

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования  
**«Пермский национальный исследовательский политехнический  
университет»**

**Заключение диссертационного совета Д ПНИПУ.05.04  
по диссертации Осколкова Александра Андреевича  
на соискание ученой степени  
кандидата технических наук**

Диссертация «Управление температурой при экструзии полимерного материала в процессе трехмерной печати» по специальности 05.13.06 – Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (в промышленности) принята к защите «01» октября 2021 г. (протокол заседания №3) диссертационным советом Д ПНИПУ.05.04, созданным по приказу ректора Пермского национального исследовательского политехнического университета от «01» октября 2019 г. № 68-О в рамках реализации предоставленных ПНИПУ прав, предусмотренных абзацами вторым – четвертым пункта 3.1 статьи 4 Федерального закона от 23 августа 1996 г. № 127-ФЗ «О науке и государственной научно-технической политике» на основании распоряжения Правительства Российской Федерации от 23 августа 2017 г. № 1792-р.

Диссертация выполнена на кафедре «Сварочное производство, метрология и технология материалов» федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет» Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

**Научный руководитель** – доктор технических наук Трушников Дмитрий Николаевич, директор департамента науки и инноваций, профессор кафедры «Сварочное производство, метрология и технология материалов» ФГАОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет».

**Официальные оппоненты:**

Мурыгин Александр Владимирович, доктор технических наук, 05.13.06 – Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (в промышленности), профессор, заведующий кафедрой «Информационно-

управляющие системы» ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева» Минобрнауки РФ.

Щербаков Алексей Владимирович, доктор технических наук, 05.09.10 – Электротехнология, доцент, профессор кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий и электротехнологии» ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет «МЭИ» Минобрнауки РФ.

**Ведущая организация:** Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный морской технический университет» Минобрнауки РФ, г. Санкт-Петербург (отзыв ведущей организации утвержден проректором по научной работе СПбГМТУ, доктором технических наук, доцентом, Никущенко Дмитрием Владимировичем, заслушан на заседании кафедры «Цифровые лазерные технологии» факультета цифровых промышленных технологий СПбГМТУ и подписан заведующим кафедрой ЦЛТ, доктором технических наук Туричиным Глебом Андреевичем, и заместителем директора по научной и проектной деятельности Института лазерных и сварочных технологий СПбГМТУ, доцентом кафедры ЦЛТ, кандидатом технических наук Земляковым Евгением Вячеславовичем).

По теме диссертации соискателем опубликовано 11 научных трудов, в том числе 7 работ – в ведущих рецензируемых научных изданиях, рекомендованных для опубликования основных научных результатов диссертаций на соискание ученой степени, из них 3 работы – в изданиях, индексируемых в международных базах цитирования (Web of Science, Scopus), соискателем получено 2 патента на изобретения и 2 на полезные модели. В диссертации отсутствуют недостоверные сведения об опубликованных соискателем научных трудах. Наиболее значимые научные работы по теме диссертации:

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

*В работе соискателем описан предложенный модифицированный вихретоковый резонансный метод измерения температуры сопла для трехмерной печати на основе анализа характеристик тока цепи индуктора в процессе нагрева токами высокой частоты. Им приведены результаты анализа традиционных систем для послойного наплавления. Соискателем представлены результаты численного моделирования процесса охлаждения сопла малой массы при помощи разработанной модели индукционного нагрева сопла при экструзии полимерного материала. Им представлена разработанная регрессионная модель формирования измерительного*

сигнала, а также описано применение программных средств повышения точности измерения. Соискателем представлены результаты апробации разработанного метода управления температурой сопла с применением разработанного метода измерения, в том числе результаты механических испытаний термопластичных образцов. Им приведены результаты оптической микроскопии поверхности разрыва образцов.

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

*В работе соискателем описаны особенности и обосновано применение метода индукционного нагрева для решения задачи скоростного управления температурой сопла в процессе послойного наплавления, предложено применение сопла из ферромагнитного сплава и концентратора магнитного потока с высокими показателями относительной магнитной проницаемости. Соискателем приведены результаты численного исследования распределений температур в сечении сопла специальной формы для различных частот тока цепи индуктора. Соискателем представлен подход к модификации формы индуктора для снижения неравномерности нагрева вдоль поверхности сопла. Им представлены результаты апробации разработанного метода скоростного управления температурой сопла.*

3. Study the possibility of improving induction heating of fdm 3d printer nozzle / I.I. Bezukladnikov, D.N. Trushnikov, Yu. A. Shilova, A.A. Yuzhakov, A.A. Oskolkov, E.V. Matveev // International Journal of Mechanical Engineering and Technology (IJMET). – 2018. – Vol. 9, iss. 9. – P. 1463–1474.

*В работе соискателем описана разработанная математическая модель, связывающая электромагнитные и тепловые процессы индукционного нагрева сопла.*

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

*В работе соискателем описана разработка имитационной модели системы автоматического управления температурой сопла в приложении Simulink пакета Matlab. Соискателем описан нелинейный характер зависимости температуры сопла от управляющего воздействия (напряжения на выходе источника питания).*

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

*В работе соискателем описан предложенный им модифицированный вихрековый резонансный метод измерения температуры сопла из ферромагнитного сплава на основе анализа фазовых и амплитудных характеристик тока цепи индуктора. Соискателем представлена имитационная модель разработанного последовательно-параллельного резонансного контура топологии LCL, в который включен индуктор. Соискателем приведены результаты и порядок исследования измерительного сигнала.*

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

*В работе соискателем приведены результаты численного исследования полей температур ряда полимерных материалов при удержании постоянной температуры стенок сопла для различных скоростей экструзии (линейных скоростей печати).*

7. Передовые технологии аддитивного производства металлических изделий / А.А. Осколков, Е.В. Матвеев, И.И. Безукладников, Д.Н. Трушников, Е.Л. Кротова // Вестник ПНИПУ. Машиностроение, материаловедение. – 2018. – Т. 20, № 3. – С. 90–104.

*В работе соискателем впервые представлен прототип устройства, реализующего разработанный метод управления индукционным нагревом сопла на ранних этапах исследования, в разрезе перспектив его применения для печати металлами и сплавами.*

**Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:**

**разработан** новый метод управления температурой сопла малой массы в процессе послойного наплавления, учитывающий нелинейный характер зависимости температуры сопла от управляющего воздействия, с применением

модифицированного вихретокового резонансного метода измерения температуры на основе совместного анализа фазовых и амплитудных характеристик тока цепи индуктора, позволяющий снизить погрешность управления температурой сопла экструдера с 20 до 0.2 °С;

**предложен** оригинальный метод синтеза системы автоматического управления температурой, состоящий в последовательном применении математических моделей источника управляющих воздействий и объекта управления с целью определения коэффициентов передачи объекта управления для всего диапазона уровней мощности;

**доказана** перспективность применения разработанного метода управления температурой сопла в процессе послойного наплавления (FFF/FDM) для улучшения физико-механических свойств наплавленных изделий из термопластов.

**Теоретическая значимость исследования** обоснована тем, что **доказана** возможность совместного использования фазовых и амплитудных характеристик тока цепи индуктора для косвенного измерения и управления температурой объекта малой массы в реальном масштабе времени при нагреве объекта токами высокой частоты; применительно к проблематике диссертации результативно (эффективно, то есть с получением обладающих новизной результатов) **использованы** известные методы математического моделирования, методы анализа и синтеза систем автоматического управления, методы статистической обработки экспериментальных данных;

**разработана** математическая модель, связывающая электромагнитные и тепловые процессы индукционного нагрева сопла для послойного наплавления при экструзии полимерного материала, позволяющая определить параметры сопла и индуктора как объекта управления;

**изложены** результаты численных исследований распределения температуры сопла малой массы для послойного наплавления при различных скоростях экструзии материала, которые позволили оценить влияние скорости экструзии на скорость охлаждения сопла малой массы и на параметры сопла как объекта управления;

**раскрыты** особенности формирования обратной связи при управлении температурой объекта малой массы в процессе его нагрева токами высокой частоты, а также управления температурой объекта малой массы, а именно влияние на качество регулирования нелинейной реакции объекта управления на управляющее воздействие при работе на широком диапазоне температур;

**изучены** закономерности формирования измерительного сигнала (зависимость фазовых и амплитудных характеристик тока цепи индуктора от температуры сопла и

потребляемой индуктором мощности), амплитудная и фазовая частотные характеристики резонансного контура топологии LCL с индуктором;

**Значение полученных соискателем результатов исследования для практики** подтверждается тем, что:

**разработан** метод управления температурой сопла малой массы в процессе послойного наплавления (FFF/FDM). **Внедрено** устройство, реализующее разработанный метод управления, на предприятии «Ф2 Инновации», что обеспечило улучшение физико-механических свойств наплавленных изделий в среднем на 20%;

**определены** перспективы применения модифицированного вихретокового резонансного метода контроля и измерения температуры изделий из ферромагнитных материалов и сплавов при их нагреве токами заданной частоты;

**создана** математическая модель индукционного нагрева сопла при экструзии полимера, которая применима для сопел и индукторов различных форм и размеров;

**представлены** предложения по дальнейшему совершенствованию технологии послойного наплавления за счет регулирования термического цикла процесса наплавления при помощи разработанного метода управления температурой сопла и численного исследования полей температур наплавляемых слоев изделия.

**Оценка достоверности результатов исследования** выявила:

**для экспериментальных работ** показана воспроизводимость авторских результатов, представлена калибровка модифицированного вихретокового резонансного метода измерения, использованы современные методы исследований и измерений;

**теория** построена на известных проверяемых данных, фактах и положениях, описывающих электромагнитные и тепловые процессы индукционного нагрева, положениях теории автоматического управления и обработки сигналов, а результаты математического моделирования и аналитических расчетов подтверждаются результатами экспериментов;

**идея базируется** на всестороннем анализе конструктивно-технологических особенностей современных традиционных экструдеров для послойного наплавления и применяемых технологических методов обеспечения качества синтеза изделий.

**Личный вклад соискателя** состоит в участии на всех этапах диссертационного исследования, а именно: соискателем проведен анализ традиционных экструдеров для послойного наплавления; разработана математическая модель, связывающая электромагнитные и тепловые процессы индукционного нагрева сопла при экструзии полимерного материала, а также представлено решение задач численного моделирования; предложен модифицированный вихретоковый

резонансный метод измерения температуры сопла на основе анализа фазовых и амплитудных характеристик тока цепи индуктора; получена регрессионная модель формирования измерительного сигнала; разработан метод управления температурой сопла малой массы в процессе послойного наплавления; проведена экспериментальная апробация разработанного метода управления; подготовлены основные публикации по работе.

**Диссертационный совет пришел к выводу**, что диссертация представляет собой научно-квалификационную работу, которая соответствует критериям, установленным Положением о присуждении ученых степеней, утвержденным Постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842, и Порядком присуждения ученых степеней в ПНИПУ, утвержденным приказом ректора ПНИПУ от 09 января 2018 г. № 1-О: в ней изложены и научно обоснованы новые теоретические и технические решения по улучшению физико-механических свойств изделий, изготовленных по технологии послойного наплавления при экструзии термопластичного материала путем повышения точности и скорости управления температурой сопла, нагреваемого токами высокой частоты, что имеет важное значение при производстве изделий ответственного назначения в авиакосмической, автомобилестроительной и других отраслях промышленности.

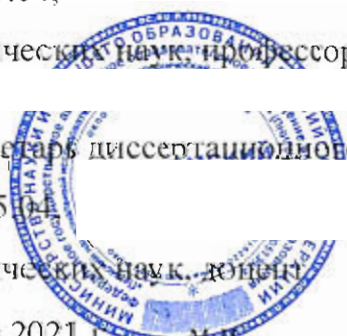
На заседании «10» декабря 2021 г. диссертационный совет Д ПНИПУ.05.04 принял решение присудить Осколкову Александру Андреевичу ученую степень кандидата технических наук (протокол заседания № 7).

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 15 человек, из них 7 докторов наук по специальности рассматриваемой диссертации, участвовавших в заседании, из 20 человек, входящих в состав совета, проголосовал: за присуждение ученой степени – 14, против присуждения ученой степени – 0, не участвовавших в голосовании – 1.

Председатель диссертационного совета

Д ПНИПУ.05.04,

доктор технических наук, профессор



Южаков Александр Анатольевич

Ученый секретарь диссертационного совета

Д ПНИПУ.05.04,

доктор технических наук, доцент

Фрейман Владимир Исаакович

«10» декабря 2021 г. М.п.