УДК 539.211

СРАВНИТЕЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ НАНОСТРУКТУРИРОВАНИЯ ПОВЕРХНОСТНОГО РЕЛЬЕФА *α*- И *β*-ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ ПРИ ИМПУЛЬСНОМ ФЕМТОСЕКУНДНОМ ЛАЗЕРНОМ ОБЛУЧЕНИИ

С.И.Кудряшов¹, О.А.Голосова², А.Ю.Колобова^{2, 3}, Ю.Р.Колобов^{2,4}, Е.В.Голосов⁵

¹ Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва, Россия ² Институт структурной макрокинетики и проблем материаловедения РАН, Черноголовка, Россия ³ Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», Москва, Россия ⁴ Белгородский государственный национальный исследовательский университет, Белгород, Россия ⁵ Институт проблем химической физики РАН, Черноголовка, Россия

С использованием атомно-силовой и структурной электронной микроскопии проведено сравнительное экспериментальное исследование влияния фемтосекундного лазерного облучения с различной поверхностной плотностью энергии и числе падающих импульсов N = 80, 400, 300), длиной волны $\lambda = 1030$ нм и длительностью импульса $\tau \approx 100$ фс на изменение топографии (формирование мультимасштабного поверхностного рельефа) поверхности низкомодульного титанового β -сплава Ti–26Nb–8Mo–12Zr и наноструктурированного технически чистого α -титана марки BT1–0.

Установлено, что в результате воздействия фемтосекундного лазерного облучения на поверхность низкомодульного титанового β-сплава формируются квазипериодические наноструктуры, субволновые периоды которых лежат в диапазоне 0.4–0.8 мкм. Для сплава системы Ti–Nb–Mo–Zr период формируемой на поверхности нанорешетки уменьшается с ростом плотности энергии и превышает соответствующие значения для нелегированного титана.

Ключевые слова: титановый β-сплав, технически чистый титан, поверхность, фемтосекундное лазерное облучение, наноструктура

A COMPARATIVE STUDY OF FEATURES OF THE NANOSTRUCTURING SURFACE RELIEF OF α - AND β -TITANIUM ALLOYS UNDER PULSED FEMTOSECOND LASER IRRADIATION

S.I. Kudryashov¹, O.A. Golosova², A.Yu. Kolobova^{2, 3}, Yu.R. Kolobov^{2, 4}, E.V. Golosov⁵

¹P.N. Lebedev Physical Institute of RAS, Moscow, Russia ²Institute of Structural Macrokinetics and Materials Science of RAS, Chernogolovka, Moscow distr., Russia ³National University of Science and Technology «MISIS», Moscow, Russia ⁴Belgorod State University, Belgorod, Russia; ⁴Delayord State University, Belgorod, Russia;

⁵Institute of Problems of Chemical Physics of RAS, Chernogolovka, Moscow distr., Russia

A comparative experimental study of the influence of femtosecond laser irradiation with various surface energy densities (0,74; 1; 2,5 J/cm² and the number of pulses (N = 80, 400, 300), wavelength $\lambda = 1030$ nm and

pulse duration $\tau \approx 100$ fs on a change in the surface topography of low modulus titanium β -alloy Ti–26Nb–8Mo– 12Z and nanostructured commercially pure α -titanium VT1–0 was carried out using atomic force and scanning electron microscopy.

It is shown that quasi-periodic nanostructures with characteristics sizes of 0.4 to 0.8 microns are formed in the specimen surface as a result of the irradiation. For the titanium alloy, the nanolattice period decreases when the energy density increases; this value for the alloy is larger than that for pure titanium.

Keywords: titanium β -alloy, commercial pure titanium, surface, femtosecond laser irradiation, nanosrtuctures.

1. Введение

Модификация поверхности металлов и сплавов с использованием различных бесконтактных методов поверхностной обработки позволяет улучшить механические, физико-химические и другие свойства, как поверхности, так и обрабатываемого материала в целом. Одним из таких перспективных направлений в указанной области исследований является поверхностное модифицирование облучением ультракороткими (фемтосекундными) лазерными импульсами [1–4]. Многоимпульсное воздействие фемтосекундного лазерного излучения позволяет получать на поверхности твердых материалов субволновые одномерные квазипериодические наномасштабные структуры (нанорешетки) [5–7]. Развивающиеся при таком воздействии процессы перестройки структуры, физико-химические превращения, изменения топографии поверхности приводят к модификации поверхностного и тонких приповерхностных слоев с формированием у них уникального комплекса физико-химических и других свойств.

Исследование влияния фемтосекундного лазерного облучения на топографию поверхности титана и его сплавов, которые широко применяются для изготовления медицинских имплантатов для травматологи, ортопедии и стоматологии, проведено в ряде работ [5, 8–10]. Показано, что в результате воздействия фемтосекундного лазерного облучения формируются поверхностные нано- и микроструктуры, происходит активное окисление поверхности [11], а также ее модификация отдельными химическими элементами [12, 13]. Такой способ обработки поверхности титановых сплавов рассматривается как перспективный вариант для модификации поверхности медицинских имплантатов [10], улучшающий за счет формирования микро- и наномасштабной шероховатости биоактивные свойства их поверхности (оптимизация условий эффективной адгезии и размножения и/или дифференцировки клеток на поверхности) с обеспечением полной остеоинтеграции. В [12, 13] показана возможность нанесения наногидроксилапатита в процессе рассматриваемой лазерной обработки должно оказать благоприятное влияние на рост костной ткани и приживляемость имплантата в кости.

При использовании титановых сплавов для изготовления имплантатов чрезвычайно благоприятным обстоятельством оказывается их низкий (примерно в два раза меньше чем у сталей) модуль упругости, что улучшает биомеханическую совместимость с костной тканью [14].

Наиболее перспективными сплавами медицинского назначения, активная разработка которых ведется в последние годы, являются наноструктурированный титан и низкомодульные (с близким по величине модулем упругости (около 30 ГПа) к костной ткани,) титановые β -сплавы, обеспечивающие биомеханическую совместимость. Последнее соответствует нормальным физиологическим условиям и препятствует преждевременной деградации костного материала [15].

В связи с изложенным выше, представляет интерес исследование возможности модификации структуры поверхности титана и титановых сплавов медицинского назначения с использованием фемтосекундного лазерного облучения с целью формирования важных для практического использования свойств поверхности, таких как биоактивность и супергидрофильность, обеспечивающая пропитываемость поверхности имплантата различными лекарственными препаратами.

В настоящей работе представлены результаты сравнительных исследований топографии поверхности низкомодульного титанового β-сплава системы Ti–Nb–Mo–Zr и наноструктурированного титанового сплава марки BT1–0 после фемтосекундного лазерного облучения.

2. Материал и методика эксперимента

В качестве материала для исследования был выбран новый низкомодульный β -титановый сплав Ti–26Nb–8Mo–12Zr, полученный методом тройного вакуумно-дугового переплава в ОАО «Корпорация ВСМПО-АВИСМА» (г. Верхняя Салда) и последующей ковки при температурах выше температуры рекристаллизации [16]. Для сравнительных исследований наряду с низкомодульным титановым β -сплавом изучали наноструктурированный (HC) нелегированный титан марки BT1–0 (Puc. 1), полученный в результате воздействия пластической деформацией с использованием метода, сочетающего поперечно-винтовую и продольную прокатки [17].

Обрабатываемая поверхность образцов в виде цилиндрической мишени диаметром 8 мм и толщиной 4 мм предварительно подвергалась механической шлифовке и полировке на установке LaboPol–5 (Struers). Облучение мишени проводилось с использованием ИК титан-сапфирового лазера с длиной волны 1030 нм и длительностью импульсов на полувысоте ~ 100 фс на воздухе. Сканирование при фемтосекундном лазерном облучении (ФЛО) осуществлялось программируемым перемещением моторизованной платформы с компьютерным управлением, на которой располагался облучаемый образец, со скоростью 1.8 мм/с при плотности энергии лазерного излучения F = 0,74; 1; 2,5 Дж/см² и числе падающих импульсов N = 80, 400, 300. Площадь облученной поверхности составила 5×5 мм.

Исследования структуры поверхности после облучения проводили с использованием растрового электронного микроскопа Zeiss Ultra Plus с интегрированной системой микроанализа INCA Energy 350 XT и атомно-силового микроскопа Интегра Аура. Атомно-силовая микроскопия (ACM) является одним из основных методов анализа рельефа поверхности на микро- и наноуровне. Метод атомно-силовой микроскопии позволяет провести изучение топографии поверхности с численным анализом рельефа. По результатам проведенных исследований сделана оценка наиболее часто используемых в технической и научной литературе характеристик рельефа поверхности: среднее арифметическое отклонение профиля (средняя шероховатость) – R_a и высота неровностей профиля по десяти точкам (среднеквадратичная шероховатость) – R_z , согласно ГОСТ 2789–73.



Рис. 1. Микроструктура нелегированного титана (ВТ1–0) после воздействия пластической деформацией методом поперечно-винтовой прокатки в сочетании с продольной прокаткой. Просвечивающая электронная микроскопия.

TEM - micrograph of pure titanium (VT1–0) after plastic deformation by the method that combines helical and longitudinal rolling. Transmission electron microscopy.

3. Результаты экспериментов

При облучении низкомодульного титанового β -сплава Ti-26Nb-8Mo-12Zr на воздухе с низкими плотностями энергии (*F*) фемтосекундного лазерного облучения (*F* = 0,74 Дж/см², число импульсов *N* = 80) на его поверхности в области воздействия ФЛО формируются чередующиеся параллельные квазипериодические впадины и бороздки, образующие нанорешетку, ширина которых не превышает 0,5 мкм (Рис. 2). Средний период сформированной в результате процессов абляции упорядоченной структуры составляет ~ 0,8 мкм (Рис. 2, табл. 1). При этом на поверхности бороздок наблюдаются фрагменты округлой (капельной) формы, образование которых свидетельствует о повышении температуры поверхности при ФЛО до значений, обеспечивающих сверхкритический термический, а не докритический откольный механизм абляции [18].

На поверхности мишени HC титана при тех же параметрах облучения ($F = 0,74 \text{ Дж/см}^2$, N = 80) также наблюдается формирование квазипериодических (средний период $\approx 0,7$ мкм, Табл. 1) хорошо выраженных узких бороздок (ширина $\approx 0,5$ мкм, Табл. 1). Однако из представленных на рисунке 2 изображений модифицированной поверхности видно, что края бороздок в случае HC титана более «рванные». Это может свидетельствовать о более интенсивном процессе абляции при ФЛО.



Рис. 2. Структура поверхности низкомодульного титанового β-сплава Ti–26Nb–8Mo–12Zr (a) и наноструктурированного технически чистого титана марки BT1–0 (б) после облучения фемтосекундными лазерными импульсами. F = 0,74 Дж/см², N = 80.

Surface structure of low modulus titanium β -alloy Ti-26Nb-8Mo-12Zr (a) and nanostructured commercially pure titanium (VT1-0) (b) after irradiation with femtosecond laser pulses. $F = 0.74 \text{ J/cm}^2$, N = 80.

Таблица 1

Параметры нанорешетки, сформированной в результате обработки фемосекундным лазерным излучением, низкомодульного титанового сплава Ti-26Nb-8Mo-12Zr и наноструктурированного технически чистого титана марки BT1-0

	F = 0,7 Дж/см ² N = 80		$F = 1 \ Дж/см^2$ N = 400		F = 2,5 Дж/см ² N = 300					
	Ширина бороздок, мкм	Средний период, мкм	Ширина бороздок, мкм	Средний период, мкм	Ширина бороздок, мкм	Средний период, мкм				
Ti-26Nb-8Mo-12Zr	0,5	0,8	0,4	0,6	0,3	0,4				
BT1-0	0,5	0,7	0,3	0,4	-	-				

С увеличением плотности энергии и числа импульсов ($F = 1 \text{ Дж/см}^2$, N = 400) на облученной поверхности низкомодульного титанового сплава и НС титана образуются сферические образования диаметром 5–7 мкм (Рис. 3а, 3в), на поверхности которых формируется квазипериодическая структура. При этом на поверхности низкомодульного титанового сплава характерно наличие большой плотности фрагментов округлой формы и хлопьеобразных образований (Рис. 36). По данным энергодисперсионного анализа наблюда-



Рис. 3. Структура поверхности поверхности низкомодульного титанового в-сплава Ti-26Nb-8Mo-12Zr (a, б) и наноструктурированного технически чистого титана марки BT1-0 (в, г) после облучения фемтосекундными лазерными импульсами. F = 1 Дж/см², N = 400.

Surface structure of the modulus titanium β -alloy Ti-26Nb-8Mo-12Zr (a, δ) and nanostructured commercially pure titanium (VT1-0) (β , z) after irradiation with femtosecond laser pulses. $F = 1 J/cm^2$, N = 400.

ется значительное (до 30 вес. %) увеличение концентрации кислорода. По-видимому, эти продукты абляции — хлопьеобразные образования являются оксидами. В связи с высоким содержанием легирующих элементов в данном сплаве (Nb, Mo и Zr), формирующиеся оксиды могут представлять собой как монооксиды титана или, например, ниобия, так и более сложные на основе титана, ниобия, циркония и молибдена. Плотность фрагментов округлой формы и хлопьеобразных образований на поверхности HC титана существенно меньше. Это хорошо согласуется с данными энергодисперсионного анализа. Содержание кислорода на поверхности HC титана не превышает 25 вес. %.

Из данных, приведенных в таблице 1 видно, что с увеличением плотности энергии и числа импульсов до $F = 1 \text{ Дж/см}^2$, N = 400, соответственно, наблюдается уменьшение ширины бороздок и среднего периода нанорешетки как для низкомодульного титанового сплава, так и для НС титана. При этом ширина бороздок нанорешетки и средний период для НС титана меньше соответствующих значений для β -сплава.

Последующее увеличение плотности энергии ($F = 2,5 \text{ Дж/см}^2$, N = 300) приводит к существенному изменению топографии модифицированной поверхности исследуемого низкомодульного β -сплава и HC титана (Рис. 4). В результате ФЛО на поверхности β -сплава происходит формирование неупорядоченной шероховатости с образованием на периодической структуре высокой плотности продуктов абляции в виде сферических оплавленных фрагментов и хлопьеобразных образований. Ширина бороздок и средней период



Рис. 4. Структура поверхности низкомодульного титанового в-сплава Ti-26Nb-8Mo-12Zr (а, б) и наноструктурированного технически чистого титана марки ВT1-0 (в, г) после облучения фемтосекундными лазерными импульсами. F = 2,5 Дж/см², N = 300.

Surface structure of modulus titanium *B*-alloy Ti–26N*B*–8M*O*–12Zr (a, b) and nanostructured commercially pure titanium (VT1–0) (b, z) after irradiation with femtosecond laser pulses. F = 2,5 J/cm², N = 300.

нанорешетки уменьшаются и составляют ~ 0,3 и 0,4 мкм, соответственно (Табл. 1). При этом для HC титана увеличение плотности энергии приводит к радикальному влиянию на поверхность. Формируется макрошероховатость, представляющая собой смесь неоднородной многоуровневой периодической структуры (Рис. 4г), гладких участков и развитой шероховатости поверхности, сформированной на краях полос сканирования лазерным пучком.

Согласно представленным выше результатам, увеличение плотности энергии (*F*) с 0,74 до 2,5 Дж/см² при ФЛО поверхности β -сплава Ti–26Nb–8Mo–12Zr и HC технически чистого титана приводит к уменьшению ширины бороздок и среднего периода нанорешетки (Табл. 1). При максимальном числе импульсов (N = 400) формируются сферические образования диаметром 5–7 мкм, являющиеся, по-видимому, конусами [11].

Различное влияние ФЛО на топографию поверхности сплава Ti–26Nb–8Mo–12Zr и наноструктурированного технически чистого титана может быть связанно с отличающимися теплопроводностью и температурой плавления в связи с высоким содержанием тугоплавких легирующих элементов в *β*-титановом сплаве.

Исследование методом атомно-силовой микроскопии позволило количественно проанализировать влияние ФЛО на топографию поверхности исследуемых титановых сплавов. Параметры рельефа поверхности после обработки фемтосекундным лазером приведены в таблице 2. Из представленной таблицы видно, что увеличение плотности энергии (F) и числа падающих импульсов (N) при воздействии ФЛО на поверхность низкомодульного сплава Ti-26Nb-8Mo-12Zr не приводит к заметным изменениям параметров шероховатости поверхности (R₂ и R₂). Параметры шероховатости практически не изменяются и остаются в пределах одинаковых значений. Иное влияние воздействия ФЛО наблюдается для HC титанового сплава BT1-0. Полученные результаты показывают, что с увеличением плотности энергии и числа падающих импульсов наблюдается существенное (в несколько раз) увеличение R_a и R_z. При этом среднее арифметическое отклонение профиля R_a для HC технически чистого титана после облучения минимальной дозой (F = 0,7 Дж/см², N = 80) почти в 5 раз меньше, чем для низкомодульного титанового сплава, а R₂ – в 1,5 раза. С увеличением плотности энергии и числа падающих импульсов эта разница уменьшается и при условиях облучения с наибольшим числом падающих импульсов (N = 400) и среднем значении плотности ($F = 1 \, \text{Дж/см}^2$) параметры шероховатости для HC титана BT1-0 становятся выше соответствующих значений для низкомодульного титанового сплава. Полученная количественная оценка топографии поверхности исследуемых сплавов свидетельствует о более интенсивном процессе абляции в HC α -титане по сравнению с низкомодульным β -сплавом.

Таблица 2

и наноструктурированного технически чистого титана марки В 11-0										
	F = 0,7 Дж/см ² N = 80		$F = 1 \ \text{Дж/cm}^2$ N = 400		F = 2,5 Дж/см ² N = 300					
	<i>R</i> а, нм	Rz, HM	Ra, нм	<i>R</i> _z , нм	R a, нм	Rz, нм				
Ti-26Nb-8Mo-12Zr	807,904	2916,27	830,397	2667,83	807,899	2916,28				
BT1-0	168,511	1843,23	992,864	3171,21	577,569	3231,23				

Параметры шероховатости поверхности после обработки фемосекундным лазерным излучением низкомодульного титанового сплава Ti-26Nb-8Mo-12Zr

4. Заключение

Установлено, что в результате воздействия фемтосекундного лазерного облучения на поверхность низкомодульного титанового β-сплава Ti–26Nb–8Mo–12Zr и наноструктурированного технически чистого титана марки BT1–0 формируются квазипериодические наноструктуры, субволновые периоды которых лежат в диапазоне 0.4–0.8 мкм. Для сплава системы Ti–Nb–Mo–Zr период формируемой на поверхности нанорешетки уменьшается с ростом плотности энергии и превышает соответствующие значения для нелегированного титана. Параметры шероховатости модифицированной поверхности наноструктурированного титана BT1–0 увеличиваются с увеличением плотности энергии и числа падающих импульсов и не изменяются для низкомодульного титанового сплава Ti–26Nb–8Mo–12Zr. При минимальных дозах облучения параметры шероховатости наноструктурированного титана BT1–0 ниже, чем для низкомодульного титанового сплава Ti–26Nb–8Mo–12Zr.

Авторы выражают благодарность научному сотруднику ИПХФ РАН Гак В.Ю. за помощь в проведении исследований методом атомно-силовой микроскопии. Работа выполнена при финансовой поддержке контракта Министерства образования и науки РФ №02.G25.31.0103, грантов РФФИ № 13-02-01107А, №12-02-97528 и гранта Президента 14.125.13.2470-MK.

Библиографический список

1. Wang X.C., Zheng H.Y., Tan C.W., Wang F., Yu H.Y., Pey K.L. Femtosecond laser induced surface nanostructuring and simultaneous crystallization of amorphous thin silicon lm. *Optics Express*, 2010, Vol. 18, I. 18, 19379–19385.

2. Pereira A., Cros A., Delaporte P., Georgiou S., Manousaki A., Marine W., Sentis M. Surface nanostructuring of metals by laser irradiation: effects of pulse duration, wavelength and gas atmosphere. *Appl. Phys. A*, 2004, Vol. 79, 1433–1437.

3. Zabotnov S.V., Golovan L.A., Ostapenko I.A., Ryabchikov Yu.V., Chervyakov A.V., Timoshenko V.Yu., Kashkarov P. K., Yakovlev V.V. Femtosecond nanostructuring of silicon surfaces. *JETP letters*, 2006, Vol. 83, I. 2, 69–71.

4. Yongguang H., Shibing L., Wei L., Yuanxing L., Wei Y. Two-dimensional periodic structure induced by singlebeam femtosecond laser pulses irradiating titanium. *Optics Express*, 2009, Vol. 17, I. 23, 20756–20761.

5. Golosov E.V., Emel'yanov V.I., Ionin A.A., Kolobov Yu.R., Kudryashov S.I., Ligachev A.E., Novoselov Yu.N., Seleznev L.V., Sinitsyn D.V. Femtosecond laser writing of subwave one dimensional quasiperiodic nanostructures on a titanium surface. *JETP letters*, 2009, Vol. 90, №2, 107–110.

6. Bonse J., Höhm S., Rosenfeld A., Krüger J. Sub-100-nm laser-induced periodic surface structures upon irradiation of titanium by Ti: sapphire femtosecond laser pulses in air. *Appl. Phys. A*, 2013, Vol. 110, I. 3, 547–551.

7. Yasumaru N., Miyazaki K., Kiuchi J. Femtosecond-laser-induced nanostructure formed on hard thin lms of TiN and DLC. *Appl. Phys. A*, 2003, Vol. 76, I. 6, 983–985.

8. Golosov E.V., Ionin A.A., Kolobov Yu.R., Kudryashov S.I., Ligachev A.E., Novoselov Yu.N., Seleznev L.V., Sinitsyn D.V. Ultrafast changes in the optical properties of a titanium surface and femtosecond laser writing of onedimensional quasi-periodic nanogratings of its relief. *Journal of Experimental and Theoretical Physics*, 2011, Vol. 113, No. 1, 14–26.

9. Ionin A.A., Kudryashov S.I., Makarov S.V., Seleznev L.V., Sinitsyn D.V., Ligachev A.E., Golosov E.V., Kolobov Yu.R. Sub-100 nanometer transverse gratings written by femtosecond laser pulses on a titanium surface. *Laser physics letters*, 2013, Vol. 10, I. 5, 056004.

10. Vorobyev A.Y., Guo Chunlei. Femtosecond laser structuring of titanium implants. *Applied Surface Science*, 2007, Vol. 253, 7272–7280.

11. Ionin A.A., Kudryashov S.I., Makarov S.V., Rudenko A.A., Seleznev L.V., Sinitsyn D.V., Golosov E.V., Kolobov Yu.R., Ligachev A.E. Beam spatial profile effect on femtosecond laser surface structuring of titanium in scanning regime. *Applied Surface Science*, 2013, Vol. 284, 634–637.

12. Yang Y., Yang J., Liang C., Wang H., Zhu X., Zhang N. Surface microstructuring of Ti plates by femtosecond laser in liquid ambiences a new approach to improving biocompatibility. *Optic Express*, 2009, Vol. 17, I. 23, 21124–21133.

13. Ionin A.A., Kudryashov S.I., Makarov S.V., Saltuganov P.N., Seleznev L.V., Sinitsyn D.V., Golosov E.V., Goryainov A.A., Kolobov Yu.R., Kornieieva K.A., Shomorokhov A.N., Ligachev A.E. Femtosecond laser modification of titanium surfaces: direct imprinting of hydroxylapatite nanopowder and wettability tuning via surface microstructuring. *Laser Physics Letters*, 2013, Vol. 10, №4, 045605.

14. Geetha M., Singh A.K., Asokamani R., Gogia A.K. Ti based biomaterials, the ultimate choice for orthopaedic implants – A review. *Progress in materials science*, 2009, №54, 397–425.

15. Leyens C., Peter M. *Titanium and Titanium Alloys. Fundamentals and Applications.* – Weinheim, 2003. 532 pp.

16. Golosova O.A., Ivanov M.B., Vershinina T.N., Kolobov Yu.R. Structure and properties of low modulus titanium alloy Ti–26Nb–7Mo–12Zr. *Materials science and technology*, 2013, 29, №2, 204–209.

17. Иванов М.Б., Колобов Ю.Р., Голосов Е.В. Кузьменко И.Н., Нечаенко Д.А., Кунгурцев Е.С. Механические свойства наноструктурного титана серийного производства. *Российские нанотехнологии*, 2011, Т. 6, № 5–6, 108–114.

18. Golosov E.V., Emel'yanov V.I., Ionin A.A., Kolobov Yu.R., Kudryashov S.I., Ligachev A.E., Novoselov Yu.N., Seleznev L.V., Sinitsyn D.V. Surface modification of titanium by pulsed laser radiation of femtosecond duration. *Inorganic Materials: Applied Research*, 2011, Vol. 2, No. 3, 206–209.

References

1. Wang X. C., Zheng H. Y., Tan C. W., Wang F., Yu H. Y., Pey K. L. Femtosecond laser induced surface nanostructuring and simultaneous crystallization of amorphous thin silicon lm. *Opt. Express*, 2010, Vol. 18, I. 18, 19379–19385.

2. Pereira A., Cros A., Delaporte P., Georgiou S., Manousaki A., Marine W., Sentis M. Surface nanostructuring of metals by laser irradiation: effects of pulse duration, wavelength and gas atmosphere. *Appl. Phys. A*, 2004, Vol. 79, 1433–1437.

3. Zabotnov S.V., Golovan L.A., Ostapenko I.A., Ryabchikov Yu.V., Chervyakov A.V., Timoshenko V.Yu., Kashkarov P. K., Yakovlev V.V. Femtosecond nanostructuring of silicon surfaces. *JETP letters*, 2006, Vol. 83, I. 2, 69–71.

4. Yongguang H., Shibing L., Wei L., Yuanxing L., Wei Y. Two-dimensional periodic structure induced by singlebeam femtosecond laser pulses irradiating titanium. *Optics Express*, 2009, Vol. 17, I. 23, 20756–20761.

5. Golosov E.V., Emel'yanov V.I., Ionin A.A., Kolobov Yu.R., Kudryashov S.I., Ligachev A.E., Novoselov Yu.N., Seleznev L.V., Sinitsyn D.V. Femtosecond laser writing of subwave one dimensional quasiperiodic nanostructures on a titanium surface. *JETP letters*, 2009, Vol. 90, №2, 107–110.

6. Bonse J., Höhm S., Rosenfeld A., Krüger J. Sub-100-nm laser-induced periodic surface structures upon irradiation of titanium by Ti: sapphire femtosecond laser pulses in air. Appl. Phys. A, 2013, Vol. 110, I. 3, 547–551.

7. Yasumaru N., Miyazaki K., Kiuchi J. Femtosecond-laser-induced nanostructure formed on hard thin lms of TiN and DLC. *Appl. Phys. A*, 2003, Vol. 76, I. 6, 983–985.

8. Golosov E.V., Ionin A.A., Kolobov Yu.R., Kudryashov S.I., Ligachev A.E., Novoselov Yu.N., Seleznev L.V., Sinitsyn D.V. Ultrafast changes in the optical properties of a titanium surface and femtosecond laser writing of onedimensional quasi-periodic nanogratings of its relief. *Journal of Experimental and Theoretical Physics*, 2011, Vol. 113, No. 1, 14–26.

9. Ionin A.A., Kudryashov S.I., Makarov S.V., Seleznev L.V., Sinitsyn D.V., Ligachev A.E., Golosov E.V., Kolobov Yu.R. Sub-100 nanometer transverse gratings written by femtosecond laser pulses on a titanium surface. *Laser physics letters*, 2013, Vol. 10, I. 5, 056004.

10. Vorobyev A.Y., Guo Chunlei. Femtosecond laser structuring of titanium implants. *Applied Surface Science*, 2007, Vol. 253, 7272–7280.

11. Ionin A.A., Kudryashov S.I., Makarov S.V., Rudenko A.A., Seleznev L.V., Sinitsyn D.V., Golosov E.V., Kolobov Yu.R., Ligachev A.E. Beam spatial profile effect on femtosecond laser surface structuring of titanium in scanning regime. *Applied Surface Science*, 2013, Vol. 284, 634–637.

12. Yang Y., Yang J., Liang C., Wang H., Zhu X., Zhang N. Surface microstructuring of Ti plates by femtosecond laser in liquid ambiences a new approach to improving biocompatibility. *Optic Express*, 2009, Vol. 17, I. 23, 21124–21133.

13. Ionin A.A., Kudryashov S.I., Makarov S.V., Saltuganov P.N., Seleznev L.V., Sinitsyn D.V., Golosov E.V., Goryainov A.A., Kolobov Yu.R., Kornieieva K.A., Shomorokhov A.N., Ligachev A.E. Femtosecond laser modification of titanium surfaces: direct imprinting of hydroxylapatite nanopowder and wettability tuning via surface microstructuring. *Laser Physics Letters*, 2013, Vol. 10, №4, 045605.

14. Geetha M., Singh A.K., Asokamani R., Gogia A.K. Ti based biomaterials, the ultimate choice for orthopaedic implants – A review. *Progress in materials science*, 2009, №54, 397-425.

15. Leyens C., Peter M. *Titanium and Titanium Alloys. Fundamentals and Applications.* – Weinheim, 2003. 532 pp.

16. Golosova O.A., Ivanov M.B., Vershinina T.N., Kolobov Yu.R. Structure and properties of low modulus titanium alloy Ti–26Nb–7Mo–12Zr. *Materials science and technology*, 2013, 29, №2, 204–209.

17. Ivanov M.B., Kolobov Yu.R., Golosov E.V., Kuz'menko I.N., Nechaenko D.A., Kungurtsev E.S. Mechanical properties of mass-produced nanostructured titanium. *Nanotechnologies in Russia*, 2011, Vol. 6, I. 5–6, 370–378.

18. Golosov E.V., Emel'yanov V.I., Ionin A.A., Kolobov Yu.R., Kudryashov S.I., Ligachev A.E., Novoselov Yu.N., Seleznev L.V., Sinitsyn D.V. Surface modification of titanium by pulsed laser radiation of femtosecond duration. *Inorganic Materials: Applied Research*, 2011, Vol. 2, No. 3, 206–209.

Сведения об авторах

С.И.Кудряшов: канд. физ.-мат. наук, ст. научный сотрудник Физического института им. П.Н. Лебедева РАН, Москва, Россия, sikudr@sci.lebedev.ru, тел +7(499) 132 60 83.

О.А. Голосова: мл. научный сотрудник Института структурной макрокинетики и проблем материаловедения РАН, Черноголовка, Московская область, Россия, <u>golosova@ism.ac.ru</u> (адрес для переписки), тел. +7(985) 216 87 00.

А.Ю.Колобова: техник Института структурной макрокинетики и проблем материаловедения РАН, Черноголовка, Московская область, Россия; студент Национального исследовательского технологического университета «МИСиС», Москва, Россия, <u>nastasiia.misis@gmail.com</u>, тел +7(985) 714 42 45.

Ю.Р.Колобов: д-р физ.-мат. наук, и.о. зав. лаборатории Института структурной макрокинетики и проблем материаловедения РАН, Черноголовка, Московская область, Россия; руководитель НОиИЦ «Наноструктурные материалы и нанотехнологии» Белгородского государственного национального исследовательского университета, Белгород, Россия, kolobov@bsu.edu.ru, тел. +7(49652) 4 62 03.

Е.В.Голосов: канд. физ.-мат. наук, руководитель инновационного-экспертного отдела Института проблем химической физики РАН, Черноголовка, Россия, golosov@bsu.edu.ru, тел. +7(49652) 2 16 02.