

ПОВЫШЕНИЕ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ ТЕХНИЧЕСКИ ЧИСТОГО ТИТАНА ВТ1-0 И СПЛАВА ВТ6

© 2011 Б.П. Гриценко^{1,3}, Н.Н. Коваль², Ю.Ф. Иванов², К.В. Круковский¹, Н.В. Гирсова¹, А.Д. Тересов²¹Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, г. Томск²Институт сильноточной электроники СО РАН, г. Томск³Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск

Поступила в редакцию 10.11.2011

Высокая удельная прочность и коррозионная стойкость титана и его сплавов обусловили их широкое применение в технике и медицине. Однако использование титановых сплавов в узлах трения сдерживается их низким сопротивлением изнашиванию [1-2]. Изучению износостойкости титановых сплавов уделялось достаточно много внимания. В частности показано, что повышение износостойкости можно получить путем азотирования, цементации, борирования. Однако эти способы не всегда приемлемы. Создаваемые поверхностные слои получаются очень хрупкими. Высокие температуры и большое время обработок приводят к росту зерна и снижению прочностных свойств. Анализ результатов исследований, проведенных в последние годы, позволяет сделать вывод, что традиционные методы повышения износостойкости изделий из титана и его сплавов малоэффективны. Наилучший результат повышения износостойкости пар трения достигается в том случае, если создаются условия образования в процессе работы вторичных структур (ВС), которые осуществляют демпфирование нагрузки, являются твердой смазкой и сами восстанавливаются [3, 4]. В случае титановых сплавов самоорганизации ВС не наблюдалось. В связи с этим целью настоящей работы являлось изучение процессов, происходящих на поверхности образцов титана при трении, способствующих формированию вторичных структур.

Материал и методика исследования

В качестве материала исследования использовали образцы технически чистого титана ВТ1-0 и сплава ВТ6, имеющие форму параллелепипеда с размерами 4×4×40 мм³. Образцы титана ВТ1-0 находились исходно в двух состояниях: крупнозернистом (размер зерен $d \sim 15$ мкм) и ультрамелкозернистом (УМЗ), полученном методом abc деформации [5]. Средний поперечный размер зерен и субзерен УМЗ титана ВТ1-0 составлял $0,240 \pm 0,022$ мкм, размер крупных зерен достигал 2 мкм, объемная доля зерен размером 1-2 мкм – 20 %. Сплав ВТ6 исследовался только в крупнозернистом состоянии со средним размером зерен $d \sim 10$ мкм. Модификацию структуры поверхности трения образцов крупнозернистого и УМЗ титана ВТ1-0 осуществляли (1) облучением высокоинтенсивным электронным пучком субмиллисекундной длительности воздействия; (2) насыщением в плазме газового разряда низкого давления ионами азота; (3) комбинирование насыщения

в плазме газового разряда низкого давления ионами азота и облучения высокоинтенсивным электронным пучком [6]. Модификацию структуры поверхности трения образцов крупнозернистого сплава ВТ6 осуществляли облучением высокоинтенсивным электронным пучком по режимам, идентичным для титана ВТ1-0. Режим электронно-пучковой обработки: длительность, количество и частота следования импульсов воздействия пучка электронов составляли 50 мкс, 3 имп., $0,3 \text{ с}^{-1}$; плотность энергии пучка электронов – 10, 15, 20, 25 и 30 Дж/см². Обработку осуществляли в остаточной атмосфере аргона при давлении $\sim 10^{-2}$ Па.

Исследования структуры образцов осуществляли методами сканирующей (прибор Carl Zeiss EVO 50) и просвечивающей дифракционной (ЭМ-125К) электронной микроскопии. Трибологические испытания образцов проводили по схеме “диск-палец” в режиме граничной смазки при скорости скольжения 3 м/с и нагрузке 25 Н [7]. В качестве смазки применяли индустриальное масло И-20А. Контртело было изготовлено из закаленной стали ШХ15. Измерения потери массы образцов в процессе испытаний на износ проводили путем их взвешивания на аналитических весах.

Результаты исследования и их обсуждение

Зависимость потери массы крупнозернистых образцов титана ВТ1-0 от времени испытания (рис. 1, кривая 1) демонстрирует стадии с высокой скоростью изнашивания, когда трение протекает по адгезионному механизму, и стадии с установившейся низкой скоростью изнашивания, характерные для нормального изнашивания. При трении титана ВТ1-0 на стадиях с высокой скоростью изнашивания происходит перенос материала образцов на поверхность контртела, в результате чего на поверхности трения контртела происходит образование слоя из перенесенного материала. Однако на стадиях с низкой скоростью изнашивания данный слой не наблюдается, а на поверхности трения образцов присутствуют вторичные структуры в виде островков (рис. 2). Вторичные структуры на поверхностях трения образцов присутствуют на всей стадии с низкой скоростью изнашивания. Они имеют практически равную высоту (~ 10 мкм) по отношению к остальной поверхности трения и выраженную плоскую поверхность. Микрорентгеноспектральный анализ этих островков показывает, кроме титана,

наличие кислорода, углерода и железа, в то же время на остальной поверхности трения эти элементы не обнаруживаются. Присутствие данных элементов в объеме перенесенного материала обусловлено интенсивным адгезионным взаимодействием.

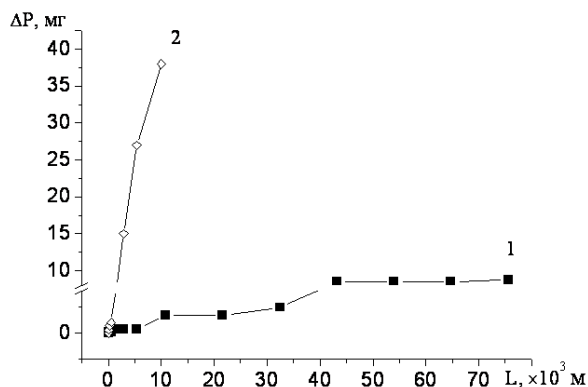


Рис. 1. Кинетические зависимости потери массы образцов от времени испытаний: 1 – крупнозернистый (КЗ) титан BT1-0; 2 – ультрамелкозернистый (УМЗ) титан BT1-0.

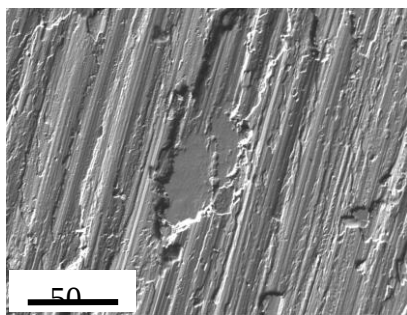


Рис. 2. Поверхность трения образца крупнозернистого титана BT1-0.

Зависимость потери массы ультрамелкозернистых образцов титана BT1-0 от времени испытания (рис. 1, кривая 2) имеет линейную зависимость, интенсивность изнашивания выше, чем в случае крупнозернистого титана BT1-0. По всей видимости, это связано с высокой неравномерностью УМЗ структуры, что в случае титана приводит к увеличению адгезионного взаимодействия при трении, и как следствие увеличивает износ.

На рис. 3 представлены результаты трибологических испытаний крупнозернистого (КЗ), а на рис. 4 ультрамелкозернистого (УМЗ) титана BT1-0, модифицированных импульсной электронно-пучковой обработкой.

Анализ результатов, приведенных на рисунках, показывает, что более эффективно данная обработка повышает износостойкость ультрамелкозернистого титана BT1-0, а наиболее оптимальной для УМЗ титана BT1-0 является модификация поверхности трения высокоинтенсивной электронно-пучковой обработкой с плотностями энергий пучков электро-

нов 20 Дж/см² и 25 Дж/см². При использовании этих режимов происходит изменение механизма изнашивания, о чём свидетельствует наличие стадий с установившейся низкой скоростью изнашивания.

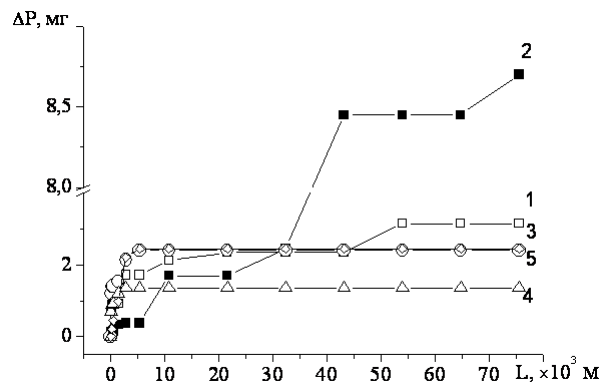


Рис. 3. Кинетические зависимости потери массы образцов от времени испытаний: 1 – крупнозернистый (КЗ) титан BT1-0 в исходном состоянии; 2-5 – КЗ титан BT1-0, модифицированный импульсной электронно-пучковой обработкой при плотности энергии пучка электронов 2 – 15 Дж/см²; 3 – 20 Дж/см²; 4 – 25 Дж/см²; 5 – 30 Дж/см².

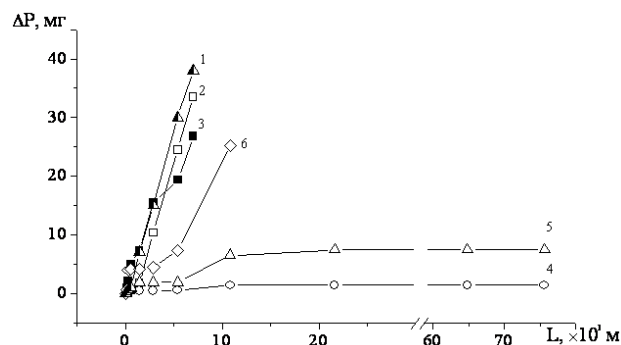


Рис. 4. Кинетические зависимости потери массы образцов от времени испытаний: 1 – ультрамелкозернистый (УМЗ) титан BT1-0 в исходном состоянии; 2-6 – УМЗ титан BT1-0, модифицированный импульсной электронно-пучковой обработкой при плотности энергии пучка электронов 2 – 10 Дж/см²; 3 – 15 Дж/см²; 4 – 20 Дж/см²; 5 – 25 Дж/см²; 6 – 30 Дж/см².

Исследования морфологии поверхностей трения образцов на данных стадиях показали, что на поверхности трения образуются вторичные структуры в виде островков, аналогичные структурам, образующимся на поверхностях трения крупнозернистого титана BT1-0 на стадиях с установившейся низкой скоростью изнашивания. Микрорентгеноспектральный анализ так же показывает присутствие в данных областях кислорода, железа и углерода. Образцы крупнозернистого титана BT1-0, модифицированные методом ионного азотирования, делили

на две партии. Одну из них подвергали высокоинтенсивной электронно-пучковой обработке, т.е. осуществляли комбинированную обработку, сочетающую ионное азотирование и последующую электронно-пучковую обработку. Результаты трибологических испытаний образцов после данных обработок приведены на рис. 5. Анализ результатов, приведенных на этом рисунке показывает, что ионное азотирование при 650°C в течение одного часа увеличивает износостойкость в 10 раз.

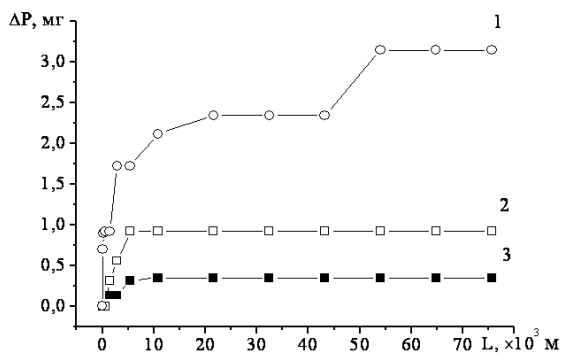


Рис. 5. Зависимости потери массы образцов от длины пути скольжения: 1 – крупно-зернистый титан BT1-0 в исходном состоянии; 2 – образцы крупно-зернистого титана BT1-0 после ионного азотирования в сочетании с последующей электронно-пучковой обработкой при плотности энергии пучка электронов 25 Дж/см^2 ; 3 – образцы крупнозернистого титана BT1-0 после ионного азотирования.

Ионное азотирование при тех же параметрах в сочетании с импульсной электронно-пучковой обработкой с плотностью энергии пучка электронов 25 Дж/см^2 имеет несколько меньший эффект в повышении износостойкости. В обоих случаях кривые имеют стадии с высокой скоростью изнашивания и стадии с установившейся низкой скоростью изнашивания. Так же в обоих случаях наблюдается частичное разрушение модифицированного слоя.

При этом образование на поверхности трения вторичных структур в виде островков наблюдается только в случае ионного азотирования, в случае комбинированной обработки образование вторичных структур в виде островков не наблюдается. В обоих случаях не выявлен перенос материала образцов на поверхность контртела и образования на нём специфического слоя из перенесённого материала.

Выполненный анализ морфологии поверхностей трения позволяет предположить следующие закономерности образования вторичных (островковых) структур и их эволюцию в процессе трения. В начальный момент испытаний (стадия приработки) изнашивание идёт по адгезионному механизму. В это же время происходит образование вторичных (островковых) структур, что приводит к предотвращению интенсивного адгезионного взаимодействия. Данные вторичные структуры являются пятнами фактического контакта, об этом свидетельствует их

плоская, параллельная контртелу, поверхность и одинаковая высота $\sim 10\text{ мкм}$. Элементный микро-рентгеноспектральный анализ показал, что в состав вторичных (островковых) структур, кроме титана, входят углерод, кислород, железо. Источниками этих элементов являются смазка, воздух и контртело. Причем, эти элементы распределены именно в объёме вторичных структур, так как при микро-рентгеноспектральном анализе информация об элементном составе собирается с некоторого объёма исследуемого материала, глубина данного объёма достигает $\sim 5\text{ мкм}$. Необходимо отметить, что анализ остальной поверхности трения показал наличие только титана.

Таким образом, в начальный момент работы трибологической пары происходит изменение морфологии поверхности. Формируются вторичные структуры в виде островковых образований. Интересным представляется процесс образования вторичных структур. Мы предполагаем, что за счет адгезионного схватывания происходит перенос материала с образцов на контртело и его размазывание. В это время титан окисляется, в него попадает углерод и железо. После образования на контртеле из перенесённого материала слоя определённой величины происходит постепенное отделение материала от этого слоя и его обратный перенос на образцы, где из него происходит формирование вторичных образований, имеющих уже другую кристаллическую структуру и другой элементный состав. Химический состав вторичных структур представлен элементами самих образцов, контртела, смазки и газовой среды. Характер образования вторичных структур подобен для всех образцов, однако их количество (площадь) и устойчивость сильно отличаются. Определяющим в образовании вторичных структур является элементный состав и структура приповерхностных слоев образцов. Изнашивание исследуемых образцов при трении происходит в результате отделения вторичных структур и выхода их за пределы области трения.

Для выяснения влияния легирующих элементов на закономерности изнашивания титана и его сплавов нами были проведены исследование сплава BT6. Интенсивность изнашивания сплава BT6 в 10 раз выше чем у титана BT1-0, а зависимости потери массы образцов от времени испытания являются линейными, что характерно для адгезионного механизма изнашивания. Поверхность трения сплава BT6 имеет бороздчатую структуру, образующуюся в результате пропахивания (рис. 6). На поверхности трения не наблюдаются микротрещины, что свидетельствует о пластичном разрушении материала. Так же на поверхности трения видны следы схватывания в виде областей материала, смещённых по направлению трения. Микрорентгеноспектральный анализ поверхности трения образцов сплава BT6 обнаруживает углерод и железо в областях схватывания, что указывает на адгезионное взаимодействие с контртелом. В процессе трения сплава BT6

происходит интенсивное образование частиц изнашивания (рис. 7). Частицы изнашивания имеют слоистую структуру, морфология их характерна для хрупкого разрушения материала.

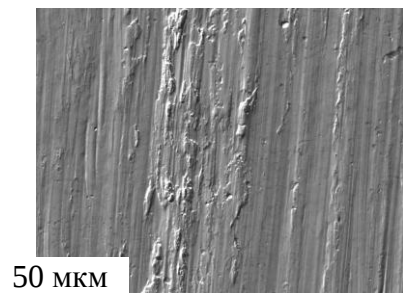


Рис. 6. Поверхность трения образца крупнозернистого сплава ВТ6.

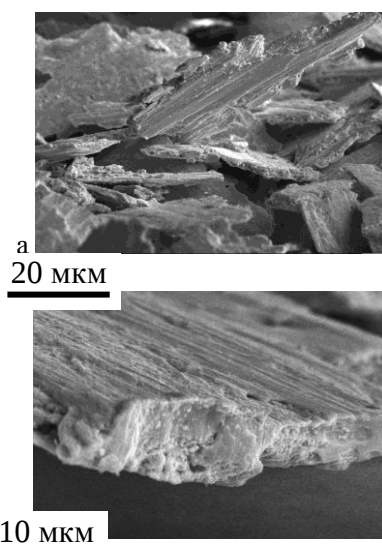


Рис. 7. Частицы изнашивания титанового сплава ВТ 6.

Из этого можно сделать вывод, что материал образца в местах контакта вследствие адгезионного взаимодействия образует тонкий перенесённый слой на контртеле, на который в дальнейшем опять может быть перенесен материал с образцов, формируя, таким образом, слоистую структуру, в виде протяжённых областей. Высокая степень деформации и большие температурные градиенты приводят к охрупчиванию перенесённого материала, в результате этого он скалывается с поверхности контртела в виде хрупких частиц изнашивания. Очевидно, что частицы изнашивания обладают более высокой твёрдостью, поэтому, находясь в зоне трения, они работают как частицы абразива. Таким образом, в случае сплава ВТ6, к адгезионному механизму изнашивания добавляется абразивный, о чём так же свидетельствуют следы пропахивания на поверхности трения образцов.

Модификацию поверхностного слоя крупнозернистого титанового сплава ВТ6 так же осуществля-

ли импульсной электронно-пучковой обработкой. Анализ результатов, приведенных на рис. 8, показывает, что наиболее оптимальной является модификация поверхности трения высокоинтенсивной электронно-пучковой обработкой с плотностями энергий пучков электронов 20 Дж/см² и 25 Дж/см². При использовании этих режимов происходит некоторое уменьшение скорости изнашивания. Исследования морфологии поверхностей трения данных образцов не показали существенных отличий от морфологии поверхности трения исходного титана ВТ6.

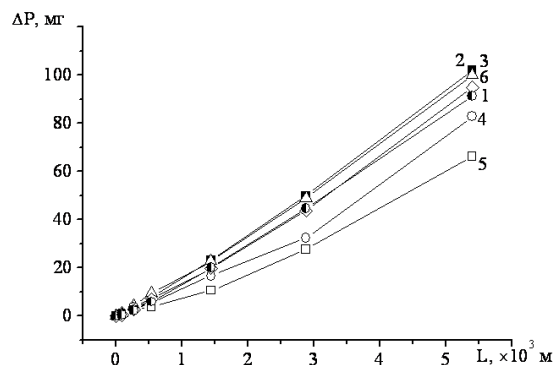


Рис. 8. Кинетические зависимости потери массы образцов от времени испытаний:

1 – крупнозернистый (КЗ) сплав ВТ6 в исходном состоянии; 2 – КЗ сплав ВТ6, модифицированный импульсной электронно-пучковой обработкой при плотности энергии пучка электронов 10 Дж/см²; 3 – 15 Дж/см²; 4 – 20 Дж/см²; 5 – 25 Дж/см²; 6 – 30 Дж/см².

Заключение

Осуществлена модификация поверхностей трения и выполнены исследования образцов технически чистого титана ВТ1-0 (крупнозернистое и УМЗ состояния) и сплава ВТ6 (крупнозернистое состояние). Получены следующие основные результаты:

- установлено кратное (до 10 раз) увеличение износостойкости образцов титана, подвергнутых азотированию в плазме газового разряда;
- выявлено образования островковых вторичных структур и прослежена их эволюция в процессе трения;
- показано, что образующиеся вторичные структуры определяют динамику изнашивания образцов титана ВТ1-0 с крупнозернистой и ультрамелкозернистой структурой и способны защищать их от изнашивания.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке грантов РФФИ (проекты № 10-08-01016_а и № 11-02-12091-офи-м-2011) и гранта президиума РАН (проект № 27.4).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Molinari A., Straffelini, T.B., Bacci T. Dry sliding wear mechanisms of the Ti6Al4V alloy // *Wear*, 208 (1997) 105-112
2. Long M., Rack H.J. Titanium alloys in total joint replacement - a materials science perspective // *Biomaterials*, 1998 V.19, №18, P. 1621-1639
3. Гаркунов Д.Н. Триботехника, износ и безызносность // М.: Изд. МСХА, 2001. – 606 с.
4. Куксенова Л.И., Рыбакова Л.М., Лантева В.Г. Задачи инженерии поверхности при формировании износостойкого структурного состояния металлических материалов // *Металловедение и термическая обработка металлов*. – 1999. - № 7. – С. 41-48.
5. Патент № 2388566 МКИ В21J. 5/00, С22F 1/18 Способ получения титановых сплавов с субмикроструктурной деформацией с обеспечением интенсивной пластической деформации / Винокуров В.А., Раточка И.В., Найдёнкин Е.В., Мишин И.П., Рожинцева Н.В (Россия) № 2388566; Заяв. 22.07.2008; Опубл. 10.05.210, Бюл. № 13. – 6 с.
6. Иванов Ю.Ф., Коваль Н.Н. Низкоэнергетические электронные пучки субмиллисекундной длительности: получение и некоторые аспекты применения в области материаловедения – Гл.13 в книге «Структура и свойства перспективных металлических материалов». – С.345-382 / Под общ. ред. А.И.Потекаева. – Томск: Изд-во НТЛ, 2007. – 580 с.
7. Гриценко Б. П., Круковский К. В., Гирсова Н. В., Кашин О. А. Влияние высокодозной ионной имплантации и акустических колебаний, генерируемых при трении, на износостойкость арможелеза и стали 45 // *Трение и износ*. – 2005. – Т. 26. - № 6. - С. 593-599.

WEAR RESISTANCE INCREASE OF TECHNICALLY PURE TITANIUM VT1-0 AND TITANIUM ALLOYS VT6

© 2011 Gritsenko B.P.^{1,3}, Koval N.N.², Ivanov U.F.², Krukovskiy K.V.¹,
Girsova N.V.¹, Teresov A.D.²

¹Institute of Strength Physics and Materials Science SB RAS, Tomsk

²Institute of High Current Electronics SB RAS, Tomsk

³National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk