

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по науке и инновациям  
Пермского национального исследовательского  
политехнического университета,  
доктор технических наук, профессор

Коротаев В.И.

2 » сентября 2021 г.

М.П.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

федерального государственного автономного образовательного учреждения  
высшего образования

«Пермский национальный исследовательский политехнический университет»  
Министерства науки и высшего образования Российской Федерации

Диссертация «Управление температурой при экструзии полимерного материала в процессе трехмерной печати» выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет» на кафедре «Сварочное производство, метрология и технология материалов».

В период подготовки диссертации соискатель Осколков Александр Андреевич работал в ООО ИВИЦ «Техномаш» в должности «системный администратор» и в Пермском национальном исследовательском политехническом университете в научно-исследовательской лаборатории «Механика биосовместимых материалов и устройств» в должности «инженер».

В 2015 году окончил Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет» по специальности 090104.65 Комплексная защита объектов информатизации с присуждением квалификации «специалист по защите информации».

В 2020 году окончил аспирантуру очной формы обучения по направлению подготовки 27.06.01 Управление в технических системах Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет» (период обучения 21.09.2015 – 30.09.2020).

Научный руководитель – доктор технических наук Трушников Дмитрий Николаевич, директор департамента науки и инноваций, профессор кафедры «Сварочное производство, метрология и технология материалов» Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего

образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет».

По итогам обсуждения принято следующее заключение.

Представленная Осколковым Александром Андреевичем диссертация посвящена повышению качества технологического процесса синтеза изделий по технологии послойного наплавления посредством разработки метода управления температурой нагреваемого токамаи высокой частоты сопла малой массы при экструзии полимерного материала.

**1. Личное участие автора в получении результатов, изложенных в диссертации,** заключается в следующем:

- проведен анализ конструктивно-технологических особенностей традиционных экструдеров, технологических методов обеспечения качества синтеза изделий по технологии послойного наплавления (FDM/FFF);

- разработана математическая модель, связывающая электромагнитные и тепловые процессы индукционного нагрева сопла малой массы для послойного наплавления при экструзии полимерного материала, и представлено решение задач численного моделирования;

- предложен модифицированный вихретоковый резонансный метод измерения температуры сопла малой массы на основе анализа фазовых и амплитудных характеристик тока цепи индуктора;

- получена регрессионная модель, описывающая зависимость фазовых и амплитудных характеристик тока цепи индуктора (измерительного сигнала) от температуры сопла и потребляемой индуктором мощности;

- разработан метод управления температурой сопла малой массы в процессе послойного наплавления с применением результатов математического моделирования и модифицированного вихретокового резонансного метода измерения температуры;

- на оборудовании для послойного наплавления, реализующем разработанный метод управления и контроля температуры сопла, подготовлены тестовые полимерные образцы и выполнена оптическая микроскопия поверхности разрыва образцов после проведения испытаний на растяжение.

**2. Научная новизна диссертационного исследования** заключается в следующем:

- разработана математическая модель нагрева сопла для послойного наплавления при экструзии полимерного материала, *отличающаяся* совместным учетом электромагнитных и тепловых процессов при индукционном нагреве сопла, *позволяющая* определить параметры индуктора и сопла как объекта управления.

- предложен модифицированный вихретоковый резонансный метод измерения температуры сопла малой массы для послойного наплавления, *отличающийся* совместным анализом фазовых и амплитудных характеристик тока цепи индуктора, *позволяющий* производить измерение с высокой скоростью и точностью непосредственно в процессе нагрева сопла.

- получена регрессионная модель формирования измерительного сигнала, *отличающаяся* совместным учетом влияния температуры сопла и потребляемой индуктором мощности на фазовые и амплитудные характеристики тока цепи индуктора, *позволяющая* осуществлять преобразование регистрируемых значений измерительного сигнала в температуру сопла с высокой точностью.

- разработан метод управления температурой сопла малой массы в процессе послойного наплавления с применением результатов математического моделирования и модифицированного вихретокового резонансного метода измерения температуры, *отличающийся* учетом нелинейного характера зависимости температуры сопла от величины управляющего воздействия, *позволяющий* обеспечить высокую точность, скорость и постоянное качество регулирования на доступном диапазоне рабочей температуры сопла.

**3. Степень достоверности результатов проведенных исследований** подтверждена успешной верификацией полученных математических моделей, соответствием результатов моделирования экспериментальным данным, известным теоретическим положениям и их непротиворечивостью публикациям других авторов, а также апробацией и внедрением полученных в диссертационной работе результатов на предприятии.

#### **4. Практическая значимость исследования:**

Решена задача скоростного управления температурой объекта малой массы применительно к соплу (~1 г) экструдера для послойного наплавления (FDM/FFF), которое нагревается токами высокой частоты. Скорость охлаждения сопла малой массы в 6 раз выше, чем у горячей части (сопло, нагревательный блок, резистивный нагреватель) традиционного экструдера. Время нагрева сопла малой массы от 50 до 250 °С составляет 1.5-2 с против 40-90 с для традиционных экструдеров. Разработан модифицированный вихретоковый резонансный метод измерения температуры сопла малой массы, обеспечивающий точность измерения  $\pm 3$  °С при времени измерения 100 мкс и  $\pm 0.2$  °С при времени измерения 20 мс. Метод обеспечивает измерение в непосредственной близости от полимерного материала (толщина стенки 1 мм) и позволяет быстро и точно корректировать (регулировать) температуру сопла малой массы для обеспечения требуемой температуры экструзии материала на участке траектории движения экструдера или при изменении скорости экструзии в процессе наплавки, что не было возможным при использовании традиционных экструдеров в силу большой тепловой инерционности горячей части (масса >20 г), большой постоянной времени (100-120 мс) применяемых термисторов и термопар, а также их расположения на удалении от сопла, что обеспечивало точность измерения температуры сопла около 10-20 °С и приводило к ошибке по температуре экструзии материала от 20-30 до 40-60 °С при скоростях экструзии от 30 до 100 мм/с. При этом для применяемых полимерных материалов, отклонение температуры экструзии от оптимальной всего на 10 °С приводит к падению итоговых механических свойств изделия на ~5-10%. Разработанный метод управления температурой сопла обеспечивает возможность регулирования

термического цикла процесса послойного наплавления, что позволит избежать значительных термических деформаций и разрушения синтезированного изделия.

Результаты диссертационного исследования реализованы в рамках проекта ООО «Ф2 Инновации» (г. Пермь) в процессе разработки технологии изготовления деталей ответственного назначения, а также их производства. Внедрено устройство, реализующее разработанный метод управления температурой сопла в процессе послойного наплавления, что обеспечило повышение стабильности качества и механических свойств синтезированных изделий. Результаты испытаний образцов демонстрируют увеличение прочности на растяжение в среднем на 15-20% по сравнению с известными результатами применения других методов оптимизации процесса послойного наплавления, с которыми разработанный метод управления температурой допускает совместное применение. Разработанная математическая модель индукционного нагрева сопла при экструзии полимерного материала применима для сопел и индукторов различных форм и размеров, а также применима при разработке систем с постоянной скоростью экструзии материала для определения оптимального положения датчика локального измерения температуры.

Исследование выполнено в Пермском национальном исследовательском политехническом университете в рамках гранта, выделяемого для государственной поддержки научных исследований, проводимых под руководством ведущих ученых в российских образовательных организациях высшего образования, научных учреждениях и государственных научных центрах Российской Федерации, соглашение № 075-15-2021-578 от 31.05.2021 г.

#### **5. Полнота изложения материалов диссертации в работах, опубликованных соискателем:**

Основные результаты работы докладывались и обсуждались на всероссийской научно-технической конференции «Автоматизированные системы управления и информационные технологии (АСУИТ 2020)», г. Пермь, 2020 г., межфакультетской научно-практической конференции (на иностранном языке) «Актуальные инновационные исследования: наука и практика», г. Пермь, ПНИПУ, 2016 г., V международном технологическом форуме «Инновации. Технологии. Производство», г. Рыбинск, 2018 г., всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Химия. Экология. Урбанистика», г. Пермь, 2020 г., международной научной конференции «9th International Conference on Mathematical Modeling in Physical Sciences», Греция, 2020 г., международной научно-практической конференции «Электронные средства и системы управления», г. Томск, 2020 г., а также на семинарах кафедры «Автоматика и телемеханика» Пермского национального исследовательского политехнического университета.

Содержание диссертационной работы достаточно полно отражено в 11 работах, из них 3 работы в журналах, входящих в международные базы цитирования Scopus и Web of Science, и 4 работы в рецензируемых научных изданиях, которые рекомендованы Минобрнауки России для публикации основных результатов диссертационных исследований, получено 4 патента

(общий объем публикаций 31.8 печатного листа, из них авторских 21.9 печатного листа).

*Основные статьи в журналах, входящих в международные базы цитирования Scopus или Web of Science:*

1. Oskolkov A, Bezukladnikov I, Trushnikov D. Indirect Temperature Measurement in High Frequency Heating Systems. Sensors. 2021; 21(7):2561

*В статье описывается модифицированный вихретоковый резонансный метод контроля и измерения температуры на основе анализа характеристик тока цепи индуктора посредством АЦП и метода PSM в процессе нагрева сопла токами ВЧ. Представлены результаты численного моделирования процесса охлаждения сопла малой массы при различных скоростях экструзии полимерного материала в сравнении с горячей частью традиционного экструдера. Представлена измерительная цепь и регрессионная модель формирования измерительного сигнала. Описаны программные средства повышения точности измерений. Представлены результаты испытаний полимерных образцов, синтезированных на установке, реализующей разработанный метод управления температурой сопла, а также оптической микроскопии поверхности разрыва.*

2. A.A. Oskolkov, D.N. Trushnikov, I.I. Bezukladnikov. Application of induction heating in the FDM/FFF 3D manufacturing. Journal of Physics: Conference Series, 2021, 1730, 012005.

*В статье решена задача высокоскоростного нагрева сопла за счет применения ферромагнитного сплава и концентратора магнитного потока с высокой относительной магнитной проницаемостью и представлен подход к модификации формы индуктора для снижения возросшей неравномерности нагрева вдоль поверхности сопла.*

3. I.I. Bezukladnikov, D.N. Trushnikov, Yu. A. Shilova, A.A. Yuzhakov, A.A. Oskolkov, E.V. Matveev. Study the possibility of improving induction heating of FDM 3D-printer nozzle // International Journal of Mechanical Engineering and Technology (IJMET)- Volume 9, Issue 9, September 2018, pp. 1463–1474.

*В статье описывается математическая модель индукционного нагрева сопла малой массы, связывающая электромагнитную и тепловую задачи.*

*Основные статьи в журналах, рекомендованных ВАК:*

4. А.А. Осколков, И.И. Безукладников, Д.Н. Трушников. Применение вихретокового метода контроля в контуре управления температурой процесса трехмерной печати // Интеллектуальные системы в производстве. – 2020. – Т. 18, № 3 – С. 110-117.

*В статье описывается нелинейный характер зависимости температуры сопла и потребляемой индуктором мощности от управляющего воздействия (напряжения на выходе генератора), а также имитационная модель нелинейной САУ температуры сопла, использующей модифицированный вихретоковый резонансный метод измерения температуры.*

5. И.И. Безукладников, А.А. Осколков, Д.Н. Трушников и др. Определение соотношения температуры полимера на выходе сопла FFF/FDM 3D-принтера и длины активной (горячей) части для различных линейных скоростей печати // Вестник ПНИПУ. Машиностроение, материаловедение. – 2020. – Т. 22, № 1. – С. 70–78.

*В статье описывается математическая модель индукционного нагрева сопла малой массы при экструзии полимерного материала, связывающая электромагнитную и тепловую задачи. Исследовано поле температур полимерного материала при удержании постоянной температуры стенок сопла для различных скоростей экструзии материала (линейных скоростей печати).*

6. А.А. Осколков, И.И. Безукладников, Д.Н. Трушников. Управление температурой в процессе трехмерной печати на основе изменений электрических параметров нагреваемого сопла // Вестник ВГТУ. – 2020. – Т. 16, № 5. – С. 19-25.

*В статье описывается модифицированный вихретоковый резонансный метод контроля и измерения температуры на основе анализа фазовых и амплитудных характеристик тока цепи индуктора. Описывается имитационная модель последовательно-параллельного колебательного контура топологии LCL, в который параллельно включается индуктор с соплом. Установлен характер зависимости регистрируемых значений измерительного сигнала от температуры сопла и потребляемой индуктором мощности.*

7. А.А. Осколков, И.И. Безукладников, Д.Н. Трушников и др. Передовые технологии аддитивного производства металлических изделий // Вестник ПНИПУ. Машиностроение, материаловедение. – 2018. – Т. 20, № 3. – С. 90–105.

*В статье впервые представлен прототип устройства, использующего индукционный метод нагрева и разработанный метод управления температурой сопла на ранних этапах исследования в разрезе перспектив его применения в сфере послойного наплавления металлами и сплавами.*

#### *Патенты:*

8. Патент на изобретение. Способ формования изделий, усиленных каркасом из непрерывного волокна: пат. 2738650 Рос. Федерация. № 2020115946 / Безукладников И.И., Трушников Д.Н., Осколков А.А., Матвеев Е.В.; заявл. 15.05.2020; опубл. 15.12.2020, Бюл. № 35 с.

9. Патент на полезную модель. Быстросменный картридж для печатающей головки FDM 3D-принтера: пат. 200952 Рос. Федерация. № 2020118335 / Безукладников И.И., Трушников Д.Н., Осколков А.А., Матвеев Е.В.; заявл. 03.06.2020; опубл. 20.11.20, Бюл. № 32 с.

10. Патент на изобретение. Способ формирования среды заданной температуры в рабочей камере 3D-принтера: пат. 2736449 Рос. Федерация. № 2019143748 / Безукладников И.И., Трушников Д.Н., Осколков А.А., Матвеев Е.В.; заявл. 25.12.19; опубл. 17.11.20, Бюл. № 32.

11. Патент на полезную модель. Быстросменный картридж для печатающей головки 3D-принтера: пат. 196247 Рос. Федерация. № 2019143751 / Безукладников

И.И., Трушников Д.Н., Осколков А.А., Матвеев Е.В.; заявл. 25.12.19; опубл. 21.02.20, Бюл. № 6.

**6. Соответствие содержания диссертации специальности, по которой она рекомендуется к защите.**

Представленная Осколковым Александром Андреевичем диссертационная работа является самостоятельным научным исследованием в области управления технологическими параметрами процесса трехмерной печати по экструзионной технологии послойного наплавления, имеет важное научное и прикладное значение для развития данного направления науки.

Разработан метод управления и контроля температуры сопла малой массы для трехмерной печати по технологии послойного наплавления (FDM/FFF) при экструзии полимерного материала с применением индукционного метода нагрева сопла. Разработана математическая модель индукционного нагрева сопла малой массы при экструзии полимерного материала, позволившая определить параметры сопла и индуктора как объекта управления.

Исследованы особенности управления температурой сопла малой массы, нагреваемого токами высокой частоты. С применением имитационного моделирования синтезирована САУ температуры сопла, учитывающая выявленные в ходе анализа особенности и закономерности, а также и произведена оценка качества регулирования.

Разработан модифицированный вихретоковый резонансный метод измерения температуры сопла малой массы на основе совместного анализа фазовых и амплитудных характеристик тока цепи индуктора. Исследованы экспериментальные закономерности в формировании измерительного сигнала и получена регрессионная модель, описывающая зависимость фазовых и амплитудных характеристик тока цепи индуктора от температуры сопла и потребляемой индуктором мощности.

Исследовано влияние разработанного метода управления и контроля температуры сопла на итоговые физико-механические свойства заготовок.

Указанная область исследования соответствует пунктам **1, 2, 4, 6, 8, 15** паспорта научной специальности 05.13.06 Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами:

п. 1 Автоматизация производства заготовок, изготовления деталей и сборки.

п. 2 Автоматизация контроля и испытаний.

п. 4 Теоретические основы и методы математического моделирования организационно-технологических систем и комплексов, функциональных задач и объектов управления и их алгоритмизация.

п. 6 Научные основы, модели и методы идентификации производственных процессов, комплексов и интегрированных систем управления.

п. 8 Формализованные методы анализа, синтеза, исследования и оптимизация модульных структур систем сбора и обработки данных в АСУТП, АСУЦ, АСТПП и др.

п. 15 Теоретические основы, методы и алгоритмы интеллектуализации решения прикладных задач при построении АСУ широкого назначения (АСУТП, АСУЦ, АСТПП и др.).

7. Диссертационная работа Осколкова Александра Андреевича отвечает требованиям, установленным п. 14 Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного Постановлением Правительства РФ № 842 от 24 сентября 2013 г.: автор, Осколков Александр Андреевич, корректно ссылается в тексте диссертации на авторов и (или) источники заимствования материалов, в том числе при использовании результатов научных работ, опубликованных лично или в соавторстве.

Диссертация на тему «Управление температурой при экструзии полимерного материала в процессе трехмерной печати» Осколкова Александра Андреевича рекомендуется к защите на соискание ученой степени кандидата технических наук по научной специальности 05.13.06 Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами.

Заключение принято на совместном заседании кафедры «Сварочное производство, метрология и технология материалов» (СПМиТМ) и кафедры «Автоматика и телемеханика» (АТ) Пермского национального исследовательского политехнического университета «21» июня 2021 г. (протокол № 13).

Приеутствовало на заседании 34 чел. Результаты голосования: «за» – 34, «против» – нет, «воздержалось» – нет.

Заведующий кафедрой СПМиТМ  
ФГАОУ ВО «Пермский национальный  
исследовательский политехнический  
университет»,  
д.т.н., профессор

  
/ Шцицын Ю.Д. /

Заведующий кафедрой АТ  
ФГАОУ ВО «Пермский национальный  
исследовательский политехнический  
университет»,  
д.т.н., профессор

  
/ Южаков А.А. /

