

## ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ЭВОЛЮЦИИ СОСТОЯНИЯ СДВИГА (ТРЕНИЯ) В ШАРНИРЕ ДЕФОРМАЦИИ ПРИ ХОЛОДНОЙ ОМД

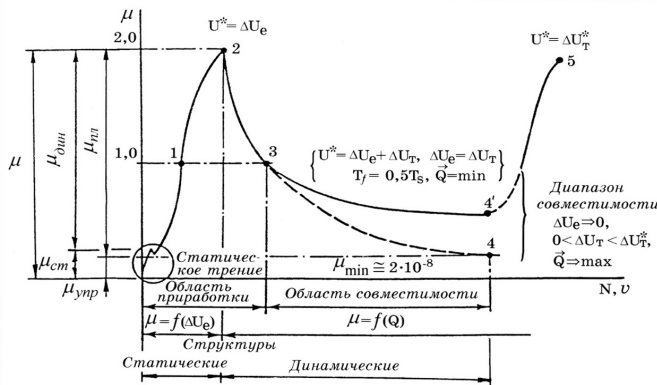
*В рамках процесса холодной ОМД анализируется модель трения (сдвига) на границе формообразующей поверхности матрицы, предложенная обобщенной теорией трения - трибоэргодинамикой. Рассматривается возможный эффект нано-квантовой «резки», образующей качество поверхности поковки. Произведена расчетная оценка качества поверхностного слоя изделия по модели идеального, нано-структурирования. Показано, что высотный параметр шероховатости поверхности изделия может достигать уровня, порядка 3-4 нанометра. Поверхностный слой изделия может иметь однородную, нано-зернистую структуру с толщиной, порядка около микрона.*

*In the framework of the metals deformation under cold pressure treatment the friction (shear) model is analysed. The possible effect of nanoquanta «cutting» is examined. This model of «cutting» to forms the quality of forging surface. The calculate estimation of quality for assortment surface layer by ideal, nanostructured model has realized. The parameter of surface roughness may be equal about to 3-4 nanometer. The surface layer of assortment in such case to have the homogeneous and nanoscale structure of thickness of one micrometer.*

**Введение.** Ранее в работе [1] автор рассматривал оригинальные исследования общих закономерностей эволюции состояний и свойств систем с внешним трением, в рамках обобщенного научного метода трибоэргодинамики [2]. Основу трибоэргодинамики представляет энергетическая модель трансформационных процессов упруго-пластической деформации на контакте трения.

Критерий предельного, суперактивированного состояния – плотность внутренней накопленной энергии [3], уравнения энергетического баланса трения (пластической деформации) с учетом богатого опыта современной трибологии позволили реализовать данный метод как аксиоматический [4].

Предложена структурно-энергетическая диаграмма эволюции трущихся поверхностей [1, 2], как обобщенное теоретико-экспериментальное подтверждение термодинамической модели трения.



**Рис. 1. Структурно-энергетическая диаграмма эволюции трущихся поверхностей [2]**

Показано, что при идеальной эволюции трибосистемы (деформируемого контакта), она, эволюция симметрична. Процесс начинается и заканчивается в областях упругого поведения. Между ними существует пластический максимум сильновозбужденного состояния, как область самоорганизации и структурного приспособления. На конечном этапе эволюции упругость существует как эффект наиболее полного структурного рассеяния энергии с реализацией условия именно упруго-вязко-пластической деформации. В данных условиях имеет место идеальная, структурная сверхпластичность деформируемого объема – высокая степень эффективности процесса и высокие свойства изделия.

Предложена физическая модель реализации структурной сверхпластичности

деформируемого объема, в основу которой уложена идея существования наименьшего структурного элемента деформируемого твердого тела - механического (нано) кванта [1, 2, 5]. Образуясь в результате самоорганизации деформируемого контакта этот механический квант как наноструктура, трибоподсистема, теоретический кристалл и собственно динамический осциллятор реализует ротационно-колебательное поведение с упругим взаимодействием с себеподобными в объеме равновесного контакта трения (элементарной трибосистемы). В итоге контактный объем трения, состоящий из, примерно, 63 млн. таких квантов и реализует уникальные свойства сверхвысокой пластичности и практически полностью обратимый процесс. Потеря – это всего лишь один квант излучения – безопасный порог усталости контакта трения, наивысшая долговечность [1, 6]. Соответственно, энергоэффективность максимальная – вся затраченная на процесс работа деформации идет на совершение

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.

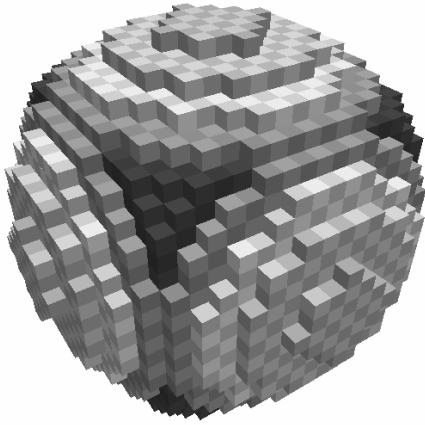


Рис. 2. Модель кристалла элементарной наноструктуры трения – механический квант, состоящий из 8103 атомных осцилляторов [5]

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  $\Delta U_e$  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;  $\Delta u_e$ ;  $\dot{u}_e = du_e/dt$  - 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;  $\mu_{adapt}$ ;  $\mu_{dis}$  - адаптивный (Леонардо да Винчи) и диссипативный коэффициенты трения;  $\mu_{disT}$ ;  $\mu_{dis\bar{Q}}$  - статическая и динамическая компоненты диссипативного коэффициента трения;  $N, l$  - нагрузка и путь трения;  $\Delta U_T$  - 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  $\Delta u_e^*$ .

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  $\Delta u_e$  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;  $\alpha$ ,  $\nu$ ,  $u_{e0}$  - 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

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

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

где:  $U_{0i}'$ ,  $U_{0i}''$  - энергия активации образования и диффузии элементарных дефектов  $i$ -го типа;  $\sigma_0$ ,  $\sigma_i$  - 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  $\Delta u_e^*$ , равной энтальпии плавления  $\Delta H$  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.

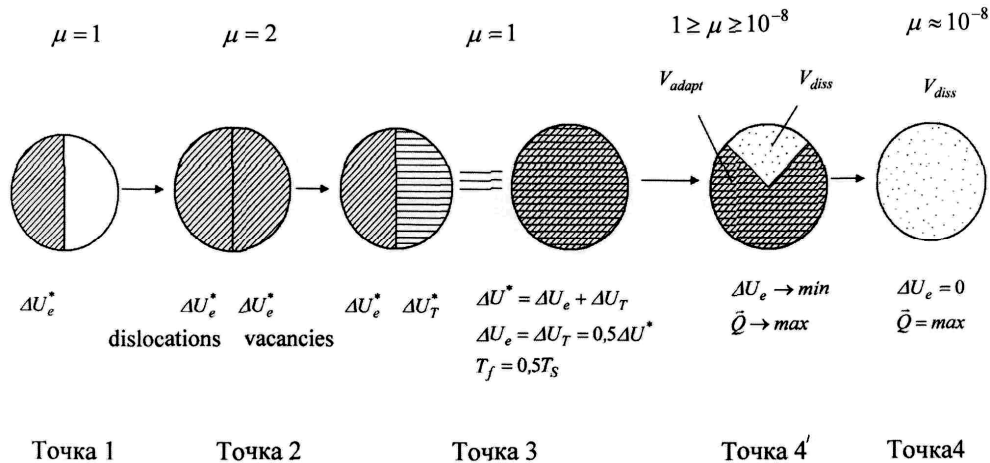


Рис. 3. Условная схема энергетической эволюции контактного объема трения  $V_f^*$  [2]

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  $\Delta u_e^*$ , равной энтальпии плавления  $\Delta H_S$  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  $\Delta U_e$  дефектов структуры начинает превращаться (трансформироваться) в тепловую (связанную) энергию  $\Delta U_T$  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  $\Delta U_e$  и  $\Delta U_T$  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  $\Delta U_e$ , превращая ее в тепловую  $\Delta U_T$ . Поэтому, по отношению к точке 1, несмотря на одинаковый уровень накопленной скрытой энергии  $\Delta U_e$ , 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 -  $NI \rightarrow \Delta U_e \rightarrow \Delta U_T$ .

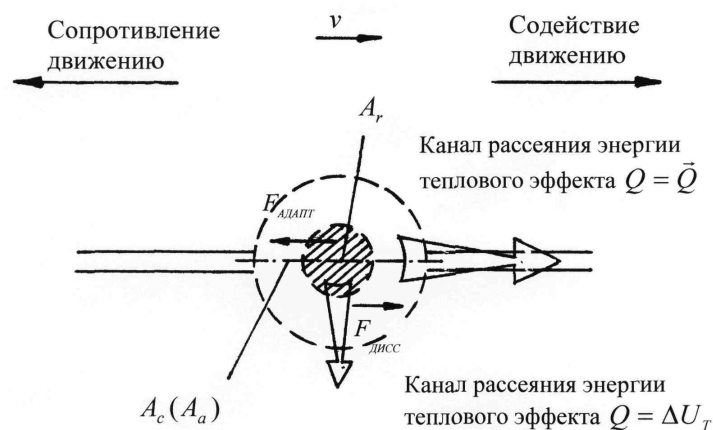


Рис.4. Условная схема двух каналов диссипации энергии теплового эффекта трения  $Q$

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 -  $\Delta u_e^*$  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  $\Delta U_T$  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.

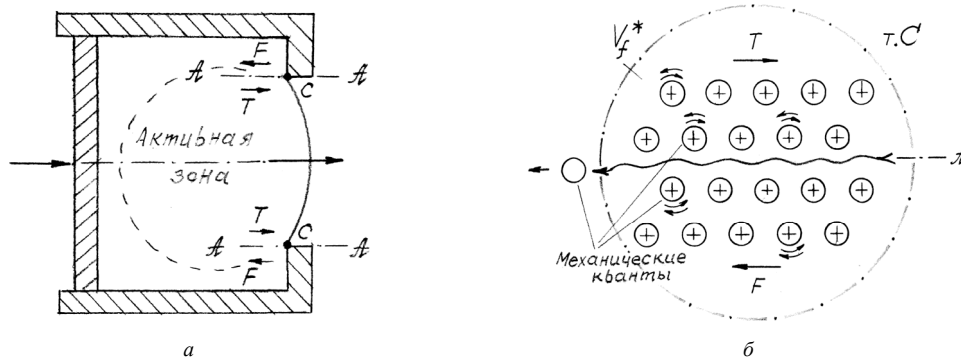


Рис. 5. Схема, поясняющая нано-квантовую модель «резки» деформируемого объема при холодной ОМД

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.