

ОТЗЫВ

официального оппонента, доктора технических наук, профессора Мурыгина Александра Владимировича 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)

Актуальность темы

Представленная на соискание ученой степени кандидата технических наук диссертационная работа Осколкова Александра Андреевича посвящена развитию методов формирования полимерных изделий при трехмерной печати по экструзионной технологии послойного наплавления (FDM/FFF) с целью повышения физико-механических свойств наплавленных изделий.

В настоящее время технологии аддитивного производства находят свое применение в архитектуре, строительстве, микроэлектронике, медицине, автомобильной и аэрокосмической промышленности, производстве одежды и пищевых продуктов. К нашему времени ряд технологий аддитивного производства достиг той стадии развития, когда стало возможным их применение в промышленном производстве функциональных изделий. В сравнении с традиционными методами производства аддитивные технологии обладают рядом преимуществ. А именно, значительное сокращение затрат на расходные материалы (до 90%), сокращение цикла производства за счет быстрого прототипирования или упрощения технологических процессов. Возможность изготовления бесшовных конструкций сложной геометрической формы. В совокупности со стремительным развитием сферы генеративного дизайна аддитивное производство позволяет обеспечить значительное снижение веса конструкций из дорогостоящих материалов или, например, средств передвижения. С учетом вышесказанного **актуальность** работы А.А. Осколкова сомнений не вызывает.

Внутреннее содержание и единство работы

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, библиографического списка и приложений. Общий объем работы составляет 215 страниц, включая 13 таблиц, 65 рисунков. Библиографический список использованной литературы составляет 328 наименований.

Во введении дана общая характеристика работы, обоснована ее актуальность, определены научная новизна и основные положения, выносимые на защиту. Формулируются достоверность полученных результатов, апробация, реализация и внедрение результатов исследования.

В 1 главе были подробно описаны проблемы управления и контроля качества печати, характерные для экструзионных систем послойного наплавления (FDM/FFF), использующих стандартный метод косвенного резистивного нагрева сопла и контактные электрические методы локального измерения температуры. В результате проведенного анализа было установлено, что традиционные экструдеры для послойного наплавления (FDM/FFF) и связанные с ними технологические методы обеспечения качества синтеза изделий не обеспечивают необходимую точность и скорость измерения и регулирования температуры сопла, а также его равномерный прогрев, не позволяют регулировать температуру сопла и, следовательно, экструдированного материала в зависимости от скорости экструзии, а также от температурных, геометрических и массовых характеристик ранее наплавленных слоев изделия, что приводит к значительным перегревам и недогревам экструдированного материала в процессе синтеза, а следовательно, к непостоянному качеству сплавления валиков материала. Установлено, что для применяемых полимерных материалов отклонение температуры экструзии от оптимальной на 10°C приводит к падению итоговых физико-механических свойств изделия на $\sim 5\text{-}10\%$ и более по мере увеличения отклонения. Был определен ряд проблем, обуславливающих описанные выше недостатки.

Во 2 главе соискателем были описаны и обоснованы конструкции индуктора и сопла, выступающие в качестве объекта управления. Показано, что применение бесконтактного метода индукционного нагрева позволило уменьшить массу горячей части экструдера с 20 г до 1 г, что обеспечило возможность быстрого нагрева и охлаждения сопла в процессе наплавки. Была разработана математическая модель, связывающая электромагнитные и тепловые процессы индукционного нагрева ферромагнитного сопла малой массы для послойного наплавления при экструзии полимерного материала, позволившая определить параметры индуктора и сопла как объекта управления. Приведены результаты численного моделирования процесса нагрева сопла в разомкнутой системе управления при заданных уровнях мощности источника питания в широком диапазоне до стабилизации температуры. Отклонение расчетных данных от экспериментальных не превышает 5%. Получены результаты численного моделирования процесса охлаждения сопла после отключения источника питания при различных скоростях экструзии материала. Установлено, что скорость

охлаждения сопла малой массы в ~ 6 раз выше по сравнению с горячей частью традиционного экструдера и увеличивается по мере роста скорости экструзии.

Глава 3 посвящена разработке модифицированного вихретокового резонансного метода измерения температуры сопла для послойного наплавления. Для реализации данного метода был разработан генератор колебаний высокой частоты на основе мостовой транзисторной схемы (МОП-транзисторы), управление которым возможно методом фазовой регулировки мощности (PSM) за счет сдвига фазы φ . Установлена нелинейная зависимость потребляемой индуктором мощности от φ . Соискателем разработан последовательно-параллельный колебательный контур топологии LCL, в который параллельно включается индуктор с соплом. Построена имитационная модель контура в пакете Multisim для анализа ФЧХ нагрузки. Установлена нелинейная зависимость регистрируемых значений измерительного сигнала от температуры сопла и от потребляемой индуктором мощности. Построена и верифицирована регрессионная модель, описывающая зависимость фазовых и амплитудных характеристик тока цепи индуктора от температуры сопла и потребляемой индуктором мощности, обеспечивающая высокую точность преобразования регистрируемых значений в температуру.

Глава 4 посвящена разработке метода управления температурой сопла малой массы с применением модифицированного вихретокового резонансного метода измерения температуры. Соискателем предложена методика идентификации параметров сопла и индуктора, как объекта управления с применением результатов математического моделирования в программных средах Multisim и ComsolMultiphysics. Данная методика позволила пренебречь фазовыми превращениями материала сопла (точка Кюри, плавление и т.д.) и определить установившиеся температуры сопла в разомкнутом контуре управления при заданных уровнях мощности, что позволило вычислить коэффициенты передачи объекта управления для всего диапазона потребляемой индуктором мощности.

В приложении Simulink пакета Matlab были разработаны имитационные модели линейной САУ температуры сопла с применением разработанного метода измерения температуры. Эксперимент показал, что применение классических ПИД-регуляторов, оптимизированных для конкретной температуры уставки, приводит к значительным отклонениям параметров переходных процессов от расчетных при работе в доступном диапазоне температур: максимальное время переходного процесса 9.6 с, максимальное перерегулирование 8% при расчетных параметрах 3 с и 1% соответственно. Для оценки эффективности разработанного метода управления температурой и его влияния на итоговое качество наплавленных изделий устройство, реализующее данный метод, было интегрировано с действующей установкой для трехмерной печати. Результаты

испытаний демонстрируют увеличение прочности на растяжение в среднем на 15-20% по сравнению с известными результатами применения других методов оптимизации процесса послойного наплавления (FDM/FFF).

В Заключение изложены основные результаты и выводы работы.

В приложениях приведены патенты, принципиальные электрические схемы генератора ВЧ, результаты измерения полезного сигнала и температуры для различных уровней мощности, протоколы испытаний образцов, акт внедрения на предприятии.

Степень обоснованности и достоверности научных положений, выводов и рекомендаций.

Основные научные выводы и положения подтверждаются теоретическим анализом, результатами экспериментальных исследований и результатами моделирования на ЭВМ. Научные положения аргументированы. Выводы подтверждены проведенными экспериментальными исследованиями, их воспроизводимостью и результатами математической обработки с использованием сертифицированных программ, а также обсуждением результатов диссертации на международных и всероссийских конференциях, научных семинарах и выставках.

Научная новизна полученных результатов.

1. Разработана математическая модель, связывающая электромагнитные и тепловые процессы индукционного нагрева сопла малой массы для послойного наплавления при экструзии полимерного материала, которая позволяет определить параметры индуктора и сопла, как объекта управления для повышения равномерности нагрева и обеспечивает высокие динамические характеристики процессов нагрева и охлаждения сопла.
2. Предложен модифицированный вихретоковый резонансный метод измерения температуры сопла для послойного наплавления, отличающийся совместным анализом фазовых и амплитудных характеристик тока цепи индуктора, позволяющий с помощью регрессионной модели производить измерение с высокой скоростью и точностью, необходимой для ведения процесса с требуемым качеством.
3. Разработан метод управления температурой сопла в процессе послойного наплавления, основанный на применении модифицированного вихретокового резонансного метода измерения температуры сопла, отличающийся учетом нелинейного характера зависимости температуры сопла от величины управляющего воздействия, позволяющий повысить физико-механические свойства синтезированных по технологии послойного наплавления изделий.

Значение выводов и рекомендаций для науки и практики

Ценность полученных соискателем результатов состоит в получении метода управления температурой сопла в процессе трёхмерной печати и устройства, которое позволяет осуществлять высокоскоростной нагрев и охлаждение сопла с обеспечением требуемых точностных и скоростных характеристик контроля и управления температурой. Результаты диссертационного исследования реализованы в рамках проекта ООО «Ф2 Инновации» (г. Пермь) в процессе разработки технологии изготовления деталей ответственного назначения. Разработанная математическая модель, связывающая тепловые и электромагнитные процессы при индукционном нагреве сопла для трехмерной печати при экструзии полимерного материала, может применяться для сопел и индукторов различных форм и размеров, что позволяет адаптировать и масштабировать предлагаемую систему послойного наплавления под решение конкретных задач производства.

Соответствие содержания диссертации содержанию и качеству опубликованных работ

По результатам диссертационного исследования опубликованы 11 печатных работ, в том числе 4 публикации в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК РФ, 3 публикации в изданиях, из перечня индексируемых в международных наукометрических базах Web of Science и Scopus, получено 4 патента на изобретения РФ. Содержание опубликованного материала соответствует направлению научных исследований, изложенному в тексте диссертационной работы.

Соответствие темы диссертации заявленной научной специальности

Тема диссертационной работы соответствует паспорту специальности 05.13.06 – Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (промышленность)

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

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, АСУП, АСПП и др.

Замечания по работе

1. Цель работы формулируется автором некорректно. Автор пишет «целью исследования является – повышение физико-механических свойств синтезированных по технологии послойного наплавления изделий посредством разработки метода управления температурой нагреваемого токамаи высокой частоты сопла малой массы при экструзии полимерного материала». Полагаю, что повышение физико-механических свойств изделий происходит не в результате разработки чего-либо, а в результате управления процессом технологии послойного наплавления.
2. Положения научной новизны требуют уточнения. В п.2, п.3, п.4 положений научной новизны автор использует относительные понятия «измерение температуры с высокой скоростью», «... температура сопла с высокой точностью». Возникает вопрос, а что автор имеет при этом ввиду, что такое высокая скорость, высокая точность. Кроме того, отсутствует связь между положениями научной новизны и целью работы «повышение физико-механических свойств синтезированных по технологии послойного наплавления изделий».
3. В автореферате отсутствует раздел **Теоретическая значимость работы**. Следовало бы его раскрыть.

В целом приведенные замечания не снижают ценность полученных результатов и общего положительного впечатления о выполненной диссертационной работе.

Заключение по работе:

Диссертационная работа Осколкова Александра Андреевича «Управление температурой при экструзии полимерного материала в процессе трехмерной печати» является завершенной научно-квалификационной работой, выполненной на актуальную тему, в которой изложены новые научно обоснованные технические решения для послойного наплавления при экструзии полимерного материала, имеющие существенное значение для развития аддитивных технологий, внедрение которых вносит значительный вклад в развитие страны.

Работа обладает актуальностью, результаты работы обладают научной новизной и практической значимостью, результаты и выводы обоснованы и достоверны. Содержание автореферата соответствует основным положениям диссертационной работы. Результаты диссертации соответствуют паспорту специальности 05.13.06. Диссертационная работа отвечает требованиям п. 9

«Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. №842, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а сам автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.06 – Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (в промышленности)

Место работы:

660037, Россия, Красноярский край, г. Красноярск, проспект им. газеты Красноярский рабочий, д. 31

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева»

Телефон: +7(391) 291-92-40

E-mail: ius_murygin@sibsau.ru

<https://www.sibsau.ru/>

научная специальность 05.13.06 Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами

Официальный оппонент,
доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой
«Информационно-управляющие системы»

А.В. Мурыгин

«10» ноября 2021 г.

Подпись Мурыгина Александра Владимировича заверяю:

Подпись А.В. Мурыгина заверяю
Ученый секретарь ученого совета
СибГУ им. М.Ф. Решетнева



А. Е. Гончаров