

КИНЕТИЧЕСКИЙ КРИТЕРИЙ ПОВРЕЖДАЕМОСТИ И РАЗРУШЕНИЯ ПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЕВ, ДЕФОРМИРУЕМЫХ ТРЕНИЕМ

© 2006 И.Д. Ибатуллин

Самарский государственный технический университет

В докладе приведена физическая интерпретация развития усталостной повреждаемости материалов при трении и представлены результаты разработки энергетического критерия прочности поверхностных слоев. Показана область применимости полученного критерия.

Совершенствование расчетных моделей изнашивания требует постоянного углубления знаний о природе и кинетике протекания физических механизмов повреждаемости и разрушения поверхностных слоев. Подавляющее большинство видов изнашивания имеет в своей основе усталостную природу повреждаемости и разрушения поверхностных слоев, которая проявляется в периодическом отслаивании, выкрашивании и отшелушивании тонких поверхностных слоев. К ним относятся бринеллирование, фреттинг, кавитационная эрозия, окислительное и усталостное изнашивание и др.

Современная физика прочности рассматривает разрушение материалов как заключительную фазу, закономерно развивающегося во времени многомасштабного и многоэтапного процесса повреждаемости, сопровождаемого, в общем случае, различными синергетическими эффектами [1]. Поэтому адекватное представление о поверхностном слое, деформируемом трением можно получить, рассматривая его как синергетическую систему. К таким системам относятся открытые термодинамические системы, находящиеся вдали от равновесного состояния, фундаментальными свойствами которых являются способность к саморегулированию, самоорганизации, гомеостазу и адаптации к внешним условиям. Саморегулирование основано на принципе минимума производства энтропии Гленсдорфа-Пригожина и направлено на оптимизацию состояния системы в энергетическом фазовом пространстве за счет приоритетной активации малоэнергоемких диссипативных механизмов. Это позволяет системе максимально сохранять устойчивость при поступлении в нее больших потоков энергии. Этот принцип ранжирует диссипативные механизмы и создает последовательно возрас-

тающую в пространственных и временных масштабах иерархию диссипативных структур, определяющую их эволюцию в поверхностных слоях при трении (рис. 1) [2].

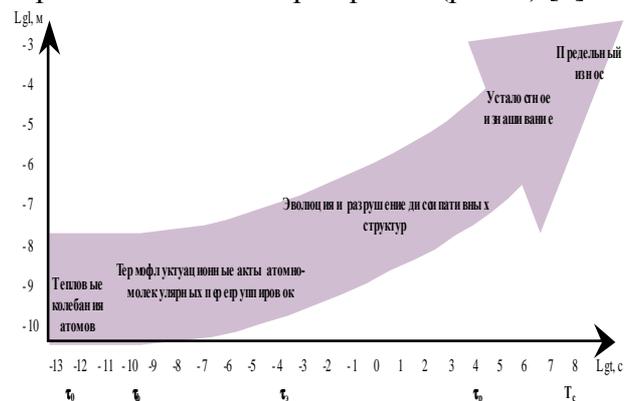


Рис. 1. Схема развития усталостного процесса в поверхностных слоях при трении

В качестве теоретической основы разработки кинетической модели примем структурно-энергетическую теорию [3], связывающую накопление повреждаемости и разрушение материала с его состоянием в энергетическом фазовом пространстве. Энергетическое представление состояния деформируемого твердого тела целесообразно по следующим причинам.

1. Энергия – универсальная характеристика объекта. Любые внешние воздействия и внутренние условия на любых масштабных уровнях сводимы к соответствующему энергетическому описанию.

2. Энергия системы является однозначным параметром ее состояния. Любые изменения, происходящие с материалом в процессе деформации, взаимодействия со средой и т.д. можно представить как перемещение фазовой точки (ФТ) системы в одномерном энергетическом фазовом пространстве.

3. Энергия обладает свойством аддитивности. Любую энергетическую

характеристику можно представить как алгебраическую сумму составляющих ее компонентов, выделенных по определенному признаку.

4. Энергия подчиняется фундаментальному закону сохранения при любых превращениях, справедливо как для отдельных частиц, так и для системы в целом. При этом для каждого процесса, в т.ч. повреждаемости, справедливы уравнения энергетического баланса.

5. Энергия имеет четкий физический смысл и лучше всего соответствует сущности понятий о прочности как о потенциальных энергетических барьерах, препятствующих протеканию в системе кинетических (необратимых) процессов.

6. Энергия не изменяет свои смысл и значение при любом представлении объекта, т.е. обладает свойством транзитивности. Оперирование энергией позволяет использовать хорошо математизированные методы квантовой механики, статистической физики, неравновесной термодинамики, теории упругости и др. фундаментальных наук.

Для формализации энергетического критерия прочности материалов сделаем ряд предварительных замечаний.

- Для возможности применения расчетного аппарата и теоретических принципов классической термодинамики для систем, находящихся вдали от равновесия, будем опираться на принцип локального равновесия [1], т.е. будем считать, что термодинамические свойства в каждом элементарном объеме материала вполне определены. При таком описании под термином «энергия» будем подразумевать интенсивную мольную характеристику физически бесконечно малого (элементарного) объема деформируемого материала с метрической размерностью [кДж/моль].

- Кинетика протекания повреждаемости и разрушения материала зависит не от средних действующих, а от фактических напряжений, неравномерно распределенных в объеме реальных деформируемых твердых тел. Концентрация напряжений прежде всего обусловлена формой детали и неоднородностью структуры материала, а на поверхностях еще и дискретностью фактического контакта, различием коэффи-

циента перекрытия и др. причин. Неравномерность механической нагрузки может наблюдаться не только в пространстве, но и во времени, вследствие, например, динамических вибрационных и ударных воздействий. Поэтому при разработке критерия прочности будем учитывать пространственную и временную концентрацию напряжений соответствующими коэффициентами

- Критерий должен учитывать всю существенную совокупность происходящих явлений. В этом смысле критерии, учитывающие один, даже и ведущий вид дефектов, например, дислокации при пластической деформации, не могут считаться исчерпывающими. Кроме дислокаций в процессе деформации материалов участвуют вакансии, примесные атомы, дефекты упаковки (их вклад может быть значителен при низкотемпературной деформации), двойники, разупорядочивание сплавов и др. микроскажения [3].

- Бездефектных материалов не существует, поэтому исходное состояние материала не может рассматриваться как имеющее нулевую запасенную энергию без учета той степени повреждаемости, которую он изначально имел в заготовке и дополнительно приобрел в результате различных технологических операций. Прочность материалов имеет фундаментальную связь с фактором времени. Любые кажущиеся мгновенными явления, происходящие при разрушении – суть процессы, развивающиеся во времени. При этом нельзя пренебрегать даже самыми малыми временными интервалами, сопоставимыми с периодом атомных колебаний, которые «квантуют» многие макроскопические процессы. С учетом развития в последние годы фононной теории прочности, когда межатомные связи рассматриваются с позиций взаимодействия электронных оболочек, возможно, придется оперировать и более мелкими интервалами времени. В этом плане возникает сложность применения многих континуальных моделей, в которых используются идеализированные бесконечно малые интервалы dt , которые для реальных процессов не имеют физического смысла.

- Разрушение является сугубо стохастическим процессом, поэтому любой критерий

рий прочности является справедливым только статистически. Более того, как показал И.Р. Пригожин, вероятностная природа и наличие флуктуаций является фундаментальным свойством всех физических характеристик материальных объектов. Поэтому для их оценки будем обращаться к методам, разработанным в рамках статистической физики, к одним из них относится фактор Больцмана выражающий вероятность появления флуктуаций. Согласно энергетической концепции прочности, разрушение наступает в результате неустойчивости материала при достижении плотности его внутренней энергии определенного критического значения. Рассматривая физически бесконечно малый объем твердого тела как открытую термодинамическую систему, находящуюся при установившихся внешних условиях в состоянии локального равновесия, т.е. обладающую совокупностью интенсивных (мольных) свойств, словие разрушения материала может быть записано в виде

$$\Delta u = u_0 \quad (1)$$

где Δu и u_0 - соответственно изменение мольной внутренней энергии системы и ее мольная энергия активации разрушения, кДж/моль. Справедливость условия (1) подтверждается экспериментальными исследованиями изменения энергии активации пластической деформации в процессе усталостного изнашивания деталей (рис. 2).

Изменение внутренней энергии системы, согласно фундаментальному уравнению Гиббса, записанному в локальной форме [4] равно

$$\Delta u = Tds + pdv + \sum \bar{\mu}_i dw_i \quad (2)$$

где $s, v, \bar{\mu}_i$ - соответственно мольные значения энтропии, объема и химического потенциала; w_i - мольная доля i -го компонента.

Первое слагаемое в уравнении (2) является элементарным мольным приращением связанной энергии Δl , в котором, согласно Больцмановской интерпретации, элементарное изменение мольной энтропии можно представить в виде

$$ds = R \ln(W_2/W_1) \quad (3)$$



Рис.2. Рост энергии активации пластической деформации в процессе трения поршневых колец. Цикл изнашивания 2,5 мин.

где W_1 и W_2 - термодинамические вероятности начального и конечного состояний системы соответственно. В работе [5] на основе анализа производства энтропии в системе на различных масштабных уровнях показано, что при любых механизмах повреждаемости в произвольный момент времени t справедливо выражение

$$W_2/W_1 \approx t/\tau_0 \quad (4)$$

В уравнении (2) подразумевается, что система совершает работу против сил внешнего давления, поэтому элементарная работа pdv здесь является положительной. Вклад механических сил в приращение внутренней энергии материала обусловлен действием совокупности внешних и внутренних упругих напряжений E_y , а также энергией, переданной при пластической деформации E_n . Мольная потенциальная энергия, обусловленная упругими деформациями при одноосном напряженном состоянии с учетом требований размерности составляет

$$E_y = V_m 10^{-6} \frac{\tau^2}{2G}, \quad (5)$$

где V_m - молярный объем, мм³/моль; τ - касательное напряжение, МПа; G - модуль сдвига, МПа. Упругая энергия не накапливается в материале с течением времени, поэтому E_y является функцией мгновенного значения напряжений $\tau(t)$, однако, при наличии периодических динамических воздействий, например, гармоническом колебании, напряжение τ можно представить как максимальное (амплитудное) за период значение напряжений. При комбинирован-

ном статическом и динамическом воздействии, а также наличии концентраторов напряжений с учетом коэффициента динамичности n_0 перенапряжение τ в (5) можно представить как произведение $\tau_{cm} n_0 k_n$, где τ_{cm} - статическое напряжение, а k_n - коэффициент перенапряжений.

В отличие от E_y изотермически затраченная работа на пластическую деформацию материала E_n с течением времени может накапливаться в материале до значительных величин, намного превышающих потенциальную энергию. В общем случае энергия E_n равна площади под истинной кривой «напряжение-деформация». Отметим, что при упругих деформациях E_n не равна нулю, так как в этом случае имеет место микропластическая деформация, а затраченная работа равна площади петли гистерезиса.

При произвольной степени пластической деформации материала необратимо и изотермически переданная системе механическая энергия будет равна мольной работе неупругих сил

$$E_n = \int_{\gamma_n}^{\gamma_k} \tau V_m 10^{-6} d\gamma = V_m 10^{-6} \tau (\gamma_k - \gamma_n) + \Delta u_n = V_m 10^{-6} \sigma \bar{\gamma} + \Delta u_n \quad (6)$$

где γ_n и γ_k - соответственно относительные значения начальной и критической деформации сдвига материала поверхностного слоя; $\bar{\gamma}$ - средняя скорость неупругой деформации поверхностного слоя при трении, s^{-1} ; t - время наработки, с. Результат интегрирования в (6) известен с точностью до постоянной составляющей Δu_n , отражающей исходную повреждаемость материала. В выражении (6) учтено, что начальное состояние материала в общем случае нельзя рассматривать как недеформированное, поскольку получение заготовки и последующая технологическая обработка деталей всегда связана с появлением остаточных деформаций.

Изменение во времени действующего напряжения и частичный переход энергии деформирования в тепло можно учесть при помощи коэффициентов формы k_ϕ и аккумуля-

мулирования энергии k_a . Первый коэффициент определяется отношением $k_\phi = D/\tau\gamma$, где D - фактическая необратимо затраченная работа (площадь под кривой «касательное напряжение – деформация сдвига»). Вторым коэффициентом показывается долю запасаемой энергии, относительно всей затраченной работы D . Практика показывает, что для пластичных материалов, например, отожженных сталей k_a , как правило, не превышает 0,3. В этом случае

$$E_n = k_\phi k_a V_m 10^{-6} \tau \bar{\gamma} t + \Delta u_n \quad (7)$$

С учетом (5) и (6) можно записать

$$pdv = E_y + E_n = V_m 10^{-6} \frac{\tau^2}{2G} + V_m 10^{-6} \tau \bar{\gamma} t + \Delta u_n = V_m 10^{-6} \left(\frac{\tau^2}{2G} + \tau \bar{\gamma} \right) + \Delta u_n \quad (8)$$

Как было отмечено, анализ энергий вносимых упругими силами и накопленными в результате пластической деформации показывает, что первое слагаемое в (8) значительно меньше второго. Поэтому энергией упругих напряжений (внутренних и внешних) при анализе разрушения пластичных материалов (при больших степенях пластической деформации) часто пренебрегают.

В общем случае изменение внутренней энергии системы происходит под действием комплексного влияния различных термодинамических сил: тепловых, механических, химических, диффузионных, электромагнитных и др. Выше в явном виде были рассмотрены только первые два фактора, а остальные можно учесть переменной Δg , имеющей размерность энергии и характеризующей вклад немеханических обратимых сил в преодолении энергетического барьера u_0 . Эти силы, согласно принципу наименьшего принуждения Лешателье – Брауна, появляются в результате взаимодействия свободной поверхности со средой и направлены на уменьшение разрушающих воздействий. В общем случае Δg можно выразить через обобщенные силы и обобщенные координаты или же посредством химических потенциалов и массовых долей компонентов, т.е.

$$\Delta g = \sum \bar{\mu}_i dw_i \quad (9)$$

При этом параметр Δg может принимать как положительные, так и отрицательные значения.

С учетом (1-9) и принимая во внимание принятую размерность величин ($R \approx 0,008314 \text{ кДж/К}\cdot\text{моль}$; T , К; $u_0, \Delta g$, кДж/моль; t, τ_0 , с; $\bar{\gamma}$, с^{-1} ; τ , МПа), условие разрушения можно записать в виде равенства

$$TR \ln \left(\frac{t}{\tau_0} \right) + V_m 10^{-6} \left(\frac{\tau^2}{2G} + \tau \bar{\gamma} \right) + \Delta u_n + \Delta g = u_0 \quad (10)$$

$$+ \Delta u_n + \Delta g = u_0$$

Левая часть условия (10), представленная в виде функции времени является кинетической моделью повреждаемости материалов, которая при значениях $t < t_p$, где t_p - долговечность материала, описывает процесс роста внутренней энергии системы, а в момент времени $t = t_p$ вызывает достижение условия разрушения. Правая часть условия разрушения (10), представляющая собой потенциальный барьер, препятствующий разрушению материалов, складывается из энергии межатомного взаимодействия u_{0BA} , а также энергии взаимодействия дефектов $u_{0ВД}$. Прочность межатомных связей преимущественно зависит от их природы и структуры кристаллической решетки. Дефекты вносят в существующие плоскости скольжения кристаллической решетки дополнительные потенциальные ямы и барьеры, затрудняющие скольжение атомных плоскостей и, как следствие, пластическую деформацию материала, что вызывает эффект упрочнения. Особенностью энергетического параметра $u_{0ВД}$ является его зависимость от изменяющейся в процессе наработки степени повреждаемости материала и стадии эволюции диссипативных структур. Таким образом, энергия $u_{0ВД}$, в отличие от значения u_{0BA} , является функцией времени наработки. Величина u_{0BA} определяется как начальное значение внутренней энергии материала в отсутствие запасенной энергии повреждаемости.

С учетом вышесказанного, пренебрегая упругой деформацией материалов и

считая малой их начальную пластическую деформацию условие (10) можно упрощенно записать в виде

$$TR \ln \left(\frac{t}{\tau_0} \right) + V_m 10^{-6} \sigma \bar{\epsilon} t + \Delta g = u_0 \quad (11)$$

В исходном состоянии конструкционных материалов запасенная энергия, представленная суммой мольных энергий в левой части выражения (11) не достигает энергии активации, чем обеспечивается устойчивость системы. Однако с течением времени условие разрушения может выполняться при любых значениях нагрузки и температуры, за счет роста первых двух слагаемых. В момент достижения равенства (11) длительность приложения нагрузки становится эквивалентной времени до разрушения (долговечности) материала, т.е. $t = t_p$, а пластическая деформация становится критической для данного состояния материала $\Delta \gamma = \bar{\gamma} t_p = \Delta \gamma_{крит}$, отсюда, выразив t_p , получим уравнение долговечности.

$$t_p = \tau_0 \exp \left(\frac{u_0 - V_m 10^6 \tau \Delta \gamma_{крит} - \Delta g}{RT} \right), \quad (12)$$

Если в выражении (12) пренебречь влиянием взаимодействия материалов со средой $\Delta g = 0$, а также принять равенство

$$\gamma = \mu V_m 10^6 \Delta \gamma_{крит}, \quad (13)$$

где μ - коэффициент трения, то в результате из (13) получим известное эмпирическое уравнение С.Н. Журкова [6] для оценки долговечности твердых тел.

$$t_p = \tau_0 \exp(U_0 - \gamma \sigma / RT), \quad (14)$$

где σ - нормальное напряжение.

Выражение (14) раскрывает физический смысл структурно-чувствительного коэффициента γ , который ранее использовался как подгоночный коэффициент в модели (14).

Анализ функции накопления повреждаемости показал, что она может с высокой степенью корреляции аппроксимироваться линейной функцией роста внутренней энергии. Таким образом, долговечность материала поверхностного слоя может быть выражена следующим образом

$$t_p = \frac{U_0 \partial t}{\partial(\Delta U)} \cong \frac{U_0 \Delta t}{(\Delta U_2 - \Delta U_1)}. \quad (15)$$

Полученный кинетический критерий повреждаемости и разрушения поверхностных слоев, деформируемых трением имеет эвристическую ценность. На основе его анализа получен ряд кинетических зависимостей для прогнозирования ресурсных характеристик материалов [5], выбора режимов ускоренных испытаний; оценки активационных характеристик разрушения поверхностных слоев [7,8], исследования влияния смазочных материалов на прочность поверхностных слоев и др.

Список литературы

1. Иванова В.С., Баланкин А.С., Бунин И.Ж. Оксогоев А.А. Синергетика и фракталы в материаловедении. -М.: Наука, 1994.-383с.
2. Громаковский Д.Г., Ибатуллин И.Д. Опора надежности и качества //В ж. «Оборудование и инструмент для профессионалов».
3. Иванова В.С., Гуревич С.Е., Копьев И.М., Кудряшов В.Г., Степанов В.Н., Марьяновская Т.С., Никонов А.Г., Устинов Л.М.

Усталость и хрупкость металлических материалов. –М: Наука, 1968.-216с.

4. Агеев Е.П. Неравновесная термодинамика в вопросах и ответах.-М.: Эдиториал УРСС, 2001.-136с.

5. Ибатуллин И.Д. Применение энергетического критерия прочности при анализе кинетики усталостного разрушения поверхностных слоев.

6. Журков С.Н., Нарзуллаев Б.Н. Временная зависимость прочности твердого тела//”ЖТФ”.-Т.23. -вып.10 1953. -С.1677-1689.

7. Громаковский Д.Г., Ибатуллин И.Д., Прилуцкий В.А., Дынников А.В., Овчинников И.Н., Бакиров М.Б. Новый способ оценки пластичности конструкционных материалов и прогнозирования ресурсных характеристик деталей машин и конструкций// Тяжелое машиностроение, №10, 2004.-с.2-6.

8. Патент №2166745 от 2001.05.10, G01N3/56. Способ оценки энергии активации разрушения материала поверхностного слоя, деформированного трением //Д.Г. Громаковский, Е.В. Беленьких, И.Д. Ибатуллин И.Д. и др.

KINETIC CRITERION OF DAMAGING AND DESTRUCTION OF SURFACE LAYERS ON FRICTION

© 2006 I.D. Ibatullin

Samara State Technical University

In the paper an interpretation of fatigue damaging the surface layers on friction are given. Results of working out a kinetic criteria of durability of surface layers is presented. Received criterion may be used for estimation of activation characteristics of destruction of materials, modeling the damageability and destruction of materials, and wear calculation.