

УДК 621.7539.37; 621.891

С.В.Фёдоров, д. т. н., проф.

ФГОУ ВПО «Калининградский государственный технический университет», г. Калининград, РФ

## НАНО-КВАНТОВАЯ, СТРУКТУРНАЯ СВЕРХПЛАСТИЧНОСТЬ ПРИ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ И ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИЕ ТЕХНОЛОГИИ ОМД

---

*Пропонується узагальнена теоретична двох-стадійна модель існування деформації при холодній обробці металів тиском з точки зору ефектів самоорганізації твердих тел. Показані можливості створення енерго- та матеріалозберігаючих технологій обробки металів тиском з позицій наноквантової моделі пластичності.*

*It is proposed a generalized theoretical two-stages model of the metals deformation under cold pressure treatment with point of view of the solids selforganization effects. With position of the nanoquanta plasticity model, the possibilities of creation the energy and material saving technologies of the metals cold pressure treatment has showed.*

---

### Введение

Общеизвестны преимущества холодной обработки металлов давлением. Первостепенное значение этого преимущества заключается в возможности получения комплекса высоких механических свойств изделий как технологических, так и эксплуатационных; минимизации потерь металла на предварительных (подготовительных) технологических этапах процесса вследствие нагрева и сопутствующих ему процессов; сокращению рабочего времени; упрощению совокупной технологической оснастки и оборудования и много другого, что справедливо ставит эти технологии в ряд перспективных – энерго- и материалосберегающих. Однако, естественно, существует ряд проблем ограничивающих возможности более интенсивного и широкого внедрения и использования этих уникальных технологий. Наиболее очевидны здесь проблемы создания высоких усилий деформирования и соответственно высокопрочной технологической оснастки, устранению побочных явлений – трения и т.д. Главным тормозом здесь, по нашему мнению, является проблема недостаточной изученности этих уникальных (естественных) технологий, и именно в рамках современного взгляда на все эти процессы, как процессы (технологии) самоорганизующиеся, которые подчиняются строго определённым и общим законам эволюции систем при переходе от начального состояния к конечному (оптимальному) через промежуточное сильновозбужденное (механически активированное) состояние с реализацией своего естественного свойства приспособления (адаптации) к уровню внешних условий (воздействий). При этом самоорганизующиеся технологии действительно уникальны и перспективны (технологии будущего) в силу, реализации в них естественного (заложенного природой) комплекса свойств, и, конечно, наиболее экономны (рациональны), ибо естественные природные феномены обладают высшей степенью оптимальности с точки зрения энерго-материального баланса (существа).

Как известно, главным преимущественным фактором операций холодной обработки металлов давлением является схема неравномерного всестороннего сжатия, благодаря коей и появляется возможность получать высокие степени пластической деформации без разрушения, и это же есть суть получения высокого комплекса эксплуатационных свойств изделия.

Посмотреть более широко на эту схему и условия деформирования, используя современные фундаментальные знания, можно, например, вспомнив схему сдвига при высоком приближённо гидростатическом давлении, капитально исследованную П. Бриджменом [1], на так называемых наковальнях, получивших его имя, где он исследовал большие пластические деформации. Результаты этих исследований в полной мере относятся к рассматриваемому вопросу и описывают практически все те же эффекты положительного и отрицательного свойства, что имеют место в реальных технологиях.

В данной статье кратко и весьма популярно рассказано об основных результатах исследования состояния и свойств деформируемого контакта трения в рамках трибоэргодинамики [2] и которые достаточно близко отражают существо поведения активных шарниров деформации при ОМД, именно при технологиях холодной деформации.

Трибоэргодинамика, как аксиоматический метод анализа трения скольжения, есть синтез (к проблеме деформирования при трении в рамках современных знаний трибологии) наиболее общих законов термодинамики необратимых процессов, молекулярной кинетики и теории дислокаций в их взаимной, диалектической связи на базе наиболее общего закона природы – закона о сохранении энергии при ее превращениях. Сама трибоэргодинамика является логическим развитием общей эргодинамики деформируемых тел [2] на область процессов поверхностного деформирования и разрушения.

### Тезисы модели трения

В рамках трибоэргодинамики [2] модель упруго-пластической деформации контактных объёмов представляет обобщенный механизм трансформации и рассеяния энергии и определяет существо сопротивления перемещению поверхностей.

Трение рассматривается как глобальный (энергетический) феномен трансформации относительного движения.

Трение строго подчиняется уравнению энергетического баланса и с термодинамической точки зрения представляет собой конкуренцию двух одновременно действующих, взаимосвязанных и противоположных тенденций:

$$f = \frac{\Delta U_e}{Nl} + \frac{Q}{Nl} = \frac{\Delta U_e}{Nl} + \frac{\Delta U_T}{Nl} + \frac{\bar{Q}}{Nl} = f_{adapt} + f_{dis} = f_{adapt} + f'_{disT} + f_{dis\bar{Q}}, \quad (1)$$

накопления скрытой (потенциальной) энергии  $\Delta U_e$  различного рода дефектов и повреждений структуры контактных объёмов и её высвобождения (рассеяния)  $Q$  за счет протекания различного рода релаксационных процессов.

Здесь  $N, l$  - нагрузка и путь трения;  $f$  - коэффициент трения;  $f_{adapt}$  - адаптивный (Амонтона) коэффициент трения;  $f_{disT}$  и  $f_{dis\bar{Q}}$  - статическая и динамическая компоненты диссипативного коэффициента трения;  $\Delta U_T$  - тепловая компонента внутренней энергии;

Первая тенденция определяет эффект деформационного упрочнения и интегрально характеризует меру повреждаемости (параметр состояния); вторая тенденция определяет тепловой эффект трения  $Q$  и ответственна за квазивязкую составляющую процесса.

Коэффициент трения в его энергетической интерпретации есть отношение накопленной скрытой энергии деформации к работе внешних сил, и является истинным и обобщенным параметром состояния трибосистемы:

$$f = \frac{\Delta U_{э}}{f^* Nl}; \quad f^* = 1,0, \quad Q \cong 0. \quad (2)$$

Эволюция трибосистемы, представленная в виде диаграммы (рис.), имеет адаптивно-диссипативный характер (1) и отражает конкурентную (диалектическую) природу трения.

Эволюционная кривая имеет ряд принципиальных точек (1,2,3,4,5) переходных состояний ТС, которые строго подчинены балансовому принципу трения; между этими точками существуют наиболее характерные области поведения трибосистемы, отражающие общие свойства её нелинейной динамики.

Идеальная эволюция трибосистемы симметрична. Процесс начинается и заканчивается в областях упругого поведения. Между ними существует пластический максимум (сильновозбужденное состояние) как существо самоорганизации и приспособления. На конечном этапе эволюции упругость существует в условиях именно вязкопластической деформации.

На первом этапе адаптации эволюция контакта трения устремляется к возникновению некоторого критического объёма трения  $V_f^*$  (точка 2) - элементарной трибосистемы (адекватного понятию о равновесной шероховатости) как существа элементарного и самостоятельного трансформатора энергии; по существу – это то, что мы называем материальной точкой механики.

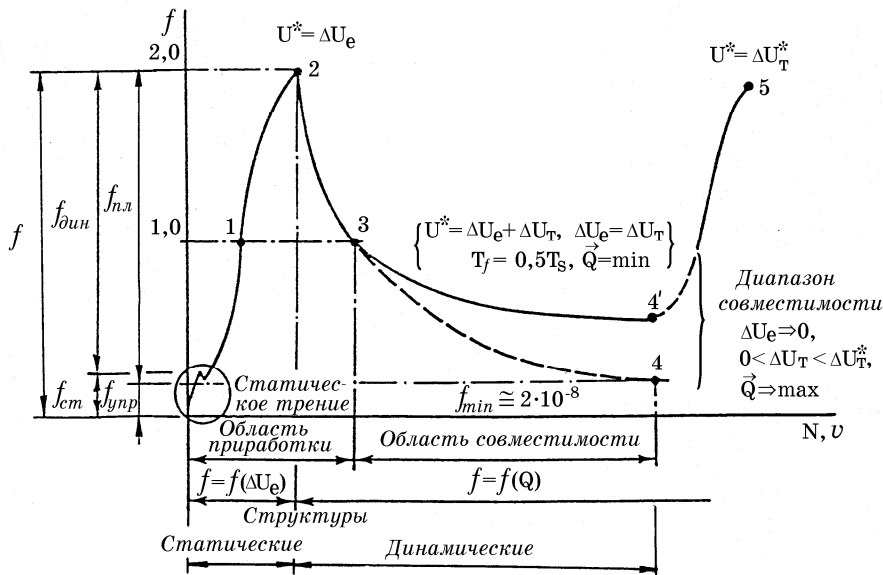


Рис. Структурно-энергетическая диаграмма эволюции трущихся поверхностей [2].

Этот объём трения  $V_f^*$  постоянен на втором этапе эволюции и здесь он эволюционно развивается за счет структурной трансформации, реализуя возможный широкий спектр совместимых структур трения.

Кульминацией эволюции ТС является ее конечное и предельное состояние точки 4 – состояние аномально-низкого трения и безызносности (максимальной работоспособности).

### Идея механического (нано) кванта

Итогом эволюции элементарной трибосистемы является образование уникальной наноструктуры, основу которой представляет механический квант [2].

Запись уравнения энерго-энтропийного баланса даёт уравнение квазиидеального твёрдого тела (контактного объёма) при трении:

$$\bar{S}_T T = f_{dis} N l_f = V_f^* u_e^* = V_f^* \bar{q}_* \quad (3)$$

Здесь  $\bar{S}_T$  и  $T$  - энтропия динамической диссипации и температура на статическом осцилляторе [2] (температура вспышки) элементарной трибосистемы;  $N$  и  $l_f$  - нагрузка и линейный размер элементарной трибосистемы;  $u_e^*$  и  $\bar{q}_*$  - критические плотности скрытой энергии и энергии динамической диссипации элементарной трибосистемы.

Решение этого уравнения [2] определяет параметр вероятности этого состояния -  $W = e^3$ , которое характеризует минимальные размерные параметры трибосистемы (ТПС) - механического кванта. Механический квант представляет собой минимальное число атомов, способных обеспечить такое их конфигурационное распределение (наноструктуру), которое обладает свойством обратимо воспринимать и рассеивать (возвращать) энергию внешнего механического движения. Он также представляет собой наименьшее структурное образование материального твёрдого тела в условиях пластической деформации и образуется при переходе трибосистемы (контактного объёма) через предельно активированное (критическое) состояние вследствие развития самоорганизационных процессов адаптации трибосистемы.

Универсальный размер (объём) механического кванта равен:

$$V_Q = (e^3)^3 = (20,08553695)^3 = 8103,083969 \text{ атомных осцилляторов.}$$

Механический квант сам по себе является динамическим осциллятором диссипативных структур трения и его линейный размер равен радиусу сферического идеального кристалла:

$$D_Q = 2R_{MQ} = \sqrt[3]{\frac{3 \cdot W^3 d_a^3}{4 \cdot \pi}} = 7,177 \text{ нм} \quad (4)$$

Здесь  $d_a$  - средний атомный диаметр.

Собственно механический квант следует рассматривать как элементарную наноструктуру металлического твёрдого тела [4].

В объёме элементарной трибосистемы (равновесной шероховатости) количество таких механических квантов (трибосистем) равно, примерно,  $n_* = 0,63 \cdot 10^8$ , т.е. безопасному числу циклов усталости.

Размер элементарной трибосистемы определяется универсальной константой:

$$R_f = k \cdot N_f = R_{MQ} \cdot N_Q = R_{MQ} \cdot 2\pi \cdot 10^7, \quad (5)$$

которая характеризует энергетический размер одной элементарной трибосистемы.

Здесь  $R_{MQ} = k \cdot 8103,085 \dots \dots \frac{\text{Дж}}{\text{град} \cdot MQ}$ ;  $R_f = R_{MQ} \cdot N_Q \frac{\text{Дж}}{\text{град} \cdot TS}$ ;  $k$  - постоянная Больцмана;  $N_f$  - число

атомов в объёме элементарной трибосистемы;  $N_Q$  - количество механических квантов (трибосистем) в одной элементарной трибосистеме. Для всех материалов, в условиях идеальной эволюции трибосистемы, количество атомов (механических квантов ( $MQ$ )) в объёме одной элементарной трибосистеме ( $TS$ ) величина постоянная. Таким образом, можно говорить о количестве вещества, равного по массе, одной элементарной трибосистеме (одному механическому кванту).

### Синергизм трибосистемы и оптимальность состояния

Идеальное, квазиупругое состояние контакта при его полной эволюции представляет собой эффект наиболее полного рассеяния энергии внешнего механического движения по вновь образованным (по механизму самоорганизации в окрестности критического состояния) структурным элементам - механическим квантам (динамическим осцилляторам), которые реализуют наиболее полное ротационно-колебательное их поведение относительно друг друга в объёме элементарной трибосистемы. При этом сопротивление их относительно взаимодействию минимально - упруго и соответствует упругости идеальных атомарных (термодинамически равновесных) взаимодействий на уровне электронных оболочек.

Универсальные константы механического кванта и элементарной трибосистемы (материальной точки) определяют как квантовую модель демпфирования поверхностей

$$f_{dis} = \frac{3R_{MQ} T n_i}{N l_f} = \frac{U_{1Q} n_i}{U_{1Q} n_*} = \frac{n_i}{n_*} = 1 - f_{adapt}; \quad f = 1 - \frac{n_i}{n_*} = \frac{n_{dest}}{n_*}, \quad (6)$$

учитывающей кванты разрушения  $n_{dest}$  (необратимая компонента процесса) и кванты демпфирования  $n_i$  (обратимая, упругая компонента (число усталости)), так и вероятностную модель эволюции трибосистемы к наиболее упорядоченному состоянию

$$f_{adapt} = 1 - f_{dis} = 1 - \frac{R_f T \ln W_i}{N l_f} = 1 - \frac{\ln W_i}{\ln W_*} \quad (7)$$

Здесь  $R_{MQ}$  - постоянная деформирования (трения);  $3R_{MQ}T = U_{1Q}$  - энергия одного механического кванта;  $W_i$  и  $W_*$  - текущая и предельная вероятности состояний совместимых трибосистем.

Согласно модели квантового демпфирования поверхностей при трении в условиях наиболее полной эволюции (адаптации) элементарной трибосистемы все механические кванты, за исключением одного, упруго и обратимо трансформируют энергию внешнего воздействия (механического движения). Один механический квант излучения ( $\cong 8103$  атомов) – есть минимальная потеря (существо безызносности).

Рассмотрены [2] физические и количественные закономерности формирования совместимого трения диссипативных структур, обладающих долговечностью пропорциональной числу циклов нагружения  $(1 \div 0,63 \cdot 10^8)$  элементарной трибосистемы до предельного состояния. В области диапазона совместимости (рис.) существует набор дискретных уровней совместимого трения, подчиняющихся квантовой модели демпфирования поверхностей. Эти уровни квантово различаются по степени рассеяния энергии по структурным элементам диссипативных структур, обладающих возрастающей степенью фрактально-геометрического их совершенства, в направлении к точке идеально-упругого (аномально-низкого) трения (т.4).

Учитывая принцип квантовых уровней  $L_n$  совместимого трения, степень совершенства диссипативных структур трения в области совместимости, возможно оценивать, сопоставляя развороты структурных элементов в пропорции к полному обороту (осцилляции) механического (нано) кванта, т.е.  $360^\circ / L_i = \varphi_i^\circ$  - элементарный фрактальный (видимо, по дисклинационному (ротационному механизму)) угол разворота структурных элементов при квазивязкой, упруго-пластической деформации объема трения.

Здесь можно говорить о синергизме при эволюции трения, который проявляется в возникновении действительно новых свойств у целого, элементарной трибосистемы, образованной в т.2 – центре самоорганизационных процессов. Эти новые свойства есть существо коллективного, действительно совместного, взаимодействия совокупности механических (нано) квантов в т.4 идеальной эволюции трибосистемы. Нанокванты как трибосистемы в их упругом взаимодействии реализуют наивысшую совместимость трибоматериалов и соответственно максимум долговечности элементарной трибосистемы. Механический квант являет собой именно асимптотически устойчивый аттрактор типа предельного цикла для деформируемого твёрдого тела. Он действительно представляет предел в структурной эволюции твёрдого тела и характеризует предельную долговечность рабочего цикла трущейся пары.

### Принципиальная основа естественных нанотехнологий холодной обработки давлением

В соответствии с вышеупомянутой исходной информацией, с учетом кинетического уравнения пластической деформации [4], процесс эволюции (адаптации) деформируемой системы в условиях операций холодной обработки металлов давлением, условно, в наиболее общем случае, можно представить в виде двух этапов.

Первый этап деформации – этап накопления скрытой энергии деформации до состояния предразрушения – близкого к критической плотности скрытой энергии  $u_e^*$ . По мере возрастания в деформируемых объемах материала плотности скрытой энергии  $u_e$  (упрочнение – механическая активация), скорость процесса деформационного упрочнения уменьшается и асимптотически стремится к нулю. При этом объемы деформируемого металла характеризуются максимальным упрочнением  $(u_e \cong u_e^*)$ . Достигается предельно неустойчивое термодинамическое состояние – точка бифуркации. Обычно далее эволюция в системе может «раздвоиться». Первый путь - это разрушение деформируемого объема. Второй - это путь естественно эволюционный и наиболее благоприятный – реализовать диссипативный процесс и приспособиться к внешним условиям. Тем более, что система находится в условиях именно благоприятствующих развитию второго пути эволюции -- неравномерного всестороннего сжатия. В соответствии с кинетическим уравнением пластической деформации [4] может иметь место второй этап адаптации системы, связанный с высвобождением накопленной скрытой энергии деформации. Скорость процессов, контролирующая динамический возврат, при этом асимптотически возрастает. Процесс протекает скачкообразно – флуктуация в макрообъеме. Устанавливается новое квазиравновесное состояние, соответствующее внешним условиям. Такой характер поведения тела под действием приложенных внешних сил имеет место, например, при стационарном течении вязких жидкостей, установившейся ползучести металлов и др., когда структурное (следовательно, термодинамическое) состояние элемента тела не изменяется.

Перестраиваясь эстафетно между двумя смежными состояниями (структурами), деформируемый объем испытывает пластическое течение как диссипативный процесс. Осуществляемая в ходе интенсивных диссипативных (релаксационных) процессов, самоорганизация структуры приводит к адаптации системы к условиям внешнего воздействия и повышению её работоспособности.

При наиболее развитом процессе возможно получение схемы деформации, описанной выше для наноквантового состояния, т.е. когда будет иметь место идеальная структурная сверхпластичность – высокая степень эффективности процесса и высокие свойства изделия.

Таким образом, мы видим, что в реальных схемах холодной обработки металлов давлением уже органически заложен принцип возможности реализации свойства самоорганизации деформируемых тел. Естественно, что главной задачей современных технологий, основанных на том свойстве, является задача оптимизации процесса управления такими технологиями [5] с целью получения заданного комплекса эксплуатационных свойств путём создания сильно возбуждённого состояния с последующей трансформацией его в приспособившуюся (оптимальную) структуру. И здесь же, в первую очередь, стоит задача более глубокого всестороннего исследования комплекса состояний и свойств самой деформируемой системы в этих условиях. Только лишь в таком случае возможно решение полной задачи состояния высокопроизводительных энерго- и материалосберегающих технологий.

#### Список литературы

1. Бриджмен П. Исследование больших пластических деформаций и разрыва.-М.: Изд. Иностранная литература, 1995.-444 с.
2. Фёдоров С.В. Основы трибоэргодинамики и физико-химические предпосылки теории совместимости.- Калининград: КГТУ,2003. – 415с.
3. Фёдоров В.В. Эргодинамическая концепция разрушения // Проблемы прочности, 1991.-№8.-С.48-58, №10.-С. 31-35.
4. Fedorov S.V. The Mechanical Quantum of Dissipative Friction Structures is the Elementary Tribonanostructure/ Proceedings of World Tribology Congress 2009 (6-11 September 2009): Japanese Society of Tribologists.- Kyoto, Japan.p. 926.
5. Фёдоров С.В., Сабол С.Ф., Ревенко В.В. Об оптимальном использовании свойства самоорганизации деформируемых тел и управлении операциями холодной обработки давлением / Инженерные проблемы трения, смазки, изнашивания. Сб. науч. работ. Вып.48., Калининград БГАРФ, 2001, С.59-86.