

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования

**«Московский авиационный институт
(национальный исследовательский университет)»**

125993, г. Москва, Волоколамское шоссе, д. 4

Телефон приёмной: +7 499 158-43-33; факс: +7 499 158-29-77.

E-mail: mai@mai.ru; сайт: <https://mai.ru>

ОКТМО 45345000; ОГРН 1037739180820; ИНН/КПП 7712038455/774301001

УТВЕРЖДАЮ

И.о. проректора по научной работе
ФГБОУ ВО «Московский авиационный
институт (национальный
исследовательский университет)»,
доктор технических наук, профессор

Ю.А. Равикович

2022 г.



ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

на диссертационную работу Симонова Юрия Владимировича «Механизмы и закономерности формирования механических свойств поверхностных слоёв металлических сплавов при селективной лазерной обработке», представленную на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности 05.16.09 – «Материаловедение» (металлургия).

Актуальность диссертационной работы

Титановые сплавы широко применяются в современной авиакосмической промышленности. С точки зрения авиационной техники многие титановые сплавы обладают такими важными достоинствами, как высокая коррозионная стойкость, жаропрочность, удельная прочность, хорошая свариваемость и пр.

Автор исследует механизмы и закономерности формирования свойств поверхностных слоёв титановых сплавов в условиях селективной лазерной обработки. Данные исследования направлены на решение фундаментальных задач выявления механизмов взаимодействия ультракоротких лазерных импульсов с дефектными областями, расположенными в поверхностных слоях металлических сплавов. Практическая значимость и актуальность диссертационного исследования обусловлена

широким применением в авиационной промышленности деталей, изготовленных из титановых сплавов. Причём эксплуатационные характеристики таких деталей, например, лопаток газотурбинных двигателей, в значительной степени определяются свойствами поверхностного слоя титановых сплавов.

Необходимо отметить, что для селективной лазерной обработки поверхности титановых сплавов не требуется создания специальной защитной атмосферы. Такой тип обработки является достаточно технологичным, позволяет обрабатывать детали сложной формы. В этом плане селективная лазерная обработка, позволяющая существенно улучшить механические характеристики поверхностного слоя материала, представляет несомненный практический интерес.

Выявление механизмов и закономерностей формирования механических свойств поверхностных слоёв титановых сплавов, а также определение параметров селективной лазерной обработки поверхности жаропрочных титановых сплавов BT9 и BT18y, позволяющих упрочнить поверхность за счёт создания слоя с повышенной твёрдостью и стойкостью к растрескиванию при локальном нагружении, является актуальным направлением исследований.

Таким образом, диссертационную работу Симонова Ю.В. «Механизмы и закономерности формирования механических свойств поверхностных слоёв металлических сплавов при селективной лазерной обработке» следует считать **актуальной как с фундаментальной, так и с прикладной точек зрения.**

Научная новизна исследований и полученных результатов, а также положений, выводов и рекомендаций диссертации состоит в том, что автором определены параметры селективной обработки поверхности титановых сплавов $Ti_{85,85}Al_{6,5}Zr_4Sn_2Nb_1Mo_{0,5}Si_{0,15}$ и $Ti_{88,3}Al_{6,4}Mo_{3,3}Zr_{1,5}Si_{0,3}Fe_{0,2}$ серией наносекундных лазерных импульсов с частотой следования импульсов 50 и 100 Гц, которые позволяют одновременно повысить её нано- и микротвёрдость, а также стойкость к формированию трещин при локальном нагружении. Впервые разработана модель теплового воздействия лазерных наносекундных импульсов на системы наноразмерных пор, расположенных в приповерхностном слое металлического сплава. Установлены зависимости микро- и нанотвёрдости от нагрузки для поверхностей титановых сплавов BT18y и BT9, обработанных серией наносекундных лазерных импульсов. Усовершенствован способ механических испытаний в центральных и граничных участках тонких твёрдых образцов, нанесённых на подложки, позволяющий определять оптимальные и допустимые режимы локального нагружения пирамидкой Виккерса при выявлении коэффициента вязкости микроразрушения. Впервые показана возможность одновременного повышения стойкости к формированию трещин при локальном нагружении пирамидкой Виккерса, модуля Юнга, нанотвёрдости в 2-4 раза и микротвёрдости в 1,4 раза при селективной импульсной лазерной обработке поверхности

титановых сплавов.

Практическая значимость работы определяется тем, что способ определения вязкости микроразрушения тонких аморфно-нанокристаллических пленок (патент № 2699945) может быть использован для механических испытаний центральных и граничных областей тонких образцов и покрытий. Разработанная программа для ЭВМ «MODEL_DISTRIBUTION_OF_VAC_AND_PORES» (номер государственной регистрации 2020611660) позволяет моделировать процесс формирования пор в приповерхностном слое материала. Полученные результаты были использованы в Центральной лаборатории ПАО «Пигмент» (г. Тамбов, акт об использовании от 05.12.2018). Экспериментально установленные режимы лазерной обработки позволяют одновременно повысить микротвёрдость и стойкость к формированию трещин при локальном нагружении поверхности титановых сплавов пирамидкой Виккерса.

Достоверность полученных результатов и выводов диссертационной работы подтверждена согласованностью результатов экспериментальных исследований и теоретических представлений, использованием стандартных методик испытаний, соответствием полученных результатов современным теоретическим представлениям, совпадением результатов компьютерного моделирования и экспериментального исследования, независимой апробацией полученных результатов в заводской лаборатории и их использованием на производстве, успешной апробацией полученных результатов на конференциях.

Структура и содержание работы

Диссертация состоит из введения, четырёх глав, общих выводов, списка литературы и четырёх приложений. Работа изложена на 190 страницах формата А4, содержит 58 рисунков и 3 таблицы. Список использованных источников включает 198 наименований.

Во введении к диссертации обоснована актуальность проведения работы, изложены её научная новизна и практическая значимость, сформулированы основные положения, выносимые на защиту, приведены сведения об апробации работы.

В первой главе выполнен критический обзор современной научной литературы. Систематизированы результаты экспериментальных и теоретических исследований механических свойств титановых металлических сплавов и тонких твёрдых плёнок аморфно-нанокристаллических металлических сплавов. Проанализированы современные методы лазерной обработки тонких образцов наноструктурных металлических сплавов, особенности их структурного состояния и методы выявления их механических свойств. Рассмотрены особенности различных видов лазерного воздействия и способы формирования свойств твёрдых материалов с использованием лазерной обработки. Проанализирована специфика селективной лазерной обработки тонких лент

наноструктурных металлических сплавов. Рассмотрены особенности структуры титановых металлических сплавов, а также особенности изменения структуры при внешних воздействиях.

Во второй главе экспериментально рассмотрена специфика разрушения тонких образцов аморфно-нанокристаллических металлических сплавов при локальном нагружении пирамидкой Виккерса центральных и граничных участков. Автором исследованы закономерности формирования микрокартин разрушения в ходе экспериментального выявления коэффициента вязкости микроразрушения при индентировании пирамидкой Виккерса. Установлено существование оптимального значения нагрузки на индентор, при котором удаётся получать симметричные микрокартины разрушения, состоящие из системы трещин в виде вложенных квадратов. Проанализировано влияние расстояния до границы образца на симметрию микрокартин разрушения. Определены допустимые расстояния от точек локального нагружения до границы образца. С учётом полученных результатов усовершенствован способ определения коэффициента вязкости микроразрушения тонких аморфно-нанокристаллических плёнок. Предложенный метод защищён патентом на изобретение.

В третьей главе исследована эффективность нескольких методов лазерной обработки поверхности титановых сплавов: облучение одиночными импульсами, последовательное облучение поверхности серией импульсов, создание матриц перекрывающихся локальных участков лазерного оплавления. В работе использованы лазерные импульсы наносекундной длительности с энергиями от 10 до 100 мДж и лазерные импульсы миллисекундной длительности с энергией до 60 Дж. Изменяя площадь области облучения, варьировали плотность мощности от 141×10^{12} до 45×10^{15} Вт/м². За счёт варьирования плотности мощности в широком диапазоне автору удалось получить поверхности с различным рельефом и различными механическими свойствами. Исследованы микротвёрдость, характер рельефа и особенности разрушения лазернообработанных поверхностей при локальном нагружении пирамидкой Виккерса. Теоретически исследована специфика импульсного прогрева поверхностного слоя металлического сплава, содержащего различные конфигурации наноразмерных пор. Полученные результаты позволили уточнить требования к параметрам лазерных импульсов и алгоритмам лазерной обработки поверхности титановых сплавов.

Четвёртая глава посвящена исследованию механических характеристик лазернообработанных поверхностей титановых сплавов. Определены методы лазерной обработки, обеспечивающие упрочнение поверхностного слоя. Установлены зависимости микротвёрдости HV поверхностей титанового сплава ВТ18у от нагрузки на индентор, а также зависимости нанотвёрдости H_1 титанового сплава ВТ9 от нагрузки на индентор. Показано, что режимы селективной лазерной обработки позволяют повысить

микротвёрдость поверхностного слоя титановых сплавов до 25 – 40 %. Данные методы обработки несомненно представляют практический интерес, так как рост микротвёрдости не сопровождается охрупчиванием. В условиях локального нагружения пирамидкой Виккерса лазернообработанных поверхностей трещины не образуются при нагрузках до 4,9 Н, в то время, как на необработанных участках математическое ожидание вероятности формирования трещин в условиях локального нагружения усилием 0,49 Н достигает 52 %. Также предложены режимы селективной лазерной обработки поверхности, обеспечивающие увеличение характеристик нанотвёрдости в 4,4 раза (с 6,3 до 27,5 ГПа) и модуля Юнга в 2,2 раза (с 163,5 до 362,4 ГПа). Полученные результаты находят непротиворечивое объяснение в рамках механизма селективного воздействия короткоимпульсного лазерного излучения на отдельные дефектные области. В этом случае удаётся устранить часть концентраторов механических напряжений, что и позволяет одновременно с ростом микротвёрдости снизить математическое ожидание вероятности формирования трещин при локальном нагружении поверхностного слоя материала.

Значимость для науки и практики полученных результатов

Научная значимость полученных результатов обусловлена определением механизмов формирования механических свойств поверхностных слоёв металлических сплавов при селективной лазерной обработке, а также разработкой модели теплового воздействия лазерных наносекундных импульсов на системы наноразмерных пор, расположенных в приповерхностном слое металлического сплава.

Полученные автором научные результаты имеют и практическую ценность. Предложенный автором способ механических испытаний (защищённый патентом на изобретение) имеет высокую чувствительность к механическим свойствам тонких твёрдых плёнок наноструктурных материалов. Разработанные автором методы селективной лазерной обработки могут быть использованы для формирования механических свойств поверхностных слоёв титановых сплавов.

Рекомендации по использованию результатов диссертации

Полученные результаты работы могут быть использованы при обработке деталей газотурбинных двигателей в Опытно-конструкторском бюро имени А. Люльки, а также в АО «Московское машиностроительное предприятие имени В.В. Чернышёва» Объединённой двигателестроительной корпорации Госкорпорации Ростех.

Диссертация Симонова Ю.В. будет полезна для ознакомления специалистам, занимающимся изучением методов обработки титановых сплавов. Результаты работы могут быть использованы при изучении материаловедения и технологии производства деталей двигателей летательных аппаратов в ФГБОУ ВО «Московский авиационный

институт (национальный исследовательский университет)», а также при обучении магистрантов и аспирантов.

Несмотря на общую положительную оценку диссертационной работы, к ней имеются следующие **замечания**:

1. Подробно рассмотрено влияние импульсной лазерной обработки на нано- и микротвёрдость поверхности титановых сплавов, модуль Юнга, а также на математическое ожидание вероятности формирования трещин при локальном нагружении алмазной пирамидкой Виккерса. Однако, при практическом применении титановых сплавов, например в авиации, важное значение имеет способность материалов сохранять свои свойства при многоцикловой нагрузке. К сожалению, данный вопрос автором не рассмотрен.

2. Автором предложены алгоритмы определения допустимых нагрузок на индентор и расстояний до границ образца, при которых возможно определение коэффициента вязкости микроразрушения. Данный метод апробирован на образцах, имеющих форму параллелепипеда. Вместе с тем, не раскрыт вопрос о применимости данного метода при испытании образцов сложной конфигурации.

3. Автор исследует свойства поверхностного упрочнённого слоя, в том числе методами нано- и микроиндентирования. Однако весьма ценным дополнением могла бы быть информация об изменении нано- и микротвёрдости на поперечном срезе лазернообработанного образца.

4. На рисунках 3.6, г и 3.7, г изображены поверхности, обработанные серией наносекундных лазерных импульсов, которые покрыты сеткой микротрещин. На рисунках 4.2, б и 4.6 показаны лазернообработанные поверхности без сетки трещин. Недостаточно подробно описано, какие изменения в режимах лазерной обработки позволяют исключить формирование микротрещин в поверхностном оплавленном слое.

5. В настоящее время для упрочнения поверхности деталей авиационных двигателей применяется метод лазерного пининга (laser peening/лазерное ударное упрочнение). Механические характеристики поверхности, упрочнённой с помощью селективной лазерной обработки, следует сравнить с механическими характеристиками поверхности титанового сплава после лазерного пининга.

6. Вывод 2 в разделе общие выводы по работе сформулирован недостаточно корректно. Отмеченные искажения теплового фронта и неоднородности нагрева локальных областей с пористостью не могут составлять механизм формирования механических свойств поверхностных слоев материалов, а, вероятно, являются причинами изменений в их структуре на микро- и наноуровнях, которые и приводят к эволюции свойств. Для описания механизмов изменения свойств следовало бы провести детальное

исследование структуры поперечных шлифов материалов до и после селективной лазерной обработки с применением методов СЭМ и ПЭМ ВР.

Отмеченные замечания не являются принципиальными и не влияют на общую положительную оценку диссертационной работы Симонова Ю.В.

Заключение

Диссертационная работа Симонова Ю.В. «Механизмы и закономерности формирования механических свойств поверхностных слоёв металлических сплавов при селективной лазерной обработке», представленная на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности 05.16.09 – «Материаловедение» (металлургия), является актуальной, выполнена на высоком научном уровне, полученные результаты имеют научную и практическую значимость. Диссертация и автореферат имеют чёткую структуру, внутреннее единство содержания, смысла и терминологии, изложены технически грамотным, лаконичным языком в принятом для научных трудов стиле. Результаты работы опубликованы в 7 статьях в российских и зарубежных рецензируемых научных журналах и доложены на различных российских и международных конференциях. Две статьи опубликованы в журналах, входящих в базы данных Scopus и WoS, две статьи – в журналах, которые рекомендованы ВАК по специальности 05.16.09 – «Материаловедение» (металлургия). По результатам конференций опубликовано восемь тезисов докладов и две статьи в сборниках материалов конференций. Результаты работы защищены патентом на изобретение. Получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. Автореферат полностью соответствует содержанию, основным положениям, идеям и выводам диссертации. Содержание работы соответствует поставленной цели, все поставленные задачи в работе выполнены. Публикации в полной мере отражают основное содержание работы.

Диссертационная работа Симонова Ю.В. соответствует требованиям Положения о порядке присуждения учёных степеней в Национальном исследовательском технологическом университете «МИСиС», а её автор, Симонов Юрий Владимирович, заслуживает присуждения учёной степени кандидата технических наук по специальности 05.16.09 – «Материаловедение» (металлургия).

Заведующий кафедрой 205 «Технология

Производства двигателей летательных аппаратов» ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)», доктор технических наук (05.07.05), профессор



Марчуков
Евгений
Ювенальевич

Заведующий кафедрой 903 «Перспективные материалы и технологии аэрокосмического назначения» ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)», доктор физико-математических наук (01.02.04), профессор



Рабинский
Лев
Наумович

Доцент кафедры 205 «Технология производства двигателей летательных аппаратов» ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)», кандидат технических наук (05.07.05)



Ионов
Алексей
Владимирович

Доцент кафедры 903 «Перспективные материалы и технологии аэрокосмического назначения» ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)», кандидат технических наук (05.16.09)



Астапов
Алексей
Николаевич

Отзыв рассмотрен и одобрен на совместном заседании кафедры 205 «Технология производства двигателей летательных аппаратов» и кафедры 903 «Перспективные материалы и технологии аэрокосмического назначения» ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» «21» января 2022 г. (протокол заседания №1).