

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

на диссертационную работу Фан Тунг Шон

«Исследование волновых процессов в термоупругом слое с применением технологий глубокого машинного обучения»,

представленную к защите на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.8 – «Механика деформируемого твёрдого тела»

Актуальность темы исследования.

Диссертационная работа посвящена исследованию волновых процессов в термоупругом слое и решению обратных задач идентификации параметров материала с использованием методов глубокого машинного обучения.

Для современной авиационной промышленности задачи надёжного расчёта и диагностического контроля несущих элементов конструкций имеют первостепенное значение. При проектировании и доводке планера, агрегатов силовой установки и шасси требуется точное знание реальных механических свойств материалов, их изменчивости от партии к партии и чувствительности к технологическим факторам (включая аддитивные технологии, термообработку, сварку и др.).

При этом возможности натурных экспериментов ограничены по времени и стоимости, а традиционные численные методы решения обратных задач (без использования машинного обучения) часто оказываются ресурсоёмкими и неустойчивыми к шумам измерений. В этой связи разработка и развитие подходов, основанных на глубоком машинном обучении и физически информированных нейронных сетях для анализа волновых процессов и восстановления параметров материалов по ограниченному набору экспериментальных данных, представляются актуальными и востребованными как с научной, так и с прикладной точек зрения.

Таким образом, тематика диссертации Шона Ф.Т. соответствует современному уровню развития механики деформируемого твёрдого тела и задачам цифровизации конструкторско-технологической подготовки производства в авиационной отрасли.

Основные цели, задачи и научная новизна работы.

Целью диссертационной работы является разработка математических моделей и вычислительных методов, основанных на технологиях глубокого машинного обучения, для исследования волновых процессов в упругом слое или стержне и решения обратных задач идентификации параметров материала по данным измерений.

В рамках поставленной цели в работе решаются следующие основные задачи:

- формулировка и анализ прямых задач распространения термоупругих волн в упругом слое, описание принятых уравнений и граничных условий, в том числе в безразмерной постановке;
- построение и исследование физически информированных нейронных сетей (Physics-Informed Neural Networks, PINN) для решения прямых волновых задач;
- разработка подходов к построению синтетических наборов данных на основе классических численных методов (метод конечных разностей, представления через функции Грина и др.) для последующего обучения нейросетевых моделей в случае решения обратных задач;
- постановка и решение обратных задач по восстановлению параметров материала по неполному набору наблюдений (датчики смещений/скоростей/напряжений в ограниченном числе точек);
- анализ устойчивости предложенных алгоритмов к шумам измерений и обсуждение вопросов идентифицируемости.

Научная новизна работы заключается в следующем:

- предложена и реализована совокупность математических постановок прямых и обратных задач для волновых процессов в термоупругом слое, ориентированных на последующее применение методов глубокого обучения;
- разработаны и исследованы варианты PINN-подхода и нейросетевых архитектур, учитывающих физические законы (уравнения движения и теплопроводности, граничные и начальные условия) непосредственно в функционале потерь при обучении;

- предложены и реализованы схемы решения обратных задач идентификации параметров материала по малому числу датчиков в условиях наличия шумов;

- проведено сравнительное исследование результатов, полученных с помощью нейросетевых моделей, с классическими аналитическим и численными решениями, что позволяет рассматривать разработанные подходы как основу для построения «цифровых двойников» элементов конструкций.

Степень обоснованности и достоверности полученных результатов.

Достоверность результатов диссертации обеспечивается:

- корректной математической постановкой рассматриваемых задач на основе общепринятых уравнений механики деформируемого твёрдого тела;

- использованием традиционных численных методов (в том числе схем конечных разностей и представления решений через функции Грина) для генерации опорных решений и тестирования нейросетевых моделей;

- сопоставлением решений, полученных с применением PINN и других нейросетевых архитектур, с эталонными аналитическими и численными решениями, а также анализом влияния уровня шума на точность восстановления параметров;

- анализом сходимости процесса обучения нейросетей и устойчивости результатов к изменению начальной инициализации и гиперпараметров.

Полученные количественные результаты выглядят убедительными и согласуются с физическими представлениями о характере распространения волн и влиянии параметров материала на отклик системы.

Теоретическая и практическая значимость.

Теоретическая значимость диссертационной работы состоит в развитии методов решения прямых и обратных задач механики деформируемого твёрдого тела с использованием технологий глубокого обучения, прежде всего физически информированных нейронных сетей. Предложенные постановки и алгоритмы могут быть распространены на другие классы задач (задачи с анизотропией, многослойные

среды и т.п.), что открывает перспективы для дальнейших исследований в данной области.

Практическая значимость работы заключается в возможности применения разработанных подходов:

- при обработке результатов динамических и ударных испытаний элементов авиационных конструкций с целью уточнения эффективных механических характеристик материалов;

- для построения ускоренных методов оценки состояния и ресурса элементов планера и силовой установки на основе ограниченного числа встраиваемых или навесных датчиков;

- при создании систем мониторинга технического состояния и цифровых двойников, что соответствует современным тенденциям развития гражданской авиации и задачам повышения надёжности и безопасности эксплуатации.

Краткая характеристика содержания диссертации.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы из 143 наименований. Объём диссертации 140 страниц, содержащих 61 рисунок и 2 таблицы.

Во введении обоснована актуальность темы исследования, сформулированы цели и задачи работы, раскрыты её научная новизна и практическая значимость, представлены сведения об апробации результатов и публикациях автора.

В первой главе приведён обзор современного состояния исследований в области волновых процессов в упругих средах, обратных задач идентификации параметров материала и применения методов машинного обучения в механике деформируемого твёрдого тела. Сформулированы математические модели, используемые в дальнейшем: уравнения движения и теплопроводности в связанной постановке, граничные и начальные условия, обсуждены особенности постановки задач для упругого слоя и выбор безразмерных параметров.

В последующих главах подробно описаны архитектуры используемых нейросетевых моделей, структура функций потерь с включением невязок по дифференциальным уравнениям и граничным условиям, а также алгоритмы обучения.

Отдельные разделы диссертации посвящены постановке и решению обратных задач идентификации параметров материала, а также восстановлению характеристик внешнего воздействия по отклику системы в ограниченном числе точек. Проводится анализ влияния уровня шума, количества датчиков и априорной информации на точность восстановления параметров, формулируются практические рекомендации по выбору конфигураций измерений.

В заключении подведены итоги проведённого исследования, сформулированы основные научные и прикладные результаты, намечены направления дальнейшего развития работы.

Апробация и публикации.

Результаты диссертационной работы представлены на научных конференциях и опубликованы в шести рецензируемых научных журналах, из которых две статьи опубликованы в журналах из перечня, рекомендованного ВАК РФ и четыре в журналах из перечня Scopus. Это свидетельствует о хорошей степени апробации и признании научным сообществом полученных результатов.

Замечания по диссертационной работе.

При общей положительной оценке диссертации хотелось бы отметить ряд замечаний, носящих в основном дискуссионный и рекомендательный характер.

1. В ряде разделов описание архитектуры нейронных сетей и выбора гиперпараметров (числа слоёв, типа активаций, стратегий инициализации и т.п.) дано достаточно компактно. Для практического применения результатов, в том числе инженерными коллективами, было бы полезно более подробно и систематизированно представить рекомендации по выбору этих параметров.

2. При обсуждении идентификации параметров материала основное внимание уделено упругим характеристикам. Представляется полезным хотя бы в постановочной части отдельно обсудить возможности расширения подхода на учёт необратимых эффектов (демпфирование, вязкоупругость, повреждаемость), что важно для реальных авиационных материалов.

3. В работе аккуратно введены множества внутренних/начальных/граничных точек коллокации и используется отступ для исключения углов и стабилизации автодифференцирования. В примерах задаются конкретные объёмы выборок (N_r , N_0 , N_b) и используется сгущение к границам/к началу времени. Однако остаётся вопрос: почему именно такие числа, насколько они оптимальны и как меняется результат при, скажем, двукратном уменьшении/увеличении (N_r). Для инженерных расчётов ценность метода сильно зависит от «цена/точность», этого сравнения в явном виде не хватает.

4. В работе сравнение проводится с аналитикой и МКР, однако для авиастроения МКЭ является более «классическим» методом решения. В тексте также оговаривается, что при сложной геометрии МКЭ подходит лучше. Хотелось бы увидеть хотя бы на уровне обсуждения: какую нишу автор отводит PINN в реальном конструкторском контуре.

5. Перечень выносимых на защиту положений сформулирован корректно, однако некоторые формулировки носят достаточно общий характер. Можно было бы более чётко выделить, какие элементы являются принципиально новыми по сравнению с известными работами в области PINN и решениями обратных задач механики.

Отмеченные замечания ни в коей мере не снижают общей высокой оценки диссертационной работы и носят рекомендательный характер.

Заключение.

Диссертационная работа Ф.Т. Шон «Исследование волновых процессов в термоупругом слое с применением технологий глубокого машинного обучения» представляет собой завершённое научно-квалификационное исследование, в котором

решён комплекс актуальных задач механики деформируемого твёрдого тела с использованием современных методов глубокого машинного обучения.

Содержание диссертации соответствует паспорту специальности 1.1.8 – «Механика деформируемого твёрдого тела», а совокупность полученных научных результатов обладает новизной, теоретической и практической значимостью для задач анализа напряжённо-деформированного состояния и диагностики элементов авиационных конструкций. Автореферат достаточно полно и верно отражает основное содержание диссертации.

Считаю, что диссертационная работа Фан Тунг Шон соответствует требованиям, установленным Положением о присуждении учёных степеней (постановление Правительства Российской Федерации № 842 от 24.09.2013 г.), предъявляемым к кандидатским диссертациям, а её автор заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.8 – «Механика деформируемого твёрдого тела».

Официальный оппонент:

К.ф.-м.н., инженер-конструктор отдела статической прочности научно-исследовательского отделения прочности инженерного центра АО «Уральский завод гражданской авиации»,

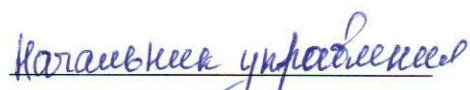
Адрес: 123308, г. Москва, проспект Маршала Жукова, д. 1, стр. 1,

телефон: +7 (495) 122-25-33, e-mail: skopintsevpd@uwca.ru

23 декабря 2025 г.

 Скопинцев Павел Дмитриевич

Подпись Скопинцева Павла Дмитриевича удостоверяю:


(должность)




(Фамилия И.О.)

С отзывом согласен
25.12.2025
