

## АНАЛИЗ ТРЕНИЯ И ИЗНАШИВАНИЯ УЛЬТРАМЕЛКОЗЕРНИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ С ПОЗИЦИИ ТЕРМОДИНАМИКИ

С. В. ЧЕРТОВСКИХ<sup>1</sup>, Л. Ш. ШУСТЕР<sup>2</sup>

<sup>1</sup>chertovskikh@mail.ru, <sup>2</sup>okmim@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  $\lambda$  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  $\delta$  – 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  $\lambda$  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),  $\rho_m$  – 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  $\tau_m$  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.

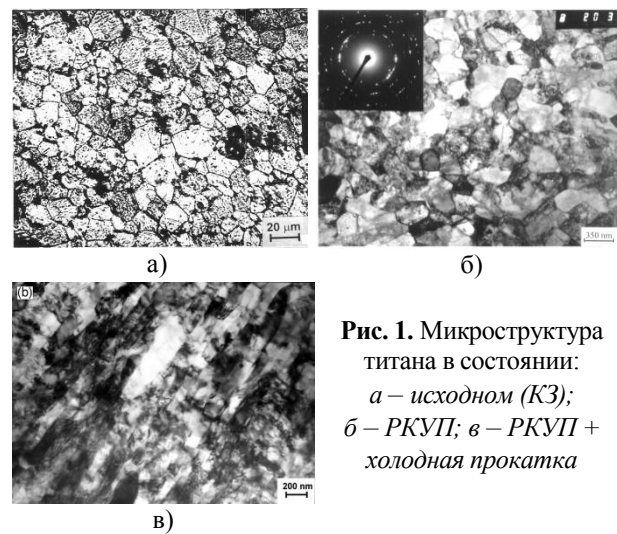
Помимо исследований на адгезиометре были также выполнены эксперименты на машине трения NANOVEA TRB по определению коэффициента трения и интенсивности изнашивания

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):  $\tau_m$ ,  $p_m$ ,  $f_M$  (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  $\tau_{mn}$  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).

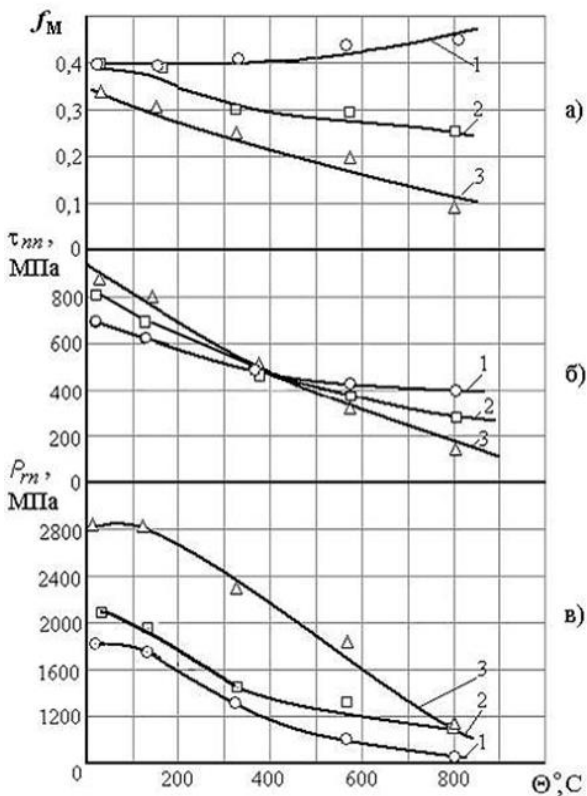


Рис. 2. Влияние температуры фрикционного контакта на триботехнические характеристики титана ВТ1-0: а –  $f_M$ ; б –  $\tau_{mn}$ ; в –  $p_{mn}$ ; 1 – исходного; 2 – после РКУП; 3 – после РКУП + хол. прокатка 75 %

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.

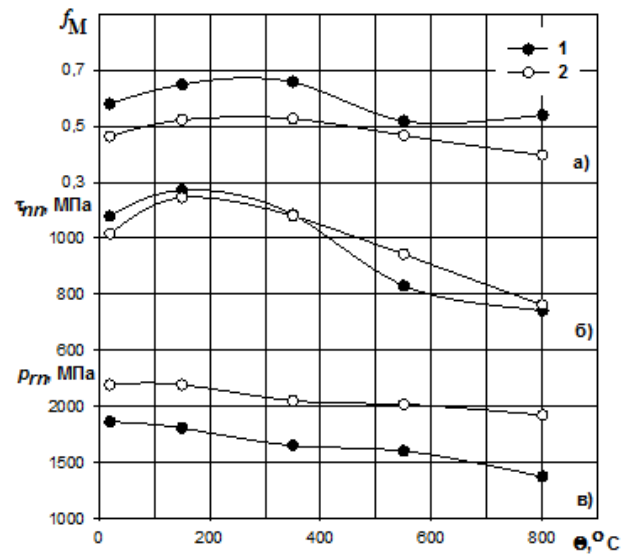


Рис. 3. Влияние температуры фрикционного контакта на триботехнические характеристики никелида титана: 1 – исходного; 2 – после РКУП; а –  $f_M$ ; б –  $\tau_{mn}$ ; в –  $p_{mn}$

Исследованиями микроструктуры поверхностей фрикционного контакта методами ОМ, РЭМ установлено отсутствие значительного роста зерна УМЗ титана при температурах контакта до  $800^\circ\text{C}$ , 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  $\text{TiO}_2$ .

Выявлено, что на поверхности УМЗ титана после триботехнических испытаний присутствует в 2 раза больше оксидов титана  $\text{TiO}_2$  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.

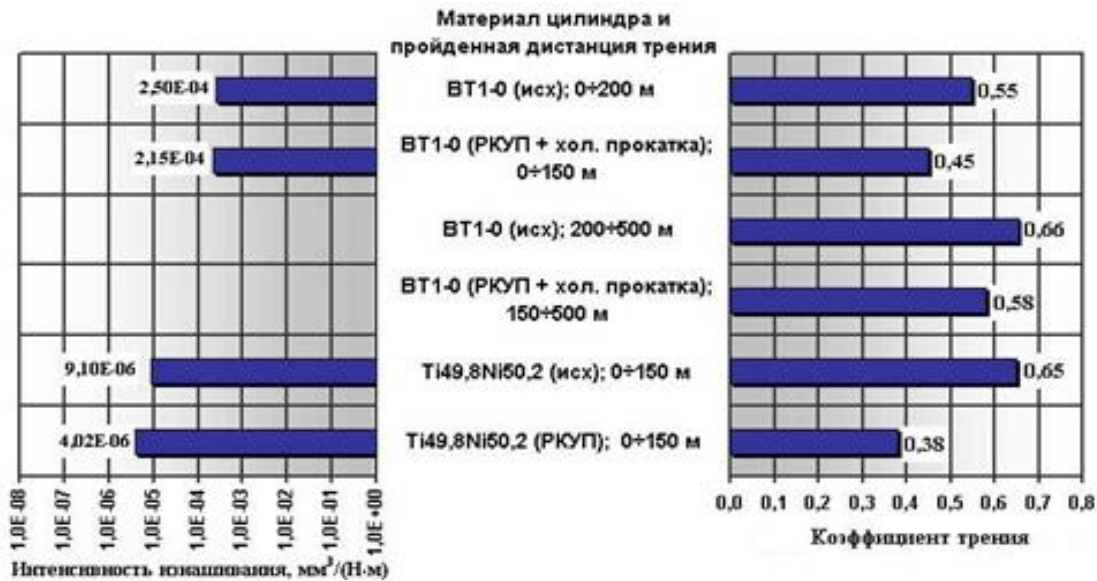


Рис. 4. Интенсивность изнашивания и коэффициент трения исследуемых материалов при испытании по схеме «диск–палец»

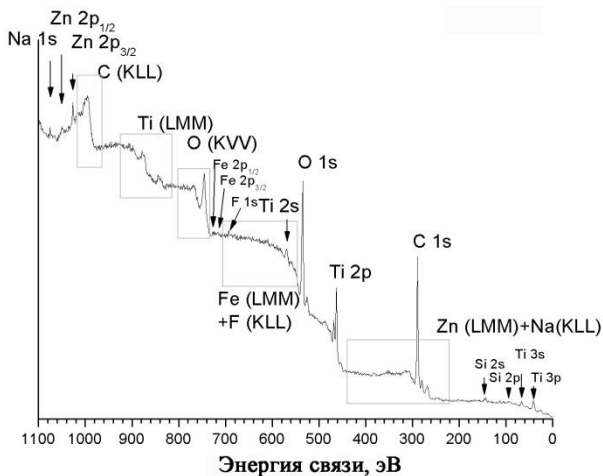


Рис. 5. Пример обзорного РФЭ спектра УМЗ титана после триботехнических испытаний при температуре контакта  $\Theta = 800^\circ\text{C}$

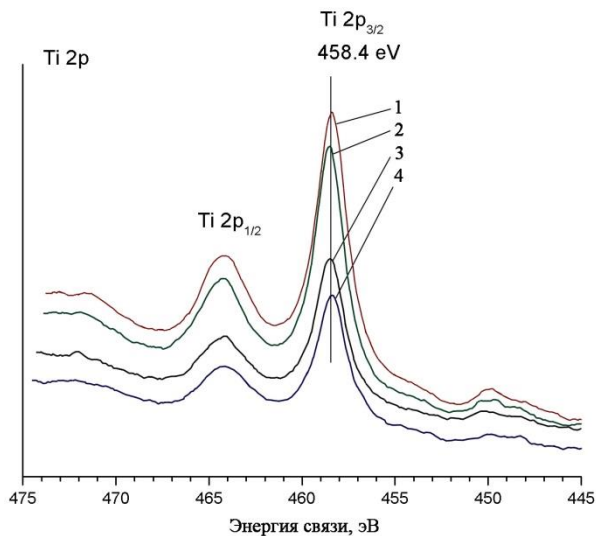


Рис. 6. Спектры высокого разрешения подуровня Ti 2p образцов из УМЗ титана: 1 –  $\Theta = 800^\circ\text{C}$ ; 2 –  $350^\circ\text{C}$ ; 3 –  $20^\circ\text{C}$ ; 4 – до триботехнических испытаний

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. Chertovskikh<sup>1</sup>, L. Sh. Shuster<sup>2</sup>

**Affiliation:**

Ufa State Aviation Technical University (UGATU), Russia.

**Email:** <sup>2</sup>chertovskikh@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.