

ОПТИМИЗАЦИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ УСЛОВНО-НЕПОДВИЖНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

Перфильева А.Д. - студент
Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова
(г. Барнаул)
ООО «СуперСплав»

В рыночной экономике основополагающим фактором развития той или иной отрасли является конкурентоспособность выпускаемых механизмов и машин. Однако в условиях глобального кризиса важным становится вопрос о надежности уже имеющихся конструкций, о поиске оптимальных сочетаний характеристик известных соединений. А все это напрямую зависит от контактной жесткости и прочности сочленений машин, что особенно актуально при их работе в условиях различного сочетания динамических нагрузок.

Жесткость машин характеризуется собственной жесткостью деталей и контактной, определяемой деформациями в местах сопряжения деталей. Контактные перемещения составляют значительную часть от общих перемещений, до 80 %. Кроме того, контактные перемещения значительно изменяют частоты собственных и вынужденных колебаний сопрягаемых деталей машин, смягчают ударные нагрузки и оказывают существенное демпфирующее значение. Поэтому вопросы, связанные с контактным взаимодействием деталей, прежде всего, динамической контактной жесткостью и диссипацией энергии, являются весьма актуальными особенно для точного приборостроения и прецизионного машиностроения и определяют долговечность эксплуатации механизма.

Практически не проводились исследования механического контакта применительно к стыкам и соединениям, испытывающим сложное динамическое воздействие внешних нагрузок. И как следствие, отсутствуют физико-математические модели и расчетные методики, с помощью которых можно было бы определить амплитуды и частоты колебаний контактирующих тел в различных направлениях. Поэтому без дальнейшего развития динамической теории контактного взаимодействия в пределах трения покоя невозможно создание точных, устойчивых, работоспособных условно-неподвижных соединений с заданными прочностными, диссипативными и динамическими характеристиками.

Отсутствие концептуального универсального подхода при решении этих проблем ставит задачу создания физической и математической модели упругого контактного взаимодействия, которая позволила бы оценивать влияние параметров контактирования на поведение сочленений при воздействии ударных, осциллирующих и других видах динамических нагрузок.

Одна из задач данной работы заключается в построении концептуальной динамической модели упругого механического диссипативного контакта и на ее основе оптимизации динамических параметров условно-неподвижных соединений. Выступы шероховатых слоев контактирующих поверхностей моделировались сферами. За основу было принято решение Р. Миндлина. Им рассмотрена задача о контакте упругих сфер одинакового радиуса, прижатых друг к другу силой M . Распределение нормальных напряжений σ по площадке соприкосновения (кругу радиусом a) принимается соответствующим закону Герца.

Для оценки нормальных смещений в упругом диссипативном контакте в работе использовалось решение А.А. Ланкова для случая контакта шероховатой сферы и плоскости.

Для случая контакта шероховатой и гладкой поверхностей принято уравнение Крагельского – Демкина.

При построении концептуальной динамической модели упругого контактного взаимодействия нормального и тангенциального направлений в пределах трения покоя были приняты следующие допущения, которые относятся к контакту сфер и поверхностей:

1. Шероховатость моделируется сегментами эллипсоидов с одинаковыми радиусами главных кривизн, вершины которых распределены согласно детерминированной кривой опорной поверхности.

2. Ввиду того, что деформации в зоне контакта превышают на порядок общие деформации тел, последними можно пренебречь.

ОПТИМИЗАЦИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ УСЛОВНО-НЕПОДВИЖНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

3. Массой выступов шероховатого слоя можно пренебречь, ввиду их малости, по сравнению с массой контактирующих тел.

4. Все касательные силы считаются лежащими в плоскости контактирования.

5. Диссипация энергии на площадках контакта представляется микротрением в зонах проскальзывания – в касательном направлении и за счет явления «всплывания» – в нормальном направлении.

6. Характерные времена протекания процессов деформирования на площадках контакта много больше периодов собственно колебаний твердых тел.

7. Диссипация энергии и трение в зонах проскальзывания не зависят от частоты нагружения и скорости деформирования.

Дифференциальное уравнение подвижного тела контактной пары в условиях нормальных вынужденных колебаний имело вид:

$$m\ddot{x} + \bar{K}_1\ddot{x} + \bar{K}_2\dot{x}^2 + \bar{K}_3x^3 = P\sin\omega t, \quad (1)$$

где m – масса штампа (для контакта сфер – масса штампа с запрессованными в него сферами); коэффициенты K_1, K_2, K_3 , характеризующие силы восстановления и диссипации.

Данная механическая система является нелинейной и обладает значительной диссипацией энергии, поэтому уравнение движения интегрировалось при помощи степенных рядов. Восстанавливающая сила представлена в виде кусочно-нелинейных функций с разложением в окрестностях точек статического равновесия (задача Коши). Начальными условиями каждого последующего этапа были конечные условия предыдущего.

Дифференциальное уравнение подвижного тела контактной пары в тангенциальном направлении имело вид:

$$m\ddot{\Delta} + \bar{\Phi}(\Delta) = P\sin\alpha t, \quad (2)$$

где m – масса штампа (для контакта сфер – масса штампа с запрессованными в него сферами), $\bar{\Phi}(\Delta)$ – нелинейная функция, характеризующая восстанавливающую силу и диссипацию энергии одного периода. Функция записывается в виде кусочно-нелинейных функций, выраженных полиномами Тейлора, P – амплитудное значение внешней вынуждающей нагрузки, ω и t – циклическая частота и время процесса. Знаки « \rightarrow » и « \leftarrow » относились к активному и пассивному процессу деформирования соответственно. Согласно принятым допущениям о трении в зонах проскальзывания, $\bar{\Phi}(\Delta)$ – суть уравнения (12),

анализ которого показал, что восстанавливающая сила и диссипация механической энергии определялись амплитудой смещения и не зависели от частоты процесса.

Как правило, соединение работает под воздействием одновременно изменяющихся во времени нормальной и тангенциальной составляющих внешнего динамического воздействия. Такая нагрузка приводит к контактными смещениям в обоих направлениях. Известно, что в упругом контакте на колебания в нормальном направлении тангенциальная составляющая динамического усилия не оказывает значительное воздействие. Оценочные расчеты показали, что увеличение площади упругого контакта под влиянием касательных сил при средних значениях коэффициента трения не превышает 5 %, т.е. тангенциальные напряжения на контакте не приводят к существенным изменениям в сближении двух шероховатых тел. Поэтому задача оценки поведения контактной пары при произвольном направлении внешнего воздействия к плоскости контактирования заключалась в определении контактных касательных колебаний.

При этом необходимо в расчетах контактных смещений тангенциального направления учитывать в каждый момент времени действие динамического нормального контактного колебательного процесса.

В случае сложного динамического нагружения нормально статически поджатого контакта в каждый момент времени нормальное усилие N^* – является суммой нормальной статической составляющей

$N = \text{const}$ и динамической силы $N(x)$, изменяющейся во времени:

$$N^* = N\text{const} + N(x(t)). \quad (3)$$

Таким образом, данное решение есть ряд статических задач, позволяющих учесть влияние нормальных перемещений и нагрузки в каждый конкретный момент времени t на касательные смещения в упругом диссипативном контакте при сложном динамическом нагружении. В формулах по расчету коэффициентов рядов при сложном динамическом нагружении вместо $N\text{const}$ будет подставляться величина N^* .

Такой подход позволяет совместить процессы в нормальном и касательном направлениях и перейти к рассмотрению различных условно-неподвижных соединений. Приведенная динамическая модель упругого контактного взаимодействия применительно к

условно-неподвижным соединениям позволяет проводить расчет на прочность и жесткость реальных соединений (резьбовых, прессовых, клиновых, заклепочных соединений) с учетом процессов, протекающих в контакте. Разработанная методика расчета дает возможность создавать условно-неподвижные соединения точных механизмов, прецизионных приборов с заранее заданными прочностными характеристиками, что позволяет продлить срок их службы и облегчить эксплуатацию.

По величине динамической контактной податливости возможна оценка прочности соединения в том или ином направлении при работе соединения в условиях динамического нагружения.

При прочностных расчетах не учитывают деформации, перемещения, напряжения, возникающие в поверхностных шероховатых слоях сопряженных деталей соединения в пределах трения покоя. Упругие контактные перемещения в нормальном и в касательном направлениях оказывают существенное влияние на формирование величины натяга.

Податливость соединения с натягом увеличивается за счет контактной податливости шероховатого поверхностного слоя сопрягаемых деталей.

Динамическая податливость в контакте соединения с натягом в нормальном направлении будет определяться общим выражением:

$$K_N = x(t) / N^*, \quad (4)$$

где $x(t)$ – нормальное контактное смещение, изменяющееся во времени в случае действия динамической нагрузки; N^* – нормальное динамическое усилие. При статических условиях в знаменателе будет стоять величина номинального давления в соединении q_0 .

С учетом динамической нормальной контактной податливости шероховатого слоя в соединении номинальное давление будет определяться выражением

$$q_0 = \delta_H / 2(\lambda_1 + \lambda_2 + K_N). \quad (5)$$

где δ_H – номинальный натяг; λ_1, λ_2 – податливости деталей соединения.

Таким образом, номинальное давление в соединении с натягом будет уменьшаться, следовательно, фактическая величина натяга будет так же меньше минимального расчетного значения.

Если прессовое соединение нагружено динамической или статической силой тангенциального направления, то необходимо в общем инженерном расчете на прочность учесть динамическую касательную контактную податливость шероховатого слоя:

$$K_\tau = \Delta(x(t); t) / N^* f. \quad (6)$$

Для общего случая одновременного динамического нагружения соединения в нормальном и тангенциальном направлении: $\Delta(x(t); t)$ – касательные контактные колебания, являющиеся функцией от $x(t)$ – нормальных контактных колебаний в каждый момент времени.

В случае действия только осевой динамической нагрузки на соединение с натягом динамическая контактная касательная податливость шероховатого слоя определяется следующим образом:

$$K_\tau = \Delta^* / \tau^*, \quad (7)$$

где Δ^* – амплитудное значение вынужденных касательных контактных колебаний в пределах предварительного смещения; τ^* – касательное напряжение, соответствующее амплитуде смещения – Δ^* .

Расчеты показали, что податливость соединений с натягом как в нормальном, так и в касательном направлении увеличивается с учетом динамической контактной податливости соединения. В частности, номинальное давление в соединении, а, следовательно, и величина самого минимального натяга уменьшается при различных параметрах контактирования от 10 до 15%.

Для того чтобы оценить влияние контактного взаимодействия поверхностей клинового соединения на процесс расклинивания, можно воспользоваться зависимостями для определения тангенциальных и нормальных упругих контактных смещений как в статических условиях, так и при динамическом возбуждении. По наклонной верхней поверхности соединения будут наблюдаться смещения в тангенциальном и в нормальном направлениях.

Приведенная система основных динамических параметров контактирования соединений позволяет совершать правильный их выбор при проектировании соединений, тем самым дает возможность создания машин и механизмов с прогнозируемой динамической работой всех их сочленений.