ИССЛЕДОВАНИЕ НОРМАЛЬНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ ПРИ УПРУГОПЛАСТИЧЕСКОМ КОНТАКТНОМ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ

А.А. Максименко, Н.В. Котенева, А.Д. Перфильева

Рассматриваются условия, при которых в контакте твердых тел возникают упругопластические деформации. Предложены зависимости, по которым можно установить диапазон внедрений как для контакта сферы с плоской поверхностью, так и для контакта поверхностей.

Authors have studied the conditions, when resilient-plastic deformation origins in contacts of solid. Dependence, which helps to determine introduction range for contact of sphere with plane surface and for contact of surface, is offered.

Триботехнические характеристики твердых тел при контактном взаимодействии существенно зависят от напряжений, возникающих в зонах их фактического контакта. В этих зонах в зависимости от нагрузок, параметров шероховатости поверхности и механических свойств поверхностных слоев могут иметь место упругие, упругопластические и пластические деформации [1].

Несмотря на то, что упругопластические деформации на реальных контактах широко распространены, они все еще не достаточно исследованы из-за трудностей физического и математического характера. Математические трудности возникают при изучении процесса взаимодействия тел даже простой формы. Эти трудности заставляют обращаться к различным упрощениям, позволяющим реализовать решение выдвигаемых задач.

Положение о дискретном характере контакта является общепризнанным. В силу того, что в контактной механике весьма распространено моделирование вершин микровыступов элементами сфер одинакового радиуса, исследования на модели единичного выступа чрезвычайно важны.

В работе [2] показано, что, как и при статическом нагружении, так и динамическом зависимость деформаций от нагрузки, в определенных пределах нагрузок, носит слабо-нелинейный характер. Нижний предел напряжения, при котором начинает проявляться нелинейность, близок к пределу текучести материала. Верхним пределом является контактная пластическая твердость H, параметр, который по своему физическому смыслу не является условным давлением в контакте (как, например, твердость НВ). Переход от твердости как понятия, тождественного условному контактному напряжению, к контактной пластической твердости H позволяет рассматривать эту величину как характеристику сопротивления материала контактной пластической деформации. Поэтому будем полагать, что пластическое течение будет происходить в точке контакта, где максимальные напряжения достигают уровня пластической твердости:

$$\sigma_{\max} = H = C\sigma_m \quad (1)$$

где σ_m – предел текучести; C – так называемый коэффициент стеснения, который для металлов равен 2,8 ÷ 3,2 [3]. В работе [4] А.Ю. Ишлинский используя гипотезу о том, что поля линий скольжения для решения осесимметричных задач подобны полям, использованным в плоской задаче, графическим методом рассчитал поле линий скольжения вокруг сферического индентора и получил значение коэффициента стеснения равным 2,84. Это значение укладывается в пределы, установленные в работе [3], а также подтверждено исследованиями других авторов.

При взаимодействии сферы с полупространством под действием нормально приложенной к плоскости контакта статической силы образуется контактная площадка, по которой сила распределяется в виде давления по соответствующему закону. Согласно решению Герца при контактировании сферы с упругим полупространством образуется контактная площадка радиусом

$$a = \left(\frac{3P\left(1-\mu^2\right)R}{4E} \right)^{1/3}, \quad (2)$$

где P – нормальная нагрузка на контакт; R – радиус сферы; E, μ – модуль упругости и коэффициент Пуассона соответственно.

В центре контакта возникают максимальное давление

$$\sigma_{\max} = \frac{3P}{2\pi a^2} \qquad (3)$$

и контактное сближение

$$\delta_1 = \frac{a^2}{R}. \qquad (4)$$

Совмещая формулы (2 – 4) можно показать, что максимальные нормальные напряжения на контакте будут равны

$$\sigma_{\max} = \frac{0{,}44 E\,\delta_1^{\frac{1}{2}}}{\left(1-\mu^2\right)R^{\frac{1}{2}}}. \qquad (5)$$

Учитывая вышеизложенное предположение, что первые пластические деформации в контакте появляются, когда максимальные нормальные напряжения достигнут предела текучести из выражений (3 - 5) нетрудно показать, что величина внедрения, при которой в зоне контакта будут возникать пластические деформации, имеет вид

$$\frac{\delta_1}{R} = \frac{5{,}17\left(1-\mu^2\right)^2 \sigma_m^2}{E^2}. \qquad (6)$$

Однако зарождение максимальных пластических деформаций в контакте еще не говорит об их распространении на всю поверхностную зону, подверженную контактным напряжениям. Для развитого пластического контакта требуются нагрузки, значительно превышающие те, которые вызывают зарождение пластической деформации.

С появлением в контакте местного пластического смещения упругое сближение продолжает, как известно, подчинятся зависимостям теории упругости, однако очевидно, что при этом обычные «упругие» формулы должны быть скорректированы в соответствии с новыми условиями контакта. К этим условиям относится наличие местной упругопластической деформации.

В соответствии с вышесказанным выражение для вычисления сближения имеет вид [5]:

$$\delta_2 = \frac{\delta_1}{\Omega}, \qquad (7)$$

где $\Omega = \left(1+2\delta_{пл}/\delta_2\right)^{1/3}$ – поправка к формуле Герца, учитывающая влияние пластического сжатия сферы в зоне контакта на величину упругого сближения; δ_1 – сближение тел при наличии только упругой деформацией, определяемое формулой (4); $\delta_{пл} = \dfrac{P}{2\pi RH}$ – остаточное сближение в контакте.

Решая совместно уравнения (1), (3), (4) и (7) получим выражение для полного сближения в упругопластическом контакте сферы с контртелом

$$\delta_2 = K^{\frac{3}{2}}\left(P\pi RH\right)^{\frac{1}{2}}, \qquad (8)$$

где $K^{\frac{3}{2}} = \dfrac{2\left(1-\mu^2\right)}{E\,R^{\frac{1}{2}}}$.

В работе [3] показано, что величина радиуса отпечатка в области развитой пластичности составляет $a = 0{,}375R$. Учитывая это соотношение и решая совместно уравнения (3) и (8) покажем, что величина внедрения, при которой в зоне контакта будет возникать развитая пластичность, имеет вид

$$\frac{\delta_2}{R} = \frac{1{,}91\left(1-\mu^2\right)H}{E}. \qquad (9)$$

В диапазоне внедрений

$$\frac{5{,}17\left(1-\mu^2\right)^2 \sigma_m^2}{E^2} \le \frac{\delta}{R} < \frac{1{,}91\left(1-\mu^2\right)H}{E} \qquad (10)$$

в зоне контакта сферы с плоским образцом имеют место упругопластические деформации.

Таким образом, если сближения сферы с плоским образцом будут находиться в диапазоне значений, определенных неравенством (10), то на одной части контактной зоны будут наблюдаться упругие сближения, а на другой пластические. Из физических соображений можно заключить, что развитая пластичность будет иметь место на участках контактной зоны, в которых нормальное напряжение достигло значения пластической твердости H. Поэтому границей перехода упругого сближения в упругопластическое будет геометрическое место точек контакта, в которых нормальные напряжения равны пластической твердости. При увеличении сближения пластическая зона будет увеличиваться, а упругая – уменьшаться.

При переходе к исследованию контактного взаимодействия двух поверхностей необходимо учесть, что реальные поверхности твердых тел не являются идеально гладкими. Как уже отмечалось, наиболее широко используемой моделью шероховатой поверхности твердого тела является сферическая модель.

Рассмотрим модель контактной пары, когда одно твердое тело более мягкое имеет шероховатую поверхность, а другое жесткое и имеет абсолютно ровную поверхность.

В работе [1] показано, что упругий ненасыщенный контакт реализуется при контурном напряжении

$$p_c = \frac{0{,}21\nu(\nu-1)k_y\, b\, E\, \varepsilon^{\frac{2\nu+1}{2}}}{(1-\mu^2)R^{1/2}}, \qquad (11)$$

где k_y – коэффициент, зависящий от ν [5]; b, ν – параметры кривой опорной шероховатой поверхности; R_{max} – наибольшая высота неровностей профиля; R – адиус микронеровности; $\varepsilon = \frac{h_1}{R_{\max}}$ – относительное сближение между контактирующими поверхностями; h_1 – сближении между поверхностями контактирующих тел в соответствии с теорией Герца.

Контурное напряжение, вычисляемое по формуле (11), соответствует условию, когда в зонах касания микронеровностей появляются пластические деформации. Взаимодействие твердых тел при этом будет осуществляться в условиях упругопластических сближений, когда в одних зонах контакта микронеровности будут иметь упругие, а в других - пластические деформации. Приближенно можно считать, что пластические деформации возникают в тех точках, где нормальные напряжения на контакте равны пределу текучести. Граница между этими сближениями может быть получена из выражений (1) и (11)

$$\frac{h_1}{R_{\max}} = \left[\frac{\sigma_m (1-\mu^2) R^{1/2}}{0{,}21\nu(\nu-1)k_y\, b\, E\, R_{\max}^{1/2}}\right]^{\frac{2}{2\nu+1}}. \qquad (12)$$

Так как развитая пластичность в зонах фактического касания микронеровностей имеет место при напряжениях равных пластической твердости, то пластические деформации будут возникать при сближениях между поверхностями контактирующих тел

$$\frac{h_2}{R_{\max}} = \left[\frac{\sigma_m}{b\,H}\right]^{\frac{1}{\nu}} \frac{1}{k_y^{1/(\nu-1)}}. \qquad (12)$$

Таким образом, в диапазоне внедрений

$$\frac{h_1}{R_{\max}} \le \frac{h}{R_{\max}} < \frac{h_2}{R_{\max}} \qquad (13)$$

в зоне контакта твердых тел, одно из которых шероховатое, а другое гладкое неподвижное имеют место упругопластические деформации.

Из равенств (1), (5) и (11) следует, что в области упругого контакта зависимость между нормальными напряжениями на контакте и сближением является степенной функцией, а в области развитой пластичности – это прямая, проходящая параллельно оси ординат. Учитывая, что переход от упругих деформаций к пластическим должен происходить плавно и непрерывно, вполне допустимо в первом приближении предположить, что при упругопластическом взаимодействии нормальные напряжения могут быть выражены в зависимости от величины сближения в виде степенной функции.

После несложных преобразований получим выражение, связывающее нормальные напряжения на контакте и сближения в области упругопластического взаимодействия:

– для контакта сферы с гладкой поверхностью неподвижного образца

$$\sigma = 1{,}68\sqrt{\frac{\delta^3}{I^2 R^3}},$$

где $I = (1-\mu^2)/E$ - упругая постоянная материала более мягкого из контактирующих тел; δ – статическое сближение сферы с поверхностью за пределом упругости.

– для контакта шероховатого и гладкого твердых тел

$$\sigma = \frac{bHk_y^{\nu/(\nu-1)} h^{\nu}}{R_{\max}^{\nu}},$$

где h – статическое сближение твердых тел за пределом упругости.

ЛИТЕРАТУРА

1. Крагельский, И. В. Основы расчетов на трение и износ / И.В. Крагельский, М.Н. Добычин, В.С. Комбалов.– М.: Машиностроение, 1977.–526с.
2. Дрозд, М. С. Определение механических свойств металла без разрушения / М.С. Дрозд. – М.: Металлургия, 1965. – 171 с.
3. Булычев, С. И. О корреляции диаграмм вдавливания и растяжения / С.И. Булычев // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2001. – Т.67. – №11. – С. 33-41.
4. Ишлинский, А. Ю. Математическая теория пластичности / А.Ю. Ишлинский, Д.Д. Ивлев, рукопись, 2000.
5. Дрозд М.С. Инженерные расчеты упругопластической контактной деформации / М.С. Дрозд, М.М. Матлин, Ю.И. Сидякин. – М., 1986. 224 с.