

## СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ КИНЕТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ УСТАЛОСТНОГО ИЗНАШИВАНИЯ ПОВЕРХНОСТЕЙ ТРЕНИЯ

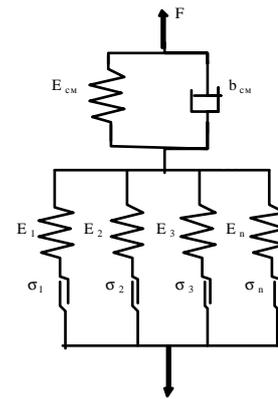
© 2006 И.Д. Ибатуллин, Д.Г. Громаковский, А.Г.Ковшов

Самарский государственный технический университет

В статье представлены результаты лабораторных исследований кинетики процесса изнашивания пары трения «бронза-сталь» с приложенной на контакт гармонической вибрацией. Описаны оригинальный стенд и методика испытаний на изнашивание и показаны способы оценки собственных частот фрикционного стыка. Приведены результаты совершенствования кинетической модели для расчета усталостного изнашивания с учетом влияния наложенных вибраций.

Наличие вибрации в тяжело нагруженных узлах трения ставится в один ряд с основными разрушающими факторами [1], лимитирующими их долговечность и поэтому требует тщательного изучения. В решении задачи управления собственными динамическими характеристиками стыков пар трения кроется скрытый ресурс повышения их эксплуатационной надежности. В статье приводятся результаты исследований влияния нормальной вибрации на кинетику изнашивания бронзы БрАЖН 10-4-4 при трении по стали 30 ХГСНА. В ходе экспериментов производилась оценка износа, микротвердости и энергии активации пластической деформации поверхностных слоев образцов бронзы в зависимости от длительности приработки на стенде, позволяющем проводить испытание образцов материалов на изнашивание в широком диапазоне динамического нагружения. Известно, что любые узлы трения представляют собой локальные динамические системы, имеющие собственные динамические характеристики, зависящие от материала, форм и размеров деталей пар трения, а также от внешней нагрузки, скорости скольжения, температуры поверхностей трения и свойств смазочного слоя. В теории трения и изнашивания фрикционных пар при наличии вибраций важное место отводится построению адекватной реологической модели, описывающей динамические свойства узлов трения.

Для реалистичного описания элементов пар трения необходимо учесть влияние смазочного слоя, разделяющего поверхности трения, обладающего кинематической и объемной вязкостями.



*Рис.1. Реологическая модель  
фрикционного контакта со смазкой*

Уточненная модель стыка получается, добавлением в модель Ишлинского А.Ю. элемента Кельвина-Фойгта для вязких тел, состоящего из параллельно соединенных элементов Гука -  $E_{см}$  и Ньютона -  $b_{см}$  (рис. 1). Если энергия, переносимая волнами, будет ниже энергии внутреннего трения, произойдет полное демпфирование колебаний. Поскольку время релаксации адгезионных связей может быть достаточно велико, деформация вязких тел имеет ограниченную скорость. Параметр  $b/E$  — характеризует время запаздывания элемента Кельвина-Фойгта, причем если  $b/E \gg t$ , где  $t$  — время приложения нагрузки, то элемент ведет себя как вязкое тело, а при  $b/E \ll t$  тело можно считать упругим.

Вибрации, близкие к гармоническим, через вязкие тела передаются с запаздыванием во времени и уменьшением амплитуды, вследствие чего проявляется демпфирующий эффект. С повышением крутизны волны вибраций, например, при увеличении амплитуды или частоты колебаний, элемент Ньютона становится жестче, а ударные нагрузки

через элемент вязкости передаются, как через жесткое тело.

Таким образом, данная модель показывает, что в зависимости от конструкторской реализации и условий работы, опора бурового долота при эксплуатации может генерировать (или усиливать) колебания, а также демпфировать их. Последнее дает возможность снижать вредное воздействие вибраций на долговечность долот.

Для проведения испытаний был изготовлен стенд для виброиспытаний «ВИ-1», в котором реализовано скольжение по схеме "плоскость-плоскость" при возвратно-поступательном движении с наложенной по нормали к поверхности синусоидальной вибрацией. Стенд содержит узел возвратно-поступательного движения, блок статического и динамического нагружения, а также вибрационный электродинамический стенд ВЭДС-10а. Испытания проводились при следующих показателях: материалы пары трения – сталь 30ХГСНА, бронза БрАЖН 10-4-4; смазка И-20А; удельное статическое давление 5 МПа; температура – комнатная. Перед началом испытаний на изнашивание проводилась приработка образцов до появления установившегося режима, характеризующегося появлением следов износа на всей поверхности трения, а также стабилизацией средней температуры и момента трения.

При испытаниях оценивались следующие динамические характеристики: резонансная частота стыка; виброускорение; амплитуды динамических сил и перемещений образцов; динамический коэффициент. Эти параметры общеприняты и позволяют провести полный анализ влияния вибрации на характеристики контактирования и изнашивания пары трения.

В качестве критерия при поиске собственных частот стыка использовалось явление резкого повышения амплитуд сил и перемещений элементов колебательной системы при резонансе. Для этого были апробированы два метода: метод сравнений виброускорений и метод измерений амплитуд колебаний.

Метод сравнений является косвенным методом оценки резонансных частот стыка, заключающийся в том, что последовательно производят измерение виброускорений в

широком диапазоне частот при непосредственном контакте образцов, а затем при изоляции контакта демпфирующей прокладкой. Результаты испытаний приведены на рис. 2. В качестве прокладки использовалась полоса резины толщиной 0,5мм. Из эшюры видно, что на общем фоне выделяются пики на частотах 68 Гц и 136Гц. Эти частоты кратны друг другу и по сути являются гармониками одной частоты, основной из которых является 136Гц. Исчезновение этих пиков при изоляции контакта резиновой прокладкой указывает на непосредственное отношение найденных частот к свойствам самого стыка, а повышение амплитуды виброускорений на частоте 136Гц в 5,4 раз относительно амплитуд при других частотах указывает на наличие резонанса.

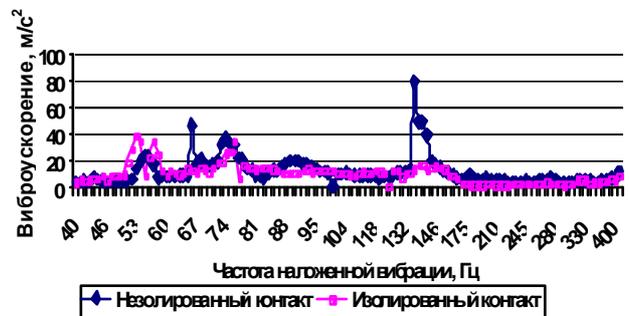


Рис.2. Зависимость виброускорения от частоты колебаний

Второй метод оценки собственных частот стыка, основанный на поиске пиков амплитуд динамических сил и перемещений в стыке при наложении вибрации различных частот, также показал, что резонанс возникает на частоте 136Гц, что подтверждает результаты, полученные предыдущим методом.

Исследование кинетики изнашивания материалов при виброн нагружении было направлено на оценку изменения параметров, характеризующих состояние поверхностных слоев по мере их изнашивания, а также установлению общей картины изнашивания материалов при различных динамических нагрузках. Для этого в ходе испытаний определяли: величину линейного износа  $h$ , микротвердость  $H_{\mu}$  и энергию активации пластической деформации поверхностного слоя  $U_0$  [1].

Чтобы установить характер изнашивания при наложенной вибрации и оценить

длительность кинетического цикла разрушения поверхностного слоя выполняли оценку всех параметров через равные интервалы наработки образцов ( $t = 3 \dots 4$  мин) на стенде ВИ-1. Основным параметром, характеризующим вибронагруженность узлов трения является динамический коэффициент -  $\mu$ . Динамическое нагружение вибронагруженных узлов трения как правило находится в пределах значений  $\mu=1 \dots 2$ . Исследования проводились при значениях  $\mu$  равных 1,5 и 2, а также для сравнения скорости изнашивания материалов производили испытания образцов без наложенной вибрации, т.е. при  $\mu=1$ . На рис.3 представлены результаты изнашивания бронзы при коэффициентах динамичности  $\mu=1,5$  (а) и  $\mu=2$  (б).

Полученная эпюра износа показывают, что в условиях наложенной вибрации проявляется циклический характер изнашивания, характерный для усталостного механизма разрушения материалов при трении, т.е. через приблизительно равные промежутки времени, соответствующие продолжительности кинетического цикла изнашивания, происходит разрушение поверхностного слоя на глубину debris-слоя -  $h_d$ .

Общим для обоих режимов вибронагружения является чувствительность значений микротвердости и энергии активации к фазе кинетических циклов изнашивания. Так, с увеличением времени наработки образцов при фазе латентного (скрытого) накопления повреждаемости (на рисунках этой фазе соответствует пологая часть эпюры изнашивания) значения энергии активации постепенно увеличиваются, что обусловлено процессами наклепа и текстурирования поверхностных слоев. Фаза разрушения поверхностного слоя сопровождается резким понижением значений  $U_0$  на 20%. Это объясняется появлением на поверхности неприработанного слоя. Указанные эффекты проявляются наиболее отчетливо при  $\mu=1,5$ , в то время как при  $\mu=2$  корреляция фазы износа и значениями параметров  $H_\mu$  и  $U_0$  становится "размытой", что свидетельствует о начале неустойчивости состояния поверхностного слоя при высоких динамических нагрузках, приближающихся к ударным.

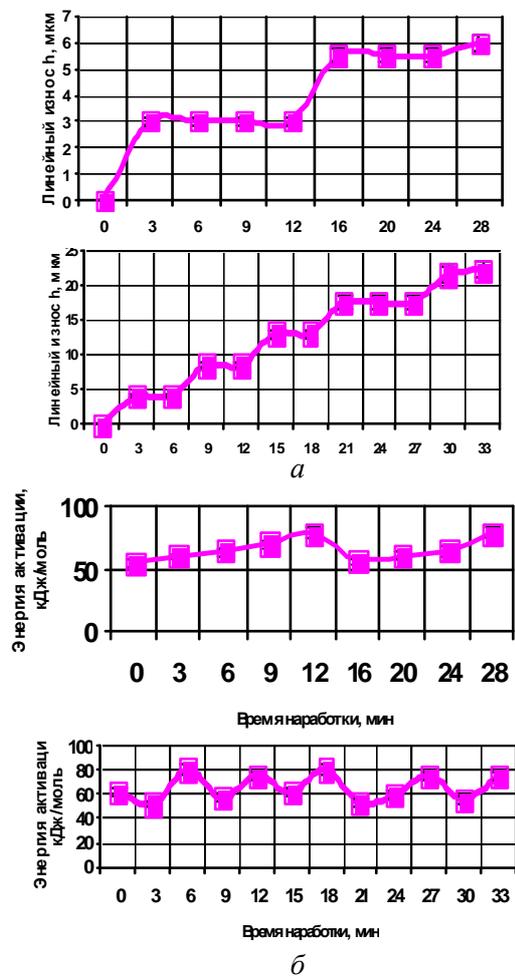


Рис. 3. Кинетика изнашивания бронзы; а) при  $\mu=1,5$ , б) при  $\mu=2$

Можно отметить, что с ростом динамической нагрузки существенно повышается скорость изнашивания, при этом длительность кинетических циклов уменьшается от  $T_{ц}^{\mu=1,5} = 9$  мин до  $T_{ц}^{\mu=2} = 6$  мин, а толщина слоя, подверженного усталости и разрушению увеличивается от  $h_d^{\mu=1,5} = 2,7$  мкм до  $h_d^{\mu=2} = 4,2$  мкм. При этом видно, что среднее значение микротвердости  $H_\mu=328$  кг/мм<sup>2</sup> при  $\mu=1,5$ , превышают средние значения 276 кг/мм<sup>2</sup> при  $\mu=2$ , в то время как значения энергии активации почти не изменились. Это позволяет констатировать, что рост динамической составляющей нагружения вызывает пластическую деформацию поверхностного слоя на большей глубине, при этом образующиеся дислокации рассредоточиваются по большему объему, вследствие чего за время кинетического цикла не успевает произойти необходимый наклеп и текстурирование поверхностей трения. Таким образом, поверхностный слой разрушается и разрушается при трении более интенсивно.

Величина средних значений энергии активации  $U_0^{cp}=69$  кДж/моль и ее неизменность при варьировании  $\mu$  показывает, что ведущий механизм разрушения поверхностных слоев при наличии или отсутствии наложенных динамических нагрузок остается один и тот же - малоцикловая усталость, вызванная пластической деформацией поверхностей при трении.

Как показали исследования кинетики усталостного изнашивания деталей пар трения наложение гармонической вибрации [1] существенно влияет на интенсивность разрушения поверхностей при трении, но основной механизм повреждаемости материала поверхностного слоя – малоцикловая усталость - остается неизменным. Усталостный характер изнашивания, как известно, проявляется в существовании двух последовательных этапов деградации поверхностного слоя. На первом этапе происходит латентное накопление дефектов в тонком поверхностном слое, толщина которого, как правило, не превышает нескольких микрометров.

В течение этой фазы основные процессы диссипации энергии трения сосредоточены на микро- и мезоуровнях, происходят структурные и микрогеометрические изменения поверхностного слоя. При этом на макроуровне, видимых изменений не происходит, а на эпюре изнашивания наблюдается пологая часть (кажущаяся безызносность). Второй этап характеризуется быстрым диспергированием накопившего микроповреждения поверхностного слоя, после чего обнажается нижележащий, неприработанный участок поверхностного слоя, который вновь подвергается указанным циклическим изменениям. При стабильных условиях трения длительность циклов и толщина разрушаемого слоя в среднем остаются неизменными. Подобная пространственно-временная локализация процесса разрушения поверхностного слоя является следствием фундаментальных свойств диссипативных систем и требует привлечения энергетических представлений к описанию состояния поверхности трения.

В качестве базовой расчетной модели скорости изнашивания материалов была рассмотрена одна из наиболее проработанных

моделей кинетического типа, предложенных Громаковский Д.Г. [2] в виде:

$$J_V = \frac{V_0}{T_u} = \frac{\Delta A_r \cdot n_r \cdot h_0}{n_p \cdot \xi \cdot \lambda \cdot \tau_0 \cdot \exp\left(\frac{U_0 - \psi \cdot \gamma \cdot \sigma}{R \cdot T}\right)}, \quad (1)$$

где  $V_0$  – активируемый объем поверхностного слоя,  $m^3$ ;  $T_u$  – длительность кинетического цикла изнашивания, с;  $P_p$  – коэффициент релаксации повреждений,  $\xi$  – коэффициент исходной повреждаемости материала,  $\psi$  – коэффициент поглощения,  $\Delta A_r \cdot n_r$  – фактическая площадь касания поверхностей трения,  $\tau_0$  – постоянная времени,  $\approx 10^{-12} \dots 10^{-13}$  с,  $U_0$  – энергия активации разрушения межатомной связи при отсутствии внешних напряжений, кДж/моль;  $\gamma$  – структурно-чувствительный коэффициент,  $R$  – универсальная газовая постоянная,  $T$  и  $\sigma$  – соответственно абсолютная температура и действующая эквивалентная нагрузка.

Нужно отметить, что представленная модель единственная, в которой нашел отражение динамический параметр  $\psi$  – коэффициент поглощения, отражающий диссипативность контакта. Однако модель требует дополнения в плане отражения виброактивности контакта, когда энергия динамических процессов преобладает над демпфирующим действием стыка.

Для удобства расчетной оценки и сопоставления их с экспериментальными результатами преобразуем данную модель в выражение для оценки скорости линейного изнашивания  $J_l$ , принимая следующие допущения.

1. Давление в зоне фактического пятна касания, приблизительно равно твердости материала,  $p_r = N_s/A_\phi \approx H_w$ , где  $A_\phi$  – площадь фактического контакта,  $[mm^2]$ ;  $N_s$  – эквивалентная нагрузка,  $[кгс]$ .

2. Эквивалентная нагрузка, действующая на поверхностях деталей при трении составляет, согласно энергетической теории прочности,  $N_s = \sqrt{F_N^2 + 3 \cdot F_\tau^2}$ , где  $F_N$  – нормальная, а  $F_\tau$  – касательная составляющая действующей нагрузки.

3. Касательная нагрузка в зоне контакта составляет  $F_\tau = f \cdot F_N$ .

Принимая допущения 1÷3, выразим площадь фактического контакта через нормальную нагрузку, коэффициент трения и

твердость более мягкого материала рассчитываемой пары трения

$$A_{\text{тм}} = \frac{F_N \sqrt{(1 + 3 \cdot f^2)}}{H_\mu} \quad (2)$$

С учетом данного выражения запишем выражение (1) в виде

$$J_v = \frac{h \cdot F_N \sqrt{(1 + 3 \cdot f^2)} \cdot 3600}{H_\mu \cdot \tau_0 \cdot \exp\left[\frac{U_0 - \gamma \cdot \sigma}{R \cdot T}\right]} \quad (3)$$

Из полученного выражения видно, что для выполнения инженерных расчетов на износ необходимо задать действующие значения внешних факторов: температуры и нагрузки  $-T$ ,  $\sigma$ ,  $F_N$ ; а также экспериментальным путем, после приработки поверхностей, оценить коэффициент трения  $-f$ ; толщину debris-слоя  $-h$ , и собственные характеристики изнашиваемого материала  $-U_0$ ,  $\gamma$ ,  $H_\mu$ . При использовании следующих размерностей параметров модели:  $h$  [мкм];  $N$  [кгс];  $H_\mu$ ,  $\sigma$  [кгс/мм<sup>2</sup>];  $\rho$  [кг/м<sup>3</sup>];  $U_0$  [кдж/моль];  $\gamma$  [кдж·мм<sup>2</sup>/моль·кгс], выражение (3) будет иметь размерность [мм<sup>3</sup>/ч]. На основе данной расчетной модели можно получить модель для оценки скорости линейного  $J_h$  изнашивания

Для успешного применения приведенной модели необходимо решить задачу оценки влияния наложенной вибрации на скорость изнашивания, а также в идентификации параметров кинетической модели (4) чувствительных к вибрации.

$$J_h = \frac{h \cdot \sigma \sqrt{(1 + 3 \cdot f^2)} \cdot 3600}{H_\mu \cdot \tau_0 \cdot \exp\left[\frac{U_0 - \gamma \cdot \psi \cdot \sigma}{R \cdot T}\right]}, \text{ [мкм/ч]} \quad (4)$$

Результаты проведенных исследований свидетельствуют о пропорциональном влиянии суммарной, статической и динамической, нагрузок на глубину протекания усталостных процессов. Таким образом, при постоянной величине статического компонента нагрузки можно записать

$$h_0 = h_{00} \cdot \mu, \quad (5)$$

где  $h_{00}$  – глубина debris-слоя в отсутствие наложенных вибраций.

Выражение (5) подтверждается экспериментальными данными по изнашиванию пары трения, при удельных статических нагрузках  $\sigma=10$  МПа. Сопоставление результатов показало, что при изнашивании бронзы

БрАЖН 10-4-4 толщина разрушаемого слоя при динамическом коэффициенте  $\mu = 2$  и статическом напряжении  $\sigma = 5$  МПа оказалась равной толщине изнашиваемого слоя при отсутствии динамической нагрузки, но при более высоком статическом напряжении  $\sigma = 10$  МПа. В обоих случаях она составляла 4 мкм. Следовательно, можно утверждать, что влияние на  $h_d$  приращения статической нагрузки за счет динамической можно рассматривать как действие только статической нагрузки, но с величиной равной сумме амплитуды динамической и статической нагрузок.

Поскольку давления на площадках фактического контакта почти в три раза превышают предел текучести материалов даже небольшие приращения амплитуды при виброн нагружении будут приводить к ускоренному наклепу поверхностей трения, а, учитывая, что пластическая деформация может достигать скоростей, приближающихся к скорости звука в металлах, то частота вынужденных колебаний не играет значительной роли, т.к. деформация успеет произойти за время прохождения волны колебаний.

Длительность кинетического цикла изнашивания определяется активационными параметрами: энергией активации пластической деформации  $-U_0$ , и структурно-чувствительным коэффициентом  $- \gamma$ , характеризующими соответственно ведущий механизм разрушения и исходную повреждаемость материала. Как было показано, энергия активации не изменяет своего значения при различных параметрах вибрации, что свидетельствует о неизменности механизма разрушения.

Повышение микротвердости при пониженных амплитудах вибраций, обусловленное быстрым наклепом и текстурированием тонкого поверхностного слоя в течение одного кинетического цикла вызывает понижение структурно-чувствительного коэффициента. Таким образом, наклепанный материал становится менее чувствительным к величине действующих напряжений, а время до его разрушения соответственно возрастает. Кроме того, с повышением микротвердости материала уменьшается площадь фактического касания поверхностей трения согласно зависимости

$$A_r = N/HB. \quad (6)$$

Однако, поскольку значения  $\gamma < U_0$ , то изменение  $\gamma$ , как правило, не оказывает заметного влияния на длительность кинетического цикла. Эксперименты показали, что изменение параметров вибраций не вызвало значительных изменений значений остальных параметров модели – коэффициента трения, температуры саморазогрева образцов и др. Однако необходимо указать, что в ряде частных случаев эти изменения возможны.

Таким образом, установлено, что наиболее чувствительными к изменению виброн нагруженности пары трения являются следующие параметры кинетической модели:  $h_d$ ,  $H_\mu$  и  $\gamma$ . Причем изменение  $h_d$  имеет линейную корреляцию с динамическим коэффициентом в диапазоне  $\mu=1 \dots 2$ .

В результате проведенной идентификации вибросочувствительных параметров модель можно представить в виде

$$J_h = \frac{h_{d0} \cdot \mu \cdot \sigma \sqrt{(1 + 3 \cdot f^2)} \cdot 3600}{H_\mu^* \cdot \tau_0 \cdot \exp\left[\frac{U_0 - \gamma^* \cdot \psi \cdot \sigma}{R \cdot T}\right]} \quad (8)$$

В данной модели параметры, отмеченные звездочками, требуют экспериментальной оценки после этапа приработки образцов.

Проверку адекватности полученной модели (8) проводили путем сравнения расчетных и экспериментальных данных. Испытания на изнашивание при наложенной вибрации проходили в НТЦ «Надежность» на стенде ВИ-1, разработанном в рамках работ по программе «Интеграция».

В таблице 1 представлены экспериментальные и расчетные значения скорости линейного изнашивания, полученные при  $\sigma=5$  МПа;  $h_{d0}=1,8$  мкм;  $f=0,1$ ;  $U_0=69$  кДж/моль;  $T=300$ К;  $\psi=1,2$ ; смазочное масло – И-12А.

Таблица.1. Скорость изнашивания бронзы БрАЖН 10-4-4 при наложенной вибрации

Динамический коэффициент, $\mu$	Скорость изнашивания $J_h$ , мкм/час	
	эксперимент	расчет
1 (без вибрации)	$12,3 \pm 3$	9,9
1,5	$15,9 \pm 3$	15,4
2	$23,5 \pm 3$	24,6

Как видно из таблицы, расчетные данные хорошо соотносятся с экспериментальными результатами, что свидетельствует о возможности использования этой модели в инженерной практике при разработке узлов трения, работающих в условиях интенсивных вибронгрузок.

#### Список литературы

1. Алексеев Г.Ф. О трении и износе фрикционных пар при вибрационных нагрузках. /В сб. Теоретические и прикладные задачи трения, износа и смазки машин. –М.: Наука, 1982г. – 285с.
2. Громаковский Д.Г. Система понятий и структура моделей изнашивания // Трение и износ. 1997г., том 18, №1.- С.53-62.

## PERFECTION OF KINETIC MODEL OF FATIGUE WEARING OF SURFACES ON FRICTION

© 2006 I.D. Ibatullin, D.G. Gromakovskiy, A.G.Kovshov  
Samara State Technical University

In the article results of laboratory research of wear process of pair friction «bronze - steel» with the imposed normal vibration are described. The technique and the stand for wear tests at the imposed vibration are presented. Ways of an estimation of own frequency of a frictional joint are shown. Results of development of calculation model of kinetic type for an estimation of speed of wear process are resulted in view of influence of dynamic loadings.