

**ФИЗИКА, МЕХАНИКА, ХИМИЯ**

doi: 10.51639/2713-0576\_2024\_4\_4\_39

УДК 535.621(075.8)

ГРНТИ 29.31.29

ВАК 1.3.19

**Исследование лазерного абляционного разрушения металлических поверхностей:  
методология, приложения и перспективы**<sup>1</sup>Урасов К. В., \*<sup>1,2</sup>Шеманин В. Г.

<sup>1</sup>-Новороссийский политехнический институт (филиал) Кубанского государственного технологического университета, Новороссийск, 353900, Россия,  
г. Новороссийск, ул. Карла Маркса, дом 20

<sup>2</sup>- Новороссийский филиал Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова (НФ БГТУ им. В.Г. Шухова), 353919, Россия,  
г. Новороссийск, Мысхакское шоссе, дом 75

e-mail: \* [tytnet22nekogo@mail.ru](mailto:tytnet22nekogo@mail.ru), [vshemanin@mail.ru](mailto:vshemanin@mail.ru)**Аннотация**

Исследование лазерного абляционного разрушения поверхности металлических образцов при мощном энергоснабжении на мишени представляет интерес для разработки методов обработки поверхности и оценки лучевой прочности этих образцов. В работе экспериментально измерены пороговые значения плотности энергии при вероятности 0 и будут  $F_{пор} = 5.1$  кДж/см<sup>2</sup> по ГОСТ, а при вероятности 0.5 –  $F_{1/2} = 57.8$  кДж/см<sup>2</sup> могут использоваться для построения кривых динамики лучевой прочности. Вероятность достигает величины 1 при пороговом значении плотности энергии  $F=93.5$  и остается таким до максимального значения 170 кДж/см<sup>2</sup>. Эти данные являются физическими константами для образцов такого титанового сплава.

*Ключевые слова:* лазер, разрушение поверхностей, прочность, образец, обработка поверхности, лазерная абляционн, лучевая прочность.

**Введение**

Вопрос обработки поверхности металлов с помощью лазерной абляции на протяжении последних десятилетий вызывает большой интерес не только у исследователей, но и у специалистов прикладных областей. Мощное лазерное излучение позволяет проводить высокоточную обработку, модификацию и структурирование поверхностных слоев металлических образцов. Нарастающий спрос на инновационные техники обработки материалов требует глубокого понимания механизма лазерной абляции и характеристик, влияющих на разрушение поверхности металлов. Исследование, посвященное лазерному абляционному разрушению титановых сплавов, представляет собой важный шаг к созданию

оптимальных технологий обработки и прогнозирования надежности конструкционных материалов.

Сегодня широкое внедрение лазеров в промышленных процессах обусловлено тем, что использование мощных импульсов лазерного излучения позволяет достичь высоких уровней точности формирования поверхности. При этом механика разрушения и воздействия лазерного излучения требует дальнейших исследований.

Целью представленной работы является создание лазерной абляционной станции, оснащенной автоматизированной системой анализа и управления параметрами лазерного излучения и оценка пороговой плотности энергии абляционного разрушения образцов титанового сплава.

### **Лазерная абляция**

Лазерная абляция подразумевает процесс испарения, плавления или выброса материала поверхности под воздействием лазерного излучения с высокой плотностью энергии. В области обработки металлов она применяется для достижения различных целей, таких как микро- и макромодификация структуры поверхности, улучшение механических свойств, придание материалу сопротивления коррозии или радиационным повреждениям.

Особую роль исследования играют в получении оптимальных параметров лазерного импульса (таких как длительность, интенсивность и длина волны), которые обеспечивают наилучшее качество обработки поверхности. Например, титановый сплав, обладающий высокой биосовместимостью, устойчивостью к коррозии и отличными механическими свойствами, широко применяется в медицинских и аэрокосмических приложениях, где надежность материала напрямую влияет на безопасность.

Лазерная обработка поверхности титановых материалов может значительно изменить такие свойства, как микротвердость, шероховатость и структура зерен. Однако для успешного контроля процесса необходимо не только изучение механизма абляционного разрушения, но и разработка математической модели, которая позволит прогнозировать результаты обработки и надежность образцов. Исследование структуры поверхностного слоя и физико-механических характеристик материала после лазерной обработки позволит определить оптимальные режимы обработки для максимизации микротвердости и достижения необходимой глубины проплавления. Результаты исследований дополняют построение статистической модели лазерного абляционного разрушения титановых образцов для прогнозирования их надежности образцов и лучевой прочности.

### **Основные положения статистической теории лазерного абляционного разрушения и прогнозирование лучевой прочности**

Для построения модели лазерного абляционного разрушения используется статистический подход, учитывающий случайное распределение дефектов на поверхности металла, их разновидности и размеры. Согласно теории [1], вероятность разрушения поверхности металла под действием лазера во многом определяется дефектной структурой материала. Рассмотрим несколько ключевых предположений, на которых основывается статистическая модель [2, 3]:

1. Размеры дефектов существенно меньше зоны лазерного взаимодействия.
2. Дефекты распределяются по поверхности и объему случайным образом.
3. Концентрация и типы дефектов определяют пороговые значения интенсивности лазерного излучения.

На основе данных предположений разработана математическая модель, описывающая вероятность разрушения материала как функцию от максимальной интенсивности лазера, объема фокусировки и физических параметров дефектов. Основным уравнением, характеризующим надежность материала при воздействии лазера, является выражение (1), которое связывает вероятность отсутствия разрушения с характеристиками лазерного излучения, параметров материала и дефектов:

$$Q(I, v, p) = \exp\left[-v \sum_{s=1}^L c_s K\left(\frac{I}{I_s(p)}\right)\right] \quad (1)$$

Оценка пороговых характеристик материала предполагает определение минимальной плотности энергии, вызывающей абляцию или разрушение поверхности. В работе предлагается новый подход к измерению пороговой плотности энергии, основанный на статистической обработке экспериментальных данных. Для этого проводятся лабораторные испытания. Они включают в себя варьирование таких параметров, как длительность импульса, плотность энергии и объем фокусировки. Данные эксперименты позволяют выявить зависимости между структурными изменениями поверхности и установленными параметрами лазерного облучения.

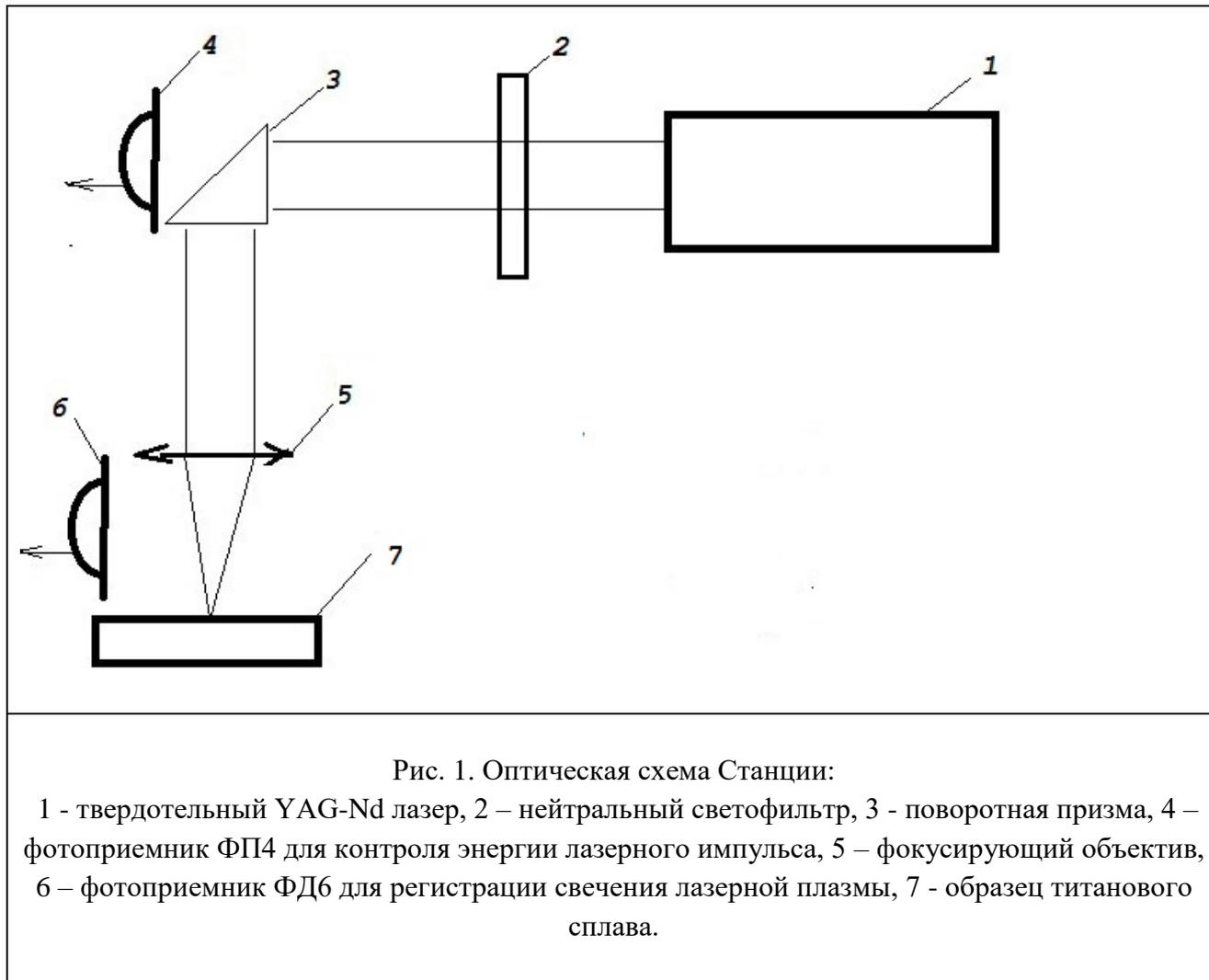
Пороговые характеристики энергии являются одним из ключевых факторов, обеспечивающих предсказуемость обработки. Они также позволяют минимизировать количество экспериментов, благодаря чему возрастает эффективность оценки надежности и прочности материалов.

### **Создание лабораторной лазерной абляционной станции для обработки поверхности образцов титанового сплава**

Для экспериментальной обработки поверхности образцов титанового сплава при лазерной абляции была использована лабораторная лазерная абляционная станция, далее Станция, которая была изготовлена на базе экспериментальной установки из [1, 2, 5, 9, 10]. Оптическая схема Станции приведена на Рис. 1. В этой Станции излучение YAG: Nd лазера 1 с импульсами длительностью 1,6 мс и энергиями до 1,2 Дж на длине волны 1064 нм поворачивалось призмой 3 и фокусировалось линзовым объективом 5 на поверхность образца 7. Наличие пробоя при лазерной абляции регистрировалось, как и ранее в [2, 5], по измерению собственного свечения факела лазерной плазмы фотоприемником ФПб на осциллографе АКТАКОМ ADS-2121М на линии с ПК.

Изменение плотности энергии лазерного импульса в диапазоне 10 ...170 кДж/см<sup>2</sup> достигалось как выбором фокусного расстояния объектива 5, так и ослаблением калиброванными нейтральными светофильтрами НС 2. Часть излучения лазера 1 на длине волны 1064 нм через нейтральный светофильтр направлялась на фото приемник ФП4 типа ФД-24К для контроля энергии лазерного импульса и синхронизации работы Станции [1, 2]. Сигналы со всех измерительных каналов регистрировались на том же осциллографе АКТАКОМ ADS-2121М, работающем на линии с ПК.

На этой Станции были выполнены соответствующие измерения пороговых значений плотности энергии при заданных значениях энергии падающего лазерного излучения и условиях фокусировки (размерный эффект) при разрушении образцов титанового сплава.



На первом этапе, как это подробно описано в [2, 5, 11], были выполнены калибровочные эксперименты для фотоприемных модулей. Эти результаты дали возможность получать из амплитуды импульса с фотодиодов ФП4 и ФП6 значение энергии лазерного импульса  $E$  и вычислить плотность энергии  $F=E/A$ , где  $A$  – площадь фокального пятна фокусирующего линзового объектива. В дальнейших экспериментах плотность энергии в лазерном импульсе рассчитывалась как произведение пропускания светофильтра НС на длине волны 1064 нм и максимального значения  $F$  для данной выборки измерений. Чтобы генерировать кривую вероятности лазерного абляционного разрушения необходимо сделать не менее 20 выстрелов при заданной энергии импульса и измерить число событий лазерного абляционного разрушения. Устанавливая новое значение плотности энергии и повторяя предыдущий процесс измерений, последовательно проходим весь диапазон значений вероятности лазерного абляционного разрушения от 0 до 1. Если кривая вероятности лазерного абляционного разрушения от плотности энергии на графике не получается гладкой, то это означает, что недостаточно измеренных данных или значения плотности энергии статистически неразличимы из-за недостаточной точности измерений. Правильная интерпретация этой кривой вероятности лазерного абляционного разрушения важна для

точного определения пороговых характеристик лазерного абляционного разрушения образцов титанового сплава.

Эти экспериментально измеренные пороговые значения плотности энергии взяты из графика на Рис. 2 при вероятности 0 и будут  $F_{пор} = 5.1$  кДж/см<sup>2</sup> по ГОСТ [6, 7], а при вероятности 0.5 –  $F_{1/2} = 57.8$  кДж/см<sup>2</sup> могут использоваться для построения кривых динамики надежности как и ранее в [2, 5]. Вероятность достигает величины 1 при пороговом значении плотности энергии  $F=93.5$  и остается таким до максимального значения 170 кДж/см<sup>2</sup>. Эти данные являются физическими константами для образцов такого титанового сплава.

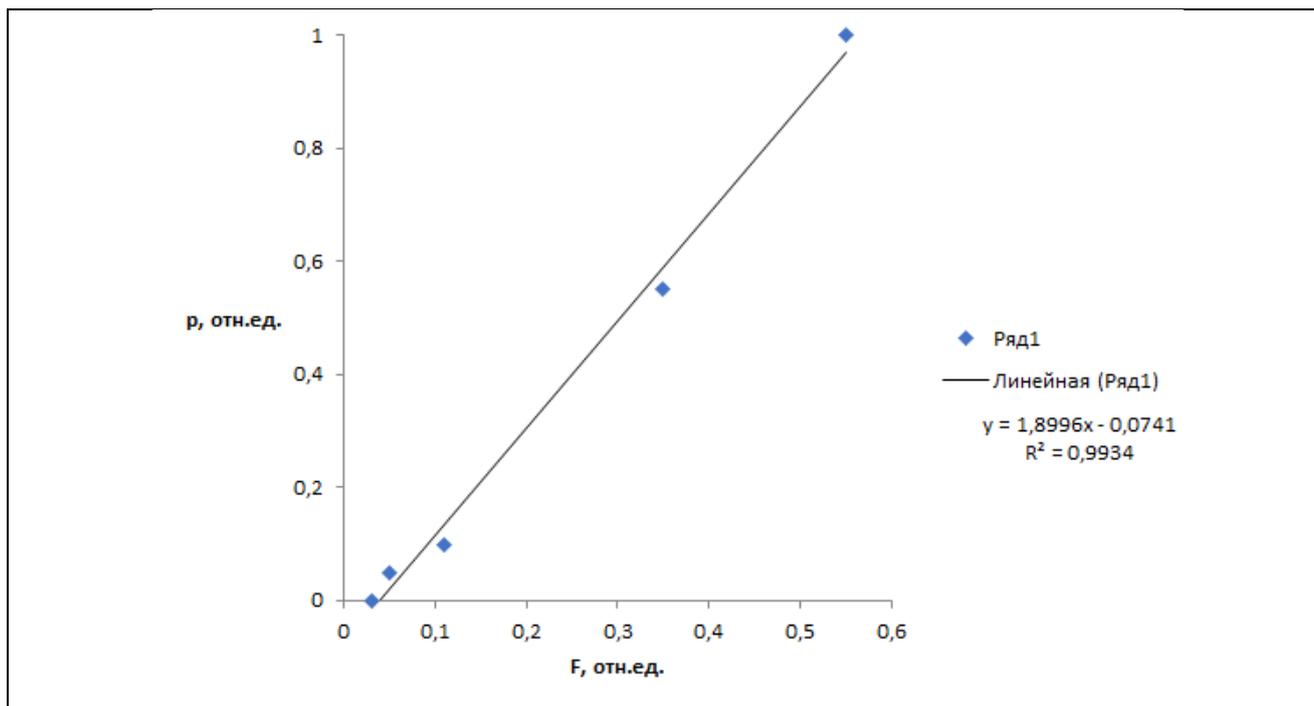


Рис. 2. График кривой вероятности лазерного абляционного разрушения для титанового образца №1

Широкое использование титановых материалов требует исследования механизма и параметров лазерного абляционного разрушения в диапазоне импульсной плотности энергии до 170 кДж/см<sup>2</sup> [4, 8, 11] и знания зависимости скорости такого разрушения от параметров лазерного импульса и физических характеристик материала. В настоящее время такие зависимости скорости такого разрушения от параметров лазерного импульса и физических характеристик материала в широких диапазонах их изменения определяются на основании численных расчетов, использующих различные физико-математические модели взаимодействия лазерного импульса с веществом. Лазерная абляция (испарение) образцов микросекундными импульсами с плотностью энергии более 10 кДж/см<sup>2</sup> сопровождается образованием низкотемпературной плазмы (характерная температура порядка 10<sup>4</sup> К), в которой может поглощаться значительная часть энергии лазерного импульса [3, 4, 12, 13], что влияет как на эффективность абляционного разрушения, так и параметры лазерного факела. Причем характеристики, определяющие оптическую

толщину плазмы факела, - концентрация электронов, температура и размер плазменного облака – значительно изменяются в течение лазерного импульса, и это делает описание динамики поглощения лазерного излучения очень сложной задачей.

### **Особенности экспериментальной платформы**

Для реализации поставленных задач в исследовании используется лабораторная лазерная абляционная станция, оснащенная системой контроля и диагностики. Уникальность станции заключается в её способности точно регулировать параметры лазерного излучения и производить бесконтактный анализ поверхности с высокой степенью точности. Этапы исследований включают калибровку системы, тестирование режимов лазерной обработки и определение оптимальных условий для работы с образцами титановых сплавов.

Результаты данной работы имеют прикладное значение для прогнозирования и оптимизации лазерной обработки материалов. Полученные экспериментальные данные и усовершенствованная модель разрушения могут быть использованы:

1. Для создания техники, позволяющей минимизировать объем экспериментов.
2. Для оценки долгосрочной надежности материалов в условиях радиационного или механического воздействия.
3. При разработке новых методов контроля качества материалов с использованием их пороговых характеристик.

Кроме того, новаторский подход, предложенный в данной работе, позволяет проводить сравнение различных образцов металлов, определяя их способность сопротивляться абляционному разрушению. Таким образом, предложенная методика может способствовать улучшению технологических процессов, связанных с лазерной обработкой и повышением эксплуатационных характеристик металлов.

### **Заключение**

Лазерная абляция, несмотря на её сложный физический механизм, представляет собой мощный инструмент для модификации структуры поверхности металлов. Создание математических и экспериментальных подходов для прогнозирования разрушения и оценки надежности металлических образцов является важным вкладом в развитие новых технологий. Проведённые исследования позволяют не только оптимизировать процессы лазерной обработки, но и проливают свет на механизмы взаимодействия лазера с поверхностью из высокопрочных материалов, таких как титановые сплавы. Перспективные возможности применения результатов включают улучшение характеристик материалов для авиации, медицины, энергетики и других высокотехнологичных отраслей.

### **Конфликт интересов**

Авторы статьи заявляют, что у них нет конфликта интересов по материалам данной статьи с третьими лицами, на момент подачи статьи в редакцию журнала, и им ничего не известно о возможных конфликтах интересов в настоящем со стороны третьих лиц.

**Список источников**

- 1 Анисимов, С.И. Избранные задачи теории лазерной абляции [Текст] / С.И. Анисимов, Б.С. Лукьянчук // УФН. - 2002.- Т.172. -вып. 3. - С. 301- 333
- 2 Voronina, E.I. Laser ablation thresholds of polymer vaterial studies [Текст] / E.I. Voronina, V.P. Efremov, V.E. Privalov, V.G.Shemanin // Proceedings of SPIE. - 2003. -V. 5381.-P. 178-185
- 3 Анисимов, С. И. Действие излучения большой мощности на металлы [Текст] / С. И. Анисимов, Я. А. Имас, Г. С. Романов, Ю. В. Ходыко / Под ред. А. М. Бонч-Бруевича и М. А. Ельяшевича. - Москва: Наука, 1970. - 272 с.
- 4 Воронина, Э.И. Оптическая прочность полимерных материалов при их лазерной абляционной деструкции [Текст] / Э.И. Воронина, В.П. Ефремов, В.Е. Привалов, П.В. Чартий, В.Г. Шеманин // Журнал технической физики – 2009. -Т.79. – вып. 5. -С. 143 – 145
- 5 Efremov, V.P. Polymer materials laser destruction thresholds studies [Текст] / V.P.Efremov, V.E. Privalov, P.V. Skripov, P.V. Charty, V.G. Shemanin// Proceedings of SPIE. - 2004. - V. 5447. - P. 234 - 241
- 6 ГОСТ Р 58369-2019 «Лазеры и лазерное оборудование. Методы определения порога лазерного разрушения». Часть 1. 2019
- 7 ГОСТ Р 58370-2019 «Лазеры и лазерное оборудование. Методы определения порога лазерного разрушения». Часть 2. 2019
- 9 Воронина, Э.И. Исследование лазерной абляции на полимерных мишенях в диапазоне давлений 0.01 – 5 атм [Текст] / Э.И. Воронина, П.В. Чартий, В.Г. Шеманин // Физика экстремальных состояний вещества – 2005. Под ред. В.Е. Фортова и др. Черноголовка. ИПХФ РАН. 2005. С. 36, 37
- 9 Морозова Е.А., Прокаев А.Е., Калюжная С.А., Мамышев А.Р. Современные магниевые и титановые сплавы, применяемые в авиастроении // Актуальные исследования. 2022. №16 (95), С. 10-14.
- 10 Морозова, Е.А. Влияние импульсной лазерной обработки на изменение структуры и и свойств титановых сплавов [Текст] / Е.А. Морозова, М.Н. Алмурзин, Д.Д. Правосудов, Д.И. Банин // Актуальные исследования. - 2023. - №8 (138). - С. 12-16.
- 11 Либенсон, М.Н. Взаимодействие лазерного излучения с веществом (силовая оптика). Часть II. Лазерный нагрев и разрушение материалов [Текст] / М.Н. Либенсон, Е.Б. Яковлев, Г.Д. Шандыбина // Под общ.ред. В.П. Вейко – СПб: НИУ ИТМО. - 2014. –181с.
- 12 Гуськов, К.С. Эффективность абляционного нагружения и предельная глубина разрушения материала под действием мощного лазерного импульса [Текст] / К.С. Гуськов, С.Ю. Гуськов //Квантовая электроника. – 2001. -Т. 31. - № 4. -С. 305 – 310.
- 13 Чартий, П.В. Исследование плазмообразования на полимерной мишени приимпульсномлазерномэнерговыведении [Текст] / П.В. Чартий, Е.И. Череп, В.Г. Шеманин// Физика экстремальных состояний вещества, Черноголовка, ИПХФ РАН. 2004. С. 128-130
- 14 Григорьянц, А.Г. Методы поверхностной лазерной обработки. [Текст] / А.Г. Григорьянц, А.Н. Сафонов. В 7 кн. Кн.3. М.: Высшаяшкола, - 1987. 191 с.

## Investigation of laser ablation destruction of metal surfaces: methodology, applications and perspectives

<sup>1</sup>Urasov K. V., \*<sup>1,2</sup>Shemanin V. G.

<sup>1</sup>*Novorossiysk Polytechnic Institute (branch) Kuban State Technological University, Novorossiysk, 353900, Russia, Novorossiysk, Karl Marx str., house 20*

<sup>2</sup>*Novorossiysk branch of Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov (NF BSTU named after V.G. Shukhov), 353919, Russia, Novorossiysk, Myshakskoe highway, house 75*

e-mail: [\\*tytnet22nekogo@mail.ru](mailto:*tytnet22nekogo@mail.ru), [vshemanin@mail.ru](mailto:vshemanin@mail.ru)

### Abstract

The study of laser ablation destruction of the metal samples surface with high-power energy release on the target is of interest for the development of surface treatment methods and estimates of the radiation strength of these samples. In this work the threshold values of energy density were experimentally measured at probability 0 and will be  $F_p = 5.1 \text{ kJ/cm}^2$  according to GOST RU, and at probability 0.5 –  $F_{1/2} = 57.8 \text{ kJ/cm}^2$  can be used to construct curves of the beam strength dynamics. The probability reaches a value of 1 at a threshold value of energy density  $F = 93.5$  and remains so until a maximum value of  $170 \text{ kJ/cm}^2$ . These data are physical constants for samples of such a titanium alloy.

*Key words:* laser, surface destruction, strength, sample, surface processing, laser ablation, beam strength.

### References

- 1 Anisimov, S.I. Selected problems of laser ablation theory [Text] / S.I. Anisimov, B.S. Lukyanchuk // UFN. - 2002.- Vol. 172. - Issue 3. - P. 301- 333
- Voronina, E.I. Optical strength of polymer materials during their laser ablation destruction [Text] / E.I.
- 2 Voronina, E.I. Laser ablation thresholds of polymer material studies [Text] / E.I. Voronina, V.P. Efremov, V.E. Privalov, V.G. Shemanin // Proceedings of SPIE. - 2003. -Vol. 5381.-P. 178-185
- 3 Anisimov, S.I. The effect of high-power radiation on metals [Text] / S.I. Anisimov, Y.A. Imas, G.S. Romanov, Yu.V. Khodyko; Ed. A.M. Bonch-Bruevich and M.A. Yelyashevich. - Moscow: Nauka, 1970. - 272 p.
- 4 Voronina, V.P. Efremov, V.E. Privalov, P.V. Charty, V.G. Shemanin // Journal of Technical Physics – 2009. -Vol. 79. – Issue 5. -P. 143 – 145
- 5 Efremov, V.P. Polymer materials laser destruction thresholds studies [Text] / V.P. Efremov, V.E. Privalov, P.V. Skripov, P.V. Charty, V.G. Shemanin // Proceedings of SPIE. - 2004. - Vol. 5447. - P. 234 - 241
- 6 GOST R 58369-2019 "Lasers and laser equipment. Methods for determining the laser destruction threshold."Part 1. 2019
- 7 GOST R 58370-2019 "Lasers and laser equipment. Methods for determining the laser destruction threshold."Part 2. 2019

- 9 Voronina, E.I. Study of laser ablation on polymer targets in the pressure range of 0.01 – 5 atm [Text] / E.I. Voronina, P.V. Charty, V.G. Shemanin // *Physics of Extreme States of Matter* – 2005. Ed. V.E. Fortov et al. Chernogolovka.IPHF RAN. 2005. P. 36, 37
- 9 Morozova E.A., Prokajev A.E., Kaluzhnaya S.A., Mamyshev A.R. Modern magnesium and titanium alloys used in aviation // *Current Research*. 2022. No. 16 (95), P. 10-14.
- 10 Morozova, E.A. The impact of pulsed laser treatment on the structure and properties of titanium alloys [Text] / E.A. Morozova, M.N. Almursin, D.D. Pravosudov, D.I. Banin // *Current Research*. - 2023. - No. 8 (138). - P. 12-16.
- 11 Libenson, M.N. Interaction of laser radiation with matter (power optics). Part II. Laser heating and material destruction [Text] / M.N. Libenson, E.B. Yakovlev, G.D. Shandybina // Edited by V.P. Veiko – St. Petersburg: National Research University ITMO. - 2014. – 181 p.
- 12 Guskov, K.S. Efficiency of ablative loading and the limiting depth of material destruction under the influence of a powerful laser pulse [Text] / K.S. Guskov, S.Yu. Guskov // *Quantum Electronics*. – 2001. - Vol. 31. - No. 4. - P. 305 – 310.
- 13 Charty, P.V. Study of plasma formation on a polymer target during pulsed laser energy deposition [Text] / P.V. Charty, E.I. Cherep, V.G. Shemanin // *Physics of Extreme States of Matter*, Chernogolovka, IPCP RAS. 2004. P. 128-130
- 14 Grigoryants, A.G. Methods of surface laser processing. [Text] / A.G. Grigoryants, A.N. Safonov. In 7 books. Book 3. Moscow: Higher School, - 1987. 191 p.