

УДК 539.4

ВЛИЯНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ НАГРУЖЕНИЯ ПРИ ВИБРОТРЕНИИ НА ЭКВИВАЛЕНТНЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ И СКОРОСТЬ ИЗНОСА В СКОЛЬЗЯЩЕМ КОНТАКТЕ

© 2020 А.Г. Ковшов

Самарский государственный технический университет

Статья поступила в редакцию 12.05.2020

Приведен расчет напряжений в плоском скользящем контакте в условиях вибрационного трения при фреттинге. Расчетом и экспериментально оценено влияние механических параметров нагружения (нагрузки, амплитуды и частоты осцилляции) на эквивалентные напряжения в контакте и скорость линейного износа поверхностей трения.

Ключевые слова: трение, износ, вибрация, фреттинг, скорость, контакт, напряжение, параметр, динамика.

DOI: 10.37313/1990-5378-2020-22-3-98-102

ВВЕДЕНИЕ

Среди многочисленных факторов влияния на интенсивность фреттинг-износа металлов и сплавов наибольшее влияние оказывают параметры внешних механических воздействий: контактное давление, амплитуда и частота осцилляций на контакте. Обобщение результатов исследований отечественных и зарубежных авторов [1] показало, что определение роли перечисленных факторов в механизме разрушения контактирующих при фреттинге поверхностей не завершено.

Накопленный к настоящему времени обширный теоретический и экспериментальный материал в области механики контактных взаимодействий [1, 2] позволяет проводить расчеты фактической площади контакта (ФПК), объема вовлеченного в контактную деформацию материала, напряжений и других характеристик структуры ФПК номинально неподвижных шероховатых поверхностей при различных видах деформации микронеровностей: упругой, пластической, упруго-пластической. Установленные расчетные зависимости не учитывают влияния скорости скольжения в контакте, что сдерживает распространение их на случаи расчета эквивалентных напряжений и скорости износа при совместном действии нормальных и тангенциальных сил на вовлеченный в контактную деформацию микрообъем материала.

В настоящей работе приведены результаты расчетной и экспериментальной оценки влияния внешних механических факторов (нагрузки, амплитуды и частоты колебаний) на эквивалентные напряжения в скользящем контакте и скорость линейного износа с целью уточнения

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

предложенной автором [3, 4] обобщенной кинетической термофлуктуационной модели изнашивания при трении:

$$V_h = \frac{\varepsilon_* C k T}{\alpha} \frac{\lambda}{h} \frac{1}{\sigma_p A_a} \exp \left[- \frac{\varepsilon_* C}{\alpha} \left(1 - \frac{\sigma_{\text{ЭКВ}}}{\sigma_p} \right) \frac{\lambda}{k T} \right]; \quad (1)$$

или в условиях ведущей роли «атермического» механизма износа при $\sigma_{\text{ЭКВ}}/\sigma_p \geq 1$

$$V_h = \frac{\varepsilon_* C k T}{\alpha} \frac{\lambda}{h} \frac{\sigma_{\text{ЭКВ}}}{\sigma_p^2} \frac{1}{A_a}, \quad (2)$$

где V_h – скорость линейного износа, м/с; ε_* = 0,1 ÷ 0,2 – относительное удлинение, при котором межатомная связь теряет устойчивость и разрывается; C – атомная (молярная) теплоемкость, Дж/°К, для одноатомных кристаллов $C \cong 3k$, где $k = 1,38 \times 10^{-23}$, Дж/°К – постоянная Больцмана; α – коэффициент термического линейного расширения, °К⁻¹; h = 6,626 × 10⁻³⁴ Дж/Гц – постоянная Планка; T – термодинамическая температура, °К; A_a – номинальная площадь поверхности трения, м²; l – число фрикционных связей (опорных точек) на поверхности трения; σ_p – разрывное напряжение, Н/м²; $\sigma_{\text{ЭКВ}}$ – эквивалентное напряжение на поверхности скользящего контакта, Н/м².

РАСЧЕТ НАПРЯЖЕНИЙ В ПЛОСКОМ СКОЛЬЗЯЩЕМ КОНТАКТЕ

При сближении под действием нормальной нагрузки двух шероховатых поверхностей формируется ФПК, равная сумме элементарных площадок контакта, возникающих при деформации отдельных микронеровностей. В прилегающей к ФПК области при взаимном внедрении шероховатостей в поверхности двух тел образуется некоторый микрообъем материала, который вовлекается в контактную деформацию. Среднее касательное напряжение на ФПК

найдем, определив полную механическую энергию сдвига этого микрообъема, при следующих допущениях: весь внедренный микрообъем материала деформируется одновременно; сдвиг микрообъема происходит в плоскости, параллельной плоскости трения; деформация осуществляется в области упругости и на границе упругости, при достижении текучести материала рост нагрузки не вызывает значительных изменений напряжения; увеличением ФПК при сдвиге пренебрегаем. Последнее связано с тем, что даже при пластическом контакте приложение тангенциальных сил к сопряжению приводит к увеличению ФПК не более чем на 5% [2].

Пусть элементарный микрообъем (рис. 1) в виде кубика находится в условиях сдвига [6]. Величина сдвига грани CD равна $CC_1 = DD_1 = \Delta S$. Угол сдвига - γ . Так как упругие деформации и деформации в области перехода к текучести материала малы, то можно принять

$$\gamma \cong \text{tg}\gamma \cong \Delta S/a, \quad (3)$$

где a – расстояние между гранями кубика.

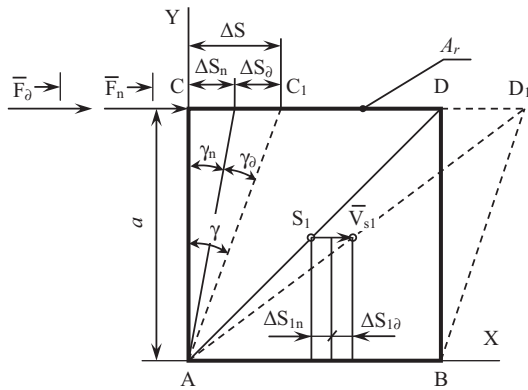


Рис. 1. Иллюстрация сдвига

Обозначим площадь грани, по которой действуют касательные напряжения, A_r , а усилие, действующее вдоль этой грани, представим, используя принцип независимости действия сил, двумя векторами \bar{F}_n и \bar{F}_δ . Усилие \bar{F}_n – квазистатическое, постепенно возрастающее от нуля до конечного значения вызывает сдвиг на величину ΔS_n . Усилие \bar{F}_δ – динамическое, под действием которого общий центр масс S_1 выделенного элемента на участке перемещения $\Delta S_{1\delta}$ приобретает скорость V_{s1} , а грань CD сдвигается на величину ΔS_δ . Из геометрических соображений (рис. 1) получим:

$$\Delta S = \Delta S_n + \Delta S_\delta; \quad \gamma = \gamma_n + \gamma_\delta, \quad (4)$$

где

$$\gamma_n \cong \text{tg}\gamma_n \cong \Delta S_n/a, \quad \gamma_\delta \cong \text{tg}\gamma_\delta \cong \Delta S_\delta/a. \quad (5)$$

Касательные напряжения сдвига определяются [6] как

$$\tau_n = G\gamma_n, \quad \tau_\delta = G\gamma_\delta, \quad (6)$$

где G – модуль сдвига.

С другой стороны

$$\tau_n = F_n/A_r, \quad \tau_\delta = F_\delta/A_r. \quad (7)$$

Решая совместно (5), (6), (7), получим:

$$\Delta S_n = F_n a / GA_r; \quad \Delta S_\delta = F_\delta a / GA_r. \quad (8)$$

Полная механическая энергия сдвига

$$W = W_n + W_k. \quad (9)$$

Потенциальную энергию сдвига представим как работу силы F_n на пути перемещения ΔS_n . Эта работа выражается [6] площадью треугольника (рис. 1)

$$W_n = F_n \Delta S_n / 2. \quad (10)$$

Подставляя в (10) ΔS_n из равенства (8), получим

$$W_n = F_n^2 a / 2GA_r. \quad (11)$$

Умножив и поделив выражение (11) на величину площади A_r грани, по которой действуют касательные напряжения и, приняв во внимание (7), найдем значение потенциальной энергии сдвига в виде:

$$W_n = \tau_n^2 V_\delta / 2G, \quad (12)$$

где $V_\delta = A_r a$ – вовлеченный в контактную деформацию микрообъем материала, а напряжение

$$\tau_n = \sqrt{2W_n G / V_\delta}. \quad (13)$$

Кинетическая энергия сдвига определится из выражения

$$W_k = mV_{s1}^2 / 2, \quad (14)$$

где m – масса деформируемого объема материала, $V_{s1} = \Delta S_{1\delta} / t$ – скорость деформации.

Полагая $\Delta S_{1\delta} = \Delta S_\delta / 2$, получим

$$W_k = m\Delta S_\delta^2 / 8t^2, \quad \text{или} \quad W_k = mV^2 / 8, \quad (15)$$

где $V = \Delta S_\delta / t$ – скорость сдвига в плоскости трения.

Подставляя в уравнение (15) ΔS_δ из равенства (8), найдем

$$W_k = \frac{1}{8} m \frac{F_\delta^2 a \Delta S_\delta}{GA_r t^2}, \quad (16)$$

но $\frac{\Delta S_\delta}{t^2} = \ddot{x}$, а $|m\ddot{x}| = F_\delta$, где \ddot{x} – ускорение, тогда

$$W_k = F_\delta^2 a / 8GA_r. \quad (17)$$

Умножив и поделив выражение (17) на A_r , получим

$$W_k = \tau_\delta^2 V_\delta / 8G, \quad (18)$$

а напряжение

$$\tau_\delta = \sqrt{8W_k G / V_\delta}. \quad (19)$$

Складывая (13) и (19), получим полное касательное напряжение при сдвиге

$$\tau = \sqrt{2W_n G / V_\delta} + \sqrt{8W_k G / V_\delta}. \quad (20)$$

Подставляя в уравнение (20) выражения (10) и (15) потенциальной и кинетической энергии сдвига, найдем

$$\tau = \sqrt{F_n \Delta S_n G / V_\delta} + \sqrt{mV^2 G / V_\delta}. \quad (21)$$

Положив в выражении (21) $m = \rho V_\delta$, где ρ – плотность материала; $F_n = \mu N$, где N – нормальная нагрузка, μ – коэффициент трения; значенные ΔS_n из равенства (8) и сделав некоторые преобразования, получим выражение для касательного напряжения в виде:

$$\tau = q_r \mu + V \sqrt{\rho G \tau} = q_r \mu + V \sqrt{\rho G}, \quad (22)$$

где $q_r = N/Ar$ – фактическое нормальное давление в контакте.

В условиях возвратно-поступательного или вибрационного трения максимальная скорость скольжения $V \cong 2\pi Af$, где A – амплитуда, f – частота осцилляции в контакте, а напряжение сдвига

$$\tau = q_r \mu + 2\pi Af \sqrt{\rho G}. \quad (23)$$

Из анализа напряженного состояния материала на скользящем контакте авторы работы [2] установили, что эквивалентное напряжение определится как

$$\sigma_{\text{экв}} = \kappa_1 \tau, \quad (24)$$

где κ_1 – коэффициент, зависящий от принятой гипотезы прочности. При использовании гипотезы наибольших нормальных или касательных напряжений $\kappa_1=3$, а эквивалентное напряжение в области фактического контакта определится как

$$\sigma_{\text{экв}} = 3\tau = 3(q_r \mu + 2\pi Af \sqrt{\rho G}). \quad (25)$$

Выражения (22) и (23) предсказывают линейную зависимость касательного напряжения от нагрузки и скорости (амплитуды и частоты) относительного проскальзывания в контакте.

Зависимость влияния каждого из слагаемых формулы (23) оценим расчетным путем в условиях вибрационного трения (фреттинга) одноименной контактной пары из сплава ВТ9 при следующих данных: $N=300$ Н, $A_r = 0,357 \cdot 10^{-6}$ м², $\mu = 0,54$, $\rho = 4480 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$, $G = 0,38 \cdot E$, где $E = 1,1 \cdot 10^{11}$ Н/м² – модуль упругости материала, $A = 15 \cdot 10^{-6}$ м, $f = 310$ Гц,

$$\tau = (454 \cdot 10^6 + 0,4 \cdot 10^6) \text{ Н/м}^2. \quad (26)$$

Как следует из расчета, такая модель дает качественно правильное представление о связи напряжения с параметрами динамического нагружения. При умеренных скоростях скольжения (амплитуде и частоте) вторым слагаемым в выражениях (22) и (23) можно пренебречь вследствие его малости (1%) по сравнению с первым слагаемым. При высоких и сверхвысоких скоростях скольжения влияние второго слагаемого может стать заметным, что проявлялось в росте скорости изнашивания [1, 2], при одновременном снижении коэффициента трения.

Как показала практика оценки скорости износа образцов при лабораторных, стендовых испытаниях и в условиях эксплуатации [4,5] при малых и средних нагрузках пластическая деформация (течение материала) возникает на вершинах микронеровностей, а среднее фактическое давление на контакте достигает $q_r = 1,1\sigma_T$, где σ_T – напряжение текучести материала. При увеличении внедрения микронеровностей с повышением фактического давления пластическая деформация распространяется на весь контакт, а $q_r = c\sigma_T$, где $c \cong 3$ по А.Ю. Ишлинскому [2].

При многократном возвратно-поступатель-

ном взаимодействии микронеровностей наблюдается тенденция к вырождению пластического контакта в упругий. Фактическое нормальное давление на контакте, соответствующее переходу от пластического к упругому деформированию, определится по зависимости И.А. Вяткина [2]

$$q_r = \sigma_T / \kappa_1 \mu, \quad (27)$$

где величина κ_1 , уточнённая Е.Ф. Непомнящим, определяется по формуле

$$\kappa_1 = 1,5 \sqrt{4(1 - \mu_0 - \mu_0^2) + \frac{(1 - 2\mu_0)^2}{\mu^2}}, \quad (28)$$

где μ_0 – коэффициент Пуассона.

Расчет скорости износа различных металлов и сплавов с учетом выражений (27 и 28), то есть в предположении упруго-пластического контакта при фреттинге, показал хорошее приближение расчетных и экспериментальных данных [4, 5].

МЕТОДИКА И РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

Лабораторные испытания с целью исследования влияния факторов динамического нагружения (нагрузки, частоты и амплитуды колебаний) на скорость износа образцов из титанового сплава ВТ9 в условиях фреттинга проводились на специально разработанном стенде [4, 5], позволяющем варьировать рабочие параметры нагружения в условиях многокомпонентной вибрации. Испытывались плоские пары одноименных образцов по двухопорной схеме [5] с общей номинальной площадью контакта **30 мм²**. Рабочие поверхности образцов изготавливались фрезерованием и притиркой на плите с алмазной пастой до получения шероховатости $R_a = 0,4...0,8$ мкм по ГОСТ 2789-73. Нормальное нагружение в контакте осуществлялось грузом, действующим через систему рычагов и гибкую тягу на верхний подвижный образец.

Осциллирующие движения подвижного образца в горизонтальной плоскости, в двух взаимно-перпендикулярных направлениях, и пульсирующая нормальная нагрузка в контакте создавались тремя вибраторами электродинамического типа (ВЭД), мощность каждого из которых 200 Вт и тяговое усилие – 200 Н. Возбуждение ВЭД осуществлялось генератором ГЗ-34 и усилителем ТУ-600. Частота контролировалась частотомером-хронометром Ф5080. Амплитуды колебаний в двух взаимно-перпендикулярных направлениях измерялись датчиками емкостного типа в комплекте с виброизмерительным прибором ВВ-ЮН.

Параметры внешних воздействий при испытаниях изменялись в следующих пределах: частота колебаний – 30...310 Гц; среднегеометрическая амплитуда 3,5...30 мкм, при которой

на контакте реализуются присущие фреттингу процессы [1]; контактное давление 1...15 МПа; объемная температура – 293 °К.

Испытания проводились при одно- или многокомпонентной вибрации без смазки, с возбуждением колебаний вибраторов в одной фазе.

Переменную составляющую контактного давления в стыке задавали в виде периодической функции $q(t) = q_{дин} \cdot \sin \omega t$, а результирующее нормальное давление определяли как сумму

$$q = q_{ст} + q_{дин} \cdot \sin \omega t, \quad (29)$$

где $q_{ст} = (1.0...11)$ МПа – диапазон значений статистического давления, создаваемого весом груза; $q_{дин} = (3,0...5,0)$ МПа – диапазон значений переменной составляющей давления в контакте.

Величину износа неподвижного образца (контробразца) определяли как среднюю арифметическую величин линейных износов дорожки трения, профиль которой записывался профилографом-профилометром ВИ-201.

Результаты исследования влияния параметров динамического нагружения (нагрузки, частоты и амплитуды колебаний) на скорость износа сплава ВТ9 приведены на рис. 2.

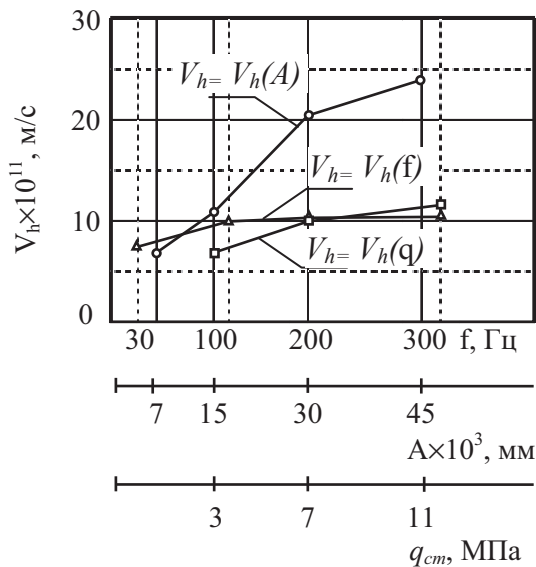


Рис. 2. Зависимость скорости линейного износа V_h сплава ВТ9:

$V_h(A)$ – от амплитуды ($f = 310$ Гц, $q_{ст} = 7$ МПа);
 $V_h(q)$ – от давления ($A = 0,015$ мм, $f = 110$ Гц);
 $V_h(f)$ – от частоты ($A = 0,015$ мм, $q_{ст} = 7$ МПа);
 $q_{дин} = 3$ МПа, $T = 293^\circ\text{K}$

Установленная функциональная связь напряжения с параметрами динамического нагружения (23, 26) в условиях фреттинга сплава ВТ9 подтверждается экспериментально (рис.2) через скорость износа, пропорциональную действующим на контакте напряжениям. Скорость линейного износа сплава в установившемся режиме фреттинга слабо возрастает с ростом

частоты (скорости) осцилляции, более интенсивно с ростом нормального давления. Влияние амплитуды осцилляции неоднозначно. Увеличение амплитуды приводит к росту скорости относительно проскальзывания, перекрытия на пятнах фактического контакта, активируемого объема материала, увеличению пути трения и смене характера контактного взаимодействия (от номинально неподвижного при фреттинге до трения скольжения) и изнашивания [1], что, очевидно, и ведет к резкому повышению скорости линейного износа.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Установлена математическая связь и оценен уровень влияния параметров внешних механических воздействий при вибрационном трении (фреттинге) на величину эквивалентных напряжений на площадках фактического контакта при одновременном действии нормальных и касательных напряжений. Экспериментально исследовано влияние внешних факторов динамического нагружения (нагрузки, частоты и амплитуды колебаний) на скорость линейного износа поверхностей трения образцов из титанового сплава ВТ9. Установленная математически функциональная связь напряжения с параметрами динамического нагружения подтверждена экспериментально через скорость линейного износа, пропорциональную действующим в скользящем контакте напряжениям, что подтверждает правомерность использования выражения для расчета эквивалентного напряжения в расчетной термофлуктуационной модели скорости изнашивания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Голего Н.Л., Алябьев А.Я., Шевеля В.В. Фреттинг-коррозия металлов. – Киев: Техника, 1974. – 272 с.
2. Крагельский И.В., Добычин М.Н., Комбалов В.С. Основы расчетов на трение и износ. – М: Машиностроение, 1977. – 526 с.
3. Ковшов А.Г. Физическая модель разрушения поверхностей трения // сб. трудов МНТК «Актуальные проблемы трибологии», июнь 2007, в 2-х томах. – Т. 2. – М.: Машиностроение, 2007. – С. 206-213.
4. Ковшов А.Г. Расчетно-экспериментальная идентификация активационных параметров модели изнашивания поверхностей трения / Известия Самарского научного центра РАН. – 2016. – Т. 18, № 4(2). – С. 341-346.
5. Ковшов А.Г. Оценка эффективности при фреттинге упрочняющего деформационного формирования поверхностей трения, совмещенного с противоизносными покрытиями / Известия Самарского научного центра РАН. 2018. – Т. 20, № 4(2)(84). – С. 248-254.
6. Беляев Н.М. Соппротивление материалов. – М: Наука, 1976. – 608 с.

**EFFECT OF DYNAMIC LOADING PARAMETERS WHEN VIBRATING
TO EQUIVALENT STRESS AND WEAR SPEED IN SLIDING CONTACT**

© 2020 A.G. Kovshov

Samara State Technical University

The calculation of stresses in a flat sliding contact under the conditions of vibrational friction during fretting is given. The calculation and experimentally estimated the influence of mechanical loading parameters (load, amplitude and oscillation frequency) on the equivalent stresses in the contact and the linear wear rate of the friction surfaces.

Key words: friction, wear, vibration, fretting, speed, contact, stress, parameter, dynamics.

DOI: 10.37313/1990-5378-2020-22-3-98-102