

И. В. КРАГЕЛЬСКИЙ, Л. Ф. БЕССОНОВ и Е. М. ШВЕЦОВА

КОНТАКТИРОВАНИЕ ШЕРОХОВАТЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

(Представлено академиком П. А. Ребиндером 4 IX 1953)

Обычно считают, что под влиянием приложенной нагрузки на контактирующих неровностях шероховатых поверхностей развиваются напряжения, равные твердости материала и приводящие к пластическому деформированию неровностей (1^{-3}). Это позволяет определить площадь фактического контакта S_f как отношение нагрузки N к твердости материала H . Это заключение основано на экспериментах по определению площади контакта методом электропроводности (1). Ранее была указана принципиальная невозможность определения площади фактического контакта методом электропроводности вследствие наличия ситочного сопротивления (4). В связи с этим нами была поставлена под сомнение правильность указанных выше утверждений.

Изучение условий контактирования поверхностей было произведено нами оптическим методом, разработанным в Институте машиноведения АН СССР (5) и заключающимся в том, что два прозрачных образца сжимаются торцами, на которых нанесены шероховатости. Внешние, параллельные друг другу торцы образцов отполированы. Для достаточно шероховатых поверхностей луч света, проходя сквозь оба образца перпендикулярно их торцам, попадает в глаз наблюдателя только в тех местах, где имеет место действительное соприкосновение. В местах, где нет соприкосновения, вследствие шероховатости поверхности свет рассеивается. Для более гладких поверхностей наблюдения велись в косом свете, так как в противном случае луч света, проходя между двумя перпендикулярными его направлению параллельными поверхностями раздела, попадает в глаз наблюдателя в тех местах, где имеется зазор.

В качестве прозрачного материала было взято хлористое серебро ($AgCl$) — «прозрачный металл» А. В. Степанова, по своим механическим свойствам представляющий полный аналог меди (6).

Были испытаны образцы, имеющие различное качество поверхности, а именно: точеные, шлифованные, полированные и полированные, подвергнутые приработке при возвратно-поступательном движении (скорость скольжения $0,15$ м/сек и уд. давление 4 кг/см 2) при охлаждении поверхностей трения водой.

Испытания велись как с наклепанными до механической обработки образцами, так и с отоженными. В некоторых случаях отжигу подвергались также образцы после механической обработки. Приведем экспериментальные данные, относящиеся к двум крайним случаям: к точеным и полированным образцам. Эксперименты производились с цилиндрическими точеными образцами диаметром $16-20$ мм, высотой 6 мм, положенными друг на друга торцами и сжимаемыми между двумя параллельными стеклянными пластинками. Шаг подачи при резании $0,18$ мм, макси-

мальная высота неровности 60 μ . Цилиндры, сжимаемые торцами, были сдвинуты на величину радиуса. Приработанные полированные образцы представляют собой бруски площадью 5×5 мм и высотой 8 мм, положенные друг на друга и сжимаемые также между параллельными стеклянными пластинками. Вследствие наблюдения контактов под углом в 45° линейный размер h по оси y воспринимается как $h_y = \frac{0,5h}{\sqrt{n^2 - 0,5}}$,

где n — коэффициент преломления материала. Испытания велись методом циклической нагрузки, т. е. после каждого нагружения следовала разгрузка до нуля. Всего было 6 ступеней нагрузки. Наибольшая нагрузка соответствовала номинальному удельному давлению порядка 1 кг/мм^2 , т. е. $1/10$ твердости материала (твердость наклепанного AgCl составляет 10 кг/см^2). Это давление примерно в 10 раз превышает давление в наиболее напряженных узлах машин.

Фотографирование производилось как под нагрузкой, так и при снятии нагрузки. На рис. 1 приведены фотографии пятен контакта для точеных поверхностей при последовательно возрастающей нагрузке и при разгрузке. Касание имеет дискретный характер в виде правильно расположенных точек, сосредоточенных в нескольких зонах. Первое является результатом взаимного наложения сдвинутых концентрических окружностей, второе обусловлено волнистостью поверхности.

Как показывают фотографии, при снятии нагрузки значительное количество контактов пропадает.

Механизм обратимого характера процесса взаимодействия поверхностей под нагрузкой в достаточной мере еще не ясен. Он может быть обусловлен следующими тремя причинами:

1. Упругим деформированием полупространства, на котором расположены шероховатости. Указанное положение было сформулировано Боуденом и Тебором (7).

2. Расположением выступов на различной высоте и деформированием тех из них, которые, будучи расположены на некоторой глубине, сжимаются в пределах упругости.

3. Высокой прочностью отдельных выступов, обусловленной их конфигурацией и малыми размерами.

Если правильно первое положение, то сами выступы должны всегда сжиматься пластически и, следовательно, среднее напряжение на них должно быть постоянным, однако, эксперимент показывает, что напряжение непрерывно возрастает и начинает стремиться к постоянству лишь при очень больших нагрузках (см. рис. 4).

Если правильно второе положение, то количество упруго деформированных уступов должно быть больше для поверхностей с наиболее однородным распределением неровностей по высоте (полированных).

И, наконец, если правильно третье положение, то число упруго деформированных выступов должно быть больше для наиболее прочных вследствие их благоприятной формы выступов.

Фактически действуют все три причины, причем первая существенна при достаточно больших нагрузках, значения второй и третьей обусловлены сочетанием характера опорной поверхности и микроконфигурации выступов.

На рис. 2 приведен характерный график, определяющий зависимость S_ϕ от нагрузки; нижняя кривая соответствует остаточной площади касания при разгрузке. Как видим, график $S_\phi = \varphi(N)$ имеет слабо выраженный S-образный характер. Остаточная площадь практически остается неизменной и в ряде случаев растет линейно по мере увеличения нагрузки.

На рис. 3 приведены фотографии фактической площади контакта для приработанных поверхностей, слева — при возрастающей нагрузке,

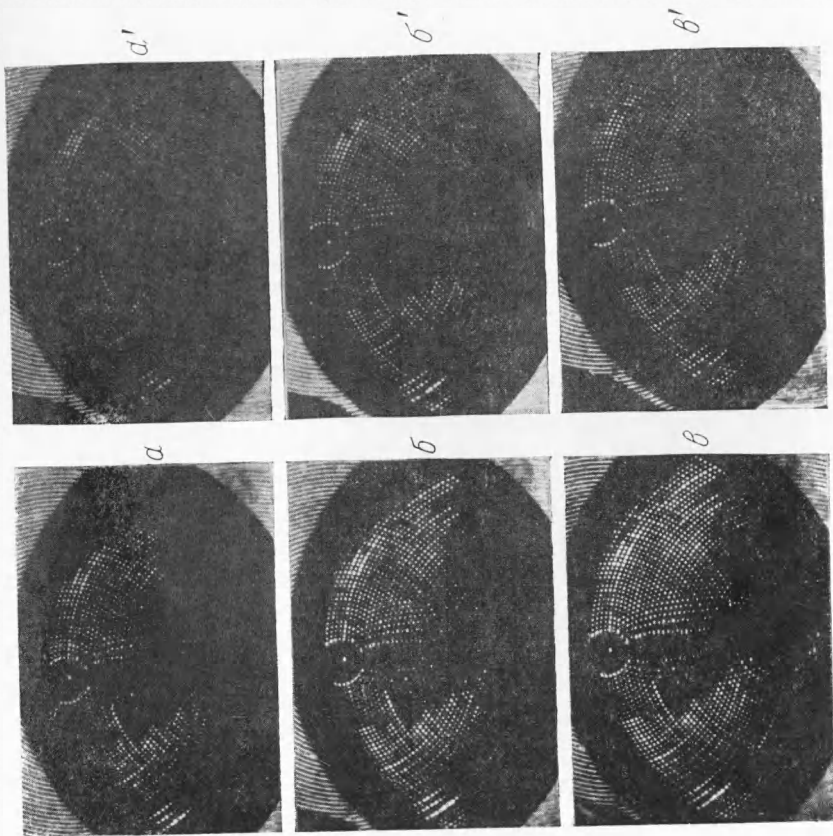


Рис. 1. Пятна контакта при последовательно возрастающей нагрузке для наклепанных поверхностей AgCl, обработанных на токарном станке. Центры сдвинуты на величину радиуса. Слева — удельное давление ($\text{кг}/\text{см}^2$) и число пятен касания: *a* — 9/724, *б* — 22/1154, *в* — 35/1578. Справа — те же поверхности при разгрузке (остаточная нагрузка 0,0034 $\text{кг}/\text{см}^2$). Число пятен касания: *a'* — 540, *б'* — 727, *в'* — 771

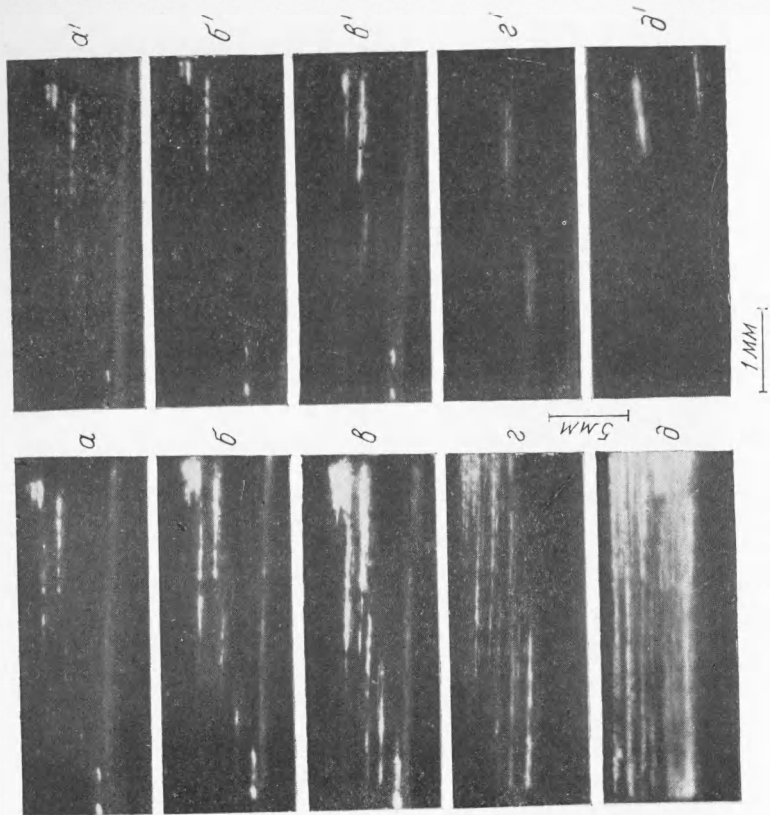


Рис. 3. Пятна контакта для приработанных поверхностей AgCl. Слева — при последовательно возрастающей нагрузке ($\text{кг}/\text{см}^2$): *a* — 6, *б* — 22, *в* — 42, *г* — 102, *д* — 460. Справа — те же поверхности при разгрузке (остаточная нагрузка 2 $\text{кг}/\text{см}^2$)

справа — при снятии нагрузки. Как видно из фотографии, при снятии нагрузки фактическая площадь контакта уменьшается почти до нуля.

Зависимость S_{ϕ} от нагрузки для полированных поверхностей аналогична зависимости для точеных поверхностей. Математическая обработка ряда графиков показала, что зависимость S_{ϕ} от нагрузки приближенно выражается следующей формулой: $S_{\phi} = kN^{0,6}$ *, где коэффициент пропорциональности k зависит от жесткости неровностей и шероховатости поверхности; он меньше для жестких и шероховатых поверхностей (°).

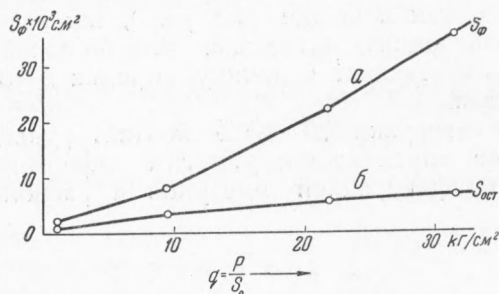


Рис. 2. Зависимость фактической площади контакта от нагрузки для точеных поверхностей. а — общая площадь касания, б — площадь касания при снятии нагрузки

Располагая данными о зависимости фактической площади контакта от нагрузки, легко вычислить среднее фактическое удельное давление $q_{\phi.c}$. По мере возрастания нагрузки это давление изменяется, причем в некоторых случаях при малых нагрузках наблюдается пере-

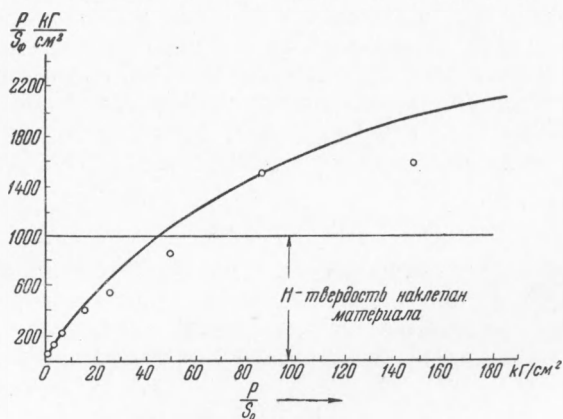


Рис. 4. Зависимость среднего фактического удельного давления на контакте от нагрузки. Горизонтальная прямая соответствует предположению о постоянстве напряжения на контакте, равном твердости

ход через минимум, т. е. возникают большие удельные давления за счет касания отдельных выступов. Характер функциональной зависимости $q_{\phi.c}$ от нагрузки N зависит от характера кривой опорной поверхности. На рис. 4 приведен типичный график зависимости от на-

* Ранее нами было показано, что при упругом контакте двух шероховатых поверхностей (°) $S_{\phi} = kN^{2/3}$. В данном случае имеет место упруго-пластический контакт, что должно приводить к снижению показателя степени.

грузки. Горизонтальная прямая соответствует предположению о постоянстве напряжения на контакте, равном твердости материала (¹⁻³).

Приведенные исследования показывают:

1. Возрастание площади контакта от нагрузки характеризуется в общем случае S-образным графиком. Ранее предполагалось, что эта зависимость линейна.

2. Среднее фактическое напряжение на контакте возрастает при увеличении нагрузки, асимптотически стремясь к некоторому пределу.

Величина предельного значения $q_{ф.с}$ в зависимости от конфигурации микроконтактов, как видно, не определяется твердостью и имеет различные значения, как меньшие (в 2 раза), так и большие (в 3—5 раз) твердости наклепанного материала. Для большей части испытанных образцов $q_{ф.с}$ составляет величину порядка 2—3 твердостей наклепанного материала.

3. При снятии нагрузки 30—70% контактирующих неровностей исчезает. Указанное обусловлено: упругим деформированием основного материала, конфигурацией выступов и расположением их на разной высоте.

Поступило
26 VI 1953

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ F. P. Bowden, D. Tabor, Proc. Roy. Soc., A 169, 391 (1939). ² R. Holm, Electrical Contacts, 1926. ³ G. Ernst, M. Merchant, Chip Formation, Friction and High Quality Machined Surfaces, 1941. ⁴ И. В. Крагельский, ЖТФ, 12, 11—12 (1942). ⁵ Е. М. Швецова, Трение и износ в машинах, сборн. 7, изд. АН СССР, 1953. ⁶ А. В. Степанов, ЖТФ, 19, в. 2 (1949). ⁷ F. P. Bowden, D. Tabor, Friction and Lubrication of Solids, 1950. ⁸ И. В. Крагельский, Изв. АН СССР, ОТН, № 10 (1948).