

УДК 621.891

О. А. МИКОСЯНЧИК

*Национальный авиационный университет, Украина*

## **ТЕРМО-КИНЕТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОЦЕНКИ ДОЛГОВЕЧНОСТИ КОНТАКТНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ В УСЛОВИЯХ СМАЗОЧНОГО ДЕЙСТВИЯ В НЕСТАЦИОНАРНЫХ РЕЖИМАХ РАБОТЫ**

*Предложена феноменологическая модель оценки долговечности изнашиваемого слоя, учитывающая наличие двух областей накопления повреждений, а именно областей многоциклового контактной усталости и дебрис-слоя. Предложены методы оценки параметров, входящих в модель, описывающую долговечность области многоциклового усталости, получены выражения связывающие напряженно-деформированное состояние, характеристики усталостной прочности материала с характеристиками физической модели разрушения материала, основанной на термофлуктуационной теории прочности твердых тел. Установлено влияние степени упрочнения приповерхностных слоев, типа вторичных структур и граничных пленок смазочного материала, образованных в результате структурной приспособляемости, на энергию активации разрушения при трении.*

**Ключевые слова:** *энергия активации разрушения, структурно-чувствительный коэффициент, долговечность, напряженно-деформированное состояние, качество с проскальзыванием.*

**Введение и постановка задач исследований.** Термофлуктуационная теория прочности применительно к разрушению изнашиваемых поверхностей нашла развитие в работах [1–3], которыми было показано, что уравнение С.Н. Журкова подходит для оценки долговечности материалов при различных механизмах повреждаемости и видах напряженно-деформированного состояния материалов, в том числе и для оценки износостойкости поверхностных слоев с учетом специфики их функционирования. Однако задача анализа прочности и долговечности материала поверхностного слоя, деформируемого трением, представляет собой достаточно трудную задачу, так как изучение активационных характеристик разрушения поверхностных слоев в результате трения осложнено влиянием на их долговечность множества одновременно протекающих и конкурирующих процессов.

Экспериментальные исследования процессов изнашивания показывают, что при усталостном изнашивании формируется две области накопления повреждаемости: первая сосредоточена в тонком поверхностном слое (дебрис-слое), который накапливает дефекты и разрушается в режиме малоциклового усталости при нормальном усталостном изнашивании; вторая – распространяется на большую глубину и отвечает за кинетику развития контактной усталости, протекающей в многоциклового режиме [4]. Кроме того, ряд авторов акцентирует особое внимание на подповерхностной локализации усталостных процессов, при которой поверхность в зоне фактического касания, упруго и пластически деформируясь, транслирует механические напряжения в более глубокие слои, где под действием знакопеременных нагрузок будут накапливаться усталостные микрповреждения [5].

Авторами [6; 7] для оценки энергии активации разрушения использовался метод испытаний на длительную прочность. В результате исследований было уста-

новлено, что уравнение долговечности С.Н. Журкова позволяет рассчитать время до разрушения образца независимо от схемы напряженного состояния (сжатие, растяжение, сдвиг или их комбинации) и природы материала. Кроме того, авторы [6; 7] утверждали, что энергия активации зависит только от свойств материала, но не зависит от его структуры, степени упрочнения и наличия примесей.

Дальнейшие исследования кинетики деформации показали, что активационные параметры способны изменяться. Было установлено, что каждое изменение параметров соответствует смене доминирующего диссипативного механизма. Впервые этот эффект был обнаружен Дорном при исследовании ползучести металлов, когда для различных механизмов деформации был получен спектр значений энергии активации [8]. Величина энергии активации в существенной мере зависит от природы действующего механизма разрушения. Поэтому каждый материал имеет столько значений энергий активации разрушения, сколько существует механизмов этого процесса.

Исходя из вышесказанного, можно утверждать, что изменения в материале поверхностного слоя, которые происходят непосредственно в процессе трения вследствие механического и физико-химического взаимодействия контактирующих поверхностей (деформация, текстурирование материала, изменение элементного состава, химическая модификация, изменение различных физических характеристик) приводит к существенному отличию значений энергии активации разрушения материала в поверхностном слое и в объеме. В связи с вышесказанным, параметры, характеризующие изменение дебрис-слоя и области контактной усталости, будут разными, и оценку их необходимо проводить с учетом особенностей накопления триборазрушений в каждой из областей.

**Цель работы** – разработка термо-кинетической модели оценки долговечности контактных поверхностей, учитывающей влияние триботехнических факторов на энергию активации ведущего механизма разрушения при трении в условиях качения с проскальзыванием.

**Моделирование оценки долговечности пар трения области многоциклового контактной усталости.** Для построения расчетной оценки долговечности по критерию износа, в качестве базовой модели воспользуемся наиболее известной и широко признанной кинетической моделью разрушения материалов, построенной на основе разработанной термофлуктуационной концепции прочности твердых тел С.Н. Журкова [1; 2].

Полученное в рамках данной модели уравнение долговечности (1) широко используется в современной теории прочности твердых тел:

$$\tau = \tau_0 \exp\left(\frac{U_0 - \gamma\sigma}{kT}\right), \quad (1)$$

где  $\tau$  – долговечность материала под нагрузкой  $\sigma$ ;  $\tau_0$  – постоянная времени, равная периоду атомных колебаний в теле  $10^{-13} \dots 10^{-12}$  с;  $k$  – постоянная Больцмана;  $T$  – абсолютная температура, К;  $U_0$  – энергия активации разрушения, кДж/моль;  $\gamma$  – структурно-чувствительный коэффициент.

В предлагаемой расчетной модели учтено наличие двух областей накопления повреждений, и отличие их механизмов превалирующего типа разрушения. Таким образом, в общем виде выражение для долговечности изнашиваемого слоя можно представить:

$$\tau = \tau_d + \tau_\sigma, \quad (2)$$

где  $\tau_d$  – долговечность дебрис-слоя;  $\tau_\sigma$  – долговечность области многоциклового контактной усталости.

При исследовании активационных характеристик была установлена их зависимость от создаваемой при испытаниях схемы напряженно деформированного состояния. При трении создается сложное напряженно-деформированное состояние материала поверхностного слоя при действии нормальных и касательных нагрузок, упругих и пластических деформаций, контактирующих тел.

Энергия активации  $U_0$  и коэффициент  $\gamma$  зависят от действующего механизма повреждения, что необходимо учитывать при их оценке.

Введя параметр  $\Delta G$ , характеризующий влияние внешней среды в преодолении энергетического барьера, получим:

$$\tau = \tau_0 \left[ \sum_{i=1}^n \left[ \exp \left( \frac{U_{0d} - \gamma_d \sigma_d \pm \Delta G_d}{kT_d} \right) \right] + \exp \left( \frac{U_{0\sigma} - \gamma_\sigma \sigma_\sigma \pm \Delta G_\sigma}{kT_\sigma} \right) \right], \quad (3)$$

где  $\tau_0$  – постоянная времени, равная периоду атомных колебаний в теле  $10^{-13} \dots 10^{-12}$  с;  $k$  – постоянная Больцмана;  $T$  – абсолютная температура, К;  $U_0$  – энергия активации разрушения, Дж/моль;  $\gamma$  – структурно-чувствительный коэффициент;  $\sigma$  – нагрузка;  $\Delta G$  – коэффициент учитывающий влияние внешней среды ( $\Delta G < 0$  – внешняя среда разупрочняет разрушаемый слой,  $\Delta G > 0$  – упрочняет, а  $\Delta G = 0$  – оказывает нейтральное воздействие). Индексы  $d, \sigma$  при переменных в выражении (3) означают, что переменная относиться к дебрис-слою ( $d$ ) или области контактной усталости ( $\sigma$ ) соответственно.

В представленной работе рассматриваются активационные параметры области многоциклового усталости.

Представим выражение, определяющее долговечность области многоциклового усталости, в виде:

$$\tau_\sigma = \tau_0 \exp \left( \frac{U_{0\sigma} - \gamma_\sigma \sigma_\sigma \pm \Delta G_\sigma}{kT_\sigma} \right) \quad (4)$$

Найдем из (4) выражение для  $\sigma_\sigma$ :

$$\sigma_\sigma = \frac{U_{0\sigma} - kT_\sigma \ln \left( \frac{\tau_\sigma}{\tau_0} \right) \pm \Delta G_\sigma}{\gamma_\sigma} \quad (5)$$

Заменив постоянную Больцмана на газовую постоянную  $R$ , получим:

$$\sigma_\sigma = \frac{U_{0\sigma} - RT_\sigma \ln \left( \frac{\tau_\sigma}{\tau_0} \right) \pm \Delta G_\sigma}{\gamma_\sigma}, \quad (6)$$

где  $\sigma_\sigma$  – напряжения, вызывающие разрушение образца после наработки в течение времени  $\tau_\sigma$ ;  $\tau_0$  – постоянная времени, равная периоду атомных колебаний в теле  $10^{-13} \dots 10^{-12}$  с;  $R$  – газовая постоянная, Дж/(К моль);  $T_\sigma$  – абсолютная температура, К;  $U_{0\sigma}$  – энергия активации разрушения, кДж/моль;  $\gamma_\sigma$  – структурно-чувствительный коэффициент.

Учитывая цикличность процесса нагружения, представим время наработки  $\tau_\sigma$  через количество циклов  $N$  и фактическое время нагружения за цикл  $t_{ц}$ :

$$\sigma_\sigma = \frac{U_{0\sigma} - RT_\sigma \ln \left( \frac{N \cdot t_{ц}}{\tau_0} \right) \pm \Delta G_\sigma}{\gamma_\sigma}, \quad (7)$$

Анализ напряженно-деформированного состояния методом конечных элементов (МКЭ) с использованием программного обеспечения ANSYS показал, что максимальные контактные давления, полученные МКЭ, превышают, в среднем, на 11% аналогичные значения, рассчитанные по зависимостям Герца, что вносит определенные погрешности в результаты расчетов.

Таким образом, для определения долговечности в выражении (7) в качестве действующей нагрузки, определяющей протекание процессов усталостного разрушения  $\sigma_\sigma$  целесообразно принять эквивалентные напряжения по Мизесу, используемые для определения потенциальной энергии изменения формы:

$$\sigma_{\text{экв}} = \sqrt{\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2}{2} + \frac{(\sigma_2 - \sigma_3)^2}{2} + \frac{(\sigma_3 - \sigma_1)^2}{2}}. \quad (8)$$

В работе [9] повышение точности оценки напряженного состояния поверхностного слоя при трении достигается путем анализа эквивалентных напряжений  $\sigma_{\text{экв}}$ , учитывающих одновременно действие на контактные поверхности сжимающей и сдвигающей нагрузок. Примем, что

$$\tau_{\text{max}} = 0,304\sigma_{\text{max}}, \quad (9)$$

где  $\sigma_{\text{max}}$  – максимальное контактное давление по Герцу,  $\tau_{\text{max}}$  – максимальные касательные напряжения.

Тогда эквивалентные напряжения в контакте, согласно [10], составят:

$$\sigma_{\text{экв}} = \sqrt{\sigma_{\text{max}}^2 + 3\tau_{\text{max}}^2} \quad (10)$$

Таким образом, с учетом приведенного анализа напряженно-деформированного состояния контактных поверхностей, кинетики накопления энергии активации разрушения в условиях качения со скольжением, уравнение (4) примет вид:

$$\tau_\sigma = \tau_0 \exp\left(\frac{U_{0\sigma} - \gamma_\sigma \sigma_{\text{экв}} \pm \Delta G_\sigma}{RT_\sigma}\right). \quad (11)$$

**Методика оценки величины энергии активации разрушения в динамических условиях нагружения.** Разработана методика оценки величины энергии активации ведущего механизма разрушения, которая заключается в следующем:

- проводят испытания образцов материалов на автоматизированном триботехническом комплексе, основные характеристики которого описаны в работе [11], в выбранном диапазоне нагрузок при контактном давлении по Герцу (100 – 500 МПа) в условиях качения с разной степенью проскальзывания (от 3 до 40%);

- испытания в нестационарном режиме разгон – стационарная работа – торможение – остановка проводят по следующей схеме: приработка в среде смазочного материала; наработка до стабилизации основных триботехнических показателей контакта (толщины смазочного слоя на стоянке, в пусковой период и в период, соответствующий выбранным максимальным скоростям качения опережающей и отстающей поверхностей; коэффициента трения; удельной работы трения), которые характеризуют формирование стабильного граничного слоя компонентами смазочного материала;

- создать условия прекращения подачи смазочного материала в зону трения и фиксировать изменение основных триботехнических показателей контакта до проявления первых признаков схватывания контактных поверхностей;

- определить долговечность работы трибосопряжения  $\tau_{p\sigma} = Nt_{\text{ц}}$  по работоспособности пар трения при ряде значений температур и нагрузок;

– рассчитать критическую температуру в зоне контакта элементов трибосопряжения, которая выражается зависимостью:  $T_\sigma = t_0 + \vartheta$ , где  $t_0$  – температура поверхностей до входа в зону контакта,  $\vartheta$  – температура вспышки по Блоку, которая представляет мгновенное повышение температуры, при которой происходит заедание.

На основании полученных экспериментальных данных изменения  $\tau_{p\sigma}$  и  $T_\sigma$  в зависимости от контактного давления определить значения энергии активации разрушения по формуле:

$$U_\sigma = RT_\sigma \ln \frac{\tau_p}{\tau_0}, \quad (12)$$

где  $U_\sigma$  – энергия активации разрушения, кДж/моль;  $\tau_\sigma$  – наработка пар трения в течение времени, с;  $\tau_0$  – постоянная времени, равная периоду атомных колебаний в теле  $10^{-13} \dots 10^{-12}$  с;  $R$  – газовая постоянная, Дж/(К моль);  $T_\sigma$  – абсолютная температура, К.

Аналогичное определение энергии активации разрушения материала при различных температурах описано в работах [6; 7].

### Результаты экспериментальных исследований по определению активационных характеристик усталостного механизма разрушения элементов трибосопряжения.

В качестве примера приведем полученные результаты энергии активации разрушения стали 45 (HRC 38) при трении в нестационарных условиях в среде трансмиссионного масла ТАД17-и (SAE 80w90 API GL-5) в режиме качения с разной степенью проскальзывания (от 3 до 40%) (табл. 1).

Таблица 1

Экспериментально-расчетные показатели при определении энергии активации разрушения стали 45 в нестационарных условиях трения

Параметры	Степень проскальзывания в контакте в условиях качения со скольжением, %				
	3	10	20	30	40
	$\sigma_{max} = 170 \text{ МПа}, (\sigma_{эКВ} = 192 \text{ МПа})$				
$\tau_{p170}, \text{ с}$	27000	23000	20000	18000	15600
$T_{170}, \text{ К}$	293,5	313	384	461	635
$U_{170}, \text{ кДж/моль}$	97	103	127,01	150,96	209
	$\sigma_{max} = 250 \text{ МПа}, (\sigma_{эКВ} = 279,38 \text{ МПа})$				
$\tau_{p250}, \text{ с}$	21000	18000	14700	12900	11500
$T_{250}, \text{ К}$	299	323	415	506	703
$U_{250}, \text{ кДж/моль}$	99,15	106,69	136,39	165,75	229,6
	$\sigma_{max} = 300 \text{ МПа}, (\sigma_{эКВ} = 338,1 \text{ МПа})$				
$\tau_{p300}, \text{ с}$	18000	15000	12450	9000	7000
$T_{300}, \text{ К}$	315	343	438	541	755
$U_{300}, \text{ кДж/моль}$	104,05	112,78	143,34	175,59	243,47

Согласно полученным зависимостям  $\tau_p(\sigma) \sim f(\sigma)$ , путем экстраполяции определяют предельное значение контактного давления  $\sigma_{пред}$  (рис.1), а энергию активации разрушения  $U_{0\sigma}$  определяют путем экстраполяции величины  $U(\sigma)$  по зависимостям  $U(\sigma) \sim f(\sigma)$  до установленного предельного значения контактного давления  $\sigma_{пред}$  (рис. 2).

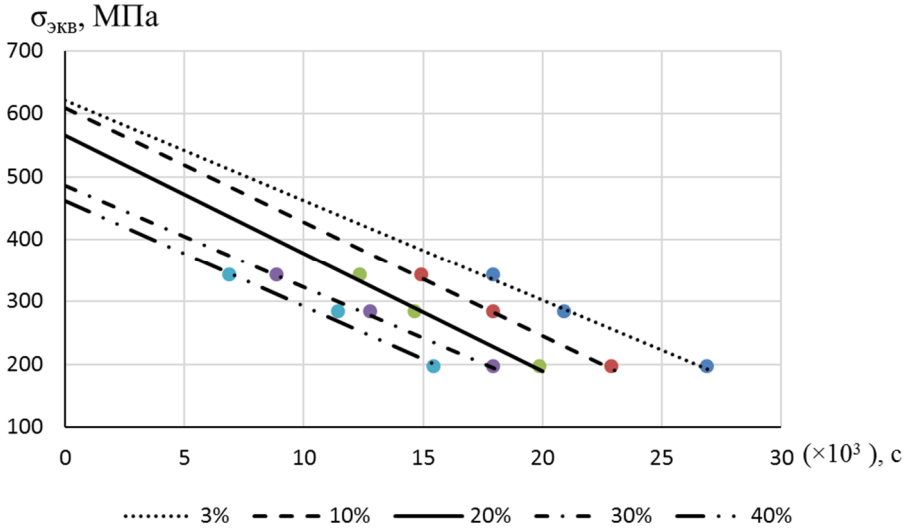


Рис.1. Определение предельного значения контактного давления по полученным экспериментальным значениям времени наработки элементов трибосопряжения до проявления признаков схватывания контактных поверхностей

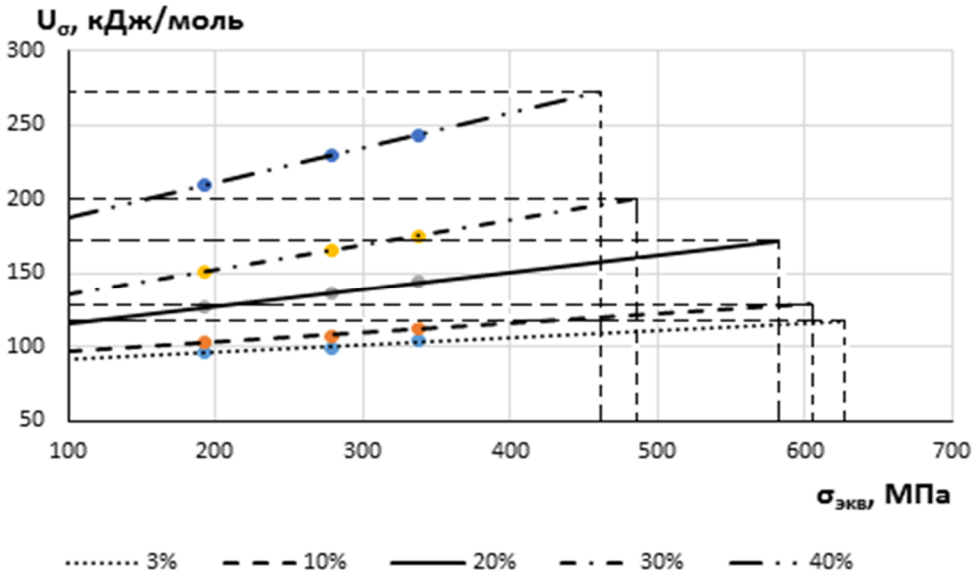


Рис. 2. Зависимость энергии активации разрушения от контактного давления при разной степени проскальзывания контактных поверхностей в условиях качения со скольжением

Таким образом,  $\sigma_{\sigma_{\text{пред}}}$  можно интерпретировать как предел усталостной прочности при  $N$  циклах нагружения.

Структурно-чувствительный коэффициент  $\gamma_{\sigma}$  находим из соотношения:

$$\gamma_{\sigma} = \frac{U_{0\sigma}}{\sigma_{\text{пред}}} \tag{13}$$

Полученные значения  $U_{0\sigma}$ ,  $\sigma_{\text{пред}}$  и  $\gamma_{\sigma}$  для стали 45 в условиях качения с разной степенью проскальзывания, представлены в таблице 2.

Таблица 2

**Влияние степени проскальзывания при качении со скольжением на энергию активации разрушения, предельное значение контактного давления и структурно-чувствительный коэффициент**

Параметры	Степень проскальзывания в контакте в условиях качения со скольжением, %				
	3	10	20	30	40
$U_{0\sigma}$ , кДж/моль	117	130	166	202	273
$\sigma_{пред}$ , МПа	623	603	580	487	463
$\gamma_{\sigma}$ , кДж·мм <sup>2</sup> /моль·Н	0,188	0,216	0,295	0,415	0,59

Определив действующие характеристики напряженно-деформированного состояния подповерхностного слоя конкретной детали (например, методом конечных или граничных элементов), и имея активационные характеристики усталостного механизма разрушения  $U_{0\sigma}$ ,  $\gamma_{\sigma}$ ,  $\Delta G_{\sigma}$ , которые позволяют учесть влияние физических аспектов на протекание процесса накопления усталостных повреждений, таких, как модификация подповерхностных слоев с помощью физико-химического и механического воздействия, которые не существенно влияют на напряженно-деформированное состояние подповерхностного слоя, но являются существенными факторами, определяющими механизм образования, скорость накопления и развития усталостных повреждений в условиях трибоконтактного взаимодействия.

Представленная кинетическая модель отражает увеличение внутренней энергии материала в процессе нестационарного циклического нагружения. Работу по разрушению поверхностного слоя совершают внутренние силы, сформировавшиеся в результате обмена энергией диссипативной системы с окружающей средой [4]. При этом в процессе трения происходит изменение внутренней энергии приповерхностных слоев металла на некоторую глубину материала вследствие влияния тепловых, механо-химических, диффузионных и других факторов.

Увеличение степени проскальзывания при качении со скольжением повышает уровень накопления энергии активации ведущего механизма разрушения. Прежде всего, это связано с увеличением степени пластической деформации, повышением температуры и градиента скорости сдвига в контакте вследствие повышения скорости скольжения с 0,062 до 1,15 м/с при проскальзывании с 3 до 40% соответственно. В работе [8] указывается, что деформация в металле протекает за счет различных механизмов, действующих на микроуровне, причем каждый из них характеризуется собственной энергией активации разрушения. Данные о распределении микротвердости приповерхностных слоев металла по глубине также свидетельствуют о различной зоне распространения деформационных изменений при трении (рис. 3).

Уровень энергии активации при трении зависит как от степени упрочнения приповерхностных слоев, так и от типа вторичных структур и пленок смазочного материала, образованных в результате структурной приспособляемости. Например, наименьший уровень энергии активации разрушения при  $\sigma_{max} = 250$  МПа установлен для пар трения, работающих при качении с проскальзыванием 3%.

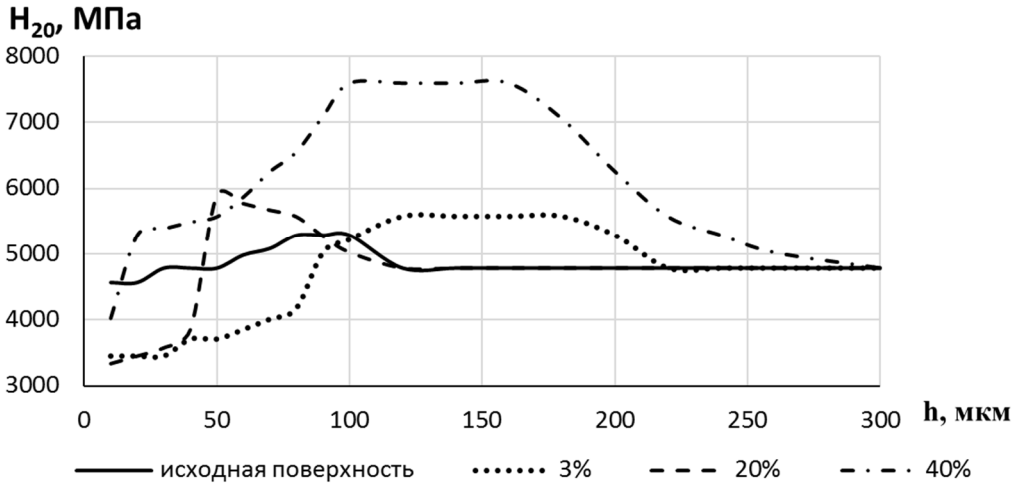


Рис. 3. Распределение микротвердости по глубине исходной поверхности стали 45 и после трения при качении с проскальзыванием от 3 до 40% ( $\sigma_{\max} = 250 \text{ МПа}$ )

Это обусловлено рядом эффектов: формированием на контактных поверхностях граничных смазочных слоев физической природы, сильной аморфизацией металла и разупрочнением на глубину до 70 мкм, формированием при трении вторичных структур первого типа [12]. При работе элементов трибосопряжения с проскальзыванием 40% происходит формирование хемосорбционных граничных слоев смазочного материала, сильное упрочнение приповерхностных слоев металла на глубину до 260 мкм, образование вторичных структур второго типа. Данные факторы способствуют значительному повышению энергии активации разрушения.

### Прогнозирование долговечности элементов трибосопряжения по кинетике накопления энергии активации разрушения при трении.

Постепенное приращение внутренней энергии трибосистемы возможно в результате аккумуляции энергии разрушения при циклически развивающихся деформационных процессах, структурно-фазовых превращениях, диспергировании материала и т.д. При достижении некоторого критического значения внутренней энергии при многоциклового усталости возможно разрушение материала.

Представим условие разрушения для поверхностей, работающих в условиях качения со скольжением, в виде:

$$U_{\sigma} = U_{0\sigma} \quad (14)$$

где  $U_{\sigma}$  — энергия активации разрушения при контактном давлении  $\sigma$  и определенной скорости скольжения;  $U_{0\sigma}$  — энергия активации разрушения при предельном значении контактного давления  $\sigma_{\text{пред}}$  для определенной скорости скольжения.

Таким образом, в процессе наработки контактных поверхностей в условиях качения с проскальзыванием происходит постепенное накопление энергии повреждаемости в материале. Процессы формирования устойчивых диссипативных структур в результате структурной приспособляемости конструкционных материалов при трении обеспечивают нормальную работу трибосопряжения в определенном промежутке времени. Длительность этого этапа зависит, прежде всего, от способности сформированных вторичных структур к накоплению энергии. Чем больше пласти-



ческая деформация в поверхностных слоях металла, тем больше скорость накопления энергии активации разрушения. При достижении критического значения энергии активации разрушения происходит разрушение материала.

Определив энергию активации разрушения при предельном значении контактного давления  $\sigma_{пред}$  для определенной скорости скольжения возможно прогнозировать долговечность элементов трибосопряжения по кинетике накопления энергии активации и при трении (рис. 4).

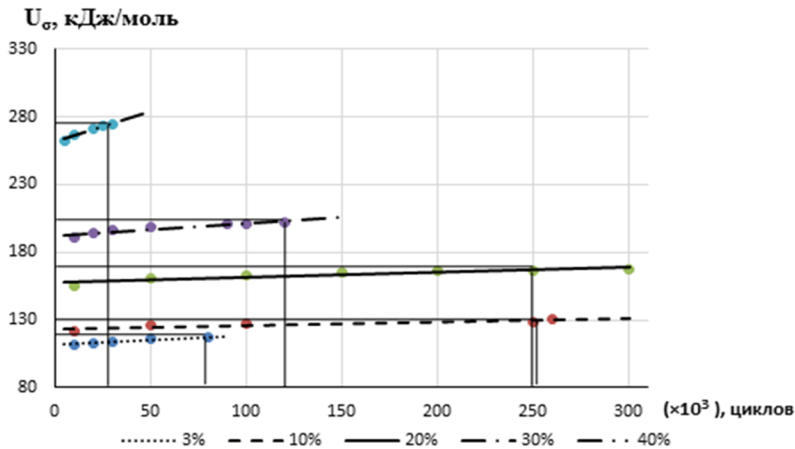


Рис.4. Кинетика увеличения энергии активации при наработке для стали 45 в среде трансмиссионного масла при  $\sigma_{max} = 300$  МПа в условиях качения с проскальзыванием от 3 до 40%

Расчетные данные о прогнозировании кинетики увеличения энергии активации для контактных поверхностей в исследуемых режимах трения коррелируют с полученными экспериментальными данными скорости изнашивания пар трения. Например, при  $\sigma_{max} = 300$  МПа скорость изнашивания отстающей поверхности при качении с проскальзыванием 3, 20 и 40% составляет 0,36, 0,252 и 0,45 мкм/час соответственно. При этом максимальное количество циклов, соответствующее предельному уровню накопления энергии активации разрушения, составляет 76000, 240000 и 28000 циклов для контактных поверхностей с проскальзыванием 3, 20 и 40% соответственно.

Проведем краткий анализ коэффициента  $\gamma_\sigma$  зависимости (7). Представим выражение (7) в виде:

$$\sigma_{эКВ} \gamma_\sigma = U_{0\sigma} - RT_\sigma \ln \left( \frac{N \cdot t_{ц}}{\tau_0} \right) \pm \Delta G_\sigma, \quad (15)$$

Анализ выражения (15) показывает, что член  $\sigma_{эКВ} \gamma_\sigma$  отражает ту часть работы, которую в усталостном разрушении тела выполняет внешняя сила (эквивалентные напряжения  $\sigma_{эКВ}$ ). Таким образом, чем меньше  $\gamma_\sigma$ , тем работа разрушения от внешнего воздействия меньше, и соответственно, больше долговечность тела. Согласно данным, приведенным в таблице 2, структурно-чувствительный коэффициент  $\gamma_\sigma$  повышается с увеличением степени проскальзывания. Однако, если для диапазона проскальзывания 10 – 40% повышение  $\gamma_\sigma$  металла коррелирует с экспериментально установленным увеличением удельной работы трения в контакте, объемом деформированного приповерхностного слоя металла, износом контактных поверхностей, то для пар трения, работающих в условиях с проскальзыванием 3%, установлены несколько иные закономерности. Наименьшее

значение  $\gamma_\sigma$  коррелирует лишь с минимальными показателями удельной работы трения в контакте и наименьшей энергией активации разрушения металла. Как указывалось выше, объем деформированного металла и скорость изнашивания превышает аналогичные показатели, установленные для контактных поверхностей с проскальзыванием 10 и 20%. Установленное несоответствие между работой разрушения и износостойкостью контактных поверхностей объясняется тем, что в процессе трения лишь для условий качения с проскальзыванием 3% свойственно разупрочнение поверхностных слоев металла, формирование вторичных структур I типа, которые, согласно Б.И. Костецкому [13], обладают свойствами сверхпластичности, мало насыщены активными элементами, характеризуются низкими показателями удельной работы трения.

Согласно работы [7], физический смысл коэффициента  $\gamma_\sigma$  авторы представляют как произведение активационного объема  $V_a$ , в котором развиваются элементарные акты разрушения, на коэффициент перенапряжения  $q = \sigma_{\text{лок}}/\sigma$ , где  $\sigma_{\text{лок}}$  — локальное истинное напряжение в месте разрушения, а  $\sigma$  — среднее напряжение. Соответственно, коэффициент  $\gamma_\sigma$  зависит от величины перенапряжения, возникающего в теле, если предположить что активационный объем останется неизменным.

Однако, в случае качения с проскальзыванием увеличение скорости скольжения приводит к возрастанию градиента скорости сдвига и температуры в контакте. Эти факторы приводят к увеличению активационного объема металла при трении.

Моделирование условий работы контакта с использованием метода конечных элементов (программа Nastran) позволяет рассчитать поля температур и напряжений в исследуемых образцах. Для моделирования теплоотдачи в окружающую среду использовались следующие граничные условия: температура окружающей среды принималась равной 20 °С, начальная температура образцов считалась равной температуре окружающей среды. Расчеты, выполненные по данной методике, показали, что максимальные значения температур и эквивалентных температурных напряжений характерны для центральной зоны по линии контакта поверхностей (рис. 5).

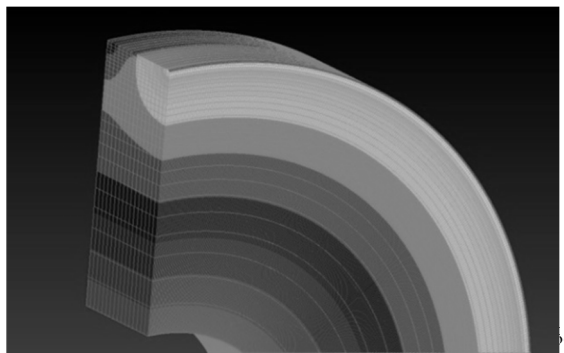


Рис. 5. Распределение эквивалентных температурных напряжений по центральному сечению дорожки трения

Наличие градиента температуры в поверхностных слоях металла как по глубине, так и по длине контакта вследствие снижения интенсивности процессов теплообмена с окружающей средой обуславливает изменение механических свойств металла на разную глубину, в зависимости от степени проскальзывания

контактных поверхностей (рис. 3). Таким образом, появление в центральной части контакта зоны локального повышения эквивалентных температурных напряжений приводит к изменению напряжённо-деформированного состояния поверхностей и возникновению центра концентратора напряжений.

Следовательно, основным источником возникновения локальных перенапряжений в поверхностных слоях металла при трении является структурная неоднородность, возникающая вследствие механического и теплового влияния, играющая роль первоначальных концентраторов напряжений, и являющаяся местом возникновения зародышевых субмикроскопических трещин с последующим их развитием и превращением в микро- и макротрещины, которые и определяют долговечность элементов трибосопряжения.

Таким образом, любое воздействие в зоне фрикционного контакта, которое приводит к уменьшению структурной неоднородности и/или будет препятствовать формированию и/или развитию процесса трещинообразования, является воздействием, способствующим повышению износостойкости пар трения. В исследуемых условиях качения с проскальзыванием, к факторам, повышающим износостойкость контактных поверхностей, относятся:

- способность смазочного материала формировать граничные хемосорбционные слои, устойчивые к высоким градиентам скорости сдвига,
- образование вторичных структур II типа в результате структурной приспособляемости при трении,
- упрочнение поверхностных слоев металла при трении и локализация пластической деформации в тонких приповерхностных слоях.

Оценить кинетику изменения данных факторов возможно с помощью представленной методики путем использования алгоритма определения энергии активации ведущего механизма разрушения, энергии активации разрушения при предельном значении контактного давления, структурно-чувствительного коэффициента  $\gamma_{\sigma}$  для определенного контактного давления и скорости скольжения.

### **Выводы:**

1. Разработана методика оценки энергии активации в динамических условиях нагружения и представлена возможность прогнозирования долговечности элементов трибосопряжения по кинетике накопления энергии активации разрушения при трении.

2. Установлено влияние величины проскальзывания при качении со скольжением, локального повышения температуры в контакте, напряженно-деформированного состояния на уровень накопления энергии активации разрушения для стали 45 при смазывании трансмиссионным маслом.

3. Установлено повышение структурно-чувствительного коэффициента  $\gamma_{\sigma}$ , с увеличением степени проскальзывания, что свидетельствует о повышении работы разрушения в трибоконтakte, увеличении объема деформированного приповерхностного слоя металла, снижении износостойкости контактных поверхностей.

### **Список литературы**

1. Журков, С.Н. Проблема прочности твердых тел / С.Н. Журков // Вестник АН СССР. – 1957. – №11. – С. 78–82.
2. Регель, В.Р. О кинетике механического и электрического разрушения / В.Р. Регель, А.И. Слуцкер. – К 90-летию С.Н. Журкова. – СПб.: ФТИРАН, 1995. – С. 14-20.

3. Громаковський, Д.Г. Современные технологии и долговечность поверхностей трения при усталостном механизме изнашивания / Д.Г. Громаковський, В.А. Горохов, Г.А. Кулаков, Л.М. Рыбакова, И.Д. Ибатуллин // Трение и смазка в машинах и механизмах. – 2006. – Вып. 3. – С.11–20.
4. Ибатуллин И.Д. Кинетика усталостной повреждаемости и разрушения поверхностных слоев: монография / И.Д. Ибатуллин. – Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2008. –387 с.
5. Коллинз Дж. Повреждение материалов в конструкциях: Анализ, предсказание, предотвращение / Дж. Коллинз. – Перевод с англ., М. : Мир, 1984. – 624 с.
6. Регель, В.Р. Структурно-динамическая гетерогенность – основа физики разрушения твердых тел / В.Р. Регель, А.И. Слущер // Соросовский образовательный журнал. – Том 8. – №1. – 2004. – С. 86-92.
7. Регель, В.Р. Кинетическая природа прочности твердых тел / В.Р. Регель, А.И. Слущер, Э.И. Томашевский. – М.: Наука, 1974. – 560 с.
8. Kassner M. E. Harper-Dorn creep / М.Е. Kassner, Р.К. Kumar, W. Blum // International Journal of Plasticity. – 2007. – №25. – р. 980-1000.
9. Громаковський Д.Г. АС СССР № 1490592 Способ оценки энергии активации материалов/ Громаковський Д.Г., Беленьких Е.В., Ибатуллин И.Д., Карпов А.С. и др., опубл. в бюл. изобретений Государственного комитета СССР №24 от 30.06.89.
10. Громаковський Д.Г. Патент №216645 РФ. Способ оценки энергии активации разрушения материала поверхностного слоя деформированного трением / Громаковський Д.Г., Беленьких Е.В., Ибатуллин И.Д., Ковшов А.Г. и др., опубл. 10.05.2001.
11. Мікосянчик О.О. автоматизований триботехнічний комплекс для оцінки змащувальних процесів в парах тертя / Мікосянчик О.О., Запорожець О.І., Мнацаканов Р.Г. // Проблеми трибології. – Хмельницький: ХНУ. – 2015. – №4. – С. 42-48.
12. Al-quraan T. M.A. The Effect of the Slippage Degree at Rolling with Slipping on the Wear Resistance of Contact Surfaces / Т.М.А. Al-quraan, О. О. Mikosyanchik, R. G. Mnatsakanov // Mechanical Engineering Research. – 2016. – Vol. 6, No. 2. – P.48 – 61.
13. Костецкий Б.И. Поверхностная прочность материалов при трении / Б.И. Костецкий, И.Г. Носовский, А.К. Караулов. – Киев: Техніка, 1976. – 296 с.

Стаття надійшла до редакції 27.01.2017

О.О. МІКОСЯНЧИК

### ТЕРМО-КІНЕТИЧНА МОДЕЛЬ ОЦІНКИ ДОВГОВІЧНОСТІ КОНТАКТНИХ ПОВЕРХОНЬ В УМОВАХ МАСТИЛЬНОГО ДІЇ В НЕСТАЛИХ РЕЖИМАХ РОБОТИ

Запропоновано феноменологічну модель оцінки довговічності зношуваного шару, яка враховує наявність двох областей накопичення пошкоджень, а саме області багатоперіодичної контактної втоми і дебрис-шару. Запропоновано методи оцінки параметрів, що входять в модель, для розрахунку довговічності області багатоперіодичної втоми; отримані вирази зв'язують напружено-деформований стан, характеристики втомної міцності матеріалу з характеристиками фізичної моделі руйнування матеріалу, заснованої на термофлуїдаційній теорії міцності твердих тіл. Встановлено вплив ступеня зміцнення приповерхневих шарів, типу вторинних структур і граничних плівок мастильного матеріалу, утворених в результаті структурної пристосованості, на енергію активації руйнування при терті.

**Ключові слова:** енергія активації руйнування, структурно-чутливий коефіцієнт, довговічність, напружено-деформований стан, кочення з проковзуванням.

**Мікосянчик Оксана Олександрівна** – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри безпеки життєдіяльності, Національний авіаційний університет, пр. Космонавта Комарова, 1, м. Київ, Україна, 03058, тел.: +38 044 406 78 91, E-mail: [oksana.mikos@bk.ru](mailto:oksana.mikos@bk.ru).

O. O. MIKOSYANCHIK

## THERMO-KINETIC MODEL FOR ASSESSMENT OF DURABILITY OF CONTACT SURFACES UNDER LUBRICATING IN NON-STATIONARY MODE OF OPERATION

A phenomenological model for assessing the durability of the wear layer is suggested. The model considers two areas of damage accumulation, namely the areas of multiple-cycle contact fatigue and debris layer. In the model, the methods of evaluating the parameters to describe durability cycle fatigue are suggested. Based on thermo-fluctuation theory of strength of solids, the expressions have been obtained that relate the stress-strain state and the characteristics of material fatigue strength with the characteristics of a physical model of the material fracture. The influence of the degree of hardening of the near surface layers, such as secondary structures and boundary lubricant layer formed as a result of structural adaptability, on the activation energy leading to failure mechanism under friction has been identified.

**Key words:** activation energy of fracture, structural-sensitive factor, durability, stress-strain state, rolling with slippage.

### References

1. Zhurkov, S.N. Problema prochnosti tverdyh tel / S.N. Zhurkov // Vestnik AN SSSR. – 1957. – №11. – S. 78–82.
2. Regel', V.R. O kinetike mehanicheskogo i jelektricheskogo razrushenija /V.R. Regel', A.I. Slucker. – K 90-letiju S.N. Zhurkova. – SPb.: FTIRAN, 1995. – S. 14-20.
3. Gromakovskij, D.G. Sovremennye tehnologii i dolgovechnost' poverhnostej tre-nija pri ustalostnom mehanizme iznashivaniya / D.G. Gromakovskij, V.A. Gorohov, G.A. Kulakov, L.M. Rybakova, I.D. Ibatullin // Trenie i smazka v mashinah i mehanizmah. – 2006. – Vyp. 3. – S.11–20.
4. Ibatullin I.D. Kinetika ustalostnoj povrezhdaemosti i razrushenija poverhno-stnyh sloev: monografija / I.D. Ibatullin. – Samara: Samar. gos. tehn. un-t, 2008. –387 s.
5. Kollinz Dzh. Povrezhdenie materialov v konstrukcijah: Analiz, predskazanie, predotvrashhenie / Dzh. Kollinz. - Perevod s angl., M. : Mir, 1984. – 624 s.
6. Regel', V.R. Strukturno-dinamicheskaja geterogennost' – osnova fiziki razrushe-nija tverdyh tel / V.R. Regel', A.I. Slucker // Sorosovskij obrazovatel'nyj zhurnal. – Tom 8. – №1. – 2004. – S. 86-92.
7. Regel', V.R. Kineticheskaja priroda prochnosti tverdyh tel / V.R. Regel',A.I. Slucker, Je.I. Tomashevskij. – M.: Nauka, 1974. – 560 s.
8. Kassner M. E. Harper-Dorn creep / M.E. Kassner, P.K. Kumar, W. Blum // International Journal of Plasticity. – 2007. – №25. – p. 980–1000.
9. Gromakovskij D.G. AS SSSR № 1490592 Sposob ocenki jenerгии aktivacii mate-rialov/ Gromakovskij D.G., Belen'kih E.V., Ibatullin I.D., Karpov A.S. i dr., opubl. v bjul. izobretenij Gosudarstvennogo komiteta SSSR №24 ot 30.06.89.
10. Gromakovskij D.G. Patent №216645 RF. Sposob ocenki jenerгии aktivacii raz-rushenija materiala poverhnostnogo sloja deforma-rovannogo treniem / Gromakovskij D.G., Belen'kih E.V., Ibatullin I.D., Kovshov A.G. i dr., opubl. 10.05.2001.
11. Mikosyanchyk O.O. avtomatyzovanny trybotekhnichnyy kompleks dlya otsinky z mashchu-val'nykh protsesiv v parakh tertya / Mikosyanchyk O.O., Zaporozhets' O.I., Mnatsakanov R.H. // Problemy trybolohiyi. – Khmel'nyts'kyy: KhNU.– 2015. – #4. - S. 42-48.
12. Al-quraan T. M.A. The Effect of the Slippage Degree at Rolling with Slipping on the Wear Resistance of Contact Surfaces / T.M.A. Al-quraan, O. O. Mikosyanchik, R. G. Mnatsakanov // Mechanical Engineering Research. – 2016. – Vol. 6, No. 2. – P.48 – 61.
13. Kosteckij B.I. Poverhnostnaja prochnost' materialov pri trenii / B.I. Kostec-kij, I.G. Nosovskij, A.K. Karaulov. - Kiev: Tehnika, 1976. – 296 c.