

Д.Н. Любимов¹, И.Ф. Пустовой², Н.И. Пустовой², Д.С. Мишарев³

¹ Южный Федеральный Университет, г. Ростов-на-Дону, Россия

² ООО «Реалинпроект», Санкт-Петербург, Россия

³ Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Санкт-Петербург, Россия, dmisharev@gmail.com

ОБРАЗОВАНИЕ АНТИФРИКЦИОННЫХ ПОВЕРХНОСТНЫХ СТРУКТУР В ГЕОМОДИФИЦИРОВАННЫХ ТРИБОСИСТЕМАХ

Аннотация

В статье рассмотрен вопрос развития особых структур на поверхностях фрикционного контакта в геомодифицированных трибосистемах. Геомодифицированные смазочные материалы используют абразивные частицы для механоактивации. На основе положений квантовой механики и физики твердого тела составлены зависимости, связывающие энергию закрепления частицы на поверхности трения с числом диссипативных центров, определяемым размерами частицы и работой сил трения. Установлено, что полученные зависимости согласуются с экспериментальными данными.

Ключевые слова: геомодификатор, трибосистема, адсорбция, сегрегационный кластер.

Введение

Одним из самых важных вопросов, когда-либо поставленных и решаемых современной теоретической трибологией, является вопрос рождения и развития на поверхностях фрикционного контакта особых структур, получивших обобщенное название «третье тело» [1]. При этом в ряде последних исследований в области трибофизики и трибохимии понятие «третье тело» отождествляется с трибосистемой, т.е. собственно изменениями и конечным результатом фрикционного взаимодействия материалов, составляющих соответственно трибосопряжение [2, 3].

Такое взаимодействие сопряжено с механоактивацией поверхностей материалов, составляющих фрикционный контакт трибосопряжения, характер которого определяется конкретными особенностями такого взаимодействия. В случае использования геомодифицированных смазочных материалов основным механизмом механоактивации является взаимодействие частиц состава геомодификатора, по сути являющихся абразивом, с поверхностного трения [4].

При ударе абразивной частицы о поверхность трения необходимо учитывать как упругие, так и пластические составляющие деформационного процесса. Степень механической деформации при таком виде взаимодействия определяется балансом между запасом потенциальной энергии упругого взаимодействия и энергией, затрачиваемой на необратимые процессы пластического деформирования среды. В этом случае отскок частиц от поверхности оказывается пренебрежимо мал, и она застревает в поверхности.

Теоретическая модель

Для взаимодействия абразивной частицы и поверхности трения параметр, называемый индексом пластичности Гринвуда-Вильямсона (ГВ) принимает значение в пределах от 0,5 до 1. Между величиной ГВ и индексом нормируемого внедрения, изменяющегося от 0,12 до 0,5, существует соотношение вида:

$$ГВ = \sqrt{2H_g}, \quad (1)$$

где H_g – параметр нормируемого внедрения [5].

При ударе частицы о поверхность трения часть её энергии затрачивается на деформирование материала, достаточную для упругопластического или чисто пластического деформирования. Величина, которая определяет значение энергии, отданной частицей веществу поверхности, получила название коэффициента энергетических потерь δ , равного [6]:

$$\delta = 1 - \frac{W_1}{W_0} = 1 - 4,1\Theta \frac{HB^{1,25} d^{0,75}}{m^{0,25} v_0^{0,5}}, \quad (2)$$

где W_0 , W_1 – кинематические энергии частицы до и после удара, HB – твердость частицы, d – диаметр частицы, m – масса частицы, v_0 – начальная скорость частицы.

$$\Theta = (1 - \nu)E, \quad (3)$$

где ν – коэффициент Пуассона материала частицы, E – модуль упругости частицы.

Основным требованием начального этапа взаимодействия твердой частицы с поверхностью трения является её закрепление на этой поверхности путем пластического деформирования материала фрикционного контакта [7]. Время взаимодействия частицы с пластичной средой определяется временем контактирования поверхностей трения в месте фактического контакта, что составляет значение $t_n = 10^{-6} - 10^{-3}$ с. Величина данного промежутка времени определяется геометрическими размерами частицы и параметрами деформируемой среды, плотностью ρ и твердостью HB [8]:

$$t_n = 0,644d \sqrt{\frac{\rho}{HB}}, \quad (4)$$

Соударение частицы со средой определяется энергетическими превращениями, сопровождающими данный процесс и отчасти представленными уравнением (1). В работе [7] показано, что в случае пластической деформации поверхности трения для закрепления на ней абразивной частицы последняя должна развивать скорость v_0 :

$$v_0^2 = \frac{10^{-3}}{m} \sqrt{N}, \quad (5)$$

где N – нагрузка на единичную частицу.

Считается, что при пластической деформации, обеспечивающей закрепление частицы в материале поверхности трения, вся её кинетическая энергия переходит во внутренние тепловые формы энергии и аккумулируется веществом поверхности трения. Величина данной энергии, исходя из уравнения (5), будет иметь значение:

$$W_n = 0,5 \cdot 10^{-3} \sqrt{N}, \quad (6)$$

где W_n – энергия деформации поверхности трения, сообщаемая ей в процессе соударения абразивной частицей.

Несомненно, какая-то часть энергии рассеивается при ударе и не вся она переходит в поверхность трения, что учитывается введением коэффициента δ из выражения (2), но и этой величины оказывается достаточно для механоактивации материала поверхности трения. Так или иначе, в поверхность трения «закачивается» значительное количество тепловой энергии, что приводит к выравниванию высот тепловых барьеров поверхностных активных центров и их сближению с величиной энергии фрикционного взаимодействия. Это позволяет рассматривать поверхностные системы в приближении слабых ван-дер-ваальсовых связей, а эмиссионные частицы как свободные физические системы [7].

В стационарном состоянии поверхность трения эквивалента (в термодинамическом смысле) адсорбенту, находящемуся в равновесном состоянии со своим паром. Саму же поверхность можно представить как совокупность ячеек с размером, равным частицы адсорбата. Энергия таких частиц создает определенное силовое поле [9], которое близко по своим характеристикам к ван-дер-ваальсовым взаимодействиям. Однако при увеличении температуры системы происходит разрушение структуры адсорбционного слоя, конечной формой которого становится высокоактивное состояние вещества – трибоплазма [10]. При этом поверхностные барьеры становятся убывающе малыми, а коэффициенты их прохождения стремятся к единице [7], что естественно облегчает образование химических связей, формирующих сильные адгезионные соединения контактирующих материалов.

Поверхность адсорбента удобно рассматривать как объект, называемый в квантовой физике «потенциальная яма» [11], причем имеющую только одно стационарное состояние. Причем в случае разделенности адсорбата и адсорбента их состояние описывается при помощи их собственных волновых функций [9], поскольку сохраняется индивидуальное электронное строение этих объектов. Однако при наличии диссипативных процессов, в которых атомы переходят в состояние адатома, эти волновые функции перекрываются и трансформируются в некоторую общую для всей системы волновую функцию, получившей название волновой функции сегрегационного кластера [12].

В соответствии с основными представлениями квантовой физики [11] сегрегационный кластер можно рассматривать как некую единую дебройлевскую волну, занимающую всё или частично пространство «потенциальной ямы», размером от 0 до a . Тогда в соответствии с условиями квантования Бора-Зоммерфельда в форме [11] для кластера можно записать следующее выражение:

$$\int_0^a p dx = 2\pi\hbar \left(n + \frac{1}{2} \right), \quad (7)$$

где p – импульс системы кластера, a – линейные размеры кластера, \hbar – постоянная Планка, n – главное квантовое число.

Поскольку в соответствии с изложенным выше потенциальная яма, в которой формируется сегрегационный кластер, содержит единственное связанное решение, соответствующее минимальному значению энергии, то величина квантового числа n в уравнении (7) принимается равным 1. Тогда в соответствии с уравнением де Бройля:

$$p = \hbar k, \quad (8)$$

где k – волновое число, выражение (7) преобразуется к виду:

$$ka = 3\pi, \quad (9)$$

а поскольку в соответствии с [11] значение волнового числа определяется при решении уравнения Шредингера из выражения:

$$k = \hbar^{-1} [2m(u - w)]^{\frac{1}{2}}, \quad (10)$$

где m – эффективная масса кластера, w – энергия кластера, u – глубина потенциальной ямы.

Подставляя значение k из уравнения (10) в равенство (9), получается выражение, определяющее размер потенциальной ямы, соответствующей предельной величине сегрегационного кластера:

$$a = \frac{3\pi\hbar}{[2m(u - w)]^{\frac{1}{2}}} \quad (11)$$

Формирование кластера вследствие взаимодействия отдельных частиц с поверхностью адгезионного центра – потенциальной ямы, представляет собой сложный динамический процесс, который можно описать с использованием вариационных уравнений классической и квантовой механики [11, 13]. Используя уравнение Гамильтона и принцип неопределённости Гейзенберга можно прийти к достаточно простому выражению для времени релаксации процесса формирования кластера:

$$\tau = \frac{\hbar}{|u - w|}, \quad (12)$$

значение времени τ лимитируется величиной t_n (4), соответственно выполняется следующее условие нормировки:

$$\tau \leq t_n, \quad (13)$$

В соответствии с принципом наименьшего действия [13] разность энергий $|u - w|$ стремится за фиксированный промежуток времени к своему минимальному значению, что соответствует увеличению времени τ , что может объясняться как стремление системы кластера к стабильному состоянию. Подстановкой значения $|u - w|$ из уравнения (12) в формулу (11) можно получить искомое выражение для размера сегрегационного кластера:

$$a = 3\pi \left(\frac{\hbar\tau}{2m} \right)^{\frac{1}{2}}, \quad (14)$$

или с учетом уравнения (4):

$$a \leq 1,7\pi \left(\frac{d}{m} \right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{\rho}{HB} \right)^{\frac{1}{4}}, \quad (15)$$

Размеры кластера оказываются в обратно пропорциональной зависимости от его эффективной массы. Подобная особенность строения формируемого частицами кластера сближает его с солитоном [14]. В пользу подобной гипотезы говорит тот факт, что, как отмечалось в монографии [9], стремление физической системы к минимуму энергии, т.е. дну потенциальной ямы, обеспечивает ей уплотнение в полном соответствии с уравнением (14). Подобная область с высокой плотностью вещества и является солитоном [9]. Поскольку солитоны отталкиваются друг от друга, они образуют регулярную структуру «цепного типа», которая способна растягивать подложку адсорбента. Представление о солитонах, в свою очередь, позволяет конкретизировать поведение кластеров, формируемых на поверхностях трения.

В трехмерном пространстве энергия солитонов локализуется в направлении, перпендикулярном их движению, а анализ уравнений нелинейной динамики, описывающих поведение подобных физических объектов, указывает на

значительную устойчивость подобных структур. Необходимо отметить, что сам кластер, скорее всего, соответствует мезоразмерной физической системе. Однако элементы, из которых он образуется, имеют микро- или даже наноразмерную природу. Каждый из таких элементов представляет диссипативный центр с характерным размером R , который, по сути, является микрохимическим трибореактором [15]. В соответствии с работами [15, 16] величина R определяется из выражения:

$$R = 10^3 \frac{\hbar N}{A}, \quad (16)$$

где N – число диссипативных центров, A – работа сил трения.

Если считать, что кластер размера a состоит из отдельных диссипативных центров, тогда:

$$a = R \cdot N = 10^3 \frac{\hbar}{A} N^2, \quad (17)$$

а число N :

$$N = \left[10^{-3} \frac{aA}{\hbar} \right]^{\frac{1}{2}}, \quad (18)$$

Величина N из уравнения (18) представляет собой предельное значение количества составляющих кластера, заполняющего единичный адгезионный центр и, в свою очередь, являющегося «элементарной ячейкой» поверхностной пленки – основного компонента третьего тела. При этом достаточно простые расчеты позволяют оценить способность исходного материала, сосредоточенного в абразивной частице, к формированию адгезионных связей с поверхностью трения.

Можно использовать известные соотношения из молекулярно-кинетической теории вещества и рассмотреть отдельную абразивную частицу в виде сферы диаметром 10 мкм и плотностью 2,55 кг/м³. С одной стороны, это соответствует наиболее часто применяемому в данном случае серпентиту, а с другой стороны, позволяет оценить количество молекул в единичной абразивной частицы. В соответствии с формулой (6), одна молекула серпентита передает поверхности трения около 30 эВ при нагрузке в 1 Н. Можно также убедиться, что при рабочих нагрузках до 50 Н, данная энергия увеличивается до 1 кэВ. Исследование же поверхности стали после её взаимодействия с частицами серпентита при помощи рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии обнаружело образование химических связей между атомами железа поверхности контртела и молекулами серпентита, лежащими как раз в диапазоне 700-740 эВ [7].

Заключение

В трибофизике и трибохимии «третье тело» отождествляется с трибосистемой. Взаимодействие частиц геомодификатора с поверхностями трения приводит к механоактивации. Степень деформации определяется балансом упругой и пластической энергии. Для закрепления частицы на поверхности трения она должна развивать определенную скорость, т.е. обладать определённым количеством энергии. Простые расчеты позволяют оценить способность абразивных частиц к формированию адгезионных связей с поверхностью трения. Так, абразивная частица серпентита при рабочих нагрузках передает поверхности до 1 кэВ. При этом, экспериментально показано, что между железом и серпентином образуются химические связи в диапазоне 700-740 эВ. Следовательно, энергия трения

оказывается достаточной для образования устойчивых поверхностных структур, а их «квантовый» механизм формирования обеспечивает их стабильность по отношению к внешним условиям.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Справочник по триботехнике : в 3 т. / под общ. ред. М. Хебды, А. В. Чичинадзе. - Москва: Машиностроение; Варшава: ВКЛ, 1989 - ISBN 5-217-00688-8
2. Любимов, Д. Н. Единая квантовая модель трения / Д. Н. Любимов, К. Н. Долгополов, Э. Л. Мельников // Ремонт. Восстановление. Модернизация. - 2017. - № 3. - С. 26-30. - EDN YGAGRВ.
3. Любимов, Д. Н. Фундаментальные основы эволюции трибосистем: монография / Д. Н. Любимов, К. Н. Долгополов; М-во образования и науки Российской Федерации, Федеральное гос. бюджетное образовательное учреждение высш. проф. образования "Южно-Российский гос. ун-т экономики и сервиса" (ФГБОУ ВПО "ЮРГУЭС"). - Шахты: ЮРГУЭС, 2011. - 94 с. - ISBN 978-5-93834-683-3. - EDN QNDBPВ.
4. Трибология геомодифицированных смазочных материалов: монография / К. Н. Долгополов, В. Л. Потеха, Д. Н. Любимов; рец.: В. Г. Барсуков, Т. П. Троцкая; Министерство сельского хозяйства и продовольствия Республики Беларусь, Учреждение образования "Гродненский государственный аграрный университет". - Гродно: ГГАУ, 2014. - 429 с.: табл., рис. - Библиогр. в конце глав. - Предм. указ.: с. 429. - ISBN 978-985-537-034-6.
5. Дадали, А.А. Энергетика процесса сдвиговой деформации твердого тела / А.А. Дадали, И.П. Ластенко // XI Всесоюзный симпозиум по механохимии и механоэмиссии твердых тел. Чернигов. - 1990 - Т.1. - С. 24-25
6. Петриченко, А.М. К расчету коэффициента потерь энергии при ударе абразивной сферической твердой частицы о плоскую поверхность материала / А.М. Петриченко, Нгуэн Хонг Зы, М.В. Можаров // Трение и износ - 1990 - Т.11. - №1 - С. 57-61
7. Квантовая трибофизика: монография / Д. Н. Любимов, Л. С. Пинчук, К. Н. Долгополов; М-во образования и науки Российской Федерации, Федеральное гос. авт. образовательное учреждение высш. проф. образования "Южный федеральный ун-т". - Ростов-на-Дону: Изд-во Южного федерального ун-та, 2012. - 292 с.: ил.: 20 см.; ISBN 978-5-9275-1013-9.
8. Трибохимические аспекты взаимодействия высокодисперсных частиц серпентинов с металлической поверхностью трения / К. Н. Долгополов, Д. Н. Любимов, А. Т. Козаков [и др.] // Трение и износ. - 2012. - Т. 33, № 2. - С. 141-148. - EDN OWMZBF
9. Физика поверхности / Э. Зенгуил; Пер. с англ. С. А. Венкстерна и др.; Под ред. В. Ф. Киселева. - М.: Мир, 1990. - 536 с. : ил. - Пер. изд.: Physics at surfaces / A. Zangwill. - Cambridge et al., 1988.
10. Хайнике, Герхард. Трибохимия / Г. Хайнике; Пер. с англ. М. Г. Гольдфельда; [Предисл. П. Бутягина]. - Москва: Мир, 1987. - 582 с. - ISBN (В пер.).
11. Теоретическая физика: Т.3. Квантовая механика. Нерелятивистская теория / Л.Д.Ландау и Е.М.Лифшиц. - М.: Наука, Гл. ред. физ.-мат. лит., 1989. - 767 с.
12. Колесников, И. В. Системный анализ и синтез процессов, происходящих в металлополимерных узлах трения фрикционного и антифрикционного назначения: монография / И. В. Колесников; отв. ред. Резер Семен Моисеевич; Российская академия наук. - Москва: Всероссийский институт научной и технической информации РАН, 2017. - 381 с. - ISBN 978-5-902928-72-0. - EDN NBFFIT.
13. Теоретическая физика: Т.1. Механика / Л.Д.Ландау и Е.М.Лифшиц. - М.: Наука, Гл. ред. физ.-мат. лит., 1973. - 207 с.
14. Любимов, Д.Н. Введение в нелинейную механику трибосистем: монография / Д.Н. Любимов, В.Л. Потеха; кол. авт. Гродненский государственный аграрный университет. - Гродно: ГГАУ, 2016. - 333 с. - ISBN 978-985-537-088-9

15. Структура смазочных слоев, формирующихся при трении в присутствии присадок минеральных модификаторов трения / К. Н. Долгополов, Д. Н. Любимов, А. Г. Пономаренко [и др.] // Трение и износ. - 2009. - Т. 30, № 5. - С. 516-521. – EDN KYMVLB.

D.N. Lyubivov¹, I.F. Pustovoi², N.I. Pustovoi², D.S. Misharev³

¹ Southern Federal University, Rostov-on-Don, Russia

² ООО «Realinproekt», Saint Petersburg, Russia

³Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University,
Saint Petersburg, Russia, dmisharev@gmail.com

FORMATION OF ANTIFRICTION SURFACE STRUCTURES IN GEOMODIFIED TRIBOSYSTEMS

Abstract

The paper considers the development of special structures on friction contact surfaces in geomodified tribosystems. Geomodified lubricants use abrasive particles for mechanoactivation. On the basis of the statements of quantum mechanics and solid state physics, the dependences linking the energy of particle fixation on the friction surface with the number of dissipative centers determined by the particle size and the work of friction forces have been compiled. It is established that the obtained dependences agree with experimental data.

Keywords: geomodifier, tribosystem, adsorbtion, segregation cluster.