

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ «МИСИС»

Симонов Юрий Владимирович

**МЕХАНИЗМЫ И ЗАКОНОМЕРНОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ
МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЁВ
МЕТАЛЛИЧЕСКИХ СПЛАВОВ ПРИ СЕЛЕКТИВНОЙ
ЛАЗЕРНОЙ ОБРАБОТКЕ**

Специальность 05.16.09 – «Материаловедение» (металлургия)

Автореферат диссертации
на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук, доцент,
профессор кафедры физики
Ушаков Иван Владимирович

Москва – 2021

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Существуют различные методы лазерной обработки металлических сплавов. Традиционные методы лазерной обработки связаны с лазерной закалкой, сваркой, резкой, аморфизацией, лазерным сверлением, лазерной наплавкой/напылением и пр. В последнее время разработаны новые методы лазерной обработки материалов и изготовления деталей заданной формы. К таким методам относятся лазерный пининг (peening), лазерные аддитивные технологии, селективная лазерная обработка и др.

Для тонких (~ 30 мкм) образцов аморфно-нанокристаллических металлических сплавов достаточно эффективной является селективная обработка серий наносекундных лазерных импульсов. При селективной лазерной обработке происходит избирательное воздействие ударной волны и кратковременного прогрева на дефектные области нано- и микромасштабных размеров в материале. Такая обработка позволяет улучшить комплекс механических свойств аморфно-нанокристаллических материалов за счёт уменьшения вредного влияния концентраторов механических напряжений, микротрещин, пор и т. п. Благодаря переводу дефектных областей в неопасное состояние удаётся одновременно повысить значения микротвёрдости наноструктурного материала на 15 – 20 % и коэффициента вязкости микроразрушения в ~ 1,5 раза. Отличительной особенностью селективной лазерной обработки является сохранение исходного наноструктурного состояния образца в целом.

Вместе с тем подавляющую часть используемых в современной промышленности материалов составляют традиционные металлические сплавы с поликристаллической структурой. Научный и практический интерес представляет исследование возможностей формирования механических свойств поверхности и приповерхностных слоёв титановых сплавов с использованием таких режимов лазерной обработки, которые обеспечивают преимущественное воздействие на дефектные области и, в конечном итоге, способствуют повышению механических и эксплуатационных свойств изделий из этих сплавов. Выбор титановых сплавов в качестве объектов исследования обоснован их эксплуатационными свойствами, жаропрочностью, коррозионной стойкостью, малым удельным весом, что обеспечивает широкое использование этих сплавов в промышленности.

Разработка технологии селективной лазерной обработки сплавов титана, помимо практической значимости, позволяет уточнить физический процесс селективного воздействия лазерных импульсов на дефектную структуру, получить новые знания о механизмах взаимодействия теплового фронта, создаваемого лазерным излучением, с дефектами, что обуславливает актуальность исследования.

Цель диссертационной работы – определение механизма формирования механических свойств поверхности металлических сплавов при взаимодействии прогрева, инициируемого серийю наносекундных лазерных импульсов, с дефектами структуры, и выявление параметров селективной лазерной обработки, обеспечивающих повышение механических свойств поверхности и тонкого приповерхностного слоя титановых сплавов.

Задачи исследования:

1. Усовершенствовать существующий способ механических испытаний тонких твёрдых тонких образцов и упрочнённых поверхностных слоёв для обеспечения получения достоверных данных о механических свойствах объектов измерений.

2. Определить механизм формирования механических свойств за счёт теплового воздействия прогрева, инициируемого серией наносекундных лазерных импульсов, на поры, расположенные в приповерхностных слоях титановых сплавов.

3. Исследовать возможность реализации селективной лазерной обработки, ранее апробированной на аморфно-нанокристаллических металлических сплавах, для поликристаллических титановых сплавов ВТ18у и ВТ9, с учётом коррекции параметров лазерной обработки.

4. Определить модуль Юнга, микро- и нанотвёрдость, а также стойкость к растрескиванию при локальном нагружении пирамидкой Виккерса поверхностей образцов титановых сплавов, подвергнутых импульсной лазерной обработке серий наносекундных лазерных импульсов.

5. Выявить параметры селективной лазерной обработки поверхности титановых сплавов ВТ18у и ВТ9, позволяющие упрочнить поверхность за счёт создания слоя с повышенной твёрдостью и стойкостью к растрескиванию при локальном нагружении.

Научная новизна результатов исследования

1. 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 вязкости микроразрушения.

2. Разработана модель теплового воздействия лазерных наносекундных импульсов на системы наноразмерных пор, расположенных в приповерхностном слое металлического сплава.

3. Показана возможность использования селективной лазерной обработки, ранее апробированной на аморфно-нанокристаллических металлических сплавах, для титановых сплавов ВТ18у и ВТ9, с учётом коррекции режимов лазерного воздействия.

4. Установлены зависимости микро- и нанотвёрдости от нагрузки для поверхности титановых сплавов ВТ18у и ВТ9, подвергнутых обработке серий наносекундных лазерных импульсов.

5. 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

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.

На защиту выносятся следующие положения:

1. Способ определения оптимальных и допустимых нагрузок и расстояний до границы тонкого твёрдого образца для обеспечения получения достоверных значений коэффициента вязкости микроразрушения.

2. Зависимости микротвёрдости и нанотвёрдости обработанных лазером участков титановых сплавов BT18y и BT9 от нагрузки на индентор.

3. Модель взаимодействия фронта лазерного прогрева в поверхностном слое металлического сплава с дефектными областями, образованными порами, позволяющая выявить условия селективности воздействия лазерных импульсов.

4. Методика упрочнения поверхности металлических сплавов на основе титана, не требующая защитной атмосферы и основанная только на использовании серии наносекундных лазерных импульсов и системы точного позиционирования излучения на обрабатываемую поверхность.

5. Параметры лазерной обработки титановых сплавов BT18y и BT9, обеспечивающие одновременное увеличение стойкости к растрескиванию при локальном нагружении пирамидкой Виккерса с усилием до 4,9 Н, значений микротвёрдости – в полтора раза и нанотвёрдости – в четыре раза.

Достоверность полученных результатов обеспечивается использованием стандартных методик испытаний, соответствием полученных результатов современным теоретическим представлениям, подтверждением теоретических представлений экспериментальными результатами, независимой апробацией полученных результатов в заводской лаборатории и их использованием на производстве, апробацией результатов на научных конференциях.

Личный вклад автора. На всех этапах выполнения диссертационной работы автор принимал прямое участие в постановке задач исследования, в планировании и методическом обеспечении эксперимента, в проведении большинства экспериментальных измерений, в обсуждении полученных результатов и формулировании выводов. Вся экспериментальная работа и необходимые расчёты проводились соискателем лично или при его непосредственном участии.

Публикации. Основные результаты диссертации опубликованы в девятнадцати работах, в том числе в шести статьях в журналах из перечня, рекомендованного ВАК (индексируемых WoS, Scopus), в десяти тезисах и материалах докладов. Получены патент на изобретение № 2699945 на способ

определения вязкости микроразрушения тонких аморфно-нанокристаллических плёнок и свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020611660.

Апробация работы. Основные результаты исследования были представлены на научных конференциях: 2-я Всероссийская национальная науч. конф. студентов, аспирантов и молодых учёных «Молодёжь и наука: актуальные проблемы фундаментальных и прикладных исследований» (Комсомольск-на-Амуре, 2019 г.); XV Междунар. семинар МНТ-ХV «Структурные основы модифицирования материалов» (Обнинск, 2019 г.); XV и XVI Российская ежегодная конф. молодых научных сотрудников и аспирантов «Физико-химия и технология неорганических материалов» (Москва, 2018, 2019 г.); 8-я Междунар. конф. «Деформация и разрушение материалов и наноматериалов» (Москва, 2019 г.); XXV Уральская школа металлургов-термистов «Актуальные проблемы физического металловедения сталей и сплавов» (Екатеринбург, 2020 г.); I Междунар. молодёжная науч. конф. «Новые материалы XXI века: разработка, диагностика, использование» (Москва, 2020 г.); XI научно-практический семинар «Актуальные проблемы физики конденсированных сред» (Екатеринбург, 2018 г.); научный семинар технологов-машиностроителей «Перспективные направления развития финишных и виброволновых технологий» (Ростов-на-Дону, 2021 г.).

Структура и объём работы. Диссертация состоит из введения, четырёх глав, общих выводов, списка цитируемой литературы из 198 наименований и четырёх приложений. Работа изложена на 190 страницах машинописного текста, содержит 58 рисунков и 3 таблицы.

По итогам конкурса МЕТАЛ-ЭКСПО'2020 (Москва – 2020 г.) коллектив молодых учёных из трёх человек, в состав которого входил Симонов Ю.В., за работу, посвящённую селективной лазерной обработке металлических сплавов, занял призовое место, награждён дипломом и денежной премией.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность диссертационного исследования, сформулированы цель и основные задачи работы, научная новизна, практическая значимость, перечислены основные положения, выносимые на защиту, приведены сведения об апробации на научных конференциях и публикациях по теме диссертации.

В первой главе представлен критический обзор литературных данных, посвящённых различным методам лазерной обработки металлических сплавов: лазерная закалка, сварка, резка, лазерная аморфизация поверхности, напыление, лазерный пининг и др. Рассмотрены аддитивные лазерные технологии, позволяющие создавать детали сложной конфигурации, армированные композиционные соединения и пр.

Особое внимание уделено одному из перспективных методов обработки поверхности металлических сплавов, который связан с возможностью короткоимпульсного лазерного излучения оказывать различное воздействие на

дефектные и бездефектные нано- и микрообласти материала. Для случая аморфно-нанокристаллических металлических сплавов, например, сплава 82К3ХСР, переведённого в аморфно-нанокристаллическое состояние контролируемым отжигом, известна методика селективной лазерной обработки. Методика селективной обработки основана на избирательном воздействии лазерного излучения наносекундой длительности на зародыши разрушения и концентраторы механических напряжений. Данная методика позволяет перевести указанные дефекты в неопасное состояние. Отличительной особенностью такого метода обработки является то, что большая часть материала сохраняет исходную аморфно-нанокристаллическую структуру. Приведены известные данные о результатах применения селективной лазерной обработки фольг различных аморфных материалов.

В заключительной части литературного обзора проведён критический анализ литературных данных, посвящённых плазменным и лазерным методам обработки поверхности титановых сплавов. Показаны востребованность развития технологий обработки титановых сплавов и несомненный научный и практический интерес исследований, связанных с изучением селективного воздействия лазерного излучения применительно к традиционным титановым сплавам.

На основе рассмотрения литературных данных обоснован выбор в качестве объектов исследования аморфно-нанокристаллического сплава 82К3ХСР, а также титановых сплавов ВТ18у и ВТ9, сформулирована цель работы и определены задачи исследования.

Вторая глава посвящена анализу факторов, обеспечивающих достоверность определения коэффициента вязкости микроразрушения тонких и твёрдых плёнок и покрытий, при использовании методики механических испытаний, основанной на локальном нагружении тонких образцов на подложке.

Сущность данной методики состоит в формировании системы микротрещин, ориентированных параллельно граням индентора, на поверхности образца при вдавливании в него индентора, например, пирамидки Виккерса. От симметрии полученной системы микротрещин и их количества зависит точность выявления коэффициента вязкости микроразрушения. Ранее разработанные методики определения коэффициента вязкости микроразрушения и микротвёрдости тонких плёнок (см. [1, 2]) не позволяют найти данные параметры при сильной асимметрии микрокартины разрушения. Это относится как к центральным, так и к граничным участкам, расположенным вблизи краёв образца. Во второй главе решается задача усовершенствования методики механических испытаний в центральных и граничных областях и её экспериментальной апробации.

Экспериментально исследованы закономерности деформирования и разрушения при локальном нагружении пирамидкой Виккерса центральных и граничных областей тонкого и хрупкого наноструктурного образца, расположенного на полимерной подложке. К микрокартинам разрушения, формирующимся по итогам испытаний, предъявляется ряд требований,

основными из которых являются: формирование системы из трёх и более микротрещин, параллельных грани индентора; микротрещины должны быть сформированы у трёх или четырёх граней индентора; данные системы микротрещин должны пересекаться в районе воздействия ребёр индентора; должна отсутствовать густая сетка микротрещин и крошево из отколотых участков материала.

Если микрокартины удовлетворяют указанным выше требованиям, то они считаются симметричными и подлежат анализу после набора статистического материала.

Экспериментальные исследования реализованы на аморфно-нанокристаллических сплавах на основе кобальта: 82К3ХСР ($\text{Co}_{71,66}\text{Si}_{17,09}\text{B}_{4,73}\text{Fe}_{3,38}\text{Cr}_{3,14}$); 84КХСР ($\text{Co}_{81,92}\text{Si}_{7,2}\text{Fe}_{4,3}\text{Cr}_4\text{B}_{2,5}\text{Ni}_{1,8}\text{C}_{0,05}\text{S}_{0,015}\text{P}_{0,015}$); 86КГСР ($\text{Co}_{71,02}\text{Ni}_{12,4}\text{Si}_{6,7}\text{Fe}_{5,9}\text{B}_{3,8}\text{Mn}_{0,1}\text{C}_{0,05}\text{S}_{0,015}\text{P}_{0,015}$). Подготовка включает нарезку и контролируемый отжиг для перевода образцов в аморфно-нанокристаллическое состояние. Затем образцы размером 15x25 мм и толщиной 30 мкм размещали на полимерных композитах (использовано 5 различных композитов, основные исследования проведены на VodiFiber: 67/548/EEC). Композит в свою очередь располагался на металлическом основании. Механические испытания проводили на микротвердомере ПМТ–3М.

Симметрия микрокартин разрушения существенно зависит от величины используемой нагрузки на индентор и расстояния до границ образца.

При разработке алгоритмов определения оптимальных и допустимых расстояний до границ образца, а также оптимальных и допустимых нагрузок, использовали следующие обозначения: P – математическое ожидание вероятности формирования симметричной микрокартины разрушения при данных условиях нагружения; F_{opt} – оптимальная величина силы вдавливания индентора в образец (оптимальная нагрузка), при которой P принимает наибольшее значение; L_{ep} – расстояние от точки индентирования до границы образца, или граничное расстояние.

Экспериментально показано, что максимальное значение P , необходимое для анализа коэффициента вязкости микроразрушения, достигается при использовании некоторой оптимальной нагрузки на индентор. Результаты представлены в виде графической зависимости P от значения нагрузки на индентор F , Н. Характерный вид такой зависимости для сплава 82К3ХСР приведён на рисунке 1. При испытаниях образцов в приграничных участках оценивается симметрия Z микрокартин разрушения, как вероятность формирования параллельных граням индентора микротрещин. На рисунке 2 показан характерный вид графика изменения величины Z от расстояния L_{ep} до границы образца.

Зависимости, показанные на рисунках 1 и 2, относятся к сплаву 82К3ХСР и к указанным выше условиям испытания. Методика считается универсальной в том случае, если схожие зависимости получаются при испытаниях на других материалах. Испытания на материалах 84КХСР и 86КГСР показали аналогичные результаты.

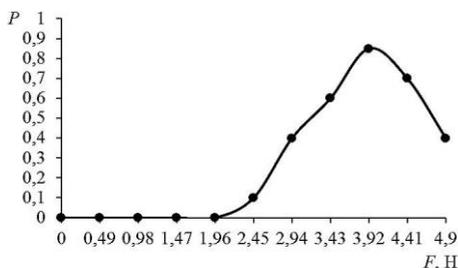


Рис. 1. Зависимость математического ожидания вероятности P формирования симметричных микрокартин разрушения от нагрузки на индентор F

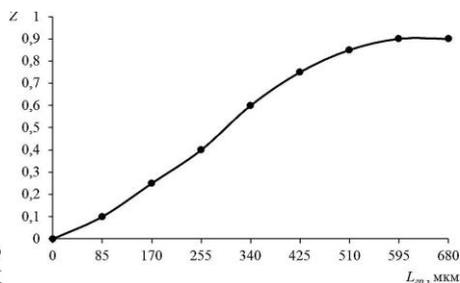


Рис. 2. Зависимость симметрии Z микрокартин разрушения от граничного расстояния L_{cr} при индентировании образцов оптимальной нагрузкой $F_{opt} = 3,92$ Н

Разработаны алгоритмы определения диапазона допустимых значений нагрузки на индентор, а также нахождения минимально допустимого расстояния до границ образца при механических испытаниях тонких плёнок. Описание алгоритмов приведено в патенте, указанном в списке публикаций. Рассмотренный способ механических испытаний тонких плёнок нашёл практическое применение в ПАО «Пигмент» при контроле качества граничных областей тонкоплёночных покрытий и слоистых композитных плёнок, наносимых на твёрдые поверхности.

Третья глава посвящена исследованию механических характеристик поверхностей образцов титановых сплавов, подвергнутых лазерной обработке, а также выявлению специфики прогрева лазерным импульсом поверхностного слоя материала, содержащего поры.

Для лазерной обработки образцов сплава использовали лазерные установки:

1) ELS-03 (LS-2134-E4): $\nu_{умт.} = 1 - 100$ Гц, $\lambda = 532$ нм, $E_{умт.} \approx 15 - 20$ мДж, $\tau \approx 15 - 20$ нс (ЛЮ № 1); 2) Bulat (LRS-150 AU): $\nu_{умт.} = 1 - 200$ Гц, $\lambda = 1,064$ мкм, $E_{умт.} \approx 60$ Дж, $\tau \approx 0,2 - 20$ мс (ЛЮ № 2); 3) ELS-01: $\nu_{умт.} = 1 - 50$ Гц, $\lambda = 1064$ нм, $E_{умт.} \approx 50 - 100$ мДж, $\tau \approx 15 - 20$ нс (ЛЮ № 3); 4) длиннофокусный лазер: $\nu_{умт.} = 100 - 300$ Гц, $\lambda = 1064$ нм, $E_{умт.} = 10 - 20$ мДж (ЛЮ № 4).

Использовали различные алгоритмы облучения локальных участков поверхности образца. В соответствии с первым алгоритмом (АЛГ № 1) образец сначала передвигали с фиксированной скоростью v по направлению оси «x» на расстояние S , а затем в направлении оси «y» на величину шага смещения дорожек $\Delta D = 0,9 \cdot D$ (D – диаметр пятна облучения), затем сдвигали образец по оси «x» на расстояние $-S$ и т. д. Поверхность обрабатывали от 1 до N_f раз.

Во втором алгоритме (АЛГ № 2) поверхность обрабатывали от 1 до N_f раз. Каждый этап обработки состоял из 4 частей. В первой части формировали геометрически правильную систему округлых непересекающихся облученных участков, расположенных на одинаковых расстояниях друг от друга (матрицу). Расстояние L между центрами соседствующих оплавленных участков в матрице составляет $1,414 \cdot D$, где D – диаметр пятна от одиночного импульса на поверхности материала, что обеспечивает отсутствие перекрытий между облученными участками одной матрицы. На второй части этапа создавали

такую же матрицу неперекрывающихся областей, смещённую относительно первой и т. д. Дополнительные матрицы смещены относительно положения начальных матриц таким образом, чтобы наблюдались симметричные перекрытия между облученными участками матриц (рис. 3).

Свойства поверхности зависят как от алгоритмов обработки, так и от параметров лазерных импульсов. В результате обработки миллисекундными лазерными импульсами (ЛУ № 2) формировалась оплавленная область. Вследствие значительной энергии лазерных импульсов материал вблизи области лазерного воздействия нагревался на сотни градусов.

Результат обработки поверхности наносекундными лазерными импульсами существенно зависит от применяемого режима обработки и плотности мощности излучения. Высокая плотность мощности (P_d) лазерных импульсов (45×10^{15} Вт/м², $\lambda = 532$ нм) при использовании АЛГ № 2 способствует формированию сильно неоднородного выжженного рельефа поверхности в результате образования плазмы оптического пробоя и абляционных процессов. Многократное облучение образца согласно АЛГ № 2 приводит к выжиганию локальных участков поверхности сплава на глубину 50 – 500 мкм без следов оплавления.

Воздействие наносекундных лазерных импульсов в диапазоне плотности мощности от 141×10^{12} Вт/м² до 1273×10^{12} Вт/м² согласно АЛГ № 1 при фокусировании излучения под поверхность образца с плавным перемещением со скоростью от $v_1 = 0,55 \times 10^{-3}$ м/с до $v_2 = 5,55 \times 10^{-3}$ м/с пятна облучения диаметром 50 – 150 мкм приводит к формированию оплавленной поверхности. Формируемые области обработки содержат плотную сетку микро- и макротрещин, формирующихся при быстром охлаждении расплавленного материала.

Механические испытания в центральных и граничных участках лазерной обработки проводили с использованием микроиндентирования, а также методики, изложенной в работах [1, 2], с применением представленных во второй главе алгоритмов и требований к механическим испытаниям.

Экспериментально установлено, что отмеченные выше режимы лазерной обработки не позволяют существенно повысить механическую прочность поверхности. Для уточнения требований к лазерной обработке решали тепловую задачу прогрева поверхности, содержащей поры. Возможные конфигурации пор определяли компьютерным моделированием, а тепловую задачу решали численными методами, используя уравнение теплопроводности:

$$c \cdot \rho \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \text{div}(\lambda \cdot \text{grad}(T)) + q_V, \quad (1)$$

где c – удельная теплоёмкость, Дж/(кг·К); ρ – плотность, кг/м³; T – температура, К; t – время, с; λ – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К); q_V – мощность объёмных/поверхностных источников теплоты, Вт/м³.

Специфика прогрева материала, содержащего различные конфигурации пор, показана на рисунках 4-6. Размер пор, показанных на рисунках, составляет 50 нм. В первой конфигурации поры расположены в ряд параллельно поверхности сплава (рис. 4). Вторая конфигурация системы пор имеет вид прямоугольного равнобедренного треугольника (рис. 5). Третья конфигурация включает в себя 5 пор в поверхностном слое сплава толщиной 0,3 мкм (рис. 6). На рисунках 5, 6 и 7 показаны моменты времени 0,5 нс, 0,7 нс и 0,85 нс соответственно, с момента начала прогрева.

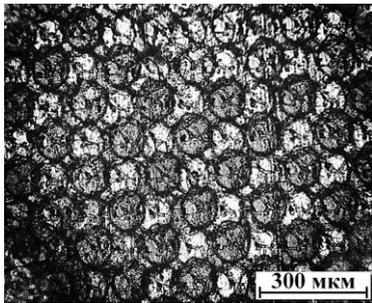


Рис. 3. Поверхность титанового сплава VT18u, обработанная в соответствии с АЛГ № 2

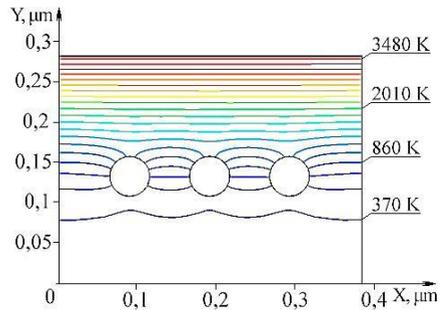


Рис. 4. Прогрев материала вблизи горизонтально расположенных пор за время 0,5 нс

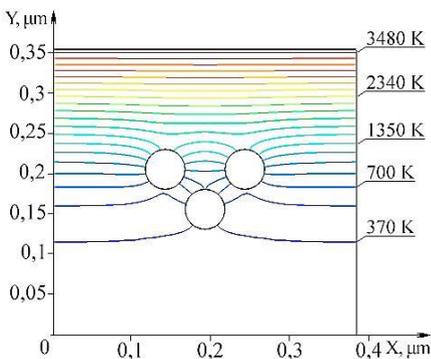


Рис. 5. Прохождение изотерм через систему пор, образующих материал с системой из трех треугольников, через 0,7 нс после воздействия лазерного импульса

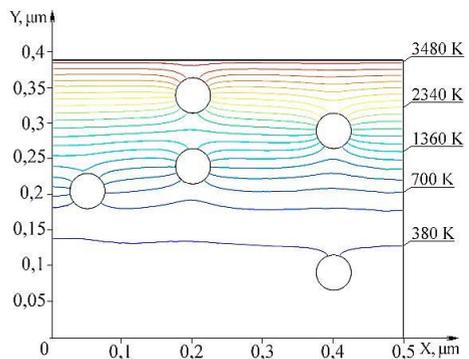


Рис. 6. Прогрев поверхностного слоя материала с системой из пяти пор через 0,85 нс от начала воздействия лазерного импульса

Анализ движения теплового фронта, представленного на рисунках изотермами, через систему пор, расположенных в поверхностном слое материала, показывает искажение формы изотерм, ускоренный прогрев материала в окрестностях пор и около систем пор в целом. Одновременно система пор задерживает прогрев материала, расположенного под ними, что особенно существенно для случая, если система пор расположена в горизонтальной плоскости параллельно обрабатываемой поверхности.

Возможность избирательного воздействия лазерного излучения на дефектные области и системы дефектов возрастает в случае обработки поверхности короткими импульсами с интервалом, достаточным для охлаждения материала. В этом случае можно ожидать избирательного

воздействия излучения на дефекты, причём при каждом последующем облучении оно будет влиять на всё более глубоко расположенные дефекты.

Соответственно эффективная селективная лазерная обработка может осуществляться по АЛГ № 1 и АЛГ № 2. АЛГ № 1 основан на последовательной обработке поверхности материала с контролем теплового режима, при этом ограничены: энергия импульса, частота следования импульсов и плотность мощности. АЛГ № 2 базируется на создании нескольких перекрывающихся матриц облучённых участков за несколько проходов. В этом случае нет жёстких требований по тепловому режиму, диаметру пятна облучения и общей энергии импульса.

Четвёртая глава. Поверхность титановых сплавов обрабатывали согласно АЛГ № 1 и АЛГ № 2. С учётом результатов, полученных в третьей главе, выбраны лазерные импульсы с длительностью $\tau \approx 15 - 20$ нс, P_d варьировали от $1,273 \times 10^{12}$ Вт/м² до $75,34 \times 10^{12}$ Вт/м², а D – от 130 мкм до 1000 мкм.

Первая технология основана на использовании АЛГ № 1 и ЛУ № 3, $D = 1000$ мкм, скорость движения образца $v = 0,185$ м/с, $P_d = 1,273 \times 10^{12}$ Вт/м², $\nu_{\text{шм}} = 100$ Гц. В основе второй технологии обработки лежит АЛГ № 2, ЛУ № 1 и ЛУ № 4, $D = 130$ мкм, $P_d = 75,34 \times 10^{12}$ Вт/м², $N_t = 2$. Уточнение параметров лазерного воздействия проводили с использованием методики испытаний, описанной во второй главе.

Для технологического режима № 2 микротвёрдость (H_v – по Виккерсу) лазернообработанной поверхности увеличилась в 1,4 – 1,6 раза (рис. 7). На рисунке 8 показана зависимость нанотвёрдости (H_I – по Берковичу) от нагрузки (для зависимостей, приведённых на рисунках 8, 9, 10, абсолютная погрешность не превышает 1,5 %). При индентировании необработанного образца математическое ожидание вероятности формирования трещин (P_{cr}) возрастало с 0,2 при нагрузке 0,49 Н до 0,34 при нагрузке 1,96 Н для сплава ВТ18у. На облучённых участках при индентировании нагрузками 4,9 Н трещины не образовывались. Это свидетельствует об увеличении стойкости к формированию трещин облученного материала при указанных режимах локального нагружения.

На рисунке 9 показаны зависимости глубины вдавливания индентора от времени, а на рисунке 10 – силы, действующей на индентор при нагружении и разгрузении, от глубины вдавливания индентора.

Для сплава ВТ9 и АЛГ № 3-1 установлен рост нанотвёрдости и модуля Юнга (таблица 1). Обработанная поверхность имеет хорошую адгезию с основным материалом. Увеличение нано- и микротвёрдости сопровождается увеличением P_{cr} . При нагружении пирамидкой Виккерса необработанной поверхности P_{cr} составляет 0,52 при $F = 0,49$ Н, в то время как в обработанных лазером областях образования трещин при указанных нагрузках не наблюдалось.

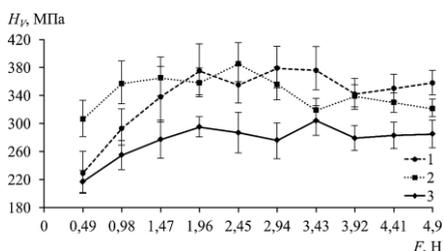


Рис. 7. Зависимости микротвёрдости H_V сплава ВТ18у от нагрузки на индентор F : 1 – поверхность, обработанная по АЛГ № 1; 2 – поверхность, обработанная по АЛГ № 2; 3 – необработанная поверхность

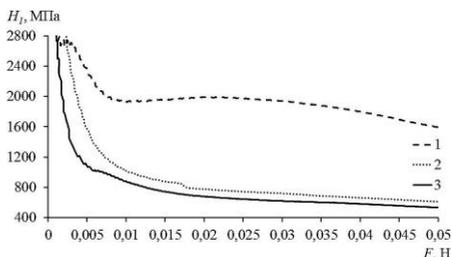


Рис. 8. Зависимости нанотвёрдости H_I сплава ВТ9 от нагрузки на индентор F : 1 – поверхность, обработанная по АЛГ № 3-1 на ЛУ № 1; 2 – поверхность, обработанная по АЛГ № 3-2 на ЛУ № 4; 3 – необработанная поверхность

Режимы лазерной обработки были выбраны на основании результатов экспериментального и теоретического исследования, представленных в третьей главе, позволяющих обеспечить проведение селективного воздействия наносекундных лазерных импульсов на дефектные области в поверхностном слое материала. Селективная обработка предполагает многократное воздействие ударной волны и сверхбыстрого прогрева на дефектную структуру. С увеличением глубины залегания дефектных областей снижается эффективность и избирательность воздействия на дефектную структуру. В нанослое твёрдость возрастает в четыре раза, а в слое микрометрового диапазона – в полтора. Полученные экспериментальные результаты, связанные с одновременным увеличением твёрдости, а также увеличением стойкости к формированию трещин при локальном нагружении пирамидкой Виккерса, подтверждают предлагаемую модель.

Таблица 1 – Результаты расчётов нанотвёрдости (H_{IT}) и модуля упругости (E_{IT}) по методике Оливера-Фарра исходного и обработанных поверхностных слоёв титанового сплава ВТ9

Механические характеристики материала	Исходная поверхность	Обработанная поверхность, ЛУ № 1, АЛГ № 3-1	Обработанная поверхность, ЛУ № 4, АЛГ № 3-2
Нанотвёрдость H_{IT} , $\times 10^9$, Па	6,297	27,473	8,475
Модуль Юнга E_{IT} , $\times 10^9$, Па	163,542	362,364	173,974

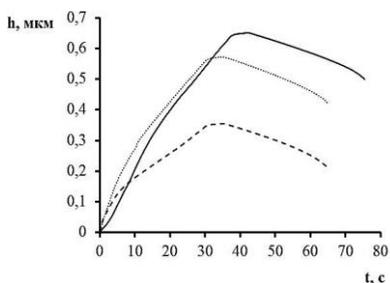


Рис. 9. Зависимость глубины внедрения индентора от времени: 1 – поверхность обработанная по АЛГ № 2, ЛУ № 1; 2 – поверхность, обработанная по АЛГ № 1, ЛУ № 4; 3 – исходная поверхность (ВТ9)

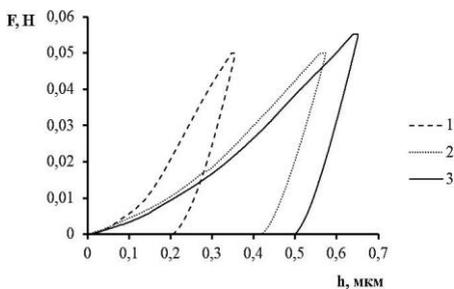


Рис. 10. Зависимость силы вдавливания от глубины внедрения индентора: 1 – поверхность, обработанная по АЛГ № 2, ЛУ № 1; 2 – поверхность, обработанная по АЛГ № 1, ЛУ № 4; 3 – исходная поверхность (ВТ9)

Способ селективной лазерной обработки, ранее апробированный на аморфно-нанокристаллических сплавах, при коррекции режимов обработки может быть использован для обработки поверхности титановых сплавов. Предлагаемый способ основан только на использовании лазерного излучения и электронно-механической системы точного перемещения, что обеспечивает простоту и технологичность рассмотренных режимов обработки поверхностного слоя.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

1. Выявлены факторы, влияющие на точность определения коэффициента вязкости микроразрушения при локальном нагружении тонкого и твёрдого образца пирамидкой Виккерса. Разработан способ определения коэффициента вязкости микроразрушения тонких плёнок и покрытий, а также соответствующие алгоритмы испытаний, которые позволяют определять оптимальные и допустимые диапазоны нагрузок и расстояний от точки испытания до границ образца.

2. Механизм формирования механических свойств поверхностных слоёв материала за счёт теплового воздействия, инициируемого сериями наносекундных лазерных импульсов, заключается в искажении теплового фронта и неоднородности нагрева локальных областей с повышенной пористостью.

Возможность избирательного воздействия лазерного излучения на дефектные области и системы дефектов возрастает в случае обработки поверхности короткими импульсами с интервалом, достаточным для охлаждения материала.

3. Определены параметры селективной обработки поверхности титановых сплавов $Ti_{85,85}Al_{6,5}Zr_4Sn_2Nb_1Mo_{0,5}Si_{0,15}$ и $Ti_{88,3}Al_{6,4}Mo_{3,3}Zr_{1,5}Si_{0,3}Fe_{0,2}$ серий наносекундных лазерных импульсов с частотой следования импульсов 50 Гц и 100 Гц, которые позволяют одновременно повысить её нано- и микротвёрдость, а также стойкость к формированию трещин при локальном нагружении. Селективная лазерная обработка поверхности титанового сплава возможна в том случае, если плотность мощности лазерных импульсов длительностью 15 – 20 нс находится в пределах от $1,273 \times 10^{12}$ Вт/м² до $75,34 \times 10^{12}$ Вт/м², а размеры пятна облучения – в пределах 130 – 1000 мкм.

Избирательность воздействия лазерного излучения может реализовываться при обработке поверхности согласно двум алгоритмам. Первый алгоритм основан на последовательной обработке поверхности материала с контролем теплового режима, при этом ограничена общая энергия импульса, частота следования импульсов и плотность мощности. Второй алгоритм заключается в создании нескольких перекрывающихся матриц облучённых участков за несколько циклов обработки.

4. Лазерная обработка теряет свою избирательность при отклонении от установленных параметров. Превышение плотности мощности лазерного импульса до 4×10^{15} Вт/м² при сканирующей обработке поверхности с многократным наложением матрицы областей воздействия приводит к абляционному механизму удаления материала. Снижение плотности мощности до 141×10^{12} Вт/м² – 1273×10^{12} Вт/м² с длительным облучением одного участка приводит к реализации классического, преимущественно теплового режима обработки.

5. В результате селективной лазерной обработки для слоя нанометровой толщины нанотвёрдость возрастает в четыре раза с 6,3 ГПа до 27,5 ГПа, модуль Юнга – в два раза, с 163,5 ГПа до 362,4 ГПа. Микротвёрдость поверхности увеличивается на 25 – 40 %, до 360 МПа.

На необработанной поверхности математическое ожидание вероятности формирования трещин при локальном нагружении пирамидкой Виккерса составляет 52 % при нагрузке 0,49 Н. В обработанных лазером областях образования трещин во время вдавливания не наблюдалось, что является экспериментальным свидетельством одновременного увеличения твёрдости и стойкости к формированию трещин при локальном нагружении пирамидкой Виккерса.

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. B. Jonsson, S. Hogmark. Hardness measurements of thin films // Metallurgical and protective coatings. Thin Solid Films, 114 (1984) P. 257–269.
2. Способ определения пластических характеристик пленок многокомпонентных аморфно-нанокристаллических металлических сплавов: патент № 2494039 С1 РФ, МКП G01N3/42(2006/01), В82Y35/(2011.00) / И.В. Ушаков, И.С. Сафронов. ФГБОУ ВПО «МГТУ». - № 2012116406; заявл. 24.04.2012; опубл. 27.09.2013, Бюл. № 27.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи, опубликованные в журналах из списка Scopus, WoS и BAK

1. Ushakov I. V., **Simonov Yu. V.** Formation of surface properties of VT18u titanium alloy by laser pulse treatment // *Materials Today: Proceedings*. 2019. Vol. 19. Part 5. P. 2051–2055.
2. Ivan Ushakov and **Yuri Simonov**. Alterations in the microhardness of a titanium alloy affected to a series of nanosecond laser pulses // *MATEC Web of Conferences*. 298, 00051 (2019).
3. Ушаков И. В., **Симонов Ю. В.** Экспериментальное выявление вязкости микроразрушения в центральных и граничных участках тонких хрупких образцов при нагружении на подложке пирамидкой Виккерса // *Вестник Московского авиационного института*. 2019. Т. 26. № 4. С. 230–239.
4. Ушаков И. В., **Симонов Ю. В.** Управление физико-механическими свойствами поверхности титановых сплавов короткоимпульсным лазерным излучением // *Вестник Московского государственного областного университета. Серия: Физика-математика*. 2019. № 4. С. 30–42.
5. **Симонов Ю. В.**, Ушаков И. В. Механические свойства поверхностных структур титанового сплава BT9 после многократной локальной обработки наносекундными лазерными импульсами // *Вестник Московского государственного областного университета. Серия: Физика-Математика*. 2020. № 2. С. 19–35.
6. **Симонов Ю. В.**, Ушаков И. В., Дьяков И. А. Тепловой механизм воздействия лазерного излучения на поры в поверхностном слое металлических сплавов // *Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии*. 2021. Т. 11. № 3. С. 77–92.

Патент и Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ

7. Способ определения вязкости микроразрушения тонких аморфно-нанокристаллических плёнок: патент № 2699945 С1 РФ, МПК G01N 3/42 (2006.01), B82Y 35/00 (2011.01) / И. В. Ушаков, **Ю. В. Симонов**: ФГАОУ ВО НИТУ «МИСиС». № 2018145595; заявл. 21.12.2018; опубл. 11.09.2019. Бюл. № 26.
8. Моделирование распределения вакансий и пор в материале MODEL_DISTRIBUTION_OF_VAC_AND_PORES: свидет. о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2020611660 РФ/ И. В. Ушаков, **Ю. В. Симонов**: ФГАОУ ВО НИТУ «МИСиС». - № 2019667511; заявл. 27.12.2019; опубл. 06.02.2020.

Публикации в других изданиях

9. **Simonov Yu. V.**, Ushakov I. V. Methodology of Mechanical Testing for Experimental Detection of Microdestruction Viscosity in Local Regions of Thin Ribbons of Amorpho-Nanocrystalline Material // *Advanced Materials & Technologies*. 2018. No. 2. P. 52–59. (входит в список BAK из базы данных Chemical Abstracts).

10. **Симонов Ю. В.**, Ушаков И. В. Специфика экспериментального выявления механических свойств наноструктурных материалов // 2-я Всероссийская национальная науч. конф. студентов, аспирантов и молодых учёных «Молодёжь и наука: актуальные проблемы фундаментальных и прикладных исследований». 2019 г. Комсомольск-на-Амуре. С. 185–187.
11. Ушаков И. В., **Симонов Ю. В.** Механические свойства поверхности титанового сплава VT18у при различных режимах импульсной лазерной обработки // XV Междунар. семинар МНТ-XV «Структурные основы модифицирования материалов». 2019 г. Обнинск. С. 109–111.
12. **Симонов Ю. В.** Формирование механических свойств аморфно-нанокристаллического металлического сплава импульсной лазерной обработкой // XVI Российская ежегодная конф. молодых научных сотрудников и аспирантов «Физико-химия и технология неорганических материалов». 2019 г. Москва. ИМЕТ РАН. С. 317–319.
13. **Симонов Ю. В.**, Ушаков И. В. Влияние специфики лазерной импульсной обработки поверхностного слоя титанового сплава VT18у на его микротвёрдость и стойкость к образованию трещин // 8-я Междунар. конф. «Деформация и разрушение материалов и наноматериалов». 2019 г. Москва. ИМЕТ РАН. С. 527–528.
14. **Симонов Ю. В.** Лазерное управление микротвёрдостью поверхностного слоя титановых сплавов // XXV Уральская школа металлослов-термистов «Актуальные проблемы физического металлословения сталей и сплавов». 2020 г. Екатеринбург. С. 246–248.
15. **Симонов Ю. В.** Применение наноиндентирования и метода Оливера-Фарра для диагностики твёрдости и упругого модуля поверхностей титанового сплава при лазерной обработке // Материалы I Междунар. молодёжной науч. конф. «Новые материалы XXI века: разработка, диагностика, использование». 2020 г. Москва. С. 104–109.
16. **Симонов Ю. В.** Методика механических испытаний тонких лент металлических сплавов на подложке для корректного определения вязкости их микроразрушения // Материалы I Междунар. молодёжной науч. конф. «Новые материалы XXI века: разработка, диагностика, использование». 2020 г. Москва. С. 147–151.
17. Ушаков И. В., **Симонов Ю. В.** Выбор оптимальных нагрузок и допустимых расстояний до границ образца при определении вязкости микроразрушения аморфно-нанокристаллических металлических сплавов // XI научно-практический семинар «Актуальные проблемы физики конденсированных сред». 2018 г. Екатеринбург. С. 22.
18. **Симонов Ю. В.** Структурные превращения и механические свойства аморфного металлического сплава 82K3XCP подвергнутого термической и импульсной лазерной обработке // XV Российская ежегодная конференция молодых научных сотрудников и аспирантов «Физико-химия и технология неорганических материалов». 2018 г. Москва. ИМЕТ РАН. С. 79–80.
19. **Симонов Ю. В.**, Ушаков И. В. Лазерное формирование поверхностного рельефа на титановом сплаве VT18у // Научный семинар технологослов-машиностроителей «Перспективные направления развития финишных и вибрословных технологий». 2021 г. Ростов-на-Дону. ДГТУ. С. 332–335.