

положительной работы – вязкопластическое течение формообразования. В условиях трения – это идеальный сдвиг с реализацией аномально-низкого сопротивления и естественно безизносность.

Конечно, автор достаточно хорошо понимает, что специалисты в области механики пластичности, применительно к процессам обработки материалов давлением могут возразить о неполной применимости данной модели внешнего трения к процессам объемной деформации. Действительно, размер области деформации при ОМД значителен по своему объему и многократно превышает контактные объемы трения. Модель деформации в активной ее области при ОМД более традиционно, видимо, описывается в аспекте внутреннего трения, подобно поведению вязких жидкостей с низкими коэффициентами вязкости.

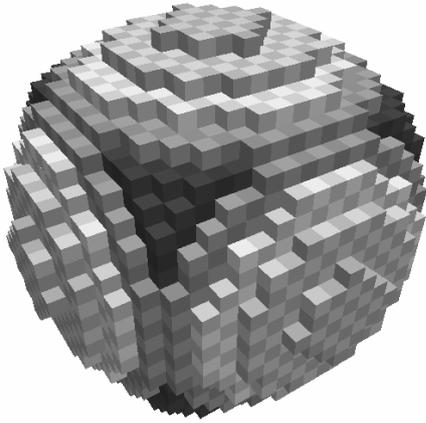


Рис. 2. Модель кристалла элементарной наноструктуры трения – механический квант, состоящий из 8103 атомных осцилляторов [5]

Однако, если учесть сдвиговую, условно слоистую модель поведения вязких сред, то здесь автор предлагает провести аналогию элементарного сдвига между слоями вязкого тела с моделью сдвига, присущего упруго-вязкопластического состояния контакта трения. Автор полагает, что здесь может быть допустимая аналогия с достаточной степенью корреляции.

Поэтому, рассматривая предложенную ранее модель эволюции трибосистемы, хотелось бы дополнить ее энергетическим анализом состояний деформируемого объема трения, претерпевающих переходы через принципиальные точки эволюции (эксплуатации).

Кратко о модели трения. В рамках трибоэродинамики [2] модель упруго-пластической деформации контактных объемов 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: накопления скрытой (потенциальной) энергии ΔU_e различного рода дефектов и повреждений структуры контактных объемов и её высвобождения (рассеяния) Q за счет протекания различного рода релаксационных процессов.

Основу обобщенного анализа трения составляют уравнения энергетического баланса трения: для работы и мощности трения

$$W_f = \Delta U_e + Q = \Delta U_{e1} + \Delta U_{e2} + \Delta U_{T1} + \Delta U_{T2} + \bar{Q}_1 + \bar{Q}_2, \quad (1)$$

$$\dot{W}_f = \dot{U}_e + \dot{Q} = \dot{U}_{e1} + \dot{U}_{e2} + \dot{U}_{T1} + \dot{U}_{T2} + \dot{Q}_1 + \dot{Q}_2 \quad (2)$$

силы трения

$$F_l = \frac{\Delta U_e}{l} + \frac{Q}{l} = \frac{\Delta U_{e1} + \Delta U_{e2}}{l} + \frac{Q_1 + Q_2}{l} \quad (3)$$

$$F_v = \frac{\dot{U}_{e1} + \dot{U}_{e2}}{v} + \frac{\dot{Q}_1 + \dot{Q}_2}{v} = F_{mechanical} + F_{molecular} \quad (4)$$

и коэффициента трения

$$\mu_l = \frac{\Delta U_{e1} + \Delta U_{e2}}{Nl} + \frac{Q_1 + Q_2}{Nl} = \mu_{adapt} + \mu_{dis} = \mu_{adapt} + \mu_{disT} + \mu_{dis\bar{Q}} \quad (5)$$

$$\mu_v = \frac{\dot{U}_{e1} + \dot{U}_{e2}}{Nv} + \frac{\dot{Q}_1 + \dot{Q}_2}{Nv} = \mu_{deformation} + \mu_{adhesion} \quad (6)$$

Здесь $\Delta U_e = V_f \Delta u_e$, $\dot{U}_e = V_f \dot{u}_e$ - изменение и скорость изменения скрытой энергии в деформируемом объеме; $Q = V_f q$, $\dot{Q} = V_f \dot{q}$ - тепловой эффект трения и его мощность; Δu_e ; $\dot{u}_e = du_e/dt$ - плотность и скорость изменения плотности скрытой энергии в контактных объемах; q , \dot{q} - плотность теплового эффекта (диссипации) и его интенсивность; V_f - деформируемый (трения) объем; μ_{adapt} ; μ_{dis} - адаптивный (Леонардо да Винчи) и диссипативный коэффициенты трения; μ_{disT} ; $\mu_{dis\bar{Q}}$ - статическая и динамическая компоненты диссипативного коэффициента трения; N, l - нагрузка и путь трения; ΔU_T - тепловая компонента внутренней энергии;

Уравнения энергетического баланса трения (в данном случае для трения без смазки) как обобщенные уравнения трения адекватны современным двойственным представлениям о трении – молекулярно-механической [7] и деформационно-адгезионной [8] теориям трения.

Как следует из (1)-(6) первая тенденция процесса 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:

$$\mu = \frac{\Delta U_e \Sigma}{\mu^* N l} = \frac{F}{N}, \mu^* = 1,0, Q \cong 0 \quad (7)$$

Таким образом, анализ закономерностей трения – это анализ закономерностей изменения накопленной скрытой энергии деформации или же коэффициента трения (рис. 1).

Эволюция трибосистемы, представленная в виде диаграммы (рис. 1), 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 [2, 9], которые строго подчинены балансовому принципу трения; между этими точками существуют наиболее характерные области поведения трибосистемы, отражающие общие свойства её нелинейной динамики.

На рис.1 можно видеть следующие условно обозначенные точки и этапы: 0-1 - участок статического трения и деформационного упрочнения; 1 - точка предельного деформационного упрочнения; 1-2 - участок накачки избыточной энергии; 2 - точка схватывания и перехода внешнего трения во внутреннее (критической неустойчивости); 2-3 - участок образования диссипативных структур; 3 - точка минимальной совместимости (максимальной фрикционности); 1-2-3 - область приспособления (адаптации) и самоорганизации; 3-4 - участок совместимости; 4 - точка безызносности (аномально-низкого трения); 5 - точка термического схватывания.

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. Завершается этап накоплением скрытой энергии с критической плотностью Δu_e^* .

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 (диапазон совместимости (рис. 1)). Условно, мы имеем уменьшение доли адаптивного объёма трения V_{adapt} и рост диссипативного объёма V_{dis} (диапазон совместимости на рис. 1), т.е. $V_f^* = V_{adapt} + V_{dis}$. В пределе (точка 4) этот этап характеризуется полным превращением адаптивного критического объёма V_{adapt}^* в объём диссипативный V_{dis}^* .

Структурное приспособление, благодаря сложным атомарно-конфигурационным изменениям внутри объёма V_f^* , приводит к уменьшению внутренних напряжений, вплоть до упругих и соответственно, увеличению доли энергии \bar{Q} , обратимо рассеиваемой. Соответственно – это структурное рассеяние энергии, характерное для существа диссипативных структур трения.

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

Обозначенные выше объёмы характеризуют различные закономерности преобразования энергии внешнего механического движения при трении. Адаптивный объём связан с необратимым поглощением энергии деформации. В этом объёме происходит накопление скрытой энергии деформации Δu_e и зарождаются очаги разрушения. Диссипативный объём способен обратимо трансформировать (рассеивать) энергию внешнего движения. В нем не происходит накопления скрытой энергии деформации за счет протекания обратимой упруго-пластической деформации.

Предложенные теоретические и расчетные оценки [1] показали, что диссипативный объём трения осуществляет обратимую упругую трансформацию энергии внешнего механического движения с плотностью \bar{q}^* , равной критической плотности скрытой энергии u_e^* . Физическое различие этих двух плотностей свободной энергии заключается в том, что u_e^* - это плотность упругой энергии различного рода дефектов и повреждений структуры, которая характеризует необратимость процесса преобразования внешнего механического движения, а \bar{q}^* - плотность упругой энергии ротационного движения структурных элементов (плотность кинетической энергии квантовых осцилляторов, равная их потенциальной энергии), обладающей свойством обратимо возвращаться внешнему механическому движению.

В наиболее общем случае движущие силы процесса (адаптации и диссипации) определяются кинетическими уравнениями [3] состояния (деформационного упрочнения) и теплового эффекта (динамического возврата),

$$\dot{u}_e = A \operatorname{sh}\left[\left(\alpha\sigma_i^2 - \nu u_e\right)/2kT\right] \quad (8)$$

$$\dot{q} = B \operatorname{sh}\left[\left(\alpha\sigma_i^2 + \nu u_e\right)/2kT\right] \quad (9)$$

описывающими кинетику изменения в деформируемых объемах плотности скрытой энергии u_e (повреждаемости) и теплового эффекта q пластической деформации.

Здесь A и B - кинетические коэффициенты; α , ν , u_{e0} - структурные параметры, характеризующие локальность и неоднородность элементарных актов по объему элемента тела.

$$A = \frac{2kT}{hV_0} \sum_1^n U_i'(\sigma_0, T) \exp[-U_i'(\sigma_0, T)/kT] \quad (10)$$

$$B = \frac{2kT}{hV_0} \sum_1^n U_i''(\sigma_0, T) \exp[-U_i''(\sigma_0, T)/kT] \quad (11)$$

и коэффициента трения

$$U_i'(\sigma_0, T) = U_{0i}' + \Delta U'(T) \pm \beta \sigma_0^2; U_i''(\sigma_0, T) = U_{0i}'' + \Delta U''(T) \pm \beta \sigma_0^2 \quad (12)$$

$$\alpha = \gamma_G^2 V_0 / 6G; \beta = \gamma_G^2 V_0 / 2K \quad (13)$$

где: U_{0i}' , U_{0i}'' - энергия активации образования и диффузии элементарных дефектов i -го типа; σ_0 , σ_i - гидростатическое напряжение и интенсивность напряжений; V_0 - атомный объем; k - постоянная Больцмана; h - постоянная Планка; G , K - модули сдвига и объемной упругости.

Как следует из уравнений (8) и (9) по мере роста плотности скрытой энергии u_e скорость процесса накопления энергии стремится к нулю ($\alpha\sigma_i^2 = \nu u_e$), а скорость процесса диссипации энергии асимптотически увеличивается.

Характерные этапы энергетической эволюции элементарной системы сдвига (трения). Принципиальные структурно-энергетические состояния трибосистемы в точках переходных состояний (рис.1) показаны на рис. 3.

В наиболее общем случае физические закономерности эволюции трибосистемы (контактных объемов) можно представить следующим образом (рис.1). От 0 до точки 1 – статическое трение и деформационное упрочнение. В точке 1 достигается предельное деформационное упрочнение. Энергетическое состояние контактного объема с размером V_f^* оценивается плотностью скрытой энергии ΔU_e^* , равной энтальпии плавления ΔH в твердом состоянии при температуре плавления T_S . Это критерий предельного состояния [10] для традиционно объемной деформации. Однако объем трения V_f^* в этих условиях (т.1) не разрушается, а продолжает накапливать энергию далее до точки 2. Здесь объем трения V_f^* попадает в область всестороннего сжатия ($F = N$, $\mu = 1,0$) со сдвигом. Равновесие, далекое от состояния равновесия.

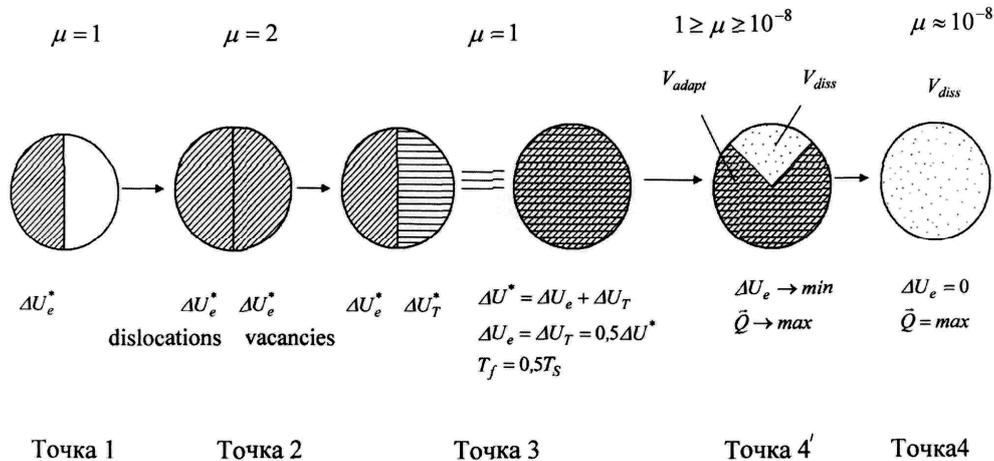


Рис. 3. Условная схема энергетической эволюции контактного объема трения V_f^* [2]

Далее, перенасыщенными очагами дислокационных областей, осуществляется накачка избыточной энергии неравновесных вакансий и в точке 2 достигается второе предельной термодинамическое состояние. Энергетическое состояние контактного объема с размером V_f^* оценивается плотностью скрытой энергии Δu_e^* , равной энтальпии плавления ΔH_S в жидком состоянии при температуре плавления T_S . Это критерий предельного состояния [10] для традиционно поверхностной деформации. Опять равновесное состояние вдали от точки равновесия и полного порядка. Здесь имеем суперпозицию двух метастабильных структур: одной деформационно-упрочненной V_D , другой вакансионно-накачанной V_V . В точке 2 мы имеем явно выраженный сдвиг ($\mu = 2$; $F = 2N$). Таким образом от точки 1 до точки 2 начинает развиваться схема всестороннего неравномерного сжатия.

Взаимодействие этих структур приводит к развитию релаксационных процессов. В соответствие с кинетическим уравнением пластической деформации [3, 10, 11] в точке 2 скорость процессов накопления энергии деформации становится равной нулю, а скорость процессов, контролирующих динамический возврат (тепловой эффект деформации) становится максимальной. В итоге, накопленная скрытая энергия ΔU_e дефектов структуры начинает превращаться (трансформироваться) в тепловую (связанную) энергию ΔU_T и в точке 3 достигается новое по качеству равновесное состояние в объеме трения ($\Delta u_e = \Delta u_T = 0,5u^*$). Это есть не что иное как условие динамической рекристаллизации ($T_f = 0,5T_S$) – тепловая флуктуация в макрообъеме. Состояние равновесия в точке 3 можно представить двояко. Либо это равновесие двух подобластей с критическими плотностями внутренней энергии ΔU_e и ΔU_T в объеме V_f^* . Модель условного статического осциллятора (медленный (статический) канал рассеяния энергии (рис.4) по механизму традиционного температурного теплообмена, перпендикулярного плоскости скольжения). Либо это равенство плотностей внутренней энергии $\Delta u_e = \Delta u_T = 0,5u^*$ в объеме V_f^* . Также модель условного статического осциллятора.

В целом вся область 1-2-3 – это область самоорганизации. Самоорганизация определяется фактом достижения в точке 1 равенства работ внешних и внутренних сил ($\mu = 1$; $\Delta U_e = NI$). Далее, накопленная внутренняя энергия дефектов структуры (дислокаций) способна, в поле действия постоянства внешних сил NI , совершать работу – работу образования (перенасыщенными очагами дислокационных скоплений) избыточной энергии вакансий. Поэтому в точке 2 коэффициент трения равен двум – двойной баланс энергии. Один баланс – работа внутренних сил, обуславливает накачку энергии вакансий. Другой баланс – работа внешних сил по поддержанию постоянства уровня накопленной энергии дислокационного упрочнения.

Самоорганизация в условиях адаптации обоснованно стремится к точке 3 и далее, так как это энергетически выгодно – например, в точке 3 достигается выгодное внутреннее равновесие - $\Delta U_e = \Delta U_T$. Объем трения в точке 3 способен работать как осциллятор; рассеивать накопленную, скрытую энергию ΔU_e , превращая ее в тепловую ΔU_T . Поэтому, по отношению к точке 1, несмотря на одинаковый уровень накопленной скрытой энергии ΔU_e , состояние точки 3 выгоднее. Здесь энергия способна рассеиваться уже в процессе ее накопления. В целом объем трения как статический трансформатор энергии можно представить следующей цепочкой преобразований - $NI \rightarrow \Delta U_e \rightarrow \Delta U_T$.

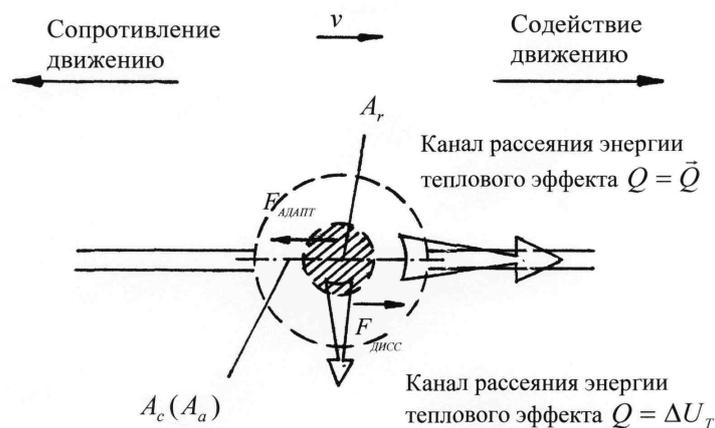


Рис.4. Условная схема двух каналов диссипации энергии теплового эффекта трения Q

Наиболее полное равновесие достигается при устремлении эволюции к точке 4, где мы имеем условие - $\Delta U_e = 0$; $\bar{Q} = \max$. От точки 3 и далее объем трения V_f^* условно можно представить состоящим из равновесных объемов адаптивного и диссипативного - $V_f^* = V_{adapt} + V_{dis}$. Уровни плотности энергии в этих объемах одинаковые и

равны, в адаптивном - Δu_e^* и в диссипативном - $\bar{q}^* = \Delta u_e^*$. Соответственно, при наиболее полной эволюции, весь объем трения V_f^* преобразуется в объем диссипативный V_{dis}^* . Здесь мы имеем быстрый канал рассеяния энергии по механизму поведения истинно диссипативных структур трения. Этот канал как бы аналогичен традиционному теплообмену, но действует он по линии плоскости скольжения (рис. 4) в направлении скольжения, способствуя последнему [2]). Однако, если при статическом (медленном), температурном теплообмене мы необратимо теряем накопленную энергию ΔU_T и превращаем ее в энергию безотносительного (хаотического) движения, то здесь структурно рассеянная упругая энергия \bar{Q} совершает работу формоизменения (сдвига), т.е. обратимо возвращается исходному упорядоченному, относительно движению, начинающему процесс деформации, поддерживая его на внутреннем молекулярном уровне. В итоге, здесь, объем трения как динамический трансформатор энергии можно представить следующей цепочкой преобразований - $Nl \rightarrow \Delta U_e \rightarrow \Delta U_T \rightarrow \bar{Q}$.

Собственно такое идеальное, квазиупругое состояние контакта при его полной эволюции обеспечивается механическими (нано) квантами (динамическими осцилляторами [1]), которые реализуют наиболее полное ротационно-колебательное их поведение относительно друг друга в объеме элементарной трибосистемы. При этом сопротивление их относительно взаимодействию минимально – упруго и соответствует упругости идеальных атомарных (термодинамически равновесных) взаимодействий на уровне электронных оболочек.

Нано-квантовая «резка» формообразования и параметры поверхности изделия. Разделим условно весь процесс деформации при ОМД (например, выдавливании) на два общих этапа. Первый – объемная деформация активной зоны заготовки до упруго-вязко пластического состояния с определенной долей упругости (вязкости). Второй – локальная деформация и отделение готовой поковки (изделия) от общей массы активированной активной зоны деформации на шарнире сдвига.

Естественно, затраты энергии на процесс можно суммировать из работы деформации первого и второго этапов. Оценка энергоемкости каждого этапа есть путь оптимизации всего процесса по его эффективности.

Рассмотрим возможную эффективность второго этапа. Хорошо было бы, чтобы на первом этапе сформировалась структура с размером зерна, равного размеру элементарной, равновесной трибосистемы (см. ниже). Тогда на линии сдвига на параллельных плоскостях в шарнире трения встретились бы объемы, именно как контактные, и равные размеру элементарной равновесной трибосистемы V_f^* .

Если представить себе точку C , лежащую на линии сдвига $A-A$ (рис. 5, а), то это область шарнира деформации на который действуют силы - тянущая T и трения F .

В этой области возникает разрушение вдоль этой же линии $A-A$. Соответственно трещина бежит от устья матрицы вглубь деформируемого объема [12]. При этом осуществляется сдвиг области C как элементарный акт образования готового изделия.

Естественно полагая, размер области C равным равновесному объёму трения V_f^* , претерпевшему, например, наиболее полную эволюцию структурного приспособления на совокупность механических квантов, трещина, разделяющая этот объем, будет двигаться, огибая эти кванты [12] упругого взаимодействия (рис. 5, б).

Дойдя до конца элементарного объема V_f^* , этот объем трения испускает один квант излучения, который по существу является малым управляющим воздействием для продолжения процесса в объеме следующей элементарной трибосистемы. Процесс начинает развиваться самостоятельно. Образуется некий, например, круговой фронт (деталь круглого сечения) самостоятельной и высококачественной (нано-квантовой) «резки» объема деформируемого тела. Процесс можно сравнить с устойчивым испусканием луча лазера областью супервозбуждённого состояния квантового генератора.

Затраты на «разрезку» деформируемого объема практически нулевые.

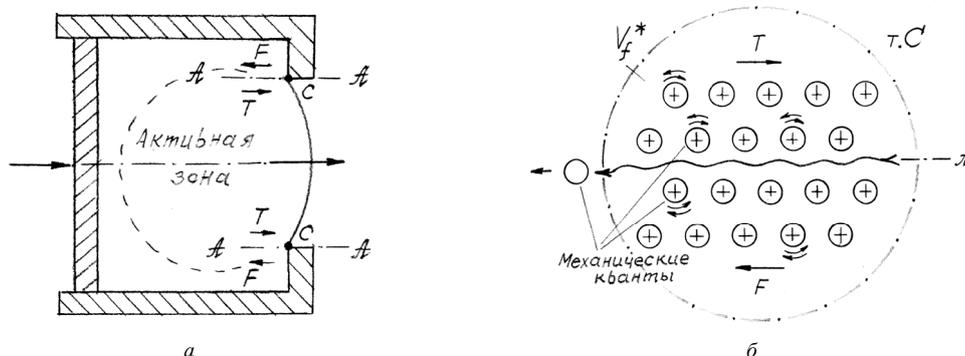


Рис. 5. Схема, поясняющая нано-квантовую модель «резки» деформируемого объема при холодной ОМД

Произведём оценку качества поверхностного слоя изделия в случае, если в шарнире V_f^* имеет место полное эволюционное приспособление структуры до нано квантового уровня.

Средний объем одного механического кванта (рис. 2) по модели куба, состоящего из атомарных кубических ячеек - $(e^3)^3 = W^3 = (20,08553695)^3 = 8103,083969$ равен, M^3 :

$$\bar{V}_{MQ} = \bar{V}_{at} \cdot e^9 = 23,887872 \cdot 10^{-30} \cdot 8103,083969 = 19,35654324 \cdot 10^{-26}.$$

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

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

здесь \bar{V}_{at} - средний атомный объем для металлов [13]; d_a - средний атомный диаметр.

По уточненным расчетам [14] размер элементарной равновесной трибосистемы V_f^* как сферического образования равен объёму \bar{V}_{MQ} кванта и их количеству $0,63 \cdot 10^8$ в объёме элементарной трибосистемы V_f^* , M^3 :

$$V_f^* = 0,63 \cdot 10^8 \cdot \bar{V}_{MQ} = 0,63 \cdot 10^8 \cdot 19,35624324 \cdot 10^{-24} = 12,19462224 \cdot 10^{-18}$$

Радиус равновесного объема трения V_f^* (элементарной трибосистемы (ITS) как сферического образования (шарнира деформации) равен, M :

$$R_{TS} = \sqrt[3]{\frac{3V_f^*}{4\pi}} = \sqrt[3]{\frac{3 \cdot 12,19462224}{4 \cdot 3,14159}} = 1,427885455 \cdot 10^{-6}$$

Диаметр элементарной трибосистемы равен, $мкм$:

$$D_{TS} = 2 \cdot R_{TS} = 2 \cdot 1,427885455 \cdot 10^{-6} = 2,8557709 \cdot 10^{-6} \text{ м} = 2,85$$

В итоге имеем следующее - при образовании поверхности изделия по указанной выше модели качество поверхности – это шероховатость на уровне нескольких нано метров - $1/2 \cdot 7,177$. Общее качество поверхностного слоя представляет собой качество однородной нано-зернистой структуры. Толщина этого слоя порядка полутора микрон - $1,427885455 \cdot 10^{-6} \text{ м}$. Более того - это равновесный слой практически абсолютно пассивный к взаимодействию с окружающей средой.

По существу, такой слой можно было бы изготовить поверхностной закалкой, если бы возможно было реализовать высокоскоростное охлаждение на уровне скорости деформации объёма V_f^* до уровня температуры абсолютного нуля ($T = 0^\circ K$). Именно такие условия [14] предполагает идеальное и упругое равновесное состояние объёма V_f^* на уровне нано-квантового его устройства.

Таким образом, общеизвестные преимущества холодной ОМД, реализуемые естественным свойством самоорганизации, вполне очевидны и имеют реальные пути к их совершенствованию.

Список литературы

1. Фёдоров С.В. Нано-квантовая структурная сверхпластичность при пластической деформации и энергосберегающие технологии ОМД. Вестник национального технического университета Украины «Киевский политехнический институт». Сер. Машиностроения, Киев.- 2010.- № 60. С.106-110.
2. Фёдоров С.В. Основы трибоэргодинамики и физико-химические предпосылки теории совместимости. – Калининград: КГТУ, 2003. – 415 с.
3. Фёдоров В.В. Эргодинамическая концепция разрушения // Проблемы прочности, 1991.-№8.-С.48-58, №10.-С. 31-35.
4. Фёдоров С.В. Аксиоматичность машинного трения // Трение и смазка в машинах и механизмах. – 2006.-№ 1.- С. 18-27.
5. Fedorov S. V. The Mechanical Quantum of Dissipative Friction Structures is the Elementary Tribonanostructure. Proceedings of World Tribology Congress, Japanese Society of Tribologists.- Kyoto, Japan, p. 926, 2009.
6. Фёдоров С.В. Расчет износа зубчатого зацепления по модели механического кванта // Трение и смазка в машинах и механизмах. – 2010.-№ 5.- С. 33-39.
7. Крагельский И.В., Добычин М.Н., Комбалов В.С. Основы расчетов на трение и износ.-М.: Машиностроение, 1977.- 526с.
8. Bowden F.P., Tabor D. Friction. An Introduction to Tribology. Anchor Books, Anchor Press / Doubleday, Garden City, New York, 1973, p. 178.
9. Фёдоров С.В. Теоретическая оценка принципиальных значений коэффициента трения Доклады АН Украины.-1993.- №3.- С.74-81.
10. Фёдоров В.В. Термодинамические аспекты прочности и разрушения твёрдых тел.-Ташкент: ФАН, 1979.-186с.
11. Фёдоров В.В. Кинетика повреждаемости и разрушения твёрдых тел.-Ташкент:ФАН, 1985.-168с.
12. Фёдоров С.В. Энергетическая природа упругого качения колеса. – Калининград: КГТУ, 2004. – 182 с.
13. Уэрт Ч., Томсон Р. Физика твёрдого тела.-М.: Мир, 1966.-567с.
14. Фёдоров С.В. Расчет истинного объема трения/ С.В.Фёдоров// Трение и смазка в машинах и механизмах. – 2011.- № 12.- С. 3-7.