

Точное точение конических и сферических поверхностей на станках с ЧПУ.

Автор: Юрий Владимирович Крыленко (Yuri Krylenko)

e-mail: info@yktechinfo.com

Дата первой публикации: 2020/07/04

Дата последнего изменения: 2022/01/09

Число правок: 2

Аннотация:

В данной статье рассматривается компенсация на радиус инструмента для токарной обработки. Объясняется суть явления, приводится вывод формул для расчета поправок, фрагменты программ для точения деталей с коническими и сферическими поверхностями. В Приложении 02 приведены формулы поправок для всех возможных случаев геометрии.

Ключевые слова:

компенсация на радиус инструмента, точение конуса на станке с ЧПУ, точение сферы на станке с ЧПУ.

Содержание

Суть явления.	с.1
Вывод формул для поправок на радиус вершины резца для конических поверхностей (на примере наружного конуса).	с.6
Внутренний конус (расточка).	с.13
Точное точение сферических поверхностей.	с.17
Приложение 01. Меры угла, перевод величин, корректный расчет.	с.23
Приложение 02. Свод формул для поправок для всех случаев точения.	с.26
Список литературы.	с.27
Англоязычная терминология.	с.28

Суть явления.

Поводом для написания данной статьи явился случай изготовления конуса Морзе на станке с ЧПУ. После двух неудачных попыток на станке одного уважаемого производителя с использованием штатных средств G42 / G40 пришлось разбираться в сути явления и писать программу, задавая контур детали с учетом поправок на радиус вершины резца. К немалому удивлению, автору статьи не удалось обнаружить подробного систематического изложения материала по данному вопросу даже в англоязычной литературе. Как говорят в науке: "чтобы понять термин – нужно знать его историю". В данном случае, чтобы избежать возможных неточностей при точении,

необходимо знать формулы для поправок на радиус вершины резца, понимать – как они были получены, уметь применять их для конкретных деталей.

В данной статье рассматривается только коррекция на радиус инструмента для токарной обработки. Остальные типы коррекций не рассматриваются:

а) на радиус (диаметр) инструмента (для фрезерной обработки).

б) на длину инструмента (для фрезерной обработки).

Как вам доподлинно известно, станки с ЧПУ позволяют изготавливать детали с невероятной точностью. Ну, вот, например, параметры точности для станка HAAS серии TL: точность позиционирования: ± 0.01 мм, повторяемость: ± 0.005 мм. При точении простых деталей (без конических, сферических и криволинейных поверхностей) проблем с точностью изготовления не возникает (диаметр и длину цилиндрических поверхностей можно точно измерить). Но, как это всегда бывает в природе, при возникновении "нелинейности" ситуация усложняется. Кратко опишем возникающие ошибки при точении, если не использовать коррекцию на радиус вершины резца.

На Рис.01 показаны точки А и В, в которых выполняется касание резца с деталью либо щупом при привязке.

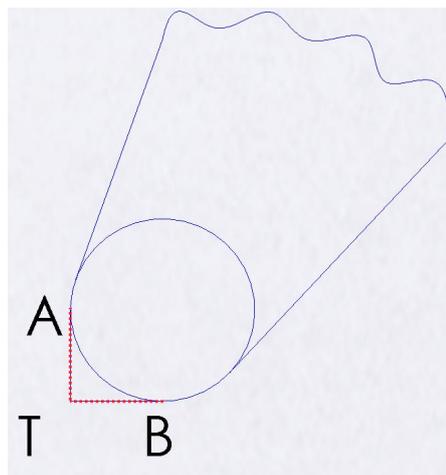
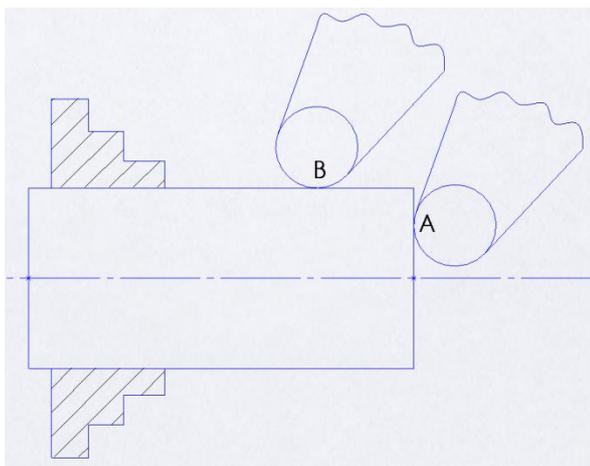


Рис.01 Привязка резца касанием. Точка А кромки резца – касание торца детали, Т. точка В кромки резца – касание боковой поверхности детали.

На резце условно изображена окружность с радиусом, равным радиусу вершины резца. Теперь компьютер станка с ЧПУ, при выполнении программы (G01 X, Z), будет позиционировать резец так, чтобы в заданную координату попала точка Т. В англоязычной литературе ее называют Theoretical Tool Tip (ТТТ) – теоретическая точка инструмента. Она не принадлежит кромке резца (Рис.02).

При изготовлении простых деталей (Рис.03) единственными неточностями, которые вы сможете обнаружить, будут:

- а) Несовпадение длин фасок. Допустим, в программе задана фаска 1 x 1 мм, а при замере окажется меньше.
- б) Несовпадение радиусов при круговой интерполяции (остается лишний материал).

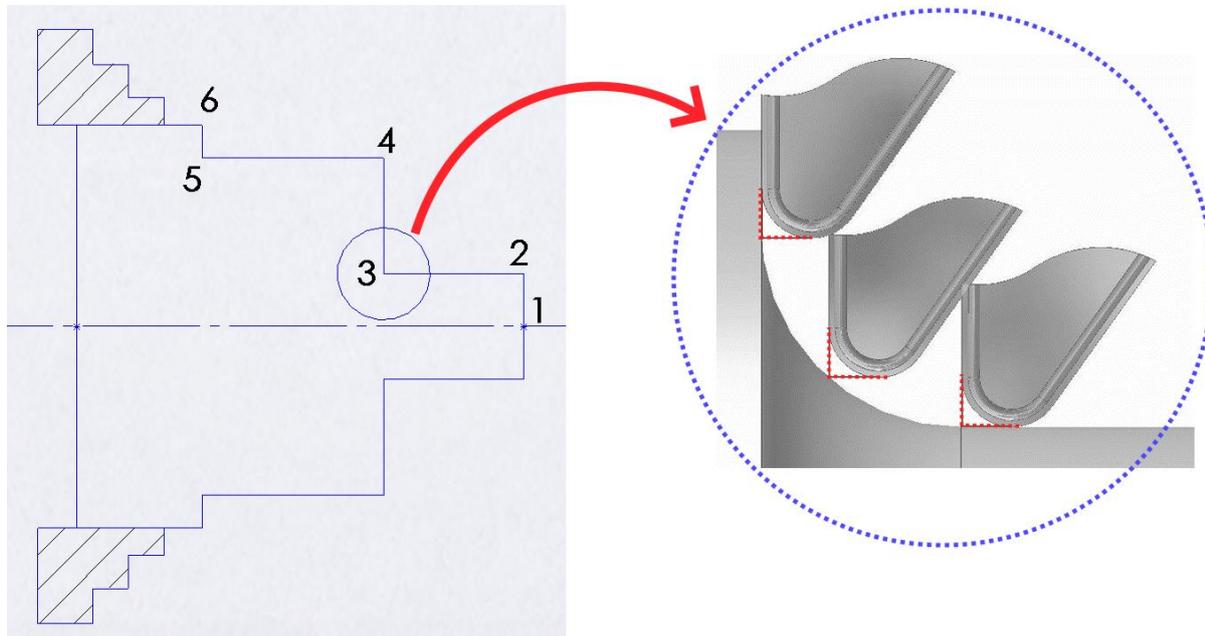


Рис.03 Пример простой детали без конических и сферических поверхностей.

Теперь, предположим, нам необходимо выточить вал с конусом Морзе, который будет сопрягаться с ответной деталью (Рис.04).

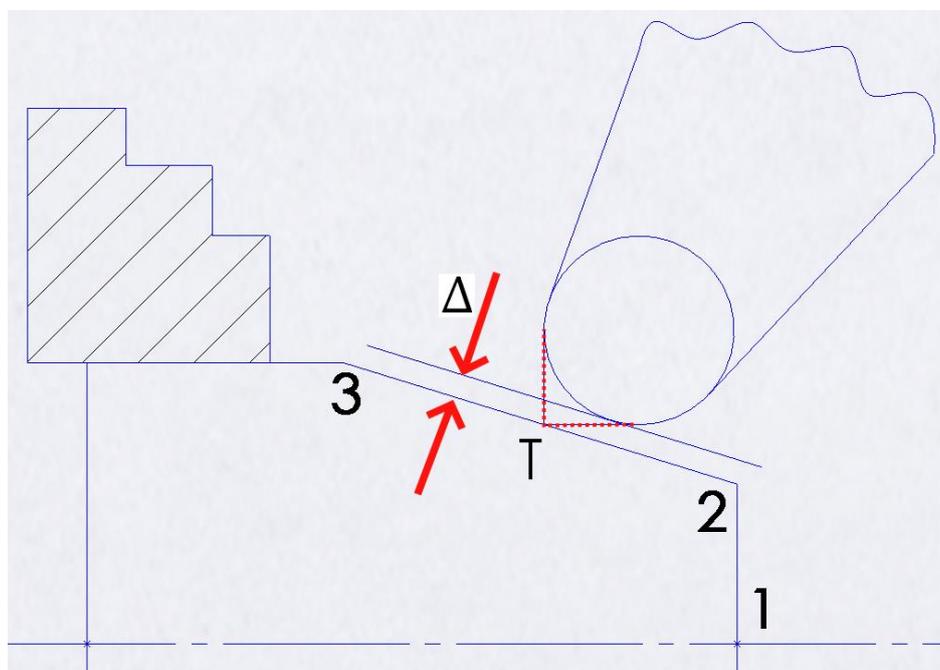


Рис.04 Точение наружного конуса 2-3 без использования коррекции на радиус вершины резца.

Как видно из Рис.04, если выполнить чистовой окончательный проход по запрограммированному контуру 1-2-3 без учета радиуса вершины резца, то движение резца будет таким, чтобы по контуру 1-2-3 двигалась теоретическая точка инструмента Т. Это приведет к тому, что останется лишний материал Δ. Деталь не станет в ответную! Вот вам и высокоточные станки с ЧПУ!

Рассмотрим более сложную деталь (Рис.05).

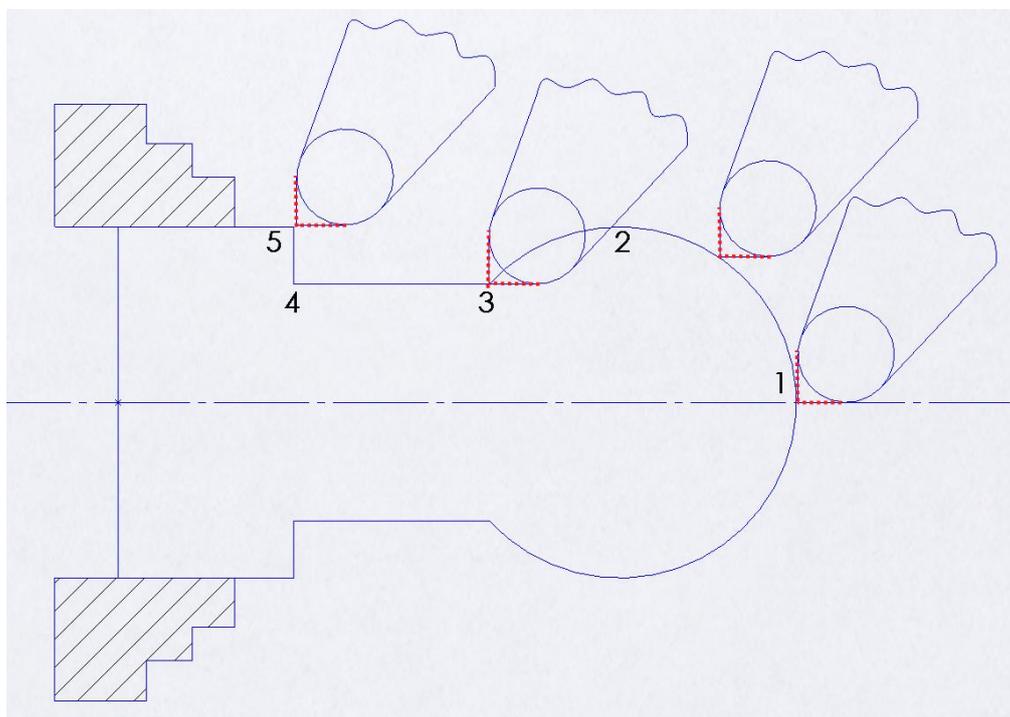


Рис.05 Неточности при окончательном чистовом проходе контура 1-2-3-4-5 правым резцом. На участке 1-2 остается лишний материал, на участке 2-3 происходит "зарез" детали.

Допустим, выполняется окончательный чистовой проход резцом по контуру 1-2-3-4-5.

Тогда на участке 1-2 останется лишний материал, а на участке 2-3 – наоборот, будет снято больше положенного.

Теперь рассмотрим, как можно учесть радиус вершины резца, чтобы избежать неточностей при точении. Сперва будем рассматривать точение наружного конуса.

Введем необходимые для дальнейшего изложения определения:

Угол конуса - это угол $\angle BAC = 2\alpha$ (Рис.06).

Угол уклона конуса - это угол $\angle BAD = \alpha$ (Рис.06).

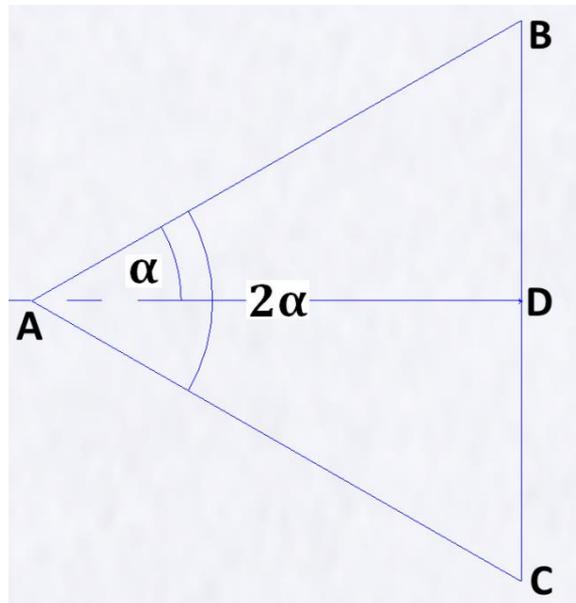


Рис.06 Угол конуса - 2α . Угол уклона конуса - α .

В дальнейшем изложении значение координаты X во фрагментах программ ЧПУ будет указываться "в диаметрах" (удвоенное значение), а на чертежах и в формулах – в изначальном геометрическом смысле.

Вывод формул для поправок на радиус вершины резца для конических поверхностей.

Для ясности вначале сформулируем результат, а потом сделаем выкладки.

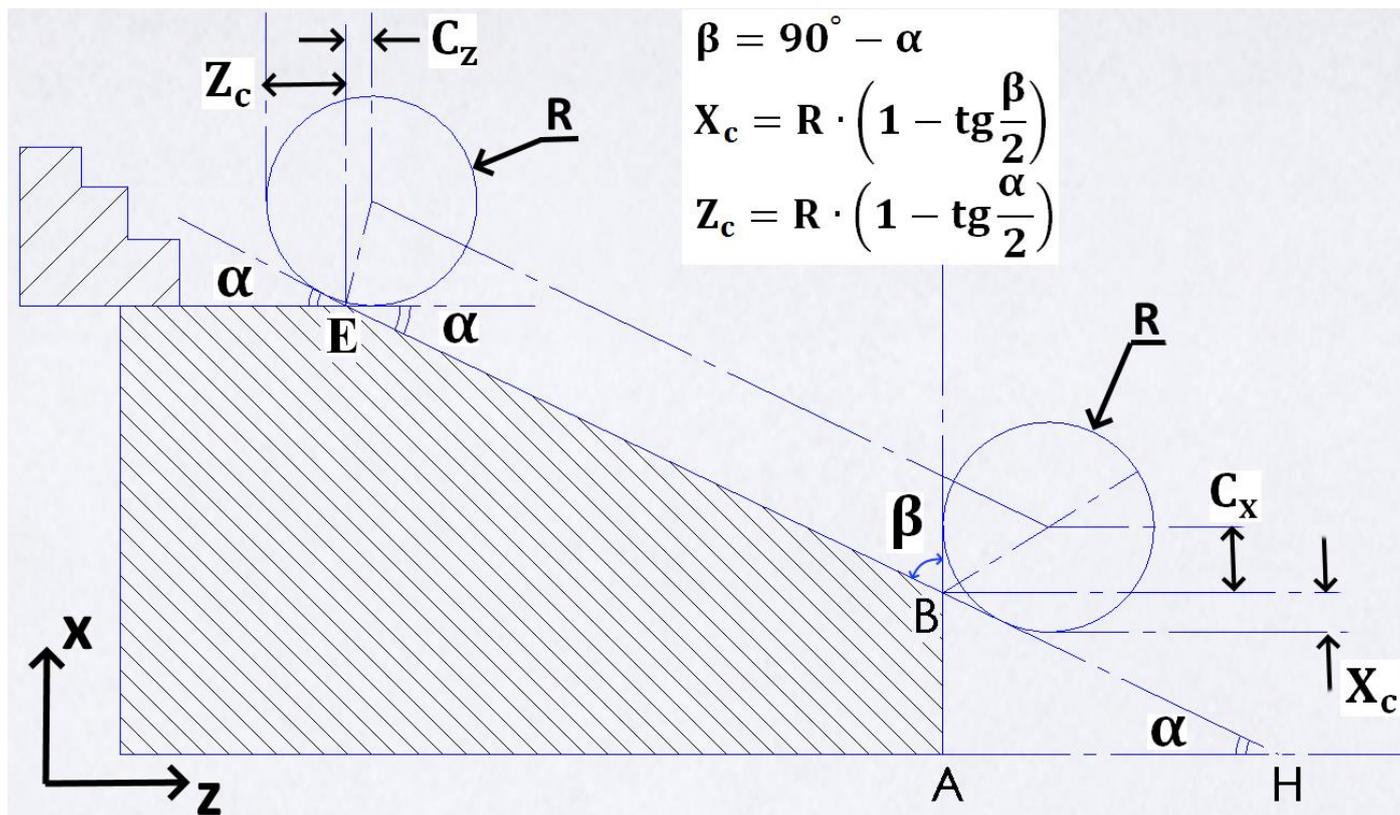


Рис.07 На рисунке показаны поправки X_c , Z_c на радиус вершины резца R . Положение вершины резца, с учетом поправок, в начале чистового прохода – точка B , в конце – точка E .

На Рис.07 показана условная деталь с конусом (точнее, ее половина; ось вращения – $АН$), чистовой контур – $АВЕ$. R – радиус вершины резца. X_c , Z_c – поправки на радиус R вершины резца. C_x , C_z – вспомогательные величины:

$$X_c = R - C_x$$

$$Z_c = R - C_z$$

Индекс "с" в обозначениях X_c , Z_c означает compensation – компенсация.

α – угол уклона конуса.

$\beta = (90^\circ - \alpha)$ – вспомогательный угол.

При расчетах следует быть внимательным: в формулах используется угол α – между осью и образующей конуса, тогда как на чертеже может быть указан угол конуса – между двумя образующими, равный 2α .

Чтобы не оставить лишний материал (как показано на Рис.04), движение резца на окончательном чистовом проходе должно начинаться не в точке (X_B, Z_B) , а в точке $(X_B - X_C, Z_B)$. Т.е. "чуть ниже", чтобы по контуру АВЕ шла реальная точка резца, а не теоретическая точка инструмента. Кроме того, завершать движение по образующей конуса ВЕ следует не в точке (X_E, Z_E) , а в точке $(X_E, Z_E + Z_C)$. Т.е. "чуть дальше по Z", чтобы реальная точка резца прошла все расстояние ВЕ. Значения поправок зависят от радиуса вершины резца R и угла α .

Теперь выведем формулы для величин поправок X_C, Z_C . Начнем с X_C :

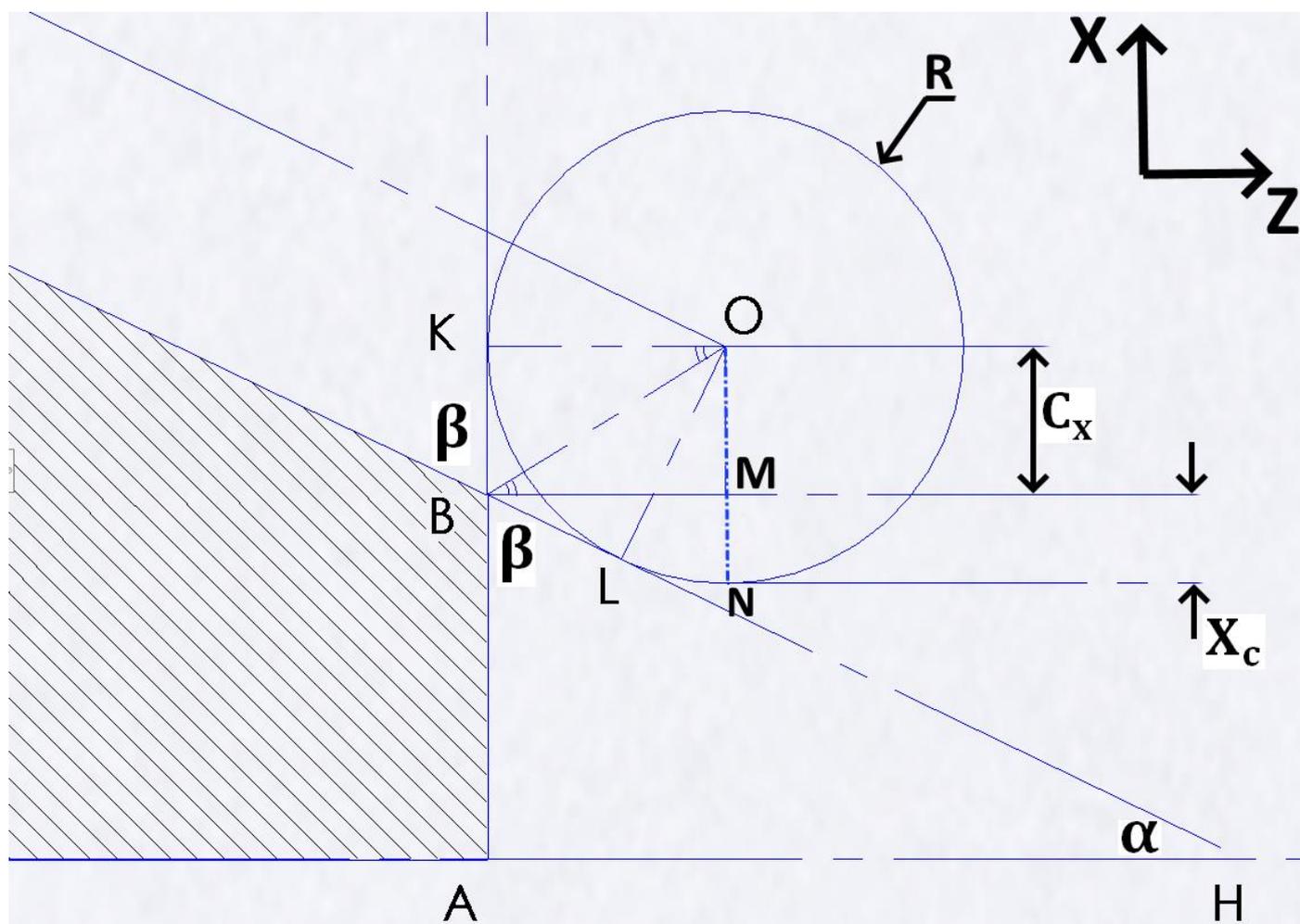


Рис.08 Положение вершины резца в начале чистового прохода. Изготовление детали на Рис.07.

На Рис.08 показано положение резца в точке начала движения вдоль образующей конуса ВЕ.

$$X_C = ON - OM = R - C_x$$

Выразим C_x через R и α .

АВ – торец детали, АН – ось вращения. R – радиус вершины резца. Прямые ВК и ВL касаются окружности "O" в точках К и L соответственно.

$$OK = OL = R$$

$$OK \perp BK, OL \perp BL$$

Из прямоугольного треугольника ВАН $\rightarrow \beta = 90^\circ - \alpha$

ВО – биссектриса угла $\angle KBL$

$$\text{Угол } \angle KBL = 180^\circ - \beta$$

$$\angle KBO = \angle OBL = \frac{180^\circ - \beta}{2}$$

$$\angle OBM = 90^\circ - \angle KBO = 90^\circ - \frac{180^\circ - \beta}{2} = \frac{\beta}{2}$$

Угол $\angle KOB = \angle OBM = \frac{\beta}{2}$ (внутренние накрест лежащие при параллельных)

Из прямоугольного треугольника ОКВ $\rightarrow \cos \frac{\beta}{2} = \frac{OK}{OB} = \frac{R}{OB}$

Из прямоугольного треугольника ОВМ $\rightarrow \sin \frac{\beta}{2} = \frac{C_x}{OB}$

$$C_x = OB \cdot \sin \frac{\beta}{2} = \frac{R}{\cos \frac{\beta}{2}} \cdot \sin \frac{\beta}{2} = R \cdot \operatorname{tg} \frac{\beta}{2}$$

$$X_c = R - C_x = R - R \cdot \operatorname{tg} \frac{\beta}{2} = R \cdot \left(1 - \operatorname{tg} \frac{\beta}{2}\right)$$

$$X_c = R \cdot \left(1 - \operatorname{tg} \frac{\beta}{2}\right)$$

Теперь для Z_c (Рис.09):

$$Z_c = OP - OW = R - C_z$$

Выразим C_z через R и α .

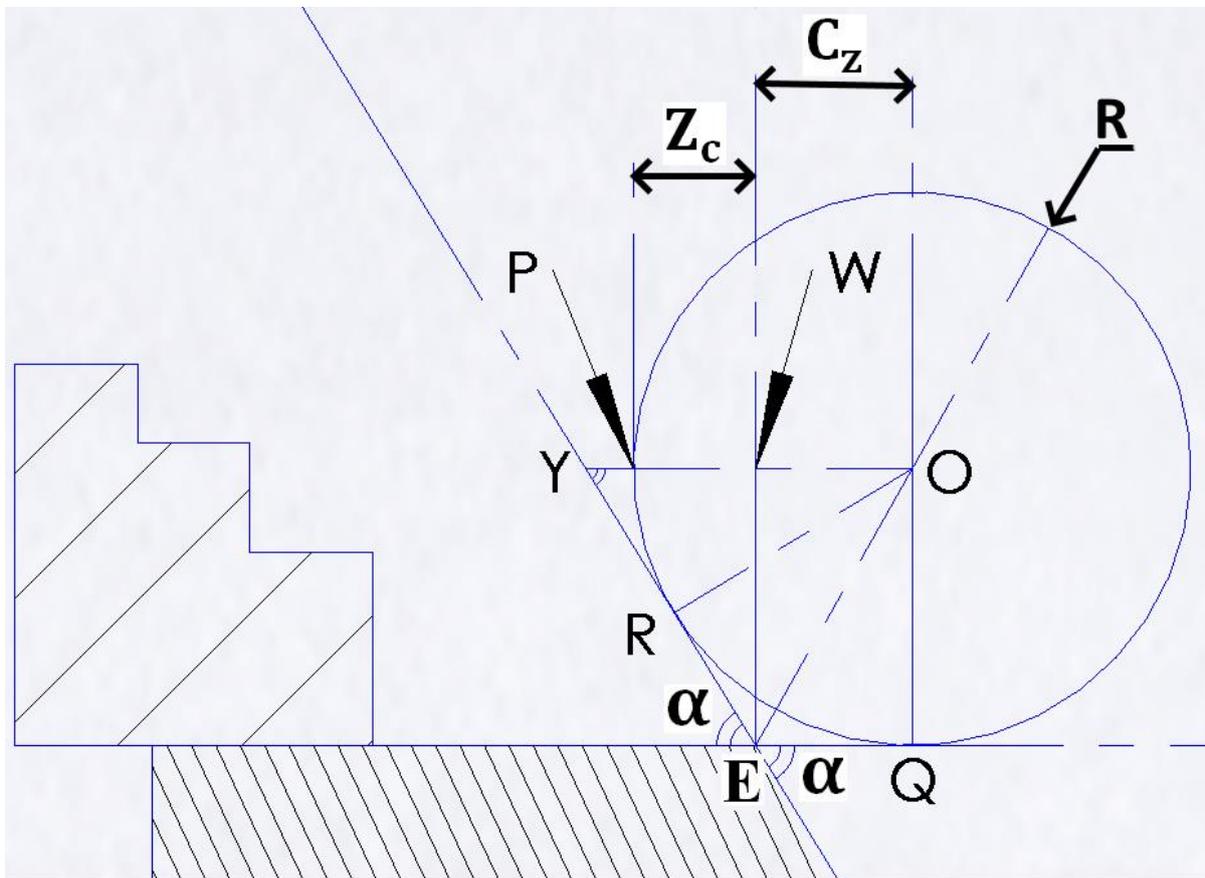


Рис.09 Положение вершины резца в конце чистового прохода. Изготовление детали на Рис.07.

$$OR = OQ = R$$

$$OR \perp ER, OQ \perp EQ$$

EO – биссектриса угла $\angle REQ \rightarrow \angle REO = \angle OEQ$

$$\text{Угол } \angle QER = 180^\circ - \alpha$$

$$\angle REO = \angle OEQ = \frac{180^\circ - \alpha}{2}$$

Из прямоугольного треугольника OQE:

$$\text{tg}(\angle OEQ) = \frac{OQ}{EQ} \rightarrow \text{tg}\left(\frac{180^\circ - \alpha}{2}\right) = \frac{R}{C_z} \rightarrow \text{ctg}\frac{\alpha}{2} = \frac{R}{C_z} \rightarrow C_z = \frac{R}{\text{ctg}\frac{\alpha}{2}} = R \cdot \text{tg}\frac{\alpha}{2}$$

$$C_z = R \cdot \text{tg}\frac{\alpha}{2}$$

$$Z_c = R - C_z = R - R \cdot \text{tg}\frac{\alpha}{2}$$

$$Z_c = R \cdot \left(1 - \text{tg}\frac{\alpha}{2}\right)$$

Итак, с поправками для точения наружного конуса разобрались:

$$X_c = R \cdot \left(1 - \operatorname{tg} \frac{\beta}{2}\right)$$

$$Z_c = R \cdot \left(1 - \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}\right)$$

где R – радиус вершины резца

α – угол уклона конуса.

$\beta = (90^\circ - \alpha)$ – вспомогательный угол.

Рассмотрим применение формул для поправок на конкретном примере:

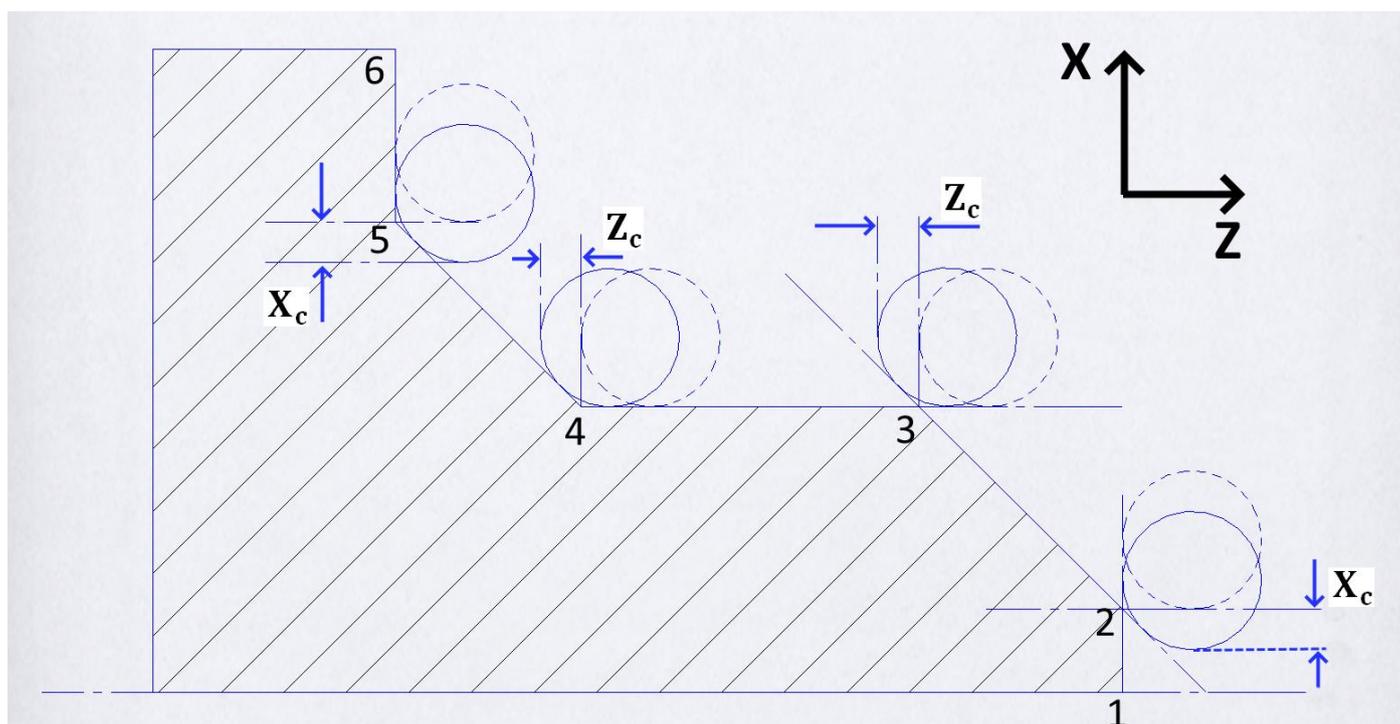


Рис.10 Опорные точки контура 1-2-3-4-5-6. Окружности, показанные сплошной линией, - это положения вершины резца с учетом компенсации на радиус вершины резца. Окружности, показанные штриховой линией, - это положения вершины резца без учета компенсации.

На Рис.10 показан "алгоритм" движения резца для окончательного чистового прохода.


```

1 ; пример точения наружных конусов
2 ; радиус вершины резца R=0.4 мм
3 ; поправки для R=0.4 мм и угла 45 градусов:
4 ; Xc = 2*0.234 = 0.468, Zc = 0.234
5 ; поправка Xc - на диаметр
6
7 T101
8 G96 S120 M03
9 G00 X30 Z10 ; безопасный подход
10 G01 X27.532 Z0 ; точка 2, X=28-0.468=27.532, Z=0
11 G01 X48 Z-10.234 ; точка 3, X=48, Z=-(10+0.234)=-10.234
12 G01 Z-46.234 ; точка 4, X=48, Z=-(46+0.234)=-46.234
13 G01 X67.532 Z-56 ; точка 5, X=68-0.468=67.532, Z=-56
14 G01 X93.532 ; точка 6, X=94-0.468=93.532, Z=-56
15 G01 X114 Z-66.234 ; точка 7, X=114, Z=-(66+0.234)=-66.234
16 ...

```

Рис.12 Фрагмент программы для точения детали (Рис.11) с учетом компенсации.

На Рис.12 – фрагмент программы, на котором задается контур детали (Рис.11). Для радиуса вершины резца $R=0.4$ мм и угла уклона конуса $\alpha = 45^\circ$ значения поправок:

$X_c = 2 \cdot 0.234 = 0.468$ (умножаем на 2, т.к. в программе указываются значения X в диаметрах)

$Z_c = 0.234$

Внутренний конус (расточка).

Теперь разберем случай точения внутреннего конуса.

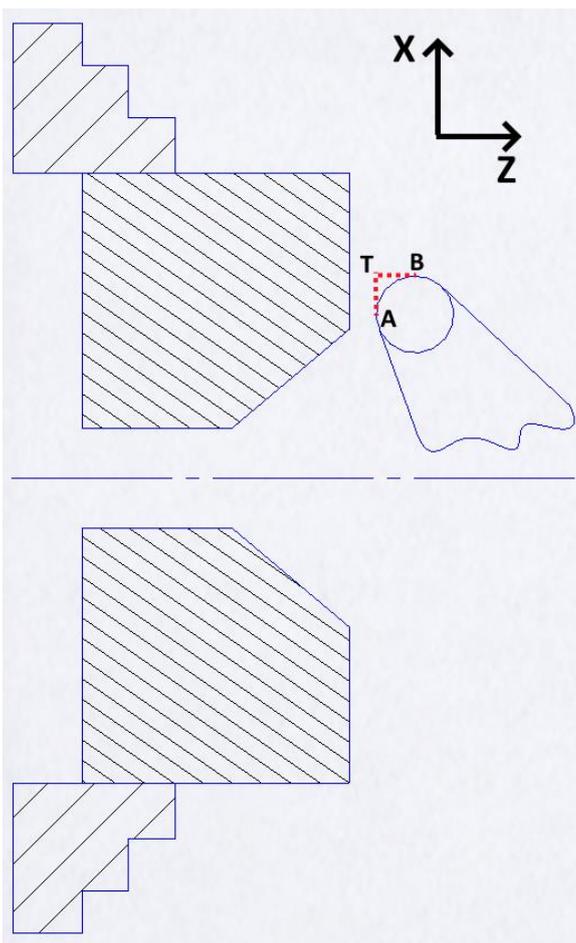


Рис.13 Расточка конуса. Резец привязывается касанием в точках А и В. Т - теоретическая точка инструмента.

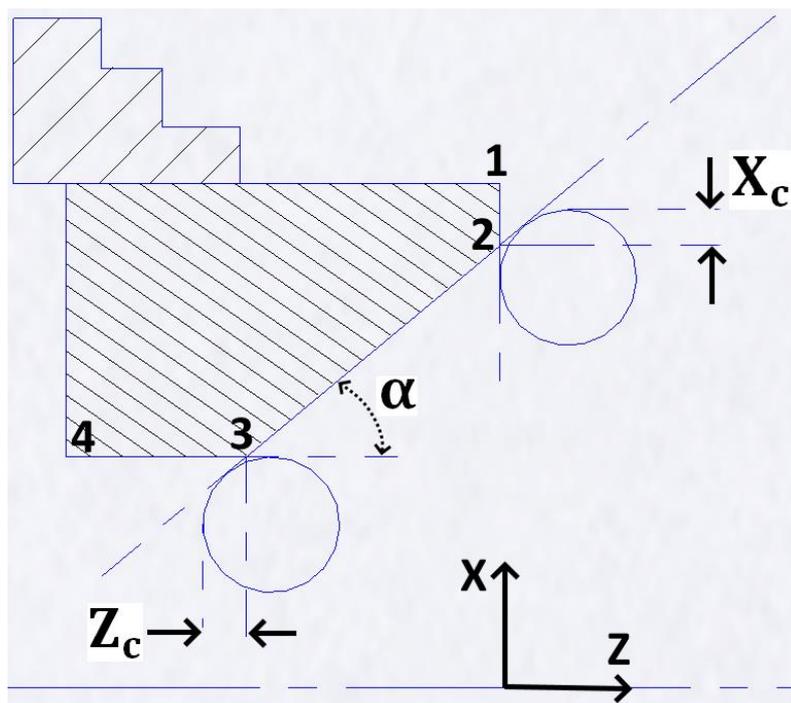


Рис.14 Положение вершины резца с учетом поправок X_c , Z_c . α – угол уклона конуса.

В данном случае мнемоническое правило для компенсации на радиус вершины резца будет таким:

Добавь X_c , Добавь Z_c

На Рис.14 изображены положения резца с учетом поправок. Начинаем "чуть выше" (точка 2) и продолжаем "чуть дальше по Z" (точка 3). Значения для X_c и Z_c такие же, как и в случае наружной обточки:

$$X_c = R \cdot \left(1 - \operatorname{tg} \frac{\beta}{2}\right) \quad Z_c = R \cdot \left(1 - \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}\right)$$

где R – радиус вершины резца

α – угол уклона конуса

$\beta = (90^\circ - \alpha)$ – вспомогательный угол.

Рассмотрим применение поправок на конкретном примере:

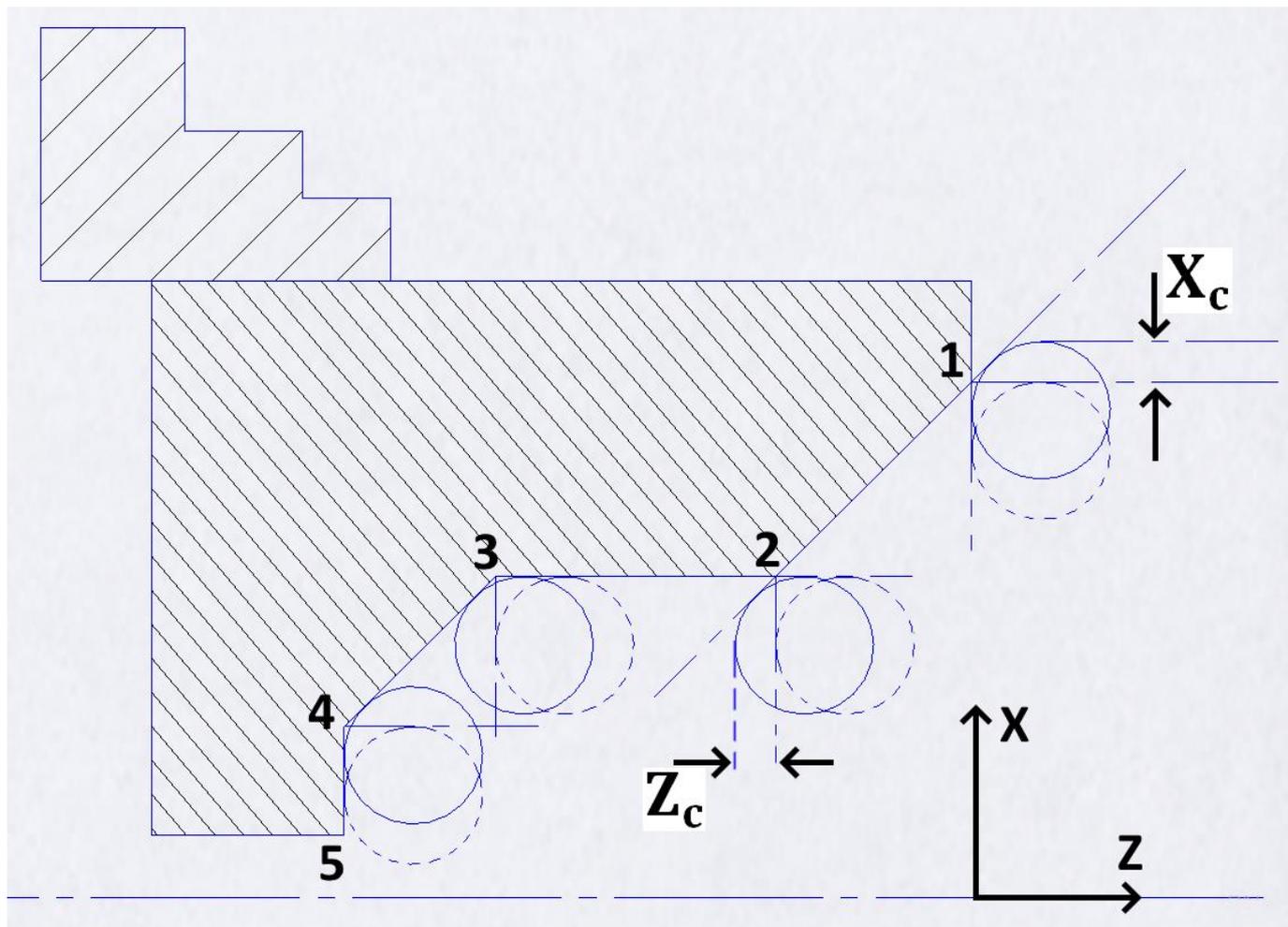


Рис.15 Опорные точки контура 1-2-3-4-5. Окружности, показанные сплошной линией, - это положения вершины резца с учетом компенсации на радиус вершины резца. Окружности, показанные штриховой линией, - это положения вершины резца без учета компенсации.

На Рис.15 показан "алгоритм" движения резца для окончательного чистового прохода.

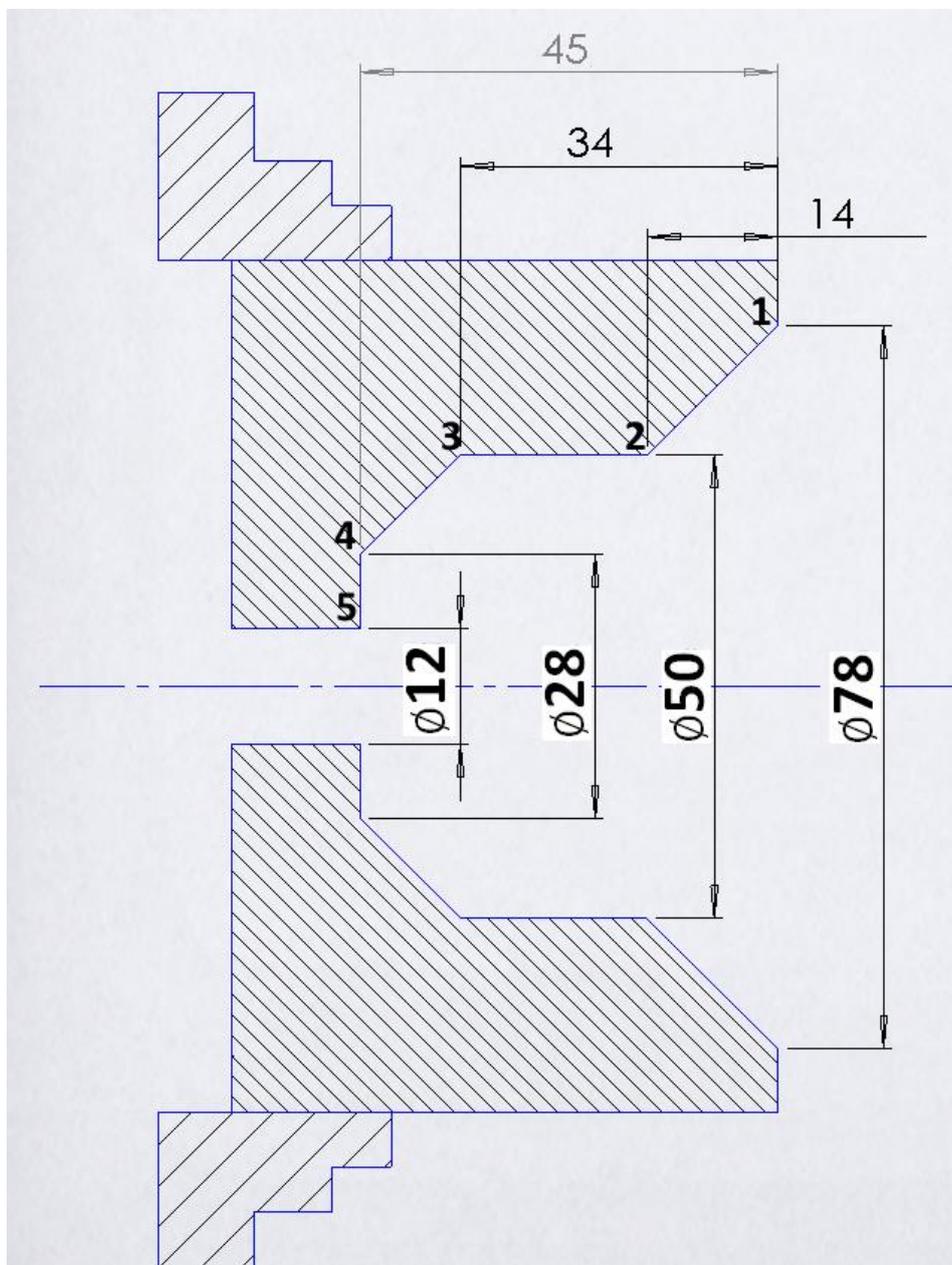


Рис.16 Деталь с внутренними коническими поверхностями. Опорные точки профиля: 1-2-3-4-5.

Отсчет координаты Z – от торца детали. Координаты опорных точек:

$$\begin{aligned}
 X_1 &= 78, Z_1 = 0 \\
 X_2 &= 50, Z_2 = -14 \\
 X_3 &= 50, Z_3 = -34 \\
 X_4 &= 28, Z_4 = -45 \\
 X_5 &= 12, Z_5 = -45
 \end{aligned}$$

```

1 ; пример точения внутренних конусов
2 ; радиус вершины резца R=0.4 мм
3 ; поправки для R=0.4 мм и угла 45 градусов:
4 ; Xc = 2*0.234 = 0.468, Zc = 0.234
5 ; поправка Xc - на диаметр
6
7 T101
8 G96 S120 M03
9 G00 X88 Z10 ; безопасный подход
10 G01 X78.468 Z0 ; точка 1, X=78+0.468, Z=0
11 G01 X50 Z-14.234 ; точка 2, X=50, Z=-(14+0.234)=-14.234
12 G01 Z-34.234 ; точка 3, X=50, Z=-(34+0.234)=-34.234
13 G01 X28.468 Z-45 ; точка 4, X=28+0.468=28.468, Z=-45
14 G01 X12 ; точка 5, X=12, Z=-45
15 ...

```

Рис.17 Фрагмент программы для точения детали (Рис.16) с учетом поправок.

На Рис.17 – фрагмент программы, на котором задается контур детали (Рис.16). Для радиуса вершины резца $R=0.4$ мм и угла уклона конуса $\alpha = 45^\circ$ значения поправок:

$X_c = 2 \cdot 0.234 = 0.468$ (умножаем на 2, т.к. в программе указываются значения X в диаметрах)

$Z_c = 0.234$

Точное точение сферических поверхностей.

Автору статьи не приходилось иметь дело с особо жесткими допусками на диаметр сферы, ниже описываются теоретические методы из [01], [02], которые подлежат проверке на практике.

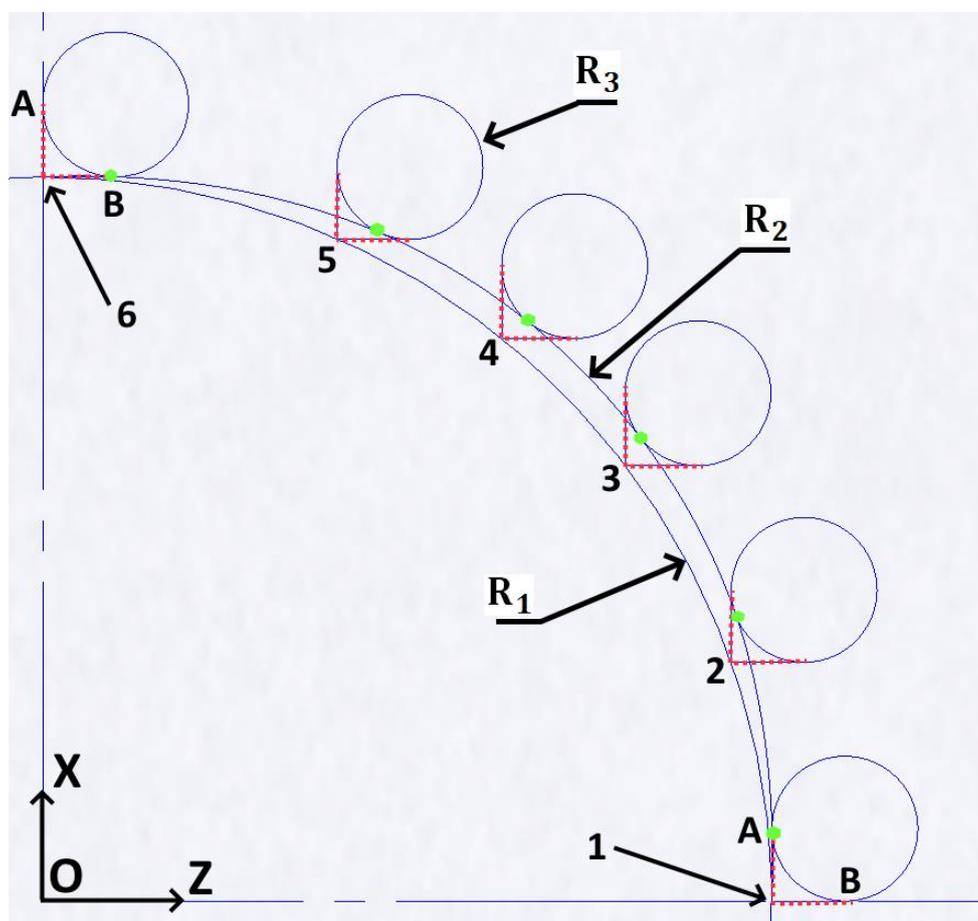


Рис.18 Неточности, возникающие при точении наружной полусферы, контур 1-2-3-4-5-6. Реальная точка резца показана зеленым. Резец привязывается в точке А (по Z) и В (по X).

R_1 – радиус полусферы "O", которую необходимо выточить.

R_2 – радиус полусферы, которая будет выточена без учета компенсации на радиус вершины резца.

R_3 – радиус вершины резца.

На Рис.18 показаны неточности, возникающие при непосредственном использовании круговой интерполяции, без учета компенсации на радиус вершины резца. Полусфера $R_1 = O1 = O6$. Радиус вершины резца R_3 . На окончательном чистовом проходе теоретическая точка инструмента будет двигаться по контуру полусферы, заданному в программе (1-2-3-4-5-6). Но, как и в случае точения наружного конуса, реальная точка резца будет описывать другой контур – окружность радиуса R_2 . Кроме того, реально точение начинается в точке с координатами $X = R_3, Z = R_1$, а должно начинаться в точке $X = 0, Z = R_1$. Реально точение заканчивается в точке с координатами $X = R_1, Z = R_3$, а должно заканчиваться в точке $X = R_1, Z = 0$. При круговой интерполяции

различные точки режущей кромки резца находятся в контакте с материалом. В итоге останется лишний материал на детали. Траектория реальной точки резца есть окружность с радиусом $R_2 = R_1 - R_3$ и с центром в точке $X = R_3, Z = R_3$.

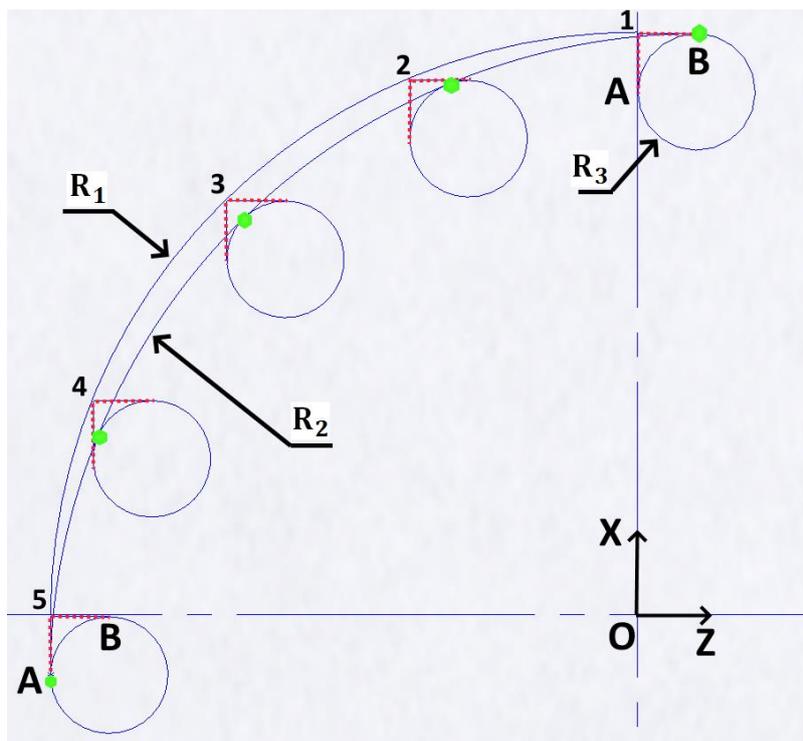


Рис.19 Неточности, возникающие при точении внутренней полусферы, контур 1-2-3-4-5. Реальная точка резца показана зеленым. Резец привязывается в точке А (по Z) и В (по X).

R_1 – радиус полусферы "О", которую необходимо выточить.

R_2 – радиус полусферы, которая будет выточена без учета компенсации на радиус вершины резца.

R_3 – радиус вершины резца.

На Рис.19 показан случай точения внутренней полусферы. Полусфера $R_1 = O1 = O5$. Радиус вершины резца R_3 . Как и в случае точения наружной полусферы на детали останется лишний материал. Без учета компенсации на радиус вершины резца при окончательном чистовом проходе точение начинается в точке с координатами $X = R_1, Z = R_3$, а должно начинаться в точке $X = R_1, Z = 0$. Точение заканчивается в точке с координатами $X = -R_3, Z = -R_1$, а должно заканчиваться в точке $X = 0, Z = -R_1$. Траектория реальной точки резца есть окружность с радиусом $R_2 = R_1 + R_3$ и с центром в точке $X = -R_3, Z = R_3$.

Теперь рассмотрим метод компенсации неточностей.

Поставлена задача: выточить наружную полусферу $O_1, O_1A_1 = O_1B_2 = R_1$ (Рис.20). Радиус вершины резца R_3 . Чтобы получить деталь согласно заданному в программе контуру – необходимо, чтобы при окончательном чистовом проходе реальная точка резца описала дугу A_1B_2 . Но это можно просто сделать следующим образом:

а) строим окружность O_2 радиусом $R_2 = R_1 + R_3$, координаты центра $X = -R_3, Z = -(R_1 + R_3)$. Начало координат – точка A_1 (торец детали).

б) для дуги T_1T_2 окружности O_2 выполняем круговую интерполяцию G03 из точки $X = -R_3, Z = R_1$ в точку $X = R_1, Z = -R_3$ с радиусом $R_2 = R_1 + R_3$

В таком случае теоретическая точка инструмента будет двигаться по дуге T_1T_2 окружности O_2 , а реальная точка резца – по дуге A_1B_2 окружности O_1 .

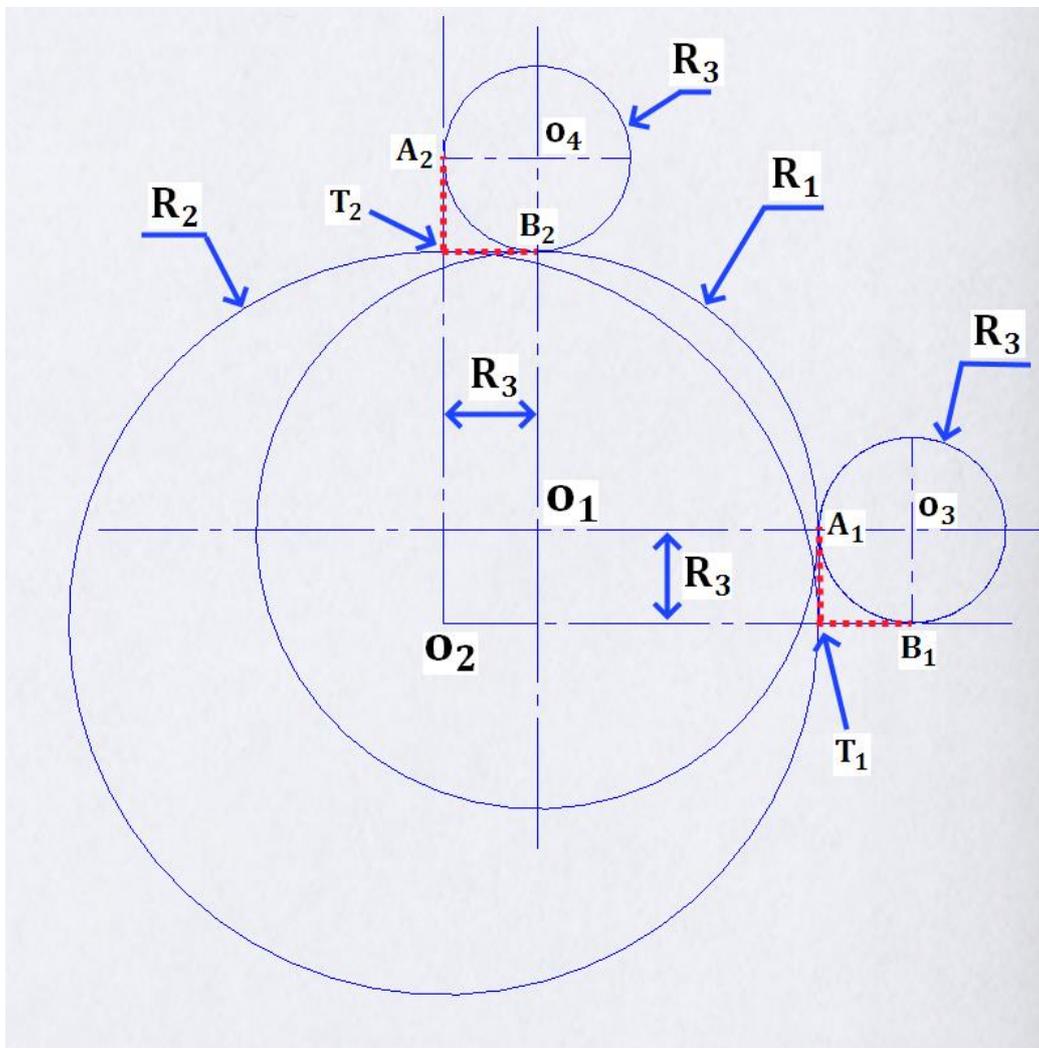


Рис.20 Корректное точение наружной полусферы.

Мнемоническое правило для точения радиусов:

наружное точение	выпуклый	вогнутый
	При круговой интерполяции прибавь к радиусу дуги радиус инструмента, скорректируй координаты точек начала и конца дуги.	При круговой интерполяции вычти из радиуса дуги радиус инструмента, скорректируй координаты точек начала и конца дуги.

Приведем пример:

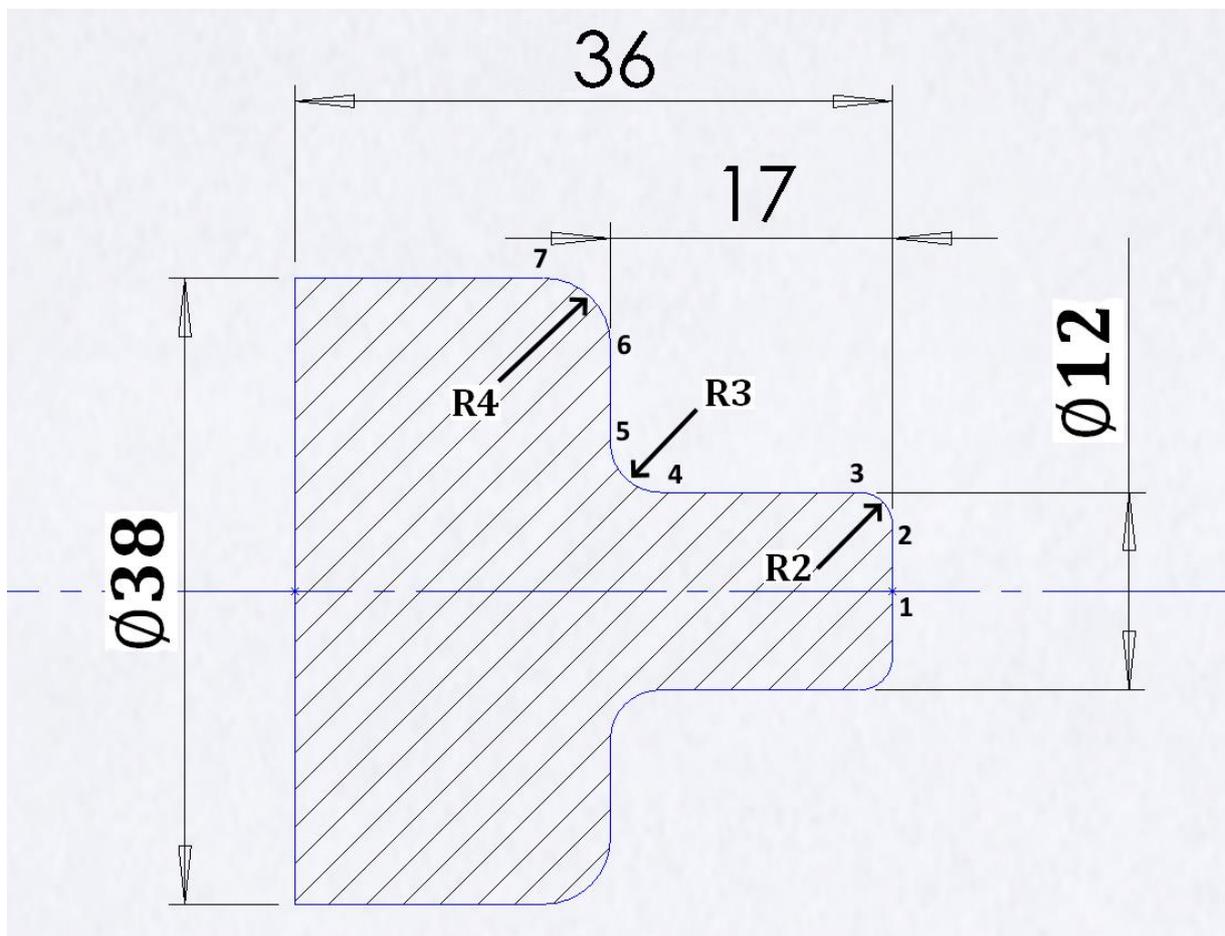


Рис.21 Точение радиусов на наружной поверхности.

Задача: выточить деталь (Рис.21), выдерживая точные значения радиусов R2, R3, R4.

Координаты опорных точек:

$$X_1 = 0, Z_1 = 0$$

$$X_2 = 8, Z_2 = 0$$

$$X_3 = 12, Z_3 = -2$$

$$X_4 = 12, Z_4 = -14$$

$$X_5 = 18, Z_5 = -17$$

$$X_6 = 30, Z_6 = -17$$

$$X_7 = 38, Z_7 = -21$$

```

1 ; пример точения радиусов
2 ; радиус вершины резца R=0.4 мм
3
4
5 T101
6 G96 S120 M03
7 G00 X10 Z10 ; безопасный подход
8 ; скорректированный радиус R2:  $R=2+0.4=2.4$ 
9 G01 X7.2 Z0 ; точка 2,  $X=12-2*2.4=7.2$ ,  $Z=0$ 
10 G03 X12 Z-2.4 R2.4 ; точка 3,  $X=12$ ,  $Z=-2.4$ 
11 ; скорректированный радиус R3:  $R=3-0.4=2.6$ 
12 G01 Z-14 ; точка 4,  $X=12$ ,  $Z=-(17-2.6)=-14.4$ 
13 G02 X17.2 Z-17 R2.6 ; точка 5,  $X=12+2*2.6=17.2$ ,  $Z=-17$ 
14 ; скорректированный радиус R4:  $R=4+0.4=4.4$ 
15 G01 X29.2 ; точка 6,  $X=38-2*4.4=29.2$ ,  $Z=-17$ 
16 G03 X38 Z-21.4 R4.4 ; точка 7,  $X=38$ ,  $Z=-(17+4.4)=-21.4$ 
17 ...

```

Рис.22 Фрагмент программы для точения детали (Рис.21) с учетом компенсации на радиус вершины резца.

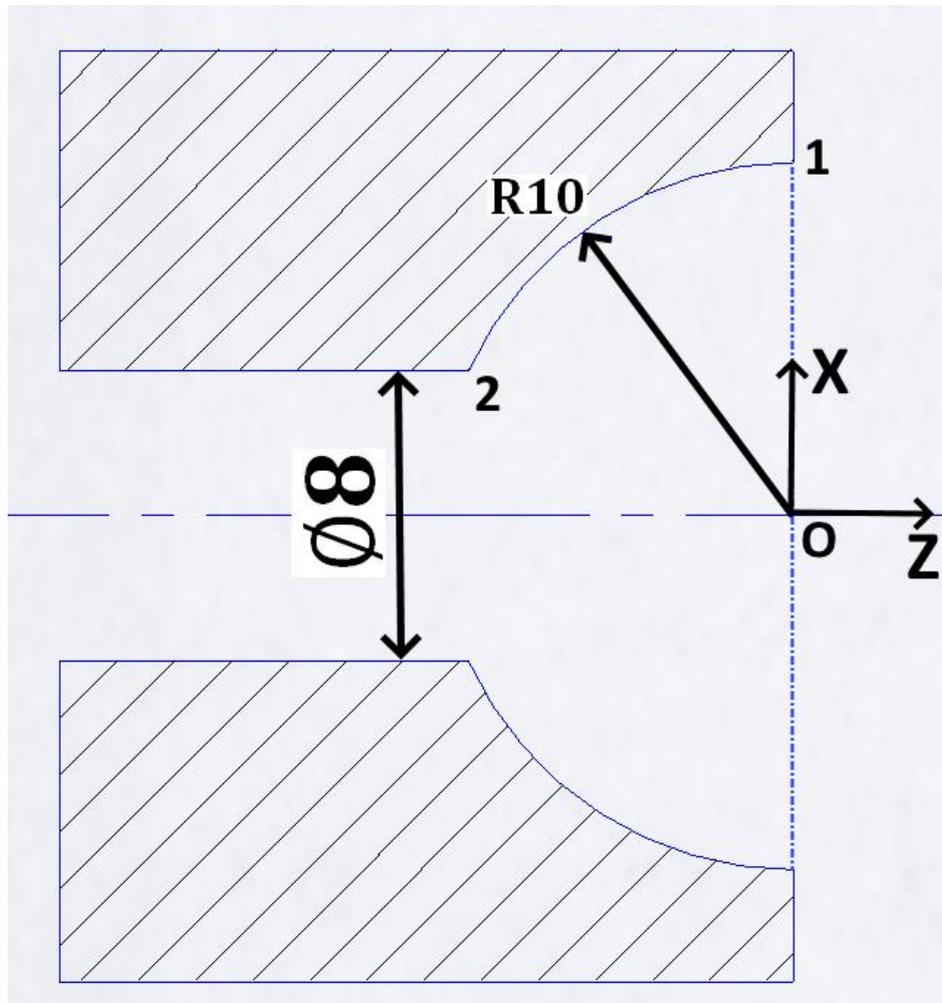


Рис.23 Точение внутренней полусферы.

Координаты опорных точек:

$$X_1 = 20, Z_1 = 0$$

$$X_2 = 8, Z_2 = -9.16$$

```
1 ; пример точения внутренней сферы
2 ; радиус вершины резца R=0.4 мм
3
4
5 T101
6 G96 S120 M03
7 G00 X30 Z10 ; безопасный подход
8 ; скорректированный радиус R: R=10+0.4=10.4
9 G01 X20.8 Z0 ; точка 1, X=20+2*0.4=20.8, Z=0
10 G03 X0 Z-10.4 R10.4 ; конечная точка, X=0, Z=-20.8
11 ...
```

Рис.24 Фрагмент кода для точения детали (Рис.23) с учетом компенсации на радиус вершины резца.

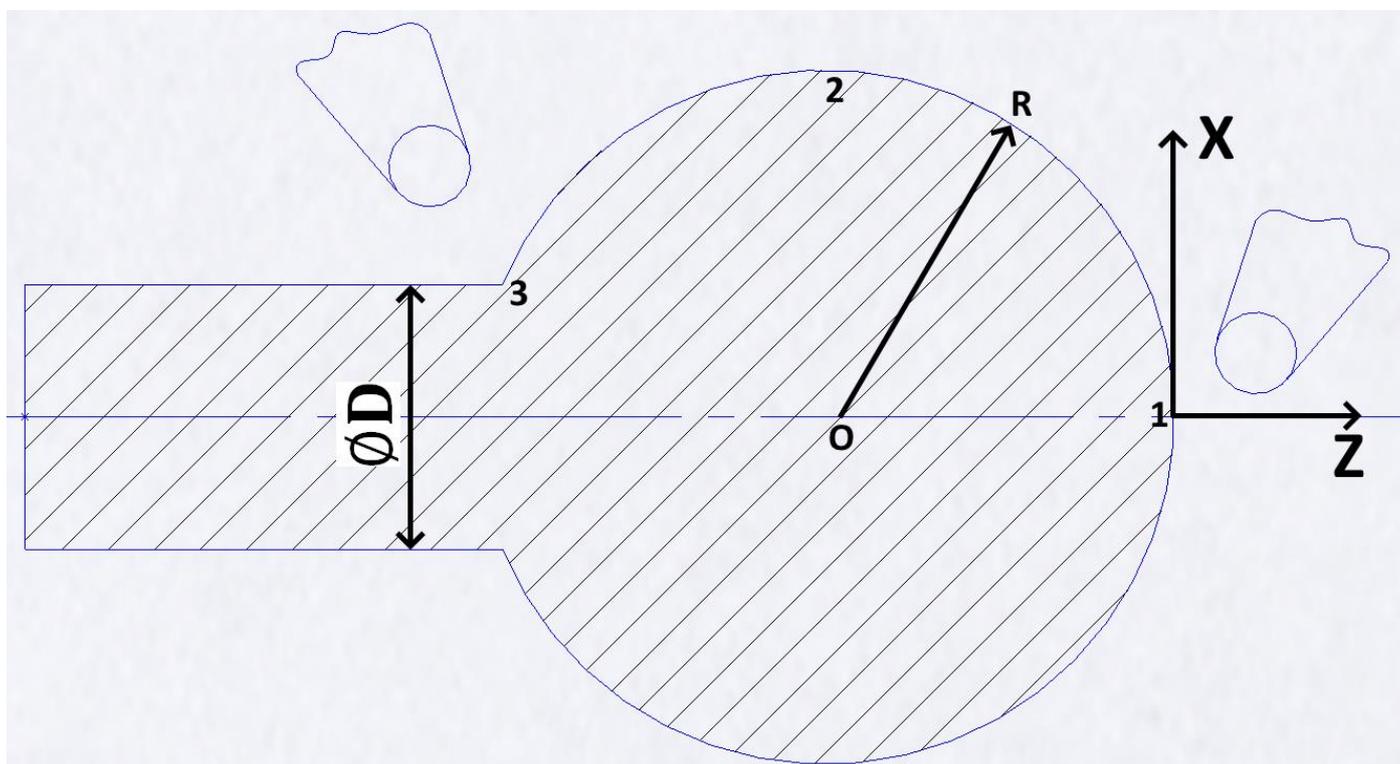


Рис.25 Точение наружной сферы, более сложная деталь.

Деталь, показанную на Рис.25 можно выточить следующим образом:

- а) контур 1-2 точим правым резцом с учетом поправок на радиус вершины резца.
- б) контур 3-2 точим левым резцом с учетом поправок на радиус вершины резца.

В книге [3] приводится описание метода эквидистантного точения.

Приложение 01. Меры угла, перевод величин, корректный расчет.

В точных науках приняты две системы единиц для измерения угла:

01. Градус, минута, секунда.

02. Радиан.

В первом случае угол задается следующим образом:

$$\alpha = \beta^{\circ} \gamma' \delta''$$

β – число градусов в угле, $[0^{\circ} - 360^{\circ}]$

γ – число минут в угле, $[0' - 60']$

δ – число секунд в угле, $[0'' - 60'']$

$\begin{aligned} 1^{\circ} &= 60' \\ 1' &= 60'' \\ 1^{\circ} &= 3600'' \end{aligned}$	$\begin{aligned} 1' &= \left(\frac{1}{60}\right)^{\circ} \\ 1'' &= \left(\frac{1}{60}\right)' \\ 1'' &= \left(\frac{1}{3600}\right)^{\circ} \end{aligned}$
---	--

$$\alpha = \beta + \frac{\gamma}{60} + \frac{\delta}{3600}$$

Угол может быть задан вещественным числом, например, так:

$54,26^{\circ}$ (это угол $54^{\circ} 15' 36''$)

$$54^{\circ} 15' 36'' = 54 + \frac{15}{60} + \frac{36}{3600} = \frac{195336}{3600} = 54,26^{\circ}$$

При вычислениях лучше приводить дроби к общему знаменателю и только после этого выполнять деление, чтобы избежать ошибок округления в промежуточных вычислениях.

Перевод из вещественной формы задания угла к формату "градус, минута, секунда":

Для $\alpha = 54,26^{\circ}$ найдем β, γ, δ такие, что:

$$\alpha = 54,26^{\circ} = \beta + \frac{\gamma}{60} + \frac{\delta}{3600}$$

а) $\beta = 54$

б) берем дробную часть: $0,26 = \frac{\gamma}{60} + \frac{\delta}{3600}$

Умножаем обе части равенства на 60.

$$15,6 = \gamma + \frac{\delta}{60}$$

$$\gamma = 15$$

$$0,6 = \frac{\delta}{60}$$

Умножаем обе части равенства на 60.

$$36 = \delta$$

$$\beta = 54, \gamma = 15, \delta = 36$$

$$\alpha = 54,26^\circ = 54^\circ 15' 36''$$

Рассмотрим вычисление дробных значений угла: если требуется вычислить, например, значение половины угла $\frac{\alpha}{2}$ при $\alpha = 2^\circ 51' 37''$, поступаем следующим образом:

$$\frac{\alpha}{2} = \frac{1}{2} \cdot \left(2 + \frac{51}{60} + \frac{37}{3600} \right) = 1 + \frac{51/2}{60} + \frac{37/2}{3600} \approx 1 + \frac{25}{60} + \frac{18}{3600}$$
$$\frac{\alpha}{2} \approx 1^\circ 25' 18''$$

Радианная мера угла.

Для угла в 1 радиан длина дуги окружности между ребрами равна радиусу R (Рис.26).

$$1 \text{ радиан} = 57^\circ 17' 45''$$

Перевод из градусов в радианы:

$$\alpha_{\text{radian}} = \pi \cdot \frac{\alpha_{\text{gradus}}}{180^\circ}$$

Перевод из радианов в градусы:

$$\alpha_{\text{gradus}} = 180^\circ \cdot \frac{\alpha_{\text{radian}}}{\pi}$$

Где $\pi = 3.1415926$

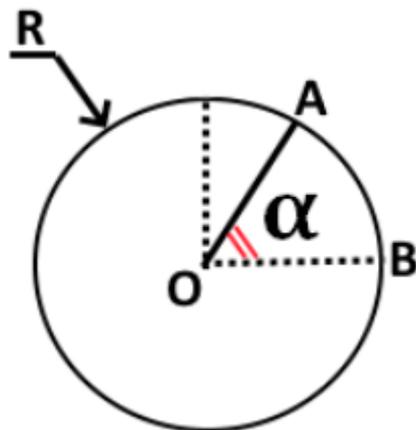


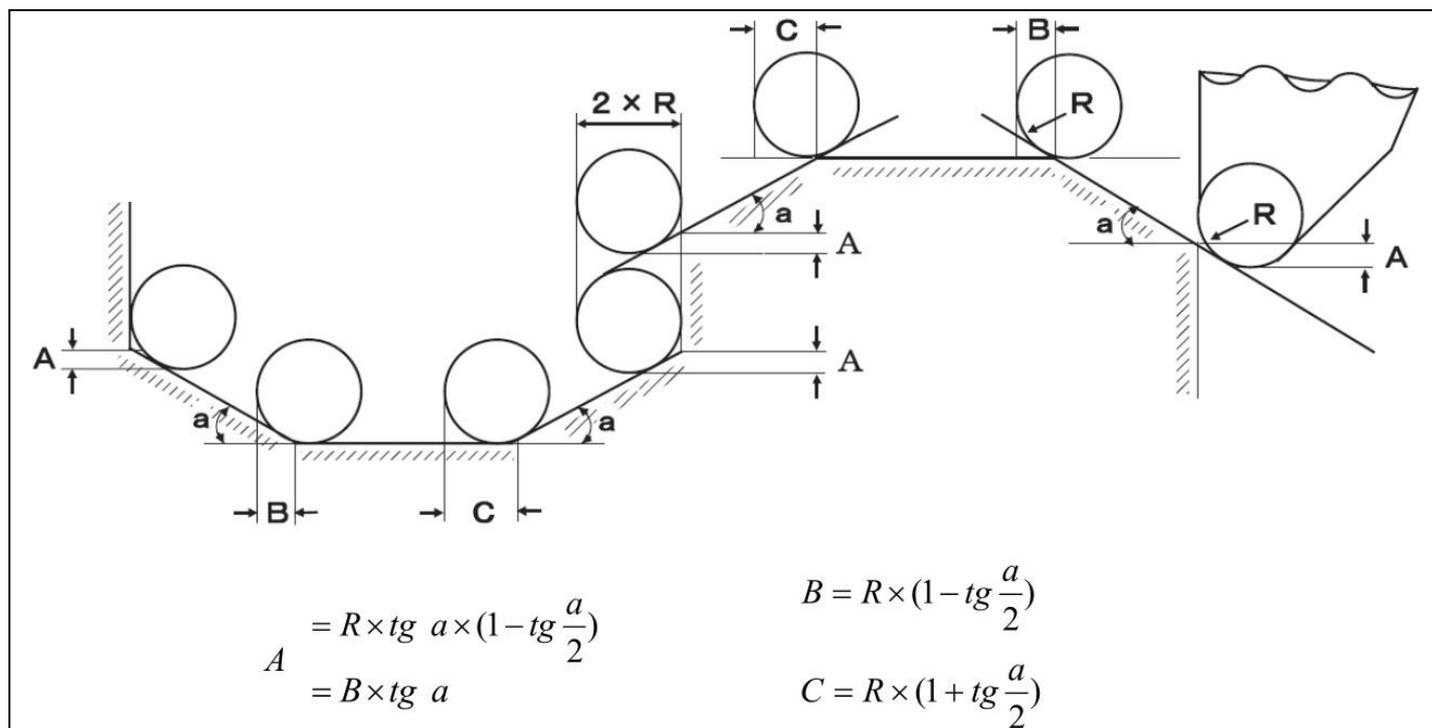
Рис.26 Радианная мера угла.

При расчете поправок X_c, Z_c потребуется вычислять тангенс угла уклона конуса: $\operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}$

Дело осложняется тем, что угол конуса может иметь, например, такое значение: $\alpha = 2^\circ 51' 51''$. Следует перевести угол α в радианы, затем выполнить деление на 2 и вычислить $\operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}$. Если расчет производится с помощью инженерного калькулятора, то при вычислении тригонометрических функций следует использовать соответствующий переключатель на калькуляторе "радиан".

Приложение 02. Формулы для поправок на радиус вершины резца.

Ниже приводятся формулы для поправок X_c, Z_c для всех случаев геометрии при точении. Это выдержка из документации компании Nomura. При написании программы следует учитывать, что формула для величины A указана "на радиус".



A x 2	a°	5°	10°	15°	20°	25°	30°	35°	40°	45°	50°	55°	60°	65°	70°	75°	80°	85°
	R		0.03	0.06	0.09	0.12	0.15	0.17	0.19	0.21	0.23	0.25	0.27	0.29	0.31	0.33	0.35	0.37
	0.2	0.03	0.06	0.09	0.12	0.15	0.17	0.19	0.21	0.23	0.25	0.27	0.29	0.31	0.33	0.35	0.37	0.38
	0.4	0.07	0.13	0.19	0.24	0.29	0.34	0.38	0.43	0.47	0.51	0.55	0.59	0.62	0.66	0.69	0.73	0.77
	0.5	0.08	0.16	0.23	0.30	0.36	0.42	0.48	0.53	0.59	0.64	0.68	0.73	0.78	0.82	0.87	0.91	0.96
	0.8	0.13	0.26	0.37	0.48	0.58	0.68	0.77	0.85	0.94	1.02	1.10	1.17	1.25	1.32	1.39	1.46	1.53

B	a°	5°	10°	15°	20°	25°	30°	35°	40°	45°	50°	55°	60°	65°	70°	75°	80°	85°
	R		0.19	0.18	0.17	0.16	0.16	0.15	0.14	0.13	0.12	0.11	0.10	0.08	0.07	0.06	0.05	0.03
	0.2	0.19	0.18	0.17	0.16	0.16	0.15	0.14	0.13	0.12	0.11	0.10	0.08	0.07	0.06	0.05	0.03	0.02
	0.4	0.38	0.37	0.35	0.33	0.31	0.29	0.27	0.25	0.23	0.21	0.19	0.17	0.15	0.12	0.09	0.06	0.03
	0.5	0.48	0.46	0.43	0.41	0.39	0.37	0.34	0.32	0.29	0.27	0.24	0.21	0.18	0.15	0.12	0.08	0.04
	0.8	0.77	0.73	0.69	0.66	0.62	0.59	0.55	0.51	0.47	0.43	0.38	0.34	0.29	0.24	0.19	0.13	0.07

C	a°	5°	10°	15°	20°	25°	30°	35°	40°	45°	50°	55°	60°	65°	70°	75°	80°	85°
	R		0.21	0.22	0.23	0.24	0.24	0.25	0.26	0.27	0.28	0.29	0.30	0.32	0.33	0.34	0.35	0.37
	0.2	0.21	0.22	0.23	0.24	0.24	0.25	0.26	0.27	0.28	0.29	0.30	0.32	0.33	0.34	0.35	0.37	0.38
	0.4	0.42	0.43	0.45	0.47	0.49	0.51	0.53	0.55	0.57	0.59	0.61	0.63	0.65	0.68	0.71	0.74	0.77
	0.5	0.52	0.54	0.57	0.59	0.61	0.63	0.66	0.68	0.71	0.73	0.76	0.79	0.82	0.85	0.88	0.92	0.96
	0.8	0.83	0.87	0.91	0.94	0.98	1.01	1.05	1.09	1.13	1.17	1.22	1.26	1.31	1.36	1.41	1.47	1.53

Список литературы

01. Professor Steven S. Saliterman "CNC Lathe Programming", Introductory Medical Device Prototyping, University of Minnesota. <http://saliterman.umn.edu/>
02. HAAS Lathe Operator's Manual.
03. А.М.Александров "Технологическая подготовка токарных станков с ЧПУ", Санкт-Петербургский институт машиностроения, 2005 г.
04. Аверченков А.В., Терехов М.В., Жолобов А.А., Мрочек Ж.А., Шкаберин В.А. "Станки с ЧПУ: устройство, программирование, инструментальное обеспечение и оснастка", 2014 г.
05. Д.Е.Турчин "Программирование обработки на станках с ЧПУ", Кемерово: КузГТУ, 2011 г.
06. Nomura NN-16UB5/20UB5. Руководство по программированию. Система ЧПУ: MELDAS 65SLC.

Англоязычная терминология

Computer Numerical Control (CNC) - числовое программное управление.

Tool Nose Radius Compensation (TNRC) - компенсация на радиус вершины резца.

Theoretical Tool Tip (TTT) – теоретическая точка инструмента.

Machine Coordinate System (MCS) - система координат станка.

Workpiece Coordinate System (WCS) - система координат детали.

Tool Coordinate System (TCS) - система координат инструмента.