

## ОТЗЫВ

научного руководителя, к.т.н., Ляховецкого Максима Александровича на диссертацию Королева Даниила Дмитриевича «Разработка технологии лазерной ударной обработки для повышения усталостной прочности компрессорных лопаток из титановых сплавов авиационных двигателей», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.5.15. – «Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов».

Королев Д. Д., 1996 г. рождения, в 2020 г. окончил федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» по специальности «Проектирование авиационных и ракетных двигателей» и сразу после окончания поступил в очную аспирантуру МАИ.

В период подготовки диссертации соискатель работал в «Московском авиационном институте (национальном исследовательском университете)» в должности ассистента (2020 – 2023 гг.). В настоящее время соискатель работает в должности старшего преподавателя, а также в должности инженера по внутривузовскому совместительству.

С 2020 по 2024 гг. Королев Д. Д. обучался в очной аспирантуре федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» по специальности 2.5.15. – «Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов». В июне 2024 г. соискатель успешно прошел государственную аттестацию и защитил на «отлично» свою научно-исследовательскую работу и в июле 2024 г. получил диплом об окончании аспирантуры с присвоением квалификации «Исследователь. Преподаватель-исследователь» по направлению подготовки 24.06.01 – «Авиационная и ракетно-космическая техника».

В период обучения Королев Д. Д. активно включился в научно-исследовательскую и учебно-методическую работу кафедры 205 «Технология производства двигателей летательных аппаратов» и начал работу над решением актуальной задачи – разработка технологии лазерной ударной обработки для повышения усталостной прочности компрессорных лопаток из титановых сплавов авиационных двигателей. В соответствии с поставленными в работе задачами, автором получены следующие научные результаты, обладающие научной новизной: установлен эффективный диапазон значений плотности мощности (интенсивности) лазерной ударной обработки титанового сплава ВТ6 при длительности импульса 60 нс равный 2-7 ГВт/см<sup>2</sup> в котором наблюдается линейный рост пластической деформации и значений микротвердости обрабатываемой поверхности; установлено, что при лазерной ударной обработке с поглощающим (абляционным) покрытием (ЛЮО) шероховатость (Ra) поверхности титанового

сплава ВТ6 не изменяется, волнистость ( $W_a$ ) повышается в 3,5 раза, а величина измененного приповерхностного слоя составляет не более 2,2 мкм при увеличении интенсивности с 2 до 7 ГВт/см<sup>2</sup>; установлено, что при лазерной ударной обработке без покрытия (ЛУОБП) шероховатость поверхности увеличивается до  $R_a = 4,961$  мкм, волнистость ( $W_a$ ) повышается в 15 раз, а величина измененного приповерхностного слоя составляет до 5 мкм при увеличении интенсивности с 2 до 7 ГВт/см<sup>2</sup>; установлено, что максимальная степень наклепа при ЛУО с покрытием для величины плотности мощности 6,5 ГВт/см<sup>2</sup> достигает 19%, а для ЛУО без покрытия, под термическим слоем, достигает 11%; установлено, что ЛУО с покрытием наводит в титановом сплаве ВТ6 устойчивые сжимающие остаточные напряжения (от 300 до 800 МПа в зависимости от режимов) на глубину порядка 1 мм. При ЛУО без покрытия значения ОН с глубины более 300 мкм сравнимы со значениями ОН после ЛУО с покрытием, однако, в диапазоне от 0 до 300 мкм ОН существенно меньше из-за плавления поверхности в результате воздействия лазерного излучения; установлено, что глубина проникновения ОН при обработке титанового сплава ВТ6 может варьироваться в широких пределах от 300 мкм до 1000 мкм при изменении плотности мощности лазерного излучения с 2 до 7 ГВт/см<sup>2</sup>; установлено, что ЛУО позволяет получить прирост усталостной долговечности титанового сплава ВТ6 на 136% относительно образцов после дробеметной обработки и на 268% относительно исходных неупрочненных образцов. На основе фрактографического анализа показано, что прирост усталостной долговечности связан с увеличением расстояния от очага усталостной трещины до поверхности образца.

Практическая значимость работы заключается: в разработке комплексной методики подбора режимов лазерной ударной обработки для различных авиационных материалов; разработанных технологических рекомендациях по обработке лопаток компрессора ГТД лазерной ударной обработкой; разработанной опытной технологии лазерной ударной обработки кромок пера рабочей лопатки компрессора из титанового сплава ВТ6, которая позволила повысить усталостную прочность лопаток на 16%.

В процессе обучения в аспирантуре и работы над диссертацией Королев Д.Д. проявил себя квалифицированным специалистом в области поверхностного пластического деформирования металлов при помощи лазерного излучения высокой интенсивности. Соискатель принимал личное участие в постановке и проведении всех экспериментальных исследований обрабатываемости титанового сплава ВТ6 лазерной ударной обработкой и обработке, полученных экспериментальных данных.

Основные результаты диссертационной работы опубликованы в 13 научных работах, в том числе 2 публикации в рецензируемых научных изданиях и изданиях, приравненных к ним, 1

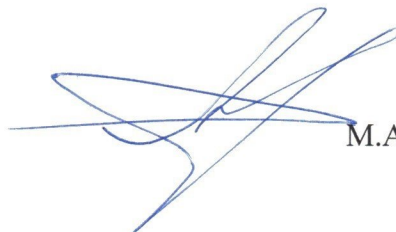
патент на изобретение и 1 свидетельство на программу для ЭВМ. По теме диссертационной работы было сделано 9 докладов на международных и всероссийских конференциях.

Представленная Королевым Д.Д. к защите диссертационная работа является завершенной научно-квалификационной работой, в которой решена актуальная задача, которая имеет большое практическое значение для авиадвигателестроительной и других отраслей машиностроения и энергетики – разработка технологии лазерной ударной обработки для повышения усталостной прочности компрессорных лопаток из титановых сплавов авиационных двигателей. Решение этой задачи позволяет повысить усталостную прочность деталей, работающих в условиях знакопеременных нагрузок, а также снизить затраты на сервисное обслуживание и ремонт авиационной техники.

Диссертационная работа Королева Д.Д. соответствует специальности 2.5.15. – «Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов» и отвечает всем требованиям «Положения о присуждении ученых степеней», предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук.

Автор диссертации, Королев Даниил Дмитриевич заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата технических наук.

Научный руководитель, к.т.н., доцент  
кафедры 205 «Технология производства  
двигателей летательных аппаратов»  
ФГБОУ ВО «Московского авиационного  
института (национального  
исследовательского университета)»



М.А. Ляховецкий

Подпись к.т.н., доцента кафедры 205 «Технология производства двигателей летательных аппаратов» Ляховецкого М.А. заверяю

Директор дирекции института №2  
«Авиационные, ракетные двигатели и  
энергетический установки»,  
к.т.н., доцент



В.П. Монахова