

ДИНАМИКА ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ТВЕРДЫХ ТЕЛ ПРИ НАЛИЧИИ МЕСТНОЙ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ В ЗОНЕ КОНТАКТА

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

Рассматривается физическая и математическая модель внедрения жесткой гладкой сферы в однородное упруго-пластичное упрочняемое твердое тело при воздействии динамических нагрузок в нормальном направлении.

Ключевые слова: контактная прочность, нагружение, нагрузка.

Введение

Исследование контактирования деталей машин и элементов конструкций является неотъемлемой частью проблем прочности и динамики машин, приборов и аппаратуры. Работа машин и механизмов в условиях больших нагрузок, скоростей и вибраций, при использовании новых материалов в значительной степени зависят от процессов протекающих в контакте элементов конструкций. В связи с этим обеспечение контактной прочности деталей и узлов машин имеет первостепенное значение для повышения их долговечности, снижения металлоемкости и для достижения высокой надежности работы машин.

Цель работы

Проблеме контактной прочности посвящено множество публикаций ученых, широко изучены вопросы, связанные с рассмотрением поведения контакта как в условиях статического, так и динамического нагружения. Причем контактирование, как правило, носит упругий характер. Между тем на практике, в большинстве случаев, имеет место упруго-пластический и пластический контакт. В связи с чем, исследование контактных задач упруго-пластичности и было выбрано главным объектом исследования в данной работе.

Методы исследования

Предложенный метод расчета контактных деформаций неупругих, гладких тел органично сочетается с подходом применения классических контактных задач теории упругости. В работе рассматривается физическая и математическая модель внедрения жесткой гладкой сферы в однородное упруго-пластичное упрочняемое твердое тело при воздействии динамических нагрузок в нормальном направлении.

Наиболее прогрессивным методом оценки контактной прочности является расчет

допускаемых нагрузок и коэффициентов запаса прочности по величинам предельных напряжений и предельных усилий деформирования. Предельные нагрузки соответствуют моменту возникновения пластической деформации в каком-либо из контактирующих тел.

При нормальном нагружении сферического сегмента поверхность штампа деформируется упругопластически. Область упругопластического деформирования состоит из двух зон: упругой зоны и зоны неразвитой пластичности. Вклад упругой деформации при упруго-пластическом контакте зависит от величины деформации в контакте: при малых величинах - вклад упругой деформации преобладает, а при значительной по величине пластической деформации - вклад упругой деформации исчезает.

При динамическом нагружении будет наблюдаться дополнительное сближение. Исследования показали, что три-пять циклов нагружения дают дополнительное увеличение сближения на 25% и при дальнейших нагружениях наступает приспособляемость пластического контакта. При нормальном нагружении пластически деформирующегося слоя возникает зона упрочнения материала, что изменяет его механические свойства. Установить дополнительное сближение сферического сегмента предполагается с помощью так называемых переменных параметров упругости. В качестве первого приближения в алгоритме расчета принимается упругое решение контактной задачи Герца. При таком предположении параметры упругости, в системе дифференциальных уравнений движения, будут зависеть только от приложенных сил. Критерием окончания расчета является установление величины максимального контактного давления, превышение которого приводит к состоянию локальной пластичности. Проведенные расчеты показали, что предлагаемый алгоритм дает надежный спо-

ДИНАМИКА ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ТВЕРДЫХ ТЕЛ ПРИ НАЛИЧИИ МЕСТНОЙ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ В ЗОНЕ КОНТАКТА

соб численного решения задач контактного взаимодействия динамически деформируемых тел.

Рассмотрим контакт жесткого сферического тела с гладкой плоской поверхностью упругопластического контртела деформирующегося с упрочнением. Последнее, в начале нагружения, испытывает упругую деформацию. На этой стадии напряжения, деформации, а также перемещения материальных элементов контртела в зоне контакта описываются решением Герца. Причем их сближение δ_0 является степенной функцией

контактной нагрузки P , т.е. $\delta_0 = k P^{\frac{2}{3}}$ [1]. Данная зависимость соответствует отрезку ОА диаграммы $P-\delta$ (рисунок 1, а). С возрастанием контактной нагрузки P в точке А впервые возникает пластическая деформация, которая затем постепенно распространяется в глубину контртела. При некоторой величине нагрузки на поверхности контртела зависи-

мость Герца нарушается (участок АВ, рисунок 1, а). После снятия нагрузки происходит упругое восстановление материала контртела, а общее сближение уменьшается на величину δ_y контртела и становится равной $\delta_{пл}$ (рисунок 1, б).

С появлением на поверхности контакта остаточной вмятины упругие деформации продолжают, как известно, подчиняться зависимостям теории упругости; однако, очевидно, что при этом обычные «упругие» формулы должны быть скорректированы в соответствии с новыми условиями контакта [2]. Принципиальное отличие этих условий, от условий чисто упругого контакта тел состоит в том, что при наличии остаточной вмятины сфера радиусом R находится в контакте не в точке, а с поверхностью остаточной вмятины, радиус кривизны которой равен R_1 (рисунок 1, б).

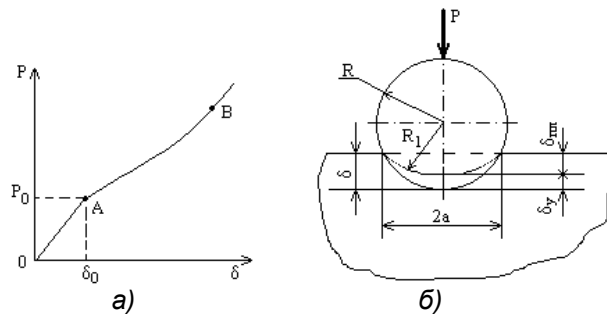


Рисунок 1 - Сближение в контакте в зависимости от контактной нагрузки (а) и схема контактного внедрения сферы в плоскую границу упругопластического контртела (б)

Учитывая вышесказанное, полное сближение в упругопластическом контакте сферы с контртелом состоит из двух слагаемых, остаточного сближения $\delta_{пл}$, равного глубине остаточного отпечатка, и упругого сближения δ_y , исчезающего со снятием нагрузки вследствие упругого восстановления контртела [3]

$$\delta = \delta_y + \delta_{пл} = \beta (\gamma P)^{\frac{1}{2}} + \alpha P,$$

где $\alpha = \frac{1}{2\pi RH}$; $\beta = k^{\frac{3}{2}}$; $\gamma = \pi RH$; $k = 2 \frac{(1-\mu^2)}{E}$ – упругая постоянная, E, μ – нормальный модуль упругости и коэффициент Пуассона соответственно; P – текущая нагрузка; H – предельная твердость, которая связана с пределом текучести соотношением $H = C_1 \sigma_m$; C_1 – коэффициент стеснения, характери-

зующий величину упрочнения материала [4], σ_m – предел текучести контртела.

Приведенные выше формулы позволяют рассчитать полное сближение в упругопластическом контакте при статическом нагружении. В ряде случаев контактирование твердых тел происходит при динамическом нагружении. При упругопластическом контактировании материалов в условиях динамического нагружения появляется дополнительное сближение, что может привести к изменению механических свойств поверхности. Анализ напряженного состояния материала при динамическом упругопластическом внедрении в него жестких инденторов представляет собой очень сложную задачу, и исследования в этом направлении еще продолжаются. Отсутствие общих методов построения тонких решений нелинейных задач динамики

приводит к необходимости разработки эффективных приближенных численно-аналитических методов.

Во многих механических системах движение описывается нелинейными дифференциальными уравнениями. Рассматриваемая в работе модель контактного взаимодействия является нелинейной, поэтому дифференциальное уравнение движения в условиях свободных колебаний имеет вид:

$$m\ddot{x} + P(x) = 0,$$

где $x = \delta$, а P - текущее значение динамической нагрузки в течении периода $0 \leq t \leq t^*$: при этом $0 \leq x \leq x_{\max}$. С учетом сказанного дифференциальное уравнение движения жесткой, гладкой сферы по упругопластическому полупространству при динамическом нагружении будет иметь вид:

$$m\ddot{x} + a_1 \sqrt{x} + a_2 x = 0,$$

где $a_1 = -\frac{\beta \gamma^{\frac{1}{2}}}{\alpha^{\frac{3}{2}}}$; $a_2 = \frac{1}{\alpha}$.

Считая, что в начальный момент нагружения $\frac{dx}{dt} = v_0$, после первого интегрирования можно найти скорость сближения в виде

$$\frac{dx}{dt} = \sqrt{v_0^2 - \left(\frac{4a_1 x^{\frac{3}{2}}}{3m} + \frac{a_2 x^2}{m} \right)}. \quad (1)$$

Наибольшего значения величина сближения достигается в тот момент, когда $\frac{dx}{dt} = 0$.

Решая уравнения (2) можно рассчитать величину динамического сближения, максимальную силу удара и максимальное давление в центре контакта. Для вычисления продолжительности удара производится разделение переменных в уравнении (1), а затем интегрирование от начала динамического нагружения до момента максимального сближения:

$$t = \pm \int_0^{x_{\max}} \frac{dx}{\sqrt{v_0^2 - \left(\frac{4a_1 x^{\frac{3}{2}}}{3m} + \frac{a_2 x^2}{m} \right)}}.$$

Решая данную зависимость и аппроксимируя полученное решение можно построить зависимости $x(t)$ и $P(t)$ в любой момент времени процесса нагружения.

Выводы

В заключение следует отметить, что данный численно-аналитический метод дает возможность рассчитать параметры контактной жесткости и прочности как в условиях статического, так и в условиях динамического нагружения. Использование этого алгоритма расчета позволит дать оценку влияния упругопластических деформаций на контактную прочность при взаимодействии жесткого гладкого шара с гладким упругопластическим полупространством. Однако предлагаемый численно-аналитический метод расчета может быть использован и для расчета упругопластического контактного взаимодействия шероховатых тел. Для этого в формуле (1) необходимо учесть параметры микрогеометрии контактирующих тел.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тимошенко С.П., Гудьер Дж. Теория упругости. – М.: Наука, 1975. – 567 с.
2. Дрозд М.С., Матлин М.М., Сидягин Ю.И. Инженерные расчеты упругопластической контактной деформации. – М.: Машиностроение, 1986. – 220 с.
3. Котенева, Н.В. Упругопластический контакт гладкой сферы с плоской поверхностью при динамическом нагружении // Изв.ТПУ.-2005.-Т.308.- № 2.-С.114-116.
4. Булычев С.И., Алехин В.П. Испытание материалов непрерывным вдавливанием. – М.: Машиностроение, 1990. – 280 с.

Котенева Н.В., Максименко А.А., д.т.н., проф., тел. (3852) 36-75-94, Перфильева Н.В.