Список литературы

1. *Smolyakov V.K.* Comb. Explosive Shock Waves 41. — 2001. — P. 319.
2. *Leitsin V.N., Dmitrieva M.A.* Chemistry in interests of steady development 13. — 2005. — P. 271.
3. *Abylkalykova R.B., Kveglis K.I. et al.* Solid-Phase Synthesis and Martensite Transformations in Thin Films and Bulk Materials Ni-Ti Systems. — Almaty, 2007. — P. 193.
4. *Hirsh P., Khovi A. et al.* Electron microscopy of thin crystals. — M.: Mir, 1968. — 562 p.
5. *Pearson W.B.* The crystal chemistry and physics of metals and alloys. — New York: Wiley Interscience Inc., 1972. — 870 p.
6. *Bolotov I.E., Kolosov V.Yu.* Phys. Status Solidi A 69. — 1982. — P. 85.
7. *Kolosov V.Yu.* Proc. XII ICEM, Seattle, San Francisco Press. — 1990. — Vol. 1. — P. 574.
8. *Gouldstein Dzh., Jakovic H.* Practical scanning electron microscopy. — M.: Mir, 1978. — 656 p.
9. *Greil E.M.* Research NiAl and M_3A1 // Mechanical properties of metallic compounds. — M.: Metallurgiya, 1982. — P. 256–299.
10. *Pearson W.B.* The crystal chemistry and physics of metals and alloys. — New York: Wiley Interscience Inc., 1972. — P. 870.
11. *Rozhanskii V.N., Berezhkova G.V.* // Phys. Stat. Sol. — Vol. 6. — 1964. — P. 185.
12. *Brown W.F.* Relaxational Behavior of Fine Magnetic Particles // J. Appl. Phys. — 1959. — Vol. 30. — № 4. — P. 130–132.
13. *Kolosov V.Yu. Tholen A.R.* Transmission electron microscopy studies of the specific structure of crystals formed by phase transition in iron oxide amorphous films // Acta Materialia. — 2000. — Vol. 48. — P. 1829.
14. *Maloney C., Lemaitre A.* Universal Breakdown of Elastisity at the onset of Material Failure // Phys. Rev. Lett. — 2004. — Vol. 93. — № 19. — P. 195501(1–4).
15. *Langer J.S., Lemaitre A.* Arhiv: cond-mat.0411038v11998, 2004.
16. *Jonn J.* Gilman Mechanochemistry. — M.: Nauka, 1996. — Vol. 274. — P. 65.

УДК 538.95.405

Условия самоорганизации трибологических систем

Self-organizing conditions of tribological systems

Юров В.М.

Карагандинский государственный университет им. Е.А.Букетова (E-mail: exciton@list.ru)

Үйкелу процесінде термодинамикалық моделін қолданып, өздік ұйымдастыру шарты қарастырылды. Термодинамикамен, ақпарат теориясымен байланысы зерттелді. Үйкелу жүйелерінің өздік ұйымдастыру деңгейін арттыру әдістері ұсынылды. Жүйе ұйымдастыру деңгейінің үйкелісі беттік тартылыспен байланыстылығы көрсетілді. Металдың бетіне түсірілген қабықша қалыңдығын оңтайландыру жолдары келтірілді.

On the basis of thermodynamic model the problem of self-organizing metal systems during friction is presented. The question on connection of thermodynamics with the theory of the information is considered. Methods of increase of a level of the organization of systems with friction are offered. It is shown, that the level of the organization of system with friction is essentially dealt with its superficial tension. Questions of optimization of thickness of a film rendered on metal surfaces are considered.

Введение

Как отмечается в работе [1], существует традиционное мнение, что трение является разрушительным процессом, направленным на необратимое диспергирование поверхностного слоя материала трущихся тел. Согласно термодинамике Клаузиуса должен наблюдаться рост энтропии, т.е. рост необратимого беспорядка в замкнутой системе, которой по мнению многих авторов и является изнашиваемая пара трения. Если считать, что пара трения обменивается веществом и энергией с окружающей средой, т.е. является термодинамически открытой системой, то и представления об этом объекте могут быть иными.

Репозиторий КарГУ

Известно также, что в открытых системах неживой природы, которые постоянно получают из внешней среды отрицательную энтропию и вещество, также могут возникать стационарные неравновесные состояния с высокой степенью упорядоченности [2].

Рассмотрим некоторые аспекты самоорганизации трибологических систем. В настоящее время этот вопрос находится, пожалуй, в стадии постановки [1].

Уровень организованности системы

В 1968 г. Е.А.Александровым и В.П.Боголеповым [3] был предложен метод оценки уровня организованности системы на основе критерия Ферстера, представляющего собой меру избыточности по К.Шеннону:

$$R = \frac{S_{\max} - S_t}{S_{\max}} = 1 - \frac{S_t}{S_{\max}}, \quad (1)$$

где $S_{\max}$ — максимальное значение энтропии системы; S_t — текущее значение величины энтропии в каждый данный момент времени t.

Этот критерий характеризует относительную организованность системы; уровень ее абсолютной организованности в каждый данный момент времени оценивается величиной структурной информации I_t, характеризующей систему.

Не рассматривая детально указанного подхода, приведем лишь основные выводы, которые были сделаны авторами.

1) Для любой замкнутой системы

$$\frac{dS_t}{dt} = -S_{\max}\frac{dR}{dt}. \quad (2)$$

Это выражение есть формализованная запись фундаментального положения о двойственности любых организационных процессов. Они всегда внутренне противоречивы: наряду с процессами упорядочения, повышения внутренней организованности системы всегда действует прямо противоположная тенденция — нарастания дезорганизованности, неупорядоченности системы.

2) Для любой системы справедливо соотношение

$$I_t = S_{\max} \cdot R, \quad (3)$$

то есть в каждый данный момент времени информация в системе пропорциональна величине максимальной энтропии и уровню ее организованности.

3) Для двух зависимых систем, находящихся в состояниях α и β (α — 1,2,3.... m; β = 1,2,3,....n), в каждый данный момент времени уровень абсолютной организованности определяется соотношением

$$I_{\alpha\beta t} \geq I_{\alpha t} + I_{\beta t}. \quad (4)$$

Равенство в уравнении (4) возможно только в том случае, когда системы независимы.

Отсюда следует основное свойство организованных систем: абсолютная организованность системы как целого всегда больше алгебраической суммы абсолютных организованностей составляющих ее частей; информация об объединенной системе больше суммарной информации об обеих системах, рассматриваемых как независимые.

Из всего сказанного вытекают следующие выводы.

Выражение (4) означает, что при объединении двух независимых систем α и β в объединенной системе появляется некоторое дополнительное количество структурной информации, равное

$$\Delta I_{\alpha\beta} = I_{\alpha\beta} - (I_\alpha - I_\beta) \quad \text{или} \quad \Delta I_{\alpha\beta} = (S_\alpha - S_\beta) - S_{\alpha\beta}. \quad (5)$$

Наличие тесной связи между термодинамическими и информационными характеристиками систем позволило сделать вывод, что введение информации в систему приводит к повышению ее внутренней энергии, что соответствует совершению внешней работы над нею [3].

Следовательно, появление дополнительной информации в объединенной системе может означать только то, что над обеими системами была произведена внешняя работа, которая и привела к их соединению. Эта работа определяется из выражения

$$A = \Theta \Delta I_{\alpha\beta}, \quad (6)$$

где Θ — статистическая температура; k — постоянная Больцмана; T — температура, выраженная в градусах по шкале Кельвина.

Таким образом, в результате притока информации произошел рост внутренней энергии системы. Из обобщения этого уравнения на любое количество объединяющихся систем и любые организаци-

Репозиторий КарГУ

онные процессы следует вывод: любые организационные процессы в системах, приводящие к повышению уровня их организованности, могут происходить только за счет притока энергии или информации извне и без такового вообще происходить не могут.

Рассмотрим более детально этот момент.

Сущность любой системы — наличие обменных процессов между ее частями и элементами, т.е. наличие связей. По оценкам В.М.Глушкова [4], количество связей пропорционально квадрату числа элементов системы:

$$s = \vartheta n^2, \tag{7}$$

где n — количество элементов; s — число связей между ними; ϑ — коэффициент пропорциональности, зависящий от структуры системы. Если элементы системы связаны по типу «каждый с каждым и с самим собой», то $\vartheta = 1$. При другом типе связей величина коэффициента будет иной.

Таким образом, мы принимаем, что развитие любой системы определяется двумя параметрами: числом элементов системы n, которое может меняться от 0 до максимально возможной для данной системы величины, и коэффициентом ϑ.

Если считать, что каждая связь может находиться в двух равновероятных состояниях (например, есть она или нет), то общее количество состояний системы (ее разнообразие) будет равно

$$R = 2^s = 2^{\vartheta n^2}. \tag{8}$$

Исходя из этого энтропия системы составит:

$$S = k \ln(2^{\vartheta n^2}) = \vartheta n^2 \cdot k \ln 2, \tag{9}$$

где k — постоянная Больцмана. Произведение $k \ln 2$ есть энергетический эквивалент одной единицы информации.

Таким образом, количество структурной информации, которое содержит данная система при данных посылках, а следовательно, внутренняя энергия системы, пропорционально квадрату числа элементов и при $\vartheta = 1$ составляет одну единицу на одну связь (считая каждый элемент особой связью «с самим собой). Соответственно, энергия связей составляет:

$$S_s = \vartheta n(n-1) \cdot k \ln 2. \tag{10}$$

Это есть потенциальная энергия связей системы. Именно она определяет структурную устойчивость системы: система устойчива при условии минимума потенциальной энергии. Следовательно, устойчивость системы определяется не простым количеством связей между элементами, а оптимальным числом связей и их конфигурацией.

Энергия внешних источников, которая в форме работы поступает в систему и приводит к преобразованию или созданию ее структуры, составляет величину

$$A = T \vartheta n^2 \cdot k \ln 2 = \Theta \vartheta n^2 \ln 2, \tag{11}$$

где T — температура, $\Theta = kT$ — статистическая температура.

Знак равенства соответствует равновесному протеканию процесса. Но поскольку в реальных системах процессы отличаются от равновесных, имеем строгое неравенство.

Таким образом, выражение (11) показывает наличие квадратичной зависимости энергетических затрат на перестройку структуры системы от числа составляющих ее элементов. Из этого следует: ни одна система не может усложняться до бесконечности, поскольку это потребовало бы внешних источников энергии бесконечно большой мощности. Следовательно, любая система (в том числе и трибологическая) может удержать лишь ограниченное число элементов, количество свободной энергии и информации.

Энтропия элементарных возбуждений

Здесь мы модифицируем термодинамический подход, предложенный нами в работах [5, 6], применительно к задачам нашего исследования. Дефекты (элементарные возбуждения) в поверхностном слое (дислокации, поры и т.д.) будем рассматривать как систему невзаимодействующих частиц, погруженную в термостат. Квантовые переходы, обусловленные взаимодействием дефектов с термостатом, будут диссипативными (с вероятностью P), в отличие от взаимодействия с внешним полем (с вероятностью F). Диссипативные процессы приводят к тому, что вторичное поле (отклик системы) всегда меньше первичного, вызывающего образование дефектов.

Репозиторий КарГУ

Поскольку подсистема дефектов обменивается с термостатом только энергией, то соответствующий им ансамбль частиц будет каноническим. В этом случае выражение для статистической энтропии имеет вид

$$S = -k\sum_i f_i \ln f_i, \tag{12}$$

где f_i — функция распределения; k — постоянная Больцмана.

Дифференцируя (1) по времени и преобразуя, получим:

$$\frac{dS}{dt} = \frac{k}{2}\sum_{i,j}\left(lhf_i - \ln f_j\right)\left(P_{ij}f_i - P_{ji}f_j\right), \tag{13}$$

где P_{ij} — вероятность перехода из начального i (с энергией E_i) в возбужденное состояние j (с энергией E_j).

Решение уравнения (13) имеет вид [5, 6]:

$$P = \frac{2\Delta S}{k\tau}\exp\left\{-\frac{E_m - G^0/N}{kT}\right\}, \tag{14}$$

где ΔS — изменение энтропии в диссипативном процессе; E_m — среднее значение энергии основного состояния дефектов; τ — время релаксации.

Большинство диссипативных процессов в природе описывается уравнением Аррениуса:

$$P = \nu\exp(-E_a / kT), \tag{15}$$

где E_a — энергия активации; ν — частотный фактор.

Сравнивая это выражение с (14), находим:

$$\Delta S = \frac{\nu k\tau}{2}\exp\left(-\frac{E_m + E_a - G^0/N}{kT}\right). \tag{16}$$

Частотный фактор в большинстве практически важных случаев $\nu = 1/\tau$ и выражение (16) перепишется в виде

$$\frac{2\Delta S}{k} = \exp\left\{-\frac{E_m + E_a - G^0/N}{kT}\right\}. \tag{17}$$

Пренебрегая малыми членами после разложения экспоненты, получим:

$$\frac{2\Delta S}{k} = \alpha\frac{G^0}{NkT} \quad \text{или} \quad \Delta S = \alpha\frac{G^0}{2NT}, \tag{18}$$

где $\alpha = \exp\left[-(E_m+E_a)/kT\right] \sim 1$.

Изменение энтропии объекта обратно пропорционально количеству ΔI информации о нем, т.е.

$$\Delta S = \frac{k\ln 2}{\Delta I}, \tag{19}$$

где $k \ln 2$ — энергетический эквивалент информации.

С другой стороны, информацию о трибологических свойствах объекта несет его коэффициент трения f, т.е.

$$\Delta I = f. \tag{20}$$

С учетом уравнений (1), (3) и (18) — (20) для уровня организованности трибологической системы можно записать:

$$R = 1 - \frac{2\ln 2 \cdot f \cdot N \cdot kT}{\mu}. \tag{21}$$

В случае чистых металлов потенциал Гиббса G^0 совпадает с химическим потенциалом μ.

Из уравнения (21) видно, что уровень организованности трибологической системы можно повысить ($R \to 1$) за счет уменьшения числа контактов N (шероховатости). На практике это достигается путем шлифования, полирования. Как правило, эта процедура требует больших затрат, что приводит к большой стоимости пар трения. Следующим параметром, существенно влияющим на трибологическую систему, является коэффициент трения f. Его уменьшение достигается за счет различного рода смазок. Последние, однако, стабильны в узком интервале температур и давлений, а в условиях вакуума вообще не применимы.

Репозиторий КарГУ

Силу трения скольжения в случае молекулярного механизма можно представить в виде

$$F_{тр} = \int_L \sigma dl \approx \sigma L, \tag{22}$$

где σ — поверхностное натяжение твердого тела; L — длина пройденного при скольжении пути.

Для единичных значений нормальной нагрузки и длины пройденного пути величины поверхностного натяжения и коэффициента трения совпадают в системе СИ.

Таким образом, уровень организованности трибологической системы можно изменять за счет изменения ее поверхностных свойств. В настоящее время основной метод модификации поверхности пар трения, работающих в условиях вакуума, — это нанесение тонкопленочных покрытий.

Эффект пленки, особенно тонких трибопленочных структур, изучен достаточно слабо, но в условиях трения очень наглядно проявляются такие ее свойства, как эффект саморегулирования энтропии (толщины, состава и свойств анизотропии), обусловливающий динамическое равновесие в системе при соблюдении принципа наименьшего действия [7].

Экспериментальное определение поверхностного натяжения твердых тел затруднено тем, что их молекулы (атомы) лишены возможности свободно перемещаться. Исключение составляет пластическое течение металлов при температурах, близких к точке плавления, — метод «нулевой ползучести» [8].

В методе «нулевой ползучести» образец (длинная нить, фольга) нагревают до достаточно высокой температуры, так что он начинает сокращаться по длине под действием поверхностных напряжений. К образцу прикладывается внешняя сила, поддерживающая неизменной форму образца. По величине этой силы определяют величину поверхностного натяжения.

В работе [9] и ряде других нами получена формула, которая описывает зависимость физического свойства твердого тела от его размера:

$$A(r) = A_0 \cdot \left(1 - \frac{d}{r}\right). \tag{23}$$

Здесь A_0 — физическое свойство массивного образца; $A(r)$ — физическое свойство малой частицы или тонкой пленки; d — критический радиус, или критическая толщина пленки, начиная с которого проявляются размерные эффекты. Для критического радиуса нами получена формула

$$d = \frac{2\sigma\upsilon}{RT}. \tag{24}$$

Здесь σ — поверхностное натяжение массивного образца; υ — молярный объем; R — газовая постоянная; T — температура.

Из формулы (24) получается линейная зависимость поверхностного натяжения от температуры плавления металла:

$$\sigma = \alpha T_{пл}. \tag{25}$$

В рамках нашей теории коэффициент $\alpha \approx 10^{-3}$ Дж·м$^{-2}$·К$^{-1}$ для всех металлов. Результаты расчета для некоторых металлов представлены в таблице 1.

Таблица 1

Температура плавления и поверхностное натяжение некоторых металлов

Металл	$T_{пл.}$, К	σ, Дж/м^2	Металл	$T_{пл.}$, К	σ, Дж/м^2
Ag	1234	1,23 (1,14 ± 0,09)	Cu	1356,2	1,36 (1,75 ± 0,09)
Al	933,4	0,93 (0,91 ± 0,2	Pt	2042,2	2,04 (2,3 ± 0,8)
Au	1336,2	1,34 (1,37 ± 0,15)	W	3653	3,65 (3,9 ± 0,3)

В скобках даны значения σ, полученные экспериментально методом «нулевой ползучести». В целом наблюдается неплохое согласие нашей теории с экспериментальными данными.

Таким образом, оценку поверхностного натяжения металлов можно сделать по их температуре плавления и коэффициенту $\alpha \approx 10^{-3}$ Дж·м$^{-2}$·K^{-1} по формуле (25).

Репозиторий КарГУ

В 1949 г. Р.Толмен [10] вывел уравнение для поверхностного натяжения σ:

$$\sigma / \sigma_{\infty} = (1 + 2\delta / R_s)^{-1}. \quad (26)$$

Здесь σ_{∞} — поверхностное натяжение для плоской поверхности; R_s — радиус поверхности натяжения; $\delta > 0$ — расстояние между эквимолекулярной разделяющей поверхностью и поверхностью натяжения для плоской границы.

Порядок величины параметра δ, называемого толменовской длиной, или постоянной Толмена, должен быть сравним с эффективным молекулярным диаметром *a*. При R >> δ формула Толмена может быть переписана в виде

$$\sigma / \sigma_{\infty} = 1 - 2\delta / R. \quad (27)$$

Таким образом, подход Толмена сводится к учету поправки на кривизну поверхности к макроскопическому значению поверхностного натяжения σ_{∞}.

Для малых *R* А.И.Русанов [11] получил асимптотическую линейную зависимость

$$\sigma = KR. \quad (28)$$

Здесь *K* — коэффициент пропорциональности. Формула (28) получена на основе термодинамического рассмотрения и должна быть применима к малым объектам различной природы. Однако границы применимости формулы (28) и значения параметра *K* остаются до сих пор практически не исследованными.

В рамках нашей модели (формулы 23 и 24) для *K* нетрудно получить

$$K = \frac{RT}{2\vartheta} \cdot \left(1 + \frac{A(r)}{A_0}\right). \quad (29)$$

Критерий применимости формулы А.И.Русанова выразится в виде (табл. 2)

$$r_k \geq d = \frac{2\sigma\vartheta}{RT}. \quad (30)$$

Таблица 2

Критерий применимости линейной формулы А.И.Русанова

Металл	r_k, нм	Металл	r_k, нм
Свинец	0,9	Серебро	1,1
Олово	0,8	Золото	1,1
Железо	1,2	Медь	1,0

Из таблицы 2 видно, что для всех металлов r_k имеет величину около 1 нм. Удивительно, но такой же порядок имеет критический размер r_k зародыша при гомогенном образовании кристаллов. Отметим также, что постоянная Толмена в нашей модели равна $\delta = r_k/2 \approx 0{,}5$ нм.

Если воспользоваться методом аналогии, можно получить формулу типа (23)

$$\sigma(r) = \sigma_0 \left(1 - \frac{r_k}{r}\right). \quad (31)$$

Используя формулу (30), можно вычислить r_k. Затем, используя данные таблицы (1) и формулу (31), мы вычисляем значение поверхностного натяжения нанопленок размером 2 и 10 нм. Результаты вычислений для некоторых металлов при $T = 300$ К представлены в таблице 3.

Таблица 3

Поверхностное натяжение нанопленок некоторых металлов

Металл	*T*, *K*	σ(r), r =2 нм Дж/м^2	σ(r), r =10 нм Дж/м^2
Серебро	300	0,155	0,257
Золото	300	0,198	0,304
Медь	300	0,180	0,396

Из таблиц 1 и 3 видно, что поверхностное натяжение нанопленок металлов почти на порядок меньше, чем массивных образцов. Во столько же раз уменьшится и коэффициент «сухого» трения. Однако уже при размере пленки больше 10 нм величина поверхностного натяжения приближается

Репозиторий КарГУ

к величине поверхностного натяжения массивного образца (сравнение таблиц 1 и 3 следует проводить с учетом температурного коэффициента по формуле (25), где $T = T_{пл}$).

При значении $r < r_k$ поверхностное натяжение становится отрицательной величиной и свойства пленки должны существенно изменяться в сторону увеличения коэффициента трения и уменьшения уровня организации трибосистем.

Существование оптимума толщины пленки при трении доказано многими исследователями.

По мнению Боудена и Тейбора [12], при трении стального ползуна по пленке индия разной толщины оказывается, что имеется оптимальная толщина с точки зрения энергетических потерь. Как трактуют сами авторы, нагрузка передается через такую пленку и предохраняет трущиеся поверхности от непосредственного контакта. Срез происходит в мягком металле. При уменьшении толщины пленки до 0,1 мкм сила трения убывает, а затем начинает возрастать. При толщине 0,01 мкм, как указывают авторы, пленка перестает быть эффективной (рис. 1). При механохимическом изнашивании оптимум толщины пленки достигается благодаря наличию двух противоположных нелинейных процессов. При толщине пленки меньше оптимального значения наблюдается ее ускоренный рост благодаря высокой активности подложки и малому сопротивлению диффузии. При большой толщине пленка механически и физически экранирует доставку активных компонентов к месту реакции. Кроме того, толстые пленки являются механически нестабильными вследствие комплекса несоответствий (температурных коэффициентов, периодов кристаллических решеток и т.д.) с основным материалом. При механическом воздействии они разрушаются.

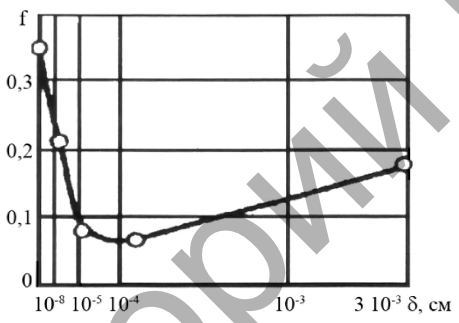

Рис. 1. Зависимость коэффициента трения от толщины тонкой пленки индия, нанесенной на инструментальную сталь [12]

На основании изложенного выше мы можем сформулировать следующее условие повышения уровня организации трибологических систем:

– необходимо уменьшать поверхностное натяжение трибосопряжения за счет нанесения на ее поверхность пленок оптимального размера, определяемого формулой (30).

Использование этой формулы основано на возможности определения поверхностного натяжения твердых тел и осаждаемых покрытий, предложенных нами недавно [13–16].

Организованность трибологических систем и теория катастроф

Источниками теории катастроф являются теория особенностей гладких отображений Уитни и теория бифуркаций динамических систем Пуанкаре и Андронова [17].

Теория особенностей — это обобщение исследований функций на максимум и минимум. В теории Уитни функции заменены отображениями, т.е. наборами нескольких функций нескольких переменных.

Слово «бифуркация» означает раздвоение и употребляется в широком смысле для обозначения всевозможных качественных перестроек различных объектов при изменении параметров, от которых они зависят.

Катастрофами называются скачкообразные изменения в виде внезапного ответа системы на плавное изменение внешних условий.

Теория катастроф может быть использована в технических задачах для математического моделирования процессов, в которых могут наблюдаться катастрофы. Разрушение трибологических систем при трении также представляет собой катастрофу.

Репозиторий КарГУ

Для математического моделирования возможно рассмотрение следующих объектов:

1) цель функционирования;

2) одна или две координаты процесса функционирования;

3) один или несколько управляющих параметров, изменяя которые, мы управляем ходом процесса.

В нашем рассмотрении цель функционирования — разрушение трибологической системы, а координатой процесса разрушения возьмем скорость диссипации свободной энергии F, обусловленной образованием кластера из $N >> 1$ числа контактов (см. формулу 21). В качестве управляющих параметров возьмем плотность контактов ρ (шероховатость) и поверхностное натяжение σ.

Для одной координаты $\dot{F}$ и двух управляющих параметров в теории катастроф имеется только одна стандартная, каноническая зависимость для записи зависимости функции цели

$$\dot{F}(N) = 0,25N^4 - 0,5\rho N^2 - \sigma N, \tag{32}$$

где $F(N)$ — потенциальная функция, которая является энергией образования N контактов. Катастрофа, имеющая такую потенциальную функцию, называется катастрофой типа «сборки» [17]. Сборка имеет в докритичной области одно устойчивое состояние равновесия (одну ямку потенциальной функции), а в закритичной — два устойчивых и одно неустойчивое состояния равновесия (т.е. две ямки, разделенные холмом).

Докритичная и закритичная области задаются следующим набором параметров:

$$\rho < 0, -\infty > \sigma > \infty,$$

$$\rho > 0,\ |\sigma| > \frac{2\rho}{3}\sqrt{\frac{\rho}{3}}, \qquad \rho > 0,\ |\sigma| < \frac{2\rho}{3}\sqrt{\frac{\rho}{3}}. \tag{33}$$

докритичная область закритичная область

Уравнение (32) задает статическую модель разрушения трибологической системы. Для получения динамической модели будем считать пару трения градиентной системой. Это означает, что потенциальная функция $\dot{F}(N)$ стремится к экстремуму. Градиент функции $\dot{F}(N)$ равен

$$\operatorname{grad}\dot{F}(N) = \frac{\partial \dot{F}(N)}{\partial N} = N^3 - \rho N + \sigma. \tag{34}$$

Далее, в первом приближении, будем считать, что скорость увеличения свободной энергии пропорциональна скорости роста количества контактов. Тогда можно записать, что

$$\beta\frac{d^2F}{dt^2} = \frac{\partial \dot{F}(N)}{\partial N} = N^3 - \rho N + \sigma, \tag{35}$$

где β — коэффициент пропорциональности, d^2F/dt^2 — вторая производная свободной энергии.

В механике такое уравнение характерно для движения в среде вязкого трения. В этом случае процесс перехода из одного состояния равновесия в другое получается плавным, похожим на S-образную логистическую кривую. На рисунке 2 приведены результаты решения дифференциального уравнения (35). Графики для соответствующих случаев обозначены номерами 1 и 2. Для обоих случаев параметр $\rho = 3 = \text{const}$. Выбор значений параметров в данном случае произволен, и наша задача состоит в том, чтобы проиллюстрировать общий подход. Коэффициент $\beta = 10$ определяет масштаб времени и согласует размерности переменных. Параметр $\sigma = 3 = \text{const}$.

В первом случае, как следует из графиков, скорость диссипации свободной энергии растет примерно по S-образной кривой и достигает максимума, примерно равного 9 единицам. Во втором случае управляющий параметр равномерно уменьшается по закону $\sigma = c - \gamma t$.

Как видно из графика, до точки m скорость диссипации свободной энергии все-таки растет, правда, не такими темпами, как в первом случае. Затем скорость диссипации свободной энергии начинает снижаться и в точке k становится нулевой, т.е. трибологическая система терпит катастрофу и разрушается. Очевидно, имея такую, достаточно простую модель разрушения трибологической системы, можно качественно оценить возможности перехода с одной S-образной кривой на другую.

Для нас важна зависимость скорости диссипации свободной энергии от поверхностного натяжения σ. *Обсудим этот вопрос подробнее*. Тонкопленочные объекты зоны трения подвержены сложным процессам разрушения — восстановления, не согласующимся с традиционными принципами термодинамики равновесных систем. Это происходит на фоне мощнейших удельных концентраций энергии на микроконтактах, приводящих материал в состояние «магма-плазма» [1] с особыми свойствами вещества.

Репозиторий КарГУ

Поэтому для трибологических систем особую роль играет скорость отвода энергии из зоны трения. Это означает, что скорость диссипации свободной энергии в зоне трения должна быть минимальной ($\mathrm{grad}\,\dot{F}(N) \to 0$). Из уравнений (34) и (35) снова следует сделанный уже нами вывод: для повышения уровня организации трибологических систем необходимо уменьшать поверхностное натяжение трибосопряжения.

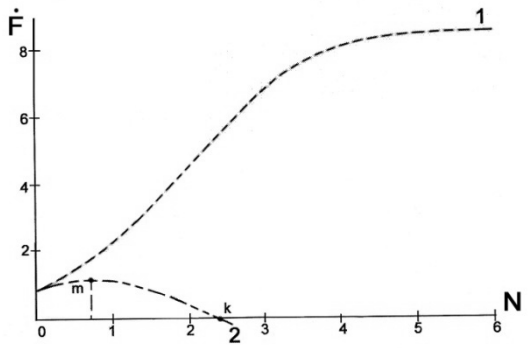

Рис. 2. Результат решения дифференциального уравнения (35)

Заключение

Рассмотренные нами вопросы относятся к синергетике конденсированных сред, которая, в свою очередь, находится в стадии становления. Отметим также, что мы не затронули вопросы анизотропии поверхностного натяжения, ее связь с фрактальной размерностью тонкопленочных покрытий в зоне трения и, собственно, ее связь с шероховатостью покрытия. Все эти вопросы мы обсудим в следующей работе.

References

1. *Baranov A.V., Wagner V. A., Tarasevich S.V.* Self-organizing conditions of tribological systems at a boundary friction of metals // Polzunov Vestnik. — 2009. — № 1–2. — P. 155–158.
2. *Kareri J.* An order and the disorder in matter structure. — M: Nauka, 1985. — 326 p.
3. *Aleksandrov E.A., Bogolepov V.P.* About some organizational criteria of quality of functioning of systems (to a question on creation of a mathematical apparatus of the theory of the organization) // The Organization and management. — M.: Nauka, 1968. — P. 60–76.
4. *Glushkov V.M.* Introduction in the management information system. — Kiev: Technika, 1974. — 264 p.
5. *Jurov V.M.* Thermodynamics of luminescing systems // Vestnik of KarSU. Physics. — 2005. — № 3 (39). — P. 13–15.
6. *Jurov V.M.* Superficial tension of solid states // Vestnik of KarSU. Physics. — 2007. — № 1 (45). — P. 23–29.
7. *Poljakov A.A.* The theoretical analysis of the basic mechanisms of evolution of tribosystems at selective carrying over // Durability of details of rubbing details of cars. — 1988. — № 3. — P. 14–26.
8. *Roldugin V.I.* Surface physical chemistry. — Dolgoprudno: Intelligence. — 2008. — 568 p.
9. *Jurov V.M.* Properties of small particles // Vestnik of KarSU. Physics. — 2009. — № 2 (54). — P. 36–45.
10. *Tolman R.C.* The effect of droplet size on surface tension // J. Chem. Phys. 1949. — Vol. 17. — № 2. — P. 333–356.
11. *Rusanov A.I.* Phase of balance and the superficial phenomena. — L.: Chemistry, 1967. — 346 p.
12. *Bouden F.P., Teibor D.* Friction and greasing of solid states. — M.: Mechanical engineering, 1968. — 543 p.
13. *Jurov V.M., Eshchanov A.N., Kuketaev A.T.* Way of measurement of a superficial tension of firm bodies // Patent RK № 57691. It is published 15.12.2008. The bulletin № 12.
14. *Jurov V.M, Portnov V.S, Puseeva M.P.* Way of measurement of a superficial tension and density of superficial conditions of dielectrics // Patent RK № 58155. It is published 15.12.2008. The bulletin № 12.
15. *Jurov V.M., Portnov V.S., Puseeva M.P.* A way of measurement of a superficial tension of magnetic materials // Patent RK № 58158. It is published 15.12.2008. The bulletin № 12.
16. *Jurov V.M., Guchenko S.A., Ibraev N.H.* A way measurements of a superficial tension of besieged coverings // Patent RK № 66095. It is published 15.11.2010. The bulletin № 11.
17. *Arnold V.I.* The theory of accidents. — M.: Editornaja URSS, 2007. — 136 p.

Репозиторий КарГУ