Машиностроение, 1978. - т.1. – 352 с. **4.** Справочник по контролю промышленных шумов. Пер. с англ. / Под ред. Л. Фолкнера. – М.: Машиностроение, 1979. – 447с. Сдано в редакцию 04.05.07

ОПТИМИЗАЦИЯ ХАРАКТЕРИСТИК СМАЗОЧНОГО СЛОЯ МЕЖДУ ЛОМАНЫМИ ПОВЕРХНОСТЯМИ

Кипреев Ю.Н. (НУК, г. Николаев, Украина)

When investigating lubrication condition of sets with contacts of flat surfaces dependences of lubricating layer carrying capacity on lubrication characteristics and geometrical dimensions have been used with the help of which the method of providing hydro dynamical lubrication condition has been worked out. Relationships of broken surfaces dimensions under which the maximum layer carrying capacity is achieved have been determined.

Вопросы определения характеристик смазочного слоя между плоскими поверхностями рассматривались в работах [1-7]. В книге Десмонда Мура [1] показано, что незначительно от них отличаются характеристики слоя между криволинейными поверхностями с близкими радиусами кривизны. Это позволяет распространить выводы и рекомендации, полученные при анализе решений для слоя между плоскими поверхностями на конструкции с криволинейными поверхностями контакта. На VIII – ом Международном симпозиуме украинских инженеров-механиков [6] автором были представлены результаты сравнительного анализа двух форм канала между плоскими поверхностями (рис.1), выполненного при параметрах, обеспечивающих максимальную несущую способность слоя W.



Рис.1. Формы смазочного канала между плоскими поверхностями

При постоянной ширине канала *В* (рис.1) плоское течение смазки описывается уравнением

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(h^3 \frac{dp}{dx} \right) + h^3 \frac{\partial^2 p}{\partial y^2} = 6\mu U \frac{dh}{dx}, \tag{1}$$

где: p – гидродинамическое давление, Па; x – текущая координата в направлении движения смазки, м; μ – кинематическая вязкость, Па·с; U – относительная скорость поверхностей, м/с; h – текущее значение толщины смазочного слоя, м.

В работах [1,7] показано, что для канала постоянной ширины можно ограничиться решением уравнения Рейнольдса $\frac{dp}{dx} = 6\mu U \frac{h-h_0}{h^3}$ для одномерного течения смазки с внесением поправок на боковую утечку. Для этой цели имеются соответствующие рекомендации в виде графиков [8] или таблицы [1].

Целью исследования является продолжение анализа ранее полученных решений [2-7] с учетом потерь на трение для определения условий, которые могут обеспечить гидродинамический режим смазки в контактах плоских поверхностей. Сравнительный анализ [7] двух конструктивных вариантов (рис.1), выполненный по максимуму несущей способности слоя дополним анализом по максимуму эпюры давления (табл. 1).

В статьях [2,3] представлено решение уравнения (1) при постоянной вязкости смазывания $\mu = \text{const.}$ В тяжело нагруженных контактах давление смазочного слоя существенным образом влияет на вязкость. Эту зависимость обычно определяют по формуле Баруса [1]

$$\mu = \mu_0 \exp(\alpha p), \qquad (2)$$

где μ₀ – кинематическая вязкость смазки при атмосферном давлении; α – пьезокоэффициент вязкости, Па⁻¹.

Решением уравнения Рейнольдса при переменной вязкости является [2,4] логарифмическая зависимость $\alpha p = -\ln(1-\alpha p_0)$, в которой функция $p_0 = p_0(x)$ определяет эпюру гидродинамического давления в смазочном слое при постоянной вязкости смазывания ($\mu = \mu_0 = \text{const}$).

Несущая способность смазочного слоя является равнодействующей сил давления смазки и определяется интегральным выражением

$$W = \int_{S} p ds , \qquad (3)$$

где *S* – площадь контакта поверхностей.

Не повторяя громоздких преобразований, сделанных автором в упомянутых работах, представим основные зависимости и характеристики, используемые для оптимизации параметров смазочного слоя: $\bar{x} = x/L$ – относительная координата сечения; γ – угол наклона плоскости на входном участке (рис.1); p_0 – гидродинамическое давление смазочного слоя при постоянной вязкости; p_{0B} – давление на границе раздела участков (в сечении *B*); $y = h/\gamma L$ – безразмерная толщина слоя; h_1 – минимальная толщина слоя; $y_1 = h_1/\gamma L = \text{const}$ – безразмерная минимальная толщина слоя; p_{0B} – давление на границе раздела участков (в сечении *B*); $k = L_1/L_2$ – отношение длин участков (рис.1, δ); $a = h_1/h_2$ – отношение толщин смазочного слоя, определяется по формуле $a = 1 + 1/y_1(1+k)$; W_0 – несущая способность смазочного слоя при постоянной вязкости; \overline{p}_0 – относительное давление, связанное с текущим значением зависимостью $p_0 = \frac{6\mu UL}{h_1^2} \overline{p}_0$; \overline{W}_0 – относительная несущая способность при

постоянной вязкости, рассчитывается по интегральной зависимости $\overline{W_0} = \int_0^{1/(1+k)} \overline{p_0} d\,\overline{x} + \int_{1/(1+k)}^1 \overline{p_0} d\,\overline{x} \,.$

Функция относительной несущей способности $\overline{W_0}$ связана с безразмерной функцией F(a,k) зависимостью $\overline{W_0} = y_1^2(1+k)F(a,k)$. Безразмерная функция F(a,k) определяется формулой, представленной в статьях [2,3]

$$F(a,k) = \ln a + \frac{(a-1)\left[0,5(a-1)k^3 - (2+3ak-k)\right]}{2a^2k + a + 1}.$$
(4)

Расчеты относительных параметров, соответствующих зависимостям (1-4), выполняются на ЭВМ. В табл.1 приведены результаты, соответствующие максимумам функции несущей способности или максимумам функции относительного давления (табл.1). В зависимости от отношения размеров участков $k = L_1/L_2$ в таблице приведены значения соответствующей безразмерной толщины слоя $y_1 = h_1/\gamma L$ и коэффициента полноты эпюры давления $\chi = \overline{W}_0/\overline{p}_{0m}$, где \overline{p}_{0m} – максимальное значение относительной функции давления.

В табл. 1 выделены значения характеристик, соответствующих максимумам несущей способности и давления. Максимальное значение относительной функции несущей способности $\overline{W_0}_{max} \approx 0,03205$ соответствует отношению k = 0,25 и безразмерной минимальной толщине слоя $y_1 = 0,65$. При этих параметрах значение функции кривой экстремумов давления $\overline{p}_{0_m} \approx 0,0549$, а коэффициент полноты эпюры давления $\chi \approx 0,578$.

ĸ	0	0,1	0, 2	0,43	0,5	0,4	0,5	0,0	0,7	0,0	0,7
Параметры слоя при максимумах $\overline{W_0} = \overline{W_0}_{max}$ функции несущей способности											
$10^3 \overline{p_0}_{\text{max}}$	26,7	30,7	32	32,05	32,0	31,4	30,5	29,6	28,6	27,6	26,6
<i>Y</i> ₁	0,84	0,71	0,66	0,65	0,63	0,60	0,57	0,54	0,51	0,49	0,47
$10^3 \overline{W_0}$	42,6	51,0	54,7	54,9	55,9	55,8	55,0	54,0	52,5	51,0	50,0
χ	0,627	0,603	0,584	0,578	0,572	0,563	0,555	0,549	0,544	0,541	0,537
Параметры слоя при максимумах $\overline{p}_{0_m} = \overline{p}_{0_{max}}$ безразмерной функции давления											
$10^3 \overline{p_0}_{\text{max}}$	42,9	51,8	55,7	56,5	56,9	56,7	55,8	54,6	53,1	51,5	50
y_1	0,71	0,54	0,5	0,47	0,48	0,46	0,44	0,43	0,41	0,4	0,39
$10^3 \overline{W_0}$	26,5	30	31,2	31,2	31,3	30,8	30	29,1	28,1	27,2	26,3
χ	0,617	0,58	0,56	0,552	0,549	0,542	0,536	0,534	0,53	0,528	0,527

 Таблица 1. Результаты расчета параметров слоя при постоянной вязкости смазки

 k 0.2
 0.25
 0.4
 0.6
 0.7
 0.8
 0.9

Таким образом, относительные характеристики, определенные при максимуме несущей способности не совпадают со значениями характеристик, рассчитанными при максимумах давления. Максимальное значение $\overline{p}_{0_m} \approx 0,0569$ кривой экстремумов давлений имеет место при отношении k = 0,3 и безразмерной минимальной толщине слоя $y_1 = 0,48$. При этих параметрах относительная функция несущей способности $\overline{W_0} \approx 0,0313$, а коэффициент полноты эпюры давления $\chi \approx 0,549$. Общим для обоих

видов оптимизации является вывод о преимуществе смазочного канала с эквидистантным участком перед ссужающимся каналом без этого участка. Это преимущество сохраняется в диапазоне отношений размеров 0 < k < 0.9. За пределами такого отношения применение эквидистантного участка не имеет смысла. Наибольшее преимущество достигается при максимальном значении относительной функции несущей способности $\overline{W_0}_{\text{max}} \approx 0.03205$. При этом значении несущая способность слоя больше несущей способности слоя без эквидистантного участка в 1,2 раза.

При оптимальных параметрах k = 0.25; $y_1 = 0.65$ ($W_{0 \max} \approx 0.03205$) определена зависимость для расчета толщины слоя

$$h_1 = 0,4385L \sqrt{\frac{\mu UB}{W_0}}$$
(5)

и угла наклона плоскости на входном участке

$$\gamma = \frac{h_1}{y_1 L} = 0,674 \sqrt{\frac{\mu UB}{W_0}} .$$
 (6)

По величине вспомогательного параметра *а* можно определить функцию для расчета коэффициента трения с использованием соответствующих зависимостей статьи [5] и доклада [7] $f = k_f \frac{h_1}{r}$.

Значения функциональной характеристики трения k_f при различных конструктивных соотношениях представлены в табл.3.

Отношение $k = L_1/L_2$	0	0,17	0,25	0,3
Отношение L_1/L	0	0,145	0,2	0,23
Отношение $y_1 = h_1 / \gamma L$	0,84	0,65	0,65	0,48
Функция трения k_f	4,706	4,682	4,95	5,3
Относительная несущая способность $\overline{W_0}$	0,0267	0,0317	0,032	0,0313
Отношение $\overline{W_0}(k)/\overline{W_0}(0)$	1,0	1,19	1,2	1,17

Таблица 2. Функция трения при разных конструктивных отношениях

Как следует из приведенных расчетов, минимальные потери на трение будут при соотношениях $L_1/L = 0.145$ и $y_1 = h_1/\gamma L = 0.65$.

Несущая способность смазочного слоя переменной вязкости определяется зависимостью

$$W = \frac{BL}{\alpha} \overline{W}_{\alpha}, \qquad (7)$$

в которой относительная функция несущей способности смазочного слоя переменной вязкости определяется интегральной зависимостью

$$\overline{W}_{\alpha} = -\int_{0}^{1,0} \ln\left(1 - k_{\alpha}\overline{p}_{0}\right) d\overline{x} .$$
(8)

В этой зависимости коэффициент k_{α} характеризует свойства смазочного слоя и рассчитывается по формуле

$$k_{\alpha} = \alpha \frac{6\mu UL}{h_{\rm l}^2}.$$
(9)

Численный расчет интегральной зависимости (9) выполняется с учетом функции относительного давления $\overline{p}_0(\overline{x})$. Результаты расчета для двух конструктивных вариантов представлены на рис 1. Функциональная графическая зависимость $k_{\alpha} = f\left(\overline{W}_{\alpha}\right)$ для канала с эквидистантным участком при отношениях k = 0,17...0,3 практически совпадает со сплошной кривой на рис.2.



Рис. 2. Функция $k_{\alpha} = f(\overline{W}_{\alpha})$ для слоя с эквидистантным участком и без него

Анализ результатов расчетов показал, что для тяжело нагруженных контактов () эффективность конструкции с эквидистантным участком возрастает. Несущая способность такого канала смазки (рис.1, δ) выше несущей способности традиционного канала (рис.1,a) на 30%.

Выводы

1. Применение на выходе из смазочного канала участка с параллельными сторонами повышает несущую способность смазочного слоя на 20...30% в диапазоне отношения длины эквидистантного участка к общей длине слоя 0,145...0,23.

2. Преимуществом смазочного канала с эквидистантным участком является увеличение толщины смазочного слоя. Это особенно важно для относительно тяжело нагруженных узлов, в которых без этого участка гидродинамический режим смазки не обеспечивается.

3. Уменьшением длины эквидистантного участка до $L_1/L \approx 0,145...0,15$ можно добиться небольшого уменьшения потерь трения в гидродинамических режимах смазки.

Дальнейшие исследования в данном проблеме могут быть направлены на распространение предложенной методики определения параметров смазочного слоя между плоскостями переменной ширины, использование ее для анализа параметров смазочного слоя между цилиндрическими поверхностями с изломом [2, 4, 8], выполнения динамических расчетов узлов трения и т.д.

Список литературы: 1. Мур Д. Основы и применения трибоники. – Издательство Мир, 1978. – 487с. 2. Ю.Н.Кипреев. Характеристики гидродинамического режима смазки в контактах поверхностей с изломом. - Збірник наукових праць УДМТУ. -Миколаїв: УДМТУ, 2002. – №6(384). – С.101 – 110. 3. Ю.Н.Кипреев, Т.Ю.Ломаковская. Несущая способность смазочного слоя в контактах плоских поверхностей. -Прогрессивные технологии и системы машиностроения: Международный сб. научных трудов. – Донецк: ДонГТУ, 2002. Вып. 20. – С.184-194. 4. Ю.М.Кіпрєєв. Характеристики мастильного шару в контактах поверхонь із зламом. - Вісник Технологічного університету Поділля, №6, Хмельницький, 2002/Ч.1, С. 135-146. 5. Ю.М.Кіпрєєв. Аналіз характеристик мастильного шару між ламаними поверхнями. Тези доповідей 8-го Міжнародного симпозіуму українських інженерів-механіків. – Львів: КІНПАТРІ ЛТД. – 2007. – С. 138-139. 6. Ю.Н.Кипреев. Определение характеристик трения в контакте плоских поверхностей с изломом. – Прогрессивные технологии и системы машиностроения: Международный сб. научных трудов. – Донецк: ДонНТУ, 2003. Вып. 25. – С.161-166. 7. Ю.Н.Кипреев. Учет боковых утечек в контактах плоских поверхностей с изломом. – Донецк: ДонНТУ, 2004. Т.2. – С.64-68. 8. Орлов П.И. Основы конструирования: Справочно-методическое пособие. В 2-х книгах. Кн. 2. Под редакцией П.Н. Учаева. – 3-е изд., исправленное. – М.: Машиностроение, 1988. – 544с. Сдано в редакцию 08.05.07

ФОРМИРОВАНИЕ РЕГУЛЯРНОГО МИКРОРЕЛЬЕФА УЛЬТРАЗВУКОВЫМ АЛМАЗНЫМ ВЫГЛАЖИВАНИЕМ С ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ РЕЛАКСАЦИЕЙ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ

Киселев Е.С., Степчева З.В., Половников П.А. (УлГТУ, г. Ульяновск, Россия)

The results of examination of technological efficiency of different ways of diamond smoothing of the ground work-piece are given. It is set, that a reserve of perfecting of technology diamond smoothing is the ultrasonic relaxation of technological residual stresses in a surface layer. Its application allows to obtain major on quantity and on location depth cramping residual stresses even at smaller gain of a hold-down diamond tool.

Наряду с обеспечением требуемых физико-механических характеристик рабочих поверхностей деталей, работающих в условиях трения, одной из важнейших технологических задач, решаемых в процессе упрочняющей обработки, является формирование регулярных микрорельефов (PMP), аналитически рассчитываемых и воспроизводимых при обработке с достаточной степенью точности.

Регуляризация поверхностей обрабатываемых заготовок при ультразвуковом (УЗ) алмазном выглаживании, как правило, осуществляется на форсированных режимах при увеличенных значениях амплитуды УЗ-колебаний (УЗК) и продольных подач выглаживателя, что неизбежно влечет за собой рост составляющих сил обработки, вызывающих как увеличение величины упругого восстановления поверхности, так и обратное пластическое течение материала в сторону уже обработанной поверхности [1-4]. Эти явления сопровождаются увеличением параметров шероховатости, что делает невозможным образование регулярных микрорельефов без потери качества обработки и зачастую, особенно в случае обработки маложестких прецизионных деталей, оказывается неприемлемым. Необходимым условием обеспечения требуемой микрогеометрии заготовок с одновременным образованием регулярного микрорельефа