

УДК 533.924, 621

## Создание прочного микрорельефа на поверхности титана при воздействии микроплазменных разрядов с амплитудой тока 200 А и длительностью импульсов 20 мс

*В. А. Иванов, М. Е. Коньжев, Л. И. Куксенова, В. Г. Лаптева, М. С. Алексеева, И. А. Хренникова, А. А. Летунов, А. С. Сахаров, Т. И. Камолова, А. А. Дорофеюк, С. Н. Сатунин*

*Экспериментально исследовано взаимодействие микроплазменных разрядов с образцами из технического титана ВТ1. Амплитуда импульсного тока микроплазменных разрядов составляла 200 А при длительности импульса 20 мс. Число импульсов микроплазменных разрядов варьировалось от 1 до 10. В результате микроплазменной обработки на образцах титана формируется сплошной переплавленный сильно упрочненный приповерхностный слой толщиной до 10 мкм. По сравнению с исходным состоянием образцов упрочненный микроплазменными разрядами приповерхностный слой титана характеризуется следующими наилучшими параметрами: микротвердость слоя увеличивается в 5 раз, предельно допустимое давление на образцы при трении повышается в 20 раз, интенсивность изнашивания при трении снижается на три порядка, а коэффициент трения уменьшается в 6 раз.*

PACS: 52.40.Hf, 81.40.-z

*Ключевые слова:* плазма, металл, титан, микроплазменный разряд, поверхность, упрочнение, микротвердость, износостойкость.

### Введение

Известно [1], что в вакууме при остаточном давлении воздуха  $p < 0,001$  Па воздействие на чистую поверхность металла импульсного ( $\sim 1$  мкс) потока плазмы с объемной плотностью электронов  $n_e > 10^{15}$  см<sup>-3</sup> и электронной температурой  $T_e \sim 10$  эВ приводит к возникновению электрических разрядов между двумя металлическими электродами, находящимися при большой разности потенциалов  $\sim 100$  кВ.

**Иванов Вячеслав Алексеевич**, зав. отделом.  
**Коньжев Михаил Евгеньевич**, научный сотрудник.  
**Летунов Александр Алексеевич**, старший научный сотрудник.  
**Сахаров Александр Сергеевич**, старший научный сотрудник.  
**Камолова Татьяна Ивановна**, научный сотрудник.  
**Дорофеюк Анна Александровна**, научный сотрудник.  
**Сатунин Сергей Николаевич**, научный сотрудник.  
 Институт общей физики им. А. М. Прохорова РАН.  
 Россия, 119991, Москва, ул. Вавилова, 38.  
 Тел. (499) 503-83-44. E-mail: ivanov@fpl.gpi.ru  
**Куксенова Лидия Ивановна**, зав. лабораторией.  
**Лаптева Валерия Григорьевна**, старший научный сотрудник.  
**Алексеева Мария Алексеевна**, научный сотрудник.  
**Хренникова Ирина Александровна**, научный сотрудник.  
 Институт машиноведения им. А. А. Благонравова РАН.  
 Россия, 101990, Москва, Харитоньевский пер., 4.

*Статья поступила в редакцию 25 июня 2011 г.*

© Иванов В. А., Коньжев М. Е., Куксенова Л. И., Лаптева В. Г., Алексеева М. С., Хренникова И. А., Летунов А. А., Сахаров А. С., Камолова Т. И., Дорофеюк А. А., Сатунин С. Н., 2011

В отличие от этих исследований, авторами было показано теоретически и экспериментально [2—6], что существенную роль в процессе возбуждения микроплазменных разрядов (МПР) на поверхности металлов играют естественные или специально нанесенные диэлектрические пленки или диэлектрические микровключения. При этом в вакууме взаимодействие потока плазмы с металлическим образцом с нанесенной на его поверхность тонкой диэлектрической пленкой (0,1—1 мкм) приводит к возбуждению МПР при существенно меньшей плотности плазмы  $n_e < 10^{12}$  см<sup>-3</sup> и при значительно меньшем значении электрического напряжения  $\sim 100$  В между металлическими электродами. Это обусловлено тем, что при взаимодействии плазменного потока с металлом, покрытым диэлектрической пленкой, происходит накопление электрического заряда на внешней поверхности пленки. В результате этого в местах разрыва тонкой пленки или на ее краю вблизи открытой поверхности металла могут возникать большие электрические поля  $\sim 1$  МВ/см. При таких или существенно меньших полях электрический пробой по поверхности диэлектрической пленки вблизи ее края приводит к возбуждению МПР с образованием плотной ( $\sim 10^{20}$  см<sup>-3</sup>) сильно локализованной плазмы (1—100 мкм) с температурой  $\sim 1$  эВ [7].

Расчеты показывают, что при плотности плазмы  $n_e \sim 10^{12}$  см<sup>-3</sup> характерное время накопления

заряда на поверхности пленки на металле, находящимся под отрицательным потенциалом в 400 В, не превышает 1 мкс. При этом поверхностный пробой пленки может возникать при полях всего около 100 кВ/см [6]. Воздействие плотной плазмы МПР на металл приводит к возбуждению электронной эмиссии из металла в плазму. При этом происходит разогрев и плавление металла в локальных областях на поверхности титана с формированием локализованной области высокого давления в расплаве [8], которое приводит к образованию микрократеров различных размеров 0,1—20 мкм [9]. Вследствие быстрого движения МПР по поверхности со скоростью перемещения до 500 м/с [10] происходит затвердевание расплавленных локальных областей металла с характерной скоростью остывания  $\sim 10^6$  К/с. В результате этих процессов происходит сильная перестройка морфологии и структуры поверхностного слоя металла на глубину до 20 мкм и формирование прочного микро рельефа на его поверхности [11—21].

Ранее выполненные авторами исследования процессов формирования прочного микро рельефа на поверхности титана [19, 21] были проведены при возбуждении МПР с пиковыми амплитудами импульсного электрического тока 200—400 А и экспоненциальным спадом тока во времени в течение 18 мс до минимального значения срыва тока  $\sim 30$  А. Полученные результаты продемонстрировали эффекты сильного упрочнения приповерхностного слоя для различных металлов и сплавов: титана, алюминия, стали 45, никелево-хромистых и кобальтово-хромистых сплавов [11—21]. Однако экспоненциальный спад тока МПР в течение всей длительности воздействия 18 мс не позволяет оптимизировать процесс микроплазменной обработки поверхности металлов и сплавов. В связи с этим решено было изменить условия экспериментов таким образом, чтобы возбуждать и поддерживать МПР при постоянной амплитуде импульсов электрического тока этих разрядов.

Основная цель данной работы — провести микроплазменную обработку поверхности образцов из титана и изучить результаты воздействия МПР на титановые образцы в условиях, когда импульсный электрический ток МПР поддерживается на постоянном уровне 200 А при фиксированной длительности импульса тока разрядов 20 мс. Важно также было изучить влияние создаваемой на поверхности металла диэлектрической пленки различной толщины 0,01—1 мкм на характеристики формируемого микро рельефа на поверхности металлических образцов.

В представленных в работе экспериментах в качестве исследуемого металла был выбран титан, который благодаря относительно небольшой

удельной плотности, высокой прочности и коррозионной стойкости находит широкое применение в авиации, ракетостроении и медицине.

Задачами изучения также являлись:

исследование влияния предварительной термической обработки на формирование диэлектрической оксидной пленки на поверхности образцов из технического титана;

исследование влияния режимов микроплазменной обработки на формирование прочного микро рельефа на поверхности образцов из технического титана после предварительной термической обработки;

изучение свойств микро рельефа, образующегося на поверхности образцов из титана в результате микроплазменной обработки;

исследование металлофизических и триботехнических свойств приповерхностного слоя титановых образцов, обработанных микроплазменными разрядами.

### Экспериментальная установка

Исследования процессов формирования микро рельефа на поверхности титановых образцов в результате воздействия МПР проводились в ИОФ РАН на установке “Сфера” [11, 12, 16, 19—21] (рис. 1). Изучение металлофизических, триботехнических, микроструктурных свойств поверхности металлических образцов, обработанных МПР, выполнялось в ИМАШ РАН на специальном оборудовании по методикам, описанным в [22—24].

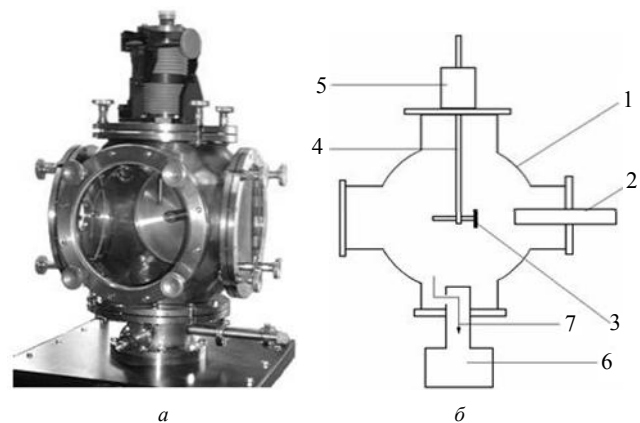


Рис. 1. Экспериментальная установка “Сфера”:

*а* — фотография внешнего вида установки; *б* — схема размещения плазменного инжектора, образца и фотоаппаратуры на установке.

1 — вакуумная камера; 2 — плазменный инжектор; 3 — образец на держателе; 4 — шток вакуумного манипулятора; 5 — вакуумный манипулятор; 6 — вакуумный насос, поток откачиваемого воздуха из камеры через лабиринт

В экспериментах использовали образцы из технического титана ВТ1, имеющего состав: Fe — 0,18 %, Si — 0,10 %, С — 0,07 %, О — 0,12 %,

Н — 0,01 %, остальное Ti. Исходные образцы из титана имели форму параллелепипеда 3,5×3,5×12 мм и подвергались предварительной механической обработке (фрезерование, шлифование и полирование). Перед микроплазменной обработкой на поверхности образцов из титана ВТ1 формировалась специальной образом диэлектрическая оксидная пленка. Для этого образцы подвергали термическому отжигу при температуре  $T_{отж} = 400$  °С в воздушной атмосфере в двух режимах, отличающихся продолжительностью отжига  $t$ : режим 1 —  $t = 1$  мин; режим 2 —  $t = 60$  мин. В режиме 1 на поверхности титановых образцов формировалась оксидная диэлектрическая пленка толщиной около 0,1 мкм. В режиме 2 на поверхности титановых образцов формировалась оксидная диэлектрическая пленка толщиной около 1 мкм.

Импульсный поток плазмы создавался плазменным инжектором в результате высоковольтного электрического разряда (электрическое напряжение 7 кВ, электрический ток 1,5 кА, длительность знакопеременного импульса 20 мкс), возникающего на поверхности плазмообразующего диэлектрического материала (полиметилметакрилат). Измерения, выполненные плазменными зондами, показали, что основным ионным компонентом плазмы являлись ионы водорода (90—80 %) и ионы углерода (10—20 %), а доля более тяжелых ионов составляла менее 1 % [25, 26]. Основные характеристики импульсного потока водородно-углеродной плазмы при обработке образцов из титана ВТ1: максимальная плотность плазмы в области размещения образцов  $5 \cdot 10^{12}$  см<sup>-3</sup>; длительность импульсного потока плазмы по уровню 0,1 от максимальной плотности — 20 мкс; длительность переднего фронта импульса плазмы — 5 мкс, скорость распространения потока плазмы от инжектора к образцу —  $5 \cdot 10^6$  см/с; электронная температура плазмы в плазменном потоке — 10 эВ. Фотография свечения плазменного потока и характерная осциллограмма импульса ионного тока насыщения плазмы вблизи образцов представлены, соответственно, на рис. 2 и 3.

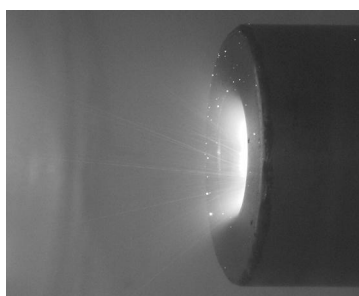


Рис. 2. Фотография свечения плазменного потока из инжектора в видимом диапазоне длин волн (справа — выходное сопло плазменного инжектора диаметром 30 мм)

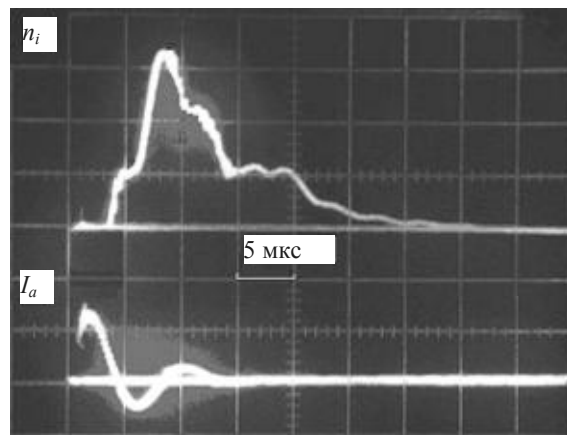


Рис. 3. Осциллограммы:  $n_i$  — импульс ионного тока насыщения плазмы вблизи поверхности образца;  $I_a$  — импульс электрического тока в плазменном инжекторе

Микроплазменную обработку образцов с помощью МПР проводили при начальном электрическом отрицательном напряжении на образце в 400 В. При взаимодействии внешнего потока плазмы с титановым образцом на его поверхности возникали микроплазменные разряды (рис. 4), которые представляли собой яркие локализованные светящиеся плазменные образования с характерными размерами от 1 до 100 мкм и с высокой плотностью плазмы [7], движущиеся с большой скоростью (до 500 м/с) по поверхности образцов [9, 10]. В местах возбуждения МПР возникало плавление металла. В результате воздействия сильного давления плазмы на расплавленный металл образовывалась впадина с выступающими краями, т. е. в расплавленном металле формировались микрократеры [8]. Вследствие быстрого охлаждения расплавленного металла и его кристаллизации эти кратеры в значительной степени сохраняли свою форму уже в твердом виде, формируя микрорельеф с характерными размерами выступов от 1 до 20 мкм (рис. 5).

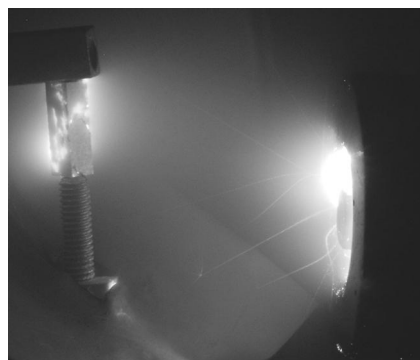


Рис. 4. Фотография микроплазменных разрядов на образце (слева) при воздействии плазменного потока из инжектора (справа). Диаметр выходного сопла инжектора 30 мм

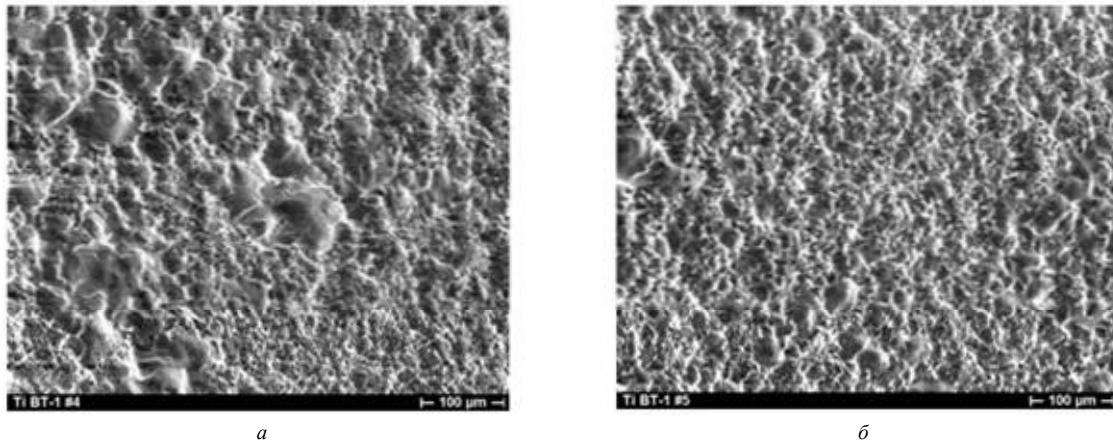
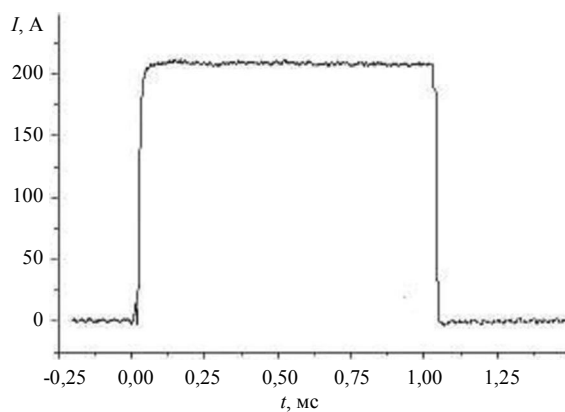


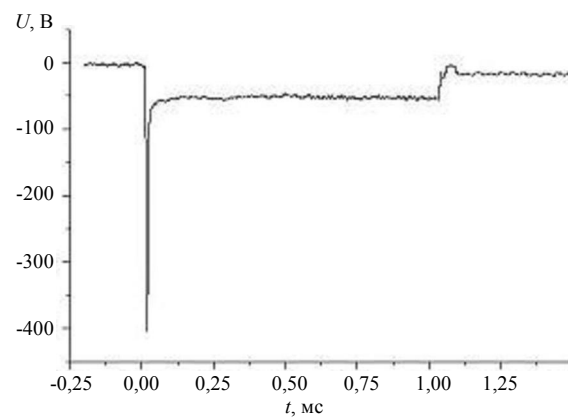
Рис. 5. Микрофотографии микрорельефа поверхности титановых образцов, полученные в результате воздействия микроплазменных разрядов: а — 10 импульсов; б — 4 импульса

В процессе микроплазменной обработки титановых образцов регистрировались осциллограммы импульсного электрического тока МПР через образец  $I(t)$  с почти постоянной амплитудой  $I_0 = 200$  А и длительностью импульсов от 1 до 20 мс (рис. 6, а, в) и электрического потенциала  $U(t)$  на образцах (рис. 6, б, г). Установлено, что при протекании электрического тока МПР через образец его электрический потенциал изменялся от -400 В

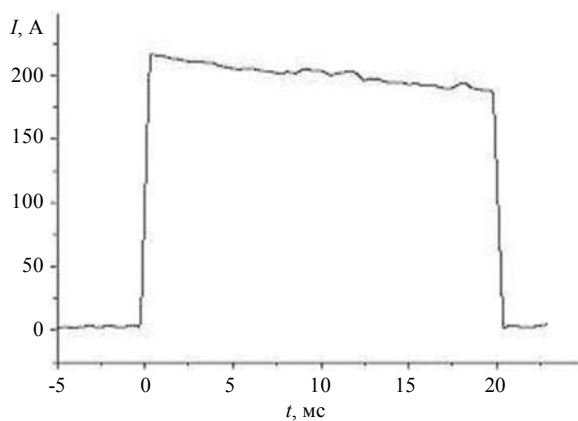
до -30 В (рис. 6, а, б). Это свидетельствует о том, что импульсное напряжение -400 В прикладывалось к образцу до того, как начиналось взаимодействие внешнего потока плазмы с металлом. Обнаружено также, что при протекании электрического тока МПР через образец динамика изменения тока во времени  $I(t)$  находится в противофазе с динамикой изменения электрического потенциала  $U(t)$  на образце (рис. 6, в, г).



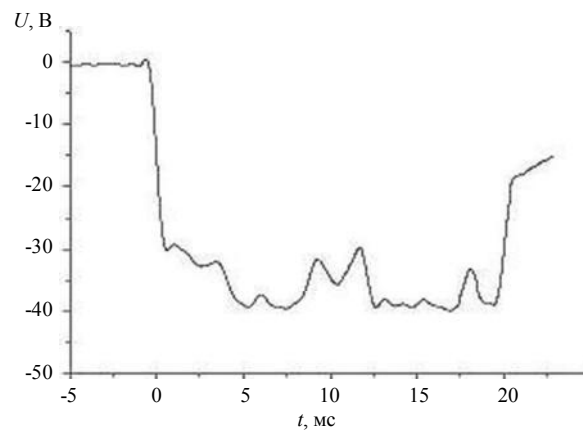
а



б



в



г

Рис. 6. Осциллограммы импульсов электрического тока (а, в) и падения напряжения на образце (б, г) при возбуждении МПР на титане, (а, б) соответствуют импульсам длительностью 1 мс, (в, г) соответствуют импульсам длительностью 20 мс

В основном режиме исследования проводились при постоянных значениях амплитуды тока 200 А и длительности импульсов 20 мс, а число импульсов МПР варьировалось от 1 до 10. После воздействия 10 импульсов МПР поверхность титанового образца становилась полностью переплавленной и очищенной от диэлектрической пленки. В результате этого порог возбуждения МПР на поверхности титана сильно возрастал по плотности плазмы [1]. Использовать число воздействующих импульсов МПР более 10 было нецелесообразно, так как разряды на таких полностью обработанных образцах в наших условиях не возбуждались, а возбуждение МПР уже происходило на поверхности металлического держателя образцов.

### Методы исследования поверхности обработанных титановых образцов

После микроплазменной обработки поверхности титана с помощью МПР изучалось изменение состояния приповерхностных слоев образцов в зависимости от толщины диэлектрической оксидной пленки, предварительно создаваемой на образцах путем термического отжига в атмосфере воздуха.

Микротвердость образцов измеряли на приборе ПМТ-3 (ГОСТ 9450—60) при нагрузке на индентер, равной 0,49 Н. Микрорельеф поверхности образцов изучали на профилографе—профилометре (модель 201). С помощью профилограмм оценивали следующие величины: толщину оксидных пленок, формирующихся в результате термического отжига образцов; максимальные значения высоты микрорельефа  $R_{max}$ ; величины механического износа образцов при триботехнических испытаниях.

Для изучения микроструктуры приповерхностного слоя металлических образцов был использован специальный метод скользящего пучка рентгеновских лучей, который позволяет проводить исследование изменений структуры в приповерхностных микрообъемах образцов послойно и без разрушения в интервале значений толщин слоев от десятых долей микрометра до десятков микромет-

ров [23]. Съемки проводились в  $CoK_{\alpha}$ -излучении, у которого длина волны  $\lambda = 1,78892 \text{ \AA}$ .

Триботехнические испытания исследуемых образцов проводили в лабораторных условиях на восьмипозиционной машине трения с возвратно-поступательным движением сопряженных образцов [24]. Средняя скорость относительного скольжения образцов 0,19 м/с. Максимальная нагрузка на образцы — 1250 Н. В качестве смазочного материала применяли солидол (ГОСТ 4366—76). Для определения сравнительной износостойкости и антифрикционности материалов пары трения (образец из титана ВТ1-контролобразец из стали 20, цементация, закалка и отпуск) испытания проводили при ступенчато повышаемых давлениях от 0,2 МПа до достижения предельно допустимых значений, выше которых происходили задир пары, “катастрофический” износ и резкое увеличение силы трения. В процессе испытаний на машине трения измеряли значения толщины изношенного слоя и силы трения между поверхностями образца и контролобразца. В случае малых толщин изношенного слоя  $h$  их определяли на профилографе-профилометре, в случае больших величин износа измеряли значения потери массы образцов, по значениям которых рассчитывали толщину изношенного слоя  $h$  и определяли интенсивность изнашивания  $I_h$  приповерхностного слоя образцов из титана при трении.

### Результаты исследований

Наличие диэлектрической пленки на поверхности металла существенно облегчает возбуждение МПР на поверхности образцов [6]. При этом были измерены толщины диэлектрических оксидных пленок при различных режимах термического отжига образцов. Проведены исследования влияния толщины пленки на свойства микрорельефа, образующегося на поверхности титановых образцов при взаимодействии с МПР. Результаты измерений микротвердости  $HV_{50}$  и высоты шероховатости  $R_{max}$  микрорельефа поверхности титановых образцов, обработанных МПР при различных режимах, показаны в таблице.

**Микротвердость  $HV_{50}$  и шероховатость  $R_{max}$  поверхности образцов из титана ВТ1, прошедших различные режимы предварительного термического отжига и обработанных затем с помощью МПР**

Номер образца	Время отжига, мин	Длительность импульсов, мс	Количество импульсов МПР	Глубина индентирования, мкм	$HV_{50}$ , кгс/мм <sup>2</sup>	$R_{max}$ , мкм
011-Ti	—	—	—	15,1	192	0,1
004-Ti	1	—	—	15,9	161	0,1
012-Ti	60	—	—	10,1	412	0,18
001-Ti	1	20	4	13,7	161	6,1
002-Ti	1	20	8	10,3	412	4,5
005-Ti	60	0,8	3	11,5	321	0,25
006-Ti	60	20	6	8,1	644	5,5
008-Ti	60	20	10	6,6	927	8,2

Выявлено, что толщина оксидной пленки в различных сечениях после отжига образца в течение 1 мин (режим 1, образец № 004-Ti) составляла 0,1—0,2 мкм, а после отжига в течение 60 мин (режим 2, образец № 012-Ti) около 1 мкм. Исходный образец из титана ВТ1 (образец № 011-Ti) имел слабо выраженный микрорельеф, возникающий в результате предварительной механической обработки (фрезерования, шлифования и полирования) образцов. Измеренная на профилографе-профилометре высота микрорельефа исходных образцов составляла величину  $R_{\max} = 0,1$  мкм. Отжиг в течение  $t = 1$  мин (режим 1, образец № 004-Ti) не приводит к изменению шероховатости поверхности. Отжиг в течение  $t = 60$  мин (режим 2, образец № 012-Ti) изменяет микрорельеф поверхности, при этом шероховатость имеет характерную высоту  $R_{\max} = 0,18$  мкм. Кроме того, поверхность образца приобретает квазирегулярный волнообразный характер с длиной волны, приблизительно равной 0,6 мм, и амплитудой волны около 0,5 мкм.

При взаимодействии импульсного потока плазмы инжектора с металлическими образцами на их поверхности возбуждались микроплазменные разряды [2]. Вследствие интенсивного локального плавления металла в течение времени развития микроплазменных разрядов, а затем (после окончания воздействия плотной плазмы) вследствие быстрого затвердевания расплавленных областей металла (из-за высокой теплопроводности и быстрого отвода тепла от поверхности вглубь объема металла) в локальных приповерхностных зонах исследуемых образцов наблюдалось образование как одиночных микрократеров, так и их скоплений. В результате повторяющихся циклических процессов быстрого плавления и затвердевания локальных участков приповерхностного слоя образцов при числе импульсов плазмы  $N = 4$  или  $N = 10$  на поверхности образцов формировался сплошной переплавленный слой, имеющий развитую структуру поверхностного микрорельефа.

На титановом образце № 001-Ti, прошедшем термический отжиг в течение 1 мин, в результате воздействия МПР с числом импульсов  $N = 4$  получены следующие результаты:

на трех гранях образца образовался неравномерный микрорельеф с чередованием участков с шероховатостью высотой  $R_{\max} \approx 2$  мкм и участков с шероховатостью  $R_{\max} \approx 6$  мкм;

на четвертой грани этого образца (которая была обращена к плазменному инжектору) сформировался микрорельеф более чем в два раза выше, чем на других гранях, причем здесь чередуются участки с высотой микрорельефа  $R_{\max} \approx 4$  мкм и участки с  $R_{\max} \approx 14$  мкм.

При увеличении числа импульсов МПР до  $N = 8$  на всех гранях титанового образца (№ 002-Ti) об-

разовывался более равномерный микрорельеф с характерной высотой  $R_{\max} = 4,5$  мкм.

На титановом образце № 005-Ti, прошедшем термический отжиг в течение  $t = 60$  мин, в результате воздействия МПР с числом импульсов  $N = 3$  и очень короткой длительностью импульсов 0,8 мс сформировался микрорельеф с малой высотой выступов  $R_{\max} = 0,25$  мкм, что в 1,5 раза превышает микрорельеф образца (после термического отжига без МПР). При этом обработанная поверхность образца № 005-Ti приобрела волнообразный характер с длиной волны около 0,8 мм и амплитудой около 1 мкм, что приблизительно в 1,5 раза превышает соответствующие параметры образца № 012-Ti.

На титановом образце № 006-Ti, прошедшем термический отжиг в течение  $t = 60$  мин, в результате воздействия МПР при  $N = 6$  и при длительности импульсов 20 мс получен равномерный микрорельеф с  $R_{\max} = 5,5$  мкм.

На титановом образце № 008-Ti, прошедшем термический отжиг в течение  $t = 60$  мин, в результате воздействия МПР при  $N = 10$  и при длительности импульсов 20 мс получен наиболее равномерный микрорельеф с  $R_{\max} \approx 8$  мкм.

Исследование влияния времени отжига на микротвердость поверхности образцов из титана показало, что термический отжиг в течение 1 мин практически не влияет на их микротвердость (образец № 004-Ti). Длительный термический отжиг в течение 60 мин приводит к увеличению микротвердости приповерхностного слоя образца по сравнению с его исходным состоянием в 2 раза от значения  $HV_{50} = 192$  кгс/мм<sup>2</sup> до  $HV_{50} = 412$  кгс/мм<sup>2</sup> (образец № 012-Ti).

Для образца № 002-Ti, подвергнутого предварительному кратковременному термическому отжигу в течение 1 мин, в результате воздействия МПР с числом импульсов  $N = 8$  и при длительности импульсов 20 мс микротвердость приповерхностного слоя титана увеличивается в 2 раза по сравнению с исходным состоянием образца от значения  $HV_{50} = 192$  кгс/мм<sup>2</sup> до  $HV_{50} = 412$  кгс/мм<sup>2</sup>.

Для образца № 008-Ti, подвергнутого длительному термическому отжигу в течение 60 мин, в результате воздействия МПР с числом импульсов  $N = 10$  и при длительности импульсов 20 мс микротвердость приповерхностного слоя титана увеличивается в 5 раз по сравнению с исходным состоянием образца от значения  $HV_{50} = 192$  кгс/мм<sup>2</sup> до  $HV_{50} = 927$  кгс/мм<sup>2</sup>.

Таким образом, использование длительного термического отжига титанового образца в течение 60 мин и его последующей обработки с помощью МПР приводят к аддитивному увеличению микротвердости приповерхностного слоя титана в результате двух различных независимых процессов: термической закалки образца и микроплазменного упрочнения.

Результаты рентгеноструктурного анализа образцов из титана ВТ1 показали, что в исходном состоянии исследуемые образцы титана ВТ1 имеют крупнозернистую структуру. Это подтверждается характерной пятнистой картиной рентгенограмм, полученных при рентгено съемке поверхностного слоя. Пятна на рентгенограмме являются незначительно размытыми в радиальном направлении, что свидетельствует о невысоком уровне микродеформаций кристаллической решетки и, соответственно, незначительной величине остаточных напряжений II рода, вызванных механической обработкой образцов при их изготовлении.

На рентгенограммах образцов после отжига в течение 1 мин на углах дифракции  $\theta \approx 16^\circ$  появляются следы новой фазы, соответствующей оксиду титана  $TiO_2$ . Рентгеновская линия оксида сильно размыта вследствие его наноструктурного состояния (размер частиц менее 100 нм). Тепловое воздействие на образец снимает тот невысокий уровень остаточных напряжений, который имел место в результате изготовления образца, на что указывает исчезновение размытости рефлексов в радиальном направлении и появление большого количества интерференционных линий на рентгенограмме при углах  $\theta > 45^\circ$ .

При воздействии 10 импульсов МПР на титановые образцы, прошедшие предварительный термический отжиг в течение 1 мин, в рентгеновских спектрах отраженного излучения следов оксида титана не обнаружено. Физическое уширение интерференционной линии основной фазы титана ( $\alpha - Ti$ ) увеличивается примерно в 2 раза по сравнению с образцом титана, не подвергавшегося воздействию МПР. Это свидетельствует о том, что в результате обработки МПР приповерхностный слой титана имеет высокий уровень остаточных внутренних напряжений.

При воздействии 10 импульсов МПР на титановые образцы, прошедшие предварительный термический отжиг в течение 60 мин, в рентгеновских спектрах поверхностного слоя наблюдаются линии оксида титана типа рутила  $TiO_2$ . Линии ос-

новной фазы ( $\alpha - Ti$ ), соответствующие малым углам дифракции ( $\theta \approx 20-30^\circ$ ), размыты на 50 %, а линии на больших углах ( $\theta > 45^\circ$ ) стали четкими и практически неразмытыми по сравнению с образцами, отожженными в течение 1 мин и обработанными 10 импульсами МПР. Эти особенности рентгеновской картины дают основание предполагать, что в результате обработки МПР структура приповерхностного слоя измельчается до ультрамелкодисперсного состояния (размер зерен составляет более 100 нм) при низком уровне остаточных внутренних напряжений. Такое структурное состояние создает предпосылки для обеспечения высоких триботехнических характеристик.

Триботехнические испытания были проведены для трех групп образцов из титана: 1) образцы в исходном состоянии; 2) образцы после отжига в течение 1 мин и последующей обработки МПР при  $N = 4$  и  $N = 8$ ; 3) образцы после отжига в течение 60 мин и последующей обработки МПР при  $N = 10$  импульсов. Испытания показали, что для первых двух групп образцов в течение первых 30 мин работы уже наблюдался сильный износ микро рельефа при трении даже при малых давлениях на образцы 0,2—0,5 МПа. При этом относительная интенсивность изнашивания для этих групп образцов составляет значительную величину — около  $2,5 \cdot 10^{-6}$ , а коэффициент трения  $f = 0,24$  для образцов в исходном состоянии и  $f = 0,08$  для образцов, прошедших отжиг в течение 1 мин и обработанных с помощью МПР.

Лучшие триботехнические характеристики приповерхностного слоя титана получены для образцов третьей группы, которые прошли термический отжиг в течение 60 мин и последующую обработку МПР при  $N = 10$  импульсов. В этом случае пара трения образец-контроль образец проработала с малыми относительными интенсивностями изнашивания и малыми коэффициентами трения вплоть до давления на образцы  $p = 11$  МПа (рис. 7, а, б). Это давление более чем в 20 раз превышает предельное давление для образцов групп (а) и (б).

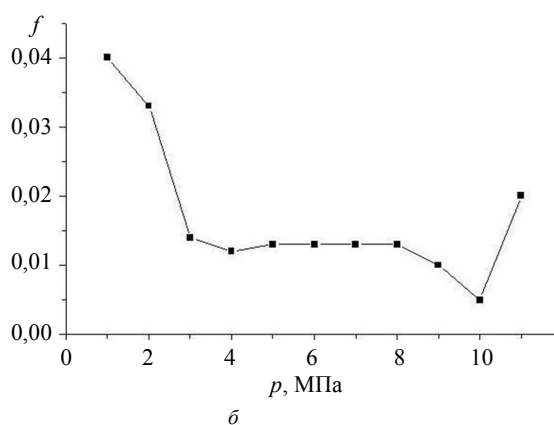
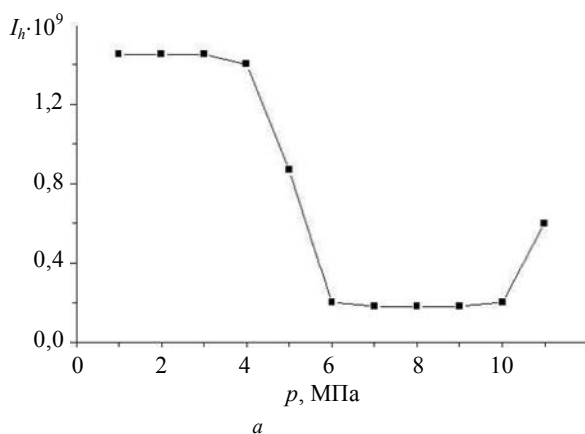


Рис. 7. Зависимости:

а —  $I_h$  — интенсивности изнашивания; б —  $f$  — коэффициента трения от прикладываемого давления к образцам из титана ВТ1 после их отжига в течение 60 мин и микроплазменного упрочнения при токе  $I = 200$  А, длительности импульсов 20 мс,  $N = 10$

Для образцов группы (в) значения интенсивности изнашивания не превышали  $1,5 \cdot 10^{-9}$  при работе на вершинах микрорельефа и  $0,5 \cdot 10^{-9}$  при работе на их основаниях, что на три порядка меньше интенсивности изнашивания для образцов групп (а) и (б). Значения коэффициента трения во всем диапазоне давлений 0,2—11 МПа не превышали значения  $f = 0,04$ , что в 6 раз меньше коэффициента трения для образцов титана в исходном состоянии.

### Заключение

При взаимодействии в вакууме импульсного потока плазмы (с электронной плотностью  $\sim 10^{13}$  см<sup>-3</sup> и длительностью импульса  $\sim 10$  мкс) с титановыми образцами, покрытыми тонкой диэлектрической пленкой (толщиной  $\sim 1$  мкм), на поверхности этих образцов возбуждаются микроплазменные разряды. В результате микроплазменной обработки на образцах титана формируется упрочненный приповерхностный слой толщиной до 10 мкм, который имеет сильно измененные физические, структурные и триботехнические свойства.

Экспериментально установлено, что при амплитуде импульсного тока микроплазменных разрядов 200 А, длительности импульса тока 20 мс, числе импульсов 10, на поверхности титановых образцов формируется прочный сплошной переплавленный слой металла, который характеризуется высотой микрорельефа  $R_{\max} \approx 8$  мкм, высоким значением микротвердости  $HV_{50} = 927$  кгс/мм<sup>2</sup>, низкой относительной величиной интенсивности изнашивания при трении  $I_h \approx 1 \cdot 10^{-9}$ , большим предельным давлением на образцы при трении  $p = 11$  МПа.

Таким образом, упрочненный микроплазменными разрядами приповерхностный слой титана по сравнению с исходным состоянием образцов характеризуется следующими параметрами: микротвердость слоя увеличилась в 5 раз, предельно допустимые давления на образцы при трении повысились более чем в 20 раз, интенсивность изнашивания при трении снизилась на три порядка, коэффициент трения уменьшился в 6 раз. При этом расчетное значение средней скорости обработки приповерхностного слоя титана микроплазменными разрядами составляет 10 см<sup>2</sup>/с, а среднее значение удельных энергетических затрат, необходимых для формирования упрочненного переплавленного слоя титана, не превышает величину 800 Дж/см<sup>2</sup>.

На основании анализа экспериментальных данных брегговского отражения пучка рентгеновских лучей от приповерхностного слоя титановых образцов можно заключить, что обработка этих образцов микроплазменными разрядами приводит к измельчению микрозерен поликристаллической

структуры их приповерхностного слоя и увеличению микротвердости. При этом также происходит снижение величины остаточных механических напряжений в этом слое, что существенно улучшает триботехнические свойства поверхности титановых образцов, обработанных микроплазменными разрядами.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект РФФИ № 09-08-00753-а).*

### Литература

1. Месляц Г. А. Эктонны в вакуумном разряде: пробой, искра, дуга. — М.: Наука, 2000.
2. Иванов В. А. // Прикладная физика. 2001. № 2. С. 5.
3. Иванов В. А., Кобышев М. Е., Сахаров А. С. // Там же. 2006. № 6. С. 114.
4. Иванов В. А., Сахаров А. С., Кобышев М. Е. // Физика плазмы. 2008. Т. 34. № 2. С. 171.
5. Ivanov V. A., Juttner B., Pursch H., Siemroth P. // Adv DDR Beitrage aus der Plasma Physik B. 23. H. 6. 1983. P. 551.
6. Ivanov V. A., Sakharov A. S., Konyzhev M. E. Plasma initiation of vacuum arcs on a metal surface partially covered with a dielectric film // Proceedings of the XXIII-rd International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum (Bucharest, Romania, September 15—19, 2008). V. 2. P. 575.
7. Ivanov V. A., Juttner B., Pursch H. // Pub. Nuclear and Plasma Sciences Society USA. IEEE Plasma Science. 1985. V. PS-13. No. 5. P. 334.
8. Зимрот П., Иванов В. А. Измерение механического давления плазмы вакуумной дуги // В сб. Плазменные генераторы и процессы. Матер. III совещ. междунар. рабочей группы "Физика низкотемпературной плазмы". Проблемная комиссия многостороннего сотрудничества социалистических стран. — Минск: ИТМО АН БССР. 1988. С. 43.
9. Ivanov V. A., Juttner B., Zimin A. M. Dynamics of Cathode Spots on the Beryllium in Vacuum Arc Discharges. // In book: Proceedings of the XX-th International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum. Tiurs(France) — July 1—5, 2002. Ed. SFV 2002. P. 135. IEEE Catalogu Number 02CH37331. ISBN 0-7803-7394-4. ISSN 1093-2941.
10. Ivanov V. A., Juttner B., Zimin A. M. // Plasma Devices and Operations. 2002. V. 10. P. 109.
11. Иванов В. А., Кобышев М. Е., Спиринов А. М., Дорофеев А. А., Камолова Т. И., Куксенова Л. И., Лаптева В. Г., Залавутдинов Р. Х. // Прикладная физика. 2006. № 6. С. 97.
12. Иванов В. А., Кобышев М. Е., Спиринов А. М., Дорофеев А. А., Камолова Т. И., Куксенова Л. И., Лаптева В. Г., Залавутдинов Р. Х. // Там же. 2007. № 6. С. 60.
13. Иванов В. А., Куксенова Л. И., Лаптева В. Г., Кобышев М. Е. // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2007. № 6. С. 81.
14. Иванов В. А., Куксенова Л. И., Лаптева В. Г., Кобышев М. Е. // Там же. 2008. № 1. С. 74.
15. Иванов В. А., Куксенова Л. И., Лаптева В. Г., Кобышев М. Е. // Там же. № 3. С. 84.
16. Иванов В. А., Кобышев М. Е., Сатунин С. И., Дорофеев А. А., Камолова Т. И., Куксенова Л. И., Лаптева В. Г. // Прикладная физика. 2008. № 6. С. 62.
17. Иванов В. А., Кобышев М. Е., Куксенова Л. И., Лаптева В. Г., Хренникова И. А. // Трение и износ. 2009. Т. 30. № 4. С. 396.

18. Куксенова Л. И., Лаптева В. Г., Иванов В. А., Коныжев М. Е. // Трение и смазка в машинах и механизмах. 2009. № 5. С. 10.
19. Иванов В. А., Коныжев М. Е., Куксенова Л. И., Лаптева В. Г., Сахаров А. С., Камолова Т. И., Дорофеев А. А., Сатунин С. Н. // Прикладная физика. 2009. № 6. С. 76.
20. Иванов В. А., Коныжев М. Е., Куксенова Л. И., Лаптева В. Г., Сахаров А. С., Дорофеев А. А., Камолова Т. И., Сатунин С. Н., Летунов А. А. // Там же. 2010. № 6. С. 57.
21. Ivanov V. A., Konyzhev M. E., Kuksenova L. I., Lapteva V. G., Sakharov A. S., Kamolova T. I., Dorofeyuk A. A., Satunin S. N. // Plasma Physics Reports. 2010. V. 36. No. 13. P. 1241.
22. Куксенова Л. И., Лаптева В. Г., Герасимов С. А. Методы исследования поверхностных слоев при трении: Учеб. пос. — М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2010.
23. Рыбакова Л. М., Куксенова Л. И. Структура и износостойкость металла. — М.: Машиностроение, 1982.
24. Методы испытаний на трение и износ. / Справ. изд. Куксенова Л. И., Лаптева В. Г., Колмаков А. Г., Рыбакова Л. М. — М.: Интермет Инжиниринг, 2001.
25. Иванов В. А. // Краткие сообщения по физике ФИАН. 1988. № 5. С. 33.
26. Ivanov V. A. Triple Probe Method for Characterization of Arc Cathode Plasmas. // Akademie der Wissenschaften der DDR, Zentralinstitut für Elektronenphysik. Preprint 85-1.

## Creating a hard microrelief of the titanium surface by exposure of microplasma discharges with the 200-A amplitude and 20-ms pulse duration

*V. A. Ivanov, M. E. Konyzhev, A. A. Letunov, A. S. Sakharov, T. I. Kamolova,  
A. A. Dorofeyuk, S. N. Satunin*

Prokhorov General Physics Institute of the Russian Academy of Sciences,  
38 Vavilov str., Moscow, 119991, Russia  
E-mail: ivanov@fpl.gpi.ru

*L. I. Kuksenova, V. G. Lapteva, M. S. Alekseeva, I. A. Khrennikova*  
A. A. Blagonravov Mechanical Engineering Institute RAS,  
4 Khariton'evskii per., Moscow, 101990, Russia

*The interaction of microplasma discharges with samples of the VT1 technical titanium was experimentally studied. The amplitude of the pulse electrical current of microplasma discharges was 200 A and pulse duration was 20 ms. The number of pulses of microplasma discharges varied from 1 to 10 pieces. As a result of the microplasma processing of titanium samples, the surface of a solid remelted layer was formed with the thickness of 10 microns and with highly hardness. This layer of titanium was taking on new physical properties: well-developed microrelief of the surface, increased microhardness, and improved tribological parameters. Compared with the initial state of the samples, new surface layer of titanium reinforced by microplasma discharges was characterized by the following best parameters: the microhardness was increased by 5 times, the maximum pressure applied to the samples during friction was increased by 20 times, the relative friction wear was reduced by three orders of magnitude, while the friction coefficient was decreased by 6 times.*

PACS: 52.40.Hf, 81.40.-z

*Keywords:* plasma, metal, titanium, microplasma discharge, surface, hardening, microhardness, wear resistance.