расплавленного материала, отсутствие перегретых участков).

Достигнуто увеличение скорости нагрева сопла экструдера. С 20 до 300 °С время нагрева составляет 2–3 с против 40–90 с в стандартных системах трехмерной печати. В результате про-

веденных испытаний была достигнута точность удержания температуры сопла в ± 3 °С. Точность контроля и регулировки температуры сопла проверялась калиброванным измерителем температуры UT325 [15] через термопару, приваренную к поверхности рабочей зоны сопла.

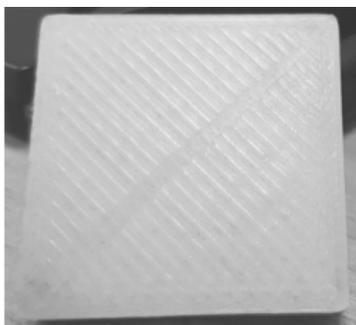


Рис. 9. Внешний вид поверхности тестового изделия из нейлона

На рис. 10 представлен график нагревания и охлаждения индукционного сопла. В течение 10 минут было произведено несколько циклов нагрева и охлаждения сопла. Сопло нагревалось от 30 до 300 °С. В ходе первого цикла происходило постепенное охлаждение сопла на 50 °С за шаг до 50 °С. В ходе второго цикла происходило охлаждение сопла до 50 °С за один шаг. Временные характеристики охлаждения индукционного сопла и горячей части стандартного экструдера приведены в таблице.

Данные, приведенные в таблице и на графике, показывают, что при работе индуктора в его основном режиме обеспечивается высокая скорость как нагрева, так и охлаждения сопла. При этом скорость охлаждения сопла снижается по мере уменьшения значения текущей температуры.

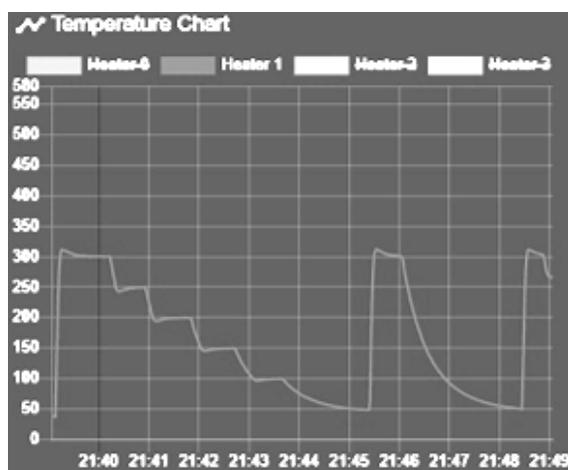


Рис. 10. График нагревания и охлаждения сопла

Временные характеристики процесса охлаждения индукционного сопла и горячей части стандартного экструдера

Начальная / конечная температура, °С	Индукционное сопло, время охлаждения, с	Горячая часть стандартного экструдера, время охлаждения, с
300/250	5	—
250/230	3	22
250/200	9	60
200/150	13	80
150/100	22	120
100/50	82	250
250/50	120	450

Заключение

В программной среде MatlabSimulink разработана модель управления температурой сопла, нагреваемого индукционным методом с использованием предлагаемого вихретокового (резонансного) метода контроля и измерения температуры сопла. Определены передаточные функции индукционной системы нагрева сопла и цепи обратной связи.

В результате моделирования были определены коэффициенты ПИД-регулятора и его период дискретизации, обеспечивающие нулевую статическую ошибку, величину перерегулирования в 1 %, время выхода системы на установившийся режим в 1 с и хорошие запасы устойчивости системы по фазе и амплитуде.

Предложен подход к применению устройства, разработанного на базе микроконтроллера STM32, в процессе трехмерной печати с использованием платы контроллера DuetWifi.

Проведены эксперименты, подтверждающие высокие скоростные и точностные характеристики разработанного метода контроля и управления температурой сопла в процессе трехмерной печати.

Библиографические ссылки

1. ASTM F2792-12A, Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2012.
2. Srinivasulu Reddy K., Dufera S. Additive manufacturing technologies // International Journal of Management, Information Technology and Engineering (BEST: IJMITE) ISSN (P): 2348-0513, ISSN (E): 2454-471X, Vol. 4, Issue 7, Jul 2016, 89-112.
3. Tan W.S. Application of induction heating to 3D print low melting point metal alloy: Final Project Summary Report 2015, UNSW@ADFA. 2015, pp. 1-13.
4. Bauer U., Bandiera N.G., Sachs E.M. Induction heating systems and techniques for fused filament metal fabrication: Patent 0118252 USA. 2019.

5. Pilavdzie J.I., Buren S.V., Kagan V.G. Apparatus for inductive and resistive heating of an object: Patent 7041944 USA. 2006.

6. Hemang J., Manish A. Induction Heating Based 3D Metal Printing of Eutectic Alloy Using Vibrating Nozzle // *Advances in Additive Manufacturing, Modeling Systems and 3D Prototyping*. 2020, pp. 71-80.

7. Elserman M., Versteegh J.A., Zalm E. Inductive nozzle heating assembly: Patent 0094726 USA. 2017.

8. Van Pelt W. Method and printer head for 3D printing of glass: Patent 3042751 Europe. 2016.

9. Stirling R.L., Chilson L., English A. Inductively heated extruder heater: Patent 9596720 USA. 2017.

10. Индукционный нагрев сегментированной токопроводящей жилы силового кабеля на этапе его изготовления / А. К. Шидловский [и др.] // *Техническая электродинамика*. 2009. № 1. С. 53–60.

11. Магнитные свойства вещества. М. : Московский физико-технический институт, 2007. 29 с.

12. Bolat D.E. Implementation of Matlab-SIMULINK based real time temperature control for set point changes [J]. *International Journal of Circuits, Systems and Signal Processing*, 2007, 1(1): 54–61.

13. Федин М. А. Выбор принципа регулирования и разработка системы управления индукционных тигельных печей с проводящим тиглем // *Актуальные проблемы энергосберегающих электротехнологий АПЭЭТ-2014 : сборник научных трудов*. Екатеринбург : [УрФУ], 2014. С. 135–140.

14. Митяков Ф. Е., Горячих Е. В. Системы управления печей сопротивления с нагревателями из тугоплавких металлов // *Актуальные проблемы энергосберегающих электротехнологий АПЭЭТ-2014 : сборник научных трудов*. Екатеринбург : [УрФУ], 2014. С. 88–93.

15. Цифровой термометр [Электронный источник]. URL: https://www.uni-trend.com/html/product/Environmental/Environmental_Tester/UT320_Contact_Type/UT325.html (дата обращения: 23.05.2018).

References

1. ASTM F2792-12A, Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2012.

2. Srinivasulu Reddy K., Duféra S. Additive manufacturing technologies. In *International Journal of Management, Information Technology and Engineering (BEST: IJMITE)* ISSN (P): 2348-0513, ISSN (E): 2454-471X, Vol. 4, Issue 7, Jul 2016, 89-112 p.

3. Tan W.S. Application of induction heating to 3D print low melting point metal alloy: Final Project Summary Report 2015, UNSW@ADFA. 2015, pp. 1-13.

4. Bauer U., Bandiera N.G., Sachs E.M. Induction heating systems and techniques for fused filament metal fabrication: Patent 0118252 USA. 2019.

5. Pilavdzie J.I., Buren S.V., Kagan V.G. Apparatus for inductive and resistive heating of an object: Patent 7041944 USA. 2006.

6. Hemang J., Manish A. Induction Heating Based 3D Metal Printing of Eutectic Alloy Using Vibrating Nozzle. In *Advances in Additive Manufacturing, Modeling Systems and 3D Prototyping*. 2020, pp.71-80.

7. Elserman M., Versteegh J.A., Zalm E. Inductive nozzle heating assembly: Patent 0094726 USA. 2017.

8. Van Pelt W. Method and printer head for 3D printing of glass: Patent 3042751 Europe. 2016.

9. Stirling R. L., Chilson L., English A. Inductively heated extruder heater: Patent 9596720 USA. 2017.

10. Shidlovsky A.K., Shcherba A.A., Podoltsev A.D., Kucheriavaya I.N. and Zolotarev V.M., [Induction heating of segmental wire conductor (Milliken type conductor) of power cable at manufacturing stage]. *Tekhnichna elektrodinamika*, 2009, no. 1, pp. 53-60 (in Russ.).

11. *Magnitnie svoystva veshstva* [Magnetic properties of matter]. Moscow, Moscow Institute of Physics and Technology, 2007. 29 p. (in Russ.).

12. Bolat D.E. Implementation of Matlab-SIMULINK based real time temperature control for set point changes [J]. *International Journal of Circuits, Systems and Signal Processing*, 2007, 1(1): 54–61.

13. Fedin M. A. *Vybor principa regulirovaniya i razrabotka sistemy upravleniya indukcionnyh tigelnih pechej s provodyashchim tiglem* [Selection of the control principle and development of a control system for induction crucible furnaces with a conductive crucible]. *Aktualnye problemy energosberegayushchih elektrotekhnologij APEET-2014 : sbornik nauchnyh trudov* [Proc. Actual problems of energy-saving electrical technologies APEET-2014]. Ekaterinburg: [UrFU], 2014. Pp. 135-140 (in Russ.).

14. Mityakov F.E., Goryachih E.V. *Sistemy upravleniya pechej soprotivleniya s nagrevatelyami iz tugoplavkih metallov* [Control systems for resistance furnaces with heaters made of refractory metals]. *Aktualnye problemy energosberegayushchih elektrotekhnologij APEET-2014 : sbornik nauchnyh trudov* [Proc. Actual problems of energy-saving electrical technologies APEET-2014: collection of scientific papers]. Ekaterinburg : [UrFU], 2014. Pp. 88-93 (in Russ.).

15. Digital thermometer [online website]. Available at: https://www.uni-trend.com/html/product/Environmental/Environmental_Tester/UT320_Contact_Type/UT325.html (accessed: 5.07.2018).

Application of Eddy Current Control in the Temperature Control Loop of the 3D Printing Process

A.A. Oskolkov, Post-graduate, Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia

I.I. Bezukladnikov, PhD in Engineering, Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia

D.N. Trushnikov, DSc in Engineering, Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia

The paper is devoted to FDM 3D manufacturing. Most of the FDM 3D printers on the market use an indirect resistive nozzle heating method and standard thermoelectric temperature control methods, which leads to a high thermal inertia of the heating system and the inability to provide a sufficient speed and accuracy of temperature control. The inability to control the temperature of the nozzle during the printing process leads to inconsistent quality of layer-to-layer adhesion and on the larger scale - heterogeneity of the material inside the whole printed object. To mitigate and/or resolve these problems, an induction heating system of the nozzle with a minimum thermal mass is proposed. At the same time, a resonant (eddy current) method is proposed to control the temperature of the nozzle. High system power and low weight nozzle required the development of a new rapid control system.

A simulation model of the nozzle temperature control loop was created in the MatLab Simulink. The transfer functions of the induction heating system and the feedback circuit are determined.

The coefficients of the PID controller and its sampling period were determined. A zero static error and overshoot value of 1% eliminate overheating of the material during extrusion. The time for the system to reach the steady state is 1 s., that meets the requirements for rapid heating and cooling of the nozzle during the printing process.

The testbed system was created consisting of the ultra-low weight induction heated nozzle, a power source, a high-frequency oscillator, an inductor coil, a measuring coil, a unit for recording and processing a measuring signal. Experimental data for all stages of the conducted research is provided.

Keywords: FFF, FDM, 3D-printing, induction heating, eddy-current testing, control loop, temperature adjustment, PID, simulation model, transfer function.

Получено 02.09.2020