

КОЛИЧЕСТВЕННАЯ ОЦЕНКА УПРУГОГО ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО СМЕЩЕНИЯ ПРИ НАПРАВЛЕННОЙ ШЕРОХОВАТОСТИ ПОВЕРХНОСТИ

В. И. МАКСАК

(Представлена научным семинаром кафедры сопротивления материалов)

Относительный сдвиг соприкасающихся тел, соответствующий неполной силе трения, называется предварительным смещением [1].

В работе [2] отмечалось, что при одинаковых сдвигающих усилиях упругие предварительные смещения (исчезающие после снятия сдвигающих и сжимающих сил) вдоль следов обработки больше, чем поперек.

Сдвиг соприкасающихся поверхностей в условиях предварительного смещения происходит в результате деформации выступов шероховатой поверхности. Реальная форма выступов большинства шероховатых поверхностей хорошо описывается эллипсоидом. Для каждого из таких выступов можно использовать решения Р. Миндлина для сдвига упругих тел с эллиптической зоной контакта [3] или А. И. Лурье для сдвига эллиптического штампа [4].

Сдвиг эллипсоидальных выступов вдоль главных осей эллиптической контактной зоны может быть определен по формуле

$$\downarrow \Delta = \begin{cases} \frac{3fN_i}{4Ga} \left[1 - \left(1 - \frac{P}{fN_i} \right)^{2/3} \right] x_{(e)}, & a > b, \\ \frac{3fN_i}{4Gb} \left[1 - \left(1 - \frac{P}{fN_i} \right)^{2/3} \right] x_{(e)}, & b > a, \end{cases} \quad (1)$$

где a и b — главные полуоси эллиптической зоны контакта.

$x_{(e)}$ — величина, определяющаяся по диаграмме [3, 4], (рис. 1),

f — коэффициент трения,

G — модуль сдвига,

N_i — сила сжатия выступа,

P — сила сдвига.

Определение смещения шероховатой поверхности с учетом деформации каждого выступа в отдельности представляется довольно сложным и для упрощения решения принимается следующее:

а) все выступы моделируются эллипсоидами, имеющими равные соответствующие размеры;

б) закон распределения выступов по высоте удовлетворяет кривой опорной поверхности;

в) наибольшее сжатие испытывают наиболее высокие выступы;

г) коэффициент трения, соответствующий определенному направлению, одинаков по всему контакту.

Ввиду неодинакового распределения микронеровностей по высоте во время напругения контакта нормальной силой, они деформируются на сжатие по-разному: наиболее высокие выступы сжимаются сильнее, менее высокие — меньше; конечно, имеются и такие, которые вступают в контакт только в конце нажатия или не вступают совсем. Благодаря этому все выступы имеют разные по величине силы сжатия.

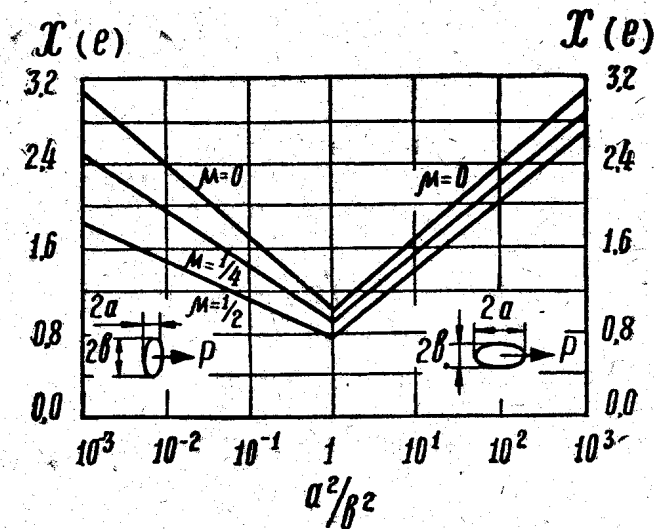


Рис. 1

Во время предварительного смещения менее сжатые выступы начнут вступать в скольжение раньше. В это время наиболее сжатые будут сдвигаться упруго. В скольжение начнут входить все новые выступы, каждый после своего полного упругого предварительного смещения. Таким образом, скольжение всего контакта не начнется до тех пор, пока не вступит в скольжение наиболее сжатый выступ. Следовательно, величина полного смещения контакта должна определяться величиной полного смещения наиболее сжатого выступа, которое определяется по формуле (1) при условии $P = fN$, т. е.

$$\Delta = \begin{cases} \frac{3fN_i}{4Ga} x_{(e)}, & a > b \\ \frac{3fN_i}{4Gb} x_{(e)}, & b > a \end{cases} \quad (2)$$

Большая полуось a или b определяется по формуле Герца [5]

$$\begin{cases} a \text{ (при } a > b) \\ b \text{ (при } b > a) \end{cases} = n_a \sqrt[3]{\frac{3}{2} \left(\frac{1-\mu^2}{E} \right) \frac{r_{\text{пр}} r_{\text{пол}}}{r_{\text{пр}} + r_{\text{пол}}} N_i}$$

а формула (2) переписется в виде

$$\Delta = \frac{3fN_i^{2/3} x_{(e)}}{4Gn_a \sqrt[3]{\frac{3}{2} \left(\frac{1-\mu^2}{E} \right) \frac{r_{\text{пр}} r_{\text{пол}}}{r_{\text{пр}} + r_{\text{пол}}}}} \quad (3)$$

Усилие сжатия N_i , согласно формуле Герца, равно

$$N_i = \left(\frac{r_{\text{пр}} r_{\text{пол}}}{r_{\text{пр}} + r_{\text{пол}}} \right)^{1/2} \frac{k_{\text{max}}^{3/2} \varepsilon^{3/2} E}{(1-\mu^2) n_0^{3/2} \cdot 0,65^{3/2}} \quad (4)$$

Здесь $r_{\text{пр}}$, $r_{\text{поп}}$ — радиусы выступа в продольном и поперечном направлениях соответственно; n_a , n_b — коэффициенты, зависящие от главных кривизн соприкасающихся тел в месте контакта и угла между плоскостями главных кривизн [5]; μ — коэффициент Пуассона, E — модуль упругости; h_{max} — максимальная высота неровностей; ε — относительное сближение шероховатых поверхностей. Последнее определяется из условия

$$N = \int_0^{n_r} N_i dn_r,$$

где n_r — число контактирующих выступов;

N — сила сжатия шероховатых поверхностей.

Следуя решению Н. Б. Демкина [6], с учетом формы эллипсоидального выступа получим

$$\varepsilon = \left[\frac{\pi n_b^{3/2} (1 - \mu) (r_{\text{п}} + r_{\text{поп}})^{1/2} N}{1,88 b K_2 h_{\text{max}}^{1/2} G A_c} \right]^{\frac{2}{2\nu+1}}, \quad (5)$$

где b , ν — параметры кривой опорной поверхности;

A_c — контурная площадь;

K_2 — коэффициент зависит от ν и имеет следующие значения:

при $\nu = 1$ $K_2 = 1$

при $\nu = 2$ $K_2 = 0,8$

при $\nu = 3$ $K_2 = 0,68$

Далее, предполагая равенство соотношения сил сдвига и сжатия для наиболее сжатого выступа и для всего контакта во всем периоде его сдвига (такое допущение не вызывает расхождения теоретических и экспериментальных кривых более, чем на 70/0), с учетом значений (1), (3), (4), (5) имеем величину упругого предварительного смещения дискретного контакта вдоль или поперек следов обработки с учетом соответствующего коэффициента трения.

$$\Delta = \frac{2fh_{\text{max}}\varepsilon_{x(e)}}{(1 - \nu)n_a n_b} \left[1 - \left(1 - \frac{P}{fN} \right)^{2/3} \right]. \quad (6)$$

Для контакта шероховатой поверхности с абсолютно жесткой гладкой величина смещения уменьшается в два раза.

Полученная формула удовлетворительно соответствует экспериментальным данным, во всяком случае по порядку величины. Так, для контактирующих закаленных, шлифованных образцов из стали 45 с чистой обработки $\Delta 5$ и $\Delta 12$, коэффициентами трения вдоль следов обработки 0,23 и поперек 0,25, сжатыми силой 30 кГ и сдвигаемыми силой 4 кГ, величины упругого предварительного смещения вдоль и поперек следов обработки, полученные экспериментально, соответственно равны 0,22 и 0,18 мк, а вычисленные по формуле (6) — 0,19 и 0,14 мк.

ЛИТЕРАТУРА

1. И. В. Крагельский, В. С. Щедров. Развитие науки о трении. Изд-во АН СССР, М., 1956.
2. Б. П. Митрофанов, В. И. Максак. Анизотропия упругого предварительного смещения. Вестник АН БССР. Серия физико-технических наук, Минск, № 1, 1968.
3. R. D. Mindlin. Compliance of Elastic Bodies in Contact. J. Appl. Mech., v. 16, 1949.
4. А. И. Лурье. Пространственные задачи теории упругости. Гостехиздат, М., 1955.
5. С. Д. Пономарев, В. Л. Бидерман, К. К. Лихарев, В. М. Макушин, Н. Н. Калинин, В. И. Феодосьев. Расчеты на прочность в машиностроении. Т. II, Машгиз, М., 1958.
6. Н. Б. Демкин. Фактическая площадь касания твердых поверхностей. Изд-во АН СССР, М., 1962.