

УДК 621.9.02

ШЛИФОВАНИЕ ДЛИННЫХ ОТВЕРСТИЙ С ВИНТОВОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ

© Андрей Эрикович Волков, Азат Фаритович Газизов,
Владимир Иванович Медведев

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Московский Государственный Технологический Университет "СТАНКИН", Москва, Россия
volkov411@gmail.com,

***Аннотация.** Предложена математическая модель процесса шлифования внутренней резьбы длинных резьбовых деталей абразивным кругом без наклона инструментального шпинделя. Представлена методика расчета диаметра и формы инструмента, которые необходимы для получения требуемой винтовой поверхности с заданной точностью. С помощью описанного алгоритма технологи имеют возможность оценить точность изготовления внутренней резьбы заданным шлифовальным кругом или ответить на вопрос о существовании инструмента для шлифования внутренней резьбы с заданной точностью изготовления. Даны примеры расчета технологических параметров шлифования резьбы.*

***Ключевые слова:** внутренняя резьба, шлифовальный круг, погрешность обработки, осевое сечение впадины резьбы*

GRINDING OF LONG HOLES WITH HELICAL SURFACE

© A.E. Volkov, A.F. Gazizov, V.I. Medvedev

Moscow State University of Technology «STANKIN», Moscow, Russia

***Abstract.** A mathematical model of grinding of a long female thread using abrasive wheel without tilting the tool spindle is proposed. A numerical technique and an algorithm for determining the diameter and the shape of the tool necessary to obtain the desired helical surface with a given accuracy is presented. Using the described algorithm the technologists have the opportunity to evaluate the accuracy of manufacturing of internal thread using a grinding wheel of given diameter or to answer the question of existence of tool for grinding internal thread with a given precision. Examples of calculation of technological parameters of grinding thread are given.*

***Keywords:** female thread, grinding tool, error processing, an axial section of the thread*

Введение.

Резьбы применяются для соединения двух и более деталей и для передачи движения в машинах и механизмах [1]. Наиболее распространенным видом цилиндрической резьбы является метрическая резьба. Кроме метрической также применяются трубная, круглая и трапецеидальная резьбы. Одним из основных методов получения точной резьбы является шлифование абразивными кругами.

Распространен процесс шлифования, при котором шлифовальный круг располагается к детали под углом подъема резьбы [2]. Профилирование поверхности резьбы осуществляется при быстром вращении круга и при одновременном медленном вращении детали с подачей вдоль оси на величину шага резьбы за один оборот. Такой метод обычно применяется для получения точной резьбы на сравнительно коротких резьбовых деталях, например, резьбовых пробках - калибрах, резьбовых роликах и т.д.

На длинных резьбовых деталях необходимо использовать метод обработки без наклона инструментального шпинделя. Целесообразность такого способа обработки обосновывается тем, что зубошлифовальный станок будет обладать большей жесткостью конструкции,

если он не имеет дополнительной степени свободы для наклона инструментального шпинделя.

Цель настоящей статьи – обоснование возможности прецизионной обработки внутренней резьбы на более длинных резьбовых деталях. Для этого будет рассмотрен процесс шлифования абразивным кругом без наклона инструментального шпинделя.

Постановка задачи и план решения. Рассмотрим процесс шлифования (рис.1) однозаходной внутренней резьбы с помощью шлифовального круга, представляющего собой тело вращения. Ось инструмента параллельна оси отверстия гайки и расположена на расстоянии A от нее. Заготовка гайки совершает винтовое движение, складывающееся из вращательного движения вокруг оси с угловой скоростью ω и поступательного движения вдоль оси с линейной скоростью $v = r\omega$. Здесь r – винтовой параметр, связанный с шагом s резьбы соотношением

$$r = \pm s/\pi/2. \quad (1)$$

Знак плюс в (1) соответствует правой резьбе, знак минус – левой.

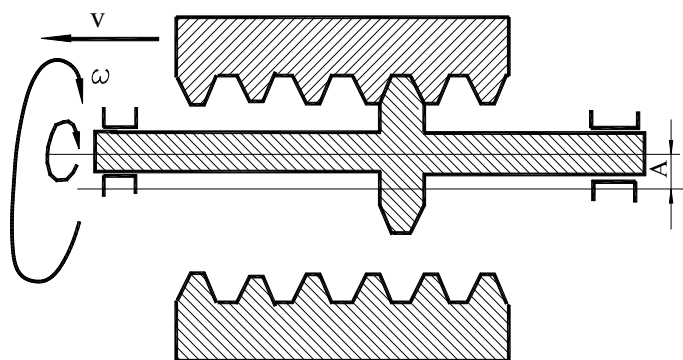


Рис. 1. Схема шлифования внутренней резьбы

Обработка производится двусторонним способом. Боковые зазоры за счет резьбы на гайке не предусматриваются. Боковые зазоры за счет резьбы на гайке не предусматриваются. Задача состоит в расчете формы криволинейной части образующей шлифовального круга и моделировании процесса обработки резьбы для контроля возможности ее изготовления с требуемой точностью с помощью инструмента заданного диаметра.

План решения задачи состоит из нескольких этапов.

1. Описание требуемого контура осевого сечения впадины винта.
2. Построение боковой поверхности впадины резьбы путем придания винтового движения контуру осевого сечения впадины.
3. Определение образующей поверхности шлифовального круга – кривой L , которая является линией касания боковой поверхности впадины резьбы и поверхности шлифовального круга.
4. Определение поверхности резьбы путем моделирования обработки шлифовальным кругом заданного профиля.
5. Расчет погрешности обработки путем сравнения поверхности, полученной моделированием обработки, с требуемой поверхностью.

Описание алгоритма решения задачи. Рассмотрим алгоритм на примере шлифования метрической резьбы.

Этап 1. Контур осевого сечения впадины (рис.2) определим в системе координат r, z . Ось z направлена вдоль оси гайки. Если смотреть в положительном направлении вдоль оси z , то вращение заготовки происходит по часовой стрелке. Начало системы координат выбрано

на оси r симметрии впадины. В общем случае будем предполагать, что поверхность осевого сечения каждой из двух сторон впадины состоит из отрезка прямой с концами в точках (z_0, r_0) и (z_1, r_1) и двух дуг окружностей радиусов ρ_1 и ρ_2 , центры которых находятся в точках $(0, r_c)$ и (z_{c1}, r_{c1}) . Это имеет место в случае трубной резьбы и круглой резьбы. В случае метрической, дюймовой унифицированной резьбы или трапецидальной резьбы окружность радиусом ρ_2 отсутствует ($\rho_2 = 0$).

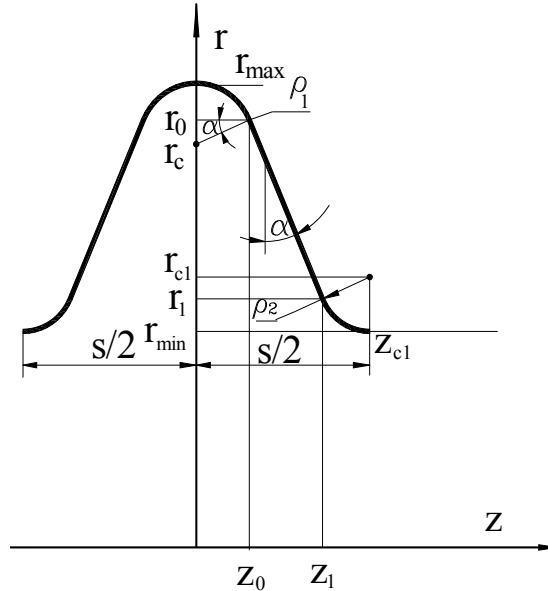


Рис. 2. Контур осевого сечения впадины резьбы общего вида

Контур осевого сечения впадины определяется соотношением (рис.2)

$$z(r) = \begin{cases} \pm (z_0 + (r_0 - r)tg\alpha), & r_1 \leq r \leq r_0; \\ \pm \sqrt{\rho_1^2 - (r - r_c)^2}, & r > r_0; \\ \pm (z_{c1} - \sqrt{\rho_2^2 - (r - r_{c1})^2}), & r < r_1. \end{cases} \quad (2)$$

Знак плюс в (2) соответствует правой стороне, знак минус – левой стороне. Будем называть правой стороной впадины ту сторону, у которой точки границы осевого сечения имеют большие по величине значения координаты z .

Боковая поверхность впадины для метрической резьбы состоит из отрезка прямой и дуги окружности, имеющих в точке сопряжения общую касательную. Профиль определяется тремя исходными данными:

- внешним диаметром d резьбы;
- шагом s резьбы;
- углом α профиля.

Параметры резьбы в наиболее общем виде, указанные на рис.2 и содержащиеся в соотношении (2) для рассматриваемых типов резьбы, определяются простыми соотношениями, которые мы опускаем.

Этап 2. Свяжем с заготовкой детали неподвижную ортогональную декартову систему Охуз (рис.3). Ось z рассматриваемой неподвижной системы координат – ось детали. Боковая поверхность впадины резьбы в этой системе представляет собой множество точек, координаты которых вычисляются так

$$\vec{r}^* = \vec{r}^*(r, \zeta) = \begin{bmatrix} x^* \\ y^* \\ z^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -r \sin \zeta \\ r \cos \zeta \\ z(r) + p\zeta \end{bmatrix}, \quad (3)$$

где $z(r)$ – функция, определяемая соотношением (2); ζ – полярный угол, отсчитываемый в плоскости $z = 0$ от оси y до проекции точки поверхности на плоскость.

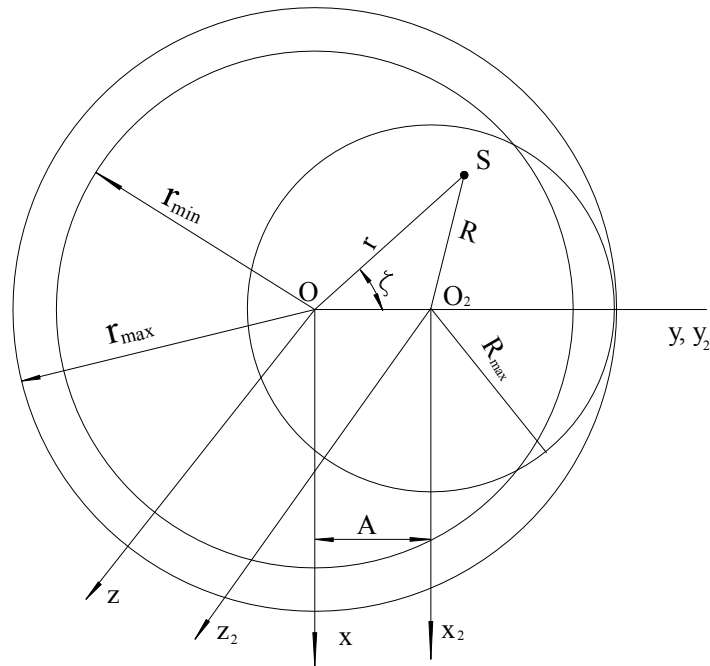


Рис. 3. Используемые системы отсчета

Этап 3. Шлифовальный круг определим как тело вращения с осью z_2 , параллельной оси z и отстоящей от нее вдоль оси y на расстоянии

$$A = r_{\max} - R_{\max}.$$

Круг касается поверхности (3) резьбы вдоль некоторой линии L

$$\tilde{x}(r) = x^*(r, \zeta(r)); \quad \tilde{y}(r) = y^*(r, \zeta(r)); \quad \tilde{z}(r) = z^*(r, \zeta(r)).$$

В процессе обработки линия L неподвижна в пространстве и представляет собой образующую поверхности инструмента, которую удобно определить функцией

$$z = z(R), \tag{4}$$

где

$$R = \sqrt{r^2 + A^2 - 2rA \cos \zeta} \tag{5}$$

– расстояние от оси z_2 до точки S линии L .

Нормаль \vec{v} к поверхности вращения лежит в осевой плоскости и перпендикулярна вектору \vec{N} нормали к этой плоскости. Кроме того, на линии L вектор \vec{v} нормали коллинеарен вектору \vec{n} нормали к поверхности резьбы. Следовательно, вектор \vec{n} перпендикулярен вектору \vec{N}

$$(\vec{n}, \vec{N}) = 0. \tag{6}$$

Вектор \vec{N} может быть представлен в виде [3]

$$\vec{N} = \vec{r}_S \times \vec{g} = \begin{bmatrix} A - y^* \\ x^* \\ 0 \end{bmatrix}, \tag{7}$$

где \vec{g} – орт оси z_2 , а радиус-вектор \vec{r}_S проведен из точки O_2 в точку S линии L .

В качестве вектора \vec{n} возьмем векторное произведение векторов $\frac{\partial \vec{r}^*}{\partial r}$ и $\frac{\partial \vec{r}^*}{\partial \zeta}$, лежащих в плоскости, касательной к поверхности впадины,

$$\vec{n} = \frac{\partial \vec{r}^*}{\partial r} \times \frac{\partial \vec{r}^*}{\partial \zeta} = \begin{vmatrix} \vec{i} & \vec{j} & \vec{k} \\ -\sin \zeta & \cos \zeta & \frac{\partial z}{\partial r} \\ -r \cos \zeta & -r \sin \zeta & p \end{vmatrix} = \begin{bmatrix} p \cos \zeta + r \sin \zeta \frac{\partial z}{\partial r} \\ p \sin \zeta - r \cos \zeta \frac{\partial z}{\partial r} \\ r \end{bmatrix}, \quad (8)$$

$$\frac{\partial z}{\partial r} = \begin{cases} -\operatorname{tg} \alpha, & r_1 \leq r \leq r_0; \\ -\frac{r - r_c}{\sqrt{\rho_1^2 - (r - r_c)^2}}, & r > r_0; \\ \frac{r - r_c}{\sqrt{\rho_2^2 - (r - r_{c1})^2}}, & r < r_1. \end{cases} \quad (9)$$

Соотношение (9) дано для правой стороны осевого сечения впадины. Равенство (6) с учетом (7) – (9) дает уравнение вида

$$f(r, \zeta) = 0. \quad (10)$$

Функция f определена в области

$$r_{\min} \leq r \leq r_{\max}; \quad \zeta \leq \zeta_{\max},$$

где r_{\min} – внутренний радиус резьбы. При $r = r_{\max}$ функция f определена в одной точке $\zeta = 0$, при этом $R = R_{\max}$. Значение ζ_{\max} рассчитывается из равенства (5), если $R = R_{\max}$. Уравнение (10) позволяет по заданному r рассчитать угол $\zeta = \zeta(r)$, определяющий точку кривой L . Радиус R точки касания в цилиндрической системе инструмента определяется с помощью соотношения (5). Координата z^* точки касания рассчитывается с использованием соотношения (3).

Функция (4) задает, с одной стороны, пространственную кривую L , а, с другой стороны, осевое сечение шлифовального круга.

Этап 4. Определение поверхности резьбы путем моделирования обработки шлифовальным кругом заданного профиля [4].

Пусть известна функция $z^* = z^*(R)$, определяющая осевое сечение инструмента в неподвижной системе $O_2x_2y_2z_2$, связанной с инструментом. Инструмент считается неподвижным, поскольку движение резания для нашей задачи несущественно. Найдем осевое сечение боковой поверхности резьбы в виде функции $z_1 = z_1(r)$, где z_1 – координата, определенная в подвижной системе $O_1x_1y_1z_1$, совпадающей в начальном положении с системой координат $Oxyz$ (рис.3) и совершающей винтовое движение относительно нее. Винтовое движение состоит из перемещения точки O_1 вдоль оси z и вращения вокруг оси z , определяемого углом поворота ζ . Система $O_1x_1y_1z_1$ неподвижна относительно заготовки. Координата z_1 связана с координатой z_2 соотношением

$$z_1 = z_2 - p\zeta.$$

Осевая координата точки пересечения боковой поверхности резьбы с цилиндром радиусом r , ось которого совпадает с осью z_1 , и плоскостью $O_1y_1z_1$ может быть представлена следующим образом

$$z_1(r) = \max_{R, \zeta} (z^*(R) - p\zeta),$$

где R – расстояние от точки инструмента, профилирующей указанную выше точку заготовки, до оси z_2 . При этом переменные R и ζ связаны соотношением (5). Из (5) следует, что при заданном значении R угол ζ^* , при котором значение функции $z^*(R) - p\zeta$ максимально, определяется соотношением

$$\cos \zeta^* = \frac{R^2 - r^2 - A^2}{2rA}.$$

Поэтому

$$z_1(r) = \max_R (z^*(R) - p\zeta^*(R)).$$

С помощью рассмотренного алгоритма определяются значения z_{1i} функции $z_1(r)$ для серии значений от r_{\max} до r_{\min} .

Этап 5. Расчет погрешности обработки путем сравнения поверхности, полученной моделированием обработки, с требуемой поверхностью.

Далее проводится сравнение полученных значений z_{1i} со значениями $z(r_i)$, рассчитанными с помощью соотношения (2). Таким образом, определяется максимальная погрешность шлифованной поверхности резьбы с использованием рассчитанного инструмента.

Следует отметить, что моделирование процесса обработки проводится для контроля возможности изготовления резьбы с требуемой точностью инструментом заданного диаметра. Уменьшение диаметра D инструмента ведет к повышению точности обработки. Чем больше шаг s резьбы, тем меньше максимальный диаметр инструмента, который может быть использован для обеспечения одинаковой точности обработки впадины.

Примеры расчета и анализ результатов. Приведенный выше алгоритм реализован в виде программного модуля для персонального компьютера, с помощью которого рассчитано большое количество примеров для различных видов резьбы.

Пример 1. Максимальный допустимый диаметр инструмента для шлифования метрической резьбы при допустимом отклонении 1 мкм обычно лежит в пределах

$$0,35d < D < 0,8d. \quad (11)$$

С увеличением шага s резьбы величина D уменьшается. Рассмотрим шлифование метрической резьбы со следующими параметрами: $d = 14$ мм, $s = 0,5$ мм, $\alpha = 30^\circ$. Возьмем инструмент диаметром, близким к верхней границе области (11), а именно $D = 11$ мм. В результате синтеза (этап 3) получаем инструмент, половина осевого сечения которого изображена на рис.4а. Точкой обозначена граница двух частей образующей поверхности инструмента. Первая часть формирует днище впадины, осевым сечением которого является окружность, а вторая часть образующей формирует боковую поверхность впадины, осевое сечение которой прямолинейно.

Отличие полученной функции $z(r)$ от требуемой функции (2) не превышает 0,00000064 мм и является, по-видимому, погрешностью расчета. Осевое сечение впадины, полученное при моделировании процесса обработки, дано на рис.5.

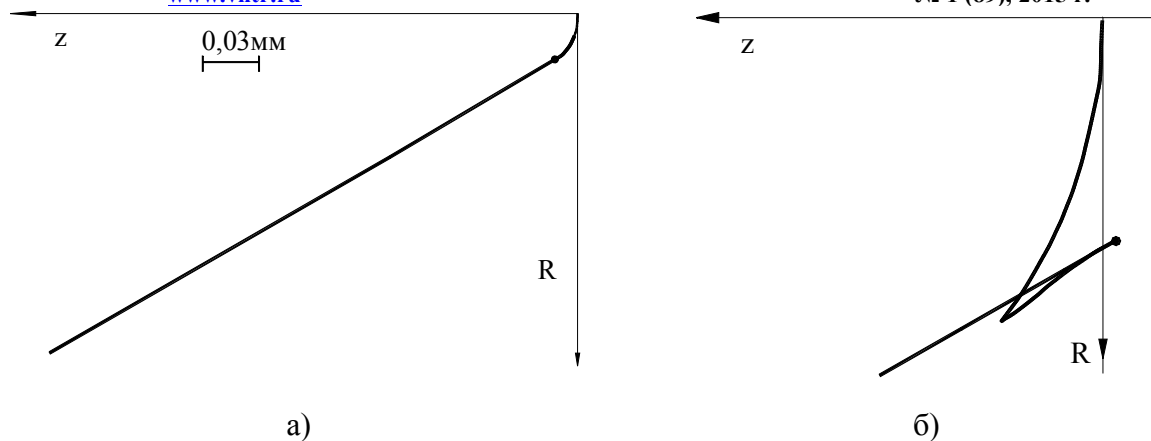


Рис.4. Половина осевого сечения инструмента для примера 1 (а) и нереализуемая форма инструмента для примера 2 (б)

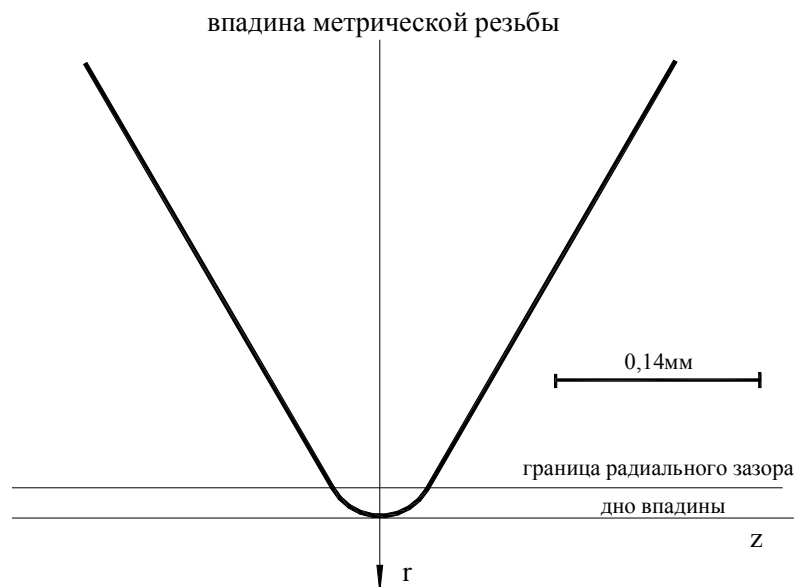


Рис.5. Осевое сечение впадины резьбы для примера 1

Пример 2. Если рассмотреть резьбу с теми же параметрами, но с максимальным шагом $s = 2$ мм, предусмотренным ГОСТ 25705-81, то при прежнем диаметре $D = 11$ мм шлифовального круга синтез приводит к форме инструмента (рис.4б), получить которую невозможно. Различие примеров 1 и 2, отраженных соответственно на рис.4а и рис.4б, заключается в следующем. Пусть R – расстояние той точки круга от его оси, которая профилирует точку боковой поверхности резьбы, находящуюся на расстоянии r от оси гайки. В примере 1 в отличие от примера 2 величина R монотонно уменьшается с уменьшением r . В алгоритме предусмотрена подобная проверки и в случае отрицательного результата диаметр D инструмента уменьшается, после чего предпринимается новая попытка построения осевого сечения шлифовального круга. Оказалось, что для примера 2 максимальный возможный диаметр инструмента $D = 8,0$ мм.

В табл.1 даны значения максимально возможного диаметра D_{\max} инструмента, соответствующих ему диаметра D_{\min} нижней границы рабочей поверхности инструмента и ширины b_{\min} его вершинной ленточки для некоторых неблагоприятных сочетаний параметров d и s из номенклатуры, предусмотренной ГОСТ 24705-81. Неблагоприятными сочетаниями будем называть такие сочетания d и s , при которых при одном и том же

значении d максимальна величина шага s , а также и величина угла $\lambda = \arctg(s/\pi/d)$ подъема резьбы.

Таблица 1

d	мм	3,0	6,0	18,0	24,0	30,0	36,0	42,0	48,0	56,0	90,0
s	мм	0,5	1,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0	5,5	6,0
D_{max}	мм	1,61	3,23	10,3	14,5	18,6	22,7	26,5	30,0	37,0	63,0
D_{min}	мм	1,02	2,05	7,3	11,1	14,5	18,1	21,3	24,1	30,5	55,8
b_{min}	мм	0,38	0,76	1,9	2,3	2,6	3,0	3,4	3,8	4,1	4,5
λ	град	3,04	3,04	2,53	2,28	2,13	2,03	1,95	1,90	1,79	1,22
D_{max}/d	-	0,54	0,54	0,57	0,61	0,62	0,63	0,63	0,63	0,66	0,70

При больших значениях λ отношение D_{max}/d мало. Это приводит к необходимости использования шлифовальных кругов малого внешнего диаметра D с еще меньшим по сравнению D диаметром нижней границы рабочей поверхности, а следовательно, с малым диаметром вала. Шлифование внутренней метрической резьбы с малым диаметром требует использования шлифовального круга малого диаметра, имеющего вал малого диаметра и малой жесткости.

Поскольку трубная резьба отличается малым шагом и, следовательно, малым углом подъема резьбы при большом угле профиля ($27,5^\circ$), то для шлифования можно использовать круг относительно большого диаметра. Например, для обработки резьбы самого малого из предусмотренных ГОСТ 6357-81 диаметров ($d = 7,723$ мм) с шагом $s = 0,907$ мм может быть использован шлифовальный круг диаметра $D = 5,4$ мм. Диаметр нижней границы рабочей поверхности не должен превышать $4,24$ мм, что технически осуществимо.

Параметры инструмента, необходимые для обработки круглой резьбы из номенклатуры DIN 405 указаны в табл.2.

Таблица 2

d	мм	12,254	14,318	20,318	34,318	40,423	70,423	105,635	150,635	200,635
s	мм	2,540	3,175	3,175	3,175	4,233	4,233	6,350	6,350	6,350
D_{max}	мм	3,9	4,4	7,0	16,0	17,7	39,5	60,0	97,0	140,4
D_{min}	мм	1,36	1,30	3,82	12,82	13,47	35,25	53,64	90,64	134,10

Не все типоразмеры трапецидальной резьбы, регламентированные ГОСТ 24738-81, могут быть изготовлены с высокой точностью. Расчеты показывают, что с ростом диаметра D шлифовального круга увеличивается размер переходной поверхности, и она не всегда может разместиться в области, предназначенной для радиального зазора. Это приводит к росту погрешности обработки. Для уменьшения размера переходной кривой необходимо уменьшить диаметр D шлифовального круга. Это подтверждается зависимостью максимальной погрешности Δz от D , указанной в табл.3. Таблица составлена для резьбы диаметром $d = 22$ мм с шагом $s = 5$ мм. Начиная с некоторого значения $D \approx 12,7$ мм, переходная поверхность лежит внутри радиального зазора, и теоретическая погрешность обработки становится равной нулю.

Таблица 3

D	мм	15,4	14,4	14,0	13,6	13,2	13,0	12,7
Δz	мм	0,0135	0,0042	0,0022	0,0009	0,0002	0,00006	0,0000000

Однако для точного изготовления резьбы для некоторых типоразмеров требуются круги с чрезвычайно малыми (< 2 мм) значениями D_{\min} , при которых шлифовальный круг практически невозможно закрепить. Об этом свидетельствует табл.4 значений функций $D_{\min}(D)$ и погрешности $\Delta z(D)$ для резьбы прежнего диаметра ($d = 22$ мм), но с большим шагом $s = 8$ мм.

Таблица 4

D	мм	9,5	10,0	10,5	11,0	11,5	12,0	12,5
D_{\min}	мм	0,130	0,75	1,38	2,03	2,70	3,39	4,12
Δz	мм	0,0036	0,0067	0,0110	0,0167	0,0240	0,0330	0,0450

Установлено, что возможна обработка всех типоразмеров резьбы, предусмотренных ГОСТ 24738-81 в диапазоне $12 \text{ мм} \leq d \leq 150 \text{ мм}$ с допустимой погрешностью $0,001$ мм, причем $D_{\min} > 3,0$ мм. Исключение составляют резьбы с параметрами

$$d = 22 \text{ мм}, 24 \text{ мм}, 26 \text{ мм}, s = 8 \text{ мм} \quad \text{и} \quad d = 30 \text{ мм}, 32 \text{ мм}, 34 \text{ мм}, s = 10 \text{ мм}.$$

Однако при допустимой погрешности $0,03$ мм возможна обработка всех типоразмеров трапецеидальной резьбы, предусмотренных ГОСТ 24738-81.

Заключение. Разработано математическое и программное обеспечение для расчета технологических параметров шлифования внутренней резьбы. Это позволило обосновать принципиальную возможность шлифования без наклона инструментального шпинделя длинномерных деталей, а также значительной части типоразмеров однозаходной внутренней резьбы: треугольной метрической, унифицированной дюймовой, трубной, круглой и трапецеидальной. С помощью описанного алгоритма технологи имеют возможность оценить точность изготовления внутренней резьбы заданным шлифовальным кругом или ответить на вопрос существования инструмента для шлифования внутренней резьбы с заданной точностью изготовления.

Список литературы

1. Косарев В.А., Гречишников В.А., Дымов М.С. Определение профиля исходной инструментальной поверхности при обработке внутренних резьб инструментом с планетарным движением // СТИН. - 2011. - № 3. - С. 28-32.
2. Волков А.Э., Газизов А.Ф., Дзюба В.И., Медведев В.И. Шлифование внутренней резьбы без наклона инструментального шпинделя // Проблемы машиностроения и надежности машин, № 5, 2014. – С.85-92.
3. Волков А.Э., Медведев В.И. Проектировочные и технологические расчеты конических передач с круговыми зубьями: учеб. пособие – М.: Изд-во МГТУ «Станкин», 2007. - 151 с.
4. Volkov A.E., Gazizov A.F., Dzyuba V.I., Medvedev V.I. Grinding of the Inner Thread without Tilt of the Tool Spindle // Journal of Machinery Manufacture and Reliability, 2014, Vol. 43, No. 5, pp. 422–428.