

Сильное локализованное взаимодействие микроплазменных разрядов с титаном

В. А. Иванов, М. Е. Коньжеев, Л. И. Куксенова, В. Г. Лаптева*,
А. С. Сахаров, Т. И. Камолова, А. А. Дорофеюк, С. Н. Сатунин*
Институт общей физики им. А. М. Прохорова РАН, Москва, Россия
*Институт машиноведения им. А. А. Благодирова РАН, Москва, Россия

Проведены экспериментальные исследования возбуждения микроплазменных разрядов на поверхности титановых образцов, помещенных в однородный импульсный плазменный поток. В результате сильного локализованного взаимодействия микроплазменных разрядов с титаном в его приповерхностном слое происходят быстрое плавление и остывание участков поверхности титана микронного размера. В результате такого многократного воздействия микроплазменных разрядов на поверхности титана формируется сплошной переплавленный слой толщиной до 20 мкм, который характеризуется сильноизмененными физическими, структурными и триботехническими свойствами материала.

PACS: 52.40.Hf; 81.40.-z

Ключевые слова: плазма, вакуум, титан, поверхность, микроплазменный разряд, упрочнение, микро-твердость, износостойкость.

В последние годы интенсивно развиваются исследования по применению универсального микроплазменного метода обработки металлов и сплавов [1] в целях получения высокопрочных поверхностных слоев на различных по форме образцах [2—5]. К настоящему времени проведены первые исследования результатов упрочнения поверхности ряда металлов и сплавов с применением метода микроплазменных разрядов [1], возбуждаемых на поверхности металлических образцов при взаимодействии с импульсным потоком плазмы [6—9]. Существенным продвижением в понимании явления возбуждения микроплазменных разрядов на поверхности металлов в потоке плазмы стало создание теории возникновения сильных электрических полей вблизи и на поверхности ме-

талла, частично покрытого диэлектрической пленкой [10, 11].

Суть явления возникновения сильных электрических полей вблизи поверхности металла состоит в накоплении электрического заряда на поверхности диэлектрической тонкой (0,01—1 мкм) пленки в потоке плазмы. При этом возникают сильные электрические поля, имеющие как нормальную, так и тангенциальную компоненты вблизи края диэлектрической пленки на поверхности металла. Эти электрические поля приводят к развитию электрического пробоя вдоль поверхности диэлектрической пленки, приводящего к образованию плотной плазмы с концентрацией электронов вплоть до 10^{18} см^{-3} [12, 13], непосредственное воздействие которой на металл приводит к образова-

нию катодных пятен [14—16] и развитию квазидугового разряда на поверхности металла с высоким напряжением горения [2, 3].

Настоящая работа является развитием исследований универсального микроплазменного метода обработки изделий из металлов и сплавов, основанного на новых принципах возбуждения импульсных микроплазменных разрядов, способных упрочнять металлические изделия со сложной формой поверхности [1—10]. В данной работе метод микроплазменной обработки использовался для модификации поверхности образцов из титанового сплава типа ВТ-1. Интерес к этим исследованиям вызван тем, что данный сплав широко применяется в медицине, авиации и ракетостроении. Это обусловлено тем, что данный сплав обладает рядом уникальных свойств: небольшим удельным весом, достаточно высокой механической прочностью, а также хорошей коррозионной стойкостью. Учитывая необходимость дальнейшего повышения надежности титановых конструкций, следует развивать новые методы обработки изделий из титана в целях повышения их прочности и износостойкости.

Цель настоящих исследований — применение нового универсального микроплазменного метода для упрочнения поверхности образцов из титана.

В ходе работы решались следующие научно-технические задачи:

исследование возможности применения микроплазменного метода для формирования прочного микрорельефа на поверхности образцов из титанового сплава ВТ-1;

изучение свойства микрорельефа, формирующегося на поверхности образцов из титанового сплава ВТ-1 в результате их взаимодействия с микроплазменными разрядами;

исследование триботехнических свойств поверхностного слоя титановых образцов, обработанных микроплазменными разрядами.

Экспериментальные установки и методы исследований

Исследования характеристик плазмы, необходимых для устойчивого возбуждения импульсных микроплазменных разрядов на поверхности металлов, проводились на установке "Сфера" (рис. 1) в ИОФ РАН с использованием плазменных инжекторов, разработанных ЗАО НТЦ "ПлазмаИОФАН" [2—5]. Изучение триботехнических свойств и измерение микротвердости поверхностного слоя образцов, обработанных микроплазменными разрядами, выполнялись в ИМАШ РАН.

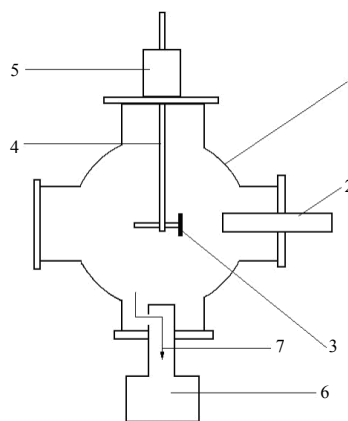


Рис. 1. Схема экспериментальной установки "Сфера": 1 — вакуумная камера; 2 — плазменный инжектор; 3 — образец; 4 — шток; 5 — вакуумный ввод; 6 — насос; 7 — откачка газа

В экспериментах были использованы образцы из титанового сплава ВТ-1, в состав которого входит основной элемент — титан (Ti) — 99,52 %, остальные 0,48 % содержания элементов распределяются следующим образом: железо — 0,18 %, кремний — 0,1 %, углерод — 0,07 %, кислород — 0,12 %, водород — 0,01 %.

Образцы в виде параллелепипеда с размерами 4×4×12 мм изготавливались из поликристаллического титанового прутка диаметром 10 мм с применением методов фрезерования и шлифования, так что шероховатость поверхности исходных образцов составляла величину ~ 1 мкм. Каждый образец обезжиривался гексаном и обезвоживался этанолом. После этого образец закрепляли на манипуляторе в центре вакуумной камеры установки "Сфера", а затем производили откачку камеры механическим вакуумным насосом до остаточного давления воздуха в камере 1 Па.

Импульсный поток плазмы создавался плазменным инжектором в результате импульсного высоковольтного электрического разряда (напряжение 7 кВ, ток 1,5 кА, длительность знакопеременного импульса 25 мкс), возникающего на поверхности плазмообразующего диэлектрического материала (полиметилметакрилат) (рис. 2). Основным ионным компонентом плазмы являлись ионы водорода (80 %) и ионы углерода (20 %), а доля более тяжелых ионов составляла менее 1 % [2, 3].

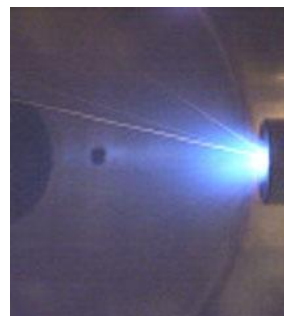


Рис. 2. Фотография свечения плазменного потока, формируемого инжектором в установке "Сфера"

В отличие от ранее исследованных образцов из Ni—Cr- и Co—Cr-сплавов, которые подвергались термическому отжигу в воздухе в целях создания окисной пленки на поверхности сплавов [2, 3], в настоящей работе образцы из титана BT-1 не подвергались предварительной термической обработке. Тем не менее на их поверхности должна была сформироваться тонкая оксидная диэлектрическая пленка, так как хорошо известно, что при остаточном давлении воздуха (10^{-2} – 10^5) Па в течение нескольких секунд на поверхности титана формируется оксидная диэлектрическая пленка со структурой рутила TiO_2 толщиной 0,01—0,1 мкм.

Микротвердость (H_V) образцов измеряли с помощью прибора ПМТ-3 (ГОСТ 9450—60). Измерения микрорельефа поверхности образцов проводили с помощью профилографа-профилометра мод. 201. Из полученных профилограмм рассчитывались максимальные значения высоты микрорельефа (H_{max}) поверхности образцов в исходном состоянии, после микроплазменной обработки, а также в процессе триботехнических испытаний.

Изучение изменений микроструктуры приповерхностного слоя титановых образцов осуществлялось с использованием метода скользящего пучка рентгеновских лучей [17]. Так, изменение ширины линии отраженного рентгеновского луча при скользящих углах падения на поверхность титанового образца при изменении углов наклона зондирующего пучка лучей к исследуемой поверхности образца позволяет сделать заключение об изменении микроструктурной структуры металла по сравнению с исходным состоянием в тонких приповерхностных слоях образца при толщине исследуемого слоя 0,5—20 мкм.

Триботехнические испытания исследуемых образцов проводили в лабораторных условиях на восьмипозиционной машине трения с возвратно-поступательным движением сопряженных образцов [18]. Средняя скорость относительного скольжения образцов составляла 0,2 м/с, максимальная нагрузка на образцы — 1250 Н. В качестве смазочного материала применяли солидол.

Для определения сравнительной износостойкости и антифрикционности материалов пары трения (образец из титана BT-1 — контролобразец из стали 20, цементация, закалка) испытания проводили при ступенчато повышаемых давлениях — от 0,2 МПа до достижения предельно допустимых значений, выше которых происходили задиры пары и, следовательно, “катастрофический” износ испытуемого образца при одновременном резком увеличении силы трения. В процессе испытаний на машине трения измеряли два основных трибологических параметра:

износ поверхности образца (методом измерения изменений толщины образца с помощью микро-

метра с одновременным контролем его шероховатости на профилографе-профилометре);

сила трения между поверхностями образца и контролобразца (с помощью тензометрического датчика).

Параметры импульсной плазмы (объемная плотность ионов и температура электронов), создаваемой коаксиальным электроразрядным инжектором в области расположения образцов, измеряли несимметричным трехэлектродным лемгюровским зондом по методике, разработанной в работе [19].

Экспериментальные результаты исследований образцов из титана BT-1

Плазменный инжектор, установленный на одном из горизонтальных патрубков установки “Сфера”, создавал импульсный поток плазмы с быстрым фронтом нарастания (~2 мкс) и медленным задним фронтом ~18 мкс с небольшой пологой средней частью длительностью около 5 мкс (рис. 3). Полная длительность импульса плазмы по уровню 0,1 от максимального значения концентрации заряженных частиц составляла 25 мкс.

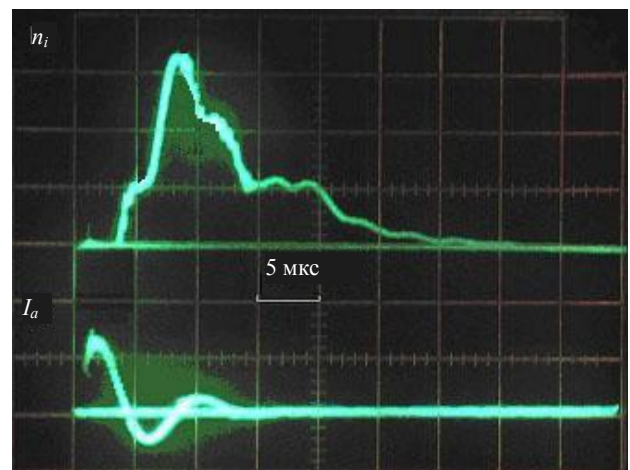


Рис. 3. Оциллограммы сигналов: n_i — ионной концентрации потока плазмы вблизи поверхности образца; I_a — электрического тока в инжекторе

Исследуемый образец располагали в центре вакуумной камеры на расстоянии 20 см от среза плазменного инжектора. Средняя скорость распространения фронта импульса плазмы при движении плазменного потока от инжектора до титанового образца составляла $(1 \cdot 10^7$ — $8 \cdot 10^6)$ см/с. Концентрация заряженных частиц (ионов) в плазменном потоке в области его взаимодействия с образцом равнялась $5 \cdot 10^{11}$ см⁻³, температура электронов плазмы находилась в интервале значений $T_e \approx 8$ —10 эВ. По соотношению электронного и ионного токов насыщения на одиночный лемгюровский зонд определялся ионный состав плазмы:

80 % ионов плазмы составляли ионы водорода и 20 % — однократно ионизованные ионы углерода. Образец титана находился под потенциалом ($40 T_e$).

При взаимодействии плазменного потока с образцом на его поверхности возбуждались микроплазменные разряды, при этом происходило падение потенциала на образце в 10 раз. Известно [10, 11], что наличие на поверхности металла диэлектрической пленки толщиной ~ 1 мкм существенно облегчает возбуждение микроплазменных разрядов на поверхности образцов. В наших экспериментах специальная пленка толщиной ~ 1 мкм на поверхность образцов не наносилась, тем не менее поверхность титановых образцов была покрыта естественной тонкой оксидной пленкой толщиной 0,01—0,1 мкм. Вследствие очень малой толщины оксидной пленки возбуждение микроплазменных разрядов на поверхности титана было затруднено (при плотности плазмы в потоке $5 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-3}$) и происходило не в каждом импульсе плазмы, а примерно в каждом десятом импульсе.

При облучении образцов импульсным плазменным потоком при количестве импульсов $N = 120$ или 450 происходило возбуждение микроплазменных разрядов на поверхности титана с вероятностью около 10 %, т. е. количество микроплазменных разрядов, инициируемых на поверхности образцов, составляло величину 12 или 45 импульсов, соответственно. При этом скорость обработки поверхности образцов составляла величину около $0,1 \text{ см}^2$ за импульс.

При взаимодействии импульсного потока плазмы с металлическими образцами на их поверхности возбуждались микроплазменные разряды (рис. 4). В местах локализации этих разрядов происходило плавление металла, а затем в результате перемещения микроплазменных разрядов вдоль поверхности

образцов со скоростью до 500 м/с [16] — быстрое затвердевание расплавленных областей металла. Быстрое остывание расплавленных участков поверхности образца происходило со скоростью $\sim 10^6 \text{ К/с}$ из-за высокой теплопроводности и быстрого отвода тепла от поверхности вглубь объема металла. В этих оплавленных локальных областях на поверхности металла наблюдалось образование как одиночных микрократеров, так и их скоплений. Диаметры этих кратеров имеют различные значения — от 10 нм до 100 мкм. В результате многократно повторяющихся циклических процессов быстрого плавления и быстрого остывания локальных участков приповерхностного слоя образцов при воздействии $N = 120$ или 450 импульсов плазмы (12 и 45 импульсов микроплазменных разрядов, соответственно) на поверхности титана формировался сплошной переплавленный слой, имеющий развитую структуру поверхностного микрорельефа.

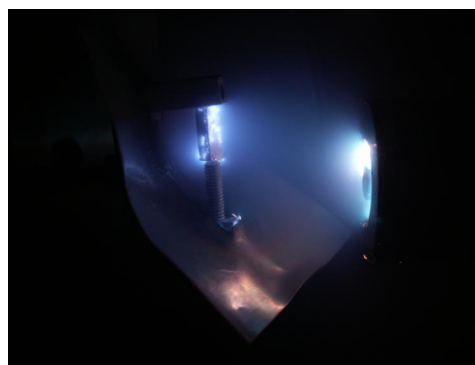


Рис. 4. Фотография свечения микроплазменных разрядов, возбуждаемых на образце титана плазменным потоком инжектора

Микрофотография исходной поверхности образца из титана ВТ-1 представлена на рис. 5, а, а образца после микроплазменного упрочнения — на рис. 5, б.

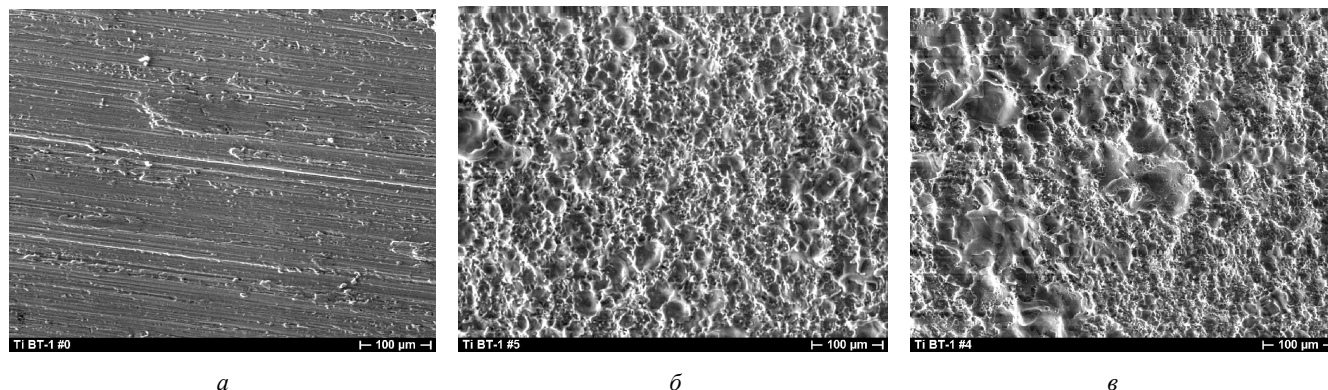


Рис. 5. Микрофотография фрагмента поверхности образца титанового сплава ВТ-1: а — в исходном состоянии после механической обработки; б — обработанного с помощью микроплазменных разрядов в режиме 1 ($N = 120, H_{\text{max}} = 10 \text{ мкм}$); в — обработанного с помощью микроплазменных разрядов в режиме 2 ($N = 450, H_{\text{max}} = 17 \text{ мкм}$)

Как видно из рис. 5, *a*, исходные образцы из титана ВТ-1 имели слабовыраженный микрорельеф, возникающий в результате предварительной механической обработки (фрезерования и шлифования) образцов. Измеренная на профилографе-профилометре высота микрорельефа образцов поперек направления шлифования составляла величину $H_{\max} = 1\text{—}3$ мкм.

Микротвердость H_V материала исходных образцов в зависимости от глубины залегания приповерхностного слоя монотонно возрастала с увеличением толщины исследуемого слоя: от 127 кгс/мм² на глубине $2,4$ мкм до 273 кгс/мм² — на глубине $7,5$ мкм (рис. 6, кривая 1). Такая зависимость микротвердости исходных образцов из титана ВТ-1 является результатом механической обработки, которая разрушает приповерхностный слой материала на глубину до 3 мкм, а в более глубоких слоях микротвердость металла исходных образцов соответствует стандартному значению 275 кгс/мм².

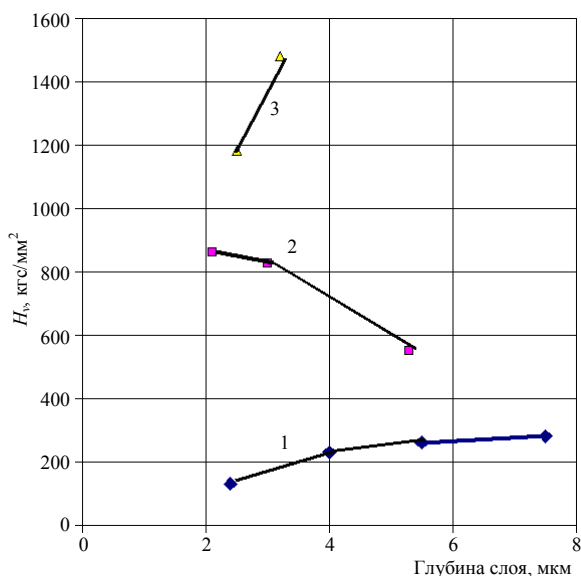


Рис. 6. Изменение микротвердости H_V по глубине приповерхностного слоя образцов из титана ВТ-1:

1 — в исходном состоянии; 2 — в результате микроплазменной обработки в режиме 1 ($N = 120$); 3 — в результате микроплазменной обработки в режиме 2 ($N = 450$)

В результате воздействия микроплазменных разрядов на поверхности образцов в режиме 1 ($N = 120$ импульсов) формировался микрорельеф с высотой выступов в пределах $6\text{—}14$ мкм. Микротвердость поверхности обработанного микроплазменными разрядами образца (см. рис. 6, кривая 2) превосходит величину микротвердости исходного образца (см. рис. 6, кривая 1) и характеризуется неоднородностью распределения как по глубине слоя, так и по поверхности образца. При этом важно отметить, что поверхности граней образца с большой шероховатостью $H_{\max} = 14$ мкм характе-

ризуются повышением микротвердости в четыре раза на глубине 3 мкм и в два раза — на глубине 5 мкм по сравнению с исходным состоянием образца.

В результате воздействия микроплазменных разрядов на поверхности образцов в режиме 2 ($N = 450$ импульсов) формировался микрорельеф с высотой выступов в пределах $10\text{—}17$ мкм, что в $1,5$ раза превышает шероховатость поверхности титана, обработанную микроплазменными разрядами в режиме 1.

Результаты измерения микротвердости поверхностного оплавленного слоя на титановом образце, обработанного микроплазменными разрядами в режиме 2, представлены на рис. 6, кривая 3. При этом наблюдается существенное увеличение микротвердости поверхностного слоя титана на глубине $2,5\text{—}3$ мкм: микротвердость увеличивается в $7\text{—}10$ раз по сравнению с исходным образцом.

Рентгеноструктурный анализ показал, что вследствие микроплазменной обработки образцов происходит некоторое увеличение физического уширения β характерных рентгеновских линий приповерхностного слоя титана. Так, физическое уширение рентгеновских линий титана в исходном состоянии $\beta_0 = 8,4 \cdot 10^{-3}$ рад, после микроплазменной обработки в режиме 1 ($N = 120$ импульсов) $\beta_1 = 9,9 \cdot 10^{-3}$ рад, после микроплазменной обработки в режиме 2 ($N = 450$ импульсов) $\beta_2 = 10,9 \cdot 10^{-3}$ рад.

Наблюдаемое увеличение физического уширения характерных рентгеновских линий в зависимости от числа импульсов микроплазменных разрядов указывает на увеличение плотности дефектов кристаллической структуры титана, что, по-видимому, и определяет упрочняющий эффект после микроплазменной обработки образцов. Более того, на основе результатов рентгеноструктурного анализа можно сделать вывод о том, что микроплазменная обработка образцов при $N = 120$ и 450 не приводит к изменению фазового состава приповерхностного слоя титана.

Результаты триботехнических испытаний образцов из титана ВТ-1 в исходном состоянии, после микроплазменного упрочнения при $N = 120$ и 450 импульсов приведены на рис. 7 (интенсивность изнашивания поверхностного слоя образцов) и рис. 8 (коэффициент трения образцов). Из приведенных данных видно, что лучшие триботехнические характеристики обработанного приповерхностного слоя образцов получены в результате микроплазменного упрочнения в режиме 2 при $N = 450$. В этом случае из рис. 7, кривая 3 и рис. 8, кривая 3 видно, что пара трения проработала на испытательной машине с малыми интенсивностями изнашивания и малыми коэффициентами трения до давления $p = 17$ МПа. Это давле-

ние в три раза больше предельного давления, до которого проработал образец из титана ВТ-1 в исходном состоянии (см. рис. 7, кривая 1 и рис. 8, кривая 1), и в 7 раз больше предельного давления, до которого проработал образец после микроплазменной обработки при $N = 120$ (см. рис. 7, кривая 2 и рис. 8, кривая 2).

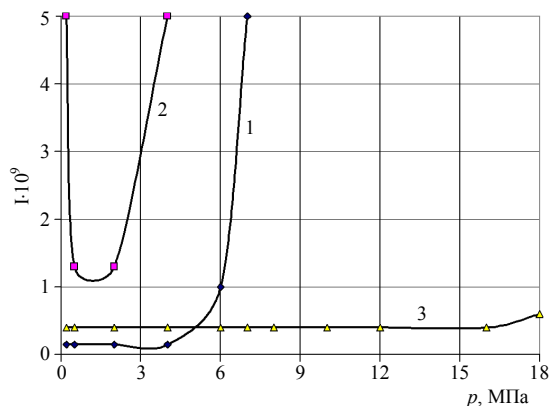


Рис. 7. Зависимости интенсивности изнашивания I от прикладываемого давления p к образцам из титана ВТ-1:
1 — в исходном состоянии; 2 — после микроплазменной обработки в режиме 1 ($N = 120$); 3 — после микроплазменной обработки в режиме 2 ($N = 450$)

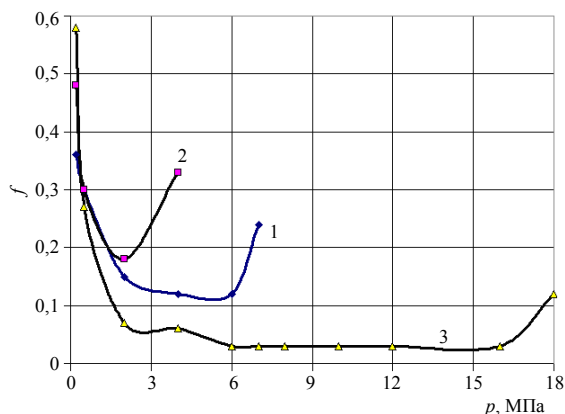


Рис. 8. Зависимости коэффициента трения f от прикладываемого давления p к образцам из титана ВТ-1:
1 — в исходном состоянии; 2 — после микроплазменного упрочнения в режиме 1 ($N = 120$); 3 — после микроплазменного упрочнения в режиме 2 ($N = 450$)

Образцы титана, обработанные микроплазменными разрядами в режиме 2 ($N = 450$), в пределах давлений $p = 1—4$ МПа имеют интенсивность изнашивания, сравнимую с аналогичной величиной для исходного образца. При давлениях $p = 5—17$ МПа как исходные образцы, так и образцы, обработанные в режиме 1 ($N = 120$), полностью теряют свою работоспособность в результате катастрофического износа. В противоположность этому образцы, обработанные в режиме 2 ($N = 450$), сохраняют свою работоспособность и характеризуются постоянной низкой относительной величиной интенсивности изнашивания $I = 0,4 \cdot 10^{-9}$

во всем диапазоне давлений $p = 1—17$ МПа (см. рис. 7, кривая 3).

Зависимости $f(p)$ коэффициента трения f различных титановых образцов от прикладываемого к ним давления p приведены на рис. 8. Образцы титана, обработанные микроплазменными разрядами в режиме 2 ($N = 450$), в пределах давлений $p = 1—6$ МПа характеризуются величиной коэффициента трения $f \approx 0,06$, что в два раза ниже аналогичной величины как для исходных образцов, так и образцов, обработанных в режиме 1 ($N = 120$). В диапазоне давлений $p = 6—17$ МПа образцы, обработанные микроплазменными разрядами в режиме 2 ($N = 450$), имеют самую низкую величину коэффициента трения $f \approx 0,03$, в то время как все остальные образцы полностью теряют свою работоспособность в результате катастрофического износа.

Заключение

В результате экспериментальных исследований установлено, что в вакууме при взаимодействии импульсного потока плотной плазмы (концентрация ионов $5 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-3}$, температура электронов $8—10 \text{ эВ}$) с металлическими образцами из технического титана ВТ-1 (без предварительной термической обработки образцов и без специального нанесения на них диэлектрических пленок), на поверхности образцов возбуждались микроплазменные разряды. В местах локализации этих разрядов происходило плавление приповерхностного слоя металла. В процессе движения микроплазменных разрядов по поверхности образцов в результате многократного повторения процессов локального плавления и остывания приповерхностного слоя металла на поверхности образцов формировался сплошной переплавленный слой, имеющий развитую структуру микрорельефа (шероховатость) с высотой выступов в интервале значений $6—17 \text{ мкм}$.

Существуют режимы микроплазменной обработки титана, которые приводят к существенному увеличению микротвердости и стойкости его приповерхностного слоя к изнашиванию при трении.

Микротвердость приповерхностного слоя образцов с увеличением числа импульсов микроплазменной обработки значительно повышается. По отношению к исходному состоянию образцов эффект поверхностного упрочнения составляет $7—8$ раз на глубине залегания слоя $2—3,2 \text{ мкм}$.

Обнаружено значительное увеличение диапазона значений предельно допустимых давлений на титановые образцы, обработанные с помощью микроплазменных разрядов. При этом величины предельно допустимых давлений на образцы су-

щественно превышают (в три раза) соответствующие величины для исходных образцов.

Авторы выражают благодарность Р. Х. Залавутдинову за предоставление микрофотографий образцов, и Б. Н. Казину за техническое обеспечение работ.

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

Литература

1. Иванов В. А. Возбуждение и воздействие микроплазменных разрядов на металлы и сплавы в плазме сверхвысоко-частотного факела// Прикладная физика. 2001. № 2. С. 5—39.
2. Иванов В. А., Кобышев М. Е., Спирин А. М. и др. Формирование прочного микрорельефа на поверхности Ni—Cr-сплава при взаимодействии с микроплазменными разрядами// Там же. 2006. № 6. С. 97—107.
3. Иванов В. А., Кобышев М. Е., Спирин А. М. и др. Формирование прочного микрорельефа на поверхности Co—Cr-сплава при взаимодействии с микроплазменными разрядами// Там же. 2007. № 6. С. 60—70.
4. Иванов В. А., Куксенова Л. И., Лаптева В. Г., Кобышев М. Е. Влияние микроплазменной обработки на свойства приповерхностного слоя образцов из Ni—Cr-сплава// Проблемы машиностроения и надежности машин. 2007. № 6. С. 81—87.
5. Иванов В. А., Куксенова Л. И., Лаптева В. Г., Кобышев М. Е. Новый метод формирования прочного микрорельефа на поверхности образцов из кобальтово-хромистого сплава// Там же. 2008. № 1. С. 74—79.
6. Иванов В. А., Куксенова Л. И., Лаптева В. Г., Кобышев М. Е. Применение микроплазменного метода для упрочнения приповерхностного слоя образцов из стали 45// Там же. № 3. С. 84—89.
7. Иванов В. А., Кобышев М. Е., Куксенова Л. И., Лаптева В. Г. Влияние микроплазменной обработки на свойства приповерхностного слоя образцов из алюминиевого сплава В95// Трение и смазка в машинах и механизмах. 2008. № 4. С. 7—13.
8. Иванов В. А., Кобышев М. Е., Сатунин С. Н., Дорофеев А. А., Камолова Т. И., Куксенова Л. И., Лаптева В. Г. Упрочнение приповерхностного слоя образцов из конструкционной стали микроплазменными разрядами// Прикладная физика. 2008. № 6. С. 62—69.
9. Иванов В. А., Кобышев М. Е., Куксенова Л. И., Лаптева В. Г. Применение микроплазменного метода для упрочнения поверхностного слоя образцов из титана// Трение и смазка в машинах и механизмах. 2008. № 7. С. 12—16.
10. Иванов В. А., Кобышев М. Е., Сахаров А. С. Возбуждение микроплазменных разрядов на металлах с диэлектрической пленкой// Прикладная физика. 2006. № 6. С. 114—121.
11. Иванов В. А., Сахаров А. С., Кобышев М. Е. Иницирование микроплазменных разрядов на краю диэлектрической пленки, нанесенной на поверхность металла// Физика плазмы. 2008. Т. 34. № 2. С. 171—184.
12. Иванов В. А., Кобышев М. Е., Гавриленко В. П., Окс Е. А., Летунов А. А. Образование сверхплотной плазмы при СВЧ-пробое диэлектриков// Прикладная физика. 2005. № 6. С. 40—51.
13. Ivanov V. A., Konyzhev M. E., Gavrilenko V. P., Oks E., Letunov A. A. Creation of super dense plasma due to contracting of microwave discharge on surface of dielectric// In book: "Strong Microwaves in plasmas". Ed. A. G. Litvak. V. 2. P. 784—792. Nizhny Novgorod-2005. ISBN 5-8048-0039-X.
14. Зимин А. М., Иванов В. А., Юттнер Б. Динамика катодных пятен на поверхности бериллия в дуговом вакуумном разряде// Вопросы атомной науки и техники. Сер. Термоядерный синтез. — М.: Изд-во РНЦ "Курчатовский институт". 2001. Вып. 2. С. 50—57.
15. 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". Tours (France) — July1-5. 2002. Ed. SFV 2002. P. 135—138//IEEE Catalogu Number 02CH37331. ISBN 0-7803-7394-4. ISSN 1093-2941.
16. Ivanov V. A., Juttner B., Zimin A. M. Development of the Cathode Spots on the Surface of the Beryllium// Plasma Devices and Operations. 2002. V. 10. P. 109—116.
17. Рыбакова Л. М., Куксенова Л. И. Структура и износостойкость металла. — М.: Машиностроение, 1982. — 212 с.
18. Методы испытаний на трение и износ: Справ. изд./ Л. И. Куксенова, В. Г. Лаптева, А. Г. Колмаков, Л. М. Рыбакова. — М.: Интермет Инжиниринг, 2001. — 152 с. (Специалист-металловед).
19. Иванов В. А. Трехэлектродный несимметричный зонд для непрерывного измерения температуры и плотности плазмы// Краткие сообщения по физике ФИАН. — М., 1988. С. 33—35.

Статья поступила в редакцию 20 июля 2009 г.

Strong localized interaction of microplasma discharges with titanium material

V. A. Ivanov, M. E. Konyzhev, L. I. Kuxsenova, V. G. Lapteva*, A. S. Sakharov, T. I. Kamolova, A. A. Dorofeyuk, S. N. Satunin*

A. M. Prokhorov General Physics Institute of RAS, 38 Vavilova str., 119991, Moscow, Russia

E-mail: ivanov@fpl.gpi.ru

* A. A. Blagonravov Institute of Mechanical Engineering of RAS, 4, Sm. Khariton al., 101990, Moscow, Russia

E-mail: Kfrolov@imash.ru

Experimental researches of excitation of microplasma discharges on the surfaces of the titanium samples placed in a homogeneous pulsed plasma flow were performed. Strong localized interaction of microplasma discharges with the titanium samples leads to fast melting and cooling of small areas of micron size on the surface of titanium. Such repeated interaction of microplasma discharges

with a surface of the titanium forms a continuous hard layer with the thickness up to 20 microns. This layer is characterized by strongly changed physical, structural and tribotechnical properties of the titanium material.

PACS: 52.40.Hf; 81.40.-z

Keywords: plasma, vacuum, titan, surface, microplasma discharge, strengthening, microhardness, wear-resistance.

Иванов Вячеслав Алексеевич, зав. лабораторией

Коньжев Михаил Евгеньевич, науч. сотр.

Сахаров Александр Сергеевич, старший науч. сотр.

Камолова Татьяна Ивановна, науч. сотр.

Дорофеюк Анна Александровна, науч. сотр.

Сатунин Сергей Николаевич, старший науч. сотр.

119991, Москва, ул. Вавилова, 38, ИОФ РАН

Тел. 8 (499) 503-83-44; E-mail: ivanov@fpl.gpi.ru

Куксенова Лидия Ивановна, зав. лабораторией

Лаптева Валерия Григорьевна, старший науч. сотр.

101990, Москва, М. Харитоньевский пер., 4, Институт машиноведения РАН

Тел.: +7 (495) 924-98-00; факс: +7 (495) 200-42-39; E-mail: Kfrolov@imash.ru