

УПРУГОЕ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЕ СМЕЩЕНИЕ И ЖЕСТКОСТЬ МЕХАНИЧЕСКОГО КОНТАКТА

В. И. МАКСАК

(Представлена научным семинаром кафедры сопротивления материалов)

В данной работе рассматривается сдвиг соприкасающихся поверхностей, вызванный сдвигающей силой, меньшей, чем сила трения, и называемый предварительным смещением [1]. Известно [2], что при первом нагружении контакта смещение является упругопластическим и по своей величине больше смещений, вызванных последующим нагружением в том же направлении силами, не превышающими первую. Обычно в установившихся процессах имеет место второй случай. Такие смещения называются упругими [3], так как после удаления сдвигающей и сжимающей сил остаточных смещений нет, и в общем виде характер их от сдвигающего усилия показан одной из кривых на рис 1, а. Из рисунка видно, что большему коэффициенту трения, с одной стороны, соответствует большая жесткость связи, с другой стороны — большее предварительное смещение. Соответственно больше упругий [2] и второй (ВО) возвраты. Для предельного упругого предварительного смещения эксперимент показывает линейную взаимосвязь с коэффициентом трения, однако при малых значениях последнего величина смещения несколько ниже, что, возможно, объясняется увеличением влияния адгезионной составляющей при малых силах сдвига.

Взаимосвязь упругого предварительного смещения и коэффициента трения покоя показана на рис. 1, б. Линии 1 соответствует смещение при максимальных силах сдвига $P=fN$. При постоянной силе сжатия N и определенной непределной силе сдвига P снижению коэффициента трения соответствует увеличение смещения (линии 2—13). Однако уменьшению коэффициента трения при постоянной силе сдвига существует предел, который определяется равенством $P=fN$. Дальнейшее снижение коэффициента трения требует снижения сдвигающей силы. При этом величина упругого предварительного смещения уменьшается по линии 1 (рис. 1, б).

Влияние сжимающего усилия на предварительное смещение показано на рис. 2, а и 2, б. Увеличение силы сжатия, так же как и коэффициента трения, с одной стороны, увеличивает жесткость связи, с другой стороны, увеличивает значение предельного смещения.

Так как предварительное смещение определяется деформацией шероховатой поверхности, то естественно предположить влияние размеров шероховатостей на величину смещения. Проведение такого эксперимента является весьма сложным, так как требует исключения различного

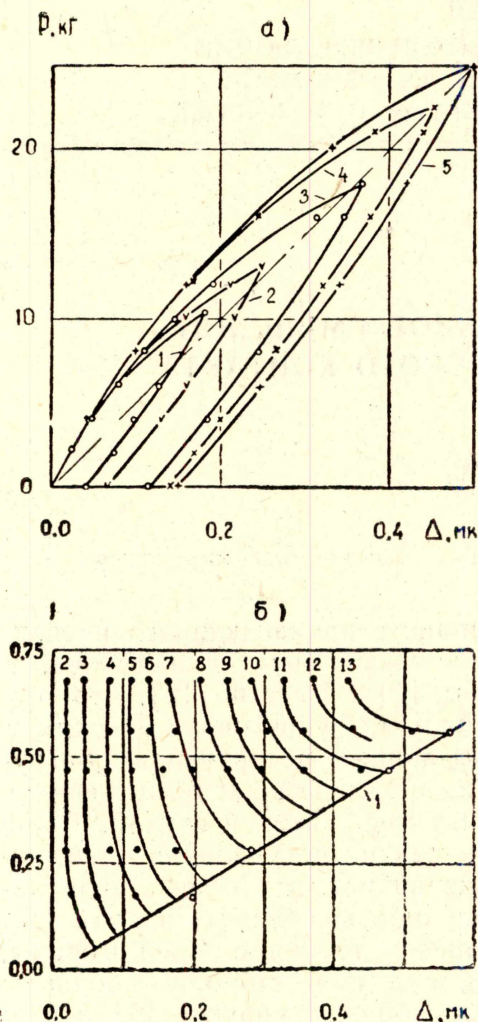


Рис. 1

а) Графики полных упругих предварительных смещений для коэффициентов трения соответственно: 1) 0,22; 2) 0,29; 3) 0,4; 4) 0,51; 5) 0,56. Сталь 3. Чистота обработки поверхностей $\Delta 8$, $N=45$ кг.

б) Графики взаимосвязи упругого предварительного смещения и коэффициента трения покоя для сил сдвига, имеющих соответственно следующие значения в кг:

1) fN ; 2) 24; 3) 22; 4) 20; 5) 18; 6) 16; 7) 14; 8) 12; 9) 10; 10) 8; 11) 6; 12) 4; 13) 2. Сталь 3. $N = 45$, $\nabla 8$

на смещения, приходящаяся на единицу сдвигающего усилия. Изменение податливости контакта в зависимости от сдвигающего усилия для различных коэффициентов трения покоя показано на рис. 3, а. При достижении сдвигающим усилием своего предельного значения податливость контакта неограниченно возрастает. Характерно, что при малых усилиях сдвига податливость постоянна и не зависит от коэффициента трения [4]. Последнее видно также и из рис. 1, а, где смещения в начале сдвига совпадают. В отличие от коэффициента трения сила сжатия заметно влияет на начальную податливость, когда сдвигающее усилие равно

влияния других параметров на смещение. Получить же контакты с одинаковыми коэффициентами трения не представляется возможным. Однако, несмотря на эти трудности, попытка проведения такого эксперимента все же была сделана. Из рис. 2, в видно, что для более грубых поверхностей величина смещения несколько больше. Так, смещение образца с чистотой обработки $\nabla 4$ больше, чем с чистотой $\nabla 5$ (коэффициенты трения примерно одинаковые). Смещение для образца с чистотой обработки $\nabla 9$ оказалось несколько больше, чем с чистотой $\nabla 5$, однако это можно объяснить тем, что эта пара имела коэффициент трения значительно меньший (смещения показаны при одинаковых силах сдвига). То, что влияние коэффициента трения велико, видно по кривой 4, для которой контакт тот же самый, что и для кривой 2. Разница лишь в том, что коэффициент трения здесь еще ниже и равен 0,2.

Эксперименты, проведенные на материалах, имеющих различные модули сдвига, показали только их количественное влияние на смещение. Из рис. 2, г видно, что смещение при одной и той же силе сдвига меньше предельной, для материала с меньшим модулем сдвига — выше. Хотя контакт медных образцов имел коэффициент трения ниже, чем контакт стальных образцов, разница в смещениях показывает очевидность влияния модуля сдвига.

Для выбора контакта оптимальной жесткости часто представляется интересным знание его тангенциальной податливости от исследуемых выше параметров. Под податливостью здесь понимается величина

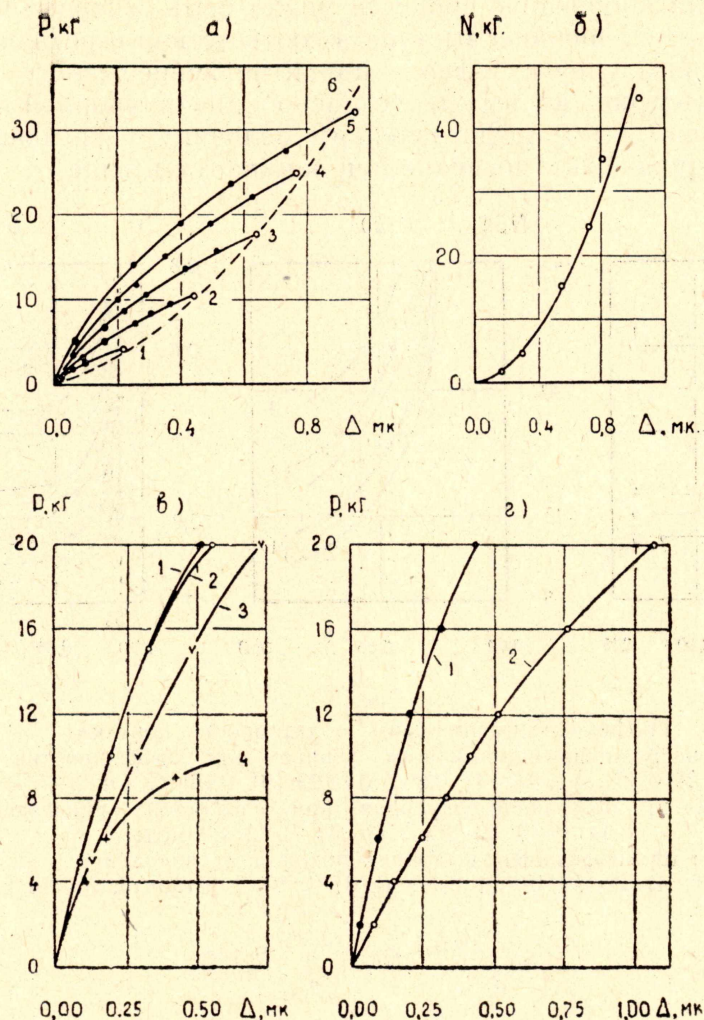


Рис. 2

а) 1, 2, 3, 4, 5 — графики предварительного смещения от сил сдвига для сил сжатия, имеющих значения соответственно 5, 15, 25, 35 и 45 кг. 6 — график предварительного смещения от силы сдвига, равной fN (по данным И. Р. Коняхина).

б) Зависимость величины смещения от нормальной нагрузки для случая $P=fN$ (по данным И. Р. Коняхина).
 в) Упругие предварительные смещения для образцов с чистой обработкой: 1 — $\nabla 5$, 2 — $\nabla 9$, 3 — $\nabla 4$, 4 — $\nabla 9$ в контакте с образцом, имеющим обработку поверхности 8 класса чистоты. Коэффициенты трения соответствующих пар равны: 1 — 0,63; 2 — 0,47; 3 — 0,6; 4 — 0,2. Сталь 3, $N=45$ кг.

г) Упругие предварительные смещения: 1 — контакта стальных образцов с коэффициентами трения 0,58; 2 — контакта медных образцов с коэффициентом трения 0,45. $N=45$ кг, $\nabla 8$

нулю (рис. 2, а и линии 1 рис. 3, б). Для различных сдвигающих усилий кривые податливости получают эквидистантным перемещением их вдоль оси N . С увеличением силы сжатия податливость контакта уменьшается, что хорошо согласуется с указанием И. В. Крагельского [1] о возрастающей жесткости связи. Влияние коэффициента трения показано на рис. 3, в.

Теоретическое описание процесса может быть основано на представлениях о сдвиге единичного выступа в соответствии с решением Р. Миндлина для сдвига упругих сфер и принятии непрерывного закона распределения выступов по высоте согласно кривой опорной поверхности [5, 6]. Согласно этим представлениям величина сдвигающего усилия в контакте шероховатых поверхностей запишется в виде

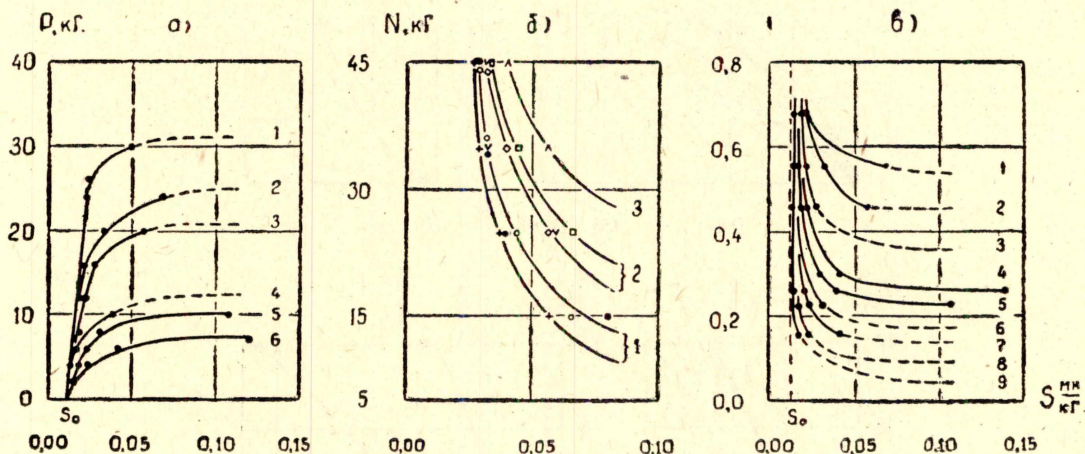


Рис. 3

- Графики тангенциальной податливости контакта
а) на пути его нагружения сдвигающим усилием для коэффициентов трения покоя:
1) 0,68; 2) 0,55; 3) 0,46; 4) 0,26; 5) 0,22; 6) 0,16; Сталь 3, $N=45$ кг.
б) в зависимости от сжимающего усилия при следующих сдвигающих усилиях:
1) $P=0$; 2) $P=1$ кг; 3) $P=2$ кг, медь,
в) в зависимости от коэффициента трения покоя для сил сдвига в кг: 1) 24; 2) 20;
3) 16; 4) 12; 5) 10; 6) 8; 7) 6; 8) 4; 9) 2, Сталь 3, $N=45$ кг

$$P = \int_0^{n_{rm}} P_i dn_r + \int_{n_{rm}}^{n_r} P_i dn_r, \quad (1)$$

где P_i — сдвигающее усилие на единичном выступе; n_{rm} — число смещающихся выступов; n_r — число контактирующих выступов;

$$dn_r = \frac{A_c b \nu (\nu - 1) x^{\nu-2} dx}{2\pi h_{\max}^{\nu} \sqrt{r_{\text{пр}} r_{\text{поп}}}}. \quad (2)$$

С учетом решения Миндлина [7] и задачи Герца величина сдвигающего усилия каждого смещающегося выступа может быть представлена в виде

$$P_i = j N_i \left\{ 1 - \left[1 - \frac{\Delta (1 - \mu) n_a n_b}{2\chi f h_{\max} (\epsilon - x)} \right]^{3/2} \right\}, \quad (3)$$

а для проскальзывающего выступа

$$P_i = f N_i, \quad (4)$$

где N_i — сжимающее усилие на единичном выступе.

$$N_i = \frac{1,88}{n_o^{3/2}} \left(\frac{r_{\text{пр}} r_{\text{поп}}}{r_{\text{пр}} + r_{\text{поп}}} \right)^{1/2} \frac{E h_{\max}^{3/2} (\epsilon - x)^{3/2}}{1 - \mu^2}; \quad (5)$$

ϵ — относительное сближение поверхностей,

$$\epsilon = \left[\frac{\pi n_o^{3/2} (1 - \mu^2) (r_{\text{пр}} + r_{\text{поп}})^{1/2} N}{0,94 b K_2 h_{\max}^{1/2} E A_c} \right]^{2/2\nu+1}. \quad (6)$$

Здесь и выше A_c — контурная площадь; b, v — параметры кривой опорной поверхности и K_2 — постоянная интегрирования по Н. Б. Демкину [6]; $h_{\max}$ — максимальная высота неровностей; $r_{\text{пр}}, r_{\text{поп}}$ — радиусы выступов в продольном и поперечном направлениях обработки; N — сила сжатия контакта; f — коэффициент трения покоя; Δ — величина смещения; n_a, n_b, n_s — коэффициенты главных кривизн выступов; E — модуль упругости; μ — коэффициент Пуассона; χ — коэффициент, учитывающий эллипсность единичного пятна касания [7].

Уровень m вершин выступов, разграничивающий смещающиеся и проскальзывающие выступы, определится из условия предельного смещения при $P_i = fN_i$

$$m = \varepsilon - \frac{\Delta(1-\mu)n_a n_b}{2\chi f h_{\max}}. \quad (7)$$

Из (1) с учетом (2) ÷ (7) после интегрирования и некоторого преобразования получим

$$\tau = f q \left\{ 1 - \left[1 - \frac{\Delta(1-\mu)n_a n_b}{2\chi f \varepsilon h_{\max}} \right]^{\frac{2v+1}{2}} \right\}. \quad (8)$$

Откуда смещение

$$\Delta = \frac{2\chi f \varepsilon h_{\max}}{(1-\mu)n_a n_b} \left[1 - \left(1 - \frac{\tau}{f q} \right)^{\frac{2}{2v+1}} \right] \quad (9)$$

и податливость

$$S = \frac{d\Delta}{d\tau} = \frac{4\chi \varepsilon h_{\max}}{(2v+1)(1-\mu)n_a n_b q} \left(1 - \frac{\tau}{f q} \right)^{\frac{1-2v}{1+2v}}. \quad (10)$$

Здесь τ и q — удельные сдвигающие и сжимающие усилия.

Анализ формул (9) и (10) подтверждает хорошее их соответствие экспериментальным данным.

Результаты экспериментального и теоретического исследования позволяют сказать, что наибольшей тангенциальной жесткости контакта соответствуют: 1) максимальное прижатие поверхностей; 2) наибольший модуль упругости; 3) большее значение коэффициента трения; 4) лучшая чистота механической обработки контактирующей поверхности.

ЛИТЕРАТУРА

1. И. В. Крагельский. Трение и износ. Изд-во «Машиностроение», М., 1968.
2. И. Р. Коняхин. Теория предварительных смещений применительно к вопросам контактирования деталей. Изд-во Томского университета, 1965.
3. Б. П. Митрофанов. Природа упругого предварительного смещения. Теория трения и износа. Изд-во «Наука», М., 1965.
4. Б. П. Митрофанов, В. И. Максак. Упругое предварительное смещение при наличии промежуточного слоя. Изв. ТПИ, т. 183, 1968.
5. В. И. Максак. Количественная оценка упругого предварительного смещения. Изв. вузов. «Машиностроение», М., № 8, 1969.
6. Н. Б. Демкин. Фактическая площадь касания твердых поверхностей. Изд-во Академии Наук СССР, М., 1962.
7. R. D. Mindlin. Compliance of Elastic Bodies in Contact. J. of Applied Mechanics, 16, № 3, 1949.