

**ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ БЛОЧНОГО НАНОСТРУКТУРИРОВАНИЯ  
В МЕТАЛЛОПОЛИМЕРНОМ СЛОЕ****Бутенко В.И.** (ТТИ ЮФУ, г. Таганрог, Россия)

Факс: (8634) 310-598; E-mail: mkk@egf.tsure.ru

**Аннотация.** Разработана энергетическая модель блочного наноструктурирования в металлополимерном слое, сформированном на контактных поверхностях деталей трибосистем. Получены аналитические выражения для определения энергетического состояния и размеров наноструктурных слоев, позволившие вывести формулу для расчета коэффициента трения при наличии на контактных поверхностях взаимодействующих деталей металлополимерного наноструктурного слоя.

**Ключевые слова:** энергия, блок, диссипация, флуктуация, волновой пакет.

**1. Введение.** Проблема повышения работоспособности и надежности трибосистем остается актуальной в современном машиностроении. Среди известных способов уменьшения интенсивности изнашивания деталей трибосистем весьма перспективным является формирование на контактирующих поверхностях металлополимерных слоев, обладающих свойствами, отличными от свойств используемого полимера и материала детали [1].

Разработана технология формирования металлополимерного слоя на поверхности детали в результате одновременного упрочнения и кратковременного температурного воздействия. Однако в настоящее время отсутствует какая-либо достоверная информация о состоянии и поведении металлополимерных слоев на поверхностях деталей трибосистем в различных условиях эксплуатации изделий машиностроения, что сдерживает широкое применение их для снижения интенсивности изнашивания материалов в зоне контактного взаимодействия.

**2. Основное содержание и результаты работы.** Комплексные металлографические и рентгеновские исследования металлополимерного слоя позволили предположить, что в результате температурно-силового воздействия в контакте «металл – полимер» образуется некоторая деформационная динамическая структура, состоящая из устойчивых элементов (блоков), обладающих энергией границы порядка  $\pi \cdot S^2 \cdot E_n$ , где  $S$  - поверхность блока,  $E_n$  - начальная эффективная удельная поверхностная энергия.

Пусть образующиеся внутри металлополимерного слоя наноструктурированные блоки имеют возможность смещаться и поворачиваться под действием сил трения, порождая локализованные деформационные образования типа флуктуационных волновых пакетов, затухающие на длинах порядка  $\xi$ . Тогда при контактном взаимодействии твердых тел, имеющих на поверхностях металлополимерный слой, диссипация энергии трения произойдет не непосредственно, а через локальные флуктуации наноструктурных блоков металлополимерного слоя. При такой схеме поверхностное разрушение (изнашивание) можно рассматривать как процесс, обусловленный взаимодействием аномальных волновых пакетов, несущих в себе зоны ослабленных связей и разрывы, отвечающие аномальным смещениям и поворотам отдельных наноструктурных блоков металлополимерного слоя.

В общем случае флуктуацию энергии и распределение наноструктурных блоков в металлополимерном слое можно определить, исходя из следующей формулы определения вероятности  $p(x)$  возникновения флуктуационных волновых пакетов в заданном направлении:

$$p(x) = A \int_0^x e^{-\frac{\Delta E(\xi)}{M}} d\xi, \quad (1)$$

где  $A$  - постоянная величина, характерная для конкретного состояния металлополимерного наноструктурного слоя и зависящая от условий контактного взаимодействия тел;

$\Delta E(\xi)$  - флуктуация энергии в квазизамкнутой системе на длине  $\xi$ ;

$M$  - модуль термодинамического состояния металлополимерного слоя, имеющего смысл средней энергии взаимодействия наноструктурных слоев.

Если допустить, что распределение наноструктурных блоков, образующихся в металлополимерном слое и взаимодействующих с флуктуационными волновыми пакетами, по энергиям их границ не зависит от характера внешнего воздействия, то функция распределения наноструктурных блоков по линейным размерам  $f(x)$  согласно формулы (1) будет иметь вид [2]

$$f(x) = \frac{dp(x)}{dx} \cdot \frac{D^2}{D_v^2} e^{-\frac{D^2}{2D_v^2}}, \quad (2)$$

где  $D$  - линейный размер наноструктурного блока;

$D_v$  - наивероятнейший линейный размер наноструктурного блока, определяемый соотношением

$$D_v = S \left( \frac{\pi}{2\beta} \right)^{1/2}; \quad (3)$$

здесь  $\beta$  - коэффициент равномерности распределения энергии по металлополимерному слою:

$$\beta = \frac{\pi^2 \cdot S^2 \cdot E_n}{M}. \quad (4)$$

Из формул (2) - (4) можно определить модуль термодинамического состояния наноструктурного слоя  $M$ :

$$M = 2\pi \cdot D_v^2 \cdot E_n. \quad (5)$$

Для определения длины  $\xi$  можно воспользоваться известным выражением, устанавливающим приближение длины свободного пробега некоторой величины, переносимой в заданном направлении [2]:

$$\xi = -\frac{1}{3} \bar{v} \frac{dp(x)}{dx}, \quad (6)$$

где  $\bar{v} = \int_0^\infty v \cdot f(0) dv$  - средняя скорость переноса флуктуационных пакетов; здесь  $f(0)$  -

локально-равномерная функция распределения.

Полагая  $p(\xi) = N_0(\xi) \Delta E(\xi)$  (где  $N_0(\xi)$  - объемная плотность флуктуационных волновых пакетов), переносимая флуктуационными пакетами величина энергии  $\Delta E(\xi)$  может быть отождествлена средней скоростью переноса  $v$  с относительной скоростью скольжения трущихся поверхностей взаимодействующих тел  $V_{ск}$ . Тогда, заменяя градиент  $dp(x)/dx$  на его значение из формулы (2), можно получить следующую формулу определения длины пробега  $\xi$  флуктуационных волновых пакетов:

$$\xi = -\frac{1}{3} N_0(\xi) \cdot V_{\text{ск}} \cdot f(0) \cdot \Delta E(\xi) \frac{D^2}{D_v^2} e^{-\frac{D^2}{2D_v^2}}. \quad (7)$$

Из формулы (7) следует, что величина переносимой (или диссипирующей) энергии наноструктурными блоками металлополимерного слоя  $\Delta E(\xi)$  может быть определена по формуле

$$\Delta E(\xi) = \frac{3 \cdot D_v^2 \cdot e^{-\frac{D^2}{2D_v^2}}}{N_0(\xi) \cdot V_{\text{ск}} \cdot f(0) \cdot D^2}. \quad (8)$$

Принимая в первом приближении  $D = D_v$  и считая наноструктурные блоки термoplastически обработанного металлополимерного слоя сфероидальными, равномерно распределенными по поверхности, были получены следующие упрощенные формулы для определения наивероятнейшего размера наноструктурного блока  $D_v$  и начальной эффективной удельной поверхностной энергии  $E_n$ , функционально влияющей на интенсивность изнашивания контактирующих материалов:

$$D_v = A \cdot M \cdot E_n^{-1/2} \cdot f(0); \quad (9)$$

$$E_n = \left( \frac{A \cdot M \cdot f(0)}{D_v} \right)^2 e^{-\beta}. \quad (10)$$

В формулах (9) и (10) неизвестной является постоянная величина  $A$ , зависящая от конкретного состояния металлополимерного наноструктурного слоя и изменения его начальной поверхностной энергии  $E_n$  в процессе трения. Согласно уравнению Гиббса изменение поверхностной энергии в процессе трения  $dE_n$  происходит по закону

$$dE_n = -\Gamma \cdot dm_n, \quad (11)$$

где  $\Gamma$  - показатель адсорбции наноструктурных блоков к металлической основе;  
 $m_n$  - химический потенциал.

Если для металлополимерного слоя справедлив закон Генри, то изменение величины химического потенциала  $d m_n$  можно выразить зависимостью [3]

$$dm_n = K_B \cdot \Theta \frac{dp}{p}, \quad (12)$$

где  $K_B$  - постоянная Больцмана;

$\Theta$  - абсолютная температура в зоне контакта взаимодействующих материалов;

$p$  - давление в зоне контакта.

Показатель адсорбции металлополимерных наноструктурных блоков  $\Gamma$  с учетом их равномерного распределения по поверхности со степенью покрытия  $\chi$  определится по формуле

$$\Gamma = N_{\delta} \cdot \chi, \quad (13)$$

где  $N_{\delta}$  - поверхностная концентрация наноструктурных блоков.

Тогда изменение поверхностной энергии в металлополимерном слое при трении составит [3]

$$dE_n = E_n - N_{\delta} \cdot K_B \cdot \int_0^p \frac{\chi}{p} dp = E_n - N_{\delta} \cdot K_B \cdot \Theta \int_0^{\chi} \frac{d \ln p}{dp} d\chi. \quad (14)$$

После интегрирования выражения (14) с учетом ранее принятых допущений в окончательном виде получается следующая формула для определения изменения поверхностной энергии  $dE_n$ :

$$dE_n = E_n - N_6 \cdot K_B \cdot \Theta \left[ \ln \left( \frac{1}{1-\chi} \right) - \frac{\chi^2}{2} \right]. \quad (15)$$

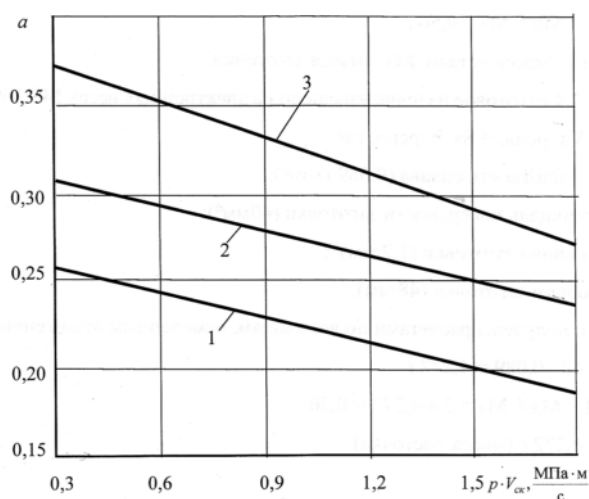


Рис. 1. Зависимость величины  $A$  от относительного изменения поверхностной энергии  $dE_n/dE$  при трении для некоторых значений  $\chi$  и  $N_6$

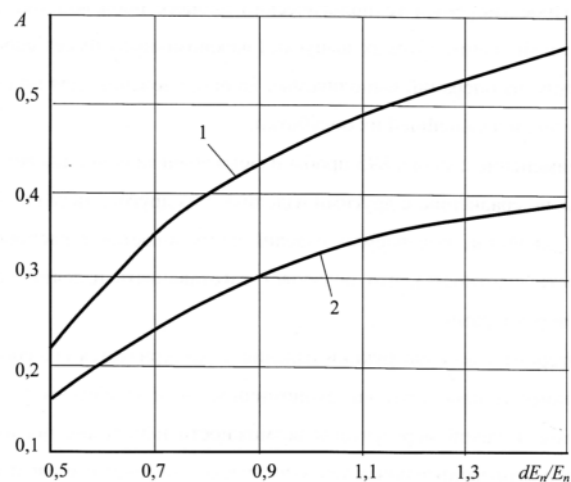


Рис. 2. Значения показателя  $a$  в зависимости от параметра трения  $p \cdot V_{ck}$ : 1 – полиэтилен; 2 – полистирол; 3 – полиамид

Таблица 1. Расчетные и экспериментальные значения коэффициентов трения в зоне контакта стальных поверхностей с различными металлополимерными слоями

Используемый полимер	Режимы трения		Коэффициент трения		Отклонение, %
	$P$ , МПа	$p \cdot V_{ck}$ , м/с	$f_{расч}$	$f_{эксп}$	
Полиэтилен	1,0	0,3	0,085	0,09	5,5
	1,5	0,4	0,087	0,09	3,3
	2,5	0,5	0,094	0,1	6,0
Полистирол	1,0	0,3	0,075	0,08	6,3
	1,5	0,4	0,081	0,09	10,0
	2,5	0,5	0,089	0,1	11,0
Полиамид	1,0	0,3	0,065	0,07	7,1
	1,5	0,4	0,072	0,07	3,0
	2,5	0,5	0,077	0,08	3,7

Как показывают металлографические исследования, степень покрытия  $\chi$  при получении на поверхности детали металлополимерного слоя на основе полиэтилена, полистирола или полиамида реально составляет 0,75 – 0,82 при поверхностной концентрации наноструктурных блоков  $N_6 = 0,50 - 0,65$ . Используя эти данные и формулы (9), (10), (15), расчетно-экспериментальным путем была получена функциональная зависимость постоянной величины  $A$  от относительного изменения поверхностной энергии  $dE_n/dE$  при трении для двух крайних значений  $\chi$  и  $N_6$ , которая приведена на рис. 1.

Учитывая атомно-молекулярную сущность коэффициента трения [4], было получено аналитическое выражение для его определения при наличии на контактной поверхности металлополимерного наноструктурного слоя:

$$f = A \cdot N_6 \cdot K_B \cdot \sqrt[a]{M \cdot \frac{\Delta\Theta}{\Theta} \ln \frac{1}{1-\chi}}, \quad (16)$$

где  $a$  - показатель степени, зависящий от параметра трения  $p \cdot V_{ск}$  (рис. 2);

$\frac{\Delta\Theta}{\Theta}$  - относительное увеличение температуры в зоне контакта.

Сравнение расчетных значений коэффициента трения в зоне контакта поверхностей с металлополимерным слоем с экспериментальными данными показали приемлемую для предварительной оценки сходимость (табл. 1), что свидетельствует о правомерности использования в исследовательской практике рассмотренной энергетической модели блочного наноструктурирования в металлополимерном слое.

**3. Заключение.** Таким образом, выполненные исследования позволили разработать энергетическую модель наноструктурирования в металлополимерном слое, формируемом на контактных поверхностях деталей трибосистем, и установить функциональную связь между размерными характеристиками наноструктурных блоков и коэффициентом трения в зоне контакта. В результате становится возможным реальное управление нанотрибологическими характеристиками поверхностей деталей машин с металлополимерными слоями и повышение надежности изделий машиностроения в целом.

**Список литературы:** 1. Бутенко В.И. Научные основы нанотрибологии. – Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ, 2010 – 275 с. 2. Семенцев А.М. Массоперенос легирующих элементов в технологических процессах лазерной обработки. – М.: ООО Изд-во «Машиностроение-1», 2006. – 147 с. 3. Рехвиашвили С.Ш., Кишტიкова Е.В. Адсорбция и поверхностная энергия в экспериментах с кварцевым микробалансом. / В кн.: Деформация и разрушение материалов и наноматериалов. Сборник статей по материалам Второй международной конференции. – М.: Изд-во ИМЕТ им. А.А. Байкова РАН, 2007. – С. 145 – 146. 4. Бутенко В.И. Износ деталей трибосистем. – Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2002. – 236 с.

### **ЕНЕРГЕТИЧНА МОДЕЛЬ БЛОЧНОГО НАНОСТРУКТУРУВАННЯ В МЕТАЛОПОЛІМЕРНОМУ ШАРІ**

**Бутенко В.І.** (ТТИ СФУ, м. Таганрог, Росія) [mkk@egf.tsure.ru](mailto:mkk@egf.tsure.ru)

**Анотація.** Розроблена енергетична модель блочного наноструктурування в металополімерному шарі, сформованому на контактних поверхнях деталей трибосистем. Одержані аналітичні залежності для визначення енергетичного стану та розмірів наноструктурних блоків, які дозволили одержати формули розрахунку коефіцієнта тертя при наявності на контактних поверхнях металополімерного наноструктурного шару.

**Ключові слова:** енергія, блок, дисіпація, флуктуація, хвильовий пакет

### **ENERGY MODEL OF BLOCK NANOSTRUCTURIZATION IN THE METAL-POLIMER LAYER**

**Butenko V.I.** (TIT SFedU, Taganrog, Russia)

**The Abstract.** The energy model of block nanostructurization was developed in the metal-polymer layer which is generated on the contact surface of tribosystems elements. The analytic form was found to define the energy state and dimensions of nanostructural blocks which helped to derive formulae for friction coefficient calculations in the presence of metal-polymer of metal-polymer nanostructural layer on contact surface.

**Key-words:** energy, block, dissipation, fluctuation, wave packet

Надійшла до редколегії 07.12.2010.