УДК 539.4:539.5:539.8

DOI: 10.18384/2310-7251-2020-2-19-35

МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОВЕРХНОСТНЫХ СТРУКТУР ТИТАНОВОГО СПЛАВА ВТ9 ПОСЛЕ МНОГОКРАТНОЙ ЛОКАЛЬНОЙ ОБРАБОТКИ НАНОСЕКУНДНЫМИ ЛАЗЕРНЫМИ ИМПУЛЬСАМИ

Симонов Ю. В., Ушаков И. В.

Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»
119049, г. Москва, Ленинский проспект, д. 4, Российская Федерация

Аннотация.

Целью работы является исследование закономерности одновременного повышения микротвёрдости и пластических свойств поверхности титанового сплава ВТ9, а также определение твёрдости и модуля Юнга тонких поверхностных слоёв.

Процедура и методы исследования. Методы обработки основаны на применении короткоимпульсного наносекундного лазерного излучения, инициирующего комплекс физико-химических процессов. По результатам метода непрерывного индентирования с максимальной нагрузкой 0,05 Н проанализированы механические свойства поверхностных структур титанового сплава ВТ9, сформированных при различных режимах лазерной обработки.

Результаты исследования. На основе диаграмм «нагрузка-проникновение» проведены расчёты следующих величин: контактной глубины внедрения, жёсткости контактной пары «индентор-материал», площади проекции невосстановленного отпечатка, эффективного модуля Юнга. По методу Оливера-Фарра оценены нано- и микротвёрдость, а также модуль продольной упругости поверхностных слоёв титанового сплава.

Установлено, что в результате обработки микротвёрдость поверхности увеличивается в 2,5–4,5 раза, а модуль Юнга в 1,1–1,5 раза. Отличительной особенностью предложенного метода обработки является хорошая адгезия поверхностного слоя с основным материалом, что снижает вероятность формирования высоких механических напряжений и трещин.

Теоретическая и практическая значимость. Предложенный метод лазерной обработки позволяет формировать упрочнённые поверхностные слои в обычной атмосфере, что способствует существенному упрощению технологического процесса и снижению его себестоимости.

Ключевые слова: титановый сплав, поверхностная структура, нанотвёрдость, микротвёрдость, модуль Юнга, методика Оливера-Фарра

MECHANICAL PROPERTIES OF SURFACE STRUCTURES OF TITANIUM ALLOY VT9 AFTER REPEATED LOCAL PROCESSING WITH NANOSECOND LASER PULSES

Yu. Simonov, I. Ushakov

National University of Science and Technology 'MISiS'

Leninsky prosp. 4, 119049 Moscow, Russian Federation

Abstract.

Purpose. The regularities of a simultaneous increase in microhardness and plastic properties of the surface of titanium alloy VT9 are investigated. The hardness and Young's modulus of thin surface layers are determined.

Methodology and Approach. The methods employed are based on the use of nanosecond laser pulses initiating a complex of physical and chemical processes. The method of continuous indentation with a maximum load of 0,05 N is used. The mechanical properties of surface structures of titanium alloy VT9 after laser treatment are analyzed. Using the load-penetration diagrams, the following values were calculated: the contact depth of penetration, the stiffness of the contact 'indenter-material' pair, the projection area of the unreconstructed print, and the effective Young's modulus. On the basis of the Oliver-Pharr method, the nano- and microhardness, as well as the modulus of longitudinal elasticity of the surface layers of a titanium alloy are estimated

Results. It is found that as a result of processing, the microhardness of the surface increases by 2,5–4,5 times, and the Young's modulus by 1,1–1,5 times. A distinctive feature of the proposed treatment method is good adhesion of the surface layer with the bulk material, which reduces the probability of high mechanical stresses and cracking.

Theoretical and Practical implications. The proposed method of laser processing makes it possible to form hardened surface layers in a normal atmosphere, which contributes to a significant simplification of the technological process and reduces its cost.

Keywords: *titanium* alloy, surface structure, nanohardness, microhardness, Young's modulus, Oliver-Farr technique

Введение

Качество большинства современных покрытий, плёнок и поверхностей во многом определяется их механическими свойствами [1–3]. Эти свойства могут заметно отличаться на разных глубинах. Одним из способов их контроля служит непрерывное индентирование исследуемых нано- и микрослоёв [4–6].

Условия работы многих авиационных деталей, в том числе изготовленных из титановых сплавов, являются очень жёсткими. Детали и механизмы испытывают многократные перепады температур, подвергаются интенсивному механическому износу. Это, с одной стороны, вызывает потребность в подборе определённого набора механических свойств, а с другой стороны – определяет необходимость контроля и корректного определения последних [7].

Известно, что обработка концентрированными потоками электромагнитной энергии представляет собой очень мощный инструмент преобразования меха-

нических свойств поверхностей титановых деталей газотурбинных двигателей [8–11]. При этом нужно учитывать, что многообразие методик лазерной обработки и их комбинирование не позволяют однозначно прогнозировать получаемый результат. Как правило, это определяется самими исследуемыми материалами, особенностями их структурного строения, физическими свойствами рабочей среды и пр.

Цель данной работы состоит в установлении физических параметров лазерно-плазменной обработки, обеспечивающих оптимизацию механических свойств нано- и микрослоёв поверхности титанового сплава ВТ9, а также в нахождении твёрдости и модуля Юнга тонких наноструктур, образующихся в результате подобной обработки на поверхности сплава.

Методика эксперимента

В качестве материала для исследований были выбраны образцы сплава на основе титана марки ВТ9 ($\text{Ti}_{88,3}\text{Al}_{6,4}\text{Mo}_{3,3}\text{Zr}_{1,5}\text{Si}_{0,3}\text{Fe}_{0,2}$).

Для анализа заявленных характеристик поверхностей образцов осуществляли их непрерывное индентирование. В течение 65 секунд осуществляли полный цикл «нагружение-выдержка-разгрузка». Продолжительность фазы роста нагрузки, равно как и её снижения, составляла 30 секунд. Максимальная нагрузка при выдержке пятисекундной длительности составляла 0,05–0,055 Н. При этом применяли стандартную пирамидку Берковича и автоматизированный нанотвердомер марки NHT-2 производства CSM Instruments (Швейцария). В случаях соскальзывания индентора с исследуемого участка поверхности, а также ряда иных нежелательных факторов, эксперимент повторяли на новом участке. На рис. 1 приведено графическое отображение результатов применения стандартного типового режима нагружения и разгрузки применительно к исследуемым образцам.

Различные участки поверхности указанного сплава независимо друг от друга обрабатывали излучением наносекундного импульсного лазера LS-2134-E4 (ELS-03) и длиннофокусного лазера с диодной накачкой Nd^{3+} : YAG.

Было разработано и испытано более двух десятков разнообразных режимов лазерной обработки. Из них далее подробно рассмотрено два режима. Первый из них (№ 1) является оптимальным режимом обработки. Он обеспечивает двух-четырёхкратное улучшение комплекса механических свойств тонкого поверхностного слоя (ELS-03). Второй (№ 2) можно охарактеризовать как наиболее стабильный для лазера с диодной накачкой Nd^{3+} : YAG.

Экспериментальные результаты и обсуждение

Первый режим облучения основан на использовании лазерной установки ELS-03. Максимальная выходная энергия лазерного импульса 5 мДж. Длина волны излучения 532 нм. Частота 1-100 Гц. Размеры обрабатываемой поверхности: 5 × 5 мм. Прямоугольный участок поверхности обрабатывали с использованием 6 последовательных проходов. Шаг между центрами точек оплавлений 10 мкм. На рис. 2 представлены микрофотографии поверхностного слоя титанового

сплава, обработанного на лазерной установке ELS-03. Более детально подобная методика облучения поверхности описана в работе [8].

Рис. 1. Трапециевидные зависимости нормальной нагрузки на образцы от времени индентирования: 1 – поверхность, облучённая с помощью лазера ELS-03 (максимальная нагрузка 0,05 Н); 2 – поверхность, обработанная диодным лазером Nd^{3+} : YAG (максимальная нагрузка 0,05 Н); 3 – исходная поверхность сплава (максимальная нагрузка 0,055 Н).

Fig. 1. Trapezoidal dependence of the normal load on the samples from the indentation time: 1 – surface irradiated with an ELS-03 laser (maximum load 0,05 N); 2 – surface treated with an Nd^{3+} diode laser: YAG (maximum load 0,05 N); 3 – the initial surface of the alloy (maximum load 0,055 N).

Источник: данные авторов.

На рис. 3 приведена микроструктура поверхности титанового сплава, обработанного излучением лазерной установки на основе стекла, активированного ионами неодима Nd^{3+} : YAG. Максимальная выходная энергия установки 10 мДж. Длина волны 532 нм. Частота следования импульсов 200 Гц. Энергия импульса 4 мДж. Последовательность обработки идентична предыдущему режиму, но в данном случае применяли 4 прохода. Шаг между центрами соседних облучённых участков составлял 20 мкм. Размеры формируемой площадки: 7×7 мм.

В результате лазерной обработки на поверхности сплава формируются чётко выраженные структуры, которые отсутствовали на исходных образцах материала (рис. 4).

Рис. 2. Микрофотографии поверхности титанового сплава ВТ9 после обработки по первому режиму с использованием установки ELS-03. На снимке с большим увеличением (справа) отчётливо заметны локальные мозаичные участки, которые преимущественно ориентированы вдоль направления движения области лазерного облучения.

Fig. 2. Microphotographs of the surface of the VT9 titanium alloy after processing in the first mode using the ELS-03 installation. In the image with a larger magnification (on the right), local mosaic sections are clearly visible, which are mainly oriented along the direction of motion of the laser irradiation region.

Источник: данные авторов (НИТУ «МИСиС», кафедра физики).

Рис. 3. Микрофотографии поверхностного слоя титанового сплава ВТ9, полученные в результате использования второго режима лазерной обработки длиннофокусным лазером Nd³⁺: YAG. Слева отмечается достаточно неоднородная ячеистая структура, справа замечен сложный рельеф поверхности.

Fig. 3. Microphotographs of the surface layer of VT9 titanium alloy obtained as a result of using the second laser treatment regime with a long-focus Nd³⁺: YAG laser. On the left, a rather heterogeneous cellular structure is noted, on the right, a complex surface topography is visible.

Источник: данные авторов (НИТУ «МИСиС», кафедра физики).

Рис. 4. Микрофотографии необработанной поверхности титанового сплава ВТ9 с различным увеличением.

Fig. 4. Micrographs of the untreated surface of VT9 titanium alloy with various magnifications.

Источник: данные авторов (НИТУ «МИСиС», кафедра физики).

Первый режим обработки формирует структуру с определённой ориентацией. Она состоит из полос, ориентированных по ходу продвижения лазерного луча. Каждая полоса состоит из матрицы мозаичных участков. Менее выраженная структура наблюдается на поверхности образцов, обработанных по второму методу. Но на ней наблюдаются значительные неоднородности, в том числе в виде капель быстро застывшего материала.

Рис. 5. Кинетические кривые глубины внедрения индентора по мере проведения процедур индентирования образца с течением времени: 1 – поверхность, облучённая с помощью лазера ELS-03; 2 – поверхность, обработанная диодным лазером Nd³⁺: YAG; 3 – исходная поверхность сплава.

Fig. 5. Kinetic curves of the indenter penetration depth as the sample is indented over time: 1 – surface irradiated with an ELS-03 laser; 2 – surface treated with a diode laser Nd³⁺: YAG; 3 – the initial surface of the alloy.

Источник: данные авторов.

Рис. 6. Диаграммы «глубина проникновения» – «сила вдавливания» для трёх различных поверхностей: 1 – поверхность, облучённая с помощью лазера ELS-03; 2 – поверхность, обработанная диодным лазером Nd^{3+} : YAG; 3 – исходная поверхность VT9.

Fig. 6. Diagrams “penetration depth” – “indentation force” for three different surfaces:

1 – surface irradiated with an ELS-03 laser; 2 – surface treated with a diode laser Nd^{3+} : YAG; 3 – initial surface VT9.

Источник: данные авторов.

Экспериментальные данные, полученные при проведении индентирования в нано- и микродиапазоне, представлены в виде зависимостей глубины вдавливания от времени (рис. 5) и силы, действующей на индентор, от глубины вдавливания для случая нагружения и разгружения (рис. 6).

Обычно кинетическая кривая нормального профиля нагрузочной силы $F(t)$ имеет в области «больших» времён линейный участок постоянной нагрузки, составляющей 3...5% от максимальной силы вдавливания $F_{\max}$ [1]. Отсутствие такого фрагмента в регистрируемом оборудованием установки трапециевидном нагрузочном отклике связано с некоторыми конструкционными особенностями применяемого в работе наноиндентационного модуля ННТ-2. Наличие системы опорного кольца, физически связанного с остриём индентора, позволяет контролировать глубину проникновения индентора с высокой точностью. За счёт этого удачно нивелируются флуктуации глубины, возникающие вследствие прогиба предметного столика, терморасширения, изгиба приборной рамы, воздействия волн звука, влажности и т. п. Термическая стабильность комплекса достигается за счёт минимальной гибкости и оптимальной длины приборной рамы. Этим объясняется малое расстояние от датчика глубины до острия индентора, что, в свою очередь, обеспечивает наряду с опорной системой высокую чувствительность и точность измерений в нанодиапазоне. Поэтому в большинстве исследуемых поверхностей материала нет так называемого вязкоупругого перехода, в который начинает трансформироваться упругий участок зависимости $h(t)$.

Наиболее информативной с точки зрения исследования количественных характеристик материала является кривая индентирования, представленная в виде F - h -диаграммы. Данная кривая включает в себя две части: нагрузочную,

отражающую комплекс упругопластических свойств материала, и разгрузочную, объясняемую только частичным восстановлением инденторного отпечатка вследствие упругого восстановления. По наклону разгрузочного участка кривой можно судить о механическом поведении исследуемых поверхностных участков. В наших случаях 1, 2, 3 ход кривых разгрузки говорит об упругопластичном характере деформации исследуемого металлического сплава. Для упругих материалов кривая нагрузки практически совпадает с ветвью разгрузки. Для реальных пластичных материалов кривая разгрузки стремится быть перпендикулярной оси h . Промежуточное положение экспериментальных разгрузочных фрагментов на F - h -диаграммах 1, 2, 3 между описанными выше крайними положениями говорит о наличии в общей деформации сплава как упругой, так и пластической составляющих [4; 12].

Поскольку обработка поверхности титанового сплава проводилась в открытой атмосфере без создания инертной среды (неона, ксенона, криптона и др.), структурные элементы сплава неизбежно взаимодействовали с компонентами воздуха. Исходя из объёмного соотношения составляющих воздушной среды и исследуемого сплава, следует ожидать наибольшего реагирования титана с атмосферным азотом и кислородом. Известно, что металлы, в частности титан, могут образовывать с азотом либо монокристаллический TiN , либо динитрид типа Ti_2N . Нитрид титана как химическое соединение обладает достаточно большим значением микротвёрдости (порядка 19–21 ГПа). В условиях высоких температур (порядка 3000 К), имеющих место при подобной лазерной обработке, металлический расплав активно насыщается нитридами, диффундирующими в саму структуру сплава [13–15].

Отличительной особенностью полученных образцов является достаточно хорошая адгезия «нитридной плёнки, покрытия» с основным материалом. Наиболее вероятно равномерное распределение нитридного слоя в «центральной» зоне обработки. Это снижает вероятность формирования дефектов и высоких механических напряжений в поверхностных слоях обработанной поверхности. Этим рассматриваемый метод выгодно отличается от ряда других, например, от напыления нитридного покрытия на поверхность титанового сплава.

Атомы азота вносят значительно больший вклад в упрочнение титановых сплавов по сравнению с атомами кислорода. В работе [16] это объясняется разной энергией взаимодействия линейных дефектов кристаллической решётки в титановых сплавах с атомами этих газов. Энергия связи дислокаций титанового сплава с примесными атомами азота выше, чем с атомами кислорода, легированными в сплав.

Поверхностные структуры, формируемые при обработке материала лазерными импульсами, в общем случае представляют собой тонкие модифицированные слои, в некоторых случаях напоминающие тонкие плёнки. В связи с этим для определения механических характеристик исследуемых слоёв мы использовали методику Оливера-Фарра, как широко зарекомендовавшую себя при нахождении твёрдости и модуля продольной упругости для таких маломасштабных областей. Следует признать, что данный метод наиболее корректно применять в

отношении достаточно массивных образцов. Применительно к тонким материалам (где два размера много больше третьего) использование такого подхода к оценке свойств сопряжено с необходимостью учёта целого ряда сопутствующих факторов, так или иначе влияющих на точность получаемых результатов [17–21].

Однако эти недостатки в методике Оливера-Фарра применительно к рассматриваемому случаю частично нивелируются по большей части «искусственным» разделением объёмного образца титанового сплава на некоторый лазернообработанный тонкий слой, переходную зону, и основную часть материала.

На диаграммах, представленных на рис. 6, видно, что для каждого из трёх случаев имеют место несколько составляющих глубины внедрения пирамиды Берковича в исследуемые поверхности металлического сплава. Прежде всего, это наибольшее значение глубины внедрения $h_{\max}$, соответствующее переходу с этапа пятисекундной выдержки при максимальной нагрузке $F_{\max}$ на этап постепенного разгрузки. Окончание фазы разгрузки соответствует глубине остаточного отпечатка h_r , которая достигается при достижении нагрузкой нулевого значения и прекращении контактного взаимодействия индентора с материалом. Разница между $h_{\max}$ и h_r характеризует так называемое упругое восстановление h_e , обуславливающее убывание глубины h на рис. 5 с момента достижения $h_{\max}$ и до окончания соответствующего эксперимента h_r . Начальные данные F - h -диаграмм, позволяющие производить дальнейшие расчёты, приведены в табл. 1.

Таблица 1 / Table 1
Исходные данные / Initial data

Поверхность (режим обработки) →	1-й режим ELS-03	2-й режим Nd ³⁺ : YAG	Исходная
Параметры F-h-диаграммы ↓			
Максимальная нагрузка $F_{\max}$, Н	0,05	0,05	0,055
Наибольшая глубина вдавливания индентора $h_{\max}$, мкм	0,3547	0,5727	0,6512
Глубина остаточного отпечатка после снятия нагрузки h_r , мкм	0,204	0,4177	0,5
Упругое восстановление h_e , мкм	0,1507	0,155	0,1512
Пересечение оси h с касательной к кривой разгрузки (от $h = 0$ мкм), мкм	0,25	0,46	0,54

Источник: данные авторов.

Рис. 6 позволяет найти также две важные компоненты глубины h , на которые можно разложить общее перемещение индентора $h_{\max}$ вглубь материала: 1) упругий прогиб поверхности по контуру отпечатка h_s ; 2) истинную глубину проникновения индентора в материал h_p , в том числе глубину остаточного отпечатка при $F_{\max}$. Условная точка, разделяющая $h_{\max}$ на h_p и h_s , находится на пересечении горизонтальной оси h с касательной к кривой разгрузки в её «линейной» области (при $F \approx F_{\max}$). Стоит отметить, что более точно граница h_p и h_s на оси h определяется с учётом типа применяемого индентора [17].

Использование методики Оливера-Фарра для оценки механических характеристик материала предполагает на начальном этапе определение жёсткости K контактной пары «материал-индентор». Расчётное значение этой промежуточной величины, как будет показано ниже, оказывает существенное влияние на результаты последующих расчётов. В самом общем случае, жёсткость контакта K [Н/мкм] находится следующим образом:

$$K = \tan \alpha = \frac{dF}{dh}, \quad (1)$$

где α – угол наклона касательной к верхней области разгрузочной кривой на диаграмме F - h по отношению к оси h ; dF – малое приращение нагрузочной силы, Н; dh – малое приращение глубины отпечатка, мкм.

Значение упругого прогиба поверхности по контуру отпечатка h_s [мкм] рассчитывается через контактную жёсткость K [Н/мкм], найденную ранее:

$$h_s = \epsilon_i \cdot \frac{F_{\max}}{K}, \quad (2)$$

где ϵ_i – безразмерный коэффициент, связанный с геометрической формой применяемого индентора; $F_{\max}$ – максимальная сила вдавливания индентора, Н. В работе используется трёхгранная пирамида Берковича, для которой $\epsilon_i = 0,75$. В случае острого конического индентора $\epsilon_i = 0,72$, а при цилиндрическом инденторе с плоским основанием $\epsilon_i = 1$. Последний тип индентора обеспечивает совпадение точки пересечения касательной к «начальной» кривой разгрузки с осью h и реальной границы раздела значений h_p и h_s на оси h [9].

Соответственно контактная (истинная) глубина погружения индентора в поверхностный слой материала h_p [мкм] равна [20]:

$$h_p = h_{\max} - h_s, \quad (3)$$

где $h_{\max}$ – наибольшая глубина вдавливания индентора, мкм (см. табл. 1); h_s – внеконтактная глубина внедрения индентора, мкм (см. формулу (2)).

Площадь S [мкм²] проекции контакта на плоскость, перпендикулярную возмущающей силе F , вытекает из геометрических соотношений подобия для индентора Берковича [4]:

$$S = 3\sqrt{3} \cdot (\tan \theta)^2 \cdot h_p^2 = 24,562 \cdot h_p^2, \quad (4)$$

где $\theta = 65,3^\circ$ – половинный угол при вершине пирамиды Берковича; h_p – глубина остаточного отпечатка при $F_{\max}$, мкм (см. формулу (3)).

Приведённый модуль упругости контактного соединения E_r определяется с учётом решения Лурье-Снеддона для задачи восстанавливающегося контактирования конической поверхности с полупространством. Согласно данному решению, показатель степени в уравнении Мейера n можно принять равным 2. Это означает, что прилагаемая к пирамидальному (или коническому) индентору нагрузка пропорциональна квадрату глубины внедрения $F \sim h^2$, а потому среднее

давление в контакте индентора с материалом не зависит от значения нагрузки. Следовательно, эффективный модуль Юнга E_r [ГПа] равен:

$$E_r = K \cdot \sqrt{\frac{\pi}{4S}} \cdot 10^3 = \sqrt{\frac{\pi}{98,248}} \cdot \frac{K}{h_p} \cdot 10^3, \quad (5)$$

где K – жёсткость контакта, Н/мкм; S – оптически измеренная площадь отпечатка, мкм²; h_p – контактная глубина отпечатка индентора, мкм.

Пять величин, расчёт которых был приведён выше, являются промежуточными расчётными величинами. Их определение во многом основано на начальных данных, представленных в табл. 1. По сути, они представляют собой результаты более подробного анализа диаграмм «глубина проникновения» – «сила вдавливания». Расчётные значения этих величин сведены в табл. 2.

Таблица 2 / Table 2

Промежуточные расчётные величины / Intermediate Design Values

Поверхность (режим обработки) →	1-й режим ELS-03	2-й режим Nd ³⁺ : YAG	Исходная
Искомые величины ↓			
Контактная жёсткость K , Н/мкм	0,4545	0,4545	0,5
Упругий прогиб поверхности по контуру отпечатка h_s , мкм	0,0825	0,0825	0,0825
Истинная глубина проникновения индентора в материал h_p при $F_{\max}$, мкм	0,2722	0,4902	0,5687
Площадь проекции невосстановленного отпечатка S , мкм ²	1,82	5,9	7,94
Приведённый (эффективный) модуль Юнга контактной пары E_r , ГПа	298,609	165,812	157,217

Источник: данные авторов.

Искомая твёрдость поверхностей сплава (определяемая при индентировании) H_{IT} [ГПа] рассчитывается отношением наибольшей силы вдавливания $F_{\max}$, Н к площади поперечного сечения невосстановленного отпечатка S , мкм² [21]:

$$H_{IT} = \frac{F_{\max}}{S} \cdot 10^3. \quad (6)$$

Величина индентационного модуля Юнга материала E_{IT} [ГПа] для каждого из трёх вариантов поверхностного слоя находится из теории упругости [5]:

$$E_{IT} = \frac{E_i \cdot E_r \cdot (1 - \nu^2)}{E_i - E_r \cdot (1 - \nu_i^2)}, \quad (7)$$

где E_i – модуль Юнга материала индентора, ГПа (использовали алмазный наконечник Берковича, для которого $E_i = 1141$ ГПа) [9]; E_r – контактный модуль Юнга, ГПа, рассчитанный выше; ν – безразмерный коэффициент Пуассона тестируемого сплава (покрытия), который для титановых сплавов лежит в диапа-

зоне 0,31–0,34, (принято значение $\nu = 0,32$, что соответствует чистому титану); ν_i – безразмерный коэффициент Пуассона материала индентора (в нашем случае, для алмаза $\nu_i = 0,07$) [9].

Табл. 3 показывает результаты расчётов твёрдости и модуля упругости исходного и обработанных поверхностных слоёв титанового сплава ВТ9.

Таблица 3 / Table 3

Итоговые расчётные величины / Total Estimated Values

Режим обработки →	1-й режим ELS-03	2-й режим Nd ³⁺ : YAG	Исходная
Характеристики поверхности ↓			
Твёрдость H_{IT} , ГПа	27,473	8,475	6,297
Упругий модуль E_{IT} , ГПа	362,364	173,974	163,542

Источник: данные авторов.

Приведённые количественные результаты расчёта поверхностной твёрдости и упругого модуля Юнга характерны только для нагрузочного интервала от 0 Н до 0,05 Н.

Образцы дополнительно индентировали пирамидкой Виккерса нагрузками до 0,98 Н. На обработанных поверхностях не фиксировали формирования трещин, в то время как на необработанных поверхностях вероятность формирования трещин достигала приблизительно 25% [10].

Данные результаты демонстрируют удачное сочетание механических характеристик упрочнённого слоя. Значительное повышение микротвёрдости и модуля Юнга не приводит к снижению пластических характеристик. Особенно ценно, что при использованных режимах испытаний не фиксировали трещин от слоя между упрочнёнными поверхностями и основным материалом.

Заключение

1. На образцах титанового сплава ВТ9 установлен режим лазерной обработки, позволяющий одновременно повысить несколько механических характеристик поверхности материала. Зафиксировано улучшение таких характеристик материала, которые при обычной обработке не удаётся улучшить одновременно. Повышается микротвёрдость в четыре раза, модуль Юнга и одновременно фиксируется рост пластических характеристик по сравнению с исходным сплавом.

2. Установлены и обсуждены два режима лазерной обработки, обеспечивающие существенное улучшение прочностных (в 4,36 и в 1,35 раза) и упругих (в 2,22 раза и в 1,06 раза) характеристик металлического сплава ВТ9 для нано- и микродиапазона, соответственно.

3. Разработанные методики лазерной обработки позволяют формировать упрочнённые поверхностные слои в обычной атмосфере. Это способствует существенному упрощению технологического процесса и снижению его себестоимости.

4. Применяемые способы лазерной обработки практически не оказывают влияния на ползучесть материала, оцениваемую при максимуме нагрузки. Отличительной особенностью полученных образцов является достаточно хорошая адгезия поверхностного слоя с основным материалом. Это снижает вероятность формирования дефектов и высоких механических напряжений в поверхностных слоях обработанной поверхности.

Статья поступила в редакцию 30.04.2020 г.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность д.ф.-м.н., проф., чл.-корр. НАН Республики Беларусь Комарову Ф. Ф. и к.ф.-м.н., доц. Людчику О. Р. за всестороннюю помощь и консультации.

ACKNOWLEDGMENTS

The authors are grateful to F. F. Komarov, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Corresponding Member of the National Academy of Sciences of the Republic of Belarus, and O. R. Lyudchik, PhD in Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, for their comprehensive assistance and advice.

ЛИТЕРАТУРА

1. Головин Ю. И. Наноиндентирование и механические свойства твердых тел в субмикробиообъемах, тонких приповерхностных слоях и пленках (Обзор) // Физика твердого тела. 2008. Т. 50. № 12. С. 2113–2142.
2. Дьяков И. А. Наномодифицированные гальванические покрытия // Нанотехника. 2013. № 1 (33). С. 60–68.
3. Inorganic Solid Lubricating Coatings for Heat Engines and Power Plants / Lesnevskiy L. N., Lezhnev L. Yu., Lyakhovetskiy M. A., Troshin A. E., Gavrilov P. V., Ushakov A. M. // Journal of Machinery Manufacture and Reliability. 2015. Vol. 44. Iss. 5. P. 455–463.
4. Головин Ю. И. Наноиндентирование и его возможности. М.: Машиностроение, 2009. 312 с.
5. Шугуров А. Р., Панин А. В., Оскомов К. В. Особенности определения механических характеристик тонких пленок методом наноиндентирования // Физика твердого тела. 2008. Т. 50. № 6. С. 1007–1012.
6. Исследование эпитаксиальных слоёв и монокристаллов β -Ga₂O₃ методом наноиндентирования / Гузилова Л. И., Гращенко А. С., Печников А. И., Маслов В. Н., Завьялов Д. В., Абдрахманов В. Л., Романов А. Е., Николаев В. И. // Materials Physics and Mechanics. 2016. Т. 29. № 2. С. 166–171.
7. Формирование остаточных напряжений в поверхностных слоях мишеней из титановых сплавов при облучении сильноточными импульсными электронными пучками / Шулов В. А., Стешенко И. Г., Теряев Д. А., Перлович Ю. А., Исаенкова М. Г., Фесенко В. А. // Физика и химия обработки материалов. 2018. № 2. С. 69–73.
8. Ушаков И. В., Симонов Ю. В. Управление физико-механическими свойствами поверхности титановых сплавов короткоимпульсным лазерным излучением // Вестник Московского государственного областного университета. Серия: Физика-математика. 2019. № 4. С. 30–42.

9. Финишное плазменное упрочнение и восстановление деталей топливной аппаратуры / Шарифуллин С. Н., Тополянский П. А., Ермаков С. А., Тополянский А. П. // Металлообработка. 2018. № 4 (106). С. 28–39.
10. Ushakov I. V., Simonov Yu. V. Formation of surface properties of VT18u titanium alloy by laser pulse treatment // Materials Today: Proceedings. 2019. Vol. 19. Part 5. P. 2051–2055.
11. Структурные изменения в сплавах типа сендаст при быстрой кристаллизации спиннингованием и лазерной обработке / Шефтель Е. Н., Банных О. А., Капуткин Д. Е., Струг Р. Е., Климова Л. М. // Известия РАН. Металлы. 1994. № 4. С. 89–95.
12. Фирстов С. А., Горбань В. Ф., Печковский Э. П. Особенности использования величины работы при автоматическом индентировании для определения механических свойств материалов // Электронная микроскопия и прочность материалов. Серия: Физическое материаловедение, структура и свойства материалов: сборник научных трудов. Вып. 16. Киев: Ин-т проблем материаловедения им. И. Н. Францевича НАН Украины, 2009. С. 3–15.
13. Табаков В. П., Чихранов А. В. Определение механических характеристик износостойких ионно-плазменных покрытий на основе нитрида титана // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2010. Т. 12. № 4. С. 292–297.
14. Чапланов А. М., Щербакова Е. Н. Структурные и фазовые превращения в тонких плёнках титана при облучении азот-водородной плазмой // Журнал технической физики. 1999. Т. 69. № 10. С. 102–108.
15. Структура композитных покрытий на основе нитрида титана, сформированных с использованием конденсации с ионной бомбардировкой / Корусенко П. М., Несов С. Н., Поворознюк С. Н., Полещенко К. Н., Орлов П. В., Коротаяев Д. Н. // Динамика систем, механизмов и машин. 2019. Т. 7. № 1. С. 201–207.
16. Сайдахмедов Р. Х. Ионно-плазменные покрытия на основе нитридов и карбидов переходных металлов с регулируемой стехиометрией. Ташкент: Фан, 2005. 226 с.
17. Головин Ю. И., Коренков В. В., Разливалова С. С. Влияние малоамплитудных осцилляций нагрузки на наноконтактные характеристики материалов в процессе наноиндентирования // Физика твердого тела. 2017. Т. 59. № 6. С. 1106–1117.
18. Применение кривых кинетического индентирования сферой для определения механических свойств материалов / Огар П. М., Тарасов В. А., Турченко А. В., Федоров И. Б. // Системы. Методы. Технологии. 2013. № 1 (17). С. 41–47.
19. Новая методика оценки нанотвердости материалов / Мощенко В. И., Дощечкина И. В., Лалазарова Н. А., Демченко С. В. // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2015. Т. 81. № 5. С. 48–52.
20. Панин А. В., Шугуров А. Р., Оскомов К. В. Определение твердости и модуля упругости тонких пленок Ti и TiO₂ // Физическая мезомеханика. 2006. Т. 9. № S1. С. 119–122.
21. Сравнение расчетного метода оценки поверхностной нано- и микротвердости материалов с методом Оливера и Фарра / Мощенко В. И., Ляховицкий М. М., Дощечкина И. В., Кухарева И. Е. // Вестник Харьковского национального автомобильно-дорожного университета. 2009. № 46. С. 43–48.

REFERENCES

1. Golovin Yu. I. [Nanoindentation and mechanical properties of solids in submicrovolumes, thin near-surface layers, and films: A Review]. In: *Fizika tverdogo tela* [Physics of the Solid State], 2008, vol. 50, no. 12, pp. 2113–2142.
2. D'yakov I. A. [Nanomodified galvanic coatings]. In: *Nanotekhnika* [Nanotechnics], 2013, no. 1 (33), pp. 60–68.
3. Lesnevskiy L. N., Lezhnev L. Yu., Lyakhovetskiy M. A., Troshin A. E., Gavrilov P. V., Ushakov A. M. Inorganic Solid Lubricating Coatings for Heat Engines and Power Plants. In: *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*, 2015, vol. 44, iss. 5, pp. 455–463.
4. Golovin Yu. I. *Nanoindentirovanie i ego vozmozhnosti* [Nanoindentation and its possibilities]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2009. 312 p.
5. Shugurov A. R., Panin A. V., Oskomov K. V. [Specific features of the determination of the mechanical characteristics of thin films by the nanoindentation technique]. In: *Fizika tverdogo tela* [Physics of the Solid State], 2008, vol. 50, no. 6, pp. 1007–1012.
6. Guzilova L. I., Grashchenko A. S., Pechnikov A. I., Maslov V. N., Zav'yalov D. V., Abdrakhmanov V. L., Romanov A. E., Nikolaev V. I. [Study of β -Ga₂O₃ epitaxial layers and single crystals by nanoindentation technique]. In: *Materials Physics and Mechanics*, 2016, vol. 29, no. 2, pp. 166–171.
7. Shulov V. A., Steshenko I. G., Teryaev D. A., Perlovich Yu. A., Isaenkova M. G., Fesenko V. A. [Formation of residual stresses in the surface layers of targets from titanium alloys under irradiation with high-current pulsed electron beams]. In: *Fizika i khimiya obrabotki materialov* [Physics and Chemistry of Materials Treatment], 2018, no. 2, pp. 69–73.
8. Ushakov I. V., Simonov Yu. V. [Control of physical and mechanical properties of the surface of titanium alloys by short laser pulses]. In: *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo oblastnogo universiteta. Seriya: Fizika-matematika* [Bulletin of Moscow Region State University. Series: Physics and Mathematics], 2019, no. 4, pp. 30–42.
9. Sharifullin S. N., Topolyanskii P. A., Ermakov S. A., Topolyanskii A. P. [Finish plasma hardening and reconditioning of parts of fuel equipment]. In: *Metalloobrabotka* [Metalworking], 2018, no. 4 (106), pp. 28–39.
10. Ushakov I. V., Simonov Yu. V. Formation of surface properties of VT18u titanium alloy by pulse laser treatment. In: *Materials Today: Proceedings*, 2019, vol. 19, Part 5, pp. 2051–2055.
11. Sheftel' E. N., Bannykh O. A., Kaputkin D. E., Strug R. E., Klimova L. M. [Structural changes in Sendast alloys during fast crystallization by spinning and laser processing]. In: *Izvestiya RAN. Metally* [Russian metallurgy (Metally)], 1994, no. 4, pp. 89–95.
12. Firstov S. A., Gorban' V. F., Pechkovskii E. P. [Features of using the magnitude of work during automatic indentation to determine the mechanical properties of materials]. In: *Elektronnaya mikroskopiya i prochnost' materialov. Seriya: Fizicheskoe materialovedenie, struktura i svoystva materialov. Vip. 16* [Electron Microscopy and Strength of Materials. Series: Physical materials science, structure and properties of materials: a collection of scientific papers. Iss. 16]. Kiev, Institute of Materials Science named after I. N. Frantsevich, National Academy of Sciences of Ukraine Publ., 2009, pp. 3–15.
13. Tabakov V. P., Chikhranov A. V. [Determination of the mechanical characteristics of wear-resistant ion-plasma coatings based on titanium nitride]. In: *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiiskoi akademii nauk* [Izvestia of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences], 2010, vol. 12, no. 4, pp. 292–297.
14. Chaplanov A. M., Shcherbakova E. N. [Structural transitions and phase transitions in titanium thin films under irradiation by a nitrogen-hydrogen plasma]. In: *Zhurnal tekhnich-*

- eskoj fiziki* [Technical Physics. The Russian Journal of Applied Physics], 1999, vol. 69, no. 10, pp. 102–108.
15. Korusenko P. M., Nesov S. N., Povoroznyuk S. N., Poleshchenko K. N., Orlov P. V., Korotaev D. N. [The structure of composite coatings based on titanium nitride, formed using ion bombardment condensation]. In: *Dinamika sistem, mekhanizmov i mashin* [Dynamics of systems, mechanisms and machines], 2019, vol. 7, no. 1, pp. 201–207.
 16. Saidakhmedov R. Kh. *Ionno-plazmennye pokrytiya na osnove nitridov i karbidov perekhodnykh metallov s reguliruemoi stekhiometriей* [Ion-plasma coatings based on nitrides and carbides of transition metals with controlled stoichiometry]. Tashkent, Fan Publ., 2005. 226 p.
 17. Golovin Yu. I., Korenkov V. V., Razlivalova S. S. [The effect of small-amplitude load oscillations on the nanocontact characteristics of materials in nanoindentation]. In: *Fizika tverdogo tela* [Physics of the Solid State], 2017, vol. 59, no. 6, pp. 1106–1117.
 18. Ogar P. M., Tarasov V. A., Turchenko A. V., Fedorov I. B. [Application of the curves of kinematic indentation by a sphere to determine materials' mechanical properties]. In: *Sistemy. Metody. Tekhnologii* [Systems. Methods. Technologies], 2013, no. 1 (17), pp. 41–47.
 19. Moshchenok V. I., Doshchechkina I. V., Lalazarova N. A., Demchenko S. V. [A New Method of Nano Hardness Determination]. In: *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov* [Industrial Laboratory], 2015, vol. 81, no. 5, pp. 48–52.
 20. Panin A. V., Shugurov A. R., Oskomov K. V. [Determination of hardness and elastic modulus of thin Ti and TiO₂ films]. In: *Fizicheskaya mezomekhanika* [Physical Mesomechanics], 2006, vol. 9, no. S1, pp. 119–122.
 21. Moshchenok V. I., Lyakhovitskii M. M., Doshchechkina I. V., Kukhareva I. E. [The comparison of the calculation method of assessment of the surface nano – and microhardness of the materials with the method of Oliver and Pharr]. In: *Vestnik Khar'kovskogo natsional'nogo avtomobil'no-dorozhnogo universiteta* [Bulletin of Kharkov National Automobile and Highway University], 2009, no. 46, pp. 43–48.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Симонов Юрий Владимирович – аспирант кафедры физики, ассистент кафедры физики Национального исследовательского технологического университета «МИСиС»;
e-mail: MAK.101@yandex.ru;

Ушаков Иван Владимирович – доктор технических наук, профессор кафедры физики Национального исследовательского технологического университета «МИСиС»;
e-mail: ushakoviv@mail.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Yuri V. Simonov – postgraduate student, assistant at the Department of Physics, National University of Science and Technology 'MISIS';
e-mail: MAK.101@yandex.ru;

Ivan V. Ushakov – Doctor of Engineering Sciences, Professor at the Department of Physics, National University of Science and Technology 'MISIS';
e-mail: ushakoviv@mail.ru.

ПРАВИЛЬНАЯ ССЫЛКА НА СТАТЬЮ

Симонов Ю. В., Ушаков И. В. Механические свойства поверхностных структур титанового сплава VT9 после многократной локальной обработки наносекундными лазерными импульсами // Вестник Московского государственного областного университета. Серия: Физика-Математика. 2020. № 2. С. 19–35.

DOI: 10.18384/2310-7251-2020-2-19-35

FOR CITATION

Simonov Yu. V., Ushakov I. V. Mechanical properties of surface structures of titanium alloy VT9 after repeated local processing with nanosecond laser pulses. In: *Bulletin of Moscow Region State University. Series: Physics-Mathematics*, 2020, no. 2, pp. 19–35.

DOI: 10.18384/2310-7251-2020-2-19-35