

**Литература**

1. Сулимцев И.И. Метод изучения структурообразования металла с целью получения информации для управления процессом затвердевания изделий, кристаллизующихся в условиях двухфазной зоны. Известия МГТУ «МАМИ», 2009, №2(8).
2. Тяжелникова И.Л., Борисов В.И., Борисов В.Т. Кристаллизация цилиндрической ячейки двухфазной зоны. Известия АН СССР, Металлы, 1970, № 5.

**Метод измерения малых сегментов цилиндрических поверхностей**

к.т.н. проф. Суслин В.П., к.т.н. доц. Джунковский А.В.  
 МГТУ «МАМИ»  
 (495) 223-05-23 доб. 1392, labsapr@narod.ru

*Аннотация.* Предложена новая математическая постановка задачи определения параметров цилиндрических поверхностей по результатам их измерений на координатно-измерительных машинах. Функция минимизации дополнена отклонениями получаемых параметров от их номинальных значений, благодаря чему задача становится хорошо обусловленной для измерений цилиндрических поверхностей на малых областях.

*Ключевые слова:* координатно-измерительная машина, плохо обусловленные задачи, метод регуляризации, измерения на малых областях.

Для измерений геометрических параметров деталей в машиностроении используются координатно-измерительные машины. С их помощью можно определять диаметры валов и отверстий, углы конусов, межосевые расстояния и т.п. При этом небольшие ошибки измерений получаются, если геометрические элементы представлены в конструкции своими значительными частями. Однако встречаются детали, в которых геометрические элементы, в том числе цилиндрические поверхности, присутствуют в виде небольших сегментов. При этом возникает необходимость измерения элемента на малой области, что является плохо обусловленной задачей, решение которой получается с большими ошибками.

В [3, 4] рассмотрены задачи измерения малых сегментов окружностей и сфер, показана их плохая обусловленность и на практических примерах получены результаты, демонстрирующие большие ошибки измерений в таких ситуациях. Предложенная в этих работах идея использования метода регуляризации академика А.Н. Тихонова [1, 2] позволяет улучшить обусловленность задач измерения на малых областях и существенно уменьшить ошибки измерений. В данной статье приведены результаты исследований по измерениям малых сегментов цилиндрических поверхностей.

Параметрами, требующими определения при измерении цилиндра, являются: радиус  $R$ , вектор оси  $V=(V_x, V_y, V_z)$  и центральная точка  $C=(x_0, y_0, z_0)$ . Для решения задачи возможно применение разных методик. Мы используем метод наименьших квадратов, основанный на непосредственной минимизации суммы квадратов отклонений измеренных точек от цилиндрической поверхности:

$$F(R, V, a, b, c) = \sum_{i=1}^n \Delta_i^2 \rightarrow \min, \quad (1)$$

где:  $R, V, a, b, c$  – радиус, вектор оси и координаты центральной точки цилиндра;

$\Delta_i = |P_i' - P_i|$ ,  $i=1, 2, \dots, n$  – отклонения измеренных точек от цилиндра;

$P_i = (X_i, Y_i, Z_i)$  – измеренная точка;

$P_i' = (X_i', Y_i', Z_i')$  – точка на цилиндре, соответствующая измеренной.

Реализуя метод регуляризации, дополняем функцию (1) отклонениями параметров от

номинальных значений:

$$\Phi(R, V, a, b, c, w) = F(R, V, a, b, c) + w_1(R - R_{nom})^2 + w_2(a - a_{nom})^2 + w_3(b - b_{nom})^2 + w_4(c - c_{nom})^2 + w_5(V - V_{nom})^2 \quad (2)$$

где:  $F(R, V, a, b, c)$  – функция (1);

$R_{nom}, a_{nom}, b_{nom}, c_{nom}, V_{nom}$  – номинальные значения параметров;

$w$  – коэффициенты регуляризации (веса параметров).

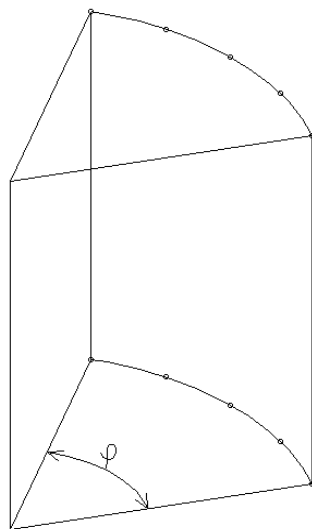
Не обязательно, чтобы все номинальные параметры были задействованы в функции (2). Некоторые из них могут быть неизвестны. Положив для них коэффициенты регуляризации равными нулю, сохраняем общий подход, определенный в функции (2).

Таким образом, возможно следующее задание параметров регуляризации при измерении малых секторов цилиндров:

- 1) задан радиус сектора;
- 2) задана центральная точка;
- 3) задан вектор оси;
- 4) заданы возможные сочетания перечисленных параметров.

Опыт измерений на промышленных предприятиях показывает, что чаще всего на чертеже указан радиус цилиндра, редко – координаты центральной точки, и практически не встречается прямое задание вектора оси цилиндра. Но бывает косвенное задание вектора оси через его перпендикулярность к базовой плоскости. Поэтому вектор оси может участвовать в регуляризации, если установить базовую плоскость как рабочую плоскость системы координат измерений. Что касается центральной точки, то ее положение является плавающим на оси цилиндра, поэтому возможно задание только двух координат этой точки и только тогда, когда ось цилиндра параллельна одной из осей системы координат измерений. В данном исследовании для регуляризации было использовано только номинальное значение радиуса.

Для моделирования измерений были сгенерированы данные на математическом цилиндре с параметрами  $R_{nom}=50$  мм,  $h=100$  мм,  $a_{nom}=0$ ,  $b_{nom}=0$ ,  $c_{nom}=50$ ,  $V_{nom}=(0,0,1)$ . Точки рассчитывались в двух крайних диаметральных сечениях, как показано на рисунке 1.



**Рисунок 1 – Расположение точек на сегменте цилиндра**

В каждом сечении было рассчитано по 5 точек. Точки были рассчитаны для сегментов цилиндра с углом  $\varphi = 5.625, 11.25, 22.5, 45, 90, 180, 360$  градусов. Для создания ошибок в координатах точек был применен генератор случайных чисел с нормальным законом распределения при  $\sigma=0.001$  мм.

Наборы данных с координатами точек обрабатывались измерительной программой так,

как будто они были получены с координатно-измерительной машины. При этом выполнялись два варианта обработки: традиционным методом на основе минимизации функции (1) и новым методом с использованием регуляризации (функция 2).

Результаты моделирования измерений приведены в таблице 1, где  $\varepsilon R$  и  $\varepsilon a$  обозначают отклонение радиуса и координаты  $X$  точки на оси цилиндра от номинальных значений, а  $\varepsilon Form$  – отклонение формы. Отклонения других параметров не включены в таблицу по следующим причинам. Отклонения параметра  $c$  не критично для положения цилиндра в пространстве, так как влияет только на положение точки на оси цилиндра. Отклонение параметра  $b$  (координаты  $Y$  точки на оси) существенно меньше, чем отклонение параметра  $a$ , так как для малых сегментов точки концентрируются возле оси  $X$  и большая ошибка радиуса компенсируется примерно таким же смещением центральной точки по оси  $X$ . Так как высота цилиндра в два раза больше радиуса, точки данных хорошо определяют вектор оси и ошибки компонент этого вектора незначительны.

Таблица 1

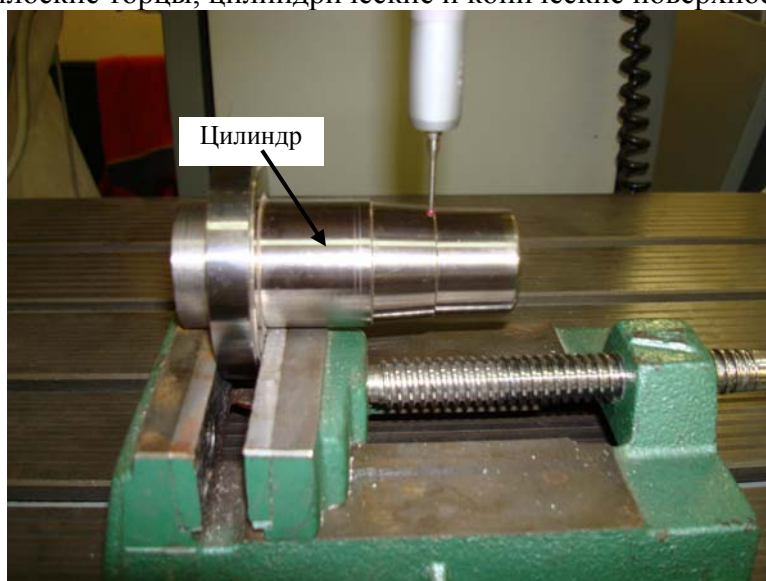
Сегмент, град.	$\varepsilon R$ , мм		$\varepsilon a$ , мм		$\varepsilon Form$ , мм	
	Традиц. метод	Новый метод	Традиц. метод	Новый метод	Традиц. метод	Новый метод
5.625	+0.1671	0.0000	-0.1669	+0.0002	0.0039	0.0037
11.25	-0.1694	+0.0001	+0.1694	+0.0003	0.0032	0.0035
22.50	-0.0177	-0.0002	+0.0171	0.0000	0.0024	0.0024
45.00	+0.0159	+0.0005	-0.0146	+0.0001	0.0031	0.0028
90.00	+0.0003	+0.0002	-0.0002	-0.0002	0.0034	0.0034
180.00	-0.0004	-0.0004	-0.0003	-0.0003	0.0033	0.0033
360.00	-0.0003	-0.0003	-0.0002	-0.0002	0.0041	0.0040

Вероятные ошибки исходных данных составляют  $\pm 0.002$  мм ( $\pm 2\sigma$ ), поэтому удовлетворительным результатом будем считать тот, в котором ошибка определения радиуса находится в этом диапазоне.

На основании принятого критерия можно сделать вывод, что правильные результаты традиционным методом получены только для сегментов 90, 180 и 360 градусов. Начиная с сегмента в 45 градусов и менее ошибки определения параметров становятся недопустимыми, существенно превышая ошибки исходных данных.

Отклонения от номинальных значений параметров, полученных новым методом, очень малы. Максимальное отклонение составляет всего 0.5 мкм. Отклонения формы соответствуют отклонениям формы исходных данных, составляющих от 0.0034 до 0.0044 мм. Это означает, что сегменты цилиндра, построенные новым методом, имея значения параметров, близкие к номинальным, хорошо вписываются в исходные данные. Следовательно, полученные значения параметров можно принять за действительные. Проанализируем результаты традиционного и нового метода для сегмента 22.5 градуса. Традиционным методом получен  $R=49.8306$  мм, новым –  $R=49.9998$  мм, притом что оба метода показали одинаковые отклонения формы 0.0024 мм. С точки зрения качества аппроксимации оба результата равноценны и приемлемы. Но нам известно, что номинальное значение радиуса равно 50 мм, поэтому имеются все основания сделать выбор в пользу второго результата. В этом состоит суть регуляризации: в случае плохо обусловленной задачи, не имеющей единственного решения, используется дополнительная информация, улучшающая обусловленность. В данном случае такой информацией являются номинальное значение радиуса.

В качестве экспериментальной детали для измерений секторов цилиндра был выбран вал, содержащий плоские торцы, цилиндрические и конические поверхности (рисунок 2).



**Рисунок 2 – Измерения вала**

В данном эксперименте проводились измерения секторов 6, 12, 24, 45, 90 и 180 градусов цилиндра, отмеченного на рисунке. Номинальный диаметр цилиндра равен 35 мм, фактический – 35.005 мм. Поэтому номинальный радиус принят равным 17.5025 мм. Для каждого сектора было измерено 10 точек по 5 точек в двух диаметральных сечениях.

Для того чтобы точки измерений располагались в пределах соответствующих секторов, была создана система координат, в которой ось  $Y$  совпадала с осью цилиндра. Соответственно, координата  $X$  точек цилиндра могла изменяться в плюс и минус от оси  $Y$ . В этой системе координат были рассчитаны координаты  $X$  точек измерений для каждого сектора с учетом калиброванного диаметра щупа  $d=1.999$  мм. Измерения выполнялись на координатно-измерительной машине DKM1-300DP, локальная погрешность измерений которой не превосходит 3 мкм. Щуп помещался в позицию измерения точек сечения, с помощью микроподдачи и цифровой индикации позиционировался по оси  $X$  в рассчитанное положение, и затем перемещением щупа вниз происходило измерение точки. Результаты измерений, обработанные традиционным и новым методами, приведены в таблице 2.

**Таблица 2**

Сектор, град.	$\varepsilon R$ , мм		$\varepsilon Form$ , мм	
	Традиц. метод	Новый метод	Традиц. метод	Новый метод
6	+0.3601	0.0000	0.0006	0.0006
12	+0.0569	-0.0004	0.0010	0.0007
24	+0.0498	-0.0003	0.0014	0.0008
45	-0.0065	-0.0002	0.0006	0.0009
90	+0.0011	-0.0001	0.0022	0.0023
180	-0.0001	-0.0001	0.0040	0.0040

Традиционным методом правильные результаты получены для секторов 90 и 180 градусов. Для сектора 45 градусов ошибка определения радиуса велика относительно погрешности измерений и точности исполнения вала, а на меньших секторах она просто недопусти-

ма.

Метод регуляризации позволил получить радиус с отклонением менее 1 мкм от номинального значения на всех секторах цилиндра. Небольшие отклонения формы при этом подтверждают хорошее качество аппроксимации измеренных точек цилиндрическими секторами и приемлемость полученных значений радиуса.

Отметим абсолютное совпадение результатов нового и традиционного методов при измерении полуцилиндра (сектора 180 градусов). Высокая точность результата, полученного традиционным методом, говорит о хорошей обусловленности задачи измерения такого сектора, а также о том, что метод регуляризации не ухудшает точность ее решения.

Проведенные вычислительные эксперименты и реальные измерения на координатно-измерительной машине подтверждают возможность применения метода регуляризации при измерениях малых сегментов цилиндрических поверхностей.

#### Литература

1. Тихонов А.Н. О решении некорректно поставленных задач и методе регуляризации // ДАН СССР. 1963. Т.151, №3. С.501-504.
2. Тихонов А.Н., Арсенин В.Я. Методы решения некорректных задач. М.: Наука, 1979. 288 с.
3. Суслин В.П., Джунковский А.В., Шутер М.Г. Новый метод определения геометрических параметров объектов при измерениях на малых областях// Законодательная и прикладная метрология. 2008, №6, С.39-42.
4. Суслин В.П., Джунковский А.В. Применение метода регуляризации для решения плохо обусловленных задач координатных измерений // Измерительная техника. 2009, №7, с.23-26.

#### **Технология накатывания резьб большой длины**

д.т.н. проф. Тимирязев В.А., к.т.н. доц. Хостикоев М.З., Чертов Ф.Н.  
МГТУ «СТАНКИН», РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина  
8 905 573 09 95, 8 985 923 50 15

*Аннотация.* Изложена технология накатывания тангенциальными головками резьбы большой длины, которая не ограничивается шириной резьбовой части роликов, как это имеет место при обычной накатке. Это достигается изменением геометрии накатывающих роликов, определенной установкой их относительно детали и комбинацией выполняемых рабочих подач.

*Ключевые слова:* накатывание резьбы, тангенциальные резьбонакатные головки, свинчивание, аксиальная подача.

Расширение номенклатуры резьб, повышение требований к качеству и экологичности процессов обработки потребовали создания новых способов и процессов резьбообразования. В последние годы получает промышленное распространение способ высокопроизводительной безотходной (бесстружечной) обработки резьб накатыванием при использовании инструментов, получивших наименование тангенциальных резьбонакатных головок и реализующих обработку, в том числе, в условиях автоматизации процесса при эффективном сочетании с другими видами обработки на высоких режимах.

Вместе с тем дальнейшее развитие этого способа обработки резьб ограничивается его общим органическим недостатком: ограниченными технологическими возможностями способа, обусловленными возможностью обработки лишь коротких резьб, длина которых не превышает ширину накатывающих роликов, устанавливаемых в тангенциальную резьбонакатную головку. Вследствие этого способ не может быть реализован при обработке большой номенклатуры резьбовых деталей со средней и большой длиной резьбы (со средней и большой длиной свинчивания) и осуществляется лишь на резьбовых деталях с короткой резьбой