

## КИНЕТИЧЕСКАЯ, ТЕРМОФЛУКТУАЦИОННАЯ ПРИРОДА РАЗРУШЕНИЯ ПОВЕРХНОСТЕЙ ТРЕНИЯ ТВЕРДЫХ ТЕЛ ПРИ ИЗНАШИВАНИИ

© 2020 А.Г. Ковшов

Самарский государственный технический университет

Статья поступила в редакцию 12.05.0020

В статье изложены основы кинетической теории прочности и термофлуктуационного механизма разрушения поверхностей трения твердых тел при изнашивании. Проанализирована связь прочности с механо-физическими константами твердого тела. Изучена кинетика состояния материалов поверхностей пар трения в процессе изнашивания. Подтверждена температурно-временная зависимость изменений физических, механических параметров материалов и разрушения поверхностей и приповерхностных слоев пар трения. Сформулированы основные положения физической модели повреждаемости поверхностей трения и оценены активационные параметры термофлуктуационной модели их разрушения. Предложена расчетная модель изнашивания при трении на основе термофлуктуационной концепции разрушения.

*Ключевые слова:* трение, изнашивание, модель, износ, кинетика, активация, объем, флуктуация, прочность, разрушение.

DOI: 10.37313/1990-5378-2020-22-3-37-43

### ВВЕДЕНИЕ

В середине прошлого столетия получила развитие кинетическая концепция прочности основанная на новых представлениях о термофлуктуационной природе (механизме) разрушения твердых тел, основоположником которой является академик С.Н. Журков с сотрудниками [1, 2]. В соответствии с представлениями температурно-временной концепции прочности долговечность образца под нагрузкой при испытаниях на разрыв определится по следующей экспериментальной зависимости:

$$t = \tau_0 \exp[(U_0 - \gamma\sigma)/kT], \quad (1)$$

откуда разрывное напряжение

$$\sigma_p = (1/\gamma) (U_0 - kT \ln(t/\tau_0)), \quad (2)$$

а максимальное разрывное напряжение при температуре  $T = 0 \text{ }^\circ\text{K}$

$$\sigma_{p,max} = U_0/\gamma, \quad (3)$$

где  $t$  – время до разрушения (долговечность) образца под нагрузкой, с.;  $\tau_0 = (10^{-12} \dots 10^{-13})$  с. – период колебаний атомов в твердом теле;  $U_0$  – энергия межатомной связи, Дж;  $\sigma$  – напряжение,  $\text{H}/\text{m}^2$ ;  $T$  – термодинамическая температура,  $^\circ\text{K}$ ;  $k = 1.38 \cdot 10^{-23}$  Дж/ $^\circ\text{K}$  – постоянная Больцмана;  $\gamma$  – параметр (подгоночный), имеющий размерность объема,  $\text{m}^3$ ;  $(U_0 - \gamma\sigma) = \Delta U$  – энергия активации разрушения;  $\sigma_p$  – разрывное напряжение,  $\text{H}/\text{m}^2$ ;  $\sigma_{p,max}$  – максимальное разрывное напряжение,  $\text{H}/\text{m}^2$ .

### АКТИВАЦИОННЫЕ ПАРАМЕТРЫ РАЗРУШЕНИЯ

Экспериментальные зависимости (1,2,3) дали возможность исследователям [1,2] оценить численные значения и физический смысл активационных параметров разрушения  $\gamma$ ,  $U_0$ ,  $\tau_0$  при температурно-временных испытаниях на одноосное растяжение образцов.

Численные значения и физический смысл коэффициента  $\gamma$  определены путем вычисления его в модели распада нагруженной атомной ангармонической цепочки, находящейся в тепловом движении [1]:

$$\gamma = (C/\alpha E)\chi, \quad (4)$$

откуда следует, что  $\gamma$  рассматривается как мера локальной перегрузки

$$\chi = \Sigma/\sigma = \sigma_n/\sigma_p = E\varepsilon_*/\sigma_p, \quad (5)$$

где  $\chi$  – коэффициент локальной перегрузки в месте разрыва созданный концентратором напряжения;  $\Sigma$  и  $\sigma$  – соответственно, локальное и среднее напряжения;  $\sigma_n = E\varepsilon_*$  – предельная (теоретическая) прочность;  $E$  – модуль Юнга,  $\text{H}/\text{m}^2$ ;  $\varepsilon_* = 0,1 \dots 0,2$  – относительное удлинение, при котором межатомная связь теряет устойчивость и разрывается;  $C$  – атомная (молярная) теплоемкость, Дж/ $^\circ\text{K}$  ( для одноатомных кристаллов  $C \approx 3k$ ) [1];  $\alpha$  – коэффициент термического линейного расширения,  $\text{K}^{-1}$ .

Далее комбинируя (3), (4) и (5), получим:

$$\sigma_{p,max} = \sigma_n = U_0/\gamma = U_0 \alpha E / (C\chi); \quad (6)$$

$$\chi \sigma_p = \sigma_n = E\varepsilon_*; \quad \chi = \frac{E\varepsilon_*}{\sigma_p}$$

*Ковшов Анатолий Гаврилович, кандидат технических наук, доцент кафедры «Технология машиностроения, станки и инструменты». E-mail: k.ntm@mail.ru*

где

$$U_0 = \varepsilon_*(C/\alpha) [1]. \quad (7)$$

Таким образом, полученные в [1,2] выражения для параметра  $\gamma$  (4) и энергии механического разрушения (связи атомов в твердом теле)  $U_0$  (7) позволили установить связь прочности  $\sigma_p$  с механо-физическими константами твердого тела: модулем упругости  $E$ , коэффициентом термического линейного расширения  $\alpha$  и атомной (молярной) теплоемкостью  $C$ . Закономерности (1,2,3) и оцененные значения активационных параметров  $U_0$ ,  $\tau_0$  и  $\gamma$  позволили интерпретировать механизм разрушения твердых тел с кинетической позиции как термофлуктуационный процесс распада межатомных связей, накопления разорванных межатомных связей, субмикроскопических трещин и генерации зародышевых микротрещин [1].

### КИНЕТИКА СОСТОЯНИЯ МАТЕРИАЛОВ ПОВЕРХНОСТЕЙ ПАР ТРЕНИЯ ПРИ ИЗНАШИВАНИИ

Подтверждением приведенной выше интерпретации кинетической концепции разрушения явились комплексные систематические исследования автора [3,4,5,6,7,8,9] кинетики накопления повреждений структуры и разрушения материалов контактирующих пар при изнашивании в условиях вибрационного трения (фреттинга) в малоподвижных и номинально неподвижных соединениях. Оборудование и средства технического оснащения при проведении исследований описаны в работах [3,6,7,9]. Оценивалась кинетика изнашивания и состояния структуры материалов поверхностей и приповерхностных слоев образцов из титановых сплавов ВТ9, ВТ3-1, бронзы БРАЖМц10-3-1,5 при фреттинге образцов титановых сплавов в одноименных парах и в парах с образцами из бронзы и жаропрочного сплава ЖС6К. Установлено, что независимо от природы материалов, условий испытаний и режимов нагружения временные зависимости линейного износа имеют ступенчатый, а характеристики изменения состояния материалов – периодический характер. На примере изнашивания сплава ВТ9 (рис.1а) при фреттинге в одноименной паре без смазки при амплитуде осцилляции  $A=0,015$  мм, частоте  $f=310$ Гц, статической нагрузке  $q_{ст} = 7$ МПа, динамической нагрузке  $q_{дин} = 3$ МПа и температуре  $T=293$  °К можно выделить три характерных стадии износа: П – приработки, I – умеренного износа (латентный период накопления повреждений), II – интенсивного износа (разрушения). Стадии умеренного I и интенсивного II износа соответствуют различным структурным состояниям (рис. 1б) кристаллической решетки.

Один цикл физического уширения  $\beta$  (интегральной характеристики микроискажений

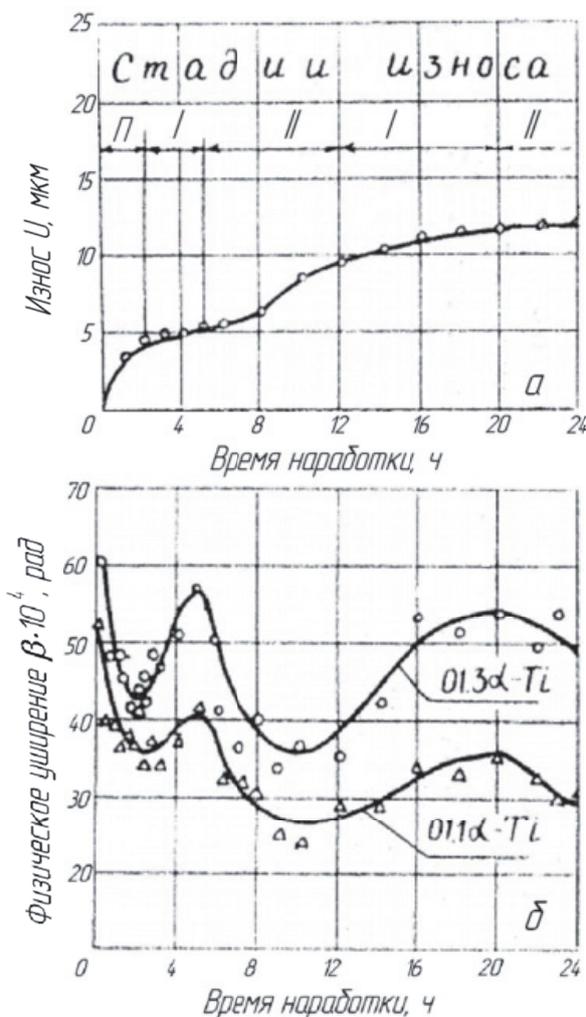


Рис. 1. Кинетика износа (а) и физического уширения рентгеновских интерференционных линий (б) сплава ВТ9

$\Delta d/d$  кристаллической решетки материала, дробления блоков мозаик  $D$  и изменения плотности дислокаций  $\rho$ ) рентгеновских линий 01.1 и 01.3 $\alpha$ -Ti, полученных методом дифракции на дифрактометре УРС-50ИМ в медном  $Cu-K_{\alpha}$  излучении, представляет собой последовательные стадии упрочнения, разупрочнения и разрушения поверхностного слоя, обусловленные развитием микроискажений решетки, дроблением блоков мозаик, увеличением плотности дислокаций, образованием и слиянием субмикро- и микротрещин и отделением частиц разрушенного материала.

Из совместного анализа кривых износа и физического уширения рентгеновских линий (рис. 1 а,б) следует, что на стадии приработки П происходит интенсивное нарастание износа и разупрочнения поверхностного слоя в связи с отделением диспергированных поверхностных структур, упрочненных при предварительной механической обработке, и обнажение нижележащих неупрочненных слоев материала. Шири-

на рентгеновской линии  $01.3\alpha - Ti$  уменьшается при этом с  $60 \cdot 10^{-4}$  до  $41 \cdot 10^{-4}$  рад.

На стадии I умеренного износа физическое уширение резко возрастает, поверхности упрочняются, а износ стабилизируется. На этой стадии происходит накопление дефектов тонкой структуры (фрагментация блоков, рост микроискажений и плотности дислокаций) на поверхности и в зонах влияния по глубине [7, с. 353,354].

На стадии II интенсивного износа наблюдается разрушение, отделение частиц износа и связанное с этими процессами разупрочнение поверхностей, ширина рентгеновских линий вновь уменьшается.

Кинетическая картина накопления повреждений кристаллической структуры и изнашивания сплавов ВТ3-1, ВТ9 в паре со сплавом ЖС6К и бронзой БРАЖМц10-3-1,5, бронзы БРАЖМц10-30-1,5 в паре со сплавом ВТ9 аналогична описанной на примере сплава ВТ9 (рис.1). То есть изменение условий контактирования, материалов контактных пар, параметров механических воздействий, рабочих сред приводит лишь к изменению уровней выходных параметров: амплитуды и периода циклов упрочнение – разрушение – разупрочнение и, следовательно, интенсивности износа рабочих поверхностей трения. Поверхностные слои разрушаются вследствие насыщения кристаллической структуры дефектами, упрочнения, развития хрупкости, потери сплошности и периодической разрядки напряженного состояния на поверхностях и в глубинных уровнях деформируемых объемов [7].

Каждой стадии цикла «упрочнение – разрушение – разупрочнение» соответствует вполне определенный уровень и циклический временной характер изменений комплекса элементарных процессов [7, с 353] на поверхностях трения: износа, физического уширения рентгеновских дифракционных линий  $\beta$ , микротвердости  $H_m$ , шероховатости  $R_z$ , относительной опорной площади  $t_p$ , демпфирования (логарифмического декремента колебаний)  $\delta$ , жесткости стыка  $K$ , коэффициента трения  $\mu$ , фазовых  $\alpha \rightleftharpoons \beta$  превращений  $V_\beta$ , указывающих на наличие в локальных объемах деформации термических флуктуаций энергии.

Результаты рентгеноструктурного изучения кинетики дефектов тонкой кристаллической структуры сплава ВТ9 на стадиях упрочнения – разрушения в различных глубинных уровнях от поверхности трения при фреттинге в одноименной паре без смазки приведены в работе [7, с. 354, рис. 2]. Использовались рентгеновские излучения с различной проникающей способностью от антикатодов рентгеновских трубок Cr, Fe, Co, Cu, что позволило исследовать полойно состояние дефектной структуры дефор-

мированного поверхностного слоя без его разрушения на глубину до 15 мкм. Фиксировалась кинетика изменений микроискажений  $\Delta d/d$  кристаллической решетки, блоков мозаик  $D$ , рентгенографической плотности дислокаций  $\rho$  в результате совместной деформации в убывающем градиентном поле внешних эквивалентных напряжений  $\sigma_{эКВ}$  на контакте и термофлуктуационных напряжений. Общая картина изменения состояния тонкой кристаллической структуры в слоях по глубине при различных уровнях напряжений и деформации показывает, что предварительно упрочненные слои, в результате роста микроискажений, генерации субмикро – и – микротрещин и фрагментации структуры на блоки, в результате которой плотность дислокаций достигает пределов насыщения для данного уровня напряжений, разупрочняются вновь, вследствие разрядки напряженного состояния, снижения прочности, развития хрупкости, нарушения сплошности и разрушения слоя на отдельные элементы дефектной структуры. Наиболее интенсивно описанные процессы протекают в слоях глубиной до 15 мкм, менее интенсивно в глубинных слоях, где  $\sigma_{эКВ} \approx 0$  и сохраняется исходная (технологическая) дефектная структура.

Таким образом, в различных структурных уровнях по глубине от поверхности и на поверхности трения протекают интенсивные структурные и атомно-молекулярные перегруппировки: генерирование, взаимодействие и размножение дефектов связанное с термофлуктуационным разрушением межатомных связей в поле градиентно убывающих напряжений от внешних сил трения.

#### ОБЪЕДИНЕННАЯ МОДЕЛЬ ПОВРЕЖДАЕМОСТИ И РАЗРУШЕНИЯ ПОВЕРХНОСТЕЙ ТРЕНИЯ

На основе проведенного исследования кинетики деформационных процессов, накопления повреждений структуры и разрушения на поверхностях трения и в приповерхностных слоях сформулированы основные положения многоуровневой объединенной модели повреждаемости и разрушения, а также расчетной модели изнашивания при трении [3,4,5].

В основу предложенной физической модели повреждаемости и разрушения [4, рис.1] положены следующие основные принципы.

1. Контакт шероховатых поверхностей дискретный. Нарушенные фрикционные связи на вершинах микронеровностей при сдвиге поверхностей на величину элементарного пятна контакта «d» возникают вновь на вершинах новых микронеровностей вступивших в контакт, образуя элементарные площадки, в совокупности составляющие фактическую площадь контакта (ФПК)

2. К ФПК приложено эквивалентное напряжение обусловленное совместным действием нормальных и касательных напряжений на элементарных площадках контакта при относительном сдвиге поверхностей.

Поверхностные контактные напряжения распространяются в глубинные слои, в соответствии с принципом Сен-Венана [10], создавая градиент убывающих по величине напряжений от внешних сил. Специфика контактного взаимодействия и деформации, обусловленная дискретностью шероховатого контакта и градиентом напряжений, создала условия наблюдаемой выше кинетики накопления повреждений структуры и разрушения на трущихся поверхностях и на различных структурных уровнях зон влияния по глубине. В деформируемых структурных уровнях периодически возникает высокая плотность элементарных дефектов, при взаимодействии которых генерируются и распространяются более сложные дефекты и повреждения, являющиеся локальными концентраторами механических и термических напряжений.

3. В глубинном уровне, где внешнее напряжение  $\sigma=0$  [4, рис.1], возможные термофлуктуационные [1] разрывы единичных межатомных связей на технологических дефектах сразу же восстанавливаются вследствие отсутствия поверхностно – активной среды.

4. По мере продвижения дефектных слоев материала из глубинных уровней к поверхности медленно нарастающее внешнее напряжение способствует разрыву межатомных связей и препятствует их восстановлению, создавая направленность термофлуктуационного разрушения в поле внешних сил. Энергия активации термофлуктуационного разрыва межатомных связей  $\Delta U = U_0 - \gamma\sigma$  снижается, а вероятность и скорость разрушения возрастают.

5. Разрыв связей происходит в области локальной перегрузки в виде локального активационного объема  $V_0 = V_A \chi$  (где  $V_A$  атомный объем) в вершине микротрещины, перемещающегося по образцу по мере продвижения фронта трещины. Освобождающаяся при разрыве связей энергия приводит к генерированию фононов определенных частот  $h\nu = kT$  (где  $h=6.626 \cdot 10^{-34}$  Дж/Гц – постоянная Планка,  $\nu = \tau_0^{-1}$  – частота флуктуаций атомов при данной температуре Т°К, Гц.), их взаимодействию и распространению [11].

6. На поверхности и в приповерхностных слоях накапливается множество локальных объемов (структурных элементов) с различным уровнем прочности, размеры которых  $V_0 = V_A \chi_i$  определяются величиной коэффициентов локальной перегрузки. Разрушение происходит в локальных объемах, где действующие напряжения достигают локального предела

прочности наиболее слабого элемента структуры (хрупкое разрушение) или усредненного предела прочности  $\sigma_p = \sigma_B = \sigma_n / \chi$ , где  $\sigma_B$  – предел прочности, группы структурных элементов (вязкое разрушение). Разрушение завершается отделением частиц, размеры которых определяются размерами областей микроненородностей или элементов деформированной структуры.

### АКТИВАЦИОННЫЕ ПАРАМЕТРЫ РАЗРУШЕНИЯ ПОВЕРХНОСТЕЙ ТРЕНИЯ

В твёрдых телах без микроповреждений в момент приложения нагрузки все межатомные связи нагружены равномерно, реализуется механизм одновременного разрыва связей. В этом случае коэффициент перегрузки цепей  $\chi=1$ , локальный объем разрушения

$$\gamma = V_A \chi = V_A \lambda_0^2 \lambda_m,$$

где  $\lambda_0$  – межатомное расстояние,  $\lambda_m$  – расстояние между минимумом и максимумом потенциальной энергии при разрыве,  $V_A$  – локальный атомно-молекулярный объем [11,12], а время ожидания флуктуации определится из уравнения(1), как

$$t = \tau_0 \exp[(U_0 - V_A \sigma_{эке})/kT], \quad (8)$$

разрывное напряжение (2),

$$\sigma_p = U_0/V_A - (kT/V_A) \ln(t/\tau_0), \quad (9)$$

предельная прочность (3),

$$\sigma_n = \sigma_{p,max} = U_0/V_A. \quad (10)$$

В реальных телах с дефектами  $\chi > 1$ ,  $\gamma = V_A \chi = V_0$ , где  $V_0$  – область локальной перегрузки в вершине микротрещины (трещины) или локальный нано - микрообъем разрушения, в котором ожидается флуктуация кинетической энергии. В этом случае время ожидания флуктуации

$$t = \tau_0 \exp[(U_0 - V_0 \sigma_{эке})/kT], \quad (11)$$

разрывное напряжение

$$\sigma_p = U_0/V_0 - (kT/V_0) \ln(t/\tau_0), \quad (12)$$

предельная прочность

$$\sigma_n = U_0/V_0. \quad (13)$$

Кумулятивное накопление дефектов приводит к образованию групп структурных элементов с локальным активационным объемом разрушения  $V_0$  с низшим уровнем прочности  $\sigma_p = \sigma_B$ . Локальный активационный объем  $V_0$  физически и математически (11) связан с временем ожидания флуктуации  $t$  в этом объеме, что, как показано ниже, является основополагающим в механизме термофлуктуационного разрушения этого объема и может быть использовано в расчётах скорости изнашивания.

Размерная идентификация расчётных активационных параметров разрушения при изнашивании в условиях фреттинга титанового сплава ВТ9 [6,7] показала следующие пределы

их рассеяния:

$$\chi = \frac{\sigma_n}{\sigma_B} = \varepsilon_* \cdot \frac{E}{\sigma_B} = (0,1 \cdot 1,1 \cdot 10^{11}) / (1,13 \cdot 10^9) \approx 10,$$

математическое ожидание параметра  $\chi$ :  $MO(\chi) \approx 10/2 \approx 5$ , то есть рассеяние коэффициента локальной перегрузки происходит в пределах одного порядка величин, что согласуется с данными источника [2]. Далее:

$$U_0 = \frac{\varepsilon_* C}{\alpha} = (0,1 \cdot 3 \cdot 1,38 \cdot 10^{-23}) / (8,5 \cdot 10^{-6}) = 0,0487 \cdot 10^{-17} \text{ Дж};$$

$$V_A = (C/\alpha E) = (3 \cdot 1,38 \cdot 10^{-23}) / (8,5 \cdot 10^{-6} \cdot 1,1 \cdot 10^{11}) = 4,4278 \cdot 10^{-29} \text{ м}^3;$$

$$V_{0_{min}} = V_A = 4,4278 \cdot 10^{-29} \text{ м}^3, \text{ при } \chi=1;$$

$$V_{0_{max}} = V_A \chi = 4,4278 \cdot 10^{-28} \text{ м}^3, \text{ при } \chi=10.$$

Данные экспериментального электронографического исследования частиц износа [7] экстрагированных с угольной репликой, характеризующих исходное, не подвергнутое многократному перетиранию, состояние поверхностных структур и отделившихся от образца частиц (блоков мозаик D) показывают, что размеры областей когерентного рассеяния (ОКР) составляют, в основном, порядка (7-15) Å и очень близки к расчётным размерам локальных активационных объёмов  $V_0$  структуры с дефектами:

$$V_0 \approx D = ((7 \dots 15) \cdot 10^{-10})^3 = (3,43 \cdot 10^{-28} \dots 3,375 \cdot 10^{-27}) \text{ м}^3.$$

### ТЕРМОФЛУКТУАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ РАЗРУШЕНИЯ ПОВЕРХНОСТЕЙ ТРЕНИЯ ПРИ ИЗНАШИВАНИИ

В основу описания большинства современных моделей изнашивания [10,13,14,15] положены выходные (конечные) объёмные макрохарактеристики процесса: например, число отделившихся с сопряжённой поверхности атомов «Z» на единичном пути трения; деформируемый объём « $V_d$ » равный объёму материала взаимно внедрившихся выступов шероховатости поверхностей, разрушаемый за определённое число циклов взаимодействий «n» [10]; объём удаляемого с поверхности трения материала за цикл изнашивания в результате разрушения определённого количества « $\lambda$ » межатомных связей этого объёма с основой [13,14]; деформируемый объём равный объёму взаимно внедрившихся субмикрощероховатостей [15].

Очевидно, что такие модели не могут привести к желаемым положительным расчётным результатам в силу неопределённости размеров

и границ вовлечённых в контактную деформацию объёмов материалов и отсутствия конечных условий по времени или количеству циклов взаимодействий до их разрушения. Использование в расчётной модели изнашивания [5] локального активационного объёма разрушения « $V_0$ » структурного элемента или группы структурных элементов, сформированного в процессе деформации по естественному термофлуктуационному механизму и имеющего прямую математическую связь (11) с временем ожидания флуктуации  $t$ , исключает перечисленные выше неопределённости.

Примем, что в установившемся режиме трения и изнашивания разрушение активационного объёма  $V_0$ , в каком бы уровне по глубине поверхностного слоя он ни находился, в конечном итоге будет эквивалентно отделению с номинальной площади поверхности трения слоя материала толщиной

$$\Delta h = V_0 / A_a, \tag{14}$$

где  $A_a$  – номинальная площадь поверхности трения, м<sup>2</sup>;  $V_0$  – активационный объём, м<sup>3</sup>;

$\Delta h$  – толщина отделяемого слоя материала, м.

Скорость износа, с учётом (11) и (14),

$$V_h = \Delta h / t = V_0 \lambda / (A_a t) = V_0 \lambda / (A_a \cdot \tau_0 \cdot \exp[(U_0 - V_0 \sigma_{экс}) / kT]), \tag{15}$$

где  $V_h$  – скорость линейного износа, м/с;  $\lambda$  – геометрический фактор (число опорных точек или число условий связи относительного движения поверхностей в контактах: плоскость – плоскость,  $\lambda=3$ ; по линии,  $\lambda=2$ ; в точке,  $\lambda=1$ ). Учитывая, что

$$\tau_0^{-1} = \nu = kT/h; \tag{16}$$

$V_0$ , с учётом (4) и (5),

$$V_0 = \varepsilon_* C / (\sigma_p \alpha);$$

$U_0$ , с учётом (3),

$$U_0 = \varepsilon_* C / \alpha,$$

получим расчётную модель скорости изнашивания поверхностей трения в широком температурном диапазоне в виде:

$$V_h = U_0 \frac{kT}{h} \frac{\lambda}{\sigma_p A_a} \exp \left[ - \frac{U_0 \left( 1 - \frac{\sigma_{экс}}{\sigma_p} \right)}{kT} \right], \tag{17}$$

или с учётом выражения (16) для  $U_0$ ,

$$V_h = \frac{\varepsilon_* C}{\alpha} \frac{kT}{h} \frac{\lambda}{\sigma_p A_a} \exp \left[ - \frac{\varepsilon_* C}{\alpha} \frac{\left( 1 - \frac{\sigma_{экс}}{\sigma_p} \right)}{kT} \right]. \tag{18}$$

Уравнение (17) удобно применять при использовании значений  $U_0$  полученных экспериментально, уравнение (18) – при использовании расчётных значений.

Эквивалентное напряжение при одновременном действии нормальных и тангенциальных напряжений на поверхностях трения опре-

делится из выражения:

$$\sigma_{\text{экс}} \approx 3\tau \approx 3(q_r \mu + v \sqrt{\rho G}), \quad (19)$$

где  $\sigma_{\text{экс}}$  – эквивалентное напряжение, Н/м<sup>2</sup>;  $\tau$  – касательное напряжение на поверхности трения, Н/м<sup>2</sup>;  $q_r$  – фактическое давление в контакте, Н/м<sup>2</sup>;  $\mu$  – коэффициент трения;  $v$  – скорость скольжения, м/с;  $\rho$  – плотность, кг/м<sup>3</sup>;  $G \approx 0,38E$  – модуль сдвига, Н/м<sup>2</sup>;  $v = 2\pi Af$ , м/с – скорость скольжения при возвратно-поступательном и вибрационном трении;  $A$  – амплитуда, м;  $f$  – частота осцилляций, Гц.

При практических расчетах в условиях малых и средних нагрузок на контакт пластическая деформация возникает на выступах микронеровностей, материал «течет» в зазор, а среднее фактическое давление в контакте достигает  $q_r = (1,1 \div 1,3)\sigma_T$ . При высоких нагрузках внедрение микронеровностей увеличивается, пластическая деформация распространяется по всему контакту, фактическое давление растёт до  $q_r \approx 3\sigma_T$  [10], а эквивалентное напряжение достигает или превышает предел прочности  $\sigma_{\text{экс}} \geq \sigma_p$ , что приводит поверхностный слой в состояние низшей прочности ( $\sigma_p \approx \sigma_B$ ) и к ведущей роли «атермического» механизма разрушения, когда время ожидания термических флуктуаций становится больше времени действия нагрузки. При  $\sigma_{\text{экс}}/\sigma_p \approx 1$ , энергия активации (15,16,17)  $\Delta U = U_0 - V_0 \sigma_{\text{экс}} = 0$ , работа внешней силы  $V_0 \sigma_{\text{экс}}$  становится равной энергии связи атомов в твердом теле  $U_0$ ,

$$U_0 = V_0 \sigma_{\text{экс}} = \left(\frac{\varepsilon \cdot C}{\alpha}\right) (\sigma_{\text{экс}}/\sigma_p), \quad (20)$$

показатель экспоненты в уравнении (17) равным нулю, а экспоненциальный член

$$\exp\left[-\frac{U_0 \left(1 - \frac{\sigma_{\text{экс}}}{\sigma_p}\right)}{kT}\right] = \exp(-0) = 1. \quad (21)$$

Учитывая (20,21) уравнение (17) переписывается в виде:

$$V_h = \frac{\varepsilon \cdot C \cdot kT \cdot \sigma_{\text{экс}} \cdot \lambda}{\alpha \cdot h \cdot \sigma_p^2 \cdot A_a}. \quad (22)$$

Наряду с атермическим механизмом разрушения при  $T > 0$  °K действует термофлуктуационный, что следует из анализа предэкспоненциального члена уравнений (17,18), (22), поэтому понятие атермического механизма разрушения при температурах больших абсолютного нуля является условным.

Проведена широкая идентификация модели (22) при вибротрении и фреттинге в лабораторных условиях, при стендовых и эксплуатационных испытаниях [3,6,7,9] сплавов ВТ9, ВТ8, ВТ3-1, ОТ4, 20Х13, ЖС6КП, 40ХНМА в различных температурных режимах. Расчётные данные удовлет-

ворительно согласуются с экспериментальными. Рассеяние большинства экспериментальных данных вокруг расчётных значений не превышало  $\pm 23\%$ , отдельные индивидуальные экспериментальные значения скорости изнашивания варьировали в диапазоне не более  $\pm 36\%$ .

## ВЫВОДЫ

Предложена кинетическая термофлуктуационная модель изнашивания при трении, прошедшая широкую идентификацию в условиях вибрационного трения и фреттинга. В модели используются механические и физические параметры и константы материалов при полном отсутствии подгоночных и эмпирических коэффициентов. Оценены локальные активационные объёмы разрушения, формируемые в процессе деформации по естественным термофлуктуационным механизмам. Для расчёта скорости изнашивания использована прямая фундаментальная математическая связь формируемых локальных активационных объёмов с временем ожидания флуктуаций кинетической энергии (разрушения). Предложенная модель изнашивания пополнит арсенал расчётных методов оценки износа при трении.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Журков С.Н. К вопросу о физической основе прочности // Физика твердого тела. 1980. Т. 22. Вып. 11. С. 3344-3349.
2. Регель В.Р., Слуцкер А.Б., Томашевский В.Д. Кинетическая теория прочности твердых тел. М.: Наука, 1974. 302 с.
3. Ковшов А.Г. Разработка триботехнических методов расчета и повышения фреттингостойкости деталей турбокомпрессоров из сплавов титана ВТ9 и ВТ3-1. Автореф. дисс. ... канд. техн. наук. 05.02.04 – «Трение и износ в машинах». Киев: КИИГА, 1988. 20 с.
4. Ковшов А.Г. Физическая модель разрушения поверхностей трения // Сб. трудов МНТК «Актуальные проблемы трибологии», июнь 2007, в 2-х томах. Том 2. М.: Машиностроение, 2007. С. 206-213.
5. Ковшов А.Г. Расчетная модель изнашивания при трении /Сб. трудов МНТК «Актуальные проблемы трибологии», июнь 2007, в 2-х томах. Том 2. М.: Машиностроение, 2007. С. 214-220.
6. Ковшов А.Г. Расчетно-экспериментальная идентификация активационных параметров модели изнашивания поверхностей трения // Известия Самарского научного центра РАН. 2016. Т. 18. № 4(2), 2016. С. 341-346.
7. Ковшов А.Г. Рентгенографическая и электронографическая оценка структурных и активационных параметров модели изнашивания поверхностей трения // Известия Самарского научного центра РАН. 2016. Т. 18, № 4(2). С. 352-356.
8. Ковшов А.Г. Динамическая модель контактиро-

- вания при фреттинге бандажных палок лопаток компрессора низкого давления газотурбинного двигателя // Известия Самарского научного центра РАН. 2018. Т. 20. № 4(2)(84). С. 202-207.
9. *Ковшов А.Г.* Оценка эффективности при фреттинге упрочняющего деформационного формоизменения поверхностей трения, совмещенного с противоизносными покрытиями // Известия Самарского научного центра РАН. 2018. Т. 20. № 4(2)(84), 2018. С. 248-254.
  10. *Крагельский И.В., Добычин М.А., Комбалов В.С.* Основы расчетов на трение и износ. М.: Машиностроение, 1977. – 526 с.
  11. *Бартенев Г.М.* Прочность и механизм разрушения полимеров. - М.: Химия. 1984. 280с.
  12. *Бартенев Г.М.* Флуктуационный (активационный) объем и его роль в расчетах прочностных характеристик полимеров // Физико-химическая механика материалов. 1985. Т. 21. №1. С. 3-6.
  13. *Громаковский Д.Г.* Разработка концепции модели изнашивания и склерометрического способа оценки кинетических параметров разрушения поверхностей трения // Известия Самарского научного центра РАН. 2011. Т. 13. № 4(42)(3), С. 699-703.
  14. *Ибатуллин И.Д.* Кинетика усталостной повреждаемости и разрушения поверхностных слоёв. / Самара: Изд-во СамГТУ, 2008.-310с.
  15. *Суслов А.Г., Шец С.П., Прудников М.И.* Термофлуктуационная модель изнашивания поверхностей трения твёрдых тел при граничной смазке // Трение и смазка в машинах и механизмах. 2008. № 10. С. 40-47.

### KINETIC, THERMOFLUCTUATION NATURE FRICTION SURFACES OF SOLID FRICTION DURING WEAR

© 2020 A.G. Kovshov

Samara State Technical University

The article describes the basics of the kinetic theory of strength and the thermofluctuation mechanism of destruction of the friction surfaces of solids during wear. The relationship of strength with the mechanical and physical constants of a solid is analyzed. The kinetics of the state of materials of the surfaces of friction pairs in the process of wear is studied. The temperature-time dependence of changes in the physical, mechanical parameters of materials and the destruction of surfaces and near-surface layers of friction pairs is confirmed. The basic principles of the physical model of damage to friction surfaces are formulated and the activation parameters of the thermofluctuation model of their destruction are estimated. A calculation model of friction wear based on the thermofluctuation fracture concept is proposed.

Keywords: friction, wear, model, wear, kinetics, activation, volume, fluctuation, strength, fracture.

DOI: 10.37313/1990-5378-2020-22-3-37-43