

8. Коробов Ю.С., Полякова А.Л., Счастливцев В.М. Структура и свойства стальных покрытий, нанесенных методом активированной дуговой металлизации // Сварочное производство. – 1997. – № 1. – С. 4–6.
9. Белоцерковский М.А. Разработка экономичного и высокоэффективного оборудования для газопламенного напыления // Наука-производство. – 1999. – № 6. – С. 14–16.
10. Ивашко В.С., Белоцерковский М.А., Байкус К.В. и др. Восстановление узлов трения активированной дуговой металлизацией // Автоматическая сварка. – 1999. – № 4. – С. 47–49.
11. Клименов В.А., Панин С.В., Балохонов Р.Р. и др. Экспериментальное и теоретическое исследование мезоскопической деформации и разрушения при сжатии образцов малоуглеродистой стали с напыленными покрытиями, оплавленными в условиях мощных ультразвуковых колебаний // Физическая мезомеханика. – 2003. – Т. 6. – № 2. – С. 99–110.
12. Безбородов В.П., Нехорошков О.Н., Ковалевский Е.А. Структурно-фазовые особенности формирования газотермических покрытий из никелевых сплавов при оплавлении и ультразвуковой обработке // Перспективные материалы. – 2000. – № 4. – С. 64–68.
13. Юсиф С.А.К., Панин С.В., Люкшин П.А., Сергеев В.П. Уменьшение степени растрескивания керамического теплозащитного покрытия на медной подложке путем варьирования геометрии границы раздела // Физическая мезомеханика. – 2011. – Т. 14. – № 4. – С. 56–65.

Поступила 08.06.2011 г.

УДК 621.891

## ВЛИЯНИЕ АКУСТИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ, ГЕНЕРИРУЕМЫХ ПРИ ТРЕНИИ, НА ИЗНАШИВАНИЕ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ

Б.П. Гриценко<sup>1,2</sup>, К.В. Круковский<sup>1</sup>, Н.В. Гирсова<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, г. Томск

<sup>2</sup>Томский политехнический университет, г. Томск

E-mail: gritsenko@ispms.tsc.ru

*Представлены исследования изнашивания титановых сплавов в условиях гашения акустических колебаний возникающих при трении. Показано, что акустические колебания по своему действию аналогичны дополнительной эффективной нагрузке. Гашением акустических колебаний в трибосистеме можно влиять на механизм изнашивания и снижать износ титановых сплавов.*

### Ключевые слова:

*Трение, износ, сплавы титана, деформация, акустические колебания.*

### Key words:

*Friction, wear, titanic alloys, deformation, acoustic vibrations.*

### Введение

Широкое применение сплавов титана в технике и медицине обусловлено его высокой удельной прочностью и коррозионной стойкостью. В то же время использование титановых сплавов в узлах трения сдерживается их низким сопротивлением изнашиванию. Разработка и получение ультрамелкозернистых (УМЗ) и наноструктурных титановых сплавов, которые обладают еще более высокими механическими свойствами, только обострили данную проблему, так как исследований их трибологических свойств проведено пока еще очень мало [1, 2]. В связи с этим представляет интерес изучение данных свойств титановых сплавов и поиск путей повышения их износостойкости.

### Материалы и методы исследований

В настоящей работе представлены исследования технически чистого титана ВТ1–0 и сплавов ПТ–3В и ВТ6 в двух состояниях: обычном крупнозернистом (КЗ) и в УМЗ состоянии, полученном с помощью интенсивной пластической деформации методом всестороннего *авс*-прессования. Средний размер зерен после интенсивной пласти-

ческой деформации уменьшался с 600...400 до 0,8...0,5 мкм. Перед испытаниями образцы шлифовали и электролитически полировали. Качество поверхности скольжения образцов составляло 0,32 Ra.

Испытания образцов проводили по схеме «диск-палец» в режиме граничной смазки [3]. Контртело было изготовлено из закаленной стали ШХ15. Нагрузка при испытаниях, кроме отдельно указанных случаев, составляла 25 Н, скорость скольжения 3 м/с. При испытаниях армо-железа нагрузка составляла от 300 до 400 Н. Измерения потери массы образцов в процессе испытаний на трение проводили путем их взвешивания на аналитических весах. Погрешность измерений составляла  $\pm 50$  мкг. Эксперименты проводились при температуре 20 °С, средняя температура образцов в опытах не достигала 40 °С.

Аттестацию структурно-фазового состояния исследуемых образцов проводили с использованием просвечивающей электронной микроскопии на микроскопе ЭМ-125К. Металлографические исследования на оптическом микроскопе АХЮ-VERT-200 фирмы «Карл Цейс».

Сравнительные исследования затухания акустических колебаний в образцах титана и его сплавов проводили с помощью ультразвукового дефектоскопа УД2-12 на частоте 10 МГц. Абсолютная чувствительность прибора составляла 96 дБ. Основная абсолютная погрешность измерения отношения амплитуд сигналов на входе приемника дефектоскопа не превышала  $\pm(0,2+0,03N)$  дБ,  $N$  – номинальное значение измеряемой величины.

#### Экспериментальные результаты и их обсуждение

Микроструктура титана технической чистоты ВТ1–0 в состоянии поставки является сложной многоуровневой. Средний размер зерен составляет  $0,40\pm 0,05$  мкм. Внутри зерен наблюдается пластинчатая структура, представленная крупными пластинами шириной до 40 мкм, ориентированных произвольно или  $\alpha$ -колониями (поперечный размер от 20 до 100 мкм, продольный – может соответствовать размеру зерна.). Пластины в свою очередь делятся на субзерна с поперечным размером от 4 до 20 мкм. Около 20 % субзерен содержат фрагменты с малоугловыми разориентировками. Средняя плотность дислокаций составляет  $\sim(3\text{...}5)\cdot 10^9 \text{ см}^{-2}$ . В отдельных субзернах присутствуют широкие экстинкционные контура; рефлексии на отдельных дифракционных картинах имеют небольшие азимутальные размытия, что говорит о наличии незначительных внутренних напряжений. Кроме того на границах зерен присутствуют вытянутые области в виде прослойки с поперечным размером от 0,5 до 2,0 мкм, содержащие двойники и микродвойники  $\alpha$ -титана, иногда в них наблюдаются прослойки  $\beta$ -титана. Таким образом, многоуровневая микроструктура ВТ1–0 в состоянии поставки представлена различными структурными элементами с широким спектром размеров.

После всесторонней изотермической деформации с конечной температурой деформации 500 °С в микроструктуре титана ВТ1–0 наблюдаются зерна с размером от 0,4 до 2,0 мкм. Средний размер зерен составляет  $0,82\pm 0,14$  мкм. Около 50 % объема материала занято зернами с размером более 1 мкм. Крупные зерна содержат фрагменты с малоугловыми разориентировками. Средняя плотность дислокаций составляет  $\sim 3\cdot 10^9 \text{ см}^{-2}$ . По-види-

мому, сравнительно невысокая плотность дислокаций является следствием протекания динамической рекристаллизации в процессе интенсивной пластической деформации при использованном режиме.

Большинство зерен микроструктуры сплава ВТ-6 в состоянии поставки имеют практически равноосную форму с размером зерен  $0,61\pm 0,05$  мкм. Между зернами наблюдаются прослойки  $\beta$ -титана толщиной  $< 1$  мкм. Зерна обычно разделены на блоки, которые состоят из отдельных  $\alpha$ -пластин шириной от 5 до 10 мкм, ориентированных различным образом и разделенных как правило тонкими, менее 0,5 мкм, прослойками  $\beta$ -титана или из  $\alpha$ -колоний (поперечный размер от 10 до 100 мкм);  $\alpha$ -пластины в  $\alpha$ -колониях имеют поперечный размер  $\sim 0,5\text{...}2,0$  мкм и часто разделены тонкой ( $\sim 0,1$  мкм) прослойкой  $\beta$ -титана. Пластины содержат микродвойники, линзообразные пластины  $\alpha$ -Ti, поперечный размер которых  $\sim 0,05\text{...}0,10$  мкм. Внутри пластин часто наблюдается сетчатая дислокационная субмикроструктура. Рефлексы на электронограммах имеют азимутальные размытия, что свидетельствует о наличии внутренних напряжений.

После всесторонней изотермической деформации при 600 °С микроструктура сплава ВТ-6 представляет собой совокупность зерен  $\alpha$ - и  $\beta$ -титана, размер которых варьируется от 0,2 до 1,0 мкм. Средний размер составляет  $0,52\pm 0,16$  мкм. В зернах  $\alpha$ -титана размером более 0,52 мкм присутствуют фрагменты с малоугловыми разориентировками (рис. 1).

В исходном состоянии микроструктура образцов сплава ПТ-3В неоднородна и представлена крупными неравноосными зернами размером от 40 до 500 мкм, которые разбиты на фрагменты, содержащие пластины (поперечный размер 0,5...10,0 мкм), разделенные прослойками толщиной  $\sim 0,1$  мкм, имеющими контраст, отличный от матричного.

В образцах сплава ПТ-3В в УМЗ состоянии поперечный размер элементов зеренно-субзеренной структуры, определяемый по темнопольному изображению, составляет 0,05...0,80 мкм. Разориентировки между элементами зеренно-субзеренной структуры в основном большеугловые. Таким об-

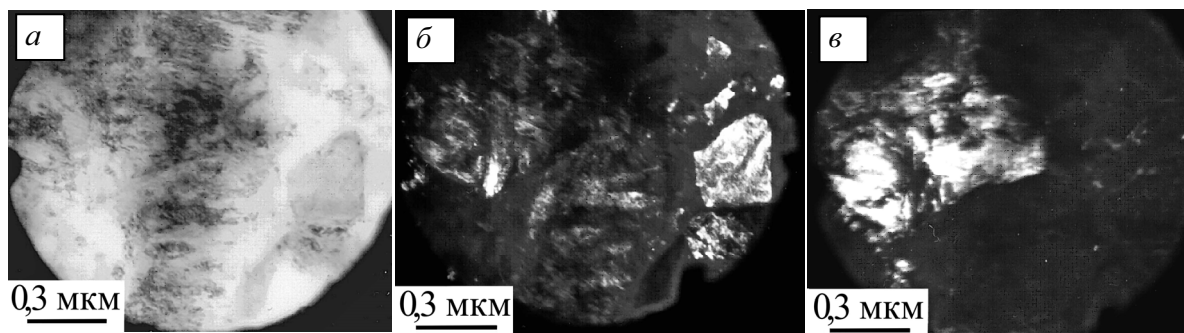


Рис. 1. Электронномикроскопические изображения микроструктуры сплава ВТ6 после всесторонней изотермической деформации с конечной температурой деформации 600 °С: а) светлопольное; б) темнопольное в рефлексе  $\beta$ -Ti; в) в рефлексе  $\alpha$ -Ti

разом, после термомеханической обработки произошло измельчение микроструктуры, микроструктура стала более однородной по объему образца.

Измерения микротвердости образцов в различных структурных состояниях показаны в таблице.

**Таблица.** Микротвердость титана ВТ1-0 и титановых сплавов ПТ-3В, ВТ6 в обычном и УМЗ состояниях

Материал	ВТ1-0/ВТ1-0 УМЗ	ПТ-3В/ПТ-3В УМЗ	ВТ6/ВТ6 УМЗ
Микротвердость, кг/мм <sup>2</sup>	172/210	292/398	336/402

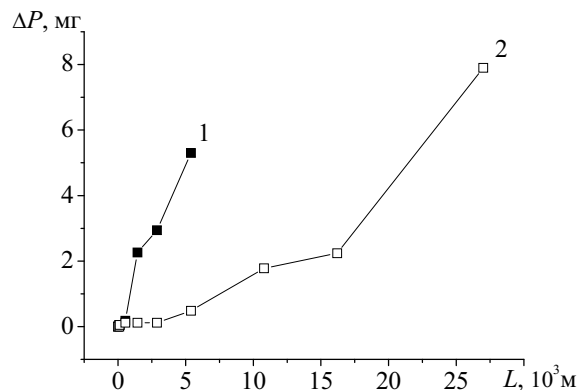
При испытаниях на изнашивание образцов титана ВТ1-0 и сплавов ПТ-3В, ВТ6 в крупнозернистом состоянии на контртеле почти сразу происходит образование слоя из перенесённого материала образцов. С небольшой задержкой от начала испытаний (~100...200 м), начиналось интенсивное изнашивание. Путь скольжения 100...200 м – это путь, за время прохождения которого, происходит формирование абразивного слоя на контртеле при данной нагрузке. По характеру кривых изнашивания и топографии поверхностей трения – это адгезивно-абразивное изнашивание [4]. В начальный момент испытаний, пока поверхностный слой на контртеле не сформировался, происходит преимущественно адгезионное изнашивание и только затем происходит изменение механизма изнашивания на адгезионно-абразивный. То есть начальная стадия приработки определяет преимущественный механизм изнашивания. Необходимо отметить, что в дальнейшем, в течение времени или при изменении условий работы механизм изнашивания снова может измениться. Такое развитие процесса изнашивания было характерно для всех образцов. Однако интенсивность изнашивания сильно отличалась. Образцы ВТ6, обладающие наибольшей твердостью, имели в десять раз более низкую износостойкость, чем ВТ1-0. Твердость и износостойкость образцов ПТ3-В занимали промежуточное положение. Из этого следует, что, несмотря на одинаковые механизмы изнашивания для всех трех материалов, сам процесс имеет существенные отличия.

Износ титана и его сплавов очень сильно зависит от приложенной нагрузки [5]. Величина нагрузки при трении, особенно в первый момент может определять не только величину износа, но и механизм изнашивания [6]. На рис. 2 приведены кривые изнашивания титана ВТ1-0 при разных нагрузках. Видно, что при меньшей нагрузке увеличилась стадия с низкой скоростью изнашивания до  $2,9 \cdot 10^3$  м. А путь до формирования абразивного слоя на контртеле и перехода на адгезионно-абразивное изнашивание увеличился до  $16,2 \cdot 10^3$  м.

В процессе трения на поверхностях образцов, имеющих меньшие скорости изнашивания, образуются вторичные структуры в виде островков

из испытываемого материала. Толщина образующихся структур составляет от 1 до 10 мкм. Причем, чем больше суммарная площадь островков, тем меньше износ. Известно, что подобные образования на поверхностях трения получили название серво-витных пленок. Они имеют отличные от основного материала свойства и могут оказывать существенное влияние на износостойкость [7–9]. В случае, когда образуются островковые структуры, механизм изнашивания изменяется. В начале происходит образование вторичных структур в виде островков, которые фактически отделяют соприкасаемые поверхности. Изнашивание происходит за счет разрушения этих структур и выноса материала из зоны трения. В процессе трения за счет адгезии и других физических процессов эти структуры восстанавливаются [9]. Длительное существование таких вторичных структур может приводить к эффекту безызносности.

Сплавы титана с УМЗ структурой обладают большим несовершенством структуры и большей энергией границ зерен. При трении это может приводить к повышению адгезионного взаимодействия, а в сочетании со снижением пластичности являться причиной снижения износостойкости.

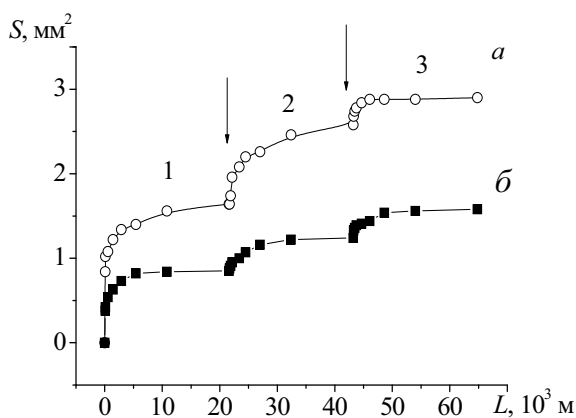


**Рис. 2.** Зависимости потери массы образцов исходного титана ВТ1-0 от пути скольжения при испытаниях на износ с нагрузками: 1) 25; 2) 12,5 Н

В работе [3] на примере армо-железа нами было показано, что акустические колебания (АК), возникающие при трении, по своему воздействию на износ подобны дополнительной эффективной нагрузке. На рис. 3 представлены результаты испытаний образцов армо-железа при изменении акустических характеристик трибосистемы и нагрузки на образцы. Испытания проводились с различным расположением демпферов при нагрузке 300 Н (рис. 3, а) и без демпферов со ступенчатым повышением нагрузки (рис. 3, б). На рисунке стрелками показаны моменты времени, когда изменялись акустические характеристики трибосистемы или нагрузка на образцы. Повышение нагрузки приводит к увеличению контурной площади контактов и точно таким же образом изменяется контурная площадь контактов, если мы перестаем гасить АК на контртеле, а затем и на образцах.

Поскольку для титана и его сплавов величина нагрузки очень сильно влияет на интенсивность изнашивания, то изучение влияния АК на изнашивание для них является актуальным. Исследования титановых сплавов показали, что влияние АК проявляется несколько иначе [6]. Учитывая перспективность использования титана в узлах трения, имеет смысл подробнее изучить влияние АК на титановые сплавы, находящиеся в различных структурных состояниях.

Испытание образцов титана с разными нагрузками показывает, что чем меньше нагрузка, тем позднее происходит переход на адгезионно-абразивный износ. Поэтому снижение эффективной нагрузки за счет гашения АК может увеличить время работы трибосистемы в режиме неинтенсивного изнашивания, и как следствие, увеличить ресурс ее работы. С точки зрения реализации того или иного механизма изнашивания, по-видимому, почти для любой трибологической пары металл-металл или сплав-металл с увеличением нагрузки можно достигнуть перехода с механизма усталостного изнашивания на адгезионное или адгезионно-абразивное. Для титана, в отличие от других металлов, этот переход происходит при меньших нагрузках и в значительно более короткое время.

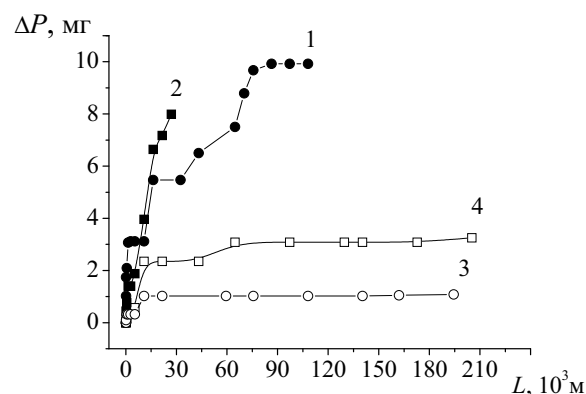


**Рис. 3.** Зависимости изменения площади пятен контактов от пути скольжения образцов армко-железа при испытаниях на трение: а – испытания с различным расположением демпферов: 1) участок с использованием демпферов на контртеле и образцах; 2) демпферы только на образцах; 3) без демпферов; б – испытания на трение со ступенчатым повышением нагрузки: 1) участок испытаний при нагрузке 200; 2) 300; 3) 400 Н

Поэтому, с точки зрения повышения износостойкости титана и его сплавов, задачу можно свести к увеличению времени перехода изнашивания с одного механизма на другой. Или, в другом варианте, это увеличение нагрузки, при которой долгое время не будет происходить смены механизма изнашивания.

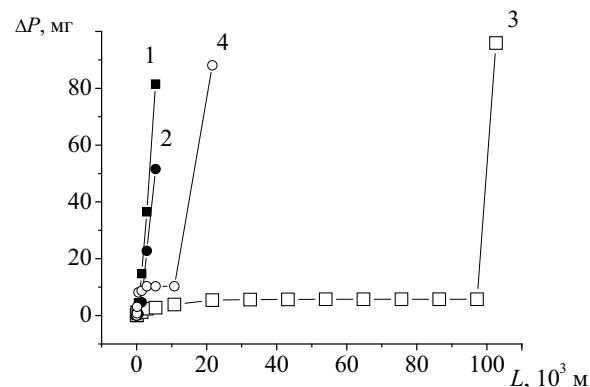
На рис. 4 представлены результаты измерений изнашивания образцов ВТ1–0 в КЗ и УМЗ состояниях при обычных испытаниях и при гашении акустических колебаний. Видно, что гашение акустических колебаний существенно изменяет характер

изнашивания. Гашение АК, возникающих при трении, приводит к изменению механизма изнашивания. Не происходит ярко выраженного адгезионно-абразивного изнашивания.



**Рис. 4.** Зависимости потери массы образцов от пути скольжения при испытаниях на износ: 1, 3) образцы титана ВТ1–0 в исходном состоянии; 2, 4) ВТ1–0 в УМЗ состоянии. Кривые 1, 2) обычные испытания; 3, 4) испытания с гашением акустических колебаний на образцах и контртеле

Аналогичные испытания с демпфированием АК были проведены и для образцов титанового сплава ВТ6. Результаты испытаний представлены на рис. 5. На этом же рисунке для сравнения приведены кривые изнашивания без использования демпферов. В образцах ВТ6 в исходном состоянии до  $10^3$  м испытаний наблюдались стадии приработки и стабильного неинтенсивного изнашивания, затем адгезионное схватывание и изменение механизма изнашивания, он стал адгезионно-абразивным. Резко возросла скорость потери массы образцов (см. кривую 3, рис. 5).



**Рис. 5.** Зависимости потери массы образцов сплава ВТ6 от пути скольжения при испытании на износ: 1) образцы в исходном состоянии; 2) в УМЗ состоянии; 3, 4) в исходном и УМЗ состояниях с гашением акустических колебаний на образцах и контртеле

На изменение механизма указывает ход кривой и образование абразивного слоя на поверхности трения на контртеле. Интенсивность изнашивания стала такой же, как и при испытаниях без демпферов. Это означает, что, несмотря на демпфирование АК, на контртеле происходило постепенное накопление абразивного слоя за счет адгезионного

переноса материала с образцов на контртело. После образования слоя определенной толщины произошла смена механизма изнашивания. Подобная картина наблюдалась и при испытаниях ВТ6 в УМЗ состоянии. Однако изменение характера изнашивания произошло значительно раньше, уже через  $10,8 \cdot 10^3$  м испытаний (см. кривую 4, рис. 5).

На рис. 6 представлены результаты испытаний на трение титанового сплава ПТ-3В. Видно, что гашение АК внесло несущественные изменения в кинетику изнашивания на  $2,7 \cdot 10^3$  м пути трения. В дальнейшем интенсивность изнашивания была такой же, как и без гашения АК. Из представленных результатов следует, что гашение АК по-разному влияет на изнашивание титана и его сплавов.

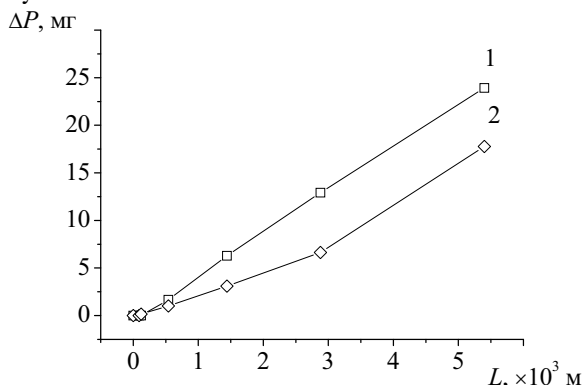


Рис. 6. Зависимости потери массы образцов от пути скольжения сплава ПТ-3В в КЗ состоянии при испытании на износ: 1) обычные испытания; 2) с гашением акустических колебаний на образцах и контртеле

Для выяснения причин столь разного поведения образцов были проведены сравнительные исследования по прохождению АК в этих образцах. Исследования показали, что затухание акустических колебаний в образцах ПТ-3В в 5 раз выше, чем

в ВТ1–0. Сравнение образцов в ВТ1–0 УМЗ и в КЗ состояниях показало, что в УМЗ состоянии затухание происходит в 10 раз сильнее, чем в КЗ состоянии. Из этих измерений становится понятным, почему гашение АК почти не влияет на изнашивание сплава ПТ-3В. В этих образцах АК хорошо поглощаются и без демпферов, а дополнительное поглощение АК уже мало что может изменить.

### Выводы

Впервые показано, что в трибосистеме титан (сплавы титана) – сталь акустические колебания, возникающие при трении, вносят существенный вклад в разрушение материалов. Изменение акустических свойств трибосистемы за счет демпфирования акустических колебаний приводит к снижению изнашивания. Вероятно, как и в случае стали 45 и армо-железа, это происходит за счет снижения эффективной нагрузки. В случае титана и его сплавов есть свои особенности. Гашение акустических колебаний позволяет при определенных условиях изменять механизм изнашивания. При гашении акустических колебаний продолжительное время сохраняется режим изнашивания через адгезию и образование пленок на поверхностях трения, возрастает время перехода изнашивания на адгезионно-абразивный механизм.

В трибосистеме, в которой одним из элементов является титан или его сплавы, путем гашения акустических колебаний можно влиять на механизм изнашивания и тем самым повышать износостойкость.

Авторы выражают благодарность доценту Томского политехнического университета А.И. Солдатову за проведение акустических измерений.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 10–08–01016 а.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мигранов М.Ш., Шустер Л.Ш., Столяров В.В. Трибологические свойства ультрамелкозернистого титана, полученного методом интенсивной пластической деформации // Вестник машиностроения. – 2004. – № 7. – С. 37–40.
2. Колгачёв А.Е., Панин В.Е., Панин С.В., Почивалов Ю.И. Влияние наноструктурирования поверхностного слоя и последующей химико-термической обработки на износостойкость титанового сплава ВТ6 // Нанотехнология и физика функциональных нанокристаллических материалов: Сб. науч. трудов УрО РАН, Екатеринбург. – 2005. – Т. 1. – С. 99–110.
3. Гриценко Б.П., Круковский К.В., Гирсова Н.В., Кашин О.А. Влияние высокодозной ионной имплантации и акустических колебаний, генерируемых при трении, на износостойкость армо-железа и стали 45 // Трение и износ. – 2005. – Т. 26. – № 6. – С. 622–627.
4. Bermudez M.D., Martinez-Nicolas G., Carrion F.J., et al. Dry and lubricated wear resistance of mechanically-alloyed aluminium-base sintered composites // Wear. – 2001. – V. 248. – № 1–2. – P. 178–186.
5. Чечулин Б.Б., Ушаков С.С., Разуваева И.Н., Гольдфайн В.Н. Титановые сплавы в машиностроении. – Л.: Машиностроение, 1977. – 248 с.
6. Гриценко Б.П., Круковский К.В., Гирсова Н.В., Кашин О.А. Закономерности изнашивания титановых сплавов с ультрамелкозернистой структурой в условиях демпфирования акустических колебаний, генерируемых при трении // Трибология и надежность: Труды VIII Междунар. конф. – СПб., – 23–25 октября 2008. – СПб.: Изд-во Санкт-Петербургского университета путей сообщения, 2008. – С. 130–135.
7. Рыбакова Л.М., Куксенова Л.И. Структура поверхностных слоев металла при трении // Поверхность. Физика, химия, механика. – 1983. – № 8. – С. 144–153.
8. Рыбакова Л.М. Рентгенографическое исследование структуры поверхностных слоев пластически деформированного металла. // Металловедение и термическая обработка металлов. – 1995. – № 7. – С. 18–21.
9. Гаркунов Д.Н. Триботехника, износ и безызносность. – М.: Изд-во МСХА, 2001. – 606 с.

Поступила 24.01.2011 г.