

И. В. КРАГЕЛЬСКИЙ, В. С. КОМБАЛОВ

**РАСЧЕТ ВЕЛИЧИНЫ СТАБИЛЬНОЙ ШЕРОХОВАТОСТИ  
ПОСЛЕ ПРИРАБОТКИ (УПРУГИЙ КОНТАКТ)**

(Представлено академиком А. Ю. Ишлинским 13 I 1969)

При относительном скольжении двух твердых тел на их соприкасающихся поверхностях устанавливается некоторая стабильная шероховатость, зависящая от режима работы пары и их механических свойств и не зависящая от исходной шероховатости (<sup>1, 2</sup> и др.).

До сих пор значение этой шероховатости не удавалось определять расчетным путем. Развитие молекулярно-механической теории трения и усталостной теории износа позволяет это сделать. Согласно (<sup>3-5</sup>), коэффициент трения выражается трехчленной зависимостью

$$f = \tau_0 / P_r + \beta + k_2 (h/R)^{1/2}, \quad (1)$$

где  $\tau_0$  — прочность на срез адгезионной связи при отсутствии нагрузки ( $\text{кГ/мм}^2$ );  $P_r$  — фактическое давление на контакте ( $\text{кГ/мм}^2$ );  $\beta$  — коэффициент упрочнения адгезионной связи;  $h$  — глубина внедрения жестких выступов радиуса  $R$  в деформируемое полупространство;  $k_2$  — коэффициент, учитывающий вид напряженного состояния и геометрию контакта.

Эта широко апробированная формула (<sup>3-5</sup>) содержит два частных случая: ранее установленный двухчленный закон трения Дерягина, характеризующий адгезионную составляющую трения, и закон трения Гранвуале — Горячкина — последний член формулы, характеризующий деформационную составляющую трения. При росте нагрузки  $P_r$  и соответственно величины внедрения  $h$  коэффициент трения переходит через минимум. С другой стороны, согласно усталостной теории износа (<sup>6, 8</sup>) число циклов  $n$ , приводящих к разрушению, обратно пропорционально коэффициенту трения  $f$ . Как следует из формулы (2), чем меньше коэффициент трения, тем больше число циклов выдерживает материал, так как при этом будут меньше растягивающие напряжения в поверхностном слое, ответственные за образование частиц износа. Число циклов в зависимости от действующего напряжения выражается кривой Велера (<sup>6, 8</sup>)  $n = (\sigma_0 / kfP_r)^t$ , где  $\sigma_0$  — экстраполированное значение разрушающего растягивающего напряжения  $n = 1$ ;  $k$  — коэффициент, характеризующий напряженное состояние и зависящий от природы материала;  $t$  — показатель кривой усталости Велера. Поэтому естественно, что в ансамбле неровностей, имеющих различную высоту, в наиболее благоприятных условиях окажутся те, для которых коэффициент трения будет наименьшим. Поэтому на приработанной поверхности они будут превалирующими.

Таким образом, шероховатость поверхности, имеющая минимальное значение коэффициента трения, будет соответствовать стабильной.

Произведем расчет этой шероховатости, исходя из модели, когда жесткая поверхность, реализованная набором сферических неровностей одинакового радиуса, скользит по упруго деформируемому гладкому полупространству. При этом учитываются физико-механические свойства этого деформируемого материала.

Относительная площадь касания  $\eta$  в зависимости от относительного сближения  $\epsilon$  выражается степенной зависимостью (<sup>9</sup>)  $\eta = a\epsilon^b$ , где  $a$  — коэффициент, зависящий от напряженного и кинематического состояния контакта (в случае относительного перемещения для упругого контакта  $a = 1/2$ );  $b$  и  $v$  — характеристики степенной зависимости.

Пара трения	Расчет				Эксперимент		
	$P_c$ , кг/мм <sup>2</sup>	$\tau_0$ , кг/мм <sup>2</sup>	$E$ , кг/мм <sup>2</sup>	$\Delta_{расч}$	$\Delta_{эксп}$	$R_z$ , $\mu$	Класс
Ст. 45 — капрон Б	0,12	0,15	$1,5 \cdot 10^3$	$2,9 \cdot 10^{-2}$	$3 \cdot 10^{-2}$	1,2	9
Ст. 45 — фторопласт-4	0,12	0,035	$7 \cdot 10^1$	$9 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-2}$	2,64	8
Ст. 45 — полиформальдегид	0,12	0,20	$1,7 \cdot 10^2$	$2,3 \cdot 10^{-2}$	$2,6 \cdot 10^{-2}$	1,15	9

С другой стороны, относительная площадь касания в случае упругого контактирования выражается зависимостью вида (9)

$$\eta = A_r / A_c = P_c / P_r = 1/2 b \varepsilon^v = 1/2 b h^v / h_{max}^v, \quad (2)$$

где  $A_c$  и  $P_c$  — контурная площадь касания (мм<sup>2</sup>) и соответствующее ей контурное давление (кг/мм<sup>2</sup>);  $\varepsilon = h / h_{max}$  — отношение величины внедрения  $h$  (мм) к максимальной высоте неровности  $h_{max}$  (мм).

Выражая величину  $h$  из (2), получим:

$$h = (2P_c h_{max}^v / b P_r)^{1/v}. \quad (3)$$

Фактическое давление  $P_r$ , входящее в уравнения (1), (3), для случая упругого контакта, согласно (8), равно:

$$P_r = [2^{1/2v} k_2 h_{max}^{1/2} E / (3/4\pi) b^{1/2v} R^{1/2} (1 - \mu^2)]^{2v/(2v+1)} P_c^{1/(2v+1)}. \quad (4)$$

Подставляя в уравнение (1) соответствующие выражения (3) и (4), получим коэффициент трения как функцию шероховатости твердого контртела, физико-механических свойств деформируемого материала и режима работы пары

$$f = A \left( \frac{h_{max}}{R b^{1/v}} \right)^{-v(2v+1)} + \beta + B \left( \frac{h_{max}}{R b^{1/v}} \right)^{v(2v+1)}, \quad (5)$$

где

$$A = \left[ \frac{3/4 \pi (1 - \mu^2)}{k_2 E} \right]^{2v/(2v+1)} \frac{\tau_0}{(2P_c)^{1/(2v+1)}}, \quad B = \left[ \frac{2 \cdot 3/4 \pi P_c (1 - \mu^2)}{E} \right]^{1/(2v+1)} k_2^{2v/(2v+1)}.$$

В рассматриваемом случае  $A$  и  $B$  постоянны.

Величина шероховатости оценивается безразмерным соотношением  $h_{max} / R b^{1/v}$ , характеризующим степень остроты выступов и их распределение по высоте, где  $R$  — средний радиус закругления микронеровностей.

Обозначив  $h_{max} / R b^{1/v} = \Delta$ , получим

$$f = A \Delta^{-v(2v+1)} + \beta + B \Delta^{v(2v+1)}. \quad (6)$$

Минимальное значение коэффициента трения будет соответствовать

$$df/d\Delta = 0, \quad d^2f/d\Delta^2 > 0. \quad (7)$$

Учитывая условие (7), получим следующее выражение шероховатости, соответствующей минимальному значению коэффициента трения:

$$\Delta_{расч} = \left[ \frac{3/4 \pi (1 - \mu^2)}{E} \right]^{(2v-1)/2v} \tau_0^{(2v+1)/2v} \frac{1}{(2P_c)^{1/2} k_2^2}. \quad (8)$$

Принимая для приработанных поверхностей  $v = 2$ , получим следующее простое выражение, определяющее безразмерную величину, соответствующую стабильной шероховатости:

$$\Delta_{расч} = 2,7 \tau_0^{3/4} \left[ \frac{(1 - \mu^2)^{3/4}}{E} \right]^{1/4} \frac{1}{P_c^{1/2}}, \quad (9)$$

где  $E, \mu$  — модуль упругости и коэффициент Пуассона деформируемого материала.

Экспериментальная проверка полученного расчетного выражения (8) проводилась для различных пар металл — полимер. Полимерные образцы

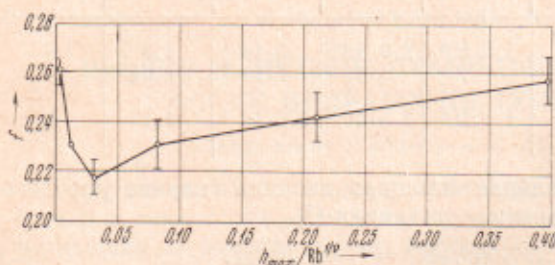


Рис. 1. Зависимость коэффициента трения пары ст. 45 — капрон Б от шероховатости стального контртела

прирабатывались к металлическим образцам с различной исходной шероховатостью. При этом нагрузки на пару соответствовали условиям упругого деформирования на контакте. Скорость скольжения составляла  $V = 0,5$  м/мин, при этом температура в зоне контакта оставалась неизменной, что позволяло судить о постоянстве физико-механических свойств пары трения. Эксперименты проводились без смазки.

Записывалось показание силы трения, снималась профилограмма с металлической поверхности, на основании которой определялись значения  $h_{max}, R, b$  и  $v$ , а также безразмерное соотношение  $\Delta_{max}$  и величина  $R_z$ , что позволяло оценить класс чистоты поверхности. На основании полученных результатов строилась экспериментальная зависимость коэффициента трения от шероховатости приработанной поверхности, определяемой безразмерным соотношением  $\Delta_{max}$  (рис. 1).

Исходя из условий на контакте ( $\tau_0$  и  $P_c$ ), а также физико-механических свойств деформируемого материала, производился расчет по формуле (8) величины стабильной шероховатости. При этом принималось  $\mu = 0,4; k_2 = 0,8$ . Значения  $v$  для обработанных профилограмм находятся в пределах 4,8—2,2.

В табл. 1 приведены расчетные и экспериментальные данные шероховатости металлической поверхности, соответствующие минимальному значению коэффициента трения. Результаты расчета удовлетворительно совпадают с экспериментом.

На рис. 1 приведена экспериментальная зависимость коэффициента трения пары сталь — капрон Б от шероховатости жесткого контртела, иллюстрирующая минимум коэффициента трения.

Расчет по формуле (8) экспериментальных данных ряда авторов<sup>(10, 11)</sup> дал также удовлетворительное совпадение.

Государственный научно-исследовательский институт машиноведения  
Москва

Поступило  
29 IV 1969

#### ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- 1 П. Е. Дьяченко, Влияние шероховатости поверхности на ее износ, кн. 11, Качество поверхности деталей машин, 1950.
- 2 П. А. Косенко, Оптимальная шероховатость трущихся поверхностей, кн. 34, Качество обработанных поверхностей, 1954.
- 3 И. В. Крагельский, Н. М. Михин, Современное представление о природе и коэффициенте трения и возможности его расчета в кинематических парах трения, Международн. конф. по механизмам и машинам, Болгария, Варна, 1965.
- 4 I. V. Kragelsky, N. M. Mikhin, Trans. ASME, March, 1966, p. 486.
- 5 И. В. Крагельский, Н. М. Михин, Сборн. Теория трения и износа, «Наука», 1965, стр. 30.
- 6 И. В. Крагельский, Е. Ф. Непомнящий, Г. М. Харач, ДАН, 185, № 4, 802 (1969).
- 7 И. В. Крагельский, Н. М. Алексеев и др., Машиноведение, № 1 (1969).
- 8 И. В. Крагельский, Е. Ф. Непомнящий, Г. М. Харач, Усталостный механизм и краткая методика аналитической оценки величины износа поверхностей трения при скольжении, М., 1967.
- 9 Н. Б. Демкин, Фактическая площадь касания твердых поверхностей, Изд. АН СССР, 1962.
- 10 В. А. Белый, Б. И. Купчинов, П. В. Сысоев, Сборн. Применение материалов на основе пластмасс для опор скольжения и уплотнений в машинах, «Наука», 1968.
- 11 Ю. А. Евдокимов, Сборн. Применение материалов на основе пластмасс для опор скольжения и уплотнений в машинах, Изд. «Наука», 1968.