

УДК 621

DOI: 10.12737/23159

И.С. Гершман, Е.И. Гершман, А.Е. Миронов

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ НЕРАВНОВЕСНОЙ ТЕРМОДИНАМИКИ И ТЕОРИИ САМООРГАНИЗАЦИИ ДЛЯ ОПИСАНИЯ ТРИБОСИСТЕМ И РАЗРАБОТКИ ИЗНОСОСТОЙКИХ МАТЕРИАЛОВ

Представлено практическое применение неравновесной термодинамики и теории самоорганизации в трибологии с получением конкретных результатов, в частности при разработке новых износостойких материалов. Показано, что для снижения интенсивности изнашивания нужно инициировать и интенсифицировать процессы с отрицательным производ-

ством энтропии, которые устойчиво протекают после самоорганизации и образования вторичных структур. Рассмотрены возможности сдвига самоорганизации в более мягкие условия трения.

**Ключевые слова:** трение, изнашивание, теория самоорганизации, неравновесная термодинамика, диссипативные структуры.

I.S. Gershman, E.I. Gershman, A.I. Mironov

## USE OF NON-EQUILIBRIUM THERMODYNAMICS AND THEORY OF SELF-ORGANIZATION FOR TRIBOSYSTEMS DESCRIPTION AND WEAR-RESISTANT MATERIALS DEVELOPMENT

In the paper there is presented a practical use of the non-equilibrium thermodynamics and theory of self-organization in tribology with obtaining certain results particularly at the development of new wear-resistant materials. Wear intensity decreases with the decrease of manufacturing entropy. There are shown the results of the applied investigations of non-equilibrium thermodynamics and the theory of self-organization conformably to friction. Possible states of a body of friction with equal power imparted to a body from the point of view of entropy are considered. There are shown practical examples

of wear intensity decrease by the example of sliding electrical contacts and antifriction alloys for sliding bearings. The results of the development of antifriction aluminum alloys made simultaneously on the basis of seven-nine alloying elements are considered. Besides, in experimental alloys there were added silicon, magnesium, zinc, titanium, that allowed decreasing wear intensity by about two times and decreasing tin content in an alloy by 1.5 – 2 times.

**Key words:** friction, theory of self-organization, non-equilibrium thermodynamics, dissipative structures.

### Введение

За последнее время появилось большое количество статей, посвященных неравновесной термодинамике применительно к трению [1-8]. Большая часть этих работ либо носят теоретический характер, либо являются обзорами. Основной их недостаток состоит в отсутствии рекомендаций по использованию положений неравновесной термодинамики и теории самоорганизации для решения практических проблем трибологии. В связи с этим настоящая статья посвящена именно практическим аспектам неравновесной термодинамики и теории самоорганизации применительно к трибологии.

Основным процессом при трении является превращение энергии. С этим связано широкое применение в трибологии термодинамических методов, в частности первого закона термодинамики [9]. Второй закон термодинамики начал применяться в трибологии существенно позже. Попытки использовать неравновесную термодинамику и теорию самоорганизации начались с конца 70-х годов. В этом направлении одними из первых были работы Л.И.Бершадского [10] и В.Е.Клемецкий [11-14]. В.Е.Клемецкий предложил считать образование измененных поверхностных структур при трении и изнашивание фундаментальными явлениями, со-

провожающими трение. Л.И. Бершадский предложил называть такие структуры вторичными структурами и предположил, что их образование соответствует самоорганизации с образованием диссипативных структур [15]. В.Е. Клатески и Л.И. Бершадский

### Теория

В данном разделе приведены результаты прикладных исследований неравновесной термодинамики и теории самоорганизации применительно к трению. Эти результаты будут использованы для снижения интенсивности изнашивания трущихся тел.

При трении к телу может подводиться такое количество энергии, которое не успевает рассеиваться через линейные каналы: тепло- и электропроводность, диффузию и др. Это может привести либо к катастрофическому износу при схватывании, либо к появлению вторичных структур [14]. При этом появляется зона преимущественного рассеяния энергии, т.е. с образованием вторичных структур в трущемся теле происходит перераспределение энергии.

Рассмотрим три возможных состояния трущегося тела с одинаковой сообщенной телу энергией (рис. 1).

На рис. 1 схематически показано распределение энергии ( $E$ ) в трущемся теле в различных состояниях: в условиях равновесия; в отсутствие вторичных структур; при наличии вторичных структур. При условии равенства энергий тел в каждом случае энтропии тел будут снижаться, т.е.

$$E_1 = E_2 = E_3, S_1 = S_2.$$

В состоянии равновесия (кривая 1) энергия распределена равномерно, энтропия максимальная. В стационарном состоянии без вторичных структур (кривая 2) энергия распределена согласно монотонно убывающей функции от расстояния от зоны трения. Энтропия снижается по сравнению с равновесным состоянием за счет неравномерного распределения энергии. В стационарном состоянии с вторичными структурами (кривая 3) большая часть энергии концентрируется в узкой зоне вторичных структур. Возраста-

считали, что это приводит к снижению интенсивности изнашивания. Эти утверждения будут приняты за основу практического применения неравновесной термодинамики и теории самоорганизации в трибологии.

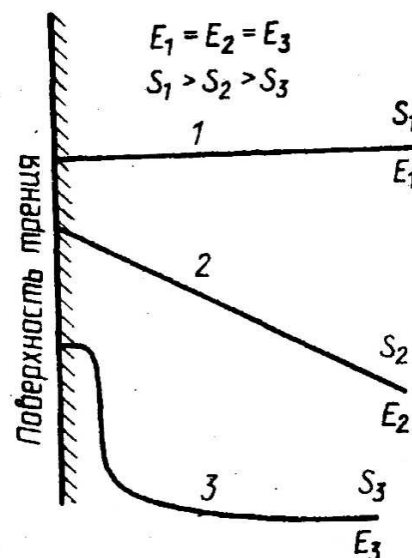


Рис. 1. Схема распределения энергии в трущемся теле в различных состояниях: 1 – в условиях равновесия; 2 – в отсутствие вторичных структур; 3 – при наличии вторичных структур;  $S_1, S_2, S_3$  – энтропии соответствующих состояний;  $E_1, E_2, E_3$  – энергии соответствующих состояний

ние степени неравномерности распределения энергии соответствует уменьшению энтропии по сравнению с предыдущим случаем.

Таким образом, с появлением вторичных структур энтропия трущегося тела снижается. Следовательно, процесс образования вторичных структур, приводящий обычно к снижению коэффициента трения, интенсивности изнашивания, может соответствовать процессу самоорганизации и образованию диссипативных структур.

Энтропия трущегося тела при трении может изменяться ( $dS$ ) за счет: внешних воздействий – потока энтропии ( $dS_e$ ) без учета износа; производства энтропии без

учета прохождения физико-химических превращений во вторичных структурах ( $dS_i$ ); физико-химических превращений во вторичных структурах ( $dS_f$ ), т.е. процессов образования вторичных структур; изнашивания материала трущегося тела ( $dS_s$ ). Изменение энтропии трущегося тела можно представить как

$$dS = dS_e + dS_i + dS_f - |dS_i|.$$

Знак «минус» обусловлен тем, что вещества покидают трущееся тело со своей энтропией. При самопроизвольных физико-химических превращениях во вторичных структурах  $dS_f$  будет положительным, при несамопроизвольных - отрицательным:

$$dS_f > 0, \quad (1)$$

$$dS_f < 0. \quad (2)$$

$dS_f$  – часть общего производства энтропии, поэтому всегда  $dS_i + dS_f > 0$ .

В стационарном состоянии изменение энтропии со временем

$$\frac{dS}{dt} = \frac{dS_e}{dt} + \frac{dS_i}{dt} + \frac{dS_f}{dt} - \frac{dS_s}{dt} = 0.$$

При условии (1)

$$\frac{dS_s}{dt} (\text{самопроизв.}) = \frac{dS_e}{dt} + \frac{dS_i}{dt} + \left| \frac{dS_f}{dt} \right|, \quad (3)$$

при условии (2)

$$\frac{dS_s}{dt} (\text{несамопроизв.}) = \frac{dS_e}{dt} + \frac{dS_i}{dt} - \frac{dS_f}{dt}. \quad (4)$$

Из-за аддитивности энтропии величина  $dS_s/dt$  пропорциональна интенсивности изнашивания материала трущегося тела. Из (3) и (4) следует, что при прочих равных условиях интенсивность изнашивания при несамопроизвольном характере превращений во вторичных структурах меньше, чем при их самопроизвольном характере, и уменьшается с уменьшением производства энтропии  $dS_i/dt$ .

### Примеры снижения интенсивности изнашивания

В данном разделе приведены практические примеры снижения интенсивности

Несамопроизвольные процессы интенсивно и устойчиво протекают при самоорганизации и образовании диссипативных структур.

Самоорганизация в системе может пройти только после потери термодинамической устойчивости. В [15] показано, что потеря термодинамической устойчивости может произойти, когда знак избыточного производства энтропии меняется с плюса на минус.

В [16] показано, что в трибосистеме вероятность потери термодинамической устойчивости

$$Y = 1 - \frac{1}{2n}, \quad (5)$$

где  $n$  – количество взаимодействующих процессов в трибосистеме.

В (5)  $n$  характеризует сложность трибосистемы. С повышением степени сложности растет вероятность потери устойчивости, следовательно, растет вероятность прохождения самоорганизации. В общем случае степень сложности повышается при усложнении легирования трущихся материалов (увеличение количества легирующих элементов).

Отметим три основных вывода из данного раздела:

1. Интенсивность изнашивания снижается при прохождении во вторичных структурах несамопроизвольных физико-химических процессов, которые интенсивно и устойчиво протекают при самоорганизации.

2. Для снижения интенсивности изнашивания следует интенсифицировать несамопроизвольные физико-химические процессы, сдвинуть проходимость самоорганизации в относительно мягкие условия трения и повысить вероятность потери трибосистемой термодинамической устойчивости.

изнашивания. Для этого сделаны попытки сдвинуть самоорганизацию в относительно

мягкие условия трения и повысить вероятность потери трибосистемой термодинамической устойчивости. Примеры приведены для скользящих электрических контактов и антифрикционных сплавов для подшипников скольжения.

В скользящих электрических контактах обычно применяются углеродные токо-съемные материалы на основе кокса или искусственного графита. В качестве контртела обычно используется медь. На рис. 2 приведена зависимость интенсивности изнашивания от величины электрического тока для разных материалов. На графике зависимости для материала на основе кокса показана точка бифуркации (70 А). В этой точке график

раздваивается. При прохождении самоорганизации образуются диссипативные структуры, интенсивность изнашивания резко снижается. Без самоорганизации интенсивность изнашивания растет по термодинамической ветви. При трении на поверхности меди может проходить химическая реакция восстановления углерода из двуокиси углерода медью [17; 18]. Эта реакция имеет отрицательное химическое сродство во всем диапазоне температур трения. Следовательно, это несамопроизвольная реакция с отрицательным производством энтропии. Можно предположить, что при образовании диссипативных структур эта реакция протекает устойчиво и интенсивно.

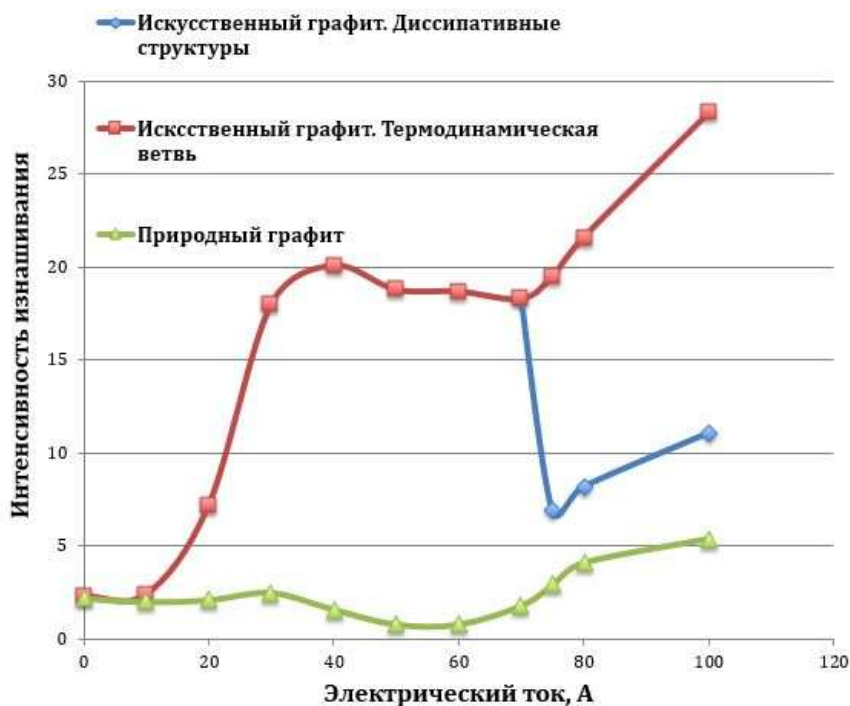


Рис. 2. Зависимость интенсивности изнашивания токо-съемных материалов от тока. Бифуркация

В [19] отмечено, что прохождение основной несамопроизвольной стадии этой реакции, т.е. разложение двуокиси углерода на углерод и кислород, сдвигается в область относительно низких температур в присутствии природного графита. В результате

впервые были изготовлены токо-съемные элементы на основе природного графита. На рис. 2 приведена зависимость интенсивности изнашивания этого материала от величины тока. Из сравнения с аналогичной кривой для кокса можно предположить, что в

присутствии природного графита прохождение несопроизвольной химической реакции начинается со значения тока 10 А. В отсутствие природного графита она начинается при значении тока 70 А. Таким образом,

самоорганизация углеродного токоосъемного материала сдвигается в относительно мягкие условия трения в присутствии природного графита, снижая общий износ материала.

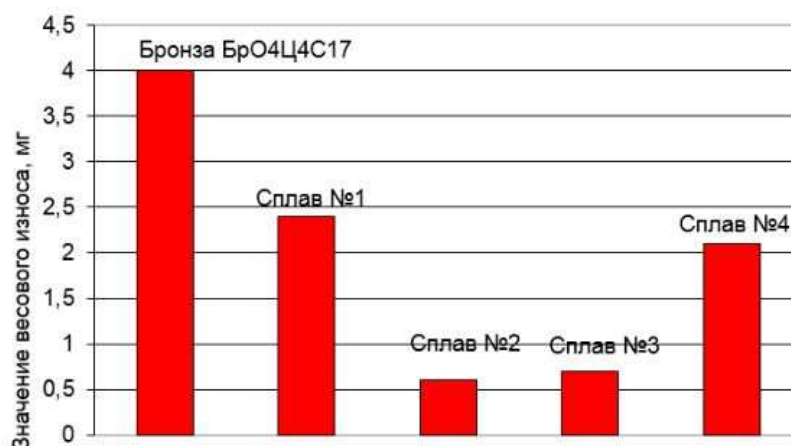


Рис. 3. Гистограммы износа алюминиевых антифрикционных сплавов и бронзы

При разработке новых антифрикционных алюминиевых сплавов взамен антифрикционных бронз сделана попытка увеличить вероятность потери трибосистемой термодинамической устойчивости. Для этого было усложнено легирование алюминиевых сплавов [20]. Традиционные антифрикционные алюминиевые сплавы содержат 2 –

4 легирующих элемента, например: АО20-1 – 20 % Sn, 1 % Cu; АО10-С2 – 10% Sn, 2 % Pb, 1 % Cu [21].

Составы экспериментальных антифрикционных сплавов и бронзы приведены в таблице. Гистограммы износа сплавов и бронзы приведены на рис. 3.

Таблица

Химический состав экспериментальных алюминиевых антифрикционных сплавов и бронзы

Обозначение сплава	Содержание элементов, % масс.								
	Sn	Pb	Cu	Zn	Mg	Si	Ti	Fe	Al
1	8,7	3,2	3,4	2,9	0,4	0,5	0,03	0,08	ост
2	11,0	2,6	3,9	2,6	-	0,1	0,01	0,07	ост
3	9,8	2,5	4,5	2,4	1,2	0,6	0,03	0,13	ост
4	9,6	3,2	4,9	4,4	0,3	0,1	0,02	0,09	ост
Бр04С4С17	4,1	16,9	Ост	3,8	-	-	-	0,12	Ост

При разработке новых антифрикционных алюминиевых сплавов было использовано одновременно 7 – 9 легирующих элементов. Кроме перечисленных выше были добавлены кремний, магний, цинк, титан. В результате примерно в 2 раза была снижена интенсивность изнашивания антифрикционного сплава и стального контртела. Кроме

того, в 1,5 -2 раза удалось уменьшить содержание олова в сплаве.

В этой статье не рассмотрены методы интенсификации несопроизвольных процессов. Пример практического применения интенсификации несопроизвольных процессов при разработке износостойких материалов можно найти в [9].

## Заключение

Показано практическое применение неравновесной термодинамики и теории самоорганизации для снижения интенсивности изнашивания трущихся тел. В качестве примеров использованы новые антифрикционные алюминиевые сплавы и новые токо-съемные материалы на основе природного графита.

Для повышения износостойкости алюминиевых антифрикционных сплавов уве-

личена вероятность потери трибосистемой термодинамической устойчивости с помощью усложнения легирования.

Для повышения износостойкости новых токо-съемных материалов прохождение самоорганизации сдвинуто в относительно мягкие условия трения с помощью применения природного графита.

*Работа выполнена при поддержке грантов Российского научного фонда № 15-19-00217, № 14-19-01033.*

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Gomez-Solano, J.R. Non-equilibrium work distribution for interacting colloidal particles under friction/ Juan Ruben Gomez-Solano, Christoph July, Jakob Mehl, Clemens Bechinger// *New J. Phys.* - 17 (2015) 045026. - P. 1-13.
2. Bryant, M.D. On the thermodynamics of degradation/ M.D.Bryant, M.M.Khonsari, F.F.Ling// *Proc. R. Soc. A* (2008) 464, 2001–2014.
3. Amiri, M. On the Thermodynamics of Friction and Wear - A Review/ M.Amiri, Michael M. Khonsari// *Entropy*. - 2010. - № 12. - P. 1021-1049.
4. Banjac, M. Friction and Wear Processes – Thermodynamic Approach/ M.Banjac, A.Vencel, S.Otović// *Tribology in Industry*. - 2014. - Vol. 36. - № 4. - P. 341-347.
5. Abdel-Aal, H.A. Thermodynamic modeling of wear/ H.A.Abel-Aal// *Encyclopedia of Tribology*/ Q.J.Wang, Y.-W. Chung (Eds.). - New York: Springer, 2013. - P. 3622-3636.
6. Bryant, M.D. Entropy and dissipative processes of friction and wear/ M.D. Bryant // *FME Transactions*. - 2009. - Vol. 37. - № 2. - P. 55-60.
7. Nosonovsky, M. Entropy in tribology: In the search for applications/ M.Nosonovsky// *Entropy*. - 2010. - № 12. - P. 1345-1390.
8. Nosonovsky, M. Friction-Induced Vibrations and Self-Organization: Mechanics and Non-Equilibrium Thermodynamics of Sliding Contact/ M.Nosonovsky, V.Mortazavi// *CRC Press*. - 2013.
9. Gershman, I.S. Catalytic Effect during Friction/ I.S.Gershman, E.I.Gershman// *Journal of Friction and Wear*. - 2011. - Vol. 32. - № 6. - P. 431-436.
10. Bershadsky, L.I. On self-organizing and concept of tribosystem self-organizing/ L.I.Bershadsky// *J. Frict. Wear*. - 1992. - № 13. - P. 101-114.
11. Klamecki, B.E. An entropy-based model of plastic deformation energy dissipation in sliding/ B.E.Klamecki// *Wear*. - 1984. - Vol. 96. - № 3. - P. 319-329.
12. Klamecki, B.E. Energy dissipation in sliding/ B.E.Klamecki// *Wear*. - 1982. - Vol. 77. - № 3. - P. 115-128.
13. Klamecki, B.E. Wear – entropy production model/ B.E.Klamecki// *Wear*. - 1980. - Vol. 58. - № 2. - P. 325-330.
14. Klamecki, B.E. A thermodynamic model of friction/ B.E.Klamecki// *Wear*. - 1980. - Vol. 63. - № 1. - P. 113-120.
15. Glansdorff, P. Thermodynamic Theory of Structure, Stability and Fluctuations/ P.Glansdorff, I.Prigogine. - London: Wiley, 1971.
16. Fox-Rabinovich, G.S. Self-Organization During Friction in Complex Surface Engineered Tribosystems/ G.S.Fox-Rabinovich, I.S.Gershman, K.Yamamoto, A.Bicsa, S.C.Veldhuis, B.D.Beake, A.I.Kovalev// *Entropy*. - 2010. - № 12. - P. 275-288.
17. Хайнике, Г. Трибохимия/ Г.Хайнике. - М.: Мир, 1987.
18. Костецкий, Б.И. Поверхностная прочность материалов при трении/ Б.И.Костецкий, М.Г.Носовский, Л.И.Бершадский. - Киев: Техника, 1976.
19. Фиалков, А.С. Углеродистые материалы/ А.С.Фиалков. - М.: Энергия, 1979.
20. Mironov, A.E. The Interrelation of the RunIn Ability of Bronzes and Aluminum Based Antifriction Alloys with Their Mechanical Properties and Degree of Alloying/ A.E.Mironov, I.S.Gershman, A.V.Ovechkin, E.I.Gershman// *Journal of Friction and Wear*. - 2016. - Vol. 37. - № 1. - P. 23-26.
21. Gershman, Iosif S. Self-Organization during Friction of Slide Bearing Antifriction Materials/ Iosif S. Gershman, Alexander E. Mironov, Eugeny I. Gershman, German S. Fox-Rabinovich, Stephen C. Veldhuis// *Entropy*. - 2015. - № 17. - P. 7967-7978.

1. Gomez-Solano, J.R. Non-equilibrium work distribution for interacting colloidal particles under friction/ Juan Ruben Gomez-Solano, Christoph July, Jakob Mehl, Clemens Bechinger// *New J. Phys.* - 17 (2015) 045026. - P. 1-13.
2. Bryant, M.D. On the thermodynamics of degradation/ M.D.Bryant, M.M.Khonsari, F.F.Ling// *Proc. R. Soc. A* (2008) 464, 2001–2014.
3. Amiri, M. On the Thermodynamics of Friction and Wear - A Review/ M.Amiri, Michael M. Khonsari// *Entropy*. - 2010. - № 12. - P. 1021-1049.
4. Banjac, M. Friction and Wear Processes – Thermodynamic Approach/ M.Banjac, A.Vencl, S.Otović// *Tribology in Industry*. - 2014. - Vol. 36. - № 4. - P. 341-347.
5. Abdel-Aal, H.A. Thermodynamic modeling of wear/ H.A.Abel-Aal// *Encyclopedia of Tribology/ Q.J.Wang, Y.-W. Chung (Eds.)*. - New York: Springer, 2013. - P. 3622-3636.
6. Bryant, M.D. Entropy and dissipative processes of friction and wear/ M.D. Bryant // *FME Transactions*. - 2009. - Vol. 37. - № 2. - P. 55-60.
7. Nosonovsky, M. Entropy in tribology: In the search for applications/ M.Nosonovsky// *Entropy*. - 2010. - № 12. - P. 1345-1390.
8. Nosonovsky, M. Friction-Induced Vibrations and Self-Organization: Mechanics and Non-Equilibrium Thermodynamics of Sliding Contact/ M.Nosonovsky, V.Mortazavi// *CRC Press*. - 2013.
9. Gershman, I.S. Catalytic Effect during Friction/ I.S.Gershman, E.I.Gershman// *Journal of Friction and Wear*. - 2011. - Vol. 32. - № 6. - P. 431-436.
10. Bershadsky, L.I. On self-organizing and concept of tribosystem self-organizing/ L.I.Bershadsky// *J. Frict. Wear*. - 1992. - № 13. - P. 101-114.
11. Klamecki, B.E. An entropy-based model of plastic deformation energy dissipation in sliding/ B.E.Klamecki// *Wear*. - 1984. - Vol. 96. - № 3. - P. 319-329.
12. Klamecki, B.E. Energy dissipation in sliding/ B.E.Klamecki// *Wear*. - 1982. - Vol. 77. - № 3. - P. 115-128.
13. Klamecki, B.E. Wear – entropy production model/ B.E.Klamecki// *Wear*. - 1980. - Vol. 58. - № 2. - P. 325-330.
14. Klamecki, B.E. A thermodynamic model of friction/ B.E.Klamecki// *Wear*. - 1980. - Vol. 63. - № 1. - P. 113-120.
15. Glansdorff, P. Thermodynamic Theory of Structure, Stability and Fluctuations/ P.Glansdorff, I.Prigogine. - London: Wiley, 1971.
16. Fox-Rabinovich, G.S. Self-Organization During Friction in Complex Surface Engineered Tribosystems/ G.S.Fox-Rabinovich, I.S.Gershman, K.Yamamoto, A.Bicsa, S.C.Veldhuis, B.D.Beake, A.I.Kovalev// *Entropy*. - 2010. - № 12. - P. 275-288.
17. Hainike, G. *Tribo-chemistry/ G.Hainike*. - M.: Mir, 1987.
18. Kostetsky, B.I. *Material Surface Strength at Friction/ B.I. Kostetsky, M.G.Nosovsky, L.I.Bershadsky*. - Kyiv: Technics, 1976.
19. Fialkov, A.S. *Carbon-Graphite Materials/ A.S.Fialkov*. - M.: Energy, 1979.
20. Mironov, A.E. The Interrelation of the RunIn Ability of Bronzes and Aluminum Based Antifriction Alloys with Their Mechanical Properties and Degree of Alloying/ A.E.Mironov, I.S.Gershman, A.V.Ovechkin, E.I.Gershman// *Journal of Friction and Wear*. - 2016. - Vol. 37. - № 1. - P. 23-26.
21. Gershman, Iosif S. Self-Organization during Friction of Slide Bearing Antifriction Materials/ Iosif S. Gershman, Alexander E. Mironov, Eugeny I. Gershman, German S. Fox-Rabinovich, Stephen C. Veldhuis// *Entropy*. - 2015. - № 17. - P. 7967-7978.

Статья поступила в редколлегию 18.10.2016.

Рецензент: д.т.н., профессор Орловского государственного университета  
Савин Л.А.

#### Сведения об авторах:

**Гершман Иосиф Сергеевич**, д.т.н., специалист акционерного общества «Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта» (АО «ВНИИЖТ»), тел.: (499) 238-07-09, e-mail: [isgershman@gmail.com](mailto:isgershman@gmail.com).

**Гершман Евгений Иосифович**, нач. отдела акционерного общества «Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта» (АО «ВНИ-

**Gershman Joseph Sergeevich**, D. Eng. Chief Expert of “ARRIRT” Co, E-mail: [isgershman@gmail.com](mailto:isgershman@gmail.com).

**Gershman Evgeny Iosiphovich**, Head of the Dep. of “ARRIRT” Co., E-mail: [gershmanei@gmail.com](mailto:gershmanei@gmail.com).

ИЖТ»), тел.: (499) 262-34-57, (499) 238-07-09, e-mail: [gershmanei@gmail.com](mailto:gershmanei@gmail.com).

**Миронов Александр Евгеньевич**, к.т.н., вед. специалист акционерного общества «Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта» (АО «ВНИИЖТ»), тел.: (499) 262-34-57, (495) 685-04-89.

**Mironov Alexander Evgenievich**, Can. Eng. Leading Expert of “ARRIRT” Co., Phone: (495) 685-04-89.