

УТВЕРЖДАЮ

И. о. проректора по науке и
стратегическим проектам, кандидат
физико-математических наук
А.С. Гоголев

« 06 » 10 2023 г.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ФГАОУ ВО НИ ТПУ).

Диссертационная работа Шагдырова Батора Ильича «Разработка алгоритмов и методик автоматизированной тепловой дефектоскопии и дефектометрии композиционных материалов» выполнена в Центре промышленной томографии Инженерной школы неразрушающего контроля и безопасности Томского политехнического университета.

В период подготовки диссертации соискатель Шагдыров Б.И. обучался в очной аспирантуре по направлению подготовки 12.06.01 «Фотоника, приборостроение, оптические и биотехнические системы и технологии» и работал в должности инженера Центра промышленной томографии Инженерной школы неразрушающего контроля и безопасности ФГАОУ ВО НИ ТПУ.

Диплом об окончании аспирантуры получен в 2022 году. Экзамен по специальности 2.2.8 – «Приборы и методы контроля природной среды, веществ, материалов и изделий» сдан в период обучения.

Тема диссертационной работы утверждена решением ученого совета Инженерной школы неразрушающего контроля и безопасности Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» от «28» сентября 2023 г., номер протокола 07/23.

Научный руководитель – Чулков Арсений Олегович, кандидат технических наук, старший научный сотрудник Центра промышленной томографии Инженерной школы неразрушающего контроля и безопасности в ФГАОУ ВО НИ ТПУ назначен приказом по организации №7803/с от «29» августа 2018 г.

По итогам обсуждения на научном семинаре Научно-производственной лаборатории «Тепловой контроль» Центра промышленной томографии Инженерной школы неразрушающего контроля и безопасности ФГАОУ ВО НИ ТПУ принято следующее заключение:

в диссертации обоснована актуальность темы исследования, сформулирована цель работы, приведены задачи исследования, перечислены положения, выносимые на защиту, обоснованы научная новизна и практическая значимость работы, а также отмечен личный вклад автора. Достоверность научных результатов подтверждается соответствием полученных экспериментальных данных результатам численного моделирования и

отсутствием противоречия общепринятым научным данным, а также данным полученным другими авторами. Достоверность экспериментальных данных обеспечена применением современной высокочувствительной тепловизионной и измерительной аппаратуры.

Актуальность диссертационной работы

Полимерные композиционные материалы (ПКМ), а именно, угле- и стеклопластики, широко используются в авиа- и ракетостроении, нефтегазовой промышленности, автомобиле- и судостроении. Применение таких материалов, например, при производстве космической и авиационной техники позволяет сэкономить от 5 до 30 % массы летательных аппаратов. Надежность и работоспособность ответственных элементов конструкций высокотехнологичной техники обеспечивается в том числе высоким качеством композиционных материалов, которое напрямую связано со своевременным и достоверным неразрушающим контролем (НК), проводимым как на стадии производства, так и в процессе эксплуатации. Активный тепловой контроль (ТК) является эффективным инструментом неразрушающих испытаний ПКМ и может быть использован в качестве как основного, так и дополнительного метода НК, в том числе, при комбинировании с традиционными ультразвуковым и радиационным видами НК. Ввиду этого растет интерес к ТК со стороны отечественных высокотехнологичных отраслей промышленности. Повышение достоверности, производительности и улучшение повторяемости результатов ТК требует разработки новых подходов, в том числе, связанных с автоматизацией процедуры контроля и обработки данных. Разработка методик и программных алгоритмов автоматизированной обработки результатов контроля, в том числе, с использованием алгоритмов на базе искусственных нейронных сетей, также является актуальной задачей НК и позволяет существенно расширить практическое применения активного ТК, повысить качество отечественной техники.

Личное участие аспиранта в полученных результатах.

Автор принимал участие в постановке целей и задач работы, в подготовке и проведении большого количества экспериментальных исследований, в анализе и интерпретации полученных результатов, а также в формулировке выводов и заключений на основе полученных результатов. Автором лично разработаны и изготовлены несколько наборов стандартных образцов полимерных композиционных материалов с дефектами различных типов, в том числе изделий сложно геометрической формы, а также образцов с молниезащитной сеткой и окраской, близкой к используемой в авиации. Созданы трехмерные модели многослойных композиционных материалов, соответствующих реальным изделиям, с помощью которых в программе ThermoCalc-3D проводились расчеты оптимальных параметров обнаружения дефектов при разработке стандартных образцов. Разработаны методики обучения искусственных нейронных сетей, а также проведено тестирование программных алгоритмов автоматизированной обработки данных с целью дефектоскопии и дефектометрии.

Достоверность полученных теоретических и экспериментальных результатов подтверждается соответствием результатов численного моделирования результатам, полученным экспериментальным путем. Результаты дефектоскопии и дефектометрии подтверждаются параметрами стандартных образцов, разработанных в ходе выполнения работы. Результаты работы были опубликованы в международных научных изданиях и

прошли соответствующую экспертизу членами научного сообщества неразрушающего контроля.

Научная новизна.

- Алгоритм автоматизированного определения зон с минимальной и максимальной температурой в дефектных областях обеспечивает повышение температурных контрастов в области дефектов приблизительно в 2 раза и снижение разброса результатов дефектометрии на 15% по сравнению с ручной процедурой обработки результатов контроля.

- Пороговый анализ температурных сигналов в автоматизированном режиме позволяет строить бинарные карты дефектов, определять их координаты и поперечные размеры с учетом трехмерной диффузии тепла.

- Искусственная нейронная сеть, обученная на динамических температурных сигналах в отдельных точках инфракрасных термограмм стандартных образцов, обеспечивает в автоматизированном режиме обнаружение дефектов, определение глубины их залегания, а также оценку количества воды в ячейках сотовых панелей с ошибкой, не превышающей 15%.

- Создана технология и изготовлены наборы стандартных образцов ПКМ с имитаторами производственных и эксплуатационных дефектов для их использования в тепловом контроле. Установлено, что применение экструдированного пенополистирола в качестве инородного включения обеспечивает достоверную имитацию расслоений, заполненных воздухом. Расхождение параметров температурных сигналов при имитации расслоений, заполненных воздухом и экструдированным пенополистиролом, составило не более 10%.

Практическая значимость работы.

Разработанные методики и алгоритмы автоматизированной тепловой дефектоскопии и дефектометрии предназначены для практического применения в научно-исследовательской работе, учебном процессе, а также могут быть использованы в составе программного обеспечения тепловых дефектоскопов промышленного применения. Основная часть предложенных решений используется в научно-исследовательской работе Научно-производственной лаборатории «Тепловой контроль» Томского политехнического университета.

Полнота изложения материалов.

Соискателем опубликовано 24 научные работы, из которых 12 по теме диссертации, в том числе, 9 статей в изданиях, индексированных в базах данных SCOPUS и Web of Science, 4 из которых опубликованы в журналах квартиля Q2, 6 из опубликованных статей имеют версии на русском языке в журнале, входящем в перечень ВАК.

Список публикаций соискателя по теме диссертации:

- 1) Chulkov A.O, Vavilov V.P, **Shagdyrov B.I**, Kladov D.Y. Stasevskii V. I. Detecting and evaluating water ingress in aviation honeycomb panels by using automated thermal nondestructive testing // Russian Journal of Nondestructive Testing sent to journal (текст оригинала статьи: Чулков А.О, Вавилов В.П., **Шагдыров Б.И.**, Кладов Д.Ю., Стасевский

В.И. Обнаружение и оценка количества воды в авиационных сотовых панелях методом автоматизированного теплового контроля Дефектоскопия, на рецензии).

2) Chulkov A.O, Vavilov V.P, **Shagdyrov B.I**, Kladov D.Y. Stasevskii V. I. A New Method of Active Thermal Testing: Combination of Heating and Forced Cooling // Russian Journal of Nondestructive Testing, 2023, vol.59, No.5. pp. 592-600. DOI: 10.1134/S1061830923700390 (текст оригинала статьи: Чулков А.О, Вавилов В.П., **Шагдыров Б.И.**, Кладов Д.Ю., Стасевский В.И. Новый способ активного теплового контроля: комбинирование нагрева и принудительного охлаждения // Дефектоскопия № 5 2023).

3) Chulkov A.O, Vavilov V.P, **Shagdyrov B.I**, Kladov D.Y. Automated detection and characterization of defects in composite-metal structures by using active infrared thermography // Journal of Nondestructive Evaluation, 2023, 42:20, DOI: 10.1007/s10921-023-00929-x.

4) Chulkov A.O, Vavilov V.P, Nesteruk D.A, **Shagdyrov B.I**. Thermal flaw detection scanner for testing large-sized flat products made of composite materials // Russian Journal of Nondestructive Testing, 2021, 58(4), стр. 301–307 DOI: 10.1134/S1061830922040040 (текст оригинала статьи: Чулков А.О, Вавилов В.П, Нестерук Д.А, **Шагдыров Б.И.** Тепловой сканер-дефектоскоп для контроля крупногабаритных плоских изделий из композиционных материалов Дефектоскопия, 2022 г., 4 номер, Страницы: 56-62, УДК: 620.179.13, DOI: 10.31857/S0130308222040066).

5) Chulkov A.O., Nesteruk D.A., **Shagdyrov B.I.**, Vavilov V.P. Method and Equipment for Infrared and Ultrasonic Thermographic Testing of Large-Sized Complex-Shaped Composite Products // Russian Journal of Nondestructive Testing, 2021, 57(7), стр. 619–626 <https://doi.org/10.1134/S1061830921070044> (текст оригинала статьи: Чулков А.О., Нестерук Д.А., **Шагдыров Б.И.**, Вавилов В.П. Метод и аппаратура инфракрасного и ультразвукового термографического контроля крупногабаритных композиционных изделий сложной формы // Дефектоскопия, 2021 г., 7 номер, Страницы: 67-74, УДК: 620.179.13, DOI: 10.31857/S0130308221070083).

6) Chulkov A.O., Nesteruk D.A., Vavilov V.P., **Shagdyrov B.I.**, Omar M., Siddiqui A.O. Prasad Y.L.V.D. Automated procedure for detecting and characterizing defects in GFRP composite by using thermal nondestructive testing // Infrared Physics & Technology Volume 114, May 2021, 103675

7) **Shagdyrov B.I.**, Chulkov A.O., Vavilov V.P. Kaledin V.O. Omar M. Active Thermal Testing of Impact Damage in 3D-Printed Composite Materials // Russian Journal of Nondestructive Testing 56(12):1083-1090, DOI:10.1134/S1061830920120098 (текст оригинала статьи: **Шагдыров Б.И.**, Чулков А.О., Вавилов В.П., Каледин В.О., Омар М. Активный тепловой контроль ударных повреждений в композиционных материалах, изготовленных методом 3D печати // Дефектоскопия, 2020, № 12, стр. 73-81. DOI: 10.31857/S0130308220120088)

8) Chulkov A.O., Vavilov V.P., Nesteruk D.A., Bedarev A.M., Yarkimbaev S., **Shagdyrov B.I**. Synthesizing Data of Active Infrared Thermography under Optical and Ultrasonic Stimulation of Products Made of Complex-Shaped CFRP // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2020. 56 (7). P.595–601 <https://doi.org/10.1134/S1061830920070037> (текст оригинала статьи: Чулков А.О., Вавилов В.П., Нестерук Д.А., Бедарев А.М., Яркимбаев Ш., **Шагдыров Б.И** Синтез данных активной инфракрасной термографии при оптической и ультразвуковой стимуляции изделий из углепластика сложной формы // «Дефектоскопия» № 7. 2020. с.54 -60. DOI: 10.31857/S0130308220070064)

9) Derusova D.A., Vavilov V.P., Chulkov A.O., **Shagdyrov B.I.**, Saeed N., Omar M. Evaluating impact damage in kevlar/carbon composites by using laser vibrometry and active infrared thermography // Electronics Letters, 2020, 56(19), с. 1001-1003

10) Чулков А.О., Вавилов В.П., **Шагдыров Б.И.**, Бедарев А.М. Автоматизированный тепловой неразрушающий контроль материалов и изделий аэрокосмической отрасли с использованием оптической и ультразвуковой стимуляции // Цифровые технологии, моделирование и автоматизация процессов неразрушающего контроля в аэрокосмической отрасли. Проблемы и перспективы внедрения Материалы XIII всероссийской конференции по испытаниям и исследованиям свойств материалов "Тестмат". 2021

11) **Шагдыров Б.И.**, Чулков А.О. Исследование влияния ударных воздействий на теплофизические характеристики композиционных материалов методом активной инфракрасной термографии // Научное издание. XXII Всероссийская конференция по неразрушающему контролю и технической диагностике. – 358 с. УДК [681.518.54+620.19]

12) **Шагдыров Б.И.**, Чулков А.О. Проведение экспериментальных исследований по обнаружению скрытых дефектов в гибридных композитах с использованием различных источников тепловой стимуляции // Наука. Технологии. Инновации //Сборник научных Трудов в 9 ч. / под ред. Гадюкиной А.В. – Новосибирск: изд-во НГТУ, 2019.

Диссертация «Разработка алгоритмов и методик автоматизированной тепловой дефектоскопии и дефектометрии композиционных материалов» Шагдырова Батора Ильича рекомендуется к защите на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.2.8 – Методы и приборы контроля и диагностики материалов, изделий, веществ и природной среды.

Заключение принято на заседании расширенного семинара Центра промышленной томографии Инженерной школы неразрушающего контроля Томского политехнического университета. На заседании присутствовало 8 чел.

Результаты голосования: "за" - 8 чел., "против" - нет, "воздержались" - нет, протокол №6 от 06.10.2023г.

Председатель научного семинара,
Заведующий Научно-производственной
лабораторией «Тепловой контроль»
Инженерной школы неразрушающего
контроля и безопасности НИ ТПУ
профессор, д.т.н.



Вавилов В.П.

Секретарь научного семинара
Старший научный сотрудник Центра промышленной
томографии Инженерной школы
неразрушающего контроля
и безопасности НИ ТПУ,
к.т.н.



Дерусова Д.А.