



# Управление твердостью поверхностного слоя титановых образцов за счет аддитивной лазерной обработки

К.А. Егорова<sup>1</sup>, К.А. Розанов<sup>1</sup>, А.И. Киян<sup>2</sup>, Д.А. Синева<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup> INSCIENCE, Санкт-Петербург, Россия

Представлены результаты экспериментальных исследований по подбору оптимальных параметров лазерного излучения для повышения твердости и износостойкости модельного титанового образца. Работа проведена с целью поиска возможностей управления механическими и функциональными параметрами титана методом аддитивной лазерной микрообработки поверхности под вспомогательным слоем графита при воздействии лазерного излучения ближнего ИК-диапазона. Результаты испытаний демонстрируют повышение твердости поверхностного слоя обработанного титана в 9,3 раз и снижение скорости абразивного изнашивания по сравнению с исходным образцом примерно в 2 раза.

**Ключевые слова:** повышение твердости, увеличение износостойкости, лазерная термохимия, лазерное микроструктурирование титана

Статья получена: 24.10.2022

Статья принята: 19.12.2022

## ВВЕДЕНИЕ

Непрерывное повышение производительности и эффективности существующих методик, а также модернизация и продление срока службы используемых устройств представляют собой существенный вызов для инновационной экономики. Примером может служить поиск новых методов повышения

# Features of Additive Laser Processing for the Surface Layer Hardness Increase on Titanium Samples

X. A. Egorova<sup>1</sup>, K. A. Rozanov<sup>1</sup>, A. I. Kiian<sup>2</sup>, D. A. Sineva<sup>1</sup>

<sup>1</sup> ITMO University, Saint Petersburg, Russia

<sup>2</sup> INSCIENCE, Saint Petersburg, Russia

This article presents the research results on the control of the mechanical and functional titanium parameters by an additive surface laser micro-treatment with an additional graphite layer under the influence of near-IR laser radiation. The results of experimental studies on selection of the optimal laser radiation parameters for increasing the hardness and wear resistance of a model titanium sample are provided. The results demonstrate significantly increased hardness of the treated area (up to 9.3 times) and a decreased abrasive wear resistance rate by about 2 times compared to the original sample.

**Keywords:** hardness increase, wear resistance enhancement, laser thermochemistry, laser micro-structuring of titanium

Received on: 24.10.2022

Accepted on: 19.12.2022

## INTRODUCTION

Continuous improvement in the performance and efficiency of existing methods, as well as upgrading and extending the service life of the devices used, represent a significant challenge for the innovation-based economy. A good example can be the search for new methods to increase the wear resistance of assemblies and parts subject to the frictional wear, including the cutting edges of guillotine-type knives, scissors, cutters, etc. Since the wear resistance is directly related to the hardness parameter of the part, the scientific challenge is in the need for an experimental search for methods and approaches to increasing the hardness of the surface layers of functional alloys.

It is well-known that the traditional quenching methods, i.e. increase of the material hardness during the



износостойкости узлов и деталей, подвергающихся фрикционному износу, включая режущие кромки гильотинных ножей, ножниц, фрез и пр. Поскольку устойчивость к износу напрямую связана с параметром твердости детали, научная проблема заключается в необходимости экспериментального поиска методов и подходов к повышению твердости поверхностных слоев функциональных сплавов.

Известно, что традиционные методы закалки (повышения твердости материалов при изотермическом нагреве) требуют проведения последующей процедуры отжига для уменьшения остаточных напряжений на поверхности металла [1, 2]. Частично эти недостатки могут быть компенсированы использованием методов поверхностной локальной лазерной закалки и термоупрочнения [3–5]. С другой стороны, методики повышения твердости на основе лазерного и нелазерного напыления высокотвердых материалов (карбидных, алмазоподобных и других покрытий) позволяют достигать нужных результатов, но при этом ограничены фактом небольшой растворимости графита в металле и требуют большего количества манипуляций [6, 7]. Компенсировать недостатки указанных технологий можно с помощью аддитивных лазерных методов, позволяющих сформировать поверхностную структуру с нужными геометрическими и физико-химическими свойствами за счет комбинирования параметров и схем лазерной обработки и вспомогательных материалов [8–10]. В настоящей работе представлены результаты экспериментального исследования возможностей, которые предоставляет методика лазерного формирования поверхностных слоев с повышенными значениями твердости и износостойкости, за счет обработки металлической детали под слоем графитного порошка в сжатых условиях.

## МАТЕРИАЛЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ОБОРУДОВАНИЕ

В качестве модельного материала для исследования был выбран технический титан марки ВТ1-0, широко применяемый как функциональный металл благодаря высокой прочности, гипоаллергенности и биологической совместимости, а также высокой изученности механизмов термического и термохимического лазерного воздействия в воздушной среде [11, 12]. В работе использованы пластины толщиной порядка 1 мм; структурирование более тонких деталей по предлагаемой методике также возможно, однако для сохранения геометрии детали малой толщины необходимо использовать

isothermal heating, require a subsequent annealing procedure to reduce residual stresses on the metal surface [1, 2]. Such shortcomings can be partly compensated by application of the surface local laser quenching and thermal strengthening methods [3–5]. On the other part, the hardening methods based on the laser and non-laser deposition of highly rigid materials (carbide, diamond-like, and other coatings) make it possible to achieve the desired results. However, they are limited by the low graphite solubility in the metal and require more production steps [6, 7]. It is possible to compensate for shortcomings of the mentioned technologies using the additive laser methods that make it possible to evolve a surface structure with the desired geometric and physicochemical properties by combining the laser processing parameters and schemes with auxiliary materials [8–10]. This paper presents the experimental study results of the possibilities provided by the laser formation of surface layers with the increased hardness and wear resistance values due to the metal part processing under a layer of graphite powder in the compressed conditions.

## RESEARCH MATERIALS AND EQUIPMENT

Grade2 commercial titanium being widely used as a functional metal due to its high strength, hypoallergenicity and biological compatibility, as well as high exploration state of the thermal and thermochemical laser exposure mechanisms in the air, was selected as a model material for the study [11, 12]. In the present research the plates with a thickness of about 1 mm were used. Structuring of thinner parts according to the proposed method is also possible; however, in order to preserve the geometry of a part with small thickness, it is necessary to use additional design clamping devices to avoid the occurrence of thermomechanical deformations.

Prior to the laser processing, the parts were treated by the abrasive paper with various grain sizes (P600–P2500). The final polishing was performed with the felt discs using the Luxor corundum paste with various sizes of structural elements (from 0.5  $\mu\text{m}$  to 0.1  $\mu\text{m}$ ) and a Dremel 300 mini-drill. All samples were cleaned in an ultrasonic bath with distilled water for 20 minutes to remove the polishing paste particles.

The samples were structured using a commercially available laser machining system based on a pulsed ytterbium optical fiber laser (Minimarker-2 produced by Laser Center LLC), with a power of up to 20 W and an emission wavelength of 1070 nm. Laser radiation was focused on the titanium sample surface into a spot with the diameter of about 50  $\mu\text{m}$ ; irradiation was carried out in the air.

The morphology of the obtained structures was studied using a Carl Zeiss Axio Imager A1.m optical microscope.

дополнительные конструкторско-прижимные приспособления во избежание возникновения термомеханических деформаций.

Перед проведением лазерной обработки детали были подвергнуты обработке шлифовальной бумагой различной зернистости (600–2500P). Финишная полировка была произведена войлочными дисками с использованием корундовой пасты Lухот с различными размерами структурных элементов (от 0,5 мкм до 0,1 мкм) и мини-дрели Dremel 300. Все образцы были очищены в ультразвуковой ванне с дистиллированной водой в течение 20 минут для удаления частиц полировочной пасты.

Структурирование образцов было проведено с использованием коммерчески доступной лазерной технологической установки на базе импульсного иттербиевого волоконного лазера (Мини-маркер-2 производства ООО «Лазерный центр»), мощностью до 20 Вт и длиной волны излучения 1070 нм. Лазерное излучение было сфокусировано на поверхности титанового образца в пятно диаметром порядка 50 мкм, облучение проводилось на воздухе.

Изучение морфологии полученных структур проводилось с помощью оптического микроскопа Carl Zeiss Axio Imager A1.m. Испытание на твердость проводилось с помощью твердомера ПМТ-3 методом Виккерса под действием статической нагрузки. В данном методе индентор – четырехгранная пирамида с квадратным основанием и имеет угол между гранями при вершине, равный 136°.

Исследование механической устойчивости было выполнено с применением испытательного стенда для проведения исследований на фрикционный износ и роликовым контртелом. Для приближения условий испытаний к эксплуатационным был подобран класс материала контртела, соответствующим материалам будущего рабочего взаимодействия (алюминий), дополнительно были проведены исследования на абразивный износ с применением контртела из полиметилакрилата с алмазным порошком, диаметр частиц алмазного порошка составлял 0,3 мкм.

На предварительном этапе подготовки полированного образца производится формирование лазерно-индуцированных оксидных слоев, а основная стадия обработки – лазерная обработка титановых образцов под слоем графитового порошка, находящемся в сжатых условиях под вспомогательным предметным стеклом. Схема эксперимента приведена на рис. 1а. Для предотвращения разлета графитного слоя было использовано предметное стекло, толщиной порядка 1,12 мм (ГОСТ 9284-75).

The hardness test was performed using a PMT-3 hardness gauge by the Vickers test method under the static load. In this method, the indenter was a tetrahedral pyramid with a square base having an angle between the sides at the top equal to 136°.

The mechanical stability was tested using a friction wear test bench and a roller counterbody. To bring the test conditions closer to the operational ones, the counterbody material class was selected in compliance with the future operating interaction materials (aluminum). Additional abrasive wear test was carried out using a counterbody made of polymethyl acrylate with the diamond powder. The particle size of the diamond powder was 0.3 μm.

At the preliminary stage of preparing a polished sample, the laser-induced oxide layers were formed. The main processing stage was laser processing of titanium samples under a layer of graphite powder being in the compressed conditions under an auxiliary glass slide. The visual framework of the experiment is shown in Fig. 1a. To prevent the graphite layer expansion, a glass slide was used with the thickness of about 1.12 mm (State standart 9284-75). The hardness increasing mechanism for the surface layer was based on the laser radiation conversion due to its high absorption by graphite and generation of a compressed microplasma [13]. It led to restructuring of the titanium surface layer. After the treatment, the glass slide and unused graphite powder were removed from the surface. To completely remove the powdered graphite particles, the sample was placed in an ultrasonic bath for 20 minutes, then the sample was air-dried.

The hardness of structures placed on the oxide layer preliminarily formed at a scanning speed of  $V=100$  mm/s reached 500–700 HV (Fig. 1b, c). The recording parameters corresponded to generation of a two-layer structure consisting of an inner  $TiO_2$  film with the thickness of about  $20 \pm 3$  nm and an outer  $Ti_3O_5$  film with the thickness of about  $40 \pm 5$  nm [11]. Moreover, the preliminary stage of sample preparation makes it possible to efficiently adapt this method to specific tasks by varying the final hardness values in the presence of one set of materials, simply by selecting the thickness of the initial oxide layer.

### IMPACT ASSESSMENT OF LASER PROCESSING PARAMETERS ON THE HARDNESS OF THE TITANIUM SAMPLE SURFACE LAYER

The revealed operating modes of a titanium sample structuring under a layer of graphite powder and an array of measured hardness values of the treated areas are presented in the form of comparative diagrams

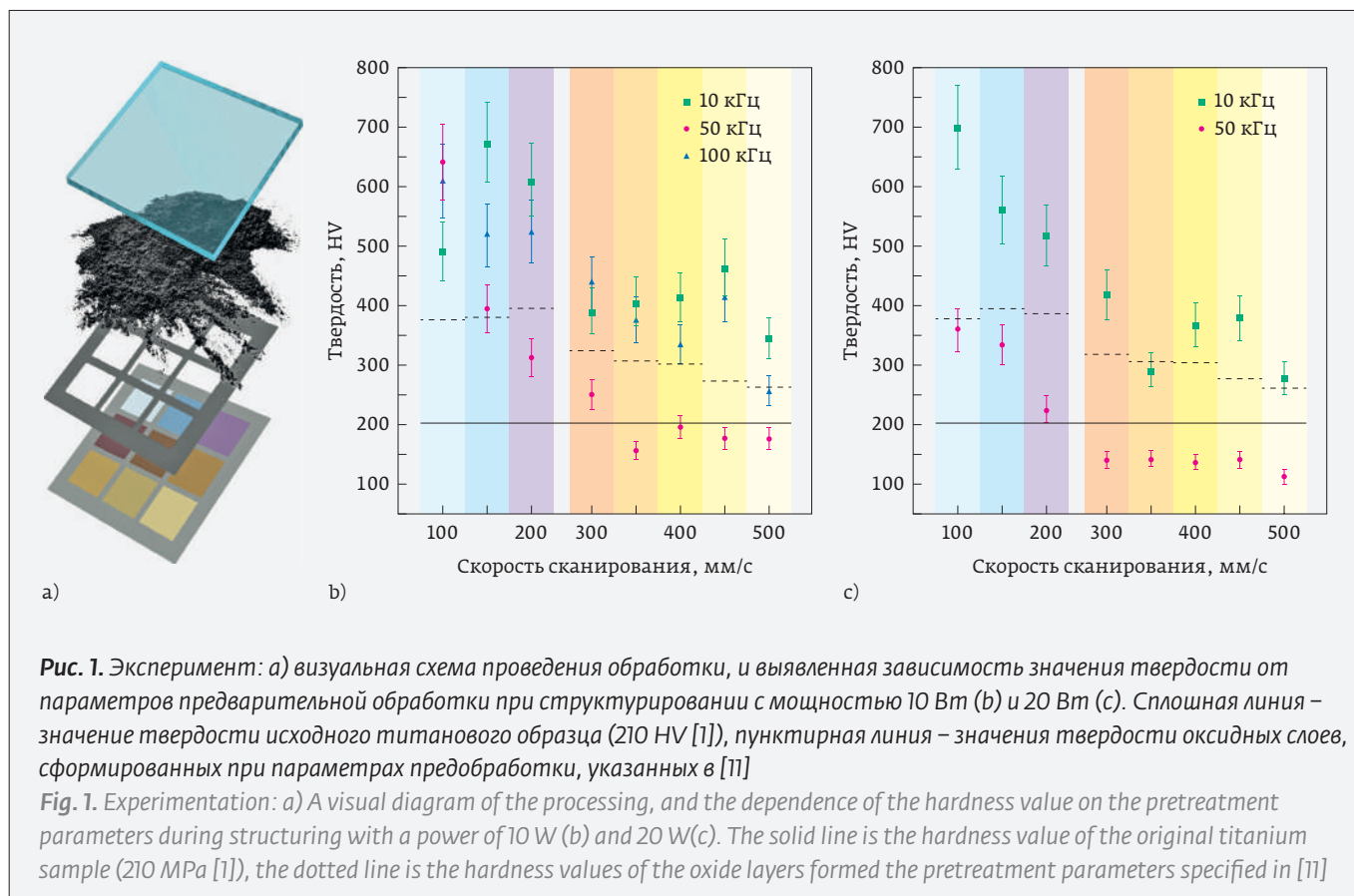
Механизм повышения твердости поверхностного слоя основан на конверсии лазерного излучения за счет высокого поглощения его графитом, и формировании сжатой микроплазмы [13], приводящей к реструктурированию поверхностного слоя титана. После проведения обработки с поверхности удаляется предметное стекло и недействующий графитовый порошок, для полного удаления порошкообразных графитовых частиц образец помещается в ультразвуковую ванну на 20 минут, далее образец высушивается на воздухе.

Твердость структур, записанных на оксидном слое, предварительно сформированном со скоростью сканирования  $V=100$  мм/с, достигает значений 500–700 HV (рис. 1 б, с). Параметры записи соответствовали формированию двухслойной структуры, состоящей из внутренней пленки  $TiO_2$  толщиной порядка  $20 \pm 3$  нм и внешней пленки  $Ti_3O_5$  порядка  $40 \pm 5$  нм [11]. При этом предварительный этап подготовки образца позволяет эффективно адаптировать методику под конкретные задачи путем варьирования итоговых значений твердости при наличии одного набора материалов, просто за счет выбора толщины начального оксидного слоя.

(Fig. 2). As a result of processing, an increase in the Vickers hardness value up to 9.3 times (2330 HV) compared to the value typical for the original surface layer of the titanium plate (244 HV) was shown. One or two exposures are sufficient for the efficient formation of structures with high hardness, since an increase in the number of exposures has not led to an observed improvement in the sample specifications.

### IMPACT ASSESSMENT OF LASER PROCESSING PARAMETERS ON THE WEAR RESISTANCE OF THE TITANIUM SAMPLE SURFACE LAYER

Aluminum was selected as the counterbody material for testing, since it is one of the main materials used in industry, in particular, in the manufacture of semi-finished products (for example, sheets, plates, sections, rods, stampings) that are subsequently subject to cutting and processing. When studying the structures using an optical microscope, it was found that the grooves formed by the laser radiation were filled with the counterbody wear products, without abrasion of the entire sample structure. This result indicates a high mechanical stability and efficient operation of the

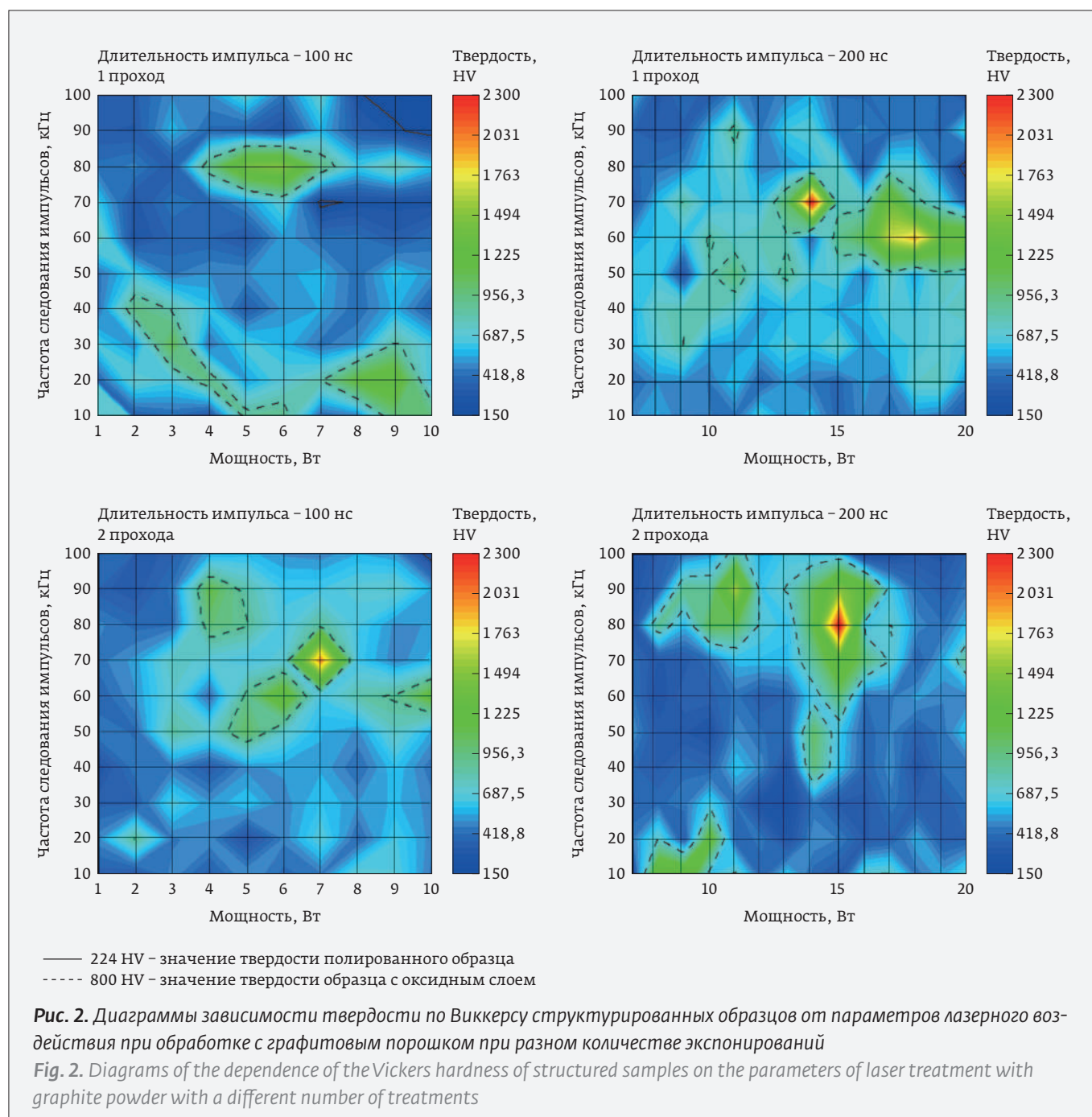


## ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ ЛАЗЕРНОЙ ОБРАБОТКИ НА ТВЕРДОСТЬ ПОВЕРХНОСТОВОГО СЛОЯ ТИТАНОВЫХ ОБРАЗЦОВ

Выявленные рабочие режимы структурирования титанового образца под слоем графитного порошка и массив измеренных значений твердости обработанных зон представлены в виде сравнительных диаграмм (рис. 2). В результате обработки продемонстрировано повышение твердости по Вик-

structured elements during the frictional interaction with the parts made of aluminum alloy.

Additional abrasive wear tests were performed using a counterbody consisting of polymethyl acrylate with the diamond powder. The contact profilometry results (Fig. 3) show that there is a difference in the height of the maximum structural peaks equal to  $5 \mu\text{m}$  between the area of the original structure and the area to which the center of the roller counterbody side face arrives. This result indicates a slight erosion of structure during



керсу до 9,3 раз (2330 HV) по сравнению со значением, характерным для исходного поверхностного слоя титановой пластины (244 HV). Проведения одного-двух экспонирований достаточно для производительного формирования структур с высокой твердостью, поскольку увеличение числа экспонирований не приводило к наблюдаемому улучшению характеристик образца.

### ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ ЛАЗЕРНОЙ ОБРАБОТКИ НА ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ТИТАНОВЫХ ОБРАЗЦОВ

В качестве материала контртела для проведения испытаний был выбран алюминий как один из основных материалов, используемых в промышленности, в частности, при изготовлении полуфабрикатов (например: листов, плит, профилей, прутков, штамповок), которые в дальнейшем подвергаются нарезке и обработке. При изучении структур с помощью оптического микроскопа было выявлено, что произошло заполнение канавок, сформированных лазерным излучением, продуктами износа контртела без истирания самой структуры образца. Данный результат говорит о высокой механической устойчивости и эффективной работе структурированных элементов, при фрикционном взаимодействии с деталями, произведенными из алюминиевого сплава.

Дополнительные исследования на абразивный износ были проведены с применением контртела, состоящего из полиметилакрилата с алмазным порошком. Результаты проведенной контактной профилометрии (рис. 3) показывают, что между зоной исходной структуры и зоной, на которую приходит центр боковой грани роликового контртела, имеется разница по высоте максимальных пиков структур, равная 5 мкм. Данный результат говорит

interaction with the counterbody. Moreover, the structure contains residual materials of the counterbody; probably, with a longer interaction time, filling of the structure grooves with the counterbody material would occur.

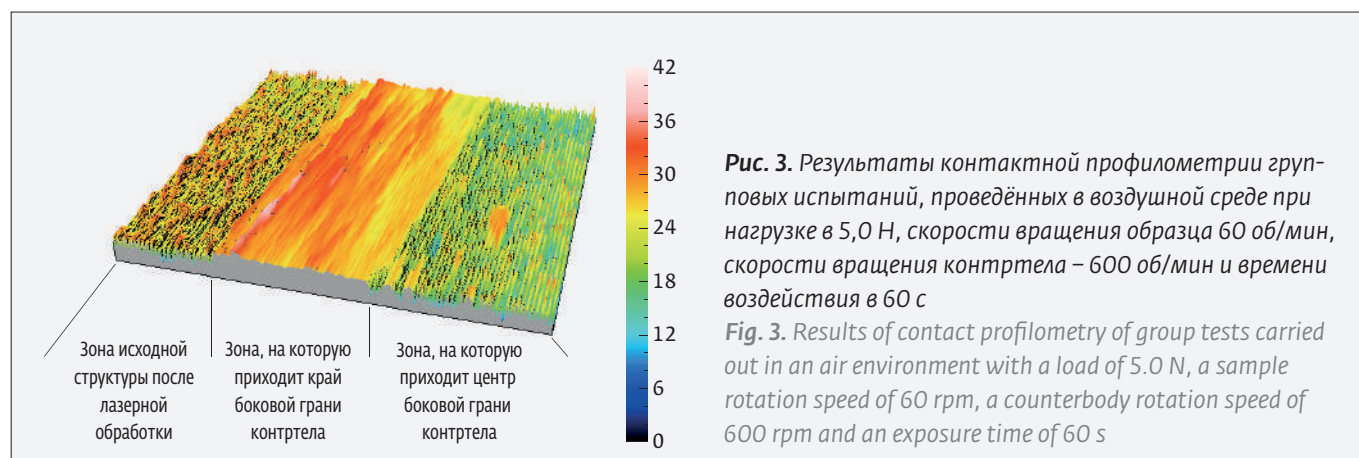
The measured wear rate of the titanium sample initial surface layer is about  $4.8 \cdot 10^{-4}$  m/h, and the wear rate of the treated surface is about  $3.0 \cdot 10^{-4}$  m/h. Thus, it is shown that the wear parameter can be reduced by at least 1.6 times due to the proposed processing method, and the treated structure belongs to the 4<sup>th</sup> wear resistance class [14] in the case of abrasive impact.

### CONCLUSION

As a result of experimental studies, the effect of laser radiation modes on the morphological and functional properties of the VT1-0 titanium alloy surface layer by modification under the layers of auxiliary substances was examined using a commercially available laser machining system based on a pulsed optical fiber laser.

An efficiency enhancement method of additive processing with the use of an auxiliary cover glass holding the graphite powder in the laser impact zone was tested. It was possible to obtain the increased hardness of the titanium sample surface layer by about 10 times (2330 HV) compared with the hardness value of the original titanium (244 HV). During the additive processing procedure using the laser radiation under a layer of graphite with different modes, it was found that the most promising processing modes suitable for the functional applications are obtained at 1-2 consecutive exposures with a power of 7-8 W (for pulses with a duration of 100 ns) and 15-17 W (for pulses with a duration of 200 ns), with the pulse repetition rates of 60-80 kHz.

Additionally, we have determined the possible reduction in the abrasive wear rate of the titanium sample





о незначительном стирании структуры при взаимодействии с контртелом. На структуре также имеются остаточные материалы контртела, вероятно, при большем времени взаимодействия произошло бы заполнение канавок структуры материалом контртела.

Измеренная скорость изнашивания исходного поверхностного слоя титанового образца составляет порядка  $4,8 \cdot 10^{-4}$  м/ч, а скорость изнашивания обработанной поверхности – порядка  $3,0 \cdot 10^{-4}$  м/ч. Таким образом показано, что параметр износа может быть снижен как минимум в 1,6 раз за счет предлагаемой методики обработки, а обработанная структура относится к 4 классу износостойкости [14] при абразивном воздействии.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате экспериментальных исследований было изучено влияние режимов лазерного излучения на морфологические и функциональные свойства поверхностного слоя титанового сплава ВТ1-0 путем модификации под слоями вспомогательных веществ с использованием коммерчески доступной технологической лазерной установки на базе импульсного волоконного лазера.

Апробирована методика повышения эффективности аддитивной обработки с применением вспомогательного покровного стекла, удерживающего графитовый порошок в зоне лазерного воздействия. Удалось достигнуть повышение твердости поверхностного слоя титанового образца примерно в 10 раз (2330 HV) по сравнению со значением твердости исходного титана (244 HV). При аддитивной обработке с применением лазерного излучения под слоем графита с разными режимами было выявлено, что наиболее перспективные режимы обработки, подходящие для функциональных применений, находятся при 1–2 последовательных экспонированиях с мощностью 7–8 Вт (для импульсов длительностью 100 нс) и 15–17 Вт (для импульсов длительностью 200 нс), с частотами следования импульсов 60–80 кГц.

Дополнительно при данных режимах определена возможность снижения скорости абразивного изнашивания поверхностного слоя титанового образца по сравнению с исходной не менее, чем в 2 раза, за счет проведения лазерного структурирования под слоем графита.

Полученные в настоящем проекте результаты имеют перспективы для широкого применения в металлообрабатывающей промышленности в виде разработки технологии аддитивной лазерной обработки плоских режущих инструментов для увеличения эксплуатационного ресурса станочного обо-

surface layer by at least 2 times compared with the initial one due to the laser structuring under a graphite layer.

The results obtained in this project have prospects for wide application in the metalworking manufacturing industry in the form of an additive laser processing technology for flat cutting tools to increase the service life of machining facilities. Additionally, the results can be easily scaled up for similar machining of bulky tools (milling cutters, turning cutters, drills) by changing the laser action sweep from flat-field to the cylindrical one.

## ACKNOWLEDGEMENTS

The authors express gratitude to the group of professor Yu. R. Kolobov (Institute of Problems of Chemical Physics, Russian Academy of Sciences), Laser Center LLC for assistance in the study of research prototypes, including the development and provision of equipment, as well as for valuable discussions.

The works were performed with financial support from the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation according to the Government Decree No. 218 dated April 09, 2010 (agreement No. 075-11-2021-045 dated June 24, 2021, project name: “Establishment of high-tech manufacturing of the equipment and technologies for laser functionalization of the medical device surface”), and financial support for academic qualification of the bachelors, masters and post-graduate students as a part of research works on the basis of the School of Physics and Engineering, ITMO University (R&D competition for the masters and post-graduate students).

## ABOUT AUTHORS

Egorova Xenia Andreevna, PhD student, research engineer, Institute of Laser Technologies, ITMO University, St. Petersburg, Russia.  
ORCID 0000-0002-4228-0392

Rozanov Konstantin Alexandrovich, student, Institute of Laser Technologies, ITMO University, St. Petersburg, Russia.

Kiiian Anton Igorevich, engineer, INSCIENCE, St. Petersburg, Russia.

Sinev Dmitry Andreevich, Candidate of Technical Sciences, assistant, Institute of Laser Technologies, ITMO University, St. Petersburg, Russia, sinev@itmo.ru  
ORCID 0000-0002-6274-1491

## CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

Egorova X. A. – organization of work, conducting a research process, analyzing the results, discussing, text editing, suggestions and comments; Rozanov K. A. – conducting a research process, discussing, writing the initial draft; Kiiian A. I. – idea, experiment design, discussions, suggestions and comments; Sinev D. A. – idea, experiment design, organization of work, discussions, text editing, suggestions and comments.



**ИЛИСТ**  
ИНСТИТУТ ЛАЗЕРНЫХ И СВАРОЧНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

## СЕМЕЙСТВО РОБОТИЗИРОВАННЫХ УСТАНОВОК ПРЯМОГО ЛАЗЕРНОГО ВЫРАЩИВАНИЯ «ИЛИСТ»



ИЛИСТ-M



ИЛИСТ-L



ИЛИСТ-XL



ИЛИСТ-2XL



### РОБОТИЗИРОВАННАЯ УСТАНОВКА ПРЯМОГО ЛАЗЕРНОГО ВЫРАЩИВАНИЯ «ИЛИСТ-2XL»

- размер выращиваемого изделия до –  $\varnothing 2200$  мм, h – 1000 мм
- максимальный вес изделия – 8000 кг
- два волоконных лазера мощностью 2 кВт
- два робота Fanuc M20iB/25
- производительность – до 250 см<sup>3</sup>/ч
- контролируемая атмосфера чистого аргона – 20 м<sup>3</sup>
- тринадцать синхронно управляемых осей
- порошковый питатель на четыре колбы
- набор сопел подачи порошка с быстрой заменой
- вакуумируемый шлюз

#### ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ МАТЕРИАЛЫ:

- нержавеющие и высокопрочные стали
- жаропрочные никелевые сплавы
- титановые сплавы
- сплавы на основе кобальта и меди

**Проводим теоретическую и практическую переподготовку персонала промышленных предприятий для работы на аддитивных установках прямого лазерного выращивания.**

САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ МОРСКОЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

**ИНСТИТУТ ЛАЗЕРНЫХ И СВАРОЧНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ**

Санкт-Петербург, пр. Маршала Жукова, 38-а

Тел. +7 (812) 757-22-22, e-mail: [ilwt@ilwt.smtu.ru](mailto:ilwt@ilwt.smtu.ru) [www.smtu.ru](http://www.smtu.ru) [www.ilwt-stu.ru](http://www.ilwt-stu.ru)







рудования. Дополнительно результаты могут быть легко масштабированы для аналогичной обработки объемных инструментов (фрезы, токарные резцы, сверла) посредством смены развертки лазерного воздействия с плоскопольной на цилиндрическую.

## БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарности: группе проф. Ю.Р. Колобова (Институт проблем химической физики РАН), ООО «Лазерный центр» за помощь в исследовании экспериментальных образцов, в том числе за разработку и предоставление оборудования, а также за ценные обсуждения.

Работы выполнены при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках Постановления Правительства № 218 от 09.04.2010 г. (соглашение № 075-11-2021-045 от 24.06.2021, название проекта «Создание высокотехнологичного производства оборудования и технологий для лазерной функционализации поверхности изделий медицинского назначения), и финансовой поддержке научной подготовки бакалавров, магистрантов и аспирантов в рамках выполнения научно-исследовательских работ на базе Физико-технического мегафакультета Университета ИТМО (конкурс НИР МиА)

## ВКЛАД АВТОРОВ

Егорова К.А. – организация работы, проведение эксперимента, обработка результатов, обсуждения, редактирование текста, предложения и замечания; Розанов К.А – проведение эксперимента, обсуждения, составление первого черновика статьи; Киян А.И – идея, дизайн эксперимента, обсуждения, предложения и замечания; Синева Д.А – идея, дизайн эксперимента, организация работы, обсуждения, редактирование текста, предложения и замечания.

## КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы подтверждают отсутствие конфликта интересов. Все авторы ознакомлены и согласны с рукописью.

## АВТОРЫ

Егорова Ксения Андреевна, аспирант, инженер-исследователь, Институт лазерных технологий, Университет ИТМО, г. Санкт-Петербург, Россия.  
ORCID 0000-0002-4228-0392

Розанов Константин Александрович, студент, Институт лазерных технологий, Университет ИТМО, г. Санкт-Петербург, Россия.

Киян Антон Игоревич, инженер, INSCIENCE, г. Санкт-Петербург, Россия.

Синева Дмитрий Андреевич, к. т. н., научный сотрудник, Институт лазерных технологий, Университет ИТМО, г. Санкт-Петербург, Россия.  
ORCID 0000-0002-6274-1491

## CONFLICT OF INTEREST

The authors declare that they have no conflict of interest and they supplemented the manuscript in part of their work.

## REFERENCES

1. **Knunyants I. L., Zefirov N. S.** *Chemical Encyclopedia: in 5 volumes / Editorial Board.: Zefirov N. S. (chief editor) and others – M.: Great Russian Encyclopedia. 1995; 4:641. (In Russ.)*  
Кнунянц И. Л., Зефирова Н. С. *Химическая энциклопедия: в 5 т. /Редкол.: Зефирова Н. С. (гл. ред.) и др. – М.: Большая Российская энциклопедия. 1995; 4:641.*
2. **Kazachenok M. S., Panin A. V., Ivanov Yu. F., Pochivalov Yu. I., Valiev R. Z.** The effect of thermal annealing on the mechanical behavior of technical titanium VT-0, having a submicrocrystalline structure in the surface layer or in the volume of the material. *Physical mesomechanics.* 2005; 8(4): 37–47. DOI:10.24411/1683-805X-2005-00024. (In Russ.)  
Казаченок М. С., Панин А. В., Иванов Ю. Ф., Почивалов Ю. И., Валиев Р. З. Влияние термического отжига на механическое поведение технического титана VT-0, имеющего субмикроструктурную структуру в поверхностном слое или в объеме материала. *Физическая мезомеханика.* 2005; 8(4): 37–47.
3. **Grum J.** Comparison of different techniques of laser surface hardening / Grum J // *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering.* 2007; Vol. 24:17–25.
4. **Ali Khorram, Akbar Davoodi Jamaloei.** Nd: YAG laser surface hardening of AISI 431 stainless steel; mechanical and metallurgical investigation. *Optics and Laser Technology.* 2019; 119: 105617. DOI: 10.1016/j.optlastec.2019.105617
5. **Mahmoud Moradi, Hossein Arabi.** Enhancement of surface hardness and metallurgical properties of AISI 410 by laser hardening process; diode and Nd: YAG lasers. *Optik.* 2019; 188:277–286. DOI: 10.1016/j.ijleo.2019.05.057
6. **N. Zarrinfar, P. H. Shipway, A. R. Kennedy, A. Saidi.** Carbide stoichiometry in TiC and Cu-TiCx produced by self-propagating high-temperature synthesis. *Scripta Materialia.* 2002; 46:121–126. DOI:10.1016/S1359-6462(01)01205-2
7. **Kiparisov S. S., Levinsky Yu. V., Petrov A. P.** Titanium carbide: preparation, properties, application. – M.: Metallurgy, 1987, 216 p. (In Russ.)  
Кипарисов С. С., Левинский Ю. В., Петров А. П. *Карбид титана: получение, свойства, применение.* – М.: Металлургия, 1987, 216 с.
8. **Maharjan N, Zhou W, Wu N.** Direct laser hardening of AISI 1020 steel under controlled gas atmosphere. *Surface and Coatings Technology.* 2020;15:125399. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2020.125399.
9. **Nair A. M., Muvvala G., Nath A. K.** A study on in-situ synthesis of TiCN metal matrix composite coating on Ti-6Al-4V by laser surface alloying process. *Journal of Alloys and Compounds.* 2019; 810:151901. DOI: 10.1016/j.jallcom.2019.151901
10. **Shi J, Wang Y.** Development of metal matrix composites by laser-assisted additive manufacturing technologies: a review. *Journal of Materials Science.* 2020; 55(23):9883–917. DOI: 10.1007/s10853-020-04730-3.
11. **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 May 20;8(5):577–85. DOI: 10.1364/OPTICA.420074.
12. **Veiko V., Luong V., Odintsova G., Romanov V., Yatsuk R.** Optimization of the technology of color laser marking of metals for industrial applications. In the VII International Conference on Photonics and Information Optics: Collection of scientific papers. Moscow: NRU MEPhI 2018 (p. 468). (In Russ.)  
Вейко В., Люонг В., Одинцова Г., Романов В., Яцук Р. Оптимизация технологии цветной лазерной маркировки металлов для промышленного применения. In VII международная конференция по фотонике и информационной оптике: Сборник научных трудов. М.: НИЯУ МИФИ 2018 (р. 468). DOI: 10.22184/1993-7296.2018.12.6.568.575
13. **Veiko V. P., Volkov S. A., Zakoldaev R. A., Sergeev M., Samokhvalov A., Kostyuk G. K., Milyaevka.** Laser-induced microplasma as a tool for microstructuring transparent media. *Quantum electronics.* 2017;47(9):842–8. (In Russ.)  
Вейко В. П., Волков С. А., Заколдаев Р. А., Сергеев М. М., Самохвалов А. А., Костюк Г. К., Мильяевка К. А. Лазерно-индуцированная микроплазма как инструмент микроструктурирования прозрачных сред. *Квантовая электроника.* 2017;47(9):842–8.
14. **Polyushkin N. G.** Fundamentals of the theory of friction, wear and lubrication: textbook. Stipend. – Krasnoyarsk: KSAU. 2013; 192:4. (In Russ.)  
Полюшкин Н. Г. *Основы теории трения, износа и смазки.* – Красноярск: КГАУ. 2013; 192:4.



Главное событие отрасли  
в России и странах СНГ

# ФОТОНИКА

МИР  
ЛАЗЕРОВ  
И ОПТИКИ

**28 – 31 марта 2023**

17-я международная специализированная выставка  
лазерной, оптической и оптоэлектронной техники



Реклама 12+

Россия, Москва, ЦВК «ЭКСПОЦЕНТР»  
[www.photonics-expo.ru](http://www.photonics-expo.ru)



ЛАЗЕРНАЯ АССОЦИАЦИЯ

 **ЭКСПОЦЕНТР**