

Хуртасенко А.В., канд. тех. наук, доц.,
Шрубченко И.В., д-р техн. наук, проф.,
Тимофеев С.П., аспирант

Белгородский государственный технологический университет им В.Г. Шухова

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ФОРМЫ НАРУЖНОЙ ПОВЕРХНОСТИ КАЧЕНИЯ ОПОР ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ БАРАБАНОВ*

hurt@intbel.ru

В статье приведена методика бесцентрового измерения формы поверхности крупногабаритных деталей вращения, не имеющих стационарной оси, обработки результатов измерений и получения цифровой модели измеряемой поверхности.

Ключевые слова: крупногабаритная деталь, измерение, модель, восстановительная обработка, геометрические параметры, параметры формы поверхности

В промышленности строительных материалов при ремонтном обслуживании печных и помольных агрегатов одной из основных задач является восстановление геометрической формы и качества поверхностей качения деталей опор, путем удаления деформированного слоя материала. На кафедре «Технология машиностроения» БГТУ им. В.Г. Шухова активно ведется разработка технологий механической обработки данных агрегатов. Наиболее эффективными способами восстановительной обработки поверхностей опор являются токарная и шлифовальная обработка с использованием соответствующих мобильных станочных модулей [1, 2]. Для обеспечения наибольшей технологичности и уменьшения времени обработки требуется предварительное определение реальной геометрии поверхностей опор. Анализ состояния поверхностей опор необходим как при диагностике работоспособности опор, так и для обеспечения технически обоснованного выбора и назначения параметров и режимов обработки [3, 4], таких как настроечные размеры положения и траектории перемещения режущего инструмента, глубина резания, подача.

Для получения информации о реальной геометрической форме таких объектов как бандажи опор вращающихся печей в процессе их эксплуатации целесообразно использование специальных устройств и технологий измерений [4, 5], которые обеспечивают возможность определения предельных значений радиусов измеряемой детали, погрешности формы в поперечных сечениях, положения центра вписанной окружности. Анализ известных моделей устройств и методик измерения поверхности крупногабаритных деталей вращения, не имеющих стационарной оси, к которым относятся рассматриваемые детали опор, позволил разработать усовершенствованную и дополненную схему измерения (рис.1) и методику определения геометрических параметров детали на основе получения цифровой модели наружной поверхности качения. Данная схема может быть реализована на основе известных устройств [6, 7] при их некоторой модификации. На рис. 1 показана расчетная схема определения координат поверхности детали при реализации бесцентровой схемы измерений накладным устройством.

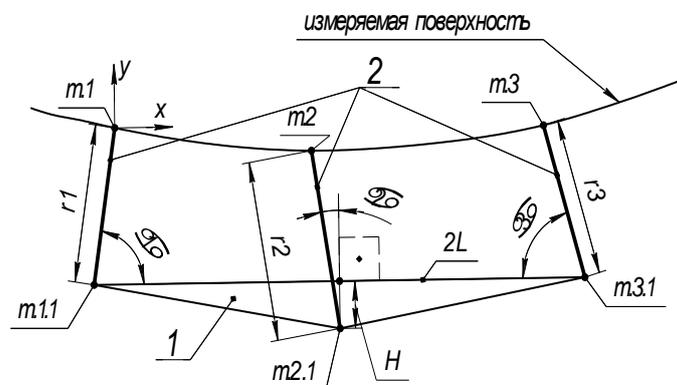


Рис. 1. Расчетная схема определения наружной поверхности качения опор технологических барабанов
(1 - корпус, 2 – измерительные опоры)

В приведенной схеме измерения измерительное устройство [6] настраивается таким образом, что измерительные опоры (2), которые шарнирно закреплены в точках $m.1.1$; $m.2.1$ и

$m.3.1$. корпуса (1), имеют возможность поворота, причем настроечный размер крайних измерительных опор постоянный и равный между собой ($r1=r3=const$), а размер определяемый на

средней измерительной опоре (r_2) может изменяться. Расстояние между точками $m.1.1$ и $m.3.1$ равно $2L$ и постоянно. Базовая точка средней измерительной опоры $m.2.1$ расположена посередине между $m.1.1$ и $m.3.1$, со смещением по нормали на величину H к прямой соединяющей эти точки. Углы α_1 и α_3 определяют угол отклонения осевых линий измерительных опор r_1 и r_3 относительно прямой $2L$. Угол α_2 определяет отклонение средней измерительной опоры r_2 от нормали к $2L$. Измерительные опоры касаются поверхности измеряемой детали в точках $m.1$, $m.2$, $m.3$ и располагаются по нормали к касательным в данных точках, что обеспечивается измерительным устройством. Для удобства расчетов нулевая точка принимается в точке $m.1$, а ось Ox параллельна прямой $2L$.

Следовательно, при данной схеме измерений постоянными являются: линейные величины r_1 , r_3 , $2L$ и H . Переменными величинами являются: r_2 , α_1 , α_2 и α_3 .

Применение данной методики при реализации бесцентровой схемы измерений позволяет обеспечить процесс получения 3D-модели реальной наружной поверхности деталей опоры качения. При этом процесс получения модели поверхности, для упрощения конструкции измерительного устройства, целесообразно разделить на два этапа:

I – непосредственный промер поверхности. На данном этапе измерительное устройство определяет параметры аппроксимирующих дуг аппроксимирующих измеряемую поверхность в необходимом количестве сечений.

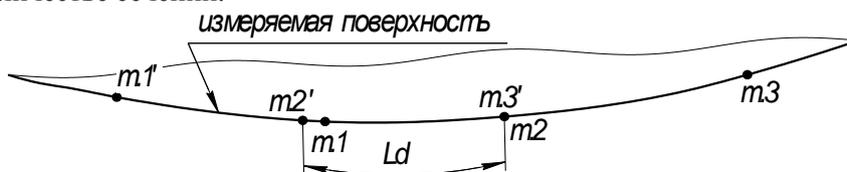


Рис. 2. Графическая интерпретация принцип последовательности измерений (точки $m.1'$, $m.2'$ и $m.3'$ соответствуют точкам контакта измерительных опор с поверхностью в предыдущем положении; точки $m.1$, $m.2$ и $m.3$ соответствуют точкам контакта измерительных опор с поверхностью в текущем положении; Ld – длина дуги между точками $m.2'$ и $m.3'$)

3) Завершение измерений поверхности опоры в конкретном сечении происходит после сигнала от датчика полного оборота. Причем, после поступления сигнала от датчика производится дополнительное измерение, обеспечивающее перекрытие аппроксимирующих дуг в районе первого измерения.

4) Далее устройство перемещается для измерений в новом сечении или отводится от измеряемой поверхности для завершения измерений.

Математически для определения координат точек измеряемой поверхности и получения 3D-модели (второй этап), на первом этапе измере-

II – расчет координат точек поверхности и построение цифровой 3D-модели. Производится на основе данных полученных в первом этапе и может производиться, как в самом измерительном устройстве, так и вне его.

Этап измерений I. Алгоритм, реализуемый на данном этапе, заключается в следующем:

1) На измеряемую деталь, по торцевой поверхности, крепится датчик полного оборота для обеспечения точного совпадения точек начала измерений в каждом из сечений опоры. Далее к измеряемой поверхности подводится измерительная головка.

2) После сигнала от датчика полного оборота измерительное устройство начинает считывать данные с датчиков, определяющих параметры r_2 , α_1 , α_2 и α_3 . Одновременно производится расчет координат трех точек касания поверхности ($m.1$, $m.2$, $m.3$) в локальной системе координат.

Расчет и сохранение значений координат точек происходит в момент получения сигнала от датчика полного оборота и при последующем каждом условном перемещении точки касания измерительного щупа (r_2) по измеряемой поверхности на величину Ld .

Величина Ld представляет собой длину дуги, которую должен пройти измерительный щуп (r_2) от точки $m.2'$ до точки $m.3'$ предыдущего положения (рис.2). В текущем положении точка $m.2$ будет соответствовать точке $m.3'$ предыдущего положения.

нужно требуется определение следующих параметров аппроксимирующих дуг: координаты точек $m.1$, $m.2$ и $m.3$; радиус аппроксимирующей дуги rd ; длина дуги от точки $m.2$ до точки $m.3$.

Расчет координат точек в каждом из положений измерительной головки производится при помощи матриц поворота и переноса, на основании постоянных параметров системы и данных полученных от датчиков.

Для определения радиуса окружности и длины дуги возможно использование широко применяемой системы квадратных уравнений (1).

$$\begin{cases} (x_1-xc)^2+(y_1-yc)^2=rd^2 \\ (x_2-xc)^2+(y_2-yc)^2=rd^2 \\ (x_3-xc)^2+(y_3-yc)^2=rd^2 \end{cases} \quad (1)$$

где x_1 и y_1 ; x_2 и y_2 ; x_3 и y_3 – координаты точек касания измерительных щупов измеряемой поверхности в локальной системе координат; $xс$ и yc – координаты точки центра дуги в локальной системе координат (неизвестная); rd – радиус дуги (неизвестная).

Вычисление неизвестных данной системы требует применения отдельной программы расчета. В основном данные программы используют алгоритмы перебора и подбора значений, поэтому вычисления могут занимать значительное количество времени. При высокой скорости вращения опоры данный фактор является лимитирующим. Для сокращения времени вычислений наряду с применением менее дорогих и менее производительных процессоров расчет производится на основании приведенных ниже положений. Известна теорема определяющая, что если последовательно соединить двумя отрезками три точки, не лежащие на одной прямой, и провести через середины данных отрезков две перпендикулярные прямые, то пересечение прямых будет центром дуги проходящей через данные точки (рис.3).

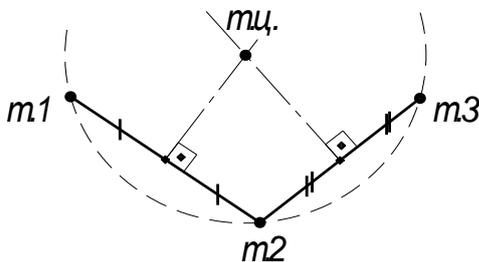


Рис. 3. Геометрическая интерпретация теоремы определения координат точки центра дуги окружности проходящей через три точки ($m.ц.$ – точка центра дуги)

Из приведенной теоремы вытекает, что координаты точки центра дуги в каждом случае можно определить по формулам (2) и (3).

$$xc = \frac{x_2^2 y_3 - x_3^2 y_2 + y_2^2 y_3 - y_3^2 y_2^2}{2x_2 y_3 - 2x_3 y_2} \quad (2)$$

$$yc = \frac{x_3^2 x_2 - x_2^2 x_3 + y_3^2 x_2 - x_3^2 y_2^2}{2x_2 y_3 - 2x_3 y_2} \quad (3)$$

где x_2 и y_2 ; x_3 и y_3 – координаты точек $m.2$ и $m.3$ в локальной системе координат; xc и yc – координаты точки центра дуги.

Далее по известной координате центра дуги определяется её радиус и параметр Ld .

Реализованный на основе предложенного алгоритма в среде MathCAD программный модуль I-го этапа измерений представлен ниже

```

M := for n ∈ 0..nx
  (x' y') ← ( cos(π/2 - α1·π/180)  sin(π/2 - α1·π/180) ) · ( 0 )
             ( -sin(π/2 - α1·π/180) cos(π/2 - α1·π/180) ) · ( -r1 )
  (x'' y'') ← ( x' ) + ( l )
              ( y' )   ( -v )
  (x2 y2) ← ( x'' ) + ( cos(α2·π/180)  -sin(α2·π/180) ) · ( 0 )
              ( y'' )   ( sin(α2·π/180)   cos(α2·π/180) ) · ( r3 )
  (x''' y''') ← ( x' ) + ( 2l )
                ( y' )
  (x3 y3) ← ( x''' ) + ( cos(π/2 - α3·π/180)  -sin(π/2 - α3·π/180) ) · ( 0 )
                  ( y''' )   ( sin(π/2 - α3·π/180)   cos(π/2 - α3·π/180) ) · ( r2 )
  xc ← ( x2^2·y3 - x3^2·y2 + y2^2·y3 - y2·y3^2 ) / ( 2·x2·y3 - 2·x3·y2 )
  yc ← ( x2·x3^2 - x2^2·x3 + x2·y3^2 - x3·y2^2 ) / ( 2·x2·y3 - 2·x3·y2 )
  rd ← √( xc^2 + yc^2 )
  h23 ← √( (x3 - x2)^2 + (y3 - y2)^2 )
  Ld ← 2rd·asin( h23 / (2·rd) )
  Mn,0 ← x2
  Mn,1 ← y2
  Mn,2 ← x3
  Mn,3 ← y3
  Mn,4 ← xc
  Mn,5 ← yc
  Mn,6 ← Ld
  Mn,7 ← rd
  
```

где n – порядковый номер измерения; nx – общее количество измерений в одном поперечном сечении; $h23$ – длина хорды от точки $m.2$ до точки $m.3$ в текущем измерении; M – массив расчетных значений координат точек измерения.

Конечным результатом работы программы является массив данных с координатами точек $m.1$, $m.2$ и $m.3$, а так же координаты точки центра дуги в локальной системе координат, длина дуги Ld и радиус дуги в каждом из расчетных положений измерительной головки.

Предлагаемый алгоритм определения параметров аппроксимирующих дуг измеряемой поверхности, первого этапа измерений, процессе проверки на имитационных моделях показал высокую точность метода определения координат расчетных точек в локальной системе координат и радиусов дуг (с точностью до 4-х знаков после запятой). Определение длины дуги Ld происходит с точностью до 3-х знаков после запятой. Однако данная схема требует изучения влияния геометрической погрешности постоянных параметров системы ($r1$; $r3$; $2L$; H) на точность измерений различных по габаритным размерам деталей опор.

Этап измерений II. Данный этап связан с получением и непосредственным анализом цифровой модели наружной поверхности качения опоры. В зависимости от требуемой точности,

объём данных для обработки, полученных на первом этапе, может варьироваться от одного массива координат точек в одном из сечений до нескольких десятков в разных сечениях и принадлежащих целому ряду опор всего агрегата. Поэтому данный этап производится на сопряженной с измерительным устройством более мощной вычислительной технике, например КПК или ПК.

Алгоритм, реализуемый на данном этапе, заключается в следующем:

1) Определение координат точек первого измерения относительно системы координат неподвижного основания измерительного устройства, координаты и положение которого относительно всего агрегата полностью известны.

2) Перерасчет координат точек профиля поверхности опоры в измеренных сечениях.

При перерасчете координат точек используется следующее допущение, что точка $m.1$ текущего измерения (рис. 4) принадлежит дуге аппроксимирующей поверхность в предыдущем измерении.

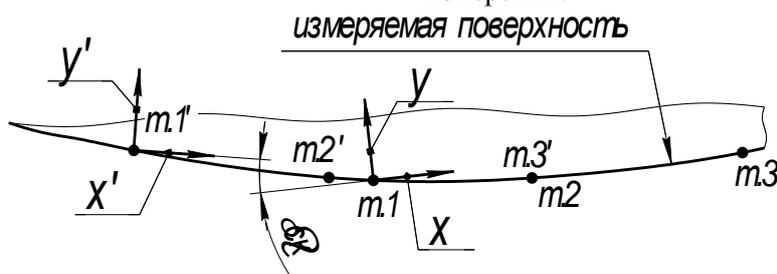


Рис. 4. Схема определения координат точек относительно первого измерения

При этом в расчетах учитывается, что точки $m.1', m.2'$ и $m.3'$ соответствуют точкам контакта измерительных опор с поверхностью в предыдущем положении; точки $m.1, m.2$ и $m.3$ соответствуют точкам контакта измерительных опор с поверхностью в текущем положении; $x'y', xy$ – локальные системы координат в предыдущем и в текущем измерении соответственно;

$\beta_{ск}$ – угол поворота текущей системы координат относительно предыдущей).

3) Получение массивов данных координат точек принадлежащих измеренным поверхностям, построение 3D-моделей поверхностей и дальнейший их анализ и обработка.

Реализованная по данному алгоритму в среде MathCAD часть программы II-го этапа измерений представлена ниже:

В этом модуле: n – порядковый номер измерения; nx – общее количество измерений в одном поперечном сечении; $h12$ – длина хорды от точки $m.1$ до точки $m.2$ в текущем измерении; $h13$ – длина хорды от точки $m.1$ до точки $m.3$ в предыдущем измерении; $M2$ – массив расчетных значений координат точек измерения.

Полученные данные в виде массивов координат точек могут передаваться для анализа как в специальные программы для определения необходимого припуска на обработку, так и для цифровой обработки и анализа, например в CAD системы. На рис. 5 представлено получение 3D-модели поверхности качения бандажа цементной печи в системе Компас-3D на основе данных измерений (измерения проводились по цифровой модели деформированного бандажа).

В реализации выполнения измерений и построения 3D-модели поверхности предложенная методика обеспечивает высокую эффективность и точность определения координат точек реальной поверхности и её относительного положения в заданной системе координат. Полученная информация об объекте может быть использована для определения погрешностей формы, возможности и технологических параметров

```

M2 :=
for n ∈ 1..nx
    h12 ← √(Mn,0)2 + (Mn,1)2
    h13 ← √(Mn-1,2)2 + (Mn-1,3)2
    α1 ← atan( $\frac{M_{n-1,3}}{M_{n-1,2}}$ )
    α2 ← atan( $\frac{M_{n,1}}{M_{n,0}}$ )
    α3 ← acos( $\frac{h12}{2 \cdot M2_{n-1,8}}$ ) - acos( $\frac{h13}{2 \cdot M2_{n-1,8}}$ )
    β ← α1 - α2 + α3 if Mn,1 < 0
    β ← -(α1 + α2 + α3) if Mn,1 ≥ 0
    βск ← βск + β
    (X1n) ← (cos(βск) sin(βск)) · (-Mn,0) + (M2n-1,4)
    (Y1n) ← (sin(βск) cos(βск)) · (-Mn,1) + (M2n-1,5)
    (X3n) ← (cos(βск) sin(βск)) · (Mn,2) + (X1n)
    (Y3n) ← (sin(βск) cos(βск)) · (Mn,3) + (Y1n)
    (Xcn) ← (cos(βск) sin(βск)) · (Mn,4) + (X1n)
    (Ycn) ← (sin(βск) cos(βск)) · (Mn,5) + (Y1n)
    M2n,0 ← X1n
    M2n,1 ← Y1n
    M2n,2 ← M2n-1,4
    M2n,3 ← M2n-1,5
    M2n,4 ← X3n
    M2n,5 ← Y3n
    M2n,6 ← Xcn
    M2n,7 ← Ycn
    M2n,8 ← Mn,7

```

восстановительной обработки. Метод требует дальнейшей исследований для адаптации и проверки на реальных поверхностях.

**Работа выполнена в рамках гранта РФФИ*

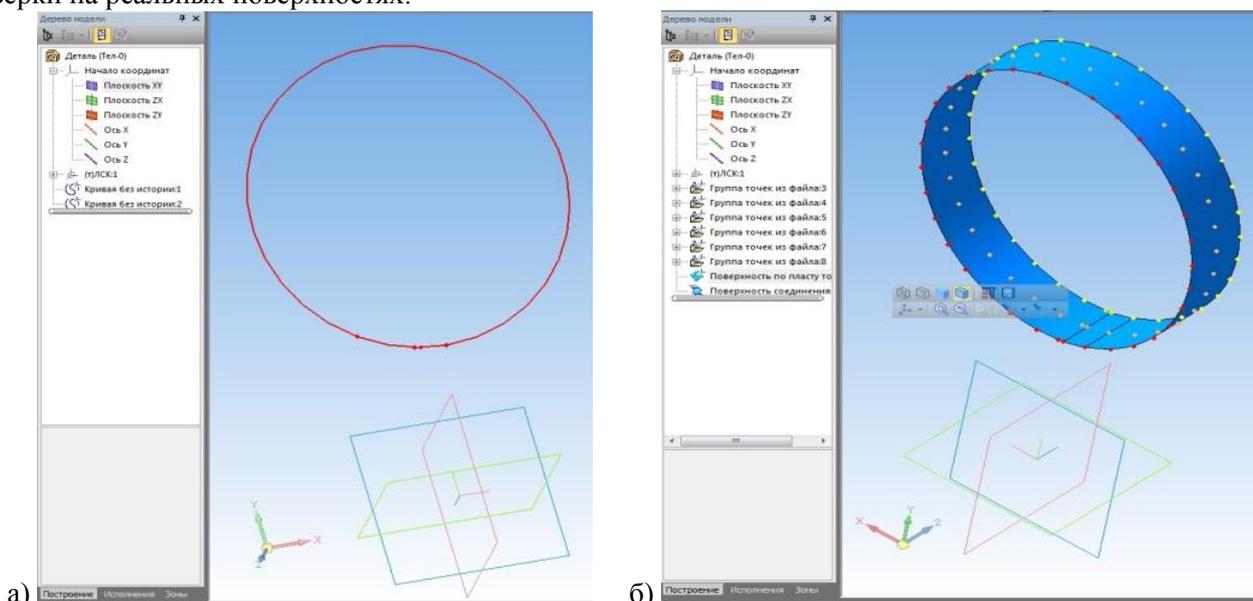


Рис. 5. а – контур профиля наружной поверхности бандажа в одном из сечений; б – воссозданная геометрия наружной поверхности качения бандажа

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Шрубченко И.В., Мурыгина Л.В., Рыбалко В.Ю., Щетинин Н.А. Оптимизация режимов обработки бандажей на специальном стенде. Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2013. № 4. С. 67-73.

2. Шрубченко И.В., Рыбалко В.Ю., Мурыгина Л.В., Щетинин Н.А. К исследованию режимов ленточного шлифования поверхностей качения бандажей и роликов технологических барабанов. Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2013. № 3. С. 77-81.

3. Shrubchenko I.V., Hurtasenko A.V., Voronkova M.N., Murygina L.V. Optimization of cutting conditions for the processing of bandages of rotary cement kilns at a special stand. World Applied Sciences Journal. 2014. T. 31. № 9. С. 1593-1600.

4. Хуртасенко А.В. Технология восстановительной обработки крупногабаритных деталей

с использованием методов активного контроля: монография / А.В. Хуртасенко. – Белгород: Изд-во БГТУ, 2012. – 144 с.

5. Маслова И.В., Хуртасенко А.В. Устройство для определения размеров и формы крупногабаритных объектов. Энергосберегающие технологические комплексы и оборудование для производства строительных материалов: межвуз. сб. ст. / под ред В.С. Богданова. – Белгород, 2011. – 380с. – Вып. X. стр.189-192.

6. Патент РФ № 2007115816/22, 25.04.2007. Погонин А.А., Хуртасенко А.В., Чепчуров М.С. Устройство для измерения геометрических параметров формы крупногабаритных деталей вращения //Патент России № 66511.2007. Бюл. № 25.

7. Патент РФ 2002122502/28, 19.08.2002. Митюрин И.В., Бондаренко В.Н., Погонин А.А. Способ измерения геометрической формы цилиндрической поверхности тела вращения и его поведения в процессе эксплуатации и устройство для его реализации //Патент России № 2227268.2004