

Рассмотрим изменение формы поперечного сечения нежестких деталей типа полый цилиндр на примере однопроходной механической обработки трубы с наружным диаметром 42 мм и внутренним диаметром 38 мм. Глубина резания $t_{рез} = 1$ мм на резец (см. устройство для комбинированной обработки).

Мы рассматриваем процесс однопроходной обработки детали ввиду того, что в данном случае величина перерезывающей силы P будет максимальной, Δr также примет наибольшее значение. За исключением рассматриваемого случая обработки, Δr , возникающая в процессе обработки труб указанных размеров, ничтожно мала, поэтому ей при расчетах можно пренебречь.

Под действием перерезывающей силы P поперечное сечение обрабатываемой трубы будет деформировано на $\Delta r = (0.1...0.05)t_{рез} = 0.2...0.1$ мм.

В дальнейшем будет рассмотрен вопрос о законе изменения среднего радиуса поперечного сечения нежесткой детали типа полый цилиндр - Δr .

Выводы

В процессе комбинированной режущо-деформирующей обработки нежестких деталей типа полый цилиндр происходит деформация поперечного сечения детали под действием перерезывающей силы, но величина деформации настолько мала, что в дальнейших расчетах ею можно пренебречь.

Литература:

1. Папшев Д.Д. Отделочно-упрочняющая обработка поверхностным пластическим деформированием. - М.: Машиностроение, 1978. - 152 с.
2. Смелянский В.М. и др. Размерно-совмещенное обкатывание детали. - «Станки и инструмент», № 11, 1981, с. 35-36.
3. Тимошенко С.П. Теория колебаний в инженерном деле. - ГНТИ, М.-Л., 1931. - 344 с.
4. Чистосердов П.С. Управление точностью обработки при совмещении резания и ППД. - «Вестник машиностроения», № 11, 1985, с. 54-57.

Плохо обусловленные задачи в геометрических измерениях торовых поверхностей

к.т.н. проф. Суслин В.П., к.т.н. доц. Джунковский А.В., Холодов Д.А.
МГТУ «МАМИ»
8(495) 223-05-23, доб. 1392

Ключевые слова: координатно-измерительная машина, торовые поверхности, подшипники, беговые дорожки, плохо обусловленные задачи, регуляризация.

Среди математических задач, возникающих при измерении геометрических объектов на координатно-измерительных машинах (КИМ), существует класс задач, решение которых неустойчиво к малым изменениям исходных данных. Они характеризуются тем, что даже малые погрешности в исходных данных могут приводить к большим ошибкам в решении. Характерным примером такой задачи может служить измерение дуги окружности на секторе меньше 90 градусов. Задачи подобного типа являются плохо обусловленными, и принадлежат к классу некорректно поставленных задач [1].

Другой областью геометрического контроля на КИМ, в которой могут возникать плохо обусловленные задачи, являются измерения профиля беговых дорожек подшипников качения (торовых поверхностей).

При анализе точностных характеристик измерительных приборов, предназначенных для контроля беговых дорожек подшипников качения, было замечено, что при измерении радиусов они дают большие погрешности, вплоть до 50 мкм и более. Наиболее вероятно, что это связано с плохой обусловленностью задачи, а не с их аппаратными особенностями изме-

рительного прибора.

В лаборатории САПР МГТУ «МАМИ» был проведен ряд экспериментов с помощью КИМ DKM 1-300DP по измерению торовой поверхности беговой дорожки внутреннего кольца серийного подшипника № 6-50306 (рисунок 1). Сектор образующей окружности тора для него составил чуть менее 90°. Целью этих экспериментов было определить наличие или отсутствие плохо обусловленной задачи как основного фактора значительных погрешностей при таких измерениях, а также рассмотреть возможные пути решения данной проблемы.

Измерение торовой поверхности беговой дорожки подшипника проводилось в 4-х сечениях по 5 точек в каждом. Определение параметров тора (центра, оси, радиуса и радиуса в сечении) производилось методом наименьших квадратов Гаусса (МНК), путем минимизации функции:

$$F(R, r, P_0, V) = \sum_{i=1}^n \delta_i^2 \quad (1)$$

где: $F = \sum_{i=1}^n \delta_i^2$ – функция минимизации, содержащая сумму квадратов отклонений измеренных точек от поверхности тора;

R, r, P_0, V - искомые параметры тора: радиус кольца, радиус дорожки, центральная точка и вектор оси тора.

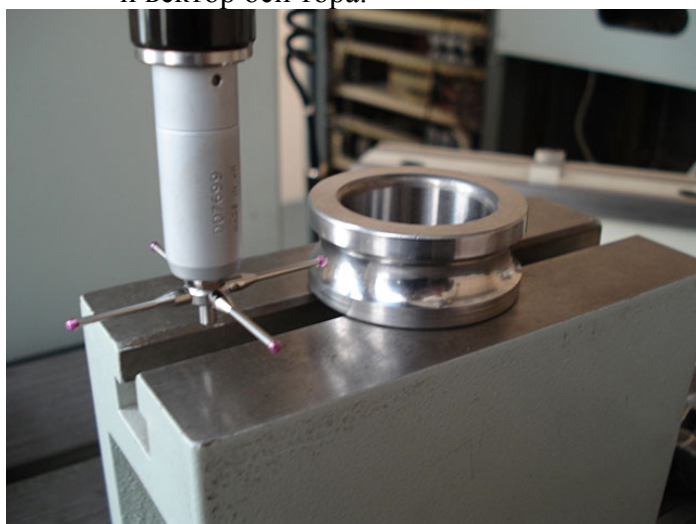


Рисунок 1 - Измерение беговой дорожки кольца шарикового подшипника

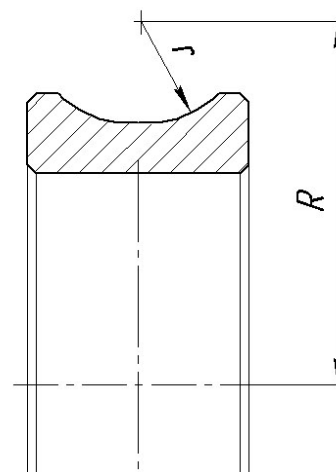


Рисунок 2 - Внутреннее кольцо подшипника

В качестве начального приближения радиуса в сечении тора использовался средний радиус измеренных сечений. Для остальных параметров в качестве начальных приближений использовались параметры окружности, построенной по центрам измеренных сечений.

Для проведения экспериментов на КИМ измерительная программа ГеоАРМ, разрабатываемая в лаборатории САПР, была расширена функциями измерения торовых поверхностей, реализующими описанные выше алгоритмы построения тора.

Результаты семи измерений торовой поверхности беговой дорожки реального подшипника, показанного на рисунок 1, сведены в таблицу 1.

Из результатов, приведенных в таблице 1, видно, что при относительно малом разбросе значений отклонения формы тора (ΔE_{form}) разброс значений параметров тора таких, как радиусы кольца и беговой дорожки, составляет около 10 мкм, т.е. на порядок выше, чем отклонения формы. Это свидетельствует о том, что при относительно небольших изменениях начальных условий решение задачи сильно изменяется. Следовательно, можно сделать вывод о

Таблица 1

Результаты измерений беговой дорожки кольца подшипника

R кольца, мм	r дорожки, мм	E_{form} (отклонение формы), мм
26,193	5,197	0,0041
26,199	5,202	0,0037
26,198	5,201	0,0038
26,200	5,203	0,0032
26,203	5,206	0,0034
26,202	5,205	0,0038
26,198	5,201	0,0043
$\Delta R = 0,010$	$\Delta r = 0,010$	$\Delta E_{form} = 0,001$

Для проверки полученных результатов были проведены вычислительные эксперименты, имитирующие проведенные измерения. На поверхности математически точного тора были рассчитаны координаты точек, составляющие сечения тора с сектором образующей окружности в 90° . Далее на эти данные случайным образом был наложен «шум» амплитудой до 3 мкм, что соответствует погрешности КИМ DKM 1-300DP в точке. Таким образом, было сформировано 7 наборов данных с различными ошибками. Полученные данные были обработаны в том же измерительном модуле, что и реальные точки. Результаты вычислительных экспериментов сведены в таблицу 2.

Таблица 2

Результаты измерения математической модели тора с сектором образующей окружности 90°

R кольца, мм	r дорожки, мм	E_{form} (отклонение формы), мм
26,199	5,203	0,0038
26,200	5,202	0,0049
26,201	5,201	0,0047
26,203	5,200	0,0039
26,199	5,203	0,0058
26,195	5,206	0,0046
26,203	5,200	0,0055
$\Delta R = 0,008$	$\Delta r = 0,007$	$\Delta E_{form} = 0,002$

Из таблицы 2 видно, что величины разброса значений радиусов и отклонения формы в определениях параметров объекта одного порядка с соответствующими величинами, полученными при измерениях реальной детали. Этот факт является подтверждением плохой обусловленности задачи измерения сегмента тора при секторе образующей 90° .

Логично предположить, что если мнение о плохой обусловленности задачи измерения торовой поверхности беговой дорожки подшипника качения верно, то с увеличением сектора образующей окружности тора разброс получаемых значений радиусов должен уменьшаться.

Для проверки данного факта были проведены еще несколько вычислительных экспериментов, аналогичных предыдущему, с той лишь разницей, что сектор образующей окружности тора был уменьшен до 70° , а затем увеличен до 100° , 110° и 180° градусов.

Результаты расчетов по торовой поверхности с сектором образующей в 180° градусов представлены в таблице 3.

Как видно из таблицы 3, величины разброса значений радиусов составляют величину одного порядка с величиной E_{form} , т.е. плохая обусловленность исчезает.

На рисунке 2 изображен график, показывающий зависимость разброса радиуса R и отклонения формы от размера сектора образующей тора.

Таблица 3

Результаты измерения математической модели тора с сектором образующей окружности 180°

R кольца, мм	r дорожки, мм	E_{form} (отклонение формы), мм
26,202	5,201	0,0038
26,201	5,202	0,0049
26,201	5,202	0,0047
26,201	5,202	0,0039
26,201	5,202	0,0058
26,199	5,203	0,0046
26,201	5,202	0,0055
$\Delta R = 0,003$	$\Delta r = 0,002$	$\Delta E_{form} = 0,002$

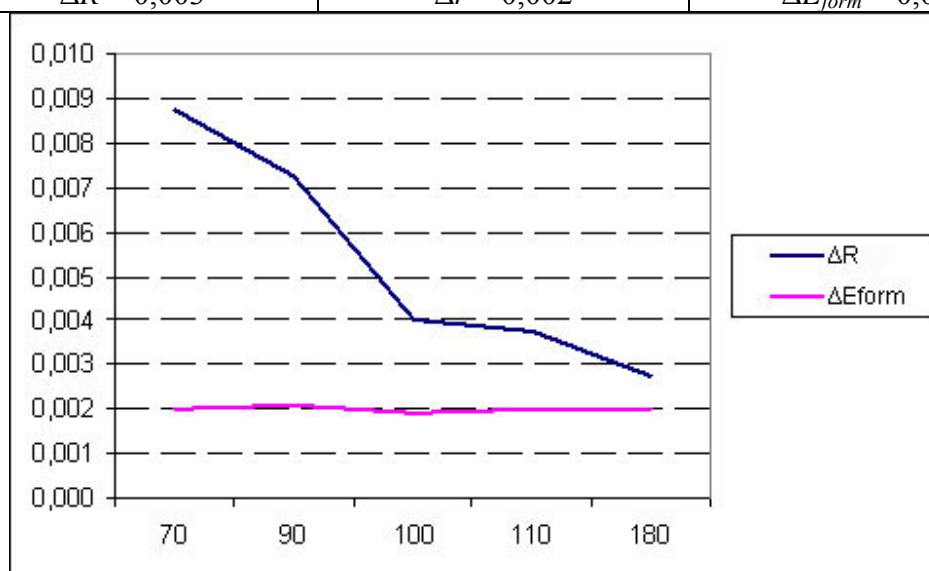


Рисунок 3 – График зависимости разброса значений параметров тора от величины сектора образующей окружности

По оси X отложены величины секторов образующих окружностей в градусах, по оси Y – величина разброса в мм.

Таким образом, проведенные вычислительные и натурные эксперименты отчетливо показывают плохую обусловленность задачи измерения торовой поверхности беговой дорожки подшипника качения.

Это обстоятельство позволяет сделать вывод о невозможности применения к данной задаче «стандартного» программного обеспечения КИМ, поскольку в нем используется традиционный метод построения геометрических объектов. Этот метод дает хорошие результаты только при измерении больших секторов стандартных геометрических объектов, таких как окружности, цилиндры, конусы, сферы и торы. В случае присутствия в конструкции деталей малых секторов этих объектов их измерения на КИМ становятся невозможными из-за плохой обусловленности измерительных задач.

В лаборатории САПР МГТУ «МАМИ» было предложено решение подобных измерительных задач на основе метода регуляризации академика А.Н. Тихонова [2]. Регуляризация заключается в том, что в условие задачи добавляется некоторая априорная информация, качественная или количественная, которая делает задачу корректной или условно корректной. Например, имеем плохо обусловленную или даже вырожденную систему линейных уравне-

ний $Ax = b$. Решение такой системы можно найти с помощью функционала А.Н. Тихонова:

$$\Omega(x, \lambda) = |Ax - b|^2 + \lambda |x - x_0|, \quad (2)$$

где: λ – положительный параметр регуляризации, значение которого нужно подбирать из некоторого условия оптимальности;

x_0 – априорный вектор решения.

При $\lambda \rightarrow 0$ задача переходит в исходную, плохо обусловленную, а при больших значениях λ становится хорошо обусловленной с решением, совпадающим с x_0 [1].

В программе ГеоАРМ планируется реализация подобного метода решения для торových поверхностей путем модификации минимизируемой функции за счет включения в нее отклонений определяемых параметров от их номинальных значений. При этом функция приобретает вид:

$$\Phi(R, r, P_0, V) = F(R, r, P_0, V) + w_1(R - R_{ном})^2 + w_2(r - r_{ном})^2 + w_3(P_0 - P_{0ном})^2 + w_4(V - V_{ном})^2, \quad (3)$$

где: $R_{ном}, r_{ном}, P_{0ном}, V_{ном}$ - номинальные значения параметров;

w_1, \dots, w_4 - веса параметров (коэффициенты регуляризации).

Существует ряд различных методик выбора коэффициентов регуляризации. Они отличаются объемом необходимой априорной информации, критериями принятия решения и количеством вычислений [3].

Таким образом, остается открытым вопрос о нахождении весов параметров. Оптимальный подбор весовых коэффициентов сделает задачу хорошо обусловленной и обеспечит успешное и адекватное нахождение параметров измеряемых объектов. Решение данного вопроса позволит производить на КИМ измерения малых секторов торových поверхностей, в том числе беговых дорожек шариковых подшипников.

Литература

1. Тихонов А.Н., Арсенин В.Я. Методы решения некорректных задач – М., «Наука» 1979.
2. Суслин В.П. Новый метод определения геометрических параметров объектов при измерениях на малых областях/ В.П. Суслин, А.В. Джунковский, М.Г. Шутер // Законодательная и прикладная метрология. - 2008. - № 6.
3. Kilmert M.E., O'Leary D.P. Choosing Regularization Parameters in Iterative Methods for Ill-Posed Problems., Society for Industrial and Applied Mathematics. Vol. 22, No. 4, pp. 1204–1221, 2001.

Экспериментальное исследование механических свойств демпфирующего материала

к.т.н. доц. Типалин С.А., проф. к.т.н. Шпунькин Н.Ф., Никитин М.Ю., Типалина А.В.
МГТУ «МАМИ»
8(495) 223-05-23, доб. 1393

Ключевые слова: многослойный материал с упруго-вязким соединительным слоем, деформация на сдвиг соединительного слоя.

Снижение веса автомобильных кузовов при сохранении безопасности пассажиров и улучшение эргономических показателей автомобиля является одной из основных задач ведущих автомобильных фирм. Традиционные способы защиты от вибрации и шума, к которым относится обклеивание панелей автомобиля шумопоглощающими материалами, приводит к дополнительным затратам и увеличивает вес транспортного средства. Наиболее перспективными материалами, которые успешно решают данный комплекс задач, являются многослойные демпфирующие листовые материалы. Данные листы состоят из стальных и