

АНАЛИЗ ТРЕНИЯ И ИЗНАШИВАНИЯ УЛЬТРАМЕЛКОЗЕРНИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ С ПОЗИЦИИ ТЕРМОДИНАМИКИ

С. В. ЧЕРТОВСКИХ¹, Л. Ш. ШУСТЕР²

¹chertovskikh@mail.ru, ²okmim@ugatu.ac.ru

ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет» (УГАТУ)

Поступила в редакцию 24.06.2016

Аннотация. Обоснованы условия потери термодинамической устойчивости трибосистемы и ее адаптации с уменьшением интенсивности изнашивания на подвижном фрикционном контакте деталей из материалов с ультрамелкозернистой (УМЗ) структурой, полученной равноканальным угловым прессованием. Теоретически и экспериментально установлены закономерности влияния дисперсности структуры и температуры фрикционного контакта на триботехнические характеристики УМЗ материалов.

Ключевые слова: трение; изнашивание; прочность адгезионных связей на срез; молекулярная составляющая коэффициента трения; термодинамика; производство энтропии; ультрамелкозернистая структура.

ВВЕДЕНИЕ

В связи с развитием высокотехнологичных отраслей промышленности во всех развитых странах проблема повышения износостойкости механизмов и снижения потерь мощности на трение является актуальной задачей. В настоящее время особое внимание уделяется вопросам разработки новых материалов для трибоузлов различного назначения. Одним из наиболее перспективных научных направлений в области создания новых материалов с уникальными свойствами, в том числе и с улучшенными триботехническими характеристиками, является разработка специальных технологий получения УМЗ материалов [1]. В качестве объекта исследований выбраны титан и его сплавы в УМЗ состоянии структуры, полученной методом интенсивной пластической деформации, в частности равноканальным угловым прессованием (РКУП).

До настоящего времени недостаточно изученными остаются триботехнические характеристики (износостойкость, коэффициент трения, прочность адгезионных связей на срез и т.д.), а также термодинамические аспекты трения и изнашивания УМЗ материалов. Решение этих вопросов является актуальным для триботехники.

Целью данной работы является: с помощью методов неравновесной термодинамики и самоорганизации изучить влияние температуры и

степени дисперсности структуры контактирующих материалов на их триботехнические характеристики.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПОСЫЛКИ

Изнашивание и формирование поверхностных слоев трибоконтакта – фундаментальные процессы, свойственные любому трению или трибосистеме. Поэтому трение может изучаться, основываясь на фундаментальных законах природы. В процессе трения происходит преобразование энергии, поэтому естественно рассмотреть механизм трения и изнашивания с термодинамической точки зрения. Т.к. трение является неравновесным процессом, и основные явления при трении концентрируются в тонком приповерхностном слое, то представляет научный и практический интерес аспекты трения, основанные на термодинамике неравновесных процессов и самоорганизации [2, 3].

Термодинамический анализ позволяет установить условия, при которых с уменьшением размеров зерен структуры контактирующих материалов можно ожидать повышения износостойкости.

Структурные различия традиционного (исходного) и РКУП состояния материалов заключаются в степени дисперсности структуры материалов. УМЗ структура, полученная методом РКУП, имеет большую объемную долю границ

зерен по сравнению с крупнозернистой (КЗ) структурой, а также характеризуется высокой концентрацией дефектов (точечных и линейных) в границах зерен и вблизи них, при этом количество дислокаций внутри зерен уменьшается [1]. Неравновесные границы зерен в УМЗ материалах вследствие наличия в их структуре дефектов с предельно высокой плотностью обладают избыточной энергией и полями дальнедействующих упругих напряжений [1]. Таким образом, УМЗ состояние, как термодинамическая система, находится в «более» неравновесном состоянии по сравнению с КЗ состоянием.

Неравновесные процессы в трибосистеме могут приводить к снижению производства энтропии и, следовательно, интенсивности изнашивания и устойчиво протекать с образованием диссипативных структур при самоорганизации (адаптации) [2–5]. Процесс самоорганизации может начаться только после прохождения системы через неустойчивость [2–5]. Система может потерять устойчивость при отрицательном избыточном производстве энтропии (согласно функции Ляпунова [3]). Для самоорганизации трибосистемы в ней должно проходить более одного независимых процесса [2–5]. В реальных системах наряду с трением всегда присутствуют другие независимые источники диссипации энергии, например, физико-химические взаимодействия трущихся тел друг с другом, средой и смазкой, приводящих к изменению состава поверхностных структур. В уравнении избыточного производства энтропии это учитывается зависимостью теплопроводности λ от некоторого параметра z , характеризующего степень отклонения состояния структуры материала от равновесия (например, степень дисперсности структуры, полученной при РКУП):

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{2 \cdot \partial t} \delta^2 S = \\ & = \frac{(p \cdot v)^2}{T^2 \cdot B} \cdot \left(\frac{1}{\lambda} \cdot \left(\frac{\partial f}{\partial z} \right)^2 - \frac{f}{\lambda^2} \cdot \frac{\partial f}{\partial z} \cdot \frac{\partial \lambda}{\partial z} \right) \cdot (\delta z)^2, \quad (1) \end{aligned}$$

где δ – флуктуация (колебание), S – энтропия, T – абсолютная температура, B – площадь контакта, f – коэффициент трения, p – нагрузка, v – скорость скольжения.

Правая часть выражения (1) может стать отрицательной за счет знака второго множителя. Для того чтобы (1) могло стать отрицательным, необходимо соблюдение условия:

$$\frac{\partial f}{\partial z} \cdot \frac{\partial \lambda}{\partial z} > 0. \quad (2)$$

Условие (2) соблюдается, если одновременно f и λ будут уменьшаться или увеличиваться с ростом параметра z . Неравновесные границы зерен в УМЗ материалах обладают избыточной энергией и полями дальнедействующих упругих напряжений, что интенсифицирует релаксационные процессы при внешнем воздействии (трении), которые отражаются в массопереносе вследствие деформации и диффузии. Часть производства энтропии, вызванной массопереносом, можно представить в общем виде:

$$\left(\frac{dS}{dt} \right)_m = X_m \cdot \rho_m \cdot W(X_m), \quad (3)$$

где X_m – термодинамическая сила, вызывающая массоперенос (градиенты напряжений или химических потенциалов, соответственно, для деформации или диффузии), ρ_m – средняя плотность вещества, участвующего в массопереносе, $W(X_m)$ – средняя скорость массопереноса, зависящая от X_m , будет увеличиваться с увеличением X_m .

Избыточное производство энтропии при систематической флуктуации параметра z будет равно:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{2 \cdot \partial t} \delta^2 S_m = \\ & = \frac{\partial X_m}{\partial z} \cdot \left(W \cdot \frac{\partial \rho_m}{\partial z} + \rho_m \cdot \frac{\partial W}{\partial X_m} \cdot \frac{\partial X_m}{\partial z} \right) \cdot (\delta z)^2. \quad (4) \end{aligned}$$

Термодинамическая сила массопереноса будет увеличиваться при увеличении степени неравновесности (z), т.е. $\frac{\partial X_m}{\partial z} > 0$, а т.к. $\frac{\partial W}{\partial z} > 0$,

то отрицательный вклад в избыточное производство энтропии может внести только член $\frac{\partial \rho_m}{\partial z}$. Для этого плотность вещества, участвующего в массопереносе должна уменьшаться с увеличением параметра z . Избыточное производство энтропии (4) может стать отрицательным, а система может потерять устойчивость при условии:

$$\frac{\partial \rho_m}{\partial z} < 0. \quad (5)$$

Снижение плотности вещества, участвующего в массопереносе, может происходить вследствие увеличения количества дислокаций и вакансий. По-видимому, такое снижение плотности является незначительным и не может вызвать неустойчивость системы. Заметное снижение плотности переносимого вещества может возникнуть вследствие увеличения со-

держания в нем вторичных более легких структур, например, оксидов.

Таким образом, избыточное производство энтропии для трибосистемы с неравновесным состоянием контактирующих поверхностей может стать отрицательным, а система может потерять устойчивость и снизить интенсивность изнашивания при соблюдении условий одновременного снижения коэффициента трения, теплопроводности и плотности вещества, участвующего в массопереносе.

Для оценки адекватности изложенных выше результатов теоретического анализа были выполнены экспериментальные исследования.

В качестве исследуемых материалов использовали КЗ и УМЗ (после РКУП) титан ВТ1-0 и никелид титана ($Ti_{49,8}Ni_{50,2}$).

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Для исследования адгезионного взаимодействия использовали экспериментальный метод [6], в основе которого принята физическая модель, которая в первом приближении отражает реальные условия трения и изнашивания на локальном контакте. Метод основан на измерении крутящего момента M проворачивания сферического индентора, сжатого двумя плоскопараллельными испытуемыми образцами из исследуемых материалов. Этот метод позволил оценить следующие триботехнические характеристики: тангенциальную прочность τ_m адгезионных связей на срез, нормальные напряжения на контакте p_m , адгезионную (молекулярную) составляющую коэффициента трения f_M .

В качестве индентора использовали двусторонние сферические цилиндрики (радиусом 2,5 мм и высотой 25 мм) из твердосплавного инструментального материала ВК8, имеющего достаточно высокие жаропрочность и жаростойкость (до 850–900° С). Нагрев зоны контакта осуществлялся электроконтактным способом. Испытуемые образцы были диаметром 20–25 мм и высотой 6 мм. Шероховатость поверхности образцов и индентора $Ra = 0,63–0,80$ мкм. Угловая скорость вращения индентора вокруг собственной оси составляла 0,1 рад/с. Длительность прогрева образца и его испытания при данной температуре не превышала 1 мин. Все измерения триботехнических характеристик для каждого состояния при комнатной и повышенных температурах были выполнены на одних и тех же образцах.

Помимо исследований на адгезиометре были также выполнены эксперименты на машине трения NANOVEA TRB по определению коэффициента трения и интенсивности изнашивания

исследуемых материалов в условиях контакта по схеме «диск–палец». Материал диска – AISI 52100 (аналог ШХ6), образцы-цилиндры $\varnothing 2 \times 20$ мм – из исследуемых материалов: УМЗ и КЗ ВТ1-0 и никелида титана. Диск совершал возвратно-вращательное движение вокруг оси на угол 45°. Вертикальная сила – 5 Н. Скорость скольжения цилиндра по диску – 0,1 м/с. Трение сухое. Показания коэффициентов трения записывались на компьютер в виде осциллограмм. Измерялся износ (потерянный объем в mm^3) и вычислялась интенсивность изнашивания ($mm^3/N \cdot m$) образцов-цилиндров.

Для исследования микроструктуры, а также химического и фазового состава испытуемых образцов использовали оптическую металлографию (ОМ) (НЕОРНОТ 21), просвечивающую (ПЭМ) (JEM-100В) и растровую электронную микроскопию (РЭМ) (JSM-6490LV), рентгенофотозлектронную спектроскопию (РФЭС) (ЭС 2403 М-Т).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Исследования влияния размеров зерен и температуры фрикционного контакта на адгезионные параметры проводили на образцах из титана ВТ1-0 в трех состояниях: в исходном состоянии, после РКУП и после РКУП + холодная прокатка. Средний размер зерен, соответственно, был 15, 0,3 и 0,1 мкм (рис. 1). РКУП подвергали и образцы из $Ti_{49,8}Ni_{50,2}$, средний размер зерен которых в исходном состоянии и после РКУП, соответственно, был равен 50 и 0,3 мкм.

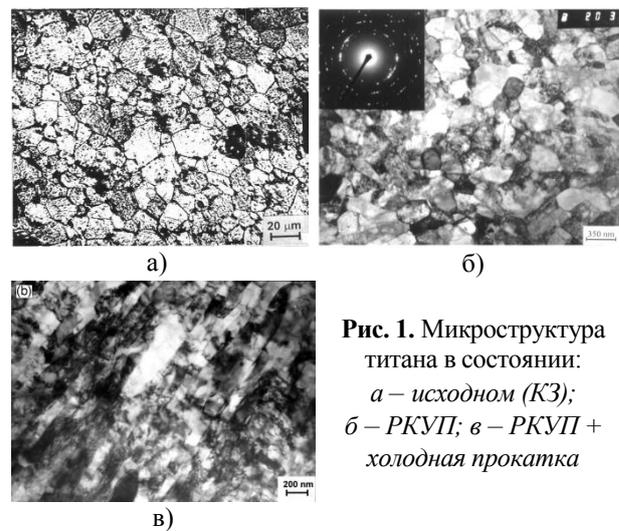


Рис. 1. Микроструктура титана в состоянии:
а – исходном (КЗ);
б – РКУП; в – РКУП +
холодная прокатка

Выявлены функциональные зависимости между температурой фрикционного контакта и триботехническими параметрами (с учетом различного структурного состояния испытуемых материалов): τ_m , p_m , f_M (рис. 2, 3). Формирова-

ние УМЗ структуры в титане ВТ1-0 снижает f_M и уменьшает его склонность к схватыванию (рис. 2). Этот эффект тем сильнее, чем меньше размер зерен и выше температура контакта. Установлена величина критической температуры контакта $\approx 350^\circ\text{C}$, выше которой увеличение дисперсности структуры титана приводит к снижению τ_{mn} по сравнению с КЗ состоянием, что можно объяснить интенсивной релаксацией напряжений в УМЗ титане за счет процессов возврата и интенсификацией формирования вторичных структур (оксидов титана) на фрикционном контакте, выполняющих функции защитной пленки, предохраняющей от схватывания поверхностей контакта. В интерметаллидном сплаве $\text{Ti}_{49,8}\text{Ni}_{50,2}$ измельчение структуры также снижает f_M (рис. 3).

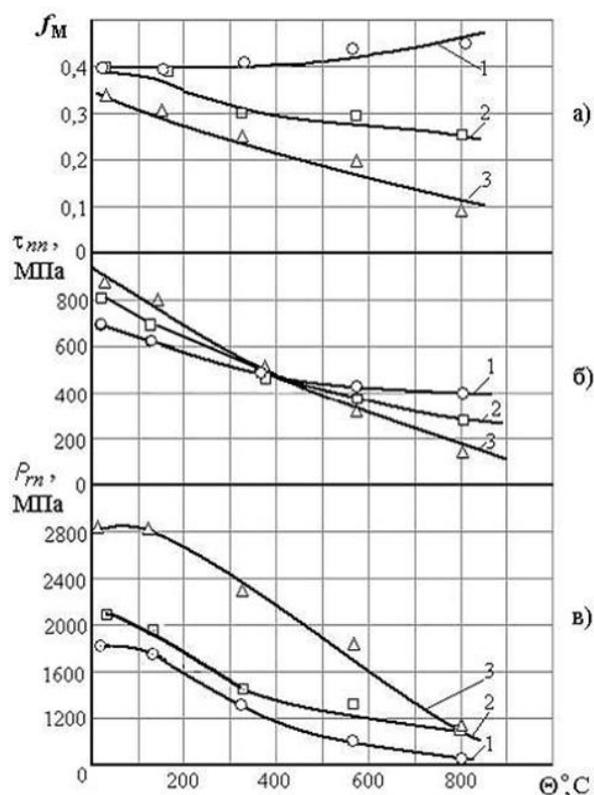


Рис. 2. Влияние температуры фрикционного контакта на триботехнические характеристики титана ВТ1-0: а – f_M ; б – τ_{mn} ; в – p_{mn} ; 1 – исходного; 2 – после РКУП; 3 – после РКУП + хол. прокатка 75 %

Испытания по схеме «диск–палец» также подтвердили снижение средних значений коэффициента трения у материалов ВТ1-0 и $\text{Ti}_{49,8}\text{Ni}_{50,2}$, обработанных РКУП, по сравнению с КЗ состоянием (рис. 4). Установлено, что УМЗ материалы имеют повышенную износостойкость по сравнению со своими КЗ аналогами.

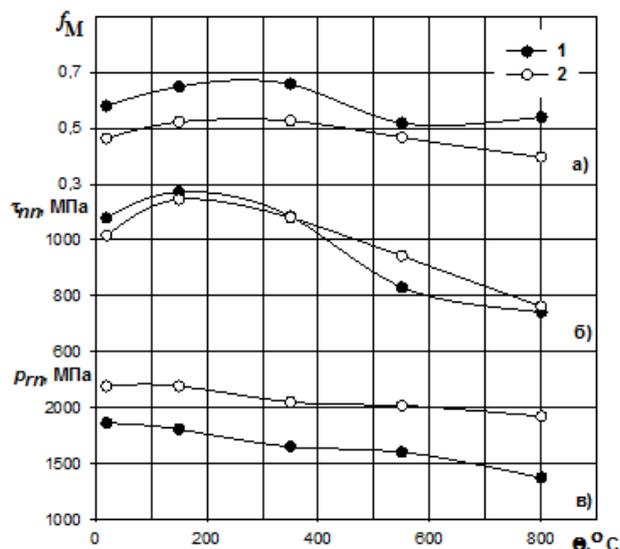


Рис. 3. Влияние температуры фрикционного контакта на триботехнические характеристики нитрида титана: 1 – исходного; 2 – после РКУП; а – f_M ; б – τ_{mn} ; в – p_{mn}

Исследованиями микроструктуры поверхностей фрикционного контакта методами ОМ, РЭМ установлено отсутствие значительного роста зерна УМЗ титана при температурах контакта до 800°C , что связано с равновесием процессов рекристаллизации и фрагментации структуры в результате интенсивной деформации в зоне пластического контакта при высоких нагрузках.

На основе обзорных РФЭ спектров (один из спектров представлен на рис. 5) выявлено, что поверхность образцов из УМЗ и КЗ титана ВТ1-0 после адгезионных испытаний имеет одинаковый качественный элементный состав, но различный количественный.

При помощи спектров высокого разрешения для подуровня $\text{Ti } 2p$ (один из спектров представлен на рис. 6) установлено, что образцы из КЗ и УМЗ титана после триботехнических испытаний не содержат на своей поверхности металлический титан, однако содержат этот элемент в его соединении TiO_2 .

Выявлено, что на поверхности УМЗ титана после триботехнических испытаний присутствует в 2 раза больше оксидов титана TiO_2 по сравнению с КЗ аналогом. При этом количество оксидов титана увеличивается с увеличением температуры контакта. Оксиды титана, выполняя функции защитной пленки, предохраняют от схватывания контактирующих поверхностей и способствуют снижению коэффициента трения.

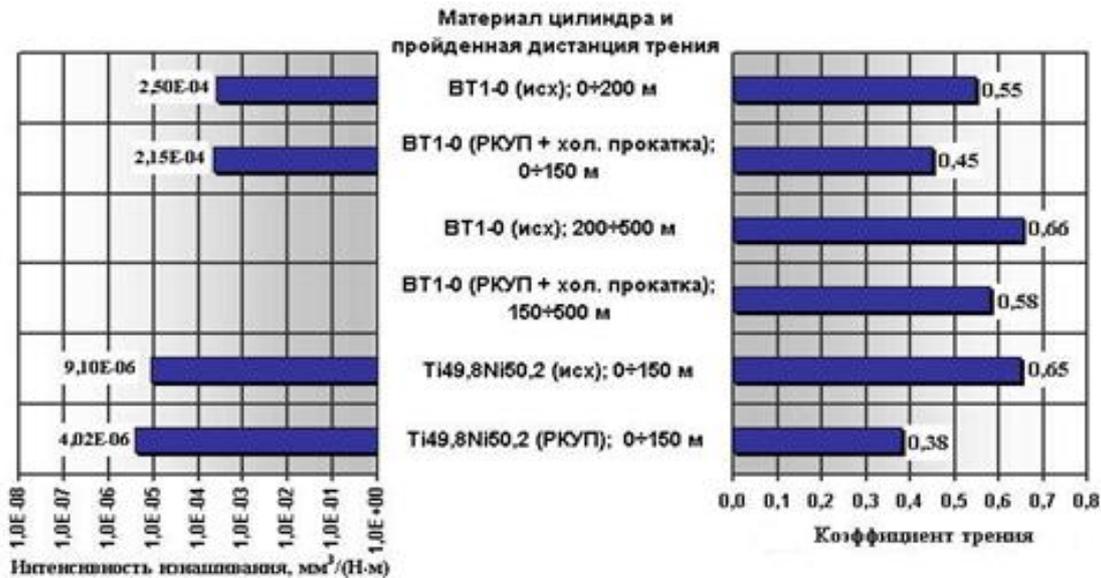


Рис. 4. Интенсивность изнашивания и коэффициент трения исследуемых материалов при испытании по схеме «диск–палец»

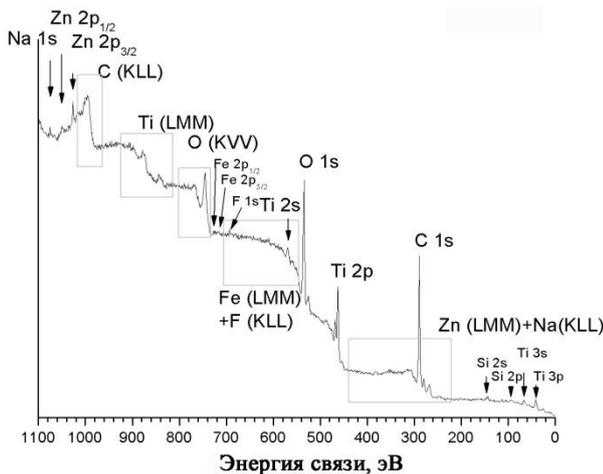


Рис. 5. Пример обзорного РФЭ спектра УМЗ титана после триботехнических испытаний при температуре контакта $\Theta = 800^\circ\text{C}$

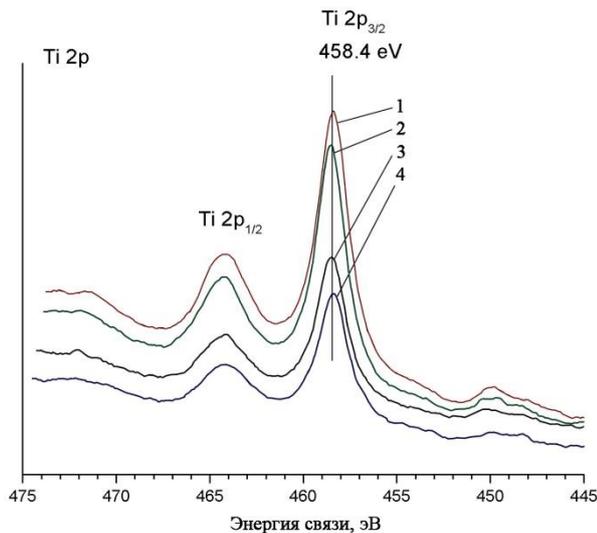


Рис. 6. Спектры высокого разрешения подуровня Ti 2p образцов из УМЗ титана: 1 – $\Theta = 800^\circ\text{C}$; 2 – 350°C ; 3 – 20°C ; 4 – до триботехнических испытаний

Из [1, 7] следует, что в УМЗ состоянии теплопроводность титана (также как и электропроводность) меньше, чем в традиционном состоянии, что, по-видимому, естественно вследствие повышенного содержания вакансий в УМЗ структуре.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные экспериментальные данные позволили объяснить снижение интенсивности изнашивания УМЗ материалов (на примере титана и его сплава) за счет одновременного снижения коэффициента трения, теплопроводности и плотности вещества, участвующего в массопереносе, т.е. они подтвердили результаты термодинамического анализа влияния дисперсности структуры и температуры на триботехнические характеристики титана и его сплавов. Это открывает новые возможности совершенствования изделий из УМЗ материалов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Валиев Р. З., Александров И. В. Наноструктурные материалы, полученные интенсивной пластической деформацией. М.: Логос, 2000. 272 с. [R. Z Valiev, I. V Alexandrov, *Nanostructured materials produced by severe plastic deformation*, (in Russian). Moscow: Logos, 2000]
2. Бершадский Л. И. Структурная термодинамика трибосистем. Киев: Знание, 1990. 31 с. [L. I Bershadskii and *Structural Thermodynamics tribosystems*, (in Russian). Kiev: Znanie, 1990]
3. Пригожин И., Кондипуди Д. Современная термодинамика. М.: Мир, 2002. 461 с. [I. Prigogin, D. Kondipudi, *Modern thermodynamics*, (in Russian). Moscow: Mir, 2002]
4. Гершман И. С., Буше Н. А. Реализация диссипативной самоорганизации поверхностей трения в трибосистемах // Трение и износ. 1995. Т.16, № 1. С. 61–70. [I. S.

Gershman and N. A. Bushe, *Implementation of dissipative self-friction surfaces tribosystems*, (in Russian), in *Trenie i iznos*, 1995, vol. 16, no. 1, pp. 61–70]

5. **Гершман И. С.** Синергетика процессов трения // Трение, износ, смазка. 2006. Т.8, № 4(29). С. 71–80. [I. S. Gershman, *Synergetics friction processes*, (in Russian), in *Trenie i iznos*, 2006, vol. 8, no. 4(29), pp. 71–80]

6. **Шустер Л. Ш.** Адгезионное взаимодействие твердых металлических тел. Уфа: Гилем, 1999. 199 с. [L. Sh Shuster, *Adhesion bond solid metal bodies*, (in Russian). Ufa: Gilem, 1999]

7. **Stolyarov V. V., Zhu Y. T., Alexandrov I. V., Valiev R. Z.** Grain refinement and properties of pure Ti, processed by warm ECAP and cold rolling // *Materials Science and Engineering*. 2003. V. 343. P. 43–50. [V. V. Stolyarov, Y. T. Zhu, I. V. Alexandrov, R. Z. Valiev, *Grain refinement and properties of pure Ti, processed by warm ECAP and cold rolling*, in *Materials Science and Engineering*, 2003, vol. 343. pp. 43–50]

ОБ АВТОРАХ

ЧЕРТОВСКИХ Сергей Владимирович, доц. каф. основ конструирования механизмов и машин. Дипл. маг. (УГАТУ, 2002). Канд. техн. наук (г. Москва, ВНИИЖТ, 2008). Иссл. в области трибологии.

ШУСТЕР Лёва Шмульевич, проф. каф. основ конструирования механизмов и машин. Д-р техн. наук (г. Москва, МГУНИГ, 1990). Иссл. в обл. высоко-температурной трибологии.

METADATA

Title: Analysis of friction and wear of ultrafine materials from the position of thermodynamics.

Authors: S. V. Chertovskikh¹, L. Sh. Shuster²

Affiliation:

Ufa State Aviation Technical University (UGATU), Russia.

Email: ²chertovskikh@mail.ru.

Language: Russian.

Source: Vestnik UGATU (scientific journal of Ufa State Aviation Technical University), vol. 20, no. 2 (72), pp. 55–60, 2016. ISSN 2225-2789 (Online), ISSN 1992-6502 (Print).

Abstract: Reasonable terms of loss of thermodynamic stability tribosystem and its adaptation to a decrease in wear rate on the movable frictional contact details of materials with ultrafine-grained (UFG) structure obtained by equal-channel angular pressing. Theoretically and experimentally established regularities of the influence of dispersion patterns and temperature frictional contact on the tribological characteristics of UFG materials.

Key words: friction; wear; strength adhesive bonds on the cut; molecular component of the friction coefficient; thermodynamics; entropy production; ultrafine structure.

About authors:

CHERTOVSKIKH, Sergey Vladimirovich, Docent, Dept. of the basics of designing mechanisms and machines. Dipl. Magistrate (USATU, 2002). Cand. of Techn. Sci. (Moscow, VNIIZhT, 2008). Research in the field of tribology.

SHUSTER, Leva Shmulevich, Prof., Dept. of the basics of designing mechanisms and machines. Dr. of Techn. Sci. (Moscow, MGUNIG, 1990). Research in the field of high-temperature tribology.