

$$\eta_t = \Delta T_{хол} / \left[T^* \cdot \left(1 - \langle 1/\pi' \rangle^{0,286} \right) \right] \quad (11)$$

Максимальное значение абсолютного эффекта охлаждения $\Delta T_{хол}$ достигается при относительной доли холодного потока $\beta = 0,2 \div 0,3$. Дальнейшее уменьшение β на холодном конце приводит к внутренней перестройке потока (из-за повышения гидравлического сопротивления вихревой трубки) и значительном росте влияния на эффекты теплообмена с окружающей средой. Для получения минимального значения p^* целесообразно принимать $\beta = 0,3$, соответствующее η_{tmax} , а максимальная экономичность наступает при $\beta = 0,65$ и соответствует $(\beta \eta_t)_{max}$, при меньших β экономичность возрастает с ростом степени расширения газа π' в вихревой трубке. Уменьшение p^* приводит к незначительному снижению величины η_t .

Анализ вихревого эффекта показывает, что с экономической точки зрения процесс вихревого энергетического разделения газов в вихревой трубке является высокоэффективным. Применение вихревой трубки решает проблему охлаждения зоны шлифования без применения традиционных СОЖ. Как показали исследования [2], особенно вихревая трубка, встроенная в шлифовальный круг, эффективна в случаях, когда применение обычных СОЖ затруднено или недопустимо, а также, если она не обеспечивает требуемого технологического эффекта, например при обработке металлов, склонных к сильному налипанию на шлифовальный инструмент, при обработке нержавеющей сталей и титановых сплавов.

Список литературы: 1. Меркулов А.П. Вихревой эффект и его применение в технике. Куйбышев: КуАИ. 1988. С. 223. 2. Долганов А.М. Повышение эффективности шлифования за счет применения инструмента с вихревым охлаждением. Сб. статей международной научно-техн. конф. «Процессы абразивной обработки, абразивные инструменты и материалы». Волжский: Волжский институт строительства и технологий (филиал) ВолгГАСУ, 2006. с. 142 – 145.

Сдано в редакцию 29.01.07

ФРЕТТИНГ-ИЗНОС РАБОЧИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ СТАНОЧНЫХ ПРИСПОСОБЛЕНИЙ

Ерохин В.В. (БГТУ, г. Брянск, Россия)

In clause substantive provisions by definition of deterioration of functional surfaces of details of adaptations depending on contact slidings and fatigue failures of a relief of a contacted surface are stated at action on a surface of variable oscillating external forces. Management in this parameter at a stage of design technological preparation of manufacture allows to raise accuracy and quality as adaptations, and processable.

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

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

1) осциллирующих контактных проскальзываний 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.

$$U_{np} = I_U L_{ск} n,$$

где I_U – интенсивность износа, мкм/мм; $L_{ск}$ – 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 $U_{уст}$.

Определим значения параметра $L_{ск}$.

Рассмотрим проскальзывание контактирующих тел сферической формы на уровне шероховатости при нагружении зоны контакта (рис. 1) 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.

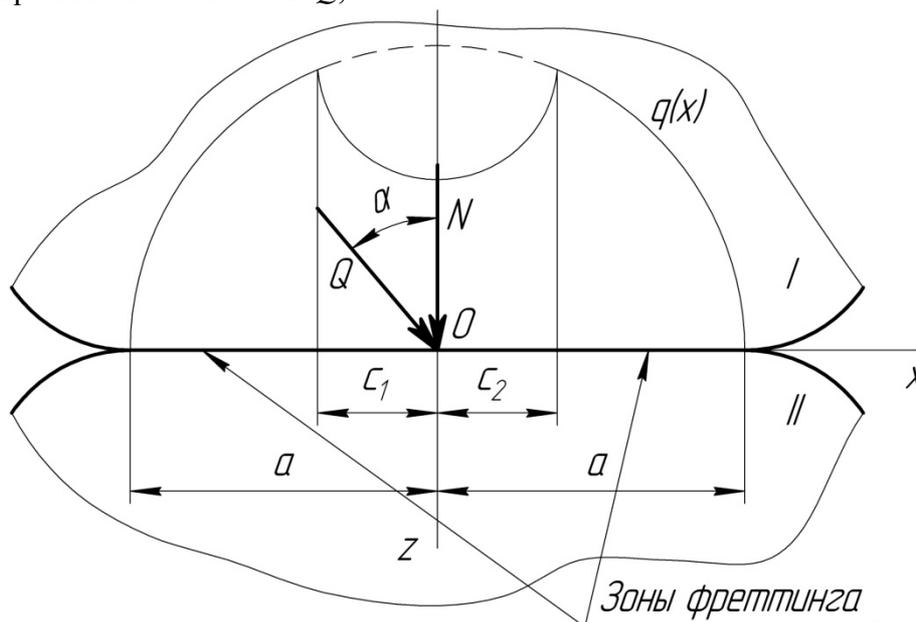


Рис. 1. Контакт единичных шероховатостей эллипсоидной формы, сжатых постоянной нагрузкой N и подверженных действию осциллирующей тангенциальной силы Q

Проскальзывание при контактировании двух тел имеет место только, если соблюдается условие

$$\operatorname{tg} \alpha > f_{mp},$$

где α – угол наклона силы Q к силе N (рис. 1); f_{mp} – коэффициент трения скольжения в зоне контакта.

Длина контактного проскальзывания за период колебания определяется как

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

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

$$a = 0,5tmSm \left(\frac{(N + Q \cos \alpha)}{c' \sigma_m A_c tm \left(1 - \frac{\sigma_{ocm}}{\sigma_m} \right)} \right)^{\frac{1}{vn_{non}}}, \text{ мм};$$

$$b = 0,5tm_{np}Sm_{np} \left(\frac{(N + Q \cos \alpha)}{c' \sigma_m A_c tm_{np} \left(1 - \frac{\sigma_{ocm}}{\sigma_m} \right)} \right)^{\frac{1}{vn_{np}}} \left(\frac{Rp_{non}}{Rp_{np}} \right)^{\frac{1}{n_{np}}}, \text{ мм},$$

где индекс «*non*» относится к поперечному направлению шероховатости, индекс «*np*» к продольному направлению шероховатости поверхности; 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 (рис. 1), Н; c' – коэффициент стеснения материала; σ_m – предел текучести или условный предел текучести материала, МПа; A_c – контурная площадь контакта, мм²; σ_{ocm} – остаточные напряжения в поверхностном слое, МПа; Rp – высота сглаживания профиля шероховатости, мкм; v – параметр начального участка опорной кривой шероховатости; n – степенная функция вида эллипсоида единичной шероховатости поверхности ($n = 1$ – точение, фрезерование, строгание; $n = 2$ – шлифование, виброобкатывание, магнитноабразивная и электрохимическая обработка; $n = 1$ – накатывание и полирование).

Контурная площадь контакта поверхности определяется из выражения [1]

$$A_c = Atm_w tm_M \frac{y_{nl}^{v_w + v_M}}{W_p^{v_w} H_p^{v_M}}, \text{ мм}^2,$$

где A – номинальная площадь контакта, мм²; tm_w, tm_M – относительная длина опорной линии на уровне средней линии соответственно волнистости, макроотклонения; y_{nl} – пластическая составляющая контактной деформации, мкм; Wp, Hp – 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 .

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

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

Учитывая, что при эксплуатации приспособления должно соблюдаться условие

$$Nf_{mp} > Q_A \sin \alpha \quad \text{или} \quad N = \frac{k_n Q_A \sin \alpha}{f_{mp}}, \quad (3)$$

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

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

$$c_1 = a \left(1 - \frac{\sin \alpha}{k_n \sin \alpha + f_{mp} \cos \alpha} \right)^{\frac{1}{3}}.$$

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

Однако, если приспособление проектируется для обработки сверлением, в этом случае вместо касательных усилий лимитирующими сдвигающими силовыми параметрами являются крутящие моменты. В формулу (4) необходимо подставить радиус зоны сцепления $c = c_1 = c_2$, расчет которого представлен в источнике [2]. При этом для надежного функционирования станочного приспособления необходимо соблюдения условия

$$[M_{кр}] = \frac{3\pi f_{mp} Na}{16k_n}.$$

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

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

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

Подынтегральная 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).

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

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

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

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

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

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 (рис. 2). Максимальные эквивалентные напряжения располагаются на глубине:

плоское шлифование, торцовое и цилиндрическое фрезерования ($e = 1$)

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

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; $e = \sqrt{1 - \frac{a^2}{b^2}}$ – эксцентриситет эллиптической зоны контакта; x – координата, расположена тангенциально контакту и совпадающая с малой полуосью эллипса зоны контакта, мм.

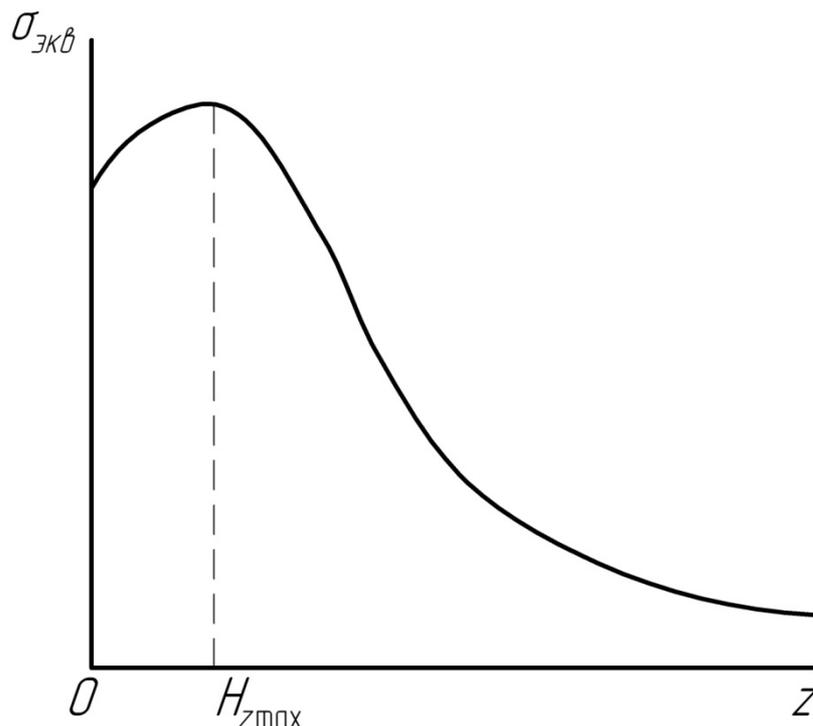


Рис. 2. График зависимости контактного эквивалентного напряжения от координаты глубины z

Фреттинг-износ от усталостного разрушения определяется по формуле

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

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

$$n_{\Sigma} = T_o N_2 f,$$

где T_o – основное время обработки заготовки, с; N_2 – обрабатываемая партия заготовок до поднастройки режущего инструмента на технологический размер или программа выпуска заготовок до достижения допустимого износа, шт.; f – частота колебания детали приспособления, вызванная внешними силовыми нагружениями 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 параметром 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, $Rmax = 3,58$ 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, $Rmax = 3,78$ 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 установочной опоры при определенном угле наклона касательной переменной силы – 60000 циклов; коэффициент трения скольжения $f_{mp} = 0,124$.

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 табл. 1 представлены теоретические расчеты длины контактного проскальзывания единичных шероховатостей по входным данным, проведенного эксперимента.

Таблица 1. Теоретические длины контактного проскальзывания единичных шероховатостей, мкм

$n_{\Sigma i}$	Угол наклона касательной переменной силы к нормали контактирующих поверхностей						
	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°
60000	0	1,48-1,743	3,49-3,24	4,74-4,63	5,82-5,69	6,46-6,57	6,84-7,6

В табл. 2 представлены теоретические и экспериментальные результаты по фреттинг-износу.

Таблица 2. 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	0,7;1,5;0,1	0,1;0,2;0,9	0,4;2,0;0,2	2,5;1,1;0,4	0,1;3,7;0,9	3,4;0,8;1,7	1,3;0,1;0,7
	(0,77)	(0,4)	(0,87)	(1,33)	(1,57)	(1,97)	(0,7)
	0,34	0,44-0,27	0,53-0,67	0,96-1,03	1,27-1,36	1,51-1,437	1,46-1,05

Примечание к табл. 2: $n_{\Sigma i}$ – число циклов нагружения зоны контакта; в скобках представлены средние значения экспериментальных данных; в первой строке общей строки $n_{\Sigma i}$ представлены экспериментальные данные, во второй – теоретические.

В соответствии с данными табл. 2 – относительная погрешность теоретических данных от средних значений экспериментальных данных составляет +10%...+40%;

Работа выполнялась в соответствии 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).

Список литературы: 1. Рыжов Э.В., Колесников Ю.В., Суслов 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, 73. – р. 249. 5. Ерохин В.В., Говоров И.В. Обеспечение износостойкости функциональных поверхностей деталей станочных приспособлений / Обработка металлов. – Новосибирск: ОАО НПП и ЭИ «ОРГСТАНКИНПРОМ», 2006, №1. – С. 26-29.

Сдано в редакцию 14.12.06