

УДК 621.9.06;621.7.07

В.В. Ерохин, к.т.н., доц.

В.Б. Ильицкий, д.т.н., проф.

Брянский государственный технический университет, Россия

ФРЕТТИНГ-ИЗНОС ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ СТАНОЧНЫХ ПРИСПОСОБЛЕНИЙ

Излагаются основные положения по определению фреттинг-износа функциональных поверхностей деталей станочных приспособлений в зависимости от контактных проскальзываний и усталостных разрушений рельефа контактируемой поверхности при ее нагружении осциллирующими внешними силами. Управление этим параметром на этапе конструкторско-технологической подготовки производства позволяет повысить точность и качество как станочного приспособления, так и обрабатываемой заготовки.

Введение. Точность и долговечность станочного приспособления определяются параметрами износостойкости материалов его деталей. Основное влияние на износ функциональных поверхностей деталей станочных приспособлений оказывает фреттинг-износ.

Основная часть. Фреттинг-износ поверхностей установочных опор и поверхностей других деталей приспособления, зависит от следующих факторов:

1) осциллирующих контактных проскальзываний (предварительных смещений) на уровнях макроформы контактирующих тел и рельефа (шероховатости, волнистости и макроотклонений) контактирующей поверхности;

2) усталостных разрушений рельефа контактируемой поверхности при ее нагружении осциллирующими внешними силами.

В этом случае можно записать:

$$U_{\phi} = U_{np} + U_{уст},$$

где U_{ϕ} – фреттинг-износ поверхности детали, мкм; U_{np} – составляющая фреттинг-износа, обусловленная осциллирующими контактными проскальзываниями, мкм; $U_{уст}$ – составляющая фреттинг-износа, зависящая от усталостных разрушений рельефа контактируемой поверхности, мкм;

$$U_{\phi} = I_U L_{ck} n,$$

где I_U – интенсивность износа, мкм/мм; L_{ck} – длина контактного проскальзывания за один цикл нагружения осциллирующей силой зоны

контакта, мм; n – количество циклов нагружения зоны контакта осциллирующей силой.

Интенсивность износа I_U достаточно подробно изучена в научной литературе в отличие от длины контактного проскальзывания $L_{ск}$ и составляющей фреттинг-износа $U_{фрт}$.

Определим значения параметра $L_{ск}$.

Рассмотрим контактное проскальзывание контактирующих тел сферической формы на уровне шероховатости при нагружении зоны контакта нормальной силой N и периодически изменяющейся силой

$$Q = Q_A \sin(\omega t),$$

где Q – внешняя сила, направлена под наклоном к зоне контакта двух тел, Н; Q_A – амплитуда колебания (осцилляции) силы Q , Н; ω – круговая частота колебания силы Q , рад./с; t – время колебания силы Q , с.

Контактное проскальзывание при контактирование двух тел имеет место только, если соблюдается условие:

$$\operatorname{tg} \alpha > f,$$

где α – угол наклона силы Q к силе N ; f – коэффициент трения скольжения в зоне контакта.

Длина контактного проскальзывания за период колебания определяется как

$$L_{ск} = 4a - 2(c_1 + c_2), \quad (1)$$

где a – полуось эллипса площадки контакта двух тел, мм; c_1, c_2 – полуоси эллипса площадки сцепления в зоне контакта двух тел, мм.

При сопряжении двух единичных шероховатостей в форме эллипсоидов их полуоси в поперечном и продольном направлении с учетом уточнений первоисточника [1] определяются по формулам:

$$a = 0,5tmSm \left(\frac{(N + Q \cos \alpha)}{c' \sigma_m A_c tm \left(1 - \frac{\sigma_{ост}}{\sigma_m} \right)} \right)^{\frac{1}{\nu n}}, \quad \text{мм},$$

где tm – относительная длина опорной линии на уровне средней линии шероховатости; Sm – средний шаг неровностей профиля шероховатости, мм; N – нагрузка на контакт, действующая перпендикулярно зоне контакта, Н; c' – коэффициент стеснения материала; σ_m – предел текучести или условный предел текучести материала, МПа; A_c – контурная площадь контакта, мм²; $\sigma_{ост}$ – остаточные напряжения в поверхностном слое, МПа; ν – параметр начального участка опорной кривой ше-

роховатости; n_n – степенная функция вида эллипсоида единичной шероховатости поверхности ($n_n = 1$ – точение, фрезерование, строгание; $n_n = 2$ – шлифование, виброобкатывание, магнитноабразивная и электрохимическая обработка; $n_n = 1$ – накатывание и полирование).

Контурная площадь контакта поверхности определяется из выражения [1]:

$$A_c = A t m_w t m_M \frac{y_{nn}^{v_w+v_M}}{W_p^{v_w} H_p^{v_M}}, \text{ мм}^2,$$

где A – номинальная площадь контакта, мм²; $t m_w$, $t m_M$ – относительная длина опорной линии на уровне средней линии соответственно волнистости, макроотклонения; y_{nn} – пластическая составляющая контактной деформации, мкм; W_p , H_p – высота сглаживания профиля соответственно волнистости, макроотклонения, мкм; v_w , v_M – параметр начального участка опорной кривой соответственно волнистости, макроотклонения.

Пользуясь методологией К.Джонсона [2] по определению зоны сцепления, определим значения параметров c_1 и c_2 .

$$c_1 = a \left(1 - \frac{Q_A \sin \alpha}{f(N + Q_A \cos \alpha)} \right)^{\frac{1}{3}}; \tag{2}$$

$$c_2 = a \left(1 - \frac{Q_A \sin \alpha}{f(N - Q_A \cos \alpha)} \right)^{\frac{1}{3}}.$$

При эксплуатации приспособления должно соблюдаться условие:

$$Nf > Q_A \sin \alpha \text{ или } N = \frac{k Q_A \sin \alpha}{f}, \tag{3}$$

где k – коэффициент запаса по силе сдвига, определяемый по методике, изложенной в источнике [3].

Подставляя выражение (3) в выражение (2), получим:

$$c_1 = a \left(1 - \frac{\sin \alpha}{k \sin \alpha + f \cos \alpha} \right)^{\frac{1}{3}};$$

$$c_2 = a \left(1 - \frac{\sin \alpha}{k \sin \alpha - f \cos \alpha} \right)^{\frac{1}{3}}.$$

Однако, если приспособление проектируется для обработки сверлением, в этом случае вместо касательных усилий лимитирующими сдвигающими силовыми параметрами являются крутящие моменты. В

формулу (4) необхідно підставити радіус зони сцеплення $c = c_1 = c_2$, расчет которого представлен в источнике [2]. При этом для надежного функционирования станочного приспособления необходимо соблюдения условия:

$$[M] = \frac{3\pi fNa}{16k},$$

где $[M]$ – допустимый крутящий момент, сдвигающий контактируемые детали станочного приспособления, Н·мм.

При сопряжении двух плоских гладких поверхностей полудлина зоны сцепления c ($c = c_1 = c_2$) определяется из уравнения

$$\frac{K(k)}{K\left(\frac{c}{a}\right)} = \frac{0,5 (1 - 2\mu_1)G_1 - (1 - 2\mu_2)G_2}{f (1 - \mu_1)G_1 + (1 - \mu_2)G_2}, \quad (4)$$

где $K(k)$ – полный эллиптический интеграл первого рода; G_1, G_2 – модули упругости второго рода соответственно первого и второго контактирующего тела.

Подинтегральная функция в эллиптических интегралах уравнения (4) определяется из выражения:

$$k = \sqrt{1 - \frac{c^2}{a^2}}.$$

Формула (4) получена уточнением теории Спенса с учетом упругих постоянных Дундурса [2, 4].

Для сопряжения реальных поверхностей формула (4) справедлива, если длина контакта $2a$ больше полудлины шага волнистости в поперечном и продольном направлениях, при значениях параметров шероховатости поверхности, когда начинаются адгезионные процессы сцепления, обеспечивающие силы трения покоя более 0,86, а также когда давление в зоне контакта находится в пределах не менее $0,75\sigma_m$.

При сопряжении двух цилиндрических поверхностей и в сопряжении цилиндр-плоскость (погрешность 12 %) длина проскальзывания за один цикл воздействия силой Q определяется по формуле (1), а значения параметров c_1 и c_2 соответственно рассчитываются по формулам (5) и (6):

$$c_1 = a \left(1 - \frac{Q_A \sin \alpha}{f(N + Q_A \cos \alpha)} \right)^{\frac{1}{2}}, \quad (5)$$

$$c_2 = a \left(1 - \frac{Q_A \sin \alpha}{f(N - Q_A \cos \alpha)} \right)^{\frac{1}{2}}. \quad (6)$$

При проектировании приспособления значения параметров c_1 и c_2 при сопряжении двух цилиндрических поверхностей и сопряжении цилиндр-плоскость за один цикл воздействия силой Q необходимо определять по формулам:

$$c_1 = a \left(1 - \frac{\sin \alpha}{k \sin \alpha + f \cos \alpha} \right)^{\frac{1}{2}};$$

$$c_2 = a \left(1 - \frac{\sin \alpha}{k \sin \alpha - f \cos \alpha} \right)^{\frac{1}{2}}.$$

Усталостное разрушение рельефа контактируемой поверхности при ее нагружении осциллирующими внешними силами определяется числом циклов воздействия n , которое приводит к разрушению материала. Число циклов воздействия определяется из источника [5]. За количество циклов n разрушается поверхность единичной шероховатости, участвующей в контакте с единичной шероховатостью другого тела. В этом случае предполагаем, что глубина разрушения в зоне контакта шероховатостей происходит в точке максимальных эквивалентных напряжений. Максимальные эквивалентные напряжения располагаются на глубине:

1) плоское шлифование, фрезерование ($e = 1$):

$$H_{z.\max} = 0,48a(1 - x^2 / a^2); \quad (7)$$

2) чистовое и тонкое точение ($e = 0,6$):

$$H_{z.\max} = 0,59a(1 - x^2 / a^2), \quad (8)$$

где $H_{z.\max}$ – максимальная глубина залегания эквивалентных напряжений, рассчитанных по IV гипотезе прочности, мм; e – эксцентриситет эллиптической зоны контакта; x – координата, расположена тангенциально контакту и совпадающая с малой полуосью эллипса зоны контакта, мм.

Фреттинг-износ от усталостного разрушения определяется по формуле:

$$U_{ycm} = \frac{H_{z.\max} n_{\Sigma}}{n} 10^{-3}, \text{ мкм,}$$

где n_{Σ} – общее количество циклов нагружения при эксплуатации приспособления до размерной поднастройки или до межремонтного периода.

При эксплуатации станочного приспособления общее количество циклов нагружения определяется из выражения:

$$n_{\Sigma} = T_o N_g f_t, \text{ мкм,}$$

где T_o – основное время обработки заготовки, с; N_g – обрабатываемая партия заготовок до поднастройки режущего инструмента на технологический размер или программа выпуска заготовок до достижения допустимого износа, шт.; f_i – частота колебания детали приспособления, вызванная внешними силовыми нагрузжениями приспособления, с⁻¹.

На основании формул (7) и (8) можно заметить, что применение технологических операций шлифования или фрезерования поверхностей, участвующих в сопряжениях, по сравнению с точением при достижении одинаковых высотных параметров шероховатости, обеспечивает меньшие значения фреттинг-износа.

Однозначная борьба с фреттинг-износом, возникающим вследствие контактного проскальзывания, является необоснованной, т.к. контактное проскальзывание двух контактирующих тел приводит к резкой диссипации осциллирующих сил, что обуславливает инерционность приспособления и повышение его виброустойчивости.

Для анализа достоверности теоретических положений, которые определяют значения фреттинг-износа, были проведены экспериментальные исследования.

Исходные данные эксперимента.

1. Для заготовки: цилиндрическая форма диаметром 20 мм и высотой 60 мм; материал – сталь 35 ГОСТ 1050-88; HB186 – твердость опорной поверхности, обработанной плоским шлифованием; параметры качества опорной поверхности – $Ra = 0,54$ мкм, $Rz = 2,24$ мкм, $R_{max} = 3,58$ мкм, $Rp = 2,329$ мкм, $Sm = 47,23$ мкм, $tm = 51,2\%$, $b = 0,638$, $v = 1,72$ (b и v – параметры степенной аппроксимации опорной кривой профиля шероховатости).

2. Для установочной опоры приспособления: опорная поверхность диаметром 20 мм; материал – сталь 45, HRC48 (закалка с охлаждением в масле); функциональная плоская поверхность обработана плоским шлифованием, ее параметры качества $Ra = 0,52$ мкм, $Rz = 2,648$ мкм, $R_{max} = 3,78$ мкм,

$Rp = 2,529$ мкм, $Sm = 49,825$ мм, $tm = 50,7\%$, $b = 0,645$, $v = 1,7$.

3. Для зоны контакта: номинальная площадь контакта 314 мм² заготовки с опорой; постоянная составляющая силы зажима 20000 Н действует нормально поверхности контакта; переменная дополнительная сила изменяется от 0 до 1000 Н по синусоидальному закону; угол наклона к поверхности контакта переменной дополнительной силы изменяется от 90° (нормально к поверхности контакта) до 0° (касательно к плоскости контакта), через 15°; число циклов нагружения до измерения фреттинг-износа на функциональной поверхности устано-

вочной опоры при определенном угле наклона касательной переменной силы – 60000 циклов; коэффициент трения скольжения $f = 0,124$.

Фреттинг-износ измерялся по значению уменьшения глубины вспомогательных баз – трех рисок. Каждая риска делит контактирующую поверхность диаметром 20 мм на три равные части. В этом случае фреттинг-износ определяется с двух краев и по середине окружности.

В таблице представлены теоретические и экспериментальные результаты по фреттинг-износу.

Таблица

Фреттинг-износ плоской зоны контакта, мкм

$n_{\Sigma i}$	Угол наклона касательной переменной силы к нормали контактирующих поверхностей						
	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°
60000	0,77	0,4	0,87	1,33	1,57	1,97	0,7
	0,34	0,44	0,67	1,03	1,36	1,51	1,05

Примечание к таблице. $n_{\Sigma i}$ – число циклов нагружения зоны контакта. В первой строке общей строки $n_{\Sigma i}$ представлены экспериментальные данные, во второй – теоретические.

В соответствии с данными таблицы – относительная погрешность теоретических данных от средних значений экспериментальных данных составляет +10 %...+110 %;

Вывод. Работа выполнялась в соответствии с грантом Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых по теме «Определение и обеспечение оптимальных проектных параметров качества станочных приспособлений и их элементов» с финансированием Министерства образования и науки РФ (шифр МК-9356.2006.8).

ЛИТЕРАТУРА:

1. Рыжов Э.В., Колесников Ю.В., Сулов А.Г. Контактное взаимодействие твердых тел при статических и динамических нагрузках. – Киев: Наук. думка, 1982. – 172 с.
2. Джонсон К. Механика контактного взаимодействия: пер. с англ. – М.: Мир, 1989. – 510 с.
3. Ильицкий В.Б., Ерохин В.В. Проектирование технологической оснастки. – Брянск: БГТУ, 2006. – 124 с.

4. *Spence D.A.* An eigenvalue problem for elastic contact with finite friction. – Proc. Cambridge Philos. Soc., 1973. – P. 249.
5. *Ерохин В.В., Говоров И.В.* Обеспечение износостойкости функциональных поверхностей деталей станочных приспособлений / Обработка металлов. – № 1. –Новосибирск: ОАО НПП и ЭИ «ОРГСТАНКИНПРОМ», 2006. – С. 26–29.

ЕРОХИН Виктор Викторович – кандидат технических наук, доцент кафедры технологии машиностроения, докторант Брянского государственного технического университета.

Научные интересы:

– технология машиностроения.

ИЛЬИЦКИЙ Валерий Борисович – доктор технических наук, профессор кафедры технологии машиностроения Брянского государственного технического университета.

Научные интересы:

– технология машиностроения.

Подано 22.08.2007