

УДК 621.793

В.М. САВОСТИКОВ, А.И. ПОТЕКАЕВ*, А.Н. ТАБАЧЕНКО*, Е.Ф. ДУДАРЕВ*, И.А. ШУЛЕПОВ***

ВЛИЯНИЕ ИОННО-ПЛАЗМЕННОЙ МОДИФИЦИРУЮЩЕЙ ОБРАБОТКИ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ И ТРИБОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КРУПНОЗЕРНИСТОГО И УЛЬТРАМЕЛКОЗЕРНИСТОГО ТИТАНОВОГО СПЛАВА ВТ6¹

Исследовано влияние магнетронно-плазменного легирования совокупностью ионов Ti–C–B–N или Ti–C–Mo–S и магнетронно-плазменного нанесения покрытия Ti–C–Mo–S на изменение механических и трибологических свойств крупнозернистого и ультрамелкозернистого титанового сплава ВТ6. Установлено, что такое ионно-плазменное модифицирование поверхности при температурах подложки порядка 300 или 400 °С заметно повышает ее твердость независимо от структурного состояния сплава и не снижает предел прочности при растяжении и относительное удлинение при разрушении ультрамелкозернистого сплава ВТ6. Фрикционные испытания одноименных пар трения (титановый сплав по титановому сплаву), проведенные по схеме неподвижный индентор – вращающийся диск («pin-on-disk»), показали, что покрытие Ti–C–Mo–S на диске обеспечивает снижение усредненного, на использованном интервале испытаний, значения коэффициента трения пары из крупнозернистого сплава ВТ6 в 5.2 раз (с 0.392 до 0.076), а пары из ультрамелкозернистого сплава ВТ6 в 8.8 раз (с 0.398 до 0.045). При этом износостойкость диска с покрытием повышается приблизительно в 200 раз для крупнозернистого и в 400 раз для ультрамелкозернистого сплава.

Ключевые слова: титановый сплав, крупнозернистая и ультрамелкозернистая структура, ионно-плазменные методы, легирование, покрытие, твердость, прочность, коэффициент трения, износостойкость.

Введение

Титановые сплавы с ультрамелкозернистой структурой (наноструктурированные сплавы) обладают более высокой прочностью по сравнению с крупнозернистыми, полученными традиционными промышленными способами [1, 2]. Однако о триботехнических свойствах ультрамелкозернистых титановых сплавов имеющиеся литературные данные не позволяют сделать однозначного вывода. По данным одних исследований [3, 4] не наблюдается сколь либо заметного различия в интенсивности изнашивания крупнозернистых и ультрамелкозернистых титановых сплавов, а в отдельных публикациях сообщается о снижении износостойкости сплава после наноструктурирования [5]. Отсюда очевидна целесообразность в применении дополнительной модифицирующей обработки поверхностей ультрамелкозернистых титановых сплавов или нанесения на них покрытий для обеспечения высоких триботехнических характеристик фрикционных сопряжений. При этом первоочередным требованием является сохранение ультрамелкозернистого состояния в материале и достигнутых наноструктурированием механических свойств. При использовании для наноструктурирования способа *abc*-прессования интенсивная пластическая деформация обычно проводится в интервале температур (0.3–0.6) температуры плавления материала заготовки. У ($\alpha + \beta$)-титановых сплавов, к которым относится и исследуемый в данной работе сплав ВТ6, после *abc*-прессования прочность превышает 1000 МПа, и она тем больше, чем ниже конечная температура *abc*-прессования. Очевидно, что для предупреждения роста зерен и снижения достигнутой прочности температура модифицирующей обработки поверхности сплава или нанесения покрытия не должна превышать конечной температуры термосилового воздействия. С учетом этого в представленной работе были использованы относительно низкотемпературные, комбинированные способы магнетронно-плазменного легирования поверхности и осаждения триботехнического покрытия [6, 7]. Причем нами установлено [8], что магнетронно-плазменное осаждение обеспечивает высокую прочность сцепления формируемого покрытия с подложкой даже при низких температурах – порядка 300 °С.

1. Материалы и методики исследований

Формирование в исследуемом ($\alpha + \beta$)-титановом сплаве ВТ6 ультрамелкозернистой структуры обеспечивалось *abc*-прессованием в разработанной прессформе. При использованных температурно-деформационных режимах пластической деформации в α -фазе сформировалась структура с

¹ Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России (задание № 2014/223, код проекта 727).

распределением зерен по размерам в интервале 0.2–1.8 мкм при среднем размере зерен 0.5 мкм. Одновременно с этим наблюдается фрагментация β -фазы и изменение ее формы с пластинчатой на глобулярную [9]. Прочностные свойства исходного крупнозернистого сплава ВТ6 (ВТ6кз) и ультрамелкозернистого (ВТ6умз), в т.ч. после модифицирующей обработки поверхности и нанесения покрытия, измеряли при комнатной температуре при растяжении плоских образцов в виде двойной лопатки [9]. Для проведения сравнительных трибологических исследований образцы из сплавов ВТ6кз и ВТ6умз изготавливались в виде дисков диаметром 30 мм и толщиной 4 мм. Магнетронно-плазменное легирование поверхностного слоя дискообразных образцов и нанесение на них покрытия осуществлялось на установке «Композит-3», содержащей в рабочей камере дуомагнетрон с двумя распыляемыми мишенями и газовый плазмодогенератор с накаливаемым катодом (ПИНК). Легирование поверхности осуществлялось путем магнетронного распыления катодных мишеней Ti–C–B в атмосфере (Ar+25 % N) или распыления мишеней Ti–C–Mo–S в атмосфере аргона при повышении ускоряющего потенциала на подложке до 1000–1300 В и одновременном асистирующем воздействии газового плазмодогенератора. При этом, температура подложки не превышала 400 °С. Нанесение покрытия Ti–C–Mo–S осуществлялось магнетронно-плазменным способом в атмосфере аргона [7] при температуре подложки ~ 300 °С. Определение твердости проводилось на приборе ПМТ-3 при нагрузке на индентор 0.2 Н и на приборе «NHT-S-AX-000X» при нагрузке 0.01 Н. Измерения коэффициента трения фрикционных пар проводилось на трибометре «NHT-S-AX000» (CSM) по схеме неподвижный индентор – вращающийся диск («pin-on-disk»). Фрикционные испытания дисков из сплавов ВТ6 кз и ВТ6умз были проведены в парах с инденторами из идентичных титановых сплавов, изготовленных в виде цилиндрических стержней диаметром 3 мм с конусообразной вершиной и радиусом закругления вершины 1.5 мм. Нагрузка на индентор при фрикционных испытаниях равнялась 10 Н. Линейная скорость перемещения контртел составляла 2 см/с. Степень износа дискообразных образцов в исходном состоянии и образцов с покрытием определялась с использованием «Micro Measure 3D Station» (STIL) путем вычисления усредненной по 6 измерениям площади поперечного сечения трека износа после 3000 оборотов диска. Одновременно оценивалась площадь износа вершины индентора по усредненному диаметру пятна износа, измеренному в двух перпендикулярных направлениях на инструментальном микроскопе ИМЦ.

2. Результаты и их обсуждение

Проведенные ранее исследования методом ОЖЕ-спектроскопии [8] показали, что глубина магнетронно-плазменного легирования титанового сплава ВТ6 не превышает 100 нм, а толщина магнетронно-плазменного покрытия Ti–C–Mo–S составляет порядка 1.2 мкм при использованных вольтамперных режимах и времени напыления 60 минут. Несмотря на малые толщины легированного поверхностного слоя и покрытия, установлено достоверное увеличение твердости модифицированной поверхности. После легирования ее твердость увеличивается с ~ 4–5 ГПа до ~ 6–6.5 ГПа, а твердость нанесенного покрытия составляет ~ 7–8 ГПа в зависимости от структурного состояния титанового сплава. В табл. 1 отражены результаты измерения прочности и пластичности титанового сплава ВТ6 в зависимости от исходного структурного состояния и вида ионно-плазменной модифицирующей обработки поверхности. Как видно из таблицы, и магнетронно-плазменное легирование при температуре 400 °С, и магнетронно-плазменное осаждение покрытия при температуре 300 °С не снижают показателей предела прочности при растяжении (σ_B , МПа) и относительного удлинения при разрушении (δ , %) ультрамелкозернистого сплава ВТ6. Трибологические исследования испытываемых пар трения показали следующее. На интервале фрикционных испытаний в 3000 оборотов диска средние значения коэффициентов трения для пар ВТ6кз–ВТ6кз и ВТ6умз–ВТ6умз практически не отличаются и составляют соответственно 0.392 и 0.398. Характер приработки этих пар трения также идентичен. Магнетронно-плазменное легирование поверхности дискообразных образцов не позволило обеспечить значимого снижения коэффициента трения, что, обусловлено, по всей видимости, малой толщиной легированного слоя (менее 100 нм) и относительно высокими удельными давлениями в паре трения. Принципиально иной, ярко выраженный положительный эффект, был зафиксирован при фрикционных испытаниях пар трения с покрытием Ti–C–Mo–S на дискообразных образцах. Для пары трения ВТ6кз–ВТ6кз+покрытие средний коэффициент трения снизился в 5.2 раза и составил 0.076. Для пары ВТ6умз–ВТ6умз+покрытие зафиксировано снижение среднего коэффициента трения в 8.8 раза –

с 0.398 до 0.045. При этом следует отметить, что существенно более низкое среднее значение коэффициента трения для пары ВТ6умз–ВТ6умз+покрытие на использованном интервале испытаний обусловлено явно меньшим временем приработки пары трения. В соответствии с эффектом снижения коэффициента трения проведенными исследованиями установлено и выраженное снижение интенсивности изнашивания сопряженных поверхностей в парах трения после нанесения покрытия на одну из составляющих (табл. 2). В этом случае износостойкость диска из крупнозернистого сплава ВТ6кз с покрытием повышается в ~ 200 раз, а из ультрамелкозернистого сплава ВТ6умз – в ~ 400 раз. При этом, на использованном интервале испытаний зафиксировано практическое равенство усредненных площадей поперечного сечения треков износа (S_{cp}) для обоих дисков с покрытием (~ 48 мкм²), а различие в степени увеличения износостойкости обусловлено первоначально высоким износом поверхности диска из ультрамелкозернистого сплава ВТ6умз без покрытия (см. табл. 2). Износостойкость контртела (инденторов) с исходной немодифицированной поверхностью увеличивается в 30–40 раз.

Таблица 1

Влияние модифицирующей ионно-плазменной обработки поверхности сплава ВТ6 в крупнозернистом и ультрамелкозернистом состояниях на прочность и пластичность

Состояние сплава	Исходные показатели прочности и пластичности		Показатели прочности и пластичности, вид ионно-плазменной обработки поверхности	
	σ_B , МПа	δ , %	σ_B , МПа	δ , %
Крупнозернистое	900±10	10.5±0.5	Легирование, 880±10 Нанесение покрытия, 920±10	Легирование, 5 Нанесение покрытия, 9.5±0.4
Ультрамелкозернистое	1040±10	10.5±0.5	Легирование, 1020±15 Нанесение покрытия, 1070±10	Легирование, 10.5±0.5 Нанесение покрытия, 13.0±0.3

Таблица 2

Обобщенные результаты сравнительных трибологических исследований пар трения

Вид пары трения индентор – диск	Среднее значение коэффициента трения, μ_{cp}	Среднее значение площади поперечного сечения трека износа на диске (S_{cp}), мкм ²	Значение площади пятна износа вершины индентора (s), мм ²
ВТ6кз–ВТ6кз	0.392	11123	515·10 ⁻³
ВТ6кз– ВТ6кз+покрытие	0.076	48.5	13·10 ⁻³
ВТ6умз–ВТ6умз	0.398	20020	451·10 ⁻³
ВТ6умз– ВТ6умз+покрытие	0.045	48.1	14·10 ⁻³

Заключение

1. Проведенные исследования позволили установить, что ионно-плазменная модифицирующая обработка поверхности ультрамелкозернистого титанового сплава ВТ6 (легирование или легирование в сочетании с покрытием) при его нагреве в процессе обработки до 300–400 °С не снижает предела прочности, достигнутого наноструктурированием с использованием *abc*-прессования. Показатели пластичности ультрамелкозернистого сплава также сохраняются.

2. Нанесение покрытия Ti–C–Mo–S комбинированным способом, разработанным на уровне изобретения [7], обеспечивает кратное снижение коэффициента трения и повышение износостойкости на два порядка и крупнозернистого, и ультрамелкозернистого титанового сплава ВТ6 во фрикционных парах как со сталью [8], так и с идентичным титановым сплавом.

3. Разработанный интегрированный подход с использованием *abc*-прессования и магнетронно-плазменного нанесения триботехнического покрытия на ($\alpha + \beta$)-титановый сплав ВТ6 в ультрамелкозернистом состоянии позволяет получить материал с низким коэффициентом трения и высокой износостойкостью при сохранении достигнутой прочности, превышающей 1000 МПа. Представленные результаты показывают возможность использования такого материала в триботехни-

ческих сопряжениях, в том числе в парах, где обе составляющие изготовлены из титановых сплавов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Псахье С.Г., Дударев Е.Ф., Кашин О.А. и др. // Вопросы материаловедения.– 2007.– № 4 (52). – С. 208–213.
2. Semenova I.P., Valiev R.Z., Yakushina E.V., et al. // J. Mater. Sci.– 2008. – V. 43. – No. 23–24. – P. 7354–7359.
3. Белый А.В., Кукареко В.А., Кононов А.Г. и др. // Трение и износ. – 2008. – Т. 29. – № 6. – С. 571–577.
4. Чертовских С.В. Триботехнические характеристики ультрамелкозернистого титана и его сплавов: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – М., 2008.
5. Garbacz H., Gradzka-Dahlke M., and Kurzydowski K. // Wear. – 2007. – V. 263. – P. 572–578.
6. Савостиков В.М., Сергеев С.М., Пинжин Ю.П. Способ комбинированной ионно-плазменной обработки изделий из сталей и твердых сплавов // Патент на изобретение № 2370570, опубли. 20.10.2009 г., бюл. № 29.
7. Савостиков В.М., Табаченко А.Н., Потекаев А.И., Дударев Е.Ф. Способ нанесения антифрикционного износостойкого покрытия на титановые сплавы // Патент на изобретение № 2502828, опубли. 27.12.2013 г., бюл. № 36.
8. Савостиков В.М., Потекаев А.И., Табаченко А.Н. и др. // Изв. вузов. Физика. – 2012. – Т. 55. – № 9. – С. 71–77.
9. Потекаев А.И., Табаченко А.Н., Савостиков В.М. и др. // Изв. вузов. Физика. – 2014. – Т. 57. – № 2. – С. 77–84.

*Сибирский физико-технический институт им. В.Д. Кузнецова
Томского государственного университета, г. Томск, Россия

Поступила в редакцию 01.10.14.

**Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
г. Томск, Россия
E-mail: svm.53@mail.ru

Савостиков Виктор Михайлович, к.т.н., ведущ. технолог;
Потекаев Александр Иванович, д.ф.-м.н., профессор, директор;
Табаченко Анатолий Никитович, к.ф.-м.н., ст. науч. сотр., ведущ. науч. сотр.;
Дударев Евгений Федорович, д.ф.-м.н., профессор, гл. науч. сотр.;
Шулелов Иван Анисимович, к.ф.-м.н., ст. науч. сотр.

V.M. SAVOSTIKOV, A.I. POTEKAEV, A.N. TABACHENKO, E.F. DUDAREV, I.A. SHULEPOV

INFLUENCE OF ION-PLASMA MODIFYING TREATMENT ON THE MECHANICAL AND TRIBOLOGICAL PROPERTIES OF COARSE AND ULTRAFINE TITANIUM ALLOY VT6

In the present work the comparative mechanical and tribological properties of coarse and ultrafine (nanostructured) titanium alloy VT6 after low-temperature ion-plasma doping and coating Ti–C–Mo–S were investigated. The coatings are formed by method of magnetron sputtering with the assistance of gas plasma generator PINK. The methods of the measurement nano- and microhardness with NHT-S-AX -000X and PMT-3 units, tensile strength (σ_v , MPa) and elongation at break (δ , %), friction coefficient by pin-on-disk test with titanium pin and TNT-S-AX000 (CSM) unit, optical study and calculations of cross-sectional area of wear tracks by Micro Measure 3D Station (STIL) were used in research work. It has been established that ion-plasma doping and coating at low temperature about 300–400 °C does not reduce tensile strength of ultrafine titanium alloy VT6. The hardness of the ion-plasma doping surface layer increases to ~ 6–6.5 GPa. The hardness of Ti–C–Mo–S coating is ~ 7–8 GPa. The friction coefficient with the same titanium alloy is reduced by 5.2 times for the coarse and 8.8 times for ultrafine VT6 alloys coated Ti–C–Mo–S. The wear resistance of coarse alloy VT6 coated Ti–C–Mo–S is increased by ~ 200 times. The wear resistance of ultrafine alloy VT6 coated Ti–C–Mo–S is increased by ~400 times. Developed combined magnetron-plasma method can find practical application in low-temperature deposition of coatings on products from ultrafine (nanostructured) titanium alloys, where tempering of

temperature deposition of coatings on products from ultrafine (nanostructured) titanium alloys, where tempering of material is not allowed.

Keywords: titanium alloy, coarse and ultrafine structure, ion-plasma methods, doping, coating hardness, strength, coefficient of friction, wear resistance.

REFERENCES

1. Psahye S.G., Dudarev E.F., Kashin O.A., et al. (2007). *Problems of Materials Science*, 4 (52), 208–213.
2. Semenova I.P., Valiev R.Z., Yakushina E.V., et al. (2008). *J. Mater. Sci.*, 43(23–24), 7354–7359.
3. Bely A.V., Kukareko V.A., Kononov, et al. (2008). *Friction and wear*, 29(6), 571–577.
4. Chertovskih S.V. *Tribological characteristics of ultrafine titanium and its alloys*. Author. diss. candidate. tehn. sciences. Moscow, 2008.
5. Garbacz H., Gradzka-Dahlke M., Kurzydowski K. (2007). *Wear*, 263, 572–578.
6. Savostikov V.M., Sergeev C.M., Pinzhin Yu.P. *The method of combined ion-plasma treatment of products from steel and hard alloys*. Patent no. 2370570, publ. 20.10.2009, bull. no. 29.
7. Savostikov V.M., Tabachenko A.N., Potekaev A.I., Dudarev E.F. *The method of applying a wear-resistant and anti-friction coating on titanium alloys*. Patent no. 502828, publ. 12.27.2013, bull. no. 36.
8. Savostikov V.M., Potekaev A.I., Tabachenko A.N., et al. (2012). *Izv. VUZov. Fis.*, 55(9), 71–77.
9. Potekaev A.I., Tabachenko A.N., Savostikov V.M., et al. (2014). *Izv. VUZov. Fis.*, 57(2), 77–84.