

4. Zhu, Y. Removal of Co²⁺ from radioactive wastewater by polyvinyl alcohol (PVA)/chitosan magnetic composite [Text] / Y. Zhu, J. Hu, J. Wang. // Progress in Nuclear Energy. – 2014. – № 71. – P. 172–178.
5. Nussinovitch, A. Polymer macro- and micro-gel beads: fundamentals and applications [Text] / A. Nussinovitch. – New York : Springer, 2010. – 303 p.
6. Patil, P. A review on ionotropic gelation method: novel approach for controlled gastroretentive gelspheres [Text] / P. Patil, D. Chavanke, M. Wagh // Int. J. Pharm. Sci. – 2012. – № 4. – P. 27–32.
7. Shibayama, M. 11B n.m.r. study on the reaction of poly(vinyl alcohol) with boric acid [Text] / M. Shibayama, M. Sato, Y. Kimura, H. Fujiwara, S. Nomura // Polymer. – 1988. – № 29. – P. 336–340.
8. Brindley, G. W. Crystal structures of clay minerals and their X-ray identification [Text] / G. W. Brindley, G. Brown. – London : Mineral. Soc., 1980. – 496 p.
9. Theng, B. K. G. Developments in clay science [Text] / B. K. G. Theng // Formation and properties of clay-polymer complexes. Second edition. – Amsterdam: Elsevier, 2012. – 528 p.
10. Kafshgari, M. H. Kinetic modeling: a predictive tool for the adsorption of zinc ions onto calcium alginate beads [Text] / M. H. Kafshgari, M. Mansouri, M. Khorram, S. R. Kashani // International Journal of Industrial Chemistry. – 2013. – № 4. – P. 1–7.
11. Abd El-Latif, M. M. Alginate polyvinyl alcohol - kaolin composite for removal of methylene blue from aqueous solution in a batch stirred tank reactor [Text] / M. M. Abd El-Latif, M. F. El-Kady, A. M. Ibrahim, M. E. Ossman // Journal of American Science. – 2010. – № 6. – P. 280–292.

У матеріалах статті проілюстрована рівноважна та нерівноважна статистична механіка, яка застосовується до поверхневого шару полімерної накладки, який знаходиться у твердому стані та у фазових переходах 1-ого та 2-ого роду. З допомогою математичного апарата з врахуванням електронів та іонів поверхневого шару накладки побудована послідовна система трьох станів, критерієм оцінки яких є термодинамічна границя

Ключові слова: поверхневий шар, електрони та іони (частинки), термодинамічна границя, статистична механіка

В материалах статьи проиллюстрирована равновесная и неравновесная статистическая механика применительно к поверхностному слою полимерной наклейки, который находится в твердом состоянии и в фазовых переходах 1-ого и 2-ого рода. С помощью математического аппарата с учетом электронов и ионов поверхностного слоя наклейки выстроена последовательная система трех состояний, критерием оценки которых является термодинамический предел

Ключевые слова: поверхностный слой, электроны и ионы (частицы), термодинамический предел, статистическая механика

УДК 621.891

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЙ ПРЕДЕЛ ПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЕВ ПОЛИМЕРНЫХ НАКЛАДОК ПРИ ФРИКЦИОННОМ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ

Д. Ю. Журавлев

Кандидат технических наук, доцент

Кафедра механики машин

Ивано-Франковский национальный

университет нефти и газа

ул. Карпатская, 15, г. Ивано-Франковск,

Украина, 76000

E-mail: udav2103@mail.ru

1. Введение

Термодинамические процессы, связанные с энергетическим состоянием поверхностных слоев металлополимерных пар трения ленточно-колодочного тормоза, неразрывно связан с их термодинамическим состоянием. Металлический фрикционный элемент (тормозной шкив) запасается энергией во время электротермомеханического трения, а между паузами его поверхности вынужденно охлаждаются. В это же время поверхностные слои накладок, расположенные на тормозной ленте, претерпевают физико-химические превращения, т. е. находятся в твердом, жидком, и газообразном со-

стоянии. Указанные состояния поверхностных слоев полимерных накладок наблюдается в результате превышения поверхностных температур их материалов по длине тормозной ленты. Это обстоятельство и является основным при снижении эффективности действия ленточно-колодочных тормозов буровых лебедок.

2. Анализ исследований и публикаций

А. В. Чичинадзе показал, что полимерные наклейки являются электретами, выступая в роли накопителей зарядов, несмотря на то, что полимеры могут

существовать в четырех физических состояниях – кристаллическом и трех аморфных (стеклообразном, высокоэластическом и вязкотекучем) [1]. Физическое состояние полимера чаще всего определяют, изучая механические свойства, а именно деформируемость или податливость, поскольку полимер работает в широком интервале поверхностных температур.

В работе [2] исследователи утверждают, что термодинамический предел является ошибочной концепцией, поскольку реальные макро- и микросистемы конечны. Поэтому, продолжают они, всякой теории, основанной на термодинамическом пределе, присуща нефизичность. Такое утверждение ни в коем случае нельзя отнести к пятнам контактов микровыступов металлополимерных пар трения ленточно-колодочных тормозов буровых лебедок.

Известно, что диапазон использования полимерных масс пока еще сравнительно ограничен и не отвечает растущим требованиям производства. Одна из причин этого – отсутствие обоснованных методов оценки термодинамического предела поверхностных слоев полимерных накладок [3].

Толщина взаимодействующих при трении поверхностных слоев имеет размер от десятков ангстрем (10^{-10} м) до сотен микрометров (10^{-6} м), поэтому участвующая во взаимодействии масса вещества столь ничтожна, что применение для исследования стандартных методов химического анализа, связанных с выпариванием, смеживанием, использованием различных катализаторов и химических индикаторов, как и прочих атрибутов классической аналитической химии становится просто невозможным. Именно поэтому для изучения поверхностных слоев полимерной наклейки и необходимо рассматривать их состояние с позиции концепции термодинамического предела [4].

Ограниченный объем знаний о влиянии температуры и температурных градиентов на фрикционные характеристики металлополимерных трибосистем снижает диапазон использования полимерных материалов в узлах трения и является одной из причин использования метода оценки термодинамического предела поверхностных слоев полимерных накладок [5].

3. Формирование целей и задач

Особое внимание в настоящее время уделяется поверхностному и подповерхностному слою полимерной наклейки при фрикционном взаимодействии с металлическим фрикционным элементом. При этом электротермомеханическое трение трибосопряжений носит контактно-импульсный характер, на который существенное влияние оказывает поверхностное состояние полимерной наклейки. Указанное состояние для накладок набегающей и сбегающей ветви тормозной ленты является неодинаковым, что существенно влияет на их износ-фрикционные свойства, и как следствие, на эффективность действия в целом ленточно-колодочного тормоза.

Целью настоящей работы является одновременное математическое описание поведения поверхностного и подповерхностного слоев полимерной наклейки в различных термодинамических состояниях.

Для достижения поставленной цели необходимо выстроить нанотрибологическую систему полимерной

наклейки, критерием оценки которой является термодинамический предел.

4. Статистическая механика при оценке термодинамического предела

Связь законов термодинамики с движением электронов и ионов металлополимерных пар трения, т. е. трибосистемы, связь функций ее состояния со статистикой поведения указанных частиц дает статистическая физика. Термодинамический и статистический методы изучения явлений являются дополнением друг друга и имеют универсальное значение.

Для проведения анализа процессов и явлений, имеющих место в парах трения тормозных устройств, удобно воспользоваться моделью трибосистемы.

На рис. 1 представлена структурная, шестиуровневая модель трибосистемы скольжения: 0-ой – трибосистема скольжения (фрикционный узел); I-ый – фрикционная плоскость; II-ой – плоскость работы трения; III-ий – плоскость генерированной, аккумулируемой и рассеиваемой теплоты; IV-ый – плоскость микроуровней на поверхностных и разделяющих слоях, а также на поверхностях раздела фрикционных материалов пар трения; V-ый – плоскость изнашивания).

Структурная модель трибосистемы скольжения (фрикционных узлов тормозных устройств) представлена в виде четырехгранной пирамиды по количеству трибоэлементов, которые берут активное участие в процессах трения и изнашивания: МТЭ-1; ПТЭ-2; ТЭ-3 и ТЭ-4 (рис. 1). Данная структура состоит из металлического (М) 1 и пластмассового (2) трибоэлементов (ТЭ), трибоэлемента 3, которым является окружающая среда (воздух). Трибоэлемент 4 – продукты распада материала ПТЭ-2 (жидкие и газообразные) и образование третьего тела.

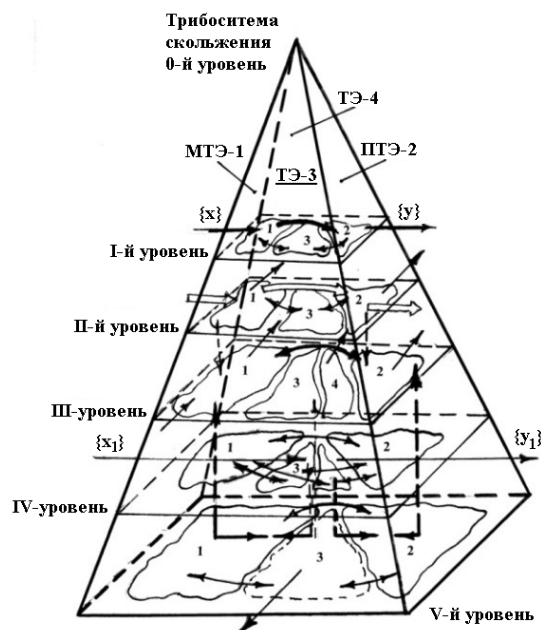


Рис. 1. Структурная модель трибосистемы скольжения (фрикционного узла тормозного устройства) на шести уровнях иерархического системного подхода

В данной иерархической модели трибосистемы на плоскости теплоты и плоскости материалов показаны трибоэлементы 3 и 4. Для последнего является характерным образование жидкой и газообразных фаз в приповерхностном слое фрикционных накладок за счет выгорания связующих компонентов в их материалах. Этот процесс является характерным для того случая, если поверхностная температура фрикционной накладки достигает температуры выше допустимой для ее материалов.

При этом имеет место фазовый переход 1-ого рода компонентов фрикционной накладки, к которому относятся: испарение и конденсация в твердой фазе.

На плоскости теплоты и плоскости материалов трибоэлементов 3 и 4 в особенности в материале фрикционной накладки в ее приповерхностных слоях имеет место сильный «тепловой хаос» (при поверхностной температуре равной или выше допустимой для материалов фрикционных накладок).

Основной особенностью компонентов материалов фрикционных накладок, находящихся в состоянии фазовых превращений и имеющих структуру типа "сендвича", являются поверхностные и приповерхностные слои накладок с дырками, в которых островки хаоса граничат с областями стойкости.

Образованная жидкостная фаза в поверхностных и приповерхностных слоях накладок есть областью сильного хаоса "стохастического моря", которая граничит с областями стойкости "островками" поверхности накладки. Структура "стохастического моря" и "островков" представляет собою фазовый портрет тепловой системы поверхностных и приповерхностных слоёв накладки. Иерархическая сложность фазового портрета распространяется на методы его изучения и анализа.

В современной прикладной математике область фазового пространства вблизи критических точек получила название области джокеров, в которой имеют место фазовые переходы 1-ого рода в материале фрикционной накладки при температуре выше допустимой. Эти переходы не только влияют на объёмное состояние компонентов накладки, но и скачком могут её перевести в другую точку фазового пространства.

Все области джокеров, которые могут повлиять на работоспособность трибосопряжения пар трения тормозных устройств, обычно имеют дело с так называемыми объёмами фазовых превращений. Это значит, что поведение объединённых объёмов в теле фрикционных накладок, сведенных в систему с устраивающей точностью определяется лишь несколькими переменными (нагрузкой, температурой разогрева, градиентом: температуры, удельного веса и т. п.). Остальные многочисленные параметры, при условии правильного определения объёмного состояния компонентов материала фрикционных накладок, в небольшой мере влияют на выходные фрикционно-износные характеристики пар трения тормозных устройств.

При фазовом переходе 1-ого рода скачком изменяются такие термодинамические параметры материалов фрикционной накладки, как плотность, концентрация компонентов в единице объёма материала, а также определенное количество теплоты, которое выделяется или поглощается, так называемая теплота фазового перехода.

Поэтому в трибологической модели приповерхностного слоя фрикционной накладки необходимо рассматривать три элементарных объёма с различными энергетическими уровнями: дымящийся (состояние сублимации), жидкий и парообразный.

Характерной особенностью трибологических процессов и явлений является взаимодействие между отдельными плоскостями, которые обозначены как уровни пирамиды: материалов, работы, теплоты, микроуровней на поверхностных и разделяющих слоях, а также на поверхностях раздела фрикционных материалов пар трения продуктов износа.

Довольно сложная взаимосвязь между процессами и явлениями, свойственными МТЭ-1, ПТЭ-1 и ТЭ-3 на всех уровнях, проиллюстрирована дугообразными стрелками. Наиболее сложной является четвертая плоскость, которую необходимо рассматривать на уровне нанотрибологии. Кроме того, возможно рассмотрение во взаимосвязи входов {x} и выходов {y} (показаны горизонтальными стрелками) на всех уровнях трибосистемы за счет управляющих воздействий (например, изменение материалов пары трения, принудительное охлаждение металлического фрикционного элемента и т. д.). Вертикальными стрелками, которые выходят со второй плоскости (работы трения) и попадают на третью плоскость (теплоты) проиллюстрировано генерирование и аккумуляция теплоты во время процесса трения фрикционных пар тормозных устройств. Процессы теплопередачи через элементы пар трения тормоза с учетом омывающей среды и приповерхностного слоя фрикционной накладки показано штриховыми вертикальными стрелками, а рассеивание теплоты от металлического термоэлемента – утолщенными штриховыми вертикальными линиями.

Поверхностное состояние полимерной накладки при электротермомеханическом фрикционном взаимодействии в металлополимерных парах трения ленточно-колодочного тормоза буровой лебедки зависит от глубины спуска колонны бурильных труб и расположения накладок на набегающей и сбегавшей ветви ленты. Оно характеризуется неодинаковой энергонагруженностью, и как следствие, находится в различных состояниях рабочих поверхностей накладок: твердом и в фазовом 1-ого и 2-ого рода. Поэтому поверхностные состояния полимерных накладок необходимо рассматривать в трех системах [6]. Во второй и третьей системе важной является интенсивная величина – плотность островков жидкости, образовавшихся на рабочей поверхности накладки после выгорания связующих компонентов ее материалов, а после выгорания связующих компонентов ее материалов, а также испарение жидкости в межконтактный зазор микровыступов пар трения. Таким образом, при рассмотрении последовательности систем необходимо указать, что при увеличении объема (V) в каждой из них числа электронов и ионов (N) увеличивается в той же пропорции; следовательно, полная плотность числа частиц $N/V = n$ остается постоянной в каждой из систем последовательности. В частности, когда рассматривается предельная система (поверхность накладки полностью покрыта жидкостью и вся она испарилась в межконтактный зазор микровыступов пар трения). При этом, когда исследуется каждая из предельных систем, для которых $V \rightarrow \infty$, следует принять также $N \rightarrow \infty$;

однако эти пределы не являются независимыми. При этом должно выполняться следующие условие:

$$\begin{aligned} V \rightarrow \infty, N \rightarrow \infty \text{ (Т - предел),} \\ N/V = n - \text{конечная постоянная.} \end{aligned} \quad (1)$$

Если принцип макроскопической эквивалентности справедлив, то указанные предельные системы описывают такое же локальное поведение, как и любое другое поведение конечной системы последовательности.

Ограничивающие условия (1) являются объемным пределом или термодинамическим пределом (Т – пределом) и выступают в роли характерного математического приема статистической механики.

Перейдем непосредственно к твердому состоянию пятен контактов микровыступов полимерной накладке, которые характеризуются локальными плотностями зарядов (ионов и электронов), которые описываются микроскопическими динамическими функциями. Рассмотрим одночастичную динамическую функцию $\beta_1(q_1, p_1)$ (где q_1 – обобщенная координата заряда пятна контакта; p_1 – обобщенный импульс заряда). В свою очередь β_1 является одной из "сингулярных функций" своих аргументов. Поэтому динамическая функция вида $b(q, p) = q_1$ описывается формулой

$$q_1 \Rightarrow \beta_{K_1 \dots J_N} = i \delta'(K_1) \prod_{r=2}^N \delta(K_r) \prod_{n=1}^N \delta(j_N), \quad (2)$$

где $\delta(K)$ – сингулярная дельта – функция Дирака, и $\delta'(K) = d\delta(K)/dK$. В дальнейшем определяем локальную плотность $b_1(q_1, p_1; x)$ в точке x . При этом в неконтинутальном электронно-ионном описании в данную функцию вносят вклад лишь те ионы и электроны, которые расположены в точке x , т.е. q_1, p_1 . Следовательно, $b_1(q_1, p_1; x) = \delta(q_1 - x) \beta_1(q_1, p_1)$.

В более общем случае S – точечная плотность заряда имеет вид

$$\begin{aligned} b_s(q_1 p_1, \dots, q_s p_s; x_1, \dots, x_s) = \\ = \delta(q_1 - x_1) \dots \delta(q_s - x_s) \beta_s(q_1 p_1, \dots, q_s p_s). \end{aligned} \quad (3)$$

Физический интерес представляет такие интенсивные величины, как $b_s \equiv 0$ для $s > S$, где S – конечное число пятен контактов микровыступов полимерной накладки, намного меньшее N ; обычно $S=6$ и более по данным академика В. А. Лазаряна. Однако в силу предложенного ограничения предел суммирования равен не N , а малому конечному числу S :

$$\langle b \rangle = \sum_{s=0}^S (\hat{S}!)^{-1} \int dy_1 \dots dy_s b_s(y_1, \dots, y_s; x_1, \dots, x_s) f_s(y_1, \dots, y_s). \quad (4)$$

Теперь вычислим это выражение для каждой из систем, принадлежащих к последовательности, в которой поверхностное состояние накладки находится в твердом и в фазовых состояниях 1-ого и 2-ого рода.

Поэтому их будем рассматривать как функции от V и N . Зависимость от указанных параметров может возникать только за счет: пределов интегрирования в уравнении (1); функции b_s ; функции f_s .

Конкретная форма равенства (4) позволяет сразу же провести интегрирование по q :

$$\begin{aligned} \int dy_1 \dots dy_s b_s(y_1, \dots, y_s; x_1, \dots, x_s) f_s(y_1, \dots, y_s) = \\ = \int_{-\infty}^{+\infty} dp_1 \dots dp_s \beta_s(x_1, p_1, \dots, x_s, p_s) f_s(x_1, p_1, \dots, x_s, p_s). \end{aligned} \quad (5)$$

Естественными пределами интегрирования по возникающим импульсам нормальных сил при взаимодействии пятен контактов нормальных сил, и при взаимодействии пятен контактов микровыступов металлополимерных пар трения, являющиеся пределы $\pm\infty$; эти пределы не зависят от объема полимерных накладок, представляющих элемент трибосистемы.

Если β_s и f_s регулярные функции импульсов, то указанные интегралы сходятся и равны конечным числам для любых заданных N и V . С другой стороны, функции β_s , являющиеся динамически замкнутой конечной s – частичной системой ($s \leq S$), не могут зависеть ни от N , ни от V . Следовательно, зависимость от этих параметров может возникать только за счет частичных функций распределения $f_s(y_1, \dots, y_s)$.

Из зависимости [7] вида

$$f_s = \frac{N!}{(N-s)!} \int dx_{s+1} \dots dx_N F(x_1, \dots, x_s, x_{s+1}, \dots, x_N) \quad (6)$$

(F – конечная функция распределения) следует, что указанные функции действительно зависят от объема и числа частиц.

В зависимости (6) производилось интегрирование по $N - s$ частицам; интегрирование по q_j распространяется на объем полимерной накладки V . Поскольку точная зависимость от выше указанных параметров чрезвычайно сложна, настоящую задачу переводим в плоскость качественных физических принципов.

$$f_1(y_1) = \int dx_1 \dots dx_N \left\{ \sum_{j=1}^N \delta(y_1 - x_j) \right\} F(x_1, \dots, x_N) \quad (7)$$

и

$$f_s(y_1, \dots, y_s) = \int dx_1 \dots dx_N \left[\sum_{j_1 \neq j_2 \neq \dots \neq j_s} \dots \sum \delta(y_1 - x_{j_1}) \cdot \delta(y_2 - x_{j_2}) \dots \delta(y_s - x_{j_s}) \right] F(x_1, \dots, x_N). \quad (8)$$

Из зависимостей (7) и (8) [7] (при этом в зависимости (7) необходимо обратить внимание на правило суммирования: $j_1 \neq j_2 \neq \dots \neq j_s$) следует, интерпретация функции f_s как s -точной плотности числа частиц в фазовом состоянии. Необходимо заметить, что на поведение иона, локализованного в токе q , оказывает влияние электрон, ибо между ними существует сила электрического взаимодействия. Следовательно, значение функции $f_s(q_1 p_1, \dots, q_s p_s)$ физически определяется взаимодействиями между s различными ионами и электронами, а также взаимодействием каждого из них со всеми остальными ($N-s$) ионами и электронами системы.

Взаимодействие второго типа усредняются по всем положениям (N-s). При этом сила электрического взаимодействия имеет конечный радиус действия r_c. Следовательно, значение и форма функции f_s(x₁,...,x_s) определяется ионами и электронами, находящимися на расстоянии от радиуса r_c от каждого из s различных ионов и электронов.

5. Закономерности изменения исследуемых параметров

Теперь вернемся к последовательности роста систем и установим влияние увеличения N при изменяющейся плотности n на значение f_s(x₁,...,x_s) при фиксированных координатах x₁,...,x_s и фиксированном s. Прежде всего заметим, что при N<s тривиально f_s=0. При N=s функция скачком возрастает до конечного значения F(x₁,...,x_s). Добавление лишних частиц заметно возмущает окружение группы (1...s), что приводит к изменению f_s. При N>s функция скачком возрастает до конечного значения F(x₁,...,x_s). Добавление лишних ионов или электронов заметно возмущает окружение группы (1...s), что приводит к изменению значения f_s (рис. 2).

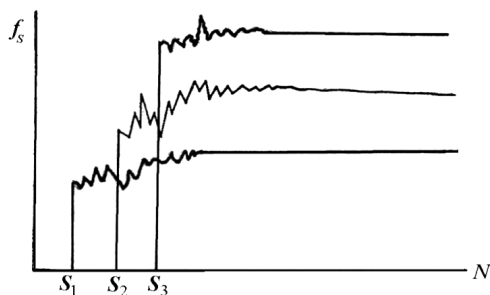


Рис. 2. Зависимость функции f_s(x₁,...,x_s), при фиксированных x₁,...,x_s, от числа частиц, когда N возрастает при постоянной плотности (схематично)

Когда добавляется все большее и большее число частиц, соответственно, изменяется объем, и при этом среднее окружение любой частицы постепенно принимает практически неизменный вид. Следовательно, когда N становится значительно больше s (причем всегда при постоянной плотности), значение f_s становится менее чувствительным к добавлению новых частиц. Итак, основываясь на физических соображениях, можно ожидать, что функции f_s(x₁,...,x_s) должны сильно зависеть от N при его малых значениях, но, тем не менее, быстро стремиться к постоянному асимптотическому значению при достаточно больших N. В свою очередь, асимптотическое значение f_s будет зависеть от плотности n.

Таким образом, частичные функции распределения f_s(x₁,...,x_s) при любом конечном s стремятся к конечным функциям, не зависящим от N в термодинамическом пределе (1). Кроме того, построенная последовательность систем позволяет перейти к макроскопическим эквивалентным системам. Рассмотренные ранее факторы, ограничивающие применимость макроскопической эквивалентности, сохраняют значимость и в данном случае. Даже в макроскопи-

чески однородной системе локальное окружение ионов и электронов на пятне контактов микровыступов полимерной накладки, расположенных на расстоянии r_c от границы, отличается от окружения ионов и электронов, находящихся в объеме микровыступов. Переход к термодинамическому пределу приводит к неправильному описанию поведений этих ионов и электронов. Это связано, в первую очередь, с формированием на пятнах контактов микровыступов полимерной накладки при электротермомеханическом трении поверхностных электрических и тепловых токов, а в объемах микровыступов их объемных величин.

В данной задаче имеет место зависимость от времени в термодинамическом пределе при нахождении пятен контактов микровыступов в твердом состоянии. При этом при фазовом переходе 1-ого и 2-ого рода не может быть и речи о возврате к начальному состоянию поверхностного слоя полимерной накладки. Все время будет наблюдаться новая топографическая картина микровыступов полимерной накладки. В первую очередь, все зависит от режимов нагружения пятен контактов микровыступов металлополимерных пар при фрикционном взаимодействии. Следовательно, результаты, получаемые из теории в термодинамическом пределе, могут быть справедливы лишь для повторно-кратковременных и длительных режимов торможения, при которых имеет место соблюдения регламентируемой эффективности. Термодинамический предел теряет свою силу в том случае, если поверхностный слой полимерной накладки достигнет допустимой температуры для их материалов.

Представим, что N→∞, вектор распределения f имеет бесконечное число компонент,

$$f = \{f_0, f_1(x_1), f_2(x_1, x_2), \dots\},$$

или просто

$$f = \{f_s(x_1, \dots, x_s); s = 0, 1, 2, \dots\}. \tag{9}$$

Предполагается, что каждая компонента этого вектора – конечная функция. В термодинамическом пределе выражение (9) для средних величин принимает вид

$$\langle b \rangle = (b, f) = \sum_{s=0}^{\infty} (S!)^{-1} \int dx_1 \dots dx_s b_s(x_1, \dots, x_s) f_s(x_1, \dots, x_s). \tag{10}$$

Однако для интенсивных величин это выражение в действительности совпадает с (8), поскольку лишь конечное число (а именно S) членов отлично от нуля.

Четко видно, что интегралы от всех частичных распределений в термодинамическом пределе (за исключением тривиального f₀) стремятся к бесконечности в T – пределе. Важен вопрос о порядке этой бесконечности, т. е. о главном члене асимптотики. Очевидно,

$$\frac{N!}{(N-s)!} = N(N-1)(N-2)\dots(N-s+1) \xrightarrow{T\text{-lim}} N^s. \tag{11}$$

Следовательно, условие нормировки (11) в T-пределе следует представить в следующей форме:

$$T - \lim N^{-S} \int dx_1 \dots dx_S f_S(x_1, \dots, x_S) = 1. \quad (12)$$

Аналогично выражение (12) в T-пределе принимает вид при условии $r < s$

$$f_r(x_1, \dots, x_r) = T - \lim N^{r-s} \times \int dx_{r+1} \dots dx_S j_s(x_1, \dots, x_r, x_{r+1}, \dots, x_S). \quad (13)$$

Заметим, что в T-пределе соотношение между функциями f_S и соответствующими функциями Боголюбова f_S^B имеет вид

$$f_S = T - \lim \frac{N^3}{V^3} f_S^B = n^3 f_S^B. \quad (14)$$

Функции Боголюбова описывают плотности свободной энергии с гамильтонианом U при числе частиц или объема (N) в зависимости от системы с абсолютной температурой (T) в энергетических единицах.

Таким образом, подробное рассмотрение термодинамического предела применительно к элементам трибологической системы позволило установить следующее:

- физическая интерпретация основывается на эмпирическом принципе макроскопической эквивалентности, относящемся к реальным макроскопическим системам;
- при излучении локального поведения макроскопической системы объем является несущественным параметром;
- при изучении локального поведения микроскопической системы объем является существенным параметром, исходя из определения класса макроскопических эквивалентных систем.
- введение в математическое описание предельного члена последовательности, который определен условием (1), показало, что все зависящие от N вклады, усложняющие микроскопическое описание и вместе с тем макроскопически необнаружимые, исчезают в термодинамическом процессе.

5. Результаты экспериментальных исследований фазового перехода 1-ого рода

В подтверждении математических вкладок рассмотрим случай, имеющий место с металлическим включением в подповерхностном слое полимерной накладки. Исследование проводилось в стендовых условиях с искусственным доведением металлического включения с твердого состояния до фазового перехода 1-ого рода.

На рис. 3 представлена характерная зависимость тока, протекающего через систему сталь 35ХНМ – медный электрод Cu. Последний имеет форму цилиндрического стержня длиной $l=30,0$ мм и диаметром $d=0,3$ мм, посаженного с натягом в тело полимерной фрикционной накладки ФК-24А.

При начальной комнатной температуре система находилась в диэлектрическом состоянии. При нагревании значение тока, протекающего через систему "сталь 35ХНМ – медный электрод Cu", соприкасающегося по всему периметру с полимерными материалами накладки ФК-24А, остается неизменным до температуры 130–135 °С. Выше этой температуры в измерительной цепи возникают флуктуации тока. Эти флуктуации существуют при дальнейшем повышении температуры системы вплоть до температуры плавления медного электрода. Можно предположить, что наличие увеличивающихся по амплитуде флуктуаций тока, связано с предпереходными явлениями, например, поверхностным многоатомным плавлением материалов электрода, предотвращающим объемный фазовый переход.

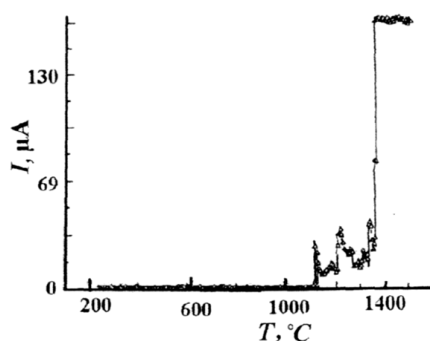


Рис. 3. Температурные зависимости тока, протекающего через систему "металл - металл", при использовании меди в качестве электрода. Напряжение, приложенное к системе, $U=16,5$ В при $d = 0,3$ мм и $l = 30,0$ мм электрода

6. Выводы

Таким образом, в результате исследований установлено, что металлополимерные пары трения, находящиеся во фрикционном взаимодействии, представлены в виде трибосистемы. Из последней выделена полимерная накладка, поверхностный слой которой находится в твердом, жидком и газообразном состоянии. Посредством математического аппарата с применением принципов статистической механики и с учетом электронов и ионов поверхностного слоя накладки выстроена последовательная система трех состояний, в которых оценочным параметром выступал термодинамический предел с заданными ограничениями. Экспериментальные исследования показали, что в результате резкого торможения в парах трения возникают значительные температуры более 200 °С, что приводит к возникновению флуктуаций тока в полимерных материалах накладки. Поэтому накладка быстро изнашивается, что приводит к ухудшению работы фрикционных узлов ленточно-колодочного тормоза буровой лебедки.

Литература

1. Чичинадзе, А. В. Материалы в триботехнике нестационарных процессов [Текст] / А. В. Чичинадзе, Р. М. Матвеевский, Э. Д. Браун и др. – М.: Наука, 1986. – 245 с.

2. Горячева, И. Г. Механика фрикционного взаимодействия [Текст] / И. Г. Горячева. – М.: Наука, 2001. – 435 с.
3. Евдокимов, Ю. А. Тепловая задача металлополимерных трибосопряжений [Текст] / Ю. А. Евдокимов, В. И. Колесников, С. А. Подрезов. – Ростов на Дону: Из-во Ростовского ун-та, 1987. – 168 с.
4. Любимов, Д. Н. Физико-химические процессы при трении. Учеб. пособие [Текст] / Д. Н. Любимов, В. А. Рыжиков / Шахтинский институт ЮРГТУ. – Новочеркасск: ЮРГУ, 2003. – 142 с.
5. Колесников, В. И. Теплофизические процессы в металлополимерных трибосистемах [Текст] / В. И. Колесников. – М.: Наука, 2003. – 279 с.
6. Джанахмедов, А. Х. Нефтяная трибология [Текст] / А. Х. Джанахмедов. – Баку: Элм, 2003. – 326 с.
7. Балеску, Р. Равновесная и неравновесная статистическая механика [Текст] / Р. Балеску. – М.: Из-во. Мир, Т.1, 1978. – 405 с.
8. Лернер, М. И. Технология получения, характеристики и некоторые области применения электропорошков [Текст] / М. И. Лернер, Н. В. Сваровская, С. Г. Псахье, О. В. Бакина // Российские нанотехнологии. – 2009. – Т. 4, № 11–12. – С. 56–68.
9. Лернер, М. И. Формирование наночастиц при воздействии на металлический проводник импульса тока большой мощности [Текст] / М. И. Лернер, В. В. Шаманский // Журнал структурной химии. – 2004. – Т. 45. – С. 112–115.
10. Котов, Ю. А. Исследование частиц образующихся при электрическом взрыве проводников [Текст] / Ю. А. Котов, Н. А. Яворский // Журнал физика и химия обработки материалов – 1978. – № 4. – С.24–29.

У статті розглянута така досить важлива властивість ниткоподібних кристалів як пластична деформація. На підставі аналізу результатів раніше проведених експериментів показано вплив властивості на ступінь руйнування кристалів і сформульована невирішена частина наукової проблеми вивчення росту, структури і властивостей ниткоподібних кристалів, що виникла у зв'язку з необхідністю вирішення ряду практичних завдань

Ключові слова: ниткоподібні кристали, механічні властивості, структура, пластична деформація, дислокації, наукові дослідження

В статье рассмотрено такое достаточно важное свойство нитевидных кристаллов как пластическая деформация. На основании анализа результатов ранее проведенных экспериментов показано влияние свойства на степень разрушения кристаллов и сформулирована нерешенная часть научной проблемы изучения роста, структуры и свойств нитевидных кристаллов, возникшей в связи с необходимостью решения ряда практических задач

Ключевые слова: нитевидные кристаллы, механические свойства, структура, пластическая деформация, дислокации, научные исследования

УДК 548.31

СВОЙСТВА НИТЕВИДНЫХ КРИСТАЛЛОВ. ПЛАСТИЧЕСКАЯ ДЕФОРМАЦИЯ

С. Р. Артемьев

Кандидат технических наук, доцент
Кафедра охраны труда и техногенно-экологической безопасности
Национальный университет
гражданской защиты Украины
ул. Чернышевского, 94, г. Харьков,
Украина, 61000
E-mail: sergey.artemev.1967@mail.ru

1. Введение

Возможность образования кристаллов в форме тонких нитей, как в природе, так и искусственным путем, была известна достаточно давно. Однако как особая научная проблема, проблема изучения роста, структуры и свойств нитевидных кристаллов возникла в связи с необходимостью решения ряда практических задач.

Так, например, еще во время второй мировой войны перед инженерами возникла задача предотвращения коротких замыканий в радиодеталях, телефонных кабелях и т. д., вызываемых вырастающими на поверхности гальванических покрытий тончайшими металлическими иглочками.

Уже много лет в различных странах проводятся работы по созданию композиционных материалов с особыми свойствами на основе нитевидных кристаллов,

что требует, прежде всего, разработки технологичных методов получения высокопрочных нитевидных кристаллов в больших количествах.

Нитевидные кристаллы находят и ряд других научных и практических применений. Например, из полупроводниковых нитевидных кристаллов можно изготавливать высокочувствительные тензодатчики. Все это говорит в пользу того, что различные свойства нитевидных кристаллов должны быть детально изучены, в том числе и такое важное как пластическая деформация.

Нитевидные кристаллы могут разрушаться как хрупко, так и пластически. Нитевидные кристаллы $Al_2O_3, SiO_2, Te, Si, C, MoO_3$, а также ряд других разрушаются хрупко при комнатной температуре, Zn и Cd – при низких температурах (160 и 20° К соответственно) [1].