

## ИССЛЕДОВАНИЕ ФАКТИЧЕСКОЙ ПЛОЩАДИ КОНТАКТА ПОЛИМЕРОВ

*B. B. Лаврентьев*

С фактической или действительной площадью контакта непосредственно связаны явления адгезии и внешнего трения полимеров. Поэтому представляет интерес выяснить общие черты процесса формирования фактической площади контакта полимеров и установить зависимость ее от нормального давления, температуры и других параметров.

Реальные поверхности имеют определенную шероховатость и волнистость. В результате этого фактическая площадь контакта имеет дискретный характер, т. е. состоит из отдельных пятен касания. Размеры и количество пятен касания определяются как рельефом поверхности, так и внешними параметрами и главным образом нормальным давлением.

Изучение фактической площади контакта металлических поверхностей показывает [1], что фактическая площадь контакта составляет малую долю от номинальной, геометрической поверхности контакта. Формирование площади контакта для таких поверхностей происходит таким образом, что прирост площади фактического контакта обусловлен в основном увеличением числа пятен касания без заметного увеличения размеров самих пятен касания [1, 2].

Наши опыты, проводимые известным оптическим методом Мехау [1], показывают, что при контактировании твердых полимеров типа пластмасс рост площади контакта под нагрузкой происходит, как и для металлов, за счет роста числа пятен касания. Мягкие, высокоэластичные полимеры типа резин образуют фактическую площадь контакта не только ростом числа пятен касания, но и увеличением размеров самих пятен касания. При этом их число резко возрастает в области малых нормальных давлений  $P$ , когда  $P/E < 1$ , где  $E$  — модуль упругости материала.

В области больших  $P$ , когда  $P/E > 1$ , происходит главным образом увеличение размеров образовавшихся пятен касания. Хотя метод Мехау и дает несколько завышенные значения площади фактического контакта, по сравнению с молекулярной площадью контакта, даже при больших давлениях невозможно достичь полного контакта. Площадь фактического контакта  $S$ , таким образом, не стремится к площади номинального контакта  $S_n$ , т. е.  $S \neq S_n$  при  $P \rightarrow \infty$ . Это обстоятельство связано в первую очередь с воздушными пузырьками, заключенными между пятнами касания и находящимися в наиболее глубоких бороздках и порах на поверхности образца.

Известно, что механические свойства полимеров определяются временем и температурным факторами [3], а так как формирование площади контакта определяется в основном механическими свойствами материала, то она должна зависеть от времени и температуры при прочих равных условиях. Типичная кривая изменения фактической площади контакта резины от времени контакта при постоянном нормальном давлении приведена на рис. 1. В первый момент времени происходит резкое увеличение площади фактического контакта  $\phi = S/S_n$ , которое продолжается, правда более медленно, с дальнейшим ростом времени контакта. Аналогичные

зависимости наблюдаются и для других полимеров. Следует отметить, что в зоне контакта протекает не только процесс релаксации напряжения на пятнах касания, но он сопровождается также деформацией отдельных шероховатостей, образующих пятна касания. В первом приближении можно считать, что процесс роста площади контакта происходит таким образом, что при постоянном нормальном давлении удельное давление или на-

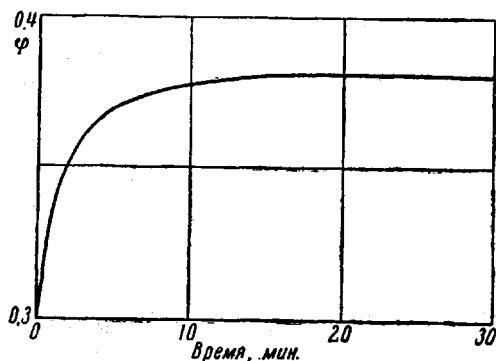


Рис. 1

Рис. 1. Копия записи изменения фактической площади контакта от времени  $t$ . Резина 2006 при  $P = 2 \text{ кг}/\text{см}^2$

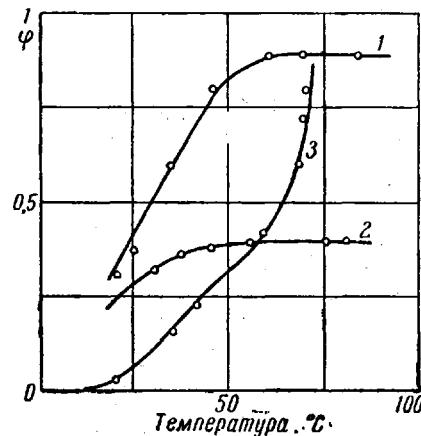


Рис. 2

Рис. 2. Зависимость фактической площади контакта от температуры  $T^\circ \text{C}$ : 1 — резина 2006 с модулем упругости  $E = 35 \text{ кг}/\text{см}^2$ ; 2 — резина 2011,  $E = 60 \text{ кг}/\text{см}^2$ ; 3 — полиэтилен низкого давления. Нормальное давление  $P = 2 \text{ кг}/\text{см}^2$

напряжение сжатия на одно пятно касания остается постоянным, шероховатости же деформируются (сминаются). Процесс происходит до тех пор, пока не установится некоторое равновесное состояние, при котором площадь контакта в дальнейшем меняться не будет, а напряжение на каждом пятне касания примет некоторое постоянное значение. Дальнейшее увеличение нагрузки приведет к дальнейшему рассасыванию напряжения в зоне контакта и росту деформаций шероховатостей в зоне контакта. В этом смысле имеется определенная аналогия со взглядами Буудена и Тейбора [4] на процесс пластического деформирования металлов в зоне контакта, обладающих определенным пределом текучести.

Зависимость фактической площади контакта от температуры приведена на рис. 2. Фактическая площадь контакта резин увеличивается при постоянном давлении с ростом температуры экспоненциально, подобно изменению с временем контакта (кривые 1 и 2). Линейные полимеры типа полиэтилена (кривая 3) в некоторой области температур 60—80° резко увеличивают площадь контакта, что связано с интенсивным процессом ползучести материала.

Известно [5], что сила трения, которая пропорциональна площади фактического контакта, падает с ростом температуры, площадь же фактического контакта, исходя из наших опытов, растет с ростом температуры. Следовательно, можно сделать вывод, что кинетическая сила трения в первую очередь определяется подвижностью молекул полимера. Эти выводы согласуются с теорией [6].

Начальная или «статическая» сила трения растет с ростом времени контакта [7]. Поэтому начальная сила трения, особенно при длительных временах контакта, определяется главным образом площадью фактического контакта, которая с ростом времени (рис. 1) растет.

Применявшийся нами оптический метод Мехау позволяет изучать изменение фактической площади контакта как в состоянии покоя, так и при

движении образца. Проведенные опыты показывают, что фактическая площадь контакта не меняется при переходе образца от покоя к движению при трении полимеров по стеклу (скорости скольжения до 0,1 м.м./сек).

Ранее [8] была предложена зависимость фактической площади контакта при упругом контактировании материалов, согласно которой зависи-

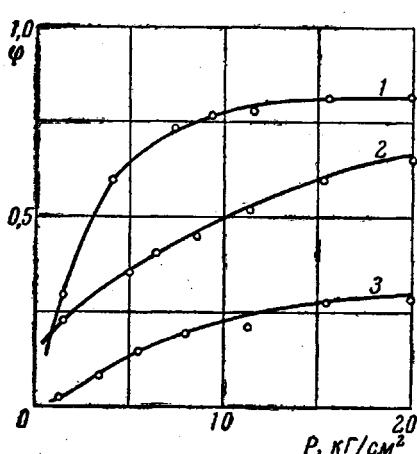


Рис. 3. Зависимость фактической площади контакта от нормального давления  $P$ :

1 — резина 2006; 2 — резина 2011; 3 — полиэтилен низкого давления

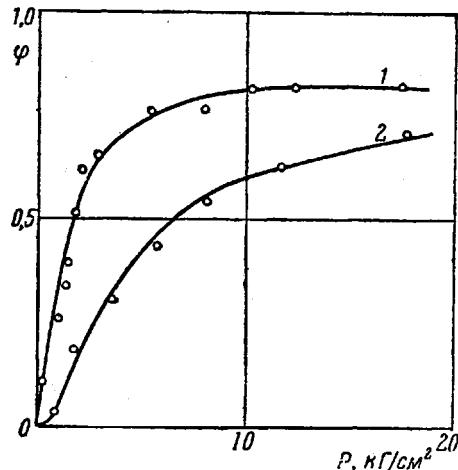


Рис. 4. Зависимость фактической площади контакта от нормального давления для резины из СКН-18:

1 — высота образца  $h = 1,5$  м.м.; 2 —  $h = 4,5$  м.м.

Диаметр образца 8 м.м.

мость площади фактического контакта от нормального давления выражается формулой:

$$\varphi = 1 - (1 - \varphi_0) \cdot \exp \left( -\frac{\beta}{E} P \right), \quad (1)$$

где  $\varphi = S/S_n$ ,  $S_n$  — номинальная площадь контакта,  $\varphi_0 = S/S_0$ ,  $S_0$  — площадь контакта при  $P = 0$ ,  $\beta$  — коэффициент шероховатости и  $E$  — модуль упругости полимера. Согласно формуле (1) площадь контакта растет с ростом нормального давления  $P$  экспоненциально. Удельная сила трения  $f = F/S_n$  пропорциональна площади фактического контакта  $f = c\varphi$ .

Предложенная формула (1) дает хорошее согласие с опытом [9] в области малых (закон Кулона) и больших (формула Тириона) нормальных давлений при трении резин. Интересно было проверить ее прямыми опытами по определению  $\varphi$ , как функции нормального давления. Результаты опытов приведены на рис. 3. Видно, что экспериментальная кривая аналогична теоретической зависимости. Однако предельные значения площади фактического контакта всегда меньше номинальной площади контакта и зависят от природы полимера (модуля упругости, температуры и т. д.). Для полимеров с малыми модулями упругости площадь фактического контакта достигает своего предельного значения при меньших значениях нормальных давлений.

Определение зависимости  $\varphi = \varphi(P)$  для различных образцов резины показало, что фактическая площадь контакта резин сильно зависит от геометрии образцов. На рис. 4 приведена зависимость  $\varphi$  от  $P$  при изменении высоты образца  $h$ , из которого видно, что изменение высоты образца от 1,5 до 4,5 м.м. привело к значительному изменению фактической площади контакта при постоянном нормальном давлении. При исследовании внешнего трения это обстоятельство не учитывается, хотя оно имеет боль-

шое значение. Исследования зависимости фактической площади контакта от нормального давления, проведенные на других полимерах, показывают, что площадь фактического контакта зависит также и от номинальной площади контакта образца.

### Выводы

1. Формирование фактической площади контакта полимеров определяется механическими свойствами и зависит от времени контакта и температуры, с ростом которых площадь фактического контакта увеличивается.

2. Фактическая площадь контакта резин зависит от нормального давления по экспоненте, что согласуется с теорией.

3. Фактическая площадь контакта зависит при постоянном давлении от геометрии образца (масштабный фактор).

Московский государственный педагогический  
институт им. В. И. Ленина

Поступила в редакцию  
4 V 1961

### ЛИТЕРАТУРА

1. И. В. Крагельский, Трение и износ, Машгиз, 1962.
2. Н. Б. Демкин, Труды ИМАШ АН СССР, 1, 5, 1959.
3. Т. Алфрей, Механические свойства полимеров, Изд. ин. лит., 1956.
4. F. Bowden, D. Tabor, Friction and Lubrication of Solids, Oxford, 1950.
5. Г. М. Бартенев, Труды III Всесоюзной конференции по трению и износу в машинах, 2, 7, 1960.
6. Г. М. Бартенев, Докл. АН СССР, 96, 1161, 1954.
7. В. В. Лаврентьев, Докл. АН СССР, 115, 717, 1957.
8. Г. М. Бартенев, В. В. Лаврентьев, Докл. АН СССР, 141, 334, 1961.
9. Г. М. Бартенев, В. В. Лаврентьев, Wear, 4, 154, 1961.

### INVESTIGATION OF THE TRUE CONTACT AREA OF POLYMERS

*V. V. Lavrentev*

#### Summary

Mechau's optical method has been employed to measure the true contact area between polymers and smooth solid surfaces in order to investigate the contacting process. The method is based on the violation of the total internal reflection of a light ray passing through a prism, the lower face of which is in contact with the polymer specimen. It has been experimentally shown that the true area of contact increases with increase in temperature and time of contact. The earlier derived equation correlating the true contact area with the normal pressure has here received experimental backing. The true contact area measured at low shearing rates (up to 1 mm/sec.) is almost identical with that for shearing rates equal to zero. The area of true contact at constant pressure greatly depends upon the size of the specimen.