

# ОСОБЕННОСТИ ПРОТЕКАНИЯ ФРЕТТИНГА НА КРИВОЛИНЕЙНЫХ ПОВЕРХНОСТЯХ СОПРЯЖЕННЫХ ДЕТАЛЕЙ ТИПА ВАЛ-ВТУЛКА

Смыслов А.М., Селиванов К.С.

Уфимский государственный авиационный технический университет, г. Уфа

Из литературы известно, что динамика протекания процесса фреттинга зависит от многих факторов, таких как амплитуда, частота взаимных относительных перемещений, а также, в значительной степени, от нагрузки, действующей в сопряжении [1,2].

При контактировании криволинейных поверхностей давление по пятну контакта от приложенной внешней нагрузки будет распределяться неравномерно, что, очевидно, повлечет за собой изменения в развитии процесса фреттинга. К тому же на изменение характера этого процесса будет влиять еще и тот факт, что при изменении нагрузки на сопряжение, будет изменяться не только величина давления на пятне контакта, но и площадь самого пятна.

Рассмотрим сопряжение при внутреннем контактировании двух круговых цилиндров с параллельными осями (типа вал-втулка) радиусы которых соответственно  $r$  и  $R$ , причем  $r \approx R$ , так что  $R - r \rightarrow 0$ . Нахождение размера пятна контакта такого сопряжения из теории упругости не приемлема. Формула Г.Р. Герца [2] для нахождения ширины площадки контакта имеет вид:

$$2a = 2,256 \cdot \sqrt{\frac{F\eta}{L} \left( \frac{Rr}{R-r} \right)}, \quad (1)$$

где  $F$  - усилие, сжимающее цилиндры,  $H$ ;  $L$  - длина образующей, мм;  $\eta$  - упругая постоянная, равная  $\eta = (1-\nu_1^2)/E_1^2 + (1-\nu_2^2)/E_2^2$ ;  $E$  - модуль упругости, МПа;  $\nu$  - коэффициент Пуассона. При поставленном условии  $R - r \rightarrow 0$  расчетное значение площадки контакта по формуле (1) стремится к бесконечно большому числу.

В общем случае контактные параметры сопряжения вал-втулка определяют решением контактной задачи теории упругости о внутреннем сжатии двух цилиндрических тел, радиусы которых почти равны. В [3] приведена методика расчета контактного угла  $2\phi_0$  с помощью коэффициента нагруженности  $\beta$ :

$$\beta = \frac{P_L}{\pi E} \left( \frac{1-\nu_1^2}{E_1} + \frac{1-\nu_2^2}{E_2} \right), \quad (2)$$

здесь  $\varepsilon$ - радиальный зазор сопряжения цилиндров. Далее рассчитывается вспомогательный параметр  $A$ :

$$A = \frac{\sqrt{17 + \frac{20}{\beta} + \frac{4}{\beta^2} - \left(1 + \frac{2}{\beta}\right)}}{4(1 + 1/\beta)}, \quad (3)$$

и, наконец, искомый угол:

$$2\varphi_0 = 4 \operatorname{arctg}(\sqrt{A}), \text{ рад} \quad (4)$$

Рассчитав таким образом угол контакта сопряжения, не трудно получить и ширину площадки контакта, как произведение найденного угла на радиус сопряжения цилиндров.

Таким образом, становится возможным рассчитать максимальное действующее напряжение и распределение контактных напряжений по пятну сопряжения. Из условия равновесия цилиндра в сопряжении вал-втулка, которое определено в контактной задаче теории упругости о внутреннем сжатии двух цилиндрических тел, радиусы которых почти равны [3,4,5], следует:

$$P_L = R \int_0^{2\varphi_0} p(\varphi, \varphi_0) \cdot \cos \varphi d\varphi, \quad (5)$$

где  $P_L$  - линейная нагрузка, действующая на единицу длины вала,  $\text{Н/мм}^2$ ;  $p(\varphi, \varphi_0)$  - контактное давление,  $\text{Н/мм}^2$ , зависящее от текущей угловой координаты  $\varphi$  по пятну контакта и угла контакта  $2\varphi_0$  вала со втулкой под воздействием линейной нагрузки;

Закон распределения контактных давлений после приработки сопряжения достаточно точно описывается следующей зависимостью [5]:

$$p(\varphi, \varphi_0) = q(\varphi_0) \cos \varphi, \quad (6)$$

где  $q(\varphi_0)$  - максимальное контактное давление,  $\text{Н/мм}^2$ .

Подставим выражение (6) в (5):

$$P_L = R \int_0^{2\varphi_0} q(\varphi_0) \cdot \cos^2 \varphi d\varphi, \quad (7)$$

отсюда выразим  $q(\varphi_0)$ :

$$q(\varphi_0) = \frac{2P_L}{R(2\varphi_0 + \sin 2\varphi_0 \cos 2\varphi_0)}. \quad (8)$$

Подставляя найденные значения в (6) и изменяя угол  $\varphi$ , получаем распределение контактных напряжений по дуге контакта, см. рис. 1

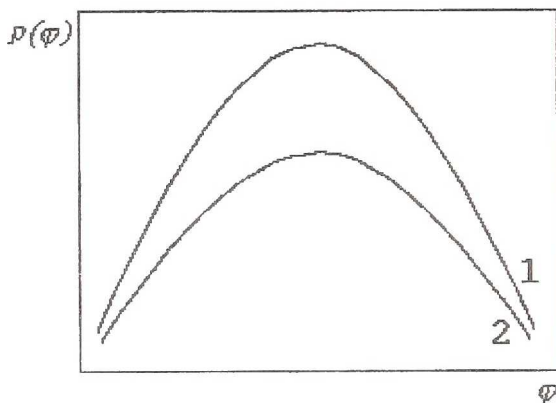


Рисунок 1- Распределение контактных напряжений по дуге контакта. 1- осевая нагрузка 1500 кг; 2- осевая нагрузка 1000 кг.

Для исследования влияния на процесс фреттинга неравномерного распределения давлений по пятну контакта внутреннего сопряжения двух круговых цилиндров с параллельными осями была разработана методика испытания, сконструирована, изготовлена и опробована установка [6]. Испытания проводились на образцах типа вал-втулка, см рис. 2, изготовленных из материала 12Х2Н4А при следующих режимах:

- амплитуда взаимного перемещение  $2A_m = 0.125 \cdot 10^{-3}$  м;
- частота скольжения  $f=87$  Гц.
- внешняя радиальная нагрузка, прилагаемая на вал, составила  $P=1500$  кг, чему соответствуют:
  - ◇ угол контакта цилиндров, рассчитанный по формуле (4):  $2\varphi_0 = 165,86^\circ$  или 2,894 рад;
  - ◇ расчетное значение ширины пятна контакта:  $2a = 2\varphi_0 \cdot R = 2,894 \cdot 7,5 = 21,562$  мм.
  - ◇ максимальное давление, рассчитанное по формуле (6):  $q(\varphi_0) = 53,75$  МПа.

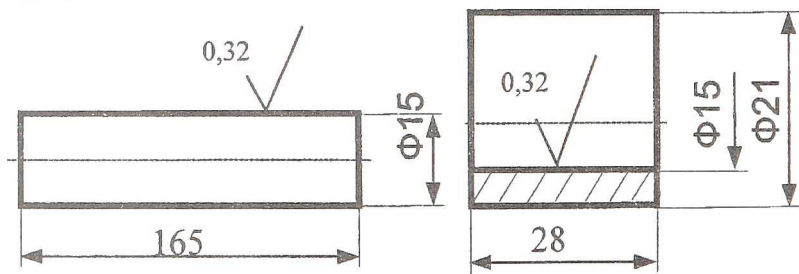


Рисунок 2- Эскиз образцов.

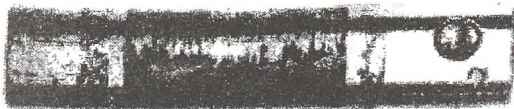


Рисунок 3- Изношенная поверхность образца.

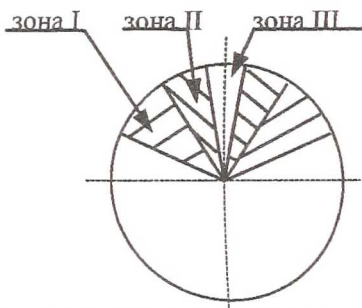


Рисунок 4 - Расположение оксидных пленок на поверхности образца.

В результате трения формируется дефектная поверхность, см. рис 3, часть которой покрытая пятнами окислов. Пятна вытянуты по направлению перемещения при трении и представляют собой образования красно-бурого и черного цветов.

Наиболее толстой и рыхлой является черная пленка, покрывающая на образце зону I, см. рис. 4. Микрорентгеноструктурный анализ, проведенный с помощью электронно-рентгеновского анализатора JXA-6400 (фирма JEOL, Дания), показал большое содержание в пленке кислорода, см. табл.1. По всей видимости, эта пленка является окалиной, образованной в результате высокотемпературного окисления металла.

Под слоем окалины, в местах его разрушения в зоне I, а также в зоне II пятна контакта, наблюдается слой красно-бурой, местами рыжей пленки, более тонкой, но и более плотной по своему строению. Содержание кислорода в ней в пять раз меньше, чем в черной окалине, см. табл.1. Это объясняется ухудшением условий аэрации и уменьшением доступа кислорода в зону II, по сравнению с зоной I, см. рис 4.

В центральной области пятна контакта, в зоне III, продукты окисления отсутствуют, то есть кислород в эту часть сопряжения не проникает.

Из вышесказанного можно сделать вывод, что содержание кислорода во вторичных продуктах износа и, следовательно, их свойства

резко меняются в зависимости от расстояния до края пятна контакта. Анализ изношенной поверхности и схемы распределения зон окислов, представленных на рис.3 и 4, показывает, то, что внешним фактором, влияющим на появление и рост оксидной пленки является контактная нагрузка, увеличение которой приводит к уменьшению зазора сопряжения и, как следствие, ухудшению доступа кислорода и условий аэрации.

Таблица 1 - Состав вторичных продуктов коррозии при фреттинге

фаза	элементы	атомное содержание, %	весовое содержание, %
черная пленка (зона I)	Fe	45,19	72,87
	O	53,16	24,56
	Ni	1,01	1,71
	Cr	0,49	0,73
красная пленка (зона II)	Fe	83,72	92,84
	O	13,70	4,35
	Ni	1,53	1,79
	Cr	0,80	0,82
в местах отсутствия пленки (зона III)	Fe	97,50	97,87
	O	0,49	0,14
	Ni	0,98	1,03
	Cr	0,94	0,87

Криволинейное распределение нагрузки ведет к неравномерному окислению металла и, следовательно, к различной степени его износа по пятну контакта. В тех местах, где существует оксидная пленка (зоны I и II на рис.4), она, воспринимая часть нагрузки на себя, предохраняет лежащую под ней поверхность детали от разрушения. В тех местах, где оксидная пленка отсутствует (зона III), всю нагрузку воспринимает поверхностный слой детали, что ведет к зарождению усталостных трещин, их объединению и выкрошиванию металла с поверхности, см. рис.5.

Установлено, что неравномерное распределение нагрузки ведет так же к появлению условного концентратора напряжения [7] в результате действия максимальной нагрузки в центральной части пятна контакта, которая способствует развитию повреждаемости поверхности деталей.

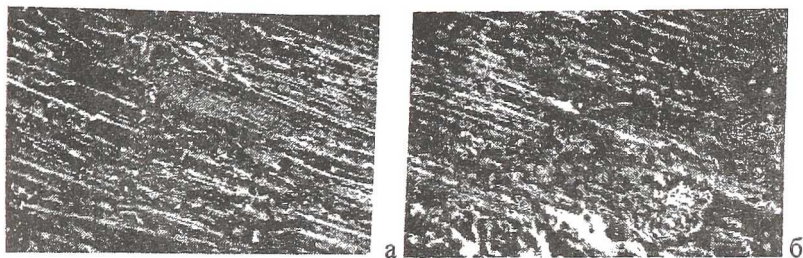


Рисунок .5- Усталостное разрушение поверхности детали.

Таким образом, неравномерное распределение нагрузки по пятну контакта сопряжения деталей ведет к протеканию на поверхности как нормального износа [8], так и к возникновению и развитию повреждаемости, которая особенно сильно проявляет себя в местах появления условного концентратора напряжения, вследствие отсутствия на них защитной оксидной пленки. Это является особенно неблагоприятным и ведет к резкому уменьшению износостойкости сопряжения.

#### Список литературы

1. Улиг Г.Г., Ревя Р.У. Коррозия и борьба с ней. Введение в коррозионную науку и технику. пер. с англ. под.ред. А.М.Сухотина. - Л.: Химия. Ленинградское отделение, 1989. -456с.
2. Гаркунов Д.Н. Триботехника.- М. : Машиностроение, 1985.-424с.
3. Дроздов Ю.Н., Павлов В.Г., Пучков В.Н. Трение и износ в экстремальных условиях.- М.: Машиностроение, 1986. - 223с.
4. Гафнер С.Л., Добычин М.Н. К расчету угла контакта при внутреннем соприкосновении цилиндрических тел, радиусы которых почти равны. - "Машиноведение", 1973, №2, с.69-73
5. Горячова И.Г., Добычин М.Н. Контактные задачи в трибологии. -М.: Машиностроение, 1988. -253с.
6. К вопросу о методике оценки условий протекания фреттинг-коррозии на контактирующих криволинейных поверхностях. Смыслов А.М., Коробейников Н.И., Селиванов К.С.// Сб. докладов науч.-техн. конференции "Проблемы машиноведения, конструкционных материалов и технологий", дек. 1997 г., Уфа, С.275-287
7. Хейвуд Р.Б. Проектирование с учетом усталости.- М.: Машиностроение, 1969- 504с.
8. Костецкий Б.И., Натансон М.Э., Бершадский Л.И. Механо-химические процессы при граничном трении. -М.: Наука, 1972. - 170с.