

РАЗДЕЛ 3. ЕСТЕСТВЕННЫЕ НАУКИ

Ультразвуковые исследования шариковых элементов подшипниковых узлов

к.ф.-м.н., доц. Бражкин Ю.А., Советская Е.С.
МГТУ «МАМИ», МГУ им. М.В. Ломоносова

Надёжность и долговечность подшипников качения (рис. 1) во многом зависят от качества поверхностного слоя деталей подшипников. Свойства поверхностного слоя этих деталей определяются рядом факторов: качеством материалов и их термической обработкой, а также способом механической обработки.



Рис. 1. Подшипник качения.

Физико-механические свойства поверхностного слоя зависят от величины контактных напряжений и рабочей температуры, остаточных напряжений, микротвёрдости, степени пластической деформации металла в поверхностном слое. Перечисленные свойства являются следствием технологических процессов изготовления деталей, методов и режимов их обработки.

В зависимости от характера контакта подшипниковых элементов с дорожками качения различают точечный и линейный контакт. В результате упругих (и частично пластических) деформаций вблизи начальной точки касания образуется поверхность, ограниченная в общем случае эллиптическим контуром [1].

Точечное касание имеет место во всех сферических роликоподшипниках, линейное - в цилиндрических и конических роликоподшипниках. Величина допустимых остаточных деформаций в подшипниках качения составляет 0,0001 диаметра тела качения. В таких системах при упругих деформациях применима теория Герца [2].

В основу теории Герца положены следующие предположения:

- Поверхности тел гладкие и несогласованные (площадь контакта весьма мала по сравнению с размерами соприкасающихся тел).
- Деформации малы (находятся в упругой области и подчиняются закону Гука).
- Материалы соприкасающихся тел однородны и изотропны.
- Трение отсутствует.

Эти предположения на практике не всегда соблюдаются, но относительно небольшие отклонения экспериментальных результатов от теоретических расчетов (например, расчет размеров контактных поверхностей) позволяют применять теорию Герца в реальных задачах.

Для моделирования распространения акустических волн в подшипниковых шариковых элементах была использована одномерная структура из стальных шариков (рис. 2), помещённых в трубку из текстолита.

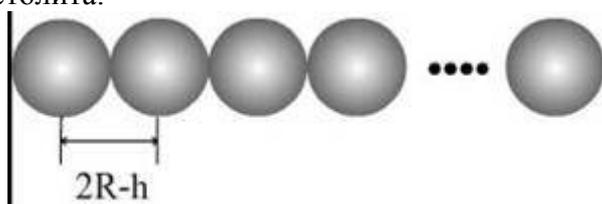


Рис. 2.

Проблема контактного взаимодействия двух упругих тел впервые была рассмотрена Герцем [2, 3]. Было показано, что без учёта нелинейности материала в упругой области деформаций при сближении на расстояние $h \ll R$ двух шариков, имеющих одинаковые радиусы R , модуль Юнга E , и коэффициент Пуассона ν возникает сила:

$$F = \frac{4E^* \sqrt{R}}{3} h^{3/2}$$

где $\frac{1}{E^*} = 2 \frac{1-\nu^2}{E}$, одномерная цепочка шариков.

Радиус контакта: $a = \left(\frac{3FR}{4E^*} \right)^{1/3}$.

$$h = \frac{a^2}{R} = \left(\frac{9F^2}{16RE^{*2}} \right)^{1/3}$$

Взаимное сближение двух точек:

Полная сближающая нагрузка связана с давлением соотношением:

$$F = \int_0^a p(r) 2\pi r dr = \frac{2}{3} p_0 \pi a^2$$

Максимальное давление P_0 в 3/2 раза превышает среднее давление P .

$$P_0 = \frac{3F}{2\pi a^2} = \left(\frac{6FE^{*2}}{\pi^3 R^2} \right)^{1/3}$$

Максимальное давление:

Экспериментальные исследования проводились в одномерной цепочке из 80 стальных одинаковых шариков диаметром $2R = 6.5$ мм, помещённых в трубку из текстолита. Внутренний диаметр трубки практически был равен диаметру шариков. Шарика имели плотность $\rho = 7800$ кг/м³, модуль Юнга $E = 200$ ГПа, коэффициент Пуассона $\nu = 0.3$.

Для возбуждения продольных волн в диапазоне частот (12-100) кГц использовался пьезоэлектрический преобразователь, который состоял из набора колец из пьезокерамики. Продольные акустические волны на другом конце цепочки принимались преобразователем GS0506HR фирмы MATEC INSTRUMENTS, INC с резонансной частотой 5 МГц. Преобразователь имеет плоскую амплитудно-частотную характеристику в интервале частот (0,01-3) МГц. Посредством специального устройства осуществлялся контролируемый поджим шариков.

На излучающий преобразователь подавались усиленные гармонические колебания с генератора НР 33120А, амплитуда которых могла изменяться в пределах (0-100) вольт. Пршедший через цепочку шаров сигнал после усиления регистрировался двухлучевым цифровым осциллографом НР 54810а и передавался в компьютер (рис. 3а и рис. 3б). Измерения проводились в импульсном и непрерывном режимах. В непрерывном режиме исследовалась форма колебаний на приемном преобразователе и ее поведение при различной амплитуде на излучающем преобразователе. В импульсном режиме исследовались нелинейные характеристики цепочки шаров, скорость звука и поглощение. Шары сжимались статической силой F . Одновременно измерялось сопротивление цепочки шариков $R_b = R_b(F)$, которое определялось в основном площадью контактов шаров и равнялось $R_b = 113/(F)^{2/3}$. Измерение сопротивления позволяло контролировать степень поджатия шаров во время эксперимента.

Результаты экспериментальных исследований формы колебаний в волне на частоте 72 кГц в зависимости от амплитуды гармонического сигнала на излучающем преобразователе приведены на рис. 4, 5. При превышении амплитуды сигнала на преобразователе некоторого порогового напряжения синусоидальный сигнал сменялся высокочастотными затухающими цугами колебаний (рис. 4). При этом частота затухающих колебаний в цуге соответствует

частоте одной из основных мод колебаний шариков (1.4 МГц), а частота повторения равна частоте упругой волны (72 кГц). На верхней осциллограмме представлен сигнал на приёмном пьезопреобразователе, на нижней – на излучающем.



Рис. 3а. Фотографическое изображение схемы экспериментальной установки.

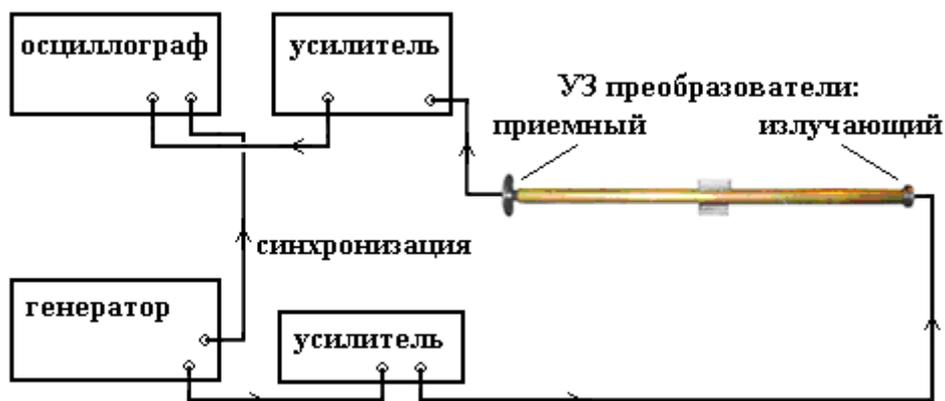


Рис. 3б. Блок-схема установки.

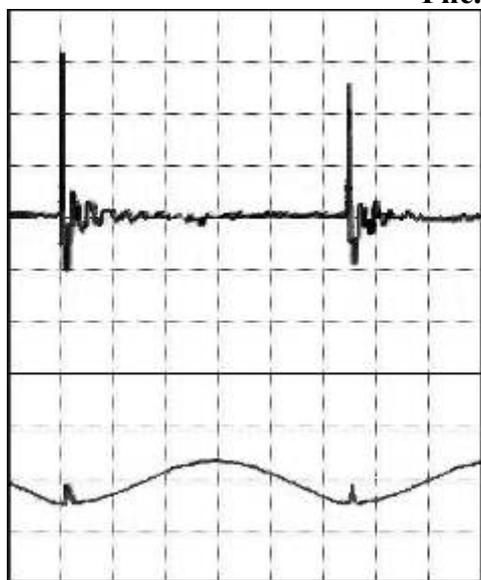


Рис. 4. Форма сигнала на приёмном (верхний рисунок) и излучающем (нижний рисунок) преобразователях.

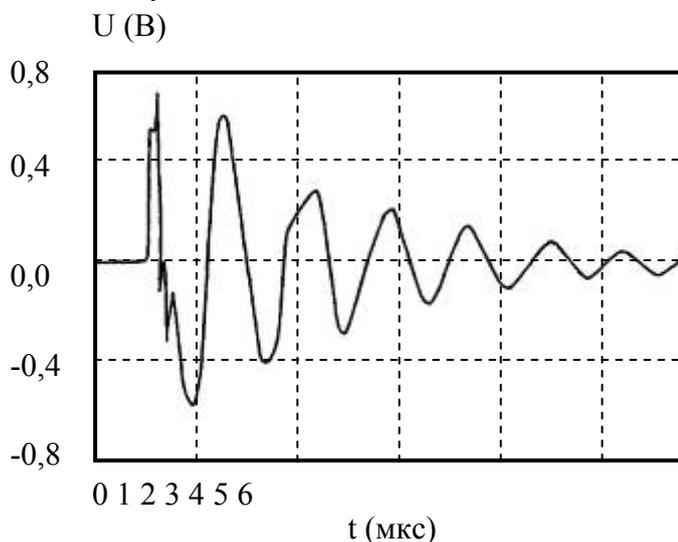


Рис. 5. Увеличенная форма колебаний на приеме.

На рис.5 представлена увеличенная форма одного цуга колебаний. Видно, что в фазе сжатия (отрицательная ось значений) сигнал оставался практически синусоидальным, т.е. нелинейность не проявлялась. В фазе разрежения (положительная ось значений) явно просматривается завал вершин и уширение положительного полупериода колебаний. Это свидетельствует о сильной нелинейности в системе в фазе разрежения. Теория контактного взаимодействия Герца подтверждает правильность выводов, сделанных из экспериментальных

исследований.

В поведении амплитуд проявлялся гистерезисный характер. В зависимости от увеличения или уменьшения амплитуды напряжения на излучающем преобразователе (сначала амплитуда уменьшалась, затем увеличивалась) пороговое напряжение появления первого пика менялось. Амплитуда колебаний на приёмном преобразователе также менялась.

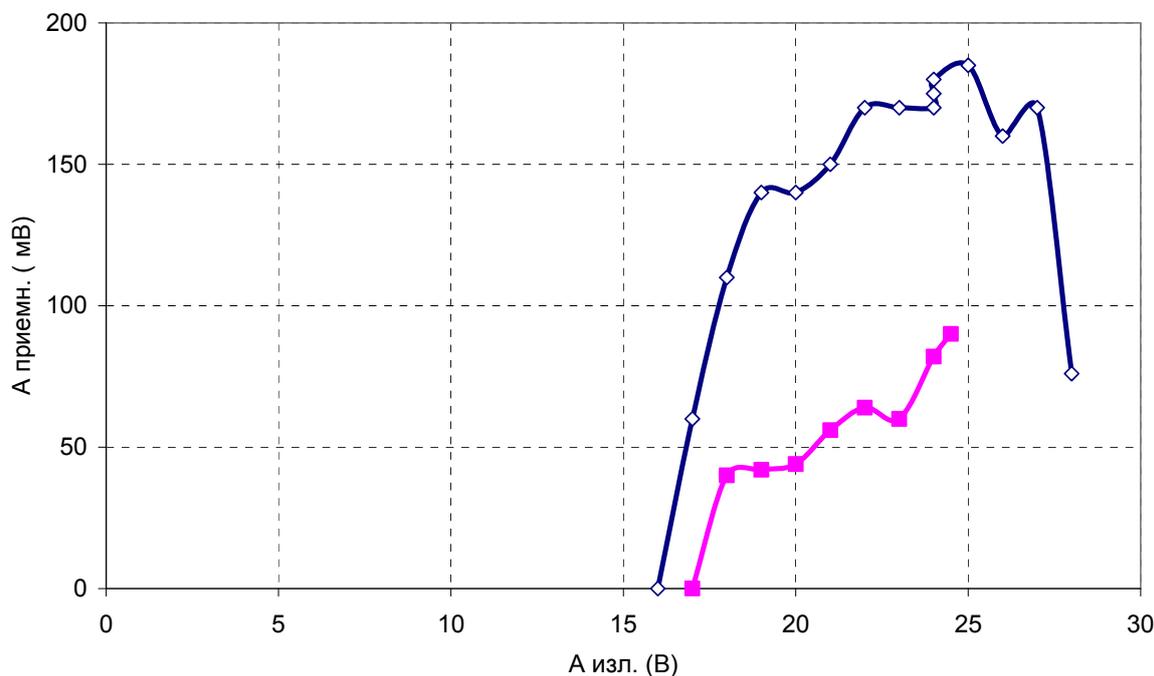


Рис. 6. Пороговая зависимость амплитуды колебаний на приёмном преобразователе от амплитуды колебаний на излучающем преобразователе. Пустые метки – ход вниз, цельные квадратики – ход вверх.

Выводы

Проведённые ультразвуковые исследования показывают, что в области контактов шариковых элементов подшипниковых узлов могут возникать значительные механические напряжения. В результате возникают колебания шариков на одной из мод их собственных колебаний. Возникновение этих колебаний носит пороговый характер. С учётом малого радиуса контактной площадки (10 – 100 мкм) возникающие при контакте напряжения имеют значительную величину. Приведённые результаты могут представлять интерес при расчёте шариковых элементов подшипниковых узлов.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 06-02-16658-а.

Литература

1. А.И. Спришевский. Подшипники качения. М.: Машиностроение. 1969. 632с.
2. Н. Hertz. Über die Berührung fester elastischer Körper. Gesammelte Werke, 1895, Bd. I, S. 155-173.
3. Л.Д. Ландау, Е.М. Лившиц. Теория упругости. М.: Наука. 1978. 293с.

Влияние осесимметричных начальных неправильностей сферической оболочки на ее критическую нагрузку

д.т.н., проф. Григолюк Э.И., д.ф.-м.н., проф. Лопаницын Е.А.
МГТУ «МАМИ»

В работе приведены результаты исследования влияния осесимметричных начальных неправильностей формы жёстко закреплённого пологого сферического купола, нагруженного равномерным поперечным давлением, на его верхнюю критическую нагрузку. В качестве начальных неправильностей используются формы изогнутой поверхности сферического купола, присущие ему на этапах до- и закритического осесимметричного деформирования. Для описания процесса деформирования купола применяются уравнения Маргерра в осесиммет-