

ОПТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И ТЕХНОЛОГИИ OPTICAL ENGINEERING

doi: 10.17586/2226-1494-2026-26-3-457-465

УДК 544.032.65

Спектральные свойства лазерно-индуцированной микроплазмы при термоупрочняющей обработке титана

Ксения Андреевна Егорова¹✉, Хамза Салех², Андрей Анатольевич Петров³,
Дмитрий Андреевич Синев⁴

^{1,2,3,4} Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация

¹ x_egorova@itmo.ru✉, <https://orcid.org/0000-0002-4228-0392>

² hamzasaleh554@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0001-8454-1343>

³ aapetrov@itmo.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2853-6478>

⁴ sinev@itmo.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6274-1491>

Аннотация

Введение. Термоупрочнение металлов под лазерным воздействием на вспомогательный поглощающий слой происходит за счет формирования и распространения плазменного факела в пространственно-ограниченных условиях. При этом обычно исследования сосредоточены на изучении достигаемых в результате обработки значений твердости *post factum*, а особенности плазменного факела в пространственно-ограниченных условиях представляются недостаточно подробно изученными. Можно предположить, что вклад плазменного факела определяет перераспределение лазерной энергии, протекание ударно-волновых процессов и формирование поверхностного слоя с улучшенными функциональными свойствами. Целью работы является определение связи свойств лазерно-индуцированной микроплазмы при термоупрочняющей лазерной обработке титана с параметрами лазерного воздействия и конфигурацией мишеней. **Метод.** Исследованы закономерности формирования плазменного факела методом оптической эмиссионной спектроскопии при различных параметрах наносекундного лазерного излучения с длиной волны 1064 нм. Интенсивность свечения плазменного факела и эмиссионные спектры регистрировались в диапазоне 380–740 нм с применением оптоволоконного спектрометра «Avantes». В качестве объекта исследования использовались технически чистые титановые пластины марки BT1-0, которые были изучены в трех конфигурациях мишеней: исходная титановая пластина; титановая пластина под стеклянной пластиной; титановая пластина, покрытая слоем графитового порошка и стеклянной пластиной. Обработка зарегистрированных эмиссионных спектров плазменного факела включала вычитание фонового сигнала, коррекцию с использованием кривой спектральной чувствительности прибора и кривой спектра пропускания стекла, а также анализ спектральных линий с применением базы данных NIST Atomic Spectra Database. Численные значения твердости модифицированных поверхностей были определены путем проведения измерений твердости по шкале Виккерса с малой нагрузкой. **Основные результаты.** Получено, что при лазерной обработке с импульсной плотностью мощности выше $4,1 \cdot 10^{11}$ Вт/м² при всех типах конфигурации мишеней в спектре плазменного факела можно идентифицировать линии нейтральными и однократно ионизированными атомами титана, что указывает на превышение порога абляции титана и формирование частично ионизированного парогазового факела. Введение в конфигурацию мишени поглощающего (порошок графита) и ограничивающего (стеклянная пластина) слоев приводит к заметному снижению общей интенсивности свечения плазменного факела при сохранении характерных линий в его спектре, однако при этом величина твердости по Виккерсу поверхностного слоя титана увеличивается с 185 HV до 520 HV. **Обсуждение.** Показано, что конфигурация мишени существенно влияет на закономерности формирования плазменного факела и твердость поверхностного слоя титана в составе мишени. Выявленные закономерности могут указывать на реализацию смешанного механизма термомеханического (ударного) упрочнения титана, при котором реализуется эффективная конверсия энергии лазерного излучения, поглощенной слоем графита, находящимся под стеклянной пластиной, в нагрев и упрочнение титана, в большей степени чем в нагрев частиц графита, аблируемых в плазменном факеле. Результаты работы могут быть использованы для оптимизации режимов лазерной обработки титана с целью управляемого формирования поверхностей с улучшенными значениями твердости.

Ключевые слова

наносекундная лазерная обработка, титан, эмиссионная спектроскопия, лазерно-индуцированная микроплазма, лазерная абляция, лазерное термоупрочнение

Благодарности

Работа выполнена при финансировании НИРСИИ Университета ИТМО (проект № 640114 «Метод синтеза параметров обработки материалов на основе строгих (математических) и нестрогих (машинных) предсказаний»).

Ссылка для цитирования: Егорова К.А., Салех Х., Петров А.А., Синева Д.А. Спектральные свойства лазерно-индуцированной микроплазмы при термоупрочняющей обработке титана // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2026. Т. 26, № 3. С. 457–465. doi: 10.17586/2226-1494-2026-26-3-457-465

Spectral properties of laser-induced plasma in confined conditions during thermal hardening treatment

Xenia A. Egorova¹✉, Hamza Saleh², Andrey A. Petrov³, Dmitry A. Sinev⁴

^{1,2,3,4} ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation

¹ x_egorova@itmo.ru✉, <https://orcid.org/0000-0002-4228-0392>

² hamzasaleh554@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0001-8454-1343>

³ aapetrov@itmo.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2853-6478>

⁴ sinev@itmo.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6274-1491>

Abstract

Thermal hardening of metals under laser irradiation with an auxiliary absorbing layer occurs due to the formation and propagation of a plasma plume in confined conditions. Most *post factum* studies are focused on the hardness values achieved by processing, while the characteristics of the plasma plume in confined conditions stay deficiently investigated. However, it can reasonably be assumed that the contribution of the plasma plume determines energy reallocation, the development of shock wave processes, and the formation of surface structures with improved functional properties. The aim of this work is to identify the relationship between the properties of laser-induced microplasma during the laser hardening of titanium and the laser irradiation parameters as well as the target configuration. Patterns of plasma plume formation were investigated in the work using the method of optical emission spectroscopy with variable parameters of nanosecond laser radiation with a wavelength of 1064 nm. Spectral lines were recorded in the range of 380–740 nm using an “Avantes” fiber-optic spectrometer. Technically pure titanium plates were used as the object of the study and were examined in three target configurations: titanium plate, a titanium plate under glass, and a titanium plate under a layer of graphite powder and glass. The processing of the recorded emission spectra of the plasma plume included the background signal subtraction, correction for the curve of spectral sensitivity of the spectrometer and the curve of transmission spectrum of the glass, and analysis of spectral lines using the NIST Atomic Spectra Database. Numerical values of surface hardness were determined by performing Vickers microhardness measurements under a low load. It was demonstrated that during laser processing with an impulse power density above $4.1 \cdot 10^{11}$ W/m², neutral atom and singly ionized atom lines can be identified for all processing configurations. This indicates that the ablation limit of the titanium target is reached, and a partially ionized plasma plume is formed. The introduction of absorbing (graphite) and confining (glass) layers leads to a visible decrease in the registered absolute emission intensity while keeping the characteristic spectral lines. At the same time, the surface hardness values increase from 185 HV to 520 HV. It was demonstrated that the target configuration significantly influences the formation patterns of the plasma plume and the hardness of the titanium surface layer within the target assembly. The identified trends may indicate the implementation of a combined thermomechanical (shock) hardening mechanism, in which efficient conversion of laser energy absorbed by the graphite layer located beneath the glass plate results in heating and strengthening of titanium to a greater extent than in heating of graphite particles ablated into the plasma plume. The results of this work can be used to optimize laser processing regimes of titanium for controlled formation of surfaces with improved hardness values.

Keywords

nanosecond laser treatment, titanium, emission spectroscopy, laser-induced microplasma, laser ablation, laser peening

Acknowledgements

The research was supported by ITMO University Research Projects in AI Initiative (RPAII) (project no. 640114).

For citation: Egorova X.A., Saleh H., Petrov A.A., Sinev D.A. Spectral properties of laser-induced plasma in confined conditions during thermal hardening treatment. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2026, vol. 26, no. 3, pp. 457–465 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2026-26-3-457-465

Введение

Многоимпульсная лазерная обработка металлов при превышении пороговой плотности мощности может сопровождаться формированием частично ионизированного парогазового факела над поверхностью обрабатываемого материала, который вносит существенный

вклад в процессы лазерной абляции и модификации приповерхностных слоев. Факел низкотемпературной лазерно-индуцированной микроплазмы (ЛИМП) влияет на распределение энергии, передаваемой лазерным импульсом поглощающему материалу за счет повышения давления в зоне обработки или генерации ударных волн [1]. При этом пространственное ограничение зоны

распространения факела с помощью дополнительного ограничивающего слоя изменяет характер протекания процессов лазерной абляции, и лежит в основе нескольких родственных технологий обработки материалов, включающих методы лазерно-индуцированного обратного переноса (Laser-Induced Backward Transfer, LIBT) [2], лазерно-индуцированной микроплазменной обработки (Laser-Induced Plasma-Assisted Ablation, LIPAA) [3] и лазерной ударной закалки (Laser Shock Processing, LSP) [4, 5].

В исследованиях методов LIBT и LIPAA основное внимание, как правило, уделяется акцептору — вторичной мишени, на поверхность которой осаждаются микро- и наночастицы материала донорной мишени, выбитые с ее поверхности в результате лазерной абляции. Анализ процессов в рамках этих подходов обычно сфокусирован на скорости переноса вещества, морфологии осажденных структур и эффективности массопереноса, тогда как сама ЛИМП часто рассматривается лишь как промежуточная стадия процесса [6, 7].

В методе LSP внимание, как правило, сосредоточено на подложке и ее механических свойствах, таких как остаточные напряжения, твердость и микроструктура. При этом ЛИМП рассматривается преимущественно как источник ударного воздействия [8], а ее спектральные и динамические характеристики, как правило, остаются вне детального рассмотрения. Аналогичный подход используется и в работах по обработке под водой, где основное внимание уделяется модели взаимодействия лазера с веществом в водной среде, позволяющей прогнозировать нагрузку [9].

При LSP плазменный факел, возникающий при абляции поглощающего слоя (графит, краски) [10] под ограничивающим слоем (вода или стекло), создает ударное давление порядка нескольких гигапаскалей, которое вызывает упрочнение поверхностного слоя без значительного термического нагрева материала в глубину. Принципиальным условием существования и устойчивости ЛИМП является режим пространственного ограничения ее расширения, реализуемый при использовании в качестве прозрачной среды жидкости или твердого диэлектрического материала. В таких условиях ЛИМП формируется и развивается в ограниченном объеме, что приводит к увеличению давления на подложку. Таким образом, достигаемые значения твердости при упрочнении металлической мишени в условиях возбуждения ЛИМП оказываются напрямую связаны с характеристиками плазменного факела. При этом обычно исследования в области LSP сосредоточены на изучении морфологии поверхностной структуры [8, 11, 12], а характерные особенности динамики лазерной абляции материалов в пространственно-ограниченных условиях представляются недостаточно подробно изученными [13–15]. Для выявления механизмов упрочнения необходимо выполнить анализ взаимосвязей между параметрами лазерного нагрева мишени и характеристиками ЛИМП в пространственно-ограниченных условиях, например с помощью оптической эмиссионной спектроскопии, которая позволяет качественно оценить степень ионизации и энергетическое состояние плазменного факела в заданных условиях лазерного

воздействия [16]. В работе [17] авторами была показана возможность осуществления LSP в конфигурации мишени стекло-графит-титан, где максимальное значение твердости по Виккерсу (HV) титана после обработки составило 2300 HV [17]. В настоящей работе проведено исследование спектральных характеристик плазменного факела в модельных условиях трех конфигураций мишеней: исходная титановая пластина; титановая пластина под стеклянной пластиной; титановая пластина, покрытая слоем графитового порошка и стеклянной пластиной. Цель настоящей работы — выявление связи свойств ЛИМП при термоупрочняющей лазерной обработке титана с параметрами лазерного воздействия и конфигурацией мишеней.

Экспериментальные методы и материалы

В качестве материала для лазерного термоупрочнения использовались пластины из технической чистого титана марки BT1-0 (ООО Альфа-Союз, Санкт-Петербург, Россия). Перед экспериментами пластины были очищены в ультразвуковой ванне «Сапфир» (ООО «Сапфир+», Москва, Россия) с дистиллированной водой в течение 10 мин для удаления загрязнений с поверхности.

В работе исследовались три конфигурации мишеней:

- конфигурация мишени 1: подложка (титановая пластина);
- конфигурация мишени 2: подложка (титановая пластина), покрытая ограничивающим слоем (стеклянной пластиной);
- конфигурация мишени 3: подложка (титановая пластина), покрытая поглощающим (порошок графита) и ограничивающим слоями (стеклянной пластиной).

Каждый слой в конфигурации мишени влияет на процессы поглощения лазерного излучения, формирования ЛИМП и распространения ударной волны. В качестве ограничивающего плазменного факела и пропускающего лазерное излучение слоя было использовано предметное стекло марки «Микромед» (ООО «Наблюдательные приборы», Санкт-Петербург, Россия) толщиной $1,1 \pm 0,1$ мм. Поглощающий слой был получен путем механического измельчения и сухого просеивания электроугольного графита (ООО «Графитопласт», Челябинск, Россия) и нанесения полученного среднезернистого порошка непосредственно на поверхность образца. Порошок был равномерно распределен между титановой и стеклянной пластинами в виде тонкого однородного слоя толщиной порядка 500 мкм. Для конфигурации мишени 3 на поверхности титана был предварительно сформирован вспомогательный поверхностный оксидный слой, предположительно способствующий ударному упрочнению. Параметры лазерной обработки для нанесения вспомогательного поверхностного оксидного слоя [18]: плотность мощности $7,5 \cdot 10^{10}$ Вт/м², длительность импульсов 100 нс, частота следования импульсов 900 кГц, скорость сканирования 100 мм/с.

Лазерная обработка была выполнена с использованием Yb:волоконной лазерной установки МиниМаркер

2-M20, (ООО «Лазерный центр», Санкт-Петербург, Россия) со средней выходной мощностью 20 Вт, длиной волны 1064 нм. Лазерный пучок фокусируется на поверхность обрабатываемого образца F-theta линзой с полем обработки 100×100 мм в пятно 50 мкм по уровню e^{-2} .

Эмиссионные спектры излучения ЛИМП возникающие при лазерной обработке различных конфигураций мишеней регистрировали под углом около 60° к обрабатываемой поверхности с помощью спектрометра «Avantes» Avaspec-ULS3648-USB2 (ООО «Локамед», Санкт-Петербург, Россия) (ПЗС-матрицы с разрешением 3648 пикселей и спектральным разрешением $R=1,4$ нм) в спектральном диапазоне 380–740 нм. Схема экспериментальной установки для исследования спектральных свойств плазменного факела в пространственно-ограниченных условиях при лазерной термоупрочняющей обработке приведена на рис. 1.

Зарегистрированные спектры были обработаны в программном обеспечении AvaSoft 8 с вычитанием шумов и калибровкой длины волны (λ) с использованием кривой спектральной чувствительности спектрометра. Для улучшения соотношения сигнал/шум и воспроизводимости измерений, сбор данных производился в результате трех единичных накоплений спектров.

Для учета вклада спектрального поглощения ограничивающего слоя (стеклянная пластина) в диапазоне $\lambda = 380\text{--}740$ нм использовалась типовая кривая пропускания стекла марки «Микромед» толщиной 1,1 мм¹.

Измерения твердости проводились с помощью микротвердомера PMT-3М (ООО «ЛОМО», Санкт-

Петербург, Россия) по методу Виккерса при малой нагрузке HV5 (груз массой до 500 г) согласно ГОСТ Р ИСО 6507-1-2007². В используемом методе индентор представляет собой четырехгранную алмазную пирамидку, вдавливаемую в поверхность под регулируемой нагрузкой и временем нагрузки 10 с. Значения твердости были рассчитаны путем измерения диагоналей отпечатков индентора в материале и пересчета по соответствующим формулам, указанным в [17].

Результаты и обсуждение

На рис. 2 представлены эмиссионные спектры излучения ЛИМП, зарегистрированные в условиях лазерного термоупрочнения титана, нормированные на максимальное значение интенсивности излучения. Анализ этих спектров показал наличие выраженного порогового характера перехода от режима поверхностного нагрева к режиму абляции материала при импульсной плотности мощности около $4,1 \cdot 10^{11}$ Вт/м². При плотностях мощности лазерного излучения ниже этого порогового значения спектральный отклик ограничивается шумовым континуумом.

С увеличением плотности мощности падающего на конфигурацию мишени 3 лазерного излучения наблюдается появление характерных линий ионов титана (рис. 2), что свидетельствует о начале абляции и формировании эрозионного плазменного факела. Формирование плазменного факела над поверхностью мишени является физически обоснованным следствием интенсивного испарения и частичной ионизации мате-

¹ Soda-lime glass optical properties database [сайт]. Taiwan [Электронный ресурс]. URL: <https://rocoe.com.tw/2glass/sodalime.html> (дата обращения: 30.01.2026).

² ГОСТ Р ИСО 6507-1-2007 (ISO 6507-1) Металлы. Измерение твердости по Виккерсу. Часть 1. Метод испытания. Введ. 01.01.2009. М.: Стандартинформ, 2008. 12 с.

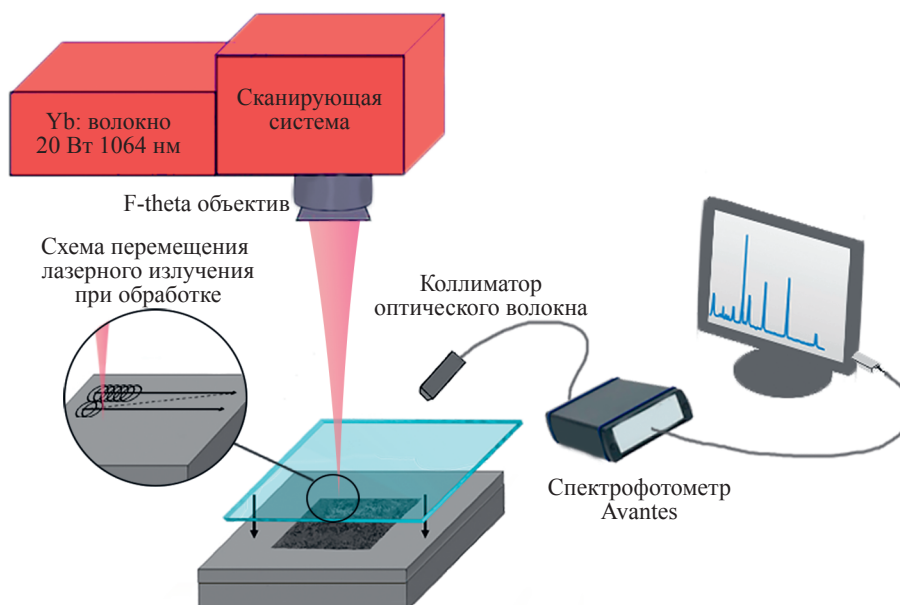


Рис. 1. Схема экспериментальной установки для исследования спектральных свойств лазерно-индуцированной микроплазмы при термоупрочняющей обработке

Fig. 1. Schematic diagram of the experimental setup for studying the spectral properties of laser-induced microplasma during laser hardening treatment

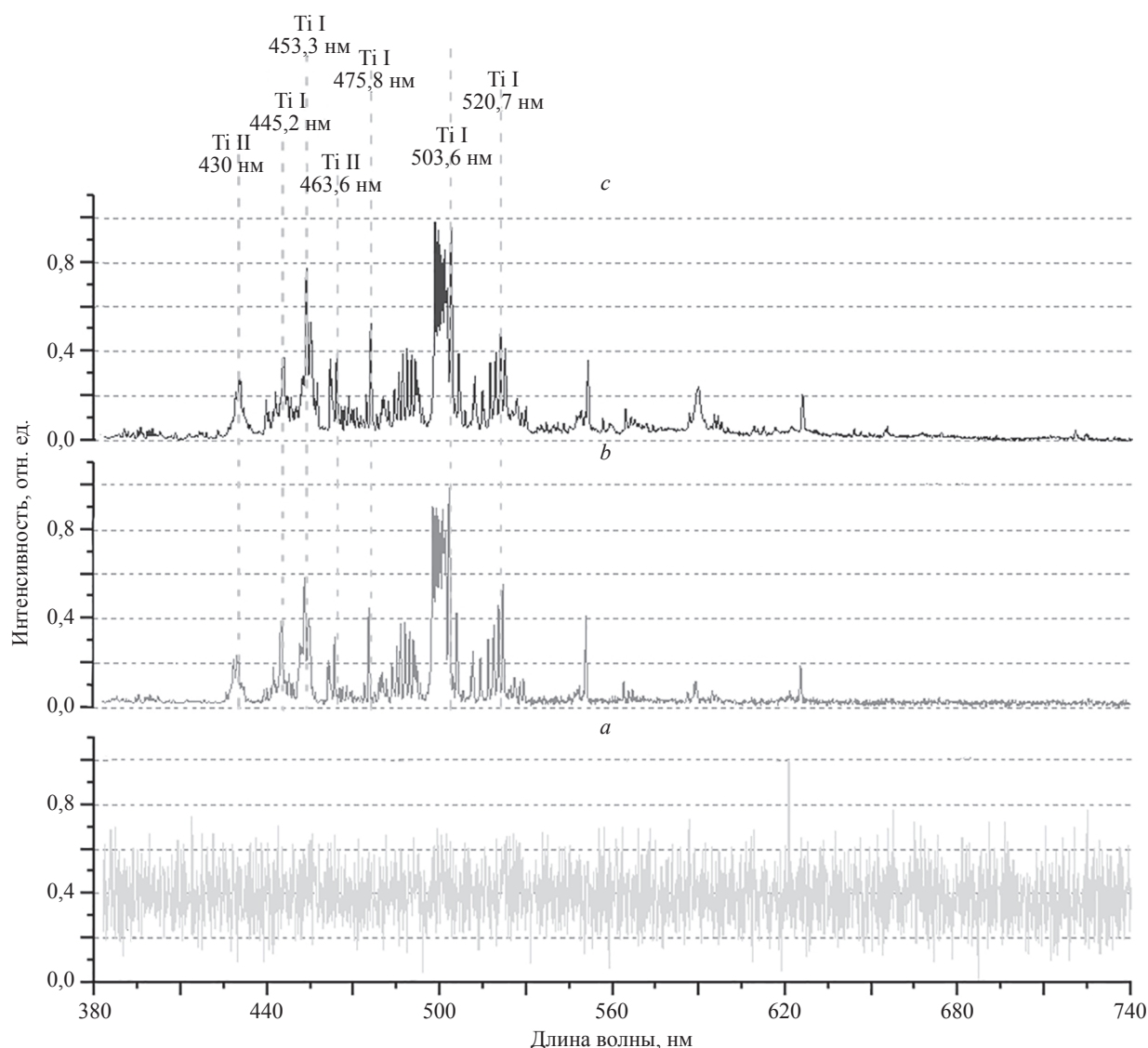


Рис. 2. Эмиссионные спектры излучения лазерно-индуцированной микроплазмы, зарегистрированные в условиях лазерного термоупрочнения титана для конфигурации мишени 3 при импульсной плотности мощности лазерного излучения: $3,18 \cdot 10^{11}$ Вт/м² (a); $4,56 \cdot 10^{11}$ Вт/м² (b); $5,73 \cdot 10^{11}$ Вт/м² (c). Характерные спектральные линии на рисунке обозначены как нейтральные атомы титана (Ti I) и однократно ионизированные атомы титана (Ti II)

Fig. 2. Emission spectra of laser-induced microplasma recorded under laser thermal hardening of titanium for the following target configuration: titanium plate under absorbing layer (graphite powder) and confining layer (glass) at a laser pulse power density is $3.18 \cdot 10^{11}$ W/m² (a); $4.56 \cdot 10^{11}$ W/m² (b); $5.73 \cdot 10^{11}$ W/m² (c). Characteristic spectral lines in the figure are designated as neutral titanium atoms (Ti I) and singly ionized titanium atoms (Ti II)

риала. Регистрация в эмиссионном спектре линий нейтральных и однократно ионизированных атомов титана свидетельствует о присутствии в плазме нейтральных атомов титана и однократно ионизованных атомов титана, образованных из мишени [19, 20].

Твердость упрочненного поверхностного слоя титана, сформированного при лазерной обработке конфигурации мишени 3, составила для значений плотности мощности лазерного излучения: $3,18 \cdot 10^{11}$ Вт/м² — 392 ± 56 HV, при $4,56 \cdot 10^{11}$ Вт/м² — 461 ± 32 HV, при $5,73 \cdot 10^{11}$ Вт/м² — 532 ± 32 HV. Исходное значение твердости титана составило 185 ± 5 HV. Сопоставление представленных на рис. 2 эмиссионных спектров с измеренными значениями твердости показывает, что существенное повышение твердости поверхностного

слоя титана наблюдается при превышении его порога абляции. Данное наблюдение предлагается считать связанным с воздействием ЛИМП, распространяющейся в пространственно-ограниченных условиях в зазоре между подложкой и ограничивающим слоем, и оказывающей термическое и ударное воздействие на подложку (титановую пластину).

Для изучения механизма влияния, поглощающего и ограничивающего слоев в конфигурациях мишеней на процесс термоупрочнения при лазерной обработке в пространственно-ограниченных условиях в работе были экспериментально зарегистрированы эмиссионные спектры, возникающие при импульсной лазерной обработке титана для трех конфигураций мишеней. Для каждой конфигурации мишени анализ

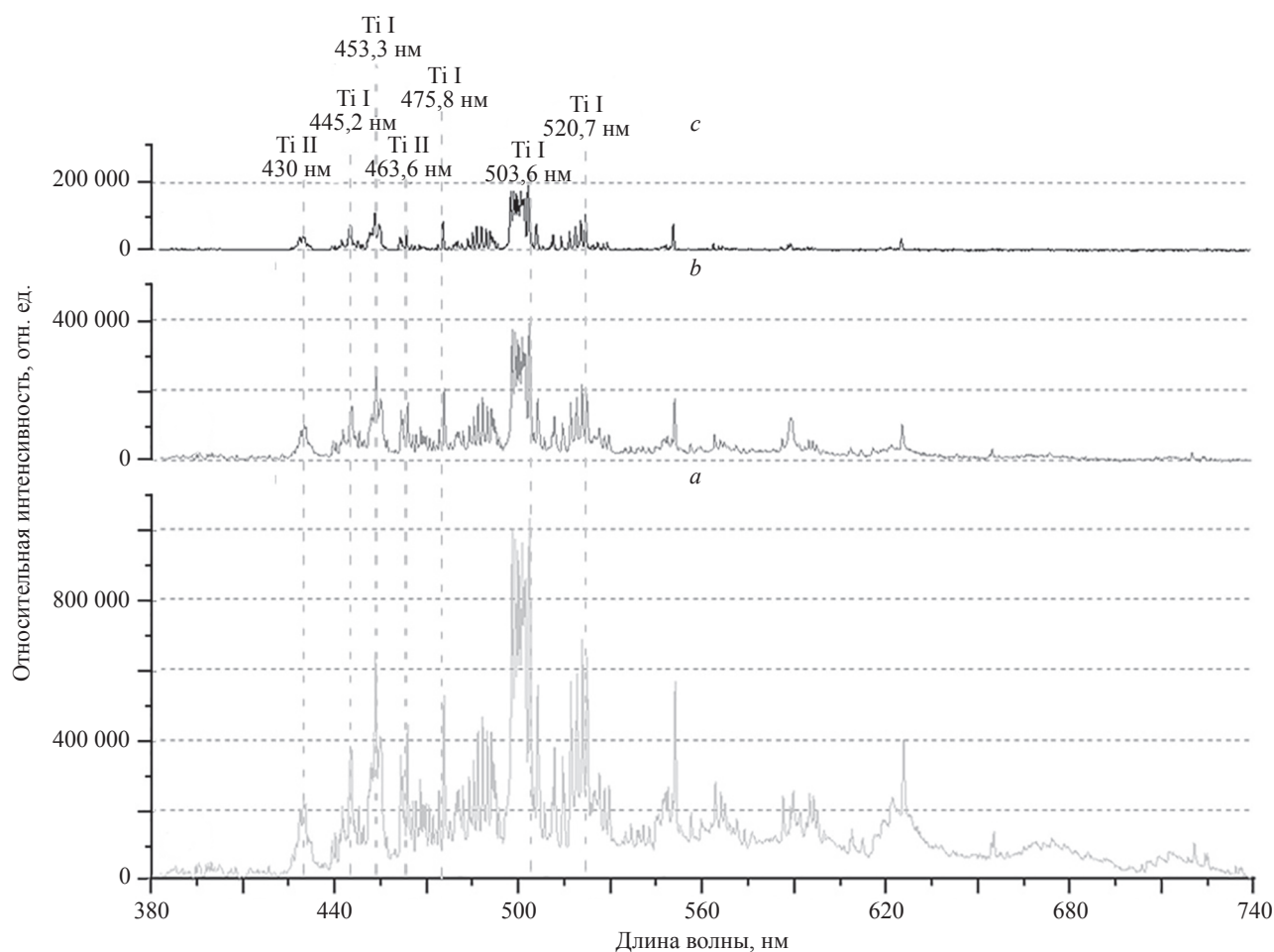


Рис. 3. Эмиссионные спектры излучения плазмы, зарегистрированные в условиях лазерного термоупрочнения титана при импульсной плотности мощности лазерного излучения $4,56 \cdot 10^{11}$ Вт/м² в различных конфигурациях мишеней: 1 (a); 2 (b); 3 (c)

Fig. 3. Emission spectra (non-normalized) laser-induced microplasma recorded under laser hardening of titanium with a power density of $4.56 \cdot 10^{11}$ W/m² in various target configurations: 1 (a), 2 (b), 3 (c)

Таблица. Идентификация спектральных линий эмиссионных спектров излучения лазерно-индуцированной микроплазмы, зарегистрированных в условиях лазерного термоупрочнения титана при импульсной плотности мощности лазерного излучения $4,56 \cdot 10^{11}$ Вт/м² в различных конфигурациях мишеней (рис. 3) по табличным данным из базы NIST¹

Table. Identification of spectral lines of emission spectra of laser-induced microplasma recorded in conditions of laser hardening of titanium at a pulsed laser power density of $4.56 \cdot 10^{11}$ W/m² in various target configurations (Fig. 3) according to data from the NIST database¹

Экспериментально измеренная длина волны, нм	Степень ионизации для нейтральных (Ti I) и однократно ионизированных (Ti II) атомов титана	Расчетная длина волны (по Ритцу) в воздухе, нм	$A_{ki} \times 10^7$ с ⁻¹	E_k , эВ
430,000	Ti II	430,004	1,63	4,063
445,298	Ti I	445,305	—	5,191
453,201	Ti I	453,324	8,83	3,583
463,658	Ti II	463,632	—	3,838
475,525	Ti I	475,812	7,13	4,854
503,428	Ti I	503,646	3,94	3,904
520,691	Ti I	520,785	7,08	4,465

Примечание: знак «—» означает отсутствие значений в базе данных базы NIST для экспериментально измененной длины волны.

¹ Kramida A., Ralchenko Yu., Reader J., and NIST ASD Team (2024). NIST Atomic Spectra Database (ver. 5.12), [Online] [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://physics.nist.gov/asd> [2025, December 3]. National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD. DOI: <https://doi.org/10.18434/T4W30F> (дата обращения: 30.01.2026).

проводился на основе усреднения по трем измерениям спектров.

Наличие выраженных спектральных линий на рис. 2 и 3 в диапазоне 430–521 нм нейтральных и однократно ионизованных атомов титана указывает на формирование ЛИМП в зоне взаимодействия лазерного излучения с металлическим образцом [19]. Идентификация спектральных линий в таблице была проведена в соответствии со справочной базой данных NIST, где A_{ki} — коэффициент Эйнштейна спонтанного излучения для перехода с верхнего энергетического уровня k на нижний уровень i , который определяет вероятность радиационного распада данного возбужденного состояния в единицу времени. Линии с большими значениями A_{ki} рассматриваются как наиболее вероятные и устойчиво регистрируемые. E_k — соответствует энергии верхнего энергетического уровня k , из которого происходит переход. Данный параметр позволяет соотнести наблюдаемые линии с энергетическим состоянием ЛИМП: линии с высокими E_k указывают на высокоэнергетичную электронную компоненту и повышенную температуру возбуждения.

Анализ представленных на рис. 2 спектров показывает, что при лазерной обработке с импульсной плотностью мощности в $3,18 \cdot 10^{11}$ Вт/м² регистрируется только шум, что указывает на недостижение порога абляции. В режимах с импульсной плотностью мощности выше $4,1 \cdot 10^{11}$ Вт/м² регистрируются эмиссионные спектры свечения плазменного факела с ростом числа различных спектральных линий — что может свидетельствовать о превышении порога абляции титана. При сравнительном анализе спектров, представленных на рис. 3 отмечено, что при обработке конфигурации мишени 2 (при добавлении ограничивающего слоя, рис. 3, *b*) устойчиво наблюдается существенное, до 1,5 раз, снижение общей интенсивности свечения плазменного факела при сохранении основных спектральных линий. Добавление графитового порошка (поглощающего слоя) в конфигурацию мишени 3 снижает общую интенсивность свечения плазменного факела до 5 раз (рис. 3, *c*) по сравнению с исходным спектром свечения плазменного факела титана при абляции на воздухе конфигурации мишени 1 (рис. 3, *a*). Отметим, что исследуемый спектральный диапазон (380–740 нм) лежит в зоне максимального пропускания силикатного стекла, таким образом, ограничивающий слой (стекло) оказывает минимальное влияние на общую интенсивность проходящего через него свечения плазменного факела. Побочная причина снижения интенсивности — многократное переотражение излучения плазменного факела внутри стекла. В совокупности с переотражением препятствие свободному расширению плазменного факела стеклом также уменьшает долю излучения, выходящую в направлении приемника излучения спектрометра. Дополнительно следует учитывать, что в замкнутой системе возможно постепенное загрязнение внутренней поверхности стеклянной пластины оседающими частицами продуктов абляции, что снижает ее прозрачность и вносит систематические искажения в регистрируемый приемником спектральный сигнал. Тем не менее, потери излучения, вносимые добавле-

нием ограничивающего слоя, не превышают 10 %, а также не объясняют снижение интенсивности свечения плазменного факела при обработке в присутствии графитного порошка (конфигурация мишени 3).

Наблюдаемое снижение интенсивности свечения плазменного факела в конфигурациях мишени с ограничивающим и поглощающим слоями при сохранении в эмиссионном спектре свечения плазменного факела линий, соответствующих нейтральным и однократно ионизованным атомами титана, можно рассматривать как следствие изменения пространственного распределения термализованной энергии лазерного излучения. Необходимо учесть, что повышение ударного воздействия на термоупрочняемый металл при добавлении в схему обработки ограничивающего и поглощающего слоев является хорошо установленным фактом и лежит в основе метода LSP [2, 3]. В связи с этим представляется возможным, что энергия, передаваемая мишени лазерным излучением, в меньшей степени расходуется на нагрев плазменного факела и в большей степени — на нагрев и ударное воздействие титана, что в рассмотренных условиях регистрируется как снижение общей интенсивности свечения плазменного факела. Дополнительным подтверждением является наблюдаемое после лазерной обработки в пространственно-ограниченных условиях повышение твердости по Виккерсу поверхностного слоя титана с 185 HV до 520 HV.

Заключение

В работе выполнено комплексное исследование лазерного термоупрочнения титана при наносекундном импульсном воздействии с использованием оптической эмиссионной спектроскопии для анализа плазменного факела. Экспериментальные исследования проведены при частоте следования импульсов 80 кГц и плотностях мощности $(3,18–5,73) \cdot 10^{11}$ Вт/м².

Показано, что при плотности мощности $3,18 \cdot 10^{11}$ Вт/м² в конфигурации мишени 3 «титановая пластина — поглощающий слой (порошок графита) — ограничивающий слой (стеклянная пластина)» регистрируется только шум, что соответствует подпороговому режиму, при котором лазерное воздействие приводит преимущественно к нагреву поверхности без развития абляционного процесса. При увеличении мощности выше $4,1 \cdot 10^{11}$ Вт/м² регистрируются эмиссионные спектры свечения плазменного факела с выраженными спектральными линиями, соответствующими нейтральным и однократно ионизованным атомам титана, что однозначно указывает на формирование частично ионизованного парогазового факела.

На основании обнаруженного эффекта повышения твердости титана в работе предложено связать снижение общей интенсивности свечения плазменного факела при лазерной обработке титана в пространственно-ограниченных условиях с трансформацией поглощенной лазерной и тепловой энергий в ударную волну, распространяющуюся в титане. Таким образом, перераспределение термализованной энергии лазерного излучения приводит к снижению общей интенсивности свечения плазменного факела, но способствует фор-

мированию структурных изменений, определяющих повышение твердости поверхностного слоя титана с 185 HV до 520 HV. Полученные сведения позволяют более полно оценить механизмы и динамику процессов

лазерно-индуцированного упрочнения металлов и открывают новые возможности для решения актуальных задач металлообработки и приборостроения.

Литература

1. Shugaev M.V., He M., Levy Y., Mazzi A., Miotello A., Bulgakova N.M., Zhigilei L.V. Laser-induced thermal processes: heat transfer, generation of stresses, melting and solidification, vaporization, and phase explosion // *Handbook of Laser Micro- and Nano-Engineering*. 2020. P. 1–81. doi: 10.1007/978-3-319-69537-2_11-1
2. Drabczyk K., Sobik P., Kulesza-Matlak G., Jeremiasz O. Laser-induced backward transfer of light reflecting zinc patterns on glass for high performance photovoltaic modules // *Materials*. 2023. V. 16. N 24. P. 7538. doi: 10.3390/ma16247538
3. Veiko V.P., Volkov S.A., Zakoldaev R.A., Sergeev M.M., Samokhvalov A.A., Kostyuk G.K., Milyaev K.A. Laser-induced microplasma as a tool for microstructuring transparent media // *Quantum Electronics*. 2017. V. 47. N 9. P. 842. doi: 10.1070/qel16377
4. Wakchaure M.B., Misra M., Menezes P.L. Finite element simulation of the laser shock peening process on 304L stainless steel // *Materials*. 2025. V. 18. N 13. P. 2958. doi: 10.3390/ma18132958
5. Balos S., Pecanac M., Rajnovic D., Janjatovic P., Dramicanin M., Kojic S., Cap F., Krstanovic L., Zulic S. Influence of gel-type confinement for laser shock peening of a Ni-based alloy // *Materials*. 2025. V. 18. N 9. P. 2145. doi: 10.3390/ma18092145
6. Fan P., Jiang G., Hu X., Wang L., Zhang H., Zhong M. Localized in-situ deposition: a new dimension to control in fabricating surface micro/nano structures via ultrafast laser ablation // *Frontiers of Optoelectronics*. 2023. V. 16. N 1. P. 36. doi: 10.1007/s12200-023-00092-1
7. Obata K., Kawabata S., Hanada Y., Miyaji G., Sugioka K. High performance micromachining of sapphire by laser induced plasma assisted ablation (LIPAA) using GHz burst mode femtosecond pulses // *Opto-Electronic Science*. 2024. V. 3. N 6. P. 230053. doi: 10.29026/oes.2024.230053
8. Wang L., Yu K., Cheng X., Cao T., Zhou L. Effect of laser shock peening on microstructure and mechanical properties of laser cladding 30CrMnSiNi2A high-strength steel // *Scientific Reports*. 2023. V. 13. N 1. P. 9971. doi: 10.1038/s41598-023-37060-w
9. Hu J., Liu Y., Ou L., Wang J., Wang H., Qin Z., Chu F. Laser shock response modeling under water confinement: novel method for pyroshock simulation // *AIAA Journal*. 2025. V. 63. N 12. P. 5153–5167. doi: 10.2514/1.j065606
10. Deng W., Wang C., Lu H., Meng X., Wang Z., Lv J., et al. Progressive developments, challenges and future trends in laser shock peening of metallic materials and alloys: a comprehensive review // *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2023. V. 191. P. 104061. doi: 10.1016/j.ijmachtools.2023.104061
11. Schubnell J., Carl E.-R., Sarmast A., Hinterstein M., Preußner J., Seifert M., Kaufmann C., Rußbüldt P., Schulte J. Surface conditions after laser shock peening of steel and aluminum alloys using ultrafast laser pulses // *Materials*. 2023. V. 16. N 20. P. 6769. doi: 10.3390/ma16206769
12. Zhao K., Chen K., Jiang G., Wang X., Sun P., Cui C. Effect of laser shock peening on surface morphology of cold-sprayed pure aluminum coating // *Chinese Journal of Lasers*. 2023. V. 50. N 4. P. 0402004. doi: 10.3788/cjl220638
13. Polyakov D.S., Ramos-Velazquez A., Veiko V.P., Domakova V.A., Arbuzova K.M., Sinev D.A. Nanosecond laser ablation in confined mode of vapor/plasma plume expansion for metal films transfer: theoretical and experimental investigation // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2025. V. 251. P. 127379. doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2025.127379
14. Rahman T.U., Rehman Z.U., Ullah S., Qayyum H., Shafique B., Ali R., Liaquat U., Dogar A.H., Qayyum A. Laser-induced plasma-assisted ablation (LIPAA) of glass: effects of the laser fluence on plasma parameters and crater morphology // *Optics and Laser Technology*. 2019. V. 120. P. 105768. doi: 10.1016/j.optlastec.2019.105768
15. Xu S., Liu B., Pan C., Ren L., Tang B., Hu Q., Jiang L. Ultrafast fabrication of micro-channels and graphite patterns on glass by nanosecond laser-induced plasma-assisted ablation (LIPAA) for

References

1. Shugaev M.V., He M., Levy Y., Mazzi A., Miotello A., Bulgakova N.M., Zhigilei L.V. Laser-induced thermal processes: heat transfer, generation of stresses, melting and solidification, vaporization, and phase explosion. *Handbook of Laser Micro- and Nano-Engineering*, 2020, pp. 1–81. doi: 10.1007/978-3-319-69537-2_11-1
2. Drabczyk K., Sobik P., Kulesza-Matlak G., Jeremiasz O. Laser-induced backward transfer of light reflecting zinc patterns on glass for high performance photovoltaic modules. *Materials*, 2023, vol. 16, no. 24, pp. 7538. doi: 10.3390/ma16247538
3. Veiko V.P., Volkov S.A., Zakoldaev R.A., Sergeev M.M., Samokhvalov A.A., Kostyuk G.K., Milyaev K.A. Laser-induced microplasma as a tool for microstructuring transparent media. *Quantum Electronics*, 2017, vol. 47, no. 9, pp. 842. doi: 10.1070/qel16377
4. Wakchaure M.B., Misra M., Menezes P.L. Finite element simulation of the laser shock peening process on 304L stainless steel. *Materials*, 2025, vol. 18, no. 13, pp. 2958. doi: 10.3390/ma18132958
5. Balos S., Pecanac M., Rajnovic D., Janjatovic P., Dramicanin M., Kojic S., Cap F., Krstanovic L., Zulic S. Influence of gel-type confinement for laser shock peening of a Ni-based alloy. *Materials*, 2025, vol. 18, no. 9, pp. 2145. doi: 10.3390/ma18092145
6. Fan P., Jiang G., Hu X., Wang L., Zhang H., Zhong M. Localized in-situ deposition: a new dimension to control in fabricating surface micro/nano structures via ultrafast laser ablation. *Frontiers of Optoelectronics*, 2023, vol. 16, no. 1, pp. 36. doi: 10.1007/s12200-023-00092-1
7. Obata K., Kawabata S., Hanada Y., Miyaji G., Sugioka K. High performance micromachining of sapphire by laser induced plasma assisted ablation (LIPAA) using GHz burst mode femtosecond pulses. *Opto-Electronic Science*, 2024, vol. 3, no. 6, pp. 230053. doi: 10.29026/oes.2024.230053
8. Wang L., Yu K., Cheng X., Cao T., Zhou L. Effect of laser shock peening on microstructure and mechanical properties of laser cladding 30CrMnSiNi2A high-strength steel. *Scientific Reports*, 2023, vol. 13, no. 1, pp. 9971. doi: 10.1038/s41598-023-37060-w
9. Hu J., Liu Y., Ou L., Wang J., Wang H., Qin Z., Chu F. Laser shock response modeling under water confinement: novel method for pyroshock simulation. *AIAA Journal*, 2025, vol. 63, no. 12, pp. 5153–5167. doi: 10.2514/1.j065606
10. Deng W., Wang C., Lu H., Meng X., Wang Z., Lv J., et al. Progressive developments, challenges and future trends in laser shock peening of metallic materials and alloys: a comprehensive review. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2023, vol. 191, pp. 104061. doi: 10.1016/j.ijmachtools.2023.104061
11. Schubnell J., Carl E.-R., Sarmast A., Hinterstein M., Preußner J., Seifert M., Kaufmann C., Rußbüldt P., Schulte J. Surface conditions after laser shock peening of steel and aluminum alloys using ultrafast laser pulses. *Materials*, 2023, vol. 16, no. 20, pp. 6769. doi: 10.3390/ma16206769
12. Zhao K., Chen K., Jiang G., Wang X., Sun P., Cui C. Effect of laser shock peening on surface morphology of cold-sprayed pure aluminum coating. *Chinese Journal of Lasers*, 2023, vol. 50, no. 4, pp. 0402004. (in Chinese). doi: 10.3788/cjl220638
13. Polyakov D.S., Ramos-Velazquez A., Veiko V.P., Domakova V.A., Arbuzova K.M., Sinev D.A. Nanosecond laser ablation in confined mode of vapor/plasma plume expansion for metal films transfer: theoretical and experimental investigation. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2025, vol. 251, pp. 127379. doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2025.127379
14. Rahman T.U., Rehman Z.U., Ullah S., Qayyum H., Shafique B., Ali R., Liaquat U., Dogar A.H., Qayyum A. Laser-induced plasma-assisted ablation (LIPAA) of glass: effects of the laser fluence on plasma parameters and crater morphology. *Optics and Laser Technology*, 2019, vol. 120, pp. 105768. doi: 10.1016/j.optlastec.2019.105768
15. Xu S., Liu B., Pan C., Ren L., Tang B., Hu Q., Jiang L. Ultrafast fabrication of micro-channels and graphite patterns on glass by

- electrofluidic devices // *Journal of Materials Processing Technology*. 2017. V. 247. P. 204–213. doi: 10.1016/j.jmatprotec.2017.04.028
16. Hayat A., Bashir S., Strickland D., Rafique M.S., Wales B., Al-Tuairqi S., Sanderson J.H. The role of laser fluence and ambient environments on femtosecond laser induced breakdown spectroscopy and on surface morphology of Mg and Zr // *Journal of Applied Physics*. 2019. V. 125. N 8. P. 083302. doi: 10.1063/1.5063897
 17. Egorova X.A., Rozanov K.A., Sidorova A.D., Manokhin S.S., Kolobov Y.R., Nelasov I.V., Sinev D.A. Hardness enhancement by laser modification of titanium under an auxiliary graphite layer // *Applied Physics A Materials Science and Processing*. 2023. V. 129. N 12. P. 855. doi: 10.1007/s00339-023-07119-6
 18. Veiko V.P., Andreeva Y., Van Cuong L., Lutoshina D., Polyakov D., Sinev D., Mikhailovskii V., Kolobov Y.R., Odintsova G. Laser paintbrush as a tool for modern art // *Optica*. 2021. V. 8. N 5. P. 577–585. doi: 10.1364/OPTICA.420074
 19. Asamoah E., Yao H., Wei P., Cong J., Zhu W., Lin Z., et al. Investigating a laser-induced titanium plasma under an applied static electric field // *Spectroscopy*. 2021. V. 36. N 1. P. 33–41.
 20. De Giacomo A. Experimental characterization of metallic titanium-laser induced plasma by time and space resolved optical emission spectroscopy // *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy*. 2003. V. 58. N 1. P. 71–83. doi: 10.1016/s0584-8547(02)00234-3
 - nanosecond laser-induced plasma-assisted ablation (LIPAA) for electrofluidic devices. *Journal of Materials Processing Technology*, 2017, vol. 247, pp. 204–213. doi: 10.1016/j.jmatprotec.2017.04.028
 16. Hayat A., Bashir S., Strickland D., Rafique M.S., Wales B., Al-Tuairqi S., Sanderson J.H. The role of laser fluence and ambient environments on femtosecond laser induced breakdown spectroscopy and on surface morphology of Mg and Zr. *Journal of Applied Physics*, 2019, vol. 125, no. 8, pp. 083302. doi: 10.1063/1.5063897
 17. Egorova X.A., Rozanov K.A., Sidorova A.D., Manokhin S.S., Kolobov Y.R., Nelasov I.V., Sinev D.A. Hardness enhancement by laser modification of titanium under an auxiliary graphite layer. *Applied Physics A Materials Science and Processing*, 2023, vol. 129, no. 12, pp. 855. doi: 10.1007/s00339-023-07119-6
 18. Veiko V.P., Andreeva Y., Van Cuong L., Lutoshina D., Polyakov D., Sinev D., Mikhailovskii V., Kolobov Y.R., Odintsova G. Laser paintbrush as a tool for modern art. *Optica*, 2021, vol. 8, no. 5, pp. 577–585. doi: 10.1364/OPTICA.420074
 19. Asamoah E., Yao H., Wei P., Cong J., Zhu W., Lin Z., et al. Investigating a laser-induced titanium plasma under an applied static electric field. *Spectroscopy*, 2021, vol. 36, no. 1, pp. 33–41.
 20. De Giacomo A. Experimental characterization of metallic titanium-laser induced plasma by time and space resolved optical emission spectroscopy. *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy*, 2003, vol. 58, no. 1, pp. 71–83. doi: 10.1016/s0584-8547(02)00234-3

Авторы

Егорова Ксения Андреевна — инженер-исследователь, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, [sc 58625791800](https://orcid.org/0000-0002-4228-0392), x_egorova@itmo.ru

Салех Хамза — инженер-исследователь, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, <https://orcid.org/0009-0001-8454-1343>, hamzasaleh554@gmail.com

Петров Андрей Анатольевич — кандидат технических наук, доцент, доцент, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, [sc 55866182900](https://orcid.org/0000-0002-2853-6478), <https://orcid.org/0000-0002-2853-6478>, aapetrov@itmo.ru

Синев Дмитрий Андреевич — кандидат технических наук, доцент, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, [sc 55547026700](https://orcid.org/0000-0002-6274-1491), <https://orcid.org/0000-0002-6274-1491>, sinev@itmo.ru

Authors

Xenia A. Egorova — Research Engineer, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, [sc 58625791800](https://orcid.org/0000-0002-4228-0392), x_egorova@itmo.ru

Hamza Saleh — Research Engineer, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, <https://orcid.org/0009-0001-8454-1343>, hamzasaleh554@gmail.com

Andrey A. Petrov — PhD, Associate Professor, Associate Professor, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, [sc 55866182900](https://orcid.org/0000-0002-2853-6478), <https://orcid.org/0000-0002-2853-6478>, aapetrov@itmo.ru

Dmitry A. Sinev — PhD, Associate Professor, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, [sc 55547026700](https://orcid.org/0000-0002-6274-1491), <https://orcid.org/0000-0002-6274-1491>, sinev@itmo.ru

Статья поступила в редакцию 11.02.2026
Одобрена после рецензирования 03.03.2026
Принята к печати 18.05.2026

Received 11.02.2026
Approved after reviewing 03.03.2026
Accepted 18.05.2026



Работа доступна по лицензии
Creative Commons
«Attribution-NonCommercial»