

## ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу Денискиной Галины Юрьевны на тему «Методы и алгоритмы оптимизации процесса 3D-печати функциональных объектов из композиционных материалов», представленную к защите на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 2.3.1. Системный анализ, управление и обработка информации, статистика

Для изготовления технических изделий, применяемых в авиационной и ракетно-космической отраслях, к которым предъявляются требования, связанные с их физико-механическими характеристиками (функциональных объектов), в настоящее время широко применяются полимерные композиционные материалы с армирующими элементами в виде углеродных волокон. Механические свойства таких изделий существенно зависят от направления волокон. Одним из перспективных направлений изготовления функциональных объектов из полимерных композитов для создания конструкций сложной формы последовательной укладкой является технология 3D-печати, позволяющая получать конструкции с пространственным армированием по заданным траекториям. В этой связи **диссертация**, посвященная разработке методов и алгоритмов оптимизации процесса 3D-печати функциональных объектов из полимерных композиционных материалов, является весьма **актуальной**.

В работе поставлена задача оптимизации процесса 3D-печати таких объектов с целевой функцией в виде критерия разрушения материала. Разработано математическое обеспечение проблемно-ориентированной системы управления моделированием и нахождением оптимальных траекторий укладки волокон при 3D-печати. Отличительной особенностью предложенного подхода является моделирование траекторий укладки волокон с помощью аналитических функций и использование биортогональных вейвлетов, построенных на основе схем подъема и подразделений, в качестве инструмента решения уравнений механики композиционных материалов.

Это подтверждает **научную новизну** выполненного **исследования**. Разработанные алгоритмы и программное обеспечение, реализующие предложенные методы оптимизации процесса 3D-печати функциональных объектов, могут быть использованы в авиационной, ракетно-космической и

Уддел докуменци  
обеспечения МАИ

11. 09 2023.



других отраслях промышленности в рамках аддитивного производства. С этой точки зрения полученные в диссертации **результаты имеют практическую значимость.**

**Основными обоснованными научными положениями, выводами и результатами диссертации, обладающими научной новизной и достоверностью, являются следующие:**

1. Постановка задачи оптимизации процесса 3D-печати функционального объекта из полимерного композиционного материала. Метод и вычислительный алгоритм нахождения значений критерия разрушения композиционного материала по заданным углам, основанный на конформных преобразованиях и вейвлет-преобразовании, как целевой функции задачи оптимизации.

2. Математическая модель управления процессом укладки волокон и метод нахождения оптимальных траекторий укладки при 3D-печати объектов.

3. Обобщение понятия локально-аппроксимационного сплайна, оценки погрешности аппроксимации таким сплайном гладкой функции. Формулы для нахождения значений локально аппроксимационных сплайнов и их производных в узлах сетки, основанные на свертке.

4. Алгоритм нахождения значений масштабирующих функций и их частных производных, а также вейвлетов, построенных на основе схем подразделений и подъема, основанный на преобразовании свертки.

5. Метод построения биортогональных вейвлет-систем, полученных по схеме подъема, на триангулируемых пространствах с конечным множеством симплексов. Алгоритм нахождения значений масштабирующих функций, а также их производных, и вейвлетов на триангулируемом пространстве, основанный на преобразовании свертки.

6. Метод применения биортогональных вейвлет-систем к приближенному решению дифференциальных уравнений в частных производных, в частности применение таких алгоритмов к приближенному решению уравнений теории упругости.

7. Алгоритмы и программный комплекс управления и оптимизации процесса 3D-печати функциональных объектов.

**Общая характеристика работы.**



Диссертация объемом 138 страниц состоит из введения, четырех глав, заключения, списка сокращений и условных обозначений, списка литературы и двух приложений.

Во введении отмечена актуальность темы диссертации, сформулирована цель, поставлены задачи для решения, отмечены научная новизна, теоретическая и практическая значимость, приведены методология и методы исследования, степень достоверности и апробация результатов, представлены положения, выносимые на защиту.

В первой главе выполнена постановка оптимизационной задачи выбора схемы 3D-печати функциональных объектов из полимерных композитов. Предложен метод нахождения значений критерия разрушения композита как целевой функции задачи оптимизации. Решена задача поиска оптимальных траекторий укладки волокон при 3D-печати.

Вторая глава посвящена дискретному вейвлет-преобразованию функций, определенных на  $n$ -мерном промежутке, даны понятия неортогонального кратномасштабного анализа и схемы подъема. Построены вычислительные алгоритмы для локально-аппроксимационных сплайнов, основанные на дискретном вейвлет-преобразовании и свертке. На их основе разработаны алгоритмы для нахождения значений вейвлетов и их частных производных на основе схемы подъема. Применение этих средств позволило осуществить параллельное построение функций из вейвлет-системы на области печати при использовании разных ядер свертки.

В третьей главе, на основании полученных результатов, предложен метод приближенного решения задач теории упругости с помощью вейвлетов.

Четвертая глава посвящена описанию программного комплекса для реализации разработанных методов и алгоритмов моделирования, управления и оптимизации процесса 3D-печати функциональных объектов из волокнистых композиционных материалов. Приведены общая организация программного комплекса и назначение его функциональных блоков.

В заключении диссертации сформулированы основные полученные результаты, а также перспективы и направления дальнейших исследований.

В приложениях приведены копии двух свидетельств о государственной регистрации программ для ЭВМ, полученных автором диссертации.



Все ключевые результаты диссертационной работы четко сформулированы и математически полностью обоснованы. Вместе с тем можно сделать следующие **замечания**:

1. Автору следовало бы представить больше примеров, показывающих преимущество разработанного в диссертации подхода к решению уравнений механики композиционных материалов, по сравнению с методом конечных элементов.

2. В третьей главе диссертации приводится теоретический пример 3D-печати прямоугольной пластины из полимерного композита с отверстием. С практической точки зрения следовало бы рассмотреть реальный технический объект с такой конструкцией.

3. В четвертой главе диссертации представлены общая организация программного комплекса для реализации разработанных методов и алгоритмов моделирования, управления и оптимизации процесса 3D-печати функциональных объектов, его основные характеристики и назначение функциональных блоков, однако не указаны требования к стандартному программно-аппаратному обеспечению решения такого класса задач.

Указанные **замечания не являются принципиальными**, носят рекомендательный характер и не влияют на общую положительную оценку работы.

Таким образом, можно сделать следующее **заключение**.

Диссертация «Методы и алгоритмы оптимизации процесса 3D-печати функциональных объектов из композиционных материалов» выполнена на актуальную тему на высоком теоретическом уровне, является завершенной научно-квалификационной работой, обладает научной новизной и практической значимостью.

Основные результаты диссертации опубликованы в изданиях, рекомендованных ВАК РФ, а также входящих в международные системы цитирования, апробированы на научных конференциях и семинарах. Автором получены два свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ.

Автореферат отражает содержание диссертационной работы, которая соответствует паспорту специальности 2.3.1. Системный анализ, управление и обработка информации, статистика (физико-математические науки).



По актуальности, научному уровню и содержанию диссертационная работа «Методы и алгоритмы оптимизации процесса 3D-печати функциональных объектов из композиционных материалов» удовлетворяет требованиям положения «О порядке присуждения ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 г. № 842, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, а ее автор, Денискина Галина Юрьевна, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 2.3.1. Системный анализ, управление и обработка информации, статистика.

Официальный оппонент,  
 профессор кафедры «Ракетно-космические  
 композитные конструкции»  
 федерального государственного бюджетного  
 образовательного учреждения высшего образования  
 «Московский государственный технический  
 университет имени Н. Э. Баумана (национальный  
 исследовательский университет)»,  
 доктор технических наук (по специальности  
 05.17.06 — Технология и переработка полимеров и  
 композитов), доцент

*[Handwritten signature]*  
 05.09.23.

Г. В. Малышева

105005, г. Москва,  
 ул. 2-я Бауманская, д. 5, с. 1  
 Тел.: +7 (499) 263-63-91, +7 (499) 267-48-44  
 E-mail: malysheva@bmstu.ru; malyin@mail.ru

Подпись Малышевой Галины Владленовны удостоверяю



ЗАВЕДУЮЩИЙ  
 КАДРОВ  
 -263-60-48

*С отзывом ознакомлена*  
 11.09.2023

*[Handwritten signature]* Денискина Г.Ю.