

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

федеральное государственное  
бюджетное образовательное  
учреждение высшего  
образования  
«Санкт-Петербургский  
государственный морской  
технический университет»  
(СПбГМТУ)

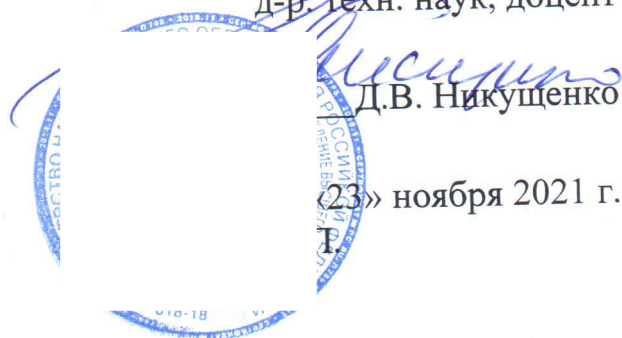
Лощманская ул., д. 3, Санкт-Петербург, 190121  
Тел. (812) 714-07-61; факс (812) 713-81-09;  
e-mail: office@smtu.ru; http://www.smtu.ru  
ОКПО 02066380; ОГРН 1027810221548;  
ИНН/КПП 7812043522/783901001

23.11.2021 № 2180/21-160

На № \_\_\_\_\_ от \_\_\_\_\_

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по научной работе  
СПбГМТУ,  
д-р техн. наук, доцент



Д.В. Никущенко

«23» ноября 2021 г.

### ОТЗЫВ

ведущей организации ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный морской технический университет» на диссертационную работу Осколкова Александра Андреевича на тему «Управление температурой при экструзии полимерного материала в процессе трехмерной печати», представленную в диссертационный совет Д ПНИПУ.05.04 на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.06 – Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (в промышленности)

В результате ознакомления с диссертационной работой Осколкова А.А., научными публикациями соискателя и авторефератом, установлено следующее:

1. Диссертационная работа Осколкова А.А. оформлена в соответствии с требованиями ВАК РФ, состоит из введения, четырех глав, заключения, приложений и списка литературы из 328 наименований. Работа изложена на 215 страницах машинописного текста, включает 65 рисунков и 13 таблиц. Приводимые автором факты и цитаты имеют корректные ссылки на первоисточники. Название, форма, содержание диссертационной работы и положения выносимые на защиту соответствуют специальности 05.13.06 – Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (в промышленности).



Автореферат в полной мере отражает содержание диссертации и полученные в ней результаты.

## **2. Актуальность темы**

Диссертационная работа Осколкова А.А. посвящена повышению физико-механических свойств изделий, полученных в результате трехмерной печати по технологии послойного наплавления (FDM/FFF). Несмотря на то, что с точки зрения печати полимерными материалами технология послойного наплавления является наиболее распространенной, ее применимость в настоящее время существенно ограничена, что вызвано низкой стабильностью качества наплавляемых изделий. В процессе послойного наплавления не обеспечивается достаточная точность измерения температуры сопла, а также не представляется возможной быстрая корректировка температуры сопла при изменении скорости печати или формы слоя в силу большой массы и конструкции традиционных экструдеров, а также особенностей доступных методов измерения. То есть не обеспечивается нужная температура полимерного материала, что приводит к ухудшению механических свойств, термическим деформациям изделия или его разрушению по границам слоев.

Актуальность диссертационного исследования обусловлена разработкой метода управления температурой нагреваемого токами высокой частоты тонкостенного сопла малой массы, при котором обеспечивается измерение температуры сопла в непосредственной близости от экструдированного материала, а также возможность скоростного регулирования температуры сопла в процессе послойного наплавления.

## **3. Общая характеристика содержания работы**

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулирована цель и задачи исследования, положения, выносимые на

защиту, научная новизна и практическая значимость, апробация, количество и виды публикаций, структура и объем работы.

В первой главе отражен анализ конструктивно-технологических особенностей традиционных экструдеров для послойного наплавления (FDM), связанных с ними технологических методов обеспечения качества наплавки изделий (управление температурой наплавленных слоев изделия, управление и контроль экструзии материала, управление и измерение температуры сопла и экструдруемого материала). Определен ряд проблем, требующих решения.

Вторая глава посвящена анализу метода индукционного нагрева с точки зрения его применения в области трехмерной печати по технологии послойного наплавления (FDM/FFF), а также разработке математической модели индукционного нагрева сопла для послойного наплавления при экструзии полимерного материала, связывающей электромагнитные и тепловые процессы. В результате численного моделирования определены параметры индуктора и сопла как объекта управления, обоснована необходимость разработки метода измерения температуры сопла малой массы, обеспечивающего требуемые скорость и точность измерения.

Третья глава посвящена разработке модифицированного вихретокового резонансного метода измерения температуры сопла для послойного наплавления, в основе которого лежит совместный анализ фазовых и амплитудных характеристик тока цепи индуктора посредством АЦП. Разработан генератор высоких частот, измерительная цепь, последовательно-параллельный резонансный контур топологии LCL, а также имитационная модель последнего. Построена регрессионная модель, описывающая зависимость фазовых и амплитудных характеристик тока цепи индуктора от температуры сопла и потребляемой индуктором мощности.

Четвертая глава посвящена разработке метода управления температурой сопла малой массы с применением разработанного метода измерения температуры. Установлена нелинейная зависимость температуры

сопла от управляющего воздействия. Разработанные ранее математические модели позволили осуществить линеаризацию системы автоматического управления (САУ) температурой сопла и определить коэффициенты передачи объекта управления. Разработана имитационная модель САУ температуры сопла, которая позволила скорректировать коэффициенты ПИД-регулятора, полученные в результате аналитического расчета, и оценить качество регулирования. С применением разработанного метода управления температурой сопла был изготовлен ряд тестовых полимерных образцов и проведены их испытания на растяжение и т.д.

**4. Научная новизна** диссертационной работы заключается в том, что Осколковым А.А. разработана математическая модель, связывающая электромагнитные и тепловые процессы индукционного нагрева ферромагнитного сопла для послойного наплавления, которая позволяет определить параметры сопла и индуктора как объекта управления. Осколковым А.А. предложен модифицированный вихретоковый резонансный метод измерения температуры сопла малой массы для послойного наплавления, в основе которого лежит совместный учет фазовых и амплитудных характеристик тока цепи индуктора, обеспечивающий измерение с высокой точностью непосредственно в процессе нагрева сопла токами высокой частоты. Построена математическая модель, описывающая изменение фазовых и амплитудных характеристик тока цепи индуктора в зависимости от температуры сопла и потребляемой индуктором мощности, которая позволяет определять температуру по регистрируемым значениям измерительного сигнала. Разработан метод управления температурой сопла малой массы в процессе послойного наплавления учитывающий нелинейный характер зависимости температуры сопла от величины управляющего воздействия, который позволяет обеспечить высокую точность, скорость и постоянное качество регулирования в диапазоне рабочих температур сопла.

## **5. Степень достоверности и обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертационной работе**

Автором изучены и проанализированы известные отечественные и зарубежные результаты исследований в заявленной предметной области. Достоверность полученных в диссертации результатов подтверждается использованием современных средств проведения исследований, успешной верификацией полученных математических моделей, соответствием результатов моделирования экспериментальным данным, соответствием известным теоретическим положениям, а также апробацией и внедрением полученных в диссертационной работе результатов на предприятии. Основные результаты диссертационной работы докладывались Осколковым А.А. на международных и всероссийских конференциях. Было опубликовано 11 печатных работ по теме исследования, в том числе 3 в журналах, входящих в международные базы цитирования Scopus или Web of Science, 4 в изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки РФ. Опубликованные работы в полной мере отражают содержание диссертации.

## **6. Практическая и научная значимость полученных результатов**

Решена задача быстрого и точного управления температурой объекта малой массы при его нагреве токами высокой частоты на примере сопла специальной формы для трехмерной печати. Сложность задачи заключалась в нелинейной реакции объекта управления на нагрев, т.е. на управляющее воздействие, одновременном влиянии целого ряда параметров, а также в поиске метода, позволяющего осуществлять измерение температуры с необходимой точностью и скоростью. Регулирование температуры сопла в зависимости от формы слоя, условий теплоотвода и скорости экструзии делает возможным регулирования термического цикла процесса наплавления.

Результаты диссертационной работы реализованы в рамках проекта ООО «Ф2 Инновации» (г. Пермь). Применение результатов исследования

обеспечило повышение физико-механических свойств наплавленных полимерных изделий на 15-20% по сравнению с результатами применения других известных методов оптимизации технологии послойного наплавления.

По теме диссертации получены четыре патента РФ. Научная и практическая значимость работы подчеркивается тем, что исследование выполнено 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.

#### **7. Рекомендации по использованию полученных результатов**

Результаты диссертационной работы рекомендуется использовать на предприятиях авиационной, ракетно-космической, автомобилестроительной и прочих наукоемких отраслях промышленности, применяющих методы аддитивного производства термопластичных изделий с целью повышения качества продукции, экономической эффективности производства, а в частности одиночного и мелкосерийного производства изделий сложной формы на предприятиях, входящих в структуры ПАО «ОАК», АО «ОДК», АО «ОСК», АО «КТРВ», АО «НПО Энергомаш», таких как АО «ЧМЗ», АО Воткинский завод, ООО «НПК ТЭТА» и др.

#### **8. Общие замечания**

1) В недостаточной степени описан случай согласного включения индуктора и измерительной катушки при разработке модифицированного вихретокового резонансного метода измерения температуры. Каким образом это повлияет на результаты измерений и работу метода?

2) Есть ли другие ограничения характерные для разработанного косвенного метода измерения температуры изделий из ферромагнитных материалов и сплавов, кроме превышения температуры Кюри?

3) Не ясно почему в качестве полимера при исследовании математической модели индукционного нагрева сопла был выбран нейлон.

4) Приводятся результаты испытаний ряда термопластичных образцов на растяжение. Стоило бы расширить спектр материалов, увеличить выборку образцов, провести более детальное исследование внутренней структуры образцов, испытания на сжатие, изгиб, ударные нагрузки и др.

5) Каким образом предполагается применять разработанный автором метод управления температурой совместно с наиболее распространенным методом оптимизации процесса послойной наплавки, а именно управлением температурой ранее наплавленных слоев изделия посредством формирования среды заданной температуры внутри герметичной камеры 3D-принтера?

Указанные замечания не снижают общей положительной оценки работы.

## **9. Заключение**

Диссертационная работа Осколкова А.А. на тему «Управление температурой при экструзии полимерного материала в процессе трехмерной печати» является законченной научно-квалификационной работой и представляет собой изложение результатов собственных исследований автора. Работа написана технически грамотно, материал изложен лаконично, в рассуждениях прослеживается логика. Работа выполнена на актуальную тему, обладает теоретической и практической значимостью, характеризуется обоснованностью положений и выводов, отвечает всем требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям, установленным Положением ВАК о присуждении ученых степеней (п. 9-14), утвержденным Постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 г. №842, а сам Осколков А.А. заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук

по специальности 05.13.06 – Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (в промышленности).

Диссертационная работа, автореферат и отзыв были обсуждены на заседании кафедры «Цифровые лазерные технологии» факультета цифровых промышленных технологий федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный морской технический университет», Протокол №4 от «23» ноября 2021 г.

Заведующий кафедрой «Цифровые лазерные технологии»

ФЦПТ СПбГМТУ

д-р. техн. наук

 Г.А. Туричин

Секретарь заседания

Заместитель директора по научной  
и проектной деятельности ИЛИСТ СПбГМТУ,  
доцент кафедры «Цифровые лазерные технологии»  
канд. техн. наук,

Адрес: 190121, г. Санкт-Петербург,

ул. Лоцманская, дом 3

Телефон: +7 (911) 288-88-07

E-mail: [office@smtu.ru](mailto:office@smtu.ru), [ilwt@ilwt.smtu.ru](mailto:ilwt@ilwt.smtu.ru)

 Е.В. Земляков

«23» ноября 2021 г.

Подпись заверяю:

федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный морской технический университет» (СПбГМТУ)		
Подпись ЕФИ	<u>Землякова Е.В.</u>	заверяю.
Начальник	<u>У.П.</u>	<u>А.В. Богомолов</u>
	<u>23</u>	<u>11</u> 20 <u>21</u>