

Описание процессов трибосистем и разработка износостойких материалов с использованием неравновесной термодинамики и теории самоорганизации

И. С. ГЕРШМАН¹, П. Ю. ПЕРЕТЯГИН², А. Е. МИРОНОВ¹, Е. И. ГЕРШМАН¹

¹Акционерное общество «Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта» (АО «ВНИИЖТ»), Москва, 129626, Россия

²Московский государственный технологический университет «СТАНКИН» (МГТУ «СТАНКИН»), Москва, 127055, Россия

Аннотация. Работа посвящена практическому применению неравновесной термодинамики и теории самоорганизации в трибологии с получением конкретных результатов, особенно при разработке новых износостойких материалов. Интенсивность изнашивания снижается с уменьшением производства энтропии. Для снижения интенсивности изнашивания нужно инициировать и интенсифицировать процессы с отрицательным производством энтропии. Такие процессы устойчиво протекают после самоорганизации и образования диссипативных структур. Рассмотрены возможности сдвига самоорганизации в более мягкие условия трения. Приведены примеры практического применения этих положений для снижения интенсивности изнашивания. К таким процессам относится соответствующий подбор состава трущихся тел, который позволяет повысить вероятность процесса самоорганизации.

Ключевые слова: трение; изнашивание; самоорганизация; диссипативные структуры

Введение. За последнее время появилось большое количество статей, посвященных неравновесной термодинамике применительно к трению, например [1 – 8]. В этих статьях приведены экспериментальные или теоретические исследования, подтверждающие применимость методов неравновесной термодинамики и теории самоорганизации к процессам трения. Несмотря на эти результаты, авторы статей, как правило, не приводят примеров разработки износостойких или антифрикционных материалов с помощью подобных методов. Основным недостатком этих работ состоит в отсутствии рекомендаций использования положений неравновесной термодинамики и теории самоорганизации для решения практических проблем трибологии. В связи с этим настоящая статья посвящена именно практическим аспектам применения неравновесной термодинамики и теории самоорганизации в трибологии, в частности, для разработки антифрикционных и износостойких материалов. Такие работы начались в лаборатории цветных металлов и трибологии ВНИИЖТа, руководимой Н. А. Буше — создателем школы трибологического материаловедения в

середине 80-х годов прошлого века. Николай Александрович Буше инициировал, поддерживал и активно участвовал в подобных работах [9 – 20].

Основным процессом при трении является превращение энергии. С этим связано широкое применение в трибологии термодинамических методов, в частности первого закона термодинамики [21]. Попытки использовать неравновесную термодинамику и теорию самоорганизации в трибологии начались с конца 70-х гг. В этом направлении одними из первых были работы Л. И. Бершадского, например [22 – 25], и Б. Кламецки [26 – 29]. Б. Кламецки предложил считать образование измененных поверхностных структур при трении и изнашивании фундаментальным явлением при трении. Л. И. Бершадский предложил называть такие структуры вторичными структурами и предположил, что их образование соответствует самоорганизации с образованием диссипативных структур [27]. Б. Кламецки и Л. И. Бершадский считали, что это приводит к снижению интенсивности изнашивания. В настоящей статье эти утверждения приняты за основу практического применения неравновесной термодинамики и теории самоорганизации в трибологии, в частности, для разработки износостойких материалов.

Теория. В этом разделе приведены результаты прикладных исследований неравновесной термодинамики и теории самоорганизации применительно к трению.

При трении к телу может подводиться такое количество энергии, которое не успевает рассеиваться через линейные каналы: тепло- и электропроводность, диффузию и другие процессы, в которых потоки линейно зависят от движущих сил. Это может привести либо к катастрофическому износу и схватыванию, либо к появлению вторичных структур [29]. При этом появляется зона преимущественного рассеяния энергии, т. е. с образованием вторичных структур на поверхности трущегося тела происходит перераспределение энергии.

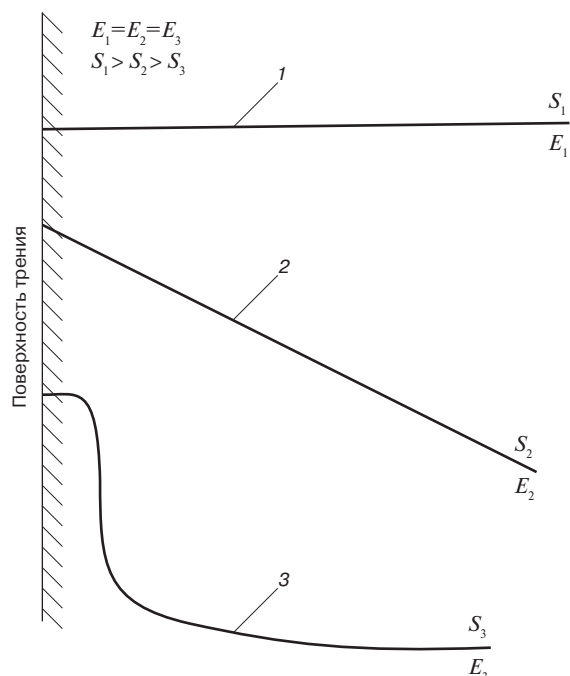


Рис. 1. Схема распределения энергии (E) в трущемся теле в различных состояниях:

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

Fig. 1. Scheme of power distribution (E) in the friction body in the different states:

1 — in equilibrium; 2 — in the absence of secondary structures; 3 — in the presence of secondary structures; S_1, S_2, S_3 — entropy of the respective states; E_1, E_2, E_3 — energy of respective state

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 в каждом случае энтропии тел будут снижаться, т. е.

если $E_1 = E_2 = E_3$, то $S_1 > S_2 > S_3$.

В состоянии равновесия (кривая 1) энергия распределена равномерно, энтропия максимальная. В стационарном состоянии без вторичных структур (кривая 2) энергия распределена согласно монотонно убывающей функции расстояния от поверхности 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. Возрастание 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 к снижению коэффициента трения и интенсивности изнашивания, соответствует процессам самоорганизации и образования диссипативных структур [30].

Энтропия трущегося тела при трении может изменяться (dS) за счет внешних воздействий — потока энтропии (dS_e) без учета износа; за счет производства энтропии без учета прохождения физико-химических превращений во вторичных структурах (dS_f); за счет физико-химических превращений во вторичных структурах (dS_s), т. е. процессов образования вторичных структур; за счет изнашивания материала трущегося тела (dS_i). Изменение энтропии трущегося тела можно представить как

$$dS = dS_e + dS_i + dS_f - |dS_s|. \quad (1)$$

Знак «минус» обусловлен тем, что продукты износа покидают трущееся тело со своей энтропией. При самопроизвольных физико-химических превращениях во вторичных структурах dS_f будет положительным (2), при несамопроизвольных — отрицательным (3):

$$dS_f > 0; \quad (2)$$

$$dS_f < 0, \quad (3)$$

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

В стационарном состоянии скорость изменения энтропии будет

$$\frac{dS}{dt} = \frac{dS_e}{dt} + \frac{dS_i}{dt} + \frac{dS_f}{dt} - \frac{dS_s}{dt} = 0. \quad (4)$$

При условии (2)

$$\frac{dS_s}{dt} (\text{самопроизвольный}) = \frac{dS_e}{dt} + \frac{dS_i}{dt} + \left| \frac{dS_f}{dt} \right|. \quad (5)$$

При условии (3)

$$\begin{aligned} \frac{dS_s}{dt} (\text{несамопроизвольный}) = \\ = \frac{dS_e}{dt} + \frac{dS_i}{dt} - \left| \frac{dS_f}{dt} \right|. \end{aligned} \quad (6)$$

Из-за аддитивности энтропии величина $\frac{dS_s}{dt}$ пропорциональна интенсивности изнашивания материала трущегося тела. Из (5) и (6) 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 $\left(\frac{dS_i}{dt} \right)$.

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

Самоорганизация в системе может пройти только после потери термодинамической устойчивости. В [30] показано, что потеря термодинамической устойчивости может произойти, когда меняется знак избыточного производства энтропии с плюса на минус.

В [31] показано, что в трибосистеме вероятность потери термодинамической устойчивости (Y) составляет

$$Y = 1 - \frac{1}{2n}, \quad (7)$$

где n — количество взаимодействующих процессов в трибосистеме.

В (7) n характеризует сложность трибосистемы. Под сложностью трибосистемы мы понимаем количество потоков (процессов), которые могут протекать в трибосистеме, т. е. с увеличением возможного количества потоков увеличивается 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 спонтанных физико-химических процессов, которые устойчиво протекают при самоорганизации.

2. Для снижения интенсивности изнашивания следует интенсифицировать несамопроизвольные спонтанные физико-химические процессы.

3. Для снижения износа следует сдвинутьхождение самоорганизации в относительно мягкие условия трения и повысить вероятность потери трибосистемой термодинамической устойчивости. Относительно мягкие условия трения — это условия, при которых относительно невысокая мощность трения. Например, для подшипников скольжения — относительно низкая нагрузка, для токосъемных трущихся материалов — относительно низкое значение тока, скорости скольжения, для режущего инструмента — начало резания.

Практическое применение. В данном разделе будут приведены практические примеры снижения интенсивности изнашивания с использованием неравновесной термодинамики и теории самоорганизации. Для этого будут сделаны попытки сдвинуть самоорганизацию в относительно мягкие условия трения и повысить вероятность потери трибосистемой термодинамической устойчивости. Примеры будут приведены для скользящих электрических контактов

и антифрикционных сплавов для подшипников скольжения.

В скользящих электрических контактах обычно применяются углеродные токосъемные 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 кривой для материала на основе кокса показана точка бифуркации (70 А). В этой точке кривая раздваивается. При прохождении самоорганизации образуются диссипативные структуры, и интенсивность изнашивания резко снижается. Без самоорганизации интенсивность изнашивания растет по термодинамической ветви. В [25, 32] исследуется прохождение при трении на поверхности меди химической реакции восстановления углерода из двуокиси углерода медью. 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 [32].

В [33] отмечено, что прохождение основной несамопроизвольной стадии этой реакции (разложение двуокиси углерода на углерод и кислород) сдвигается в присутствии природного графита в область относительно низких температур. В результате впервые были изготовлены токосъемные элементы на основе природного графита. На рис. 2 приведена зависимость интенсивности изнашивания этого материала от величины тока. Из сравнения с аналогичной кривой

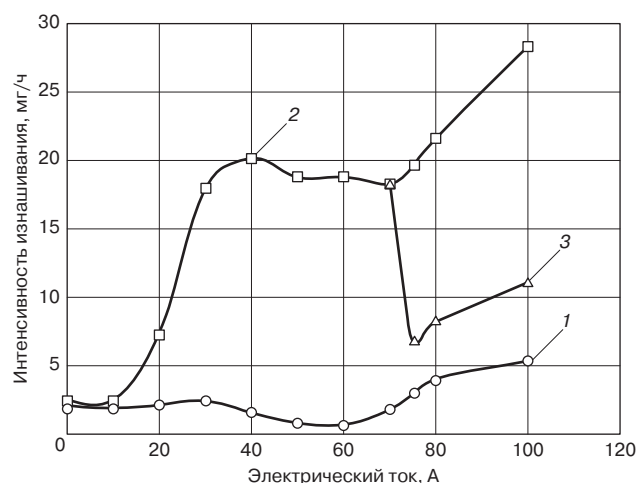


Рис. 2. Зависимость интенсивности изнашивания токосъемных материалов от тока. Бифуркация:

1 — природный графит; 2 — искусственный графит (термодинамическая ветвь); 3 — искусственный графит (диссипативные структуры)

Fig. 2. Dependence of wear rate of current collecting materials on current. Bifurcation:

1 — natural graphite; 2 — artificial graphite (thermodynamic branch); 3 — artificial graphite (dissipative structures)

Химический состав сплавов для испытаний на трение

Chemical composition of alloys for the friction tests

Сплав	Содержание элементов, % масс.										
	Sn	Pb	Cu	Si	Zn	Fe	Ti	Ni	Mn	Mg	Al
Бронза	4,15	17,10	Ост.	—	4,08	—	—	—	—	—	—
1	8,65	3,23	3,41	0,53	2,87	0,08	0,03	0,01	0,01	0,38	Ост.
2	10,97	2,59	3,86	0,06	2,63	0,07	0,01	0,01	—	—	Ост.
3	9,82	2,52	4,47	0,64	2,41	0,13	0,03	0,05	0,03	1,23	Ост.
4	9,59	3,15	4,85	0,06	4,39	0,09	0,02	—	0,03	0,31	Ост.
AlSn20	19,85	—	1,12	—	—	0,09	0,04	—	—	—	Ост.

для кокса можно предположить, что в присутствии природного графита прохождение несамопроизвольной химической реакции начинается со значения тока 10 А. В отсутствие природного графита она начинается при значении тока 70 А. Таким образом, начало самоорганизации углеродного токоотъемного материала сдвигается в присутствии природного графита в относительно мягкие условия трения, снижая износ токоотъемного материала и медного контртела.

При разработке новых антифрикционных алюминиевых сплавов взамен антифрикционных бронз сделана попытка увеличить вероятность потери трибосистемой термодинамической устойчивости, увеличив количество взаимодействующих процессов (см. формулу (7)). Для этого было усложнено легирование алюминиевых сплавов [34]. Планировалось, что это должно привести к увеличению n в формуле (7). Традиционные антифрикционные алюминиевые сплавы содержат 2–4 легирующих элемента, например, сплавы Al—20% Sn—1% Cu или Al—10% Sn—2% Pb—1% Cu [35].

При разработке новых антифрикционных алюминиевых сплавов было использовано одновременно 7–9 легирующих элементов. Легирующие элементы вводились, ориентируясь на их способность

повышения механических свойств. При этом выбирался путь сложного легирования, т. е. увеличения количества легирующих элементов. Химические составы антифрикционной бронзы, известного алюминиевого сплава AlSn20 и новых антифрикционных сплавов приведены в таблице.

Интенсивности изнашивания сплавов приведены на рис. 3. В результате усложнения легирования интенсивность изнашивания нового антифрикционного сплава была снижена примерно в 2 раза, а интенсивность изнашивания стального контртела была снижена примерно в 4 раза. Кроме того, в 2 раза удалось уменьшить содержание олова в алюминиевом сплаве.

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

Для повышения износостойкости алюминиевых антифрикционных сплавов увеличена вероятность потери трибосистемой термодинамической устойчивости с помощью усложнения легирования.

Для повышения износостойкости новых токоотъемных материалов прохождение самоорганизации следует сдвинуть в относительно мягкие условия трения с помощью применения природного графита.

Работа выполнялась при поддержке гранта федеральной целевой программы Министерства образования и науки Российской Федерации № 14.577.21.0199.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Juan Ruben Gomez-Solano, Christoph July, Jakob Mehl and Clemens Bechinger «Non-equilibrium work distribution for interacting colloidal particles under friction» New J. Phys. 17 (2015) 045026. p. 1–13 (URL: <https://arxiv.org/abs/1501.02568>).
2. M. D. Bryant, M. M. Khonsari, F. F. Ling «On the thermodynamics of degradation» Proc. R. Soc. A (2008) 464, 2001–2014 (URL: <http://rspa.royalsocietypublishing.org/content/464/2096/2001>).
3. M. Amiri and Michael M. Khonsari «On the Thermodynamics of Friction and Wear—A Review» Entropy 2010, 12, 1021–1049 (URL: <http://www.mdpi.com/1099-4300/12/5/1021>).

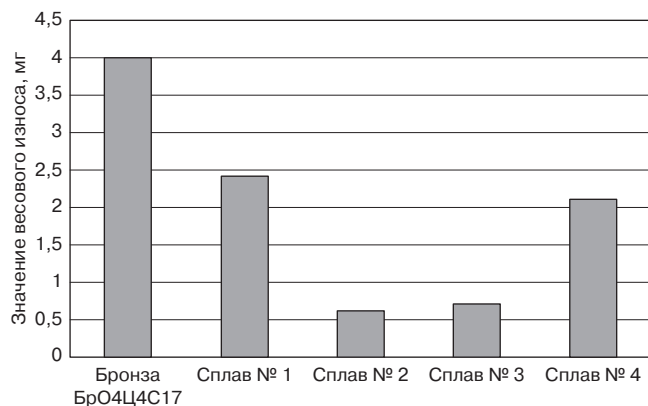


Рис. 3. Гистограммы интенсивностей изнашивания алюминиевых антифрикционных сплавов и бронзы (П. Ю. Перетягин, МГТУ «СТАНКИН»)

Fig. 3. Histograms of the wear rate of aluminum antifriction alloys and bronze (P. Yu. Peretyagin, MSTU «STANKIN»)

4. M. Banjac, A. Vencel, S. Otović «Friction and Wear Processes—Thermodynamic Approach» Tribology in Industry Vol. 36, No. 4 (2014) 341–347 (URL: <http://oaji.net/journal-archive-stats.html?number=664>).
5. H.A. Abdel-Aal: «Thermodynamic modeling of wear», in: Q.J. Wang, Y.-W. Chung (Eds.) Encyclopedia of Tribology, Springer, New York, 2013, pp. 3622–3636 (https://www.researchgate.net/publication/258048885_Thermodynamics_of_Wear).
6. M.D. Bryant: Entropy and dissipative processes of friction and wear, FME Transactions, Vol. 37, No. 2, pp. 55–60, 2009.
7. Nosonovsky, M. Entropy in tribology: In the search for applications. Entropy, 2010, No. 12, pp. 1345–1390.
8. M. Nosonovsky, V. Mortazavi «Friction-Induced Vibrations and Self-Organization: Mechanics and Non-Equilibrium Thermodynamics of Sliding Contact» CRC Press. 2013. 333 p. ((URL: <https://scholar.google.com/citations?user=sxvxBRIAAA&hl=ru>).
9. Гершман И.С., Буше Н.А. Самоорганизация структур в трущихся телах: тезисы докладов Всесоюз. науч.-техн. конф. «Проблемы синергетики». Уфа, 1989. С. 86–87.
10. Гершман И.С., Буше Н.А. Реализация диссипативной самоорганизации поверхностей трения в трибосистемах// Трение и износ. 1995. Т. 16. № 1. С. 61–70.
11. Иванова В.С., Буше Н.А., Гершман И.С. Структурная приспособляемость при трении как процесс самоорганизации// Трение и износ. 1997. Т. 18. № 1. С. 74–79.
12. Gershman J.S., N.A. Bushe N.A. Thin films and self-organization during friction under the current collection conditions. Surface & Coating Technology. 186 (2004), 405–411 (URL: <http://www.sciencedirect.com/science/journal/02578972/186>).
13. Гершман И.С., Буше Н.А. Неустойчивость трибосистем с токосъемом в процессе самоорганизации // Трение и износ. 1999. Т. 20. № 6. С. 623–629.
14. Гершман И.С., Буше Н.А., Берент В.Я. Термодинамические аспекты контактного взаимодействия сильноточечных скользящих контактов. — В кн.: Теоретические и прикладные вопросы контактного взаимодействия. Калинин: Изд-во Калининского государственного университета, 1987. С. 54–63.
15. Гершман И.С., Буше Н.А., Берент В.Я. Термодинамические аспекты существования устойчивых вторичных структур на поверхностях сильноточечных скользящих контактов// Трение и износ. 1989. Т. 10. № 2. С. 225–232.
16. J.S. Gershman, N.A. Bushe, A.E. Mironov «Self-Organizing at Friction and Development of Wearproof Materials» Proceedings of WTC 2005 World Tribology Congress III. September 12–16 2005 Washington D. C. USA, WTC 2005–63889, pp. 137–138.
17. Самоорганизация вторичных структур при трении / И.С. Гершман [и др.] // Трение и износ. 2003. Т. 24. № 3. С. 329–334.
18. N.A. Bushe, J.S. Gershman, A.E. Mironov «Processes of Self-Organizing of Tribosystem at Friction with Current Collection and without Current Collection» Abstracts of Papers from 2nd World Tribology Congress. Sept. 03–07 Vienna 2001. pp. 68–76.
19. I. S. Gershman, N. A. Bushe «Elements of Thermodynamics and Self-Organization during Friction». «Self-Organization During Friction. Advanced Surface Engineered Materials and Systems Designed» Taylor & Francis Group. Boca Raton. London New York. 2006. Ch. 2. pp. 13–58.
20. I. S. Gershman, N. A. Bushe «Compatibility of Tribosystem». «Self-Organization During Friction. Advanced Surface Engineered Materials and Systems Designed» Taylor & Francis Group. Boca Raton. London New York. 2006. Ch. 3. pp. 59–80.
21. I. S. Gershmana, and E. I. Gershman «Catalytic Effect during Friction» Journal of Friction and Wear, 2011, Vol. 32, No. 6, pp. 431–436. Allerton Press, Inc., 2011.
22. Bershadsky, L. I. On self-organizing and concept of tribosystem self-organizing. J. Frict. Wear 1992, 13, pp. 101–114.
23. Бершадский Л. И. Структурная термодинамика трибосистем. Киев: Об-во «Знание» УССР, 1990. 29 с.
24. Бершадский Л. И. Информационная модель необратимых процессов // ДАН УССР. 1978. № 5. С. 416–419.
25. Костецкий Б. И., Носовский М. Г., Бершадский Л. И. Поверхностная прочность материалов при трении. Киев: Техника, 1976. 26 с.
26. B. E. Klamecki «An entropy-based model of plastic deformation energy dissipation in sliding» «Wear» v.96, № 3, 1984, pp. 319–329.
27. B. E. Klamecki «Energy dissipation in sliding» «Wear» v.77, № 3, 1982, pp. 115–128.
28. B. E. Klamecki «Wear—entropy production model» «Wear» v.58, № 2, 1980, pp. 325...330.
29. B. E. Klamecki «A thermodynamic model of friction» «Wear» v.63, № 1, 1980, pp. 113–120.
30. P. Glansdorff and I. Prigogine, Thermodynamic Theory of Structure, Stability and Fluctuations ~Wiley, London, 1971. 306 p. (URL: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/bbpc.19720760520/abstract>).
31. G. S. Fox-Rabinovich, I. S. Gershman, K. Yamamoto, A. Bicsa, S. C. Veldhuis, B. D. Beake, A. I. Kovalev «Self-Organization During Friction in Complex Surface Engineered Tribosystems» Entropy 2010, 12, p. 275–288.
32. Хайнике Г. Трибохимия. М.: Мир, 1987. 584 с.
33. Фиалков А. С. Углеродистые материалы. М.: Энергия, 1979. 320 с.
34. A. E. Mironov, I. S. Gershman, A. V. Ovechkin, and E. I. Gershman. The Interrelation of the Run-In Ability of Bronzes and Aluminum Based Antifriction Alloys with Their Mechanical Properties and Degree of Alloying, Journal of Friction and Wear, 2016, Vol. 37, No. 1, pp. 23–26.
35. Iosif S. Gershman, Alexander E. Mironov, Eugeny I. Gershman, S. Fox-Rabinovich and Stephen C. Veldhuis. Self-Organization during Friction of Slide Bearing Antifriction Materials. Entropy 2015, 17, pp. 7967–7978.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

ГЕРШМАН Иосиф Сергеевич,

д-р техн. наук, главный специалист по инновационным проектам, АО «ВНИИЖТ»

ПЕРЕТЯГИН Павел Юрьевич,

заместитель заведующего лабораторией, МГТУ «СТАНКИН»

МИРОНОВ Александр Евгеньевич,

канд. техн. наук, ведущий специалист, АО «ВНИИЖТ»

ГЕРШМАН Евгений Иосифович,

начальник отдела, АО «ВНИИЖТ»

Статья поступила в редакцию 7.06.2016 г., актуализирована 3.08.2016 г., принята к публикации 25.08.2016 г.

Description of tribosystem processes and development of wear-resistant materials using non-equilibrium thermodynamics and the theory of self-organization

I. S. GERSHMAN¹, P. Yu. PERETYAGIN², A. E. MIRONOV¹, E. I. GERSHMAN¹

¹Joint Stock Company "Railway Research Institute" (JSC "VNIIZhT"), Moscow, 129626, Russia

²Moscow State Technological University "STANKIN" (MSTU "STANKIN"), Moscow, 127055, Russia

Abstract. The work is devoted to the practical application of non-equilibrium thermodynamics and the theory of self-organization in tribology to obtain certain results, especially in the development of new wear-resistant materials. Wear rate decreases with decreasing entropy production. To reduce wear rate it is necessary to initiate and intensify the process of negative entropy production. Such processes are stable after the self-organization and formation of dissipative structures. The possibilities of shifting self-organization to the softer friction conditions are considered. Article gives examples of practical application of these provisions in order to reduce the wear rate. Such processes include the appropriate selection of the composition of the friction bodies, which can increase the probability of self-organization process.

Keywords: friction; wear; self-organization; dissipative structures

DOI: <http://dx.doi.org/10.21780/2223-9731-2016-75-5-271-277>

REFERENCES

1. Juan Ruben Gomez-Solano, Christoph July, Jakob Mehl and Clemens Bechinger. *Non-equilibrium work distribution for interacting colloidal particles under friction*, New J. Phys., no. 17, 2015, 045026, pp. 1 – 13.
2. Bryant M. D., Khonsari M. M., Ling F. F. *On the thermodynamics of degradation*, Proc. R. Soc. A, 2008, no. 464, pp. 2001 – 2014.
3. Amiri M. and Michael M. Khonsari. *On the Thermodynamics of Friction and Wear—A Review*, Entropy, 2010, no. 12, pp. 1021 – 1049.
4. Banjac M., Vencel A., Otović S. *Friction and Wear Processes — Thermodynamic Approach*, Tribology in Industry, Vol. 36, no. 4, 2014, pp. 341 – 347.
5. Abdel-Aal H. A.: *Thermodynamic modeling of wear*, Q. J. Wang, Y.-W. Chung (Eds.), *Encyclopedia of Tribology*, Springer, New York, 2013, pp. 3622 – 3636.
6. Bryant M. D.: *Entropy and dissipative processes of friction and wear*, FME Transactions, 2009, Vol. 37, no. 2, pp. 55 – 60.
7. Nosonovsky M. *Entropy in tribology: In the search for applications*, Entropy, 2010, no. 12, pp. 1345 – 1390.
8. Nosonovsky M., Mortazavi V. *Friction-Induced Vibrations and Self-Organization: Mechanics and Non-Equilibrium Thermodynamics of Sliding Contact*. CRC Press Publ., 2013, 333 p.
9. Gershman I. S., Bushe N. A. *Samoorganizatsiya struktur v trushchikhsya telakh* [Self-organizing structures in the friction bodies], Tezisy dokladov Vses. Nauchno-tekhn. Konf. Problemy sinergetiki [Abstracts of the All-Union Scientific-Technical Conference "Problems of synergy"]. Ufa, 1989, pp. 86 – 87.
10. Gershman I. S., Bushe N. A. *Realizatsiya dissipativnoy samoorganizatsii poverkhnostey treniya v tribosistemakh* [Implementation of dissipative self-organization of the friction surfaces in hydraulic systems]. Trenie i iznos [Friction and wear], 1995, Vol. 16, no. 1, pp. 61 – 70.
11. Ivanova V. S., Bushe N. A., Gershman I. S. *Strukturnaya prispособlivaemost' pri trenii kak protsess samoorganizatsii* [Structural adaptability at friction as the self-organization process]. Trenie i iznos [Friction and wear], 1997, Vol. 18, no. 1, pp. 74 – 79.
12. Gershman J. S., N. A. Bushe N. A. *Thin films and self-organization during friction under the current collection conditions*. Surface & Coating Technology, no. 186, 2004, pp. 405 – 411.
13. Gershman I. S., Bushe N. A. *Neustoychivost' tribosistemy s tokos'emom v protsesse samoorganizatsii* [Instability of tribosystem with the current collection in the process of self-organization]. Trenie i iznos [Friction and wear], 1999, Vol. 20, no. 6, pp. 623 – 629.
14. Gershman I. S., Bushe N. A., Berent V. Ya. *Termodinamicheskie aspekty kontaktnogo vzaimodeystviya sil'notochnykh skol'zyashchikh kontaktov* [Thermodynamic aspects of contact interaction of high-current sliding contacts], "Teoreticheskie i prikladnye voprosy kontaktnogo vzaimodeystviya" ["Theoretical and applied problems of contact interaction"]. Kalinin, Kalininskoy State University Publ., 1987, pp. 54 – 63.
15. Gershman I. S., Bushe N. A., Berent V. Ya. *Termodinamicheskie aspekty sushchestvovaniya ustoychivyykh vtorichnykh struktur na poverkhnostyakh sil'notochnykh skol'zyashchikh kontaktov* [Thermodynamic aspects of the existence of stable secondary structures on the surfaces of high-current sliding contacts]. Trenie i iznos [Friction and wear], 1989, Vol. 10, no. 2, pp. 225 – 232.
16. Gershman J. S., Bushe N. A., Mironov A. E. *Self-Organizing at Friction and Development of Wearproof Materials*. Proceedings of WTC 2005 World Tribology Congress III. September 12 – 16 2005 Washington D. C. USA, WTC 2005 – 63889, pp. 137 – 138.
17. Gershman I. S., Bushe N. A., Mironov A. E., Nikiforov V. A. *Samoorganizatsiya vtorichnykh struktur pri trenii* [Self-organization of secondary structures in friction]. Trenie i iznos [Friction and wear], 2003, Vol. 24, no. 3, pp. 323 – 334.
18. Bushe N. A., Gershman J. S., Mironov A. E. *Processes of Self-Organizing of Tribosystem at Friction with Current Collection and without Current Collection*. Abstracts from 2nd World Tribology Congress, on 3 – 7 September. Vienna, 2001, pp. 68 – 76.
19. Gershman I. S., Bushe N. A. *Elements of Thermodynamics and Self-Organization during Friction. Self-Organization During Friction. Advanced Surface Engineered Materials and Systems Designed*. Taylor & Francis Group, Boca Raton, London, New York, 2006, Ch. 2, pp. 13 – 58.
20. Gershman I. S., Bushe N. A. *Compatibility of Tribosystem. Self-Organization During Friction. Advanced Surface Engineered Materials and Systems Designed*, Taylor & Francis Group, Boca Raton, London, New York, 2006, Ch. 3, pp. 59 – 80.
21. Gershman I. S., Gershman E. I. *Catalytic Effect during Friction*. Journal of Friction and Wear, 2011, Vol. 32, no. 6, pp. 431 – 436.
22. Bershadsky L. I. *On self-organizing and concept of tribosystem self-organizing*. J. Frict. Wear, 1992, no. 13, pp. 101 – 114.
23. Bershadskiy L. I. *Strukturnaya termodinamika tribosistem* [Structural thermodynamics of tribosystems]. Kyiv, Obschestvo "Znanie" [Society "Knowledge"] Publ., UkrSSR, 1990, 29p.
24. Bershadskiy L. I. *Informatsionnaya model' neobratimyykh protsessov* [Information model of irreversible processes]. Kyiv, DAN UkrSSR Publ., 1978, no. 5, pp. 416 – 419.
25. Kostetskiy B. I., Nosovskiy M. G., Bershadskiy L. I. *Poverkhnostnaya prochnost' materialov pri trenii* [The surface strength of materials during friction]. Kyiv, Tekhnika Publ., 1976, 26 p.
26. Klamecki B. E.. *An entropy-based model of plastic deformation energy dissipation in sliding*. Wear. Vol. 96, no. 3, 1984, pp. 319 – 329.

■ E-mail: isgershman@gmail.com (I. S. Gershman)

27. Klamecki B.E. *Energy dissipation in sliding*. Wear. Vol. 77, no. 3, 1982, pp. 115–128.
28. Klamecki B.E. *Wear—entropy production model*. Wear. Vol. 58, no. 2, 1980, pp. 325–330.
29. Klamecki B.E. *A thermodynamic model of friction*. Wear. Vol. 63, no. 1, 1980, pp. 113–120.
30. Glansdorff P. and Prigogine I. *Thermodynamic Theory of Structure, Stability, and Fluctuations*. Wiley Publ., London, 1971. 306 p.
31. Fox-Rabinovich G.S., Gershman I.S., Yamamoto K., Bicsa A., Veldhuis S.C., Beake B.D., Kovalev A.I. *Self-Organization During Friction in Complex Surface Engineered Tribosystems*, Entropy, 2010, no. 12, pp. 275–288.
32. Khaynik G. *Tribokhimiya* [Tribology-chemistry]. Moscow, Mir Publ., 1987, 584 p.
33. Fialkov A.S. *Uglegrafitovye materialy* [Carbon and graphite materials]. Moscow, Energiya Publ., 1979, 320 p.
34. Mironov A.E., Gershman I.S., Ovechkin A.V., Gershman E.I. *The Interrelation of the Run-In Ability of Bronzes and Aluminum Based Antifriction Alloys with Their Mechanical Properties and Degree of Alloying*. Journal of Friction and Wear, 2016, Vol. 37, no. 1, pp. 23–26.

35. Gershman I.S., Mironov A.E., Gershman E.I., Fox-Rabinovich S. and Veldhuis S.C. *Self-Organization during Friction of Slide Bearing Antifriction Material*. Entropy, 2015, no. 17, pp. 7967–7978.

ABOUT THE AUTHORS

GERSHMAN Iosif Sergeevich,
Dr. Sci.(Eng.), Chief Expert on innovation projects, JSC “VNIIZhT”

PERETYAGIN Pavel Yur’evich,
Head of Laboratory, MSTU “STANKIN”

MIRONOV Aleksander Evgen’evich,
Cand. Sci.(Eng.), Leading Engineer, JSC “VNIIZhT”

GERSHMAN Evgeniy Iosifovich,
Head of the Department of R&D programs, grants and projects, JSC “VNIIZhT”

Received 07.06.2016

Revised 03.08.2016

Accepted 25.08.2016

ВЫШЛИ В СВЕТ ТРУДЫ ВНИИЖТ

Косарев А.Б., Косарев Б.И., Сербиненко Д.В. Электромагнитные процессы в системах энергоснабжения железных дорог переменного тока. М.: ВМГ-Принт, 2015. 349 с.

Изложены методы анализа электромагнитных процессов в современных системах тягового электроснабжения и их влияние на электроустановки и электрические сети магистральных железных дорог. Обоснованы методы расчета нестационарных, в том числе и грозовых, режимов в сложных и неоднородных нелинейных цепях с переменной структурой, при представлении элементов цепи в виде линий с распределенными параметрами, носящими вероятностный характер. С привлечением методов линейной алгебры

Повышение эффективности устройства и содержания железнодорожного пути: сборник трудов ВНИИЖТ / под ред. А. Ю. Абдурашитова. М.: ВМГ-Принт, 2014. 125 с.

Приведены результаты теоретических и экспериментальных исследований с применением методов математического моделирования по выбору оптимального профиля рельсов из условий минимизации уровня воздействия от колес подвижного состава. Рассмотрены основные показатели безотказности технических средств стрелочного хозяйства с учетом внедрения системы управления ресурсами и рисками (УПРАН). Изложены результаты разработки новой конструкции железобетонной шпалы, предназначенной для различных эксплуатационных условий, включая тяжеловесное и высокоскоростное движение. Предложены конструкции охранных приспособлений для безбалластного мостового полотна. Приво-

и теории многополюсников рассмотрены матричные методы анализа энергетических соотношений в современных системах тягового электроснабжения при учете несинусоидального характера токов электровозов. Основные технические решения по обеспечению электромагнитной совместимости систем тягового электроснабжения защищены авторскими свидетельствами и патентами на полезную модель.

Предназначена для научных работников, аспирантов. Может быть полезна инженерам-электрикам, а также студентам электротехнических специальностей высших транспортных учебных заведений.

дятся основные положения методики выбора оптимальных технических решений по стабилизации и усилению оседающих насыпей на мерзлоте в условиях БАМа.

Рассмотрены вопросы определения зависимости сопротивления конструкции креплений внешнему воздействию от их фактического состояния. Представленные в сборнике работы направлены на повышение надежности функционирования конструкции железнодорожного пути в различных эксплуатационных условиях, могут быть полезны инженерно-техническим работникам железнодорожного транспорта, преподавателям и студентам транспортных вузов.

По вопросам предварительного заказа на приобретение книг обращайтесь в редакционно-издательский отдел АО «ВНИИЖТ», тел. (499) 260-43-20.