

УДК 621.91.04

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ СХЕМЫ НЕПРЕРЫВНОГО ФОРМООБРАЗОВАНИЯ И РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА ДЛЯ ОБРАБОТКИ ПЛОСКОГО ЗУБЧАТОГО КОНТУРА

доктор техн. наук, доцент В.А. ДАНИЛОВ, Р.А. КИСЕЛЕВ

Рассмотрена реализуемая на универсальных зубофрезерных станках прогрессивная схема формообразования зубчатого контура на торцах деталей при непрерывном движении деления. Установлены основные параметры схемы обработки и режущего инструмента для обеспечения рациональных условий резания и точности формообразования.

Постановка задачи. Одной из актуальных проблем в машиностроении является создание и освоение рациональных технологий формообразования зубчатых контуров на торцах деталей типа кулачковых и храповых муфт, элементов измерительных систем и т.п. Наличие одинаковых по форме и равномерно расположенных по окружности поверхностей обуславливает необходимость в делительном движении, которое может осуществляться дискретно или непрерывно.

Заслуживают внимания схемы обработки, основанные на совмещении процессов формообразования и деления, что позволяет повысить производительность и точность обработки зубчатого контура. Это подтверждается, в частности, опытом эксплуатации в ряде стран станков-профиляторов фирмы «Wega» (Германия), реализующих такие схемы формообразования. В отечественном машиностроении, в основном, применяются процессы получения прерывистых поверхностей с дискретным движением деления. Данная работа направлена на создание и освоение более эффективных технологий их обработки, что связано с исследованием прогрессивных схем формообразования, созданием соответствующих инструментов и станков.

Из-за высокой стоимости специальных станков экономически целесообразно решение данной проблемы на основе использования станков иного технологического назначения, в данном случае зубо- и шлицефрезерных, кинематика которых аналогична кинематике специальных станков для обработки прерывистых поверхностей на торцах деталей. При таком подходе основные задачи решаемой проблемы – определение на основе анализа процесса формообразования зубчатого контура параметров схемы обработки и режущего инструмента.

Определение параметров схемы обработки. Формообразование зубчатого контура при совмещении процессов формообразования и деления возможно при параллельных или скрещивающихся осях инструмента и заготовки [1].

Рассмотрим более простую в реализации на этих станках схему обработки деталей с плоским зубчатым контуром, при которой указанные оси скрещиваются (рис. 1).

Плоский зубчатый контур образуется вследствие сообщения заготовке 1 и режущему инструменту 2 согласованных вращательных движений B_1 и B_2 с частотами вращения n_1 и n_2 вокруг скрещивающихся под прямым углом осей L_1 и L_2 , расстояние между которыми $L = R_{CP}$. Здесь R_{CP} – средний радиус расположения обрабатываемых пазов. При этом резцовую головку устанавливают так, чтобы образовался угол λ между плоскостью вращения инструмента и плоскостью, проходящей через ось вращения заготовки и точку пересечения оси инструмента с плоскостью вращения его режущих элементов:

$$\lambda = \arcsin \frac{R_{CP}}{RN}, \quad (1)$$

где R – радиус резцовой головки;

N – соотношение частот вращения инструмента и заготовки, определяемое из условия

$$N = \frac{m}{z}, \quad (2)$$

где m – число обрабатываемых пазов;

z – число резцов головки.

Для формирования пазов по глубине инструменту сообщают прямолинейное перемещение L_3 вдоль оси вращения заготовки.

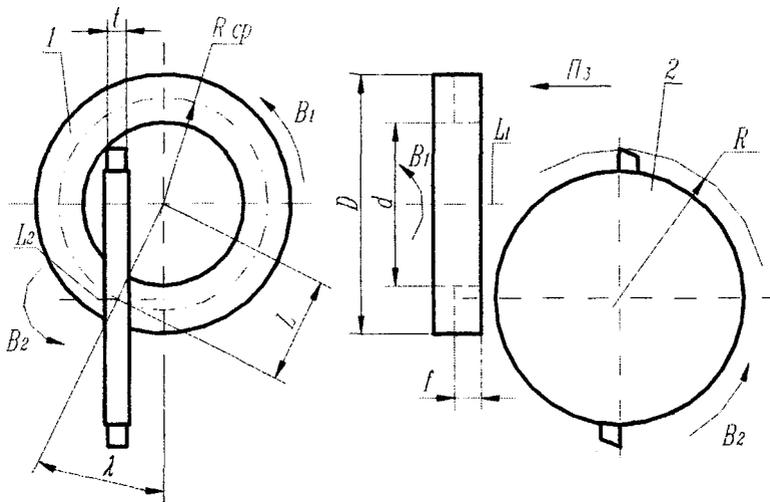


Рис. 1. Схема формообразования зубчатого контура резцовой головкой

Рассмотрим относительное движение точки C , принадлежащей режущей кромке резца, в системе координат XOY , жестко связанной с деталью и ориентированной так, чтобы начало координат O совпадало с осью вращения заготовки (рис. 2). Траектория относительного движения не изменится, если детали и инструменту сообщить дополнительное вращение вокруг оси L_1 в направлении, противоположном вращению детали. Если это дополнительное вращение совершать с угловой частотой n_1 , то деталь и система координат XOY будут неподвижны, ось L_2 получит вращение вокруг L_1 с частотой n_1 , а точка C , вращаясь вокруг L_2 с частотой n_2 , в проекции на плоскость вращения заготовки будет перемещаться по линии ab . Форма последней определяется отношением скоростей вращательных движений и геометрическими параметрами схемы обработки. Согласно рис. 2, линия ab описывается системой уравнений

$$\begin{cases} x=L \cos \alpha+R \sin (\alpha N) \cos (\alpha+\lambda), \\ y=L \sin \alpha+R \sin (\alpha N) \sin (\alpha+\lambda), \end{cases} \quad (3)$$

где α – угол поворота заготовки или резцовой головки в относительном движении.

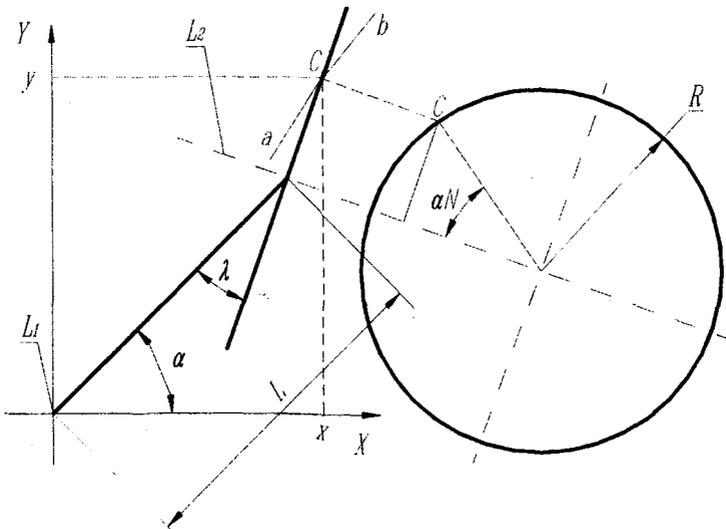


Рис. 2. Схема к математической модели формообразования зубчатого контура резцовой головкой

При выполнении условий (1) и (2) траектории относительного движения средних точек режущих элементов расположены в плоскостях, проходящих через ось вращения заготовки, благодаря чему обеспечивается обработка m радиально расположенных пазов. Иная ориентация пазов достигается за счет настройки соответствующего значения угла λ .

Радиус кривизны R_K траектории, описываемой точкой, принадлежащей режущей кромке резца в месте пересечения ее со средним радиусом расположения пазов, находится по известной зависимости

$$R_K = \frac{(x'^2 + y'^2)^{3/2}}{|x'y'' - x''y'|}, \quad (4)$$

где с учетом (3)

$$x' = -L \sin \alpha + RN \cos(\alpha N) \cos(\alpha + \lambda) - R \sin(\alpha N) \sin(\alpha + \lambda), \quad (5)$$

$$y' = L \cos \alpha + RN \cos(\alpha N) \sin(\alpha + \lambda) + R \sin(\alpha N) \cos(\alpha + \lambda), \quad (6)$$

$$x'' = -L \cos \alpha - RN^2 \sin(\alpha N) \cos(\alpha + \lambda) - RN \cos(\alpha N) \sin(\alpha + \lambda) - RN \cos(\alpha N) \sin(\alpha + \lambda) - R \sin(\alpha N) \cos(\alpha + \lambda), \quad (7)$$

$$y'' = -L \sin \alpha - RN^2 \sin(\alpha N) \sin(\alpha + \lambda) + RN \cos(\alpha N) \cos(\alpha + \lambda) + RN \cos(\alpha N) \cos(\alpha + \lambda) - R \sin(\alpha N) \sin(\alpha + \lambda). \quad (8)$$

На основании выражений (4) – (8) имеем

$$R_K = \frac{RN \cos \lambda}{2}. \quad (9)$$

Выражение (9) позволяет определить непрямолинейность боковых граней пазов. Из него видно, что она уменьшается при увеличении радиуса резцовой головки и передаточного отношения N .

Для выполнения в процессе формообразования операции деления, т.е. перехода от обработки одного паза к другому, должно выполняться условие (2).

Если число режущих элементов инструмента кратно количеству формируемых пазов, то погрешность по угловому шагу пазов складывается из кинематической погрешности станка и неточности относительного расположения режущих элементов. В противном случае инструментальные погрешности переносятся на ширину обрабатываемых пазов, что должно учитываться при профилировании режущих элементов.

Скорость резания V при обработке по рассматриваемой схеме формообразования равна геометрической сумме окружных скоростей инструмента и заготовки и определяется уравнением

$$V = 2\pi n_2 \sqrt{R^2 - \left(\frac{R_{CP}}{N}\right)^2}. \quad (10)$$

Из выражения (10) следует зависимость для определения частоты вращения инструмента при заданной скорости резания

$$n_2 = \frac{V}{2\pi \sqrt{R^2 - \left(\frac{R_{CP}}{N}\right)^2}}. \quad (11)$$

Определение параметров инструмента. В процессе обработки непрерывно изменяется относительное положение резца и боковых граней паза, вследствие чего его задние вспомогательные углы переменны. Необходимо отметить, что при установке режущей кромки перпендикулярно плоскости вра-

щения инструмента значения этих углов для левой и правой сторон режущего элемента (рис. 3) различны и изменяются в пределах Δ .

Для левой стороны реза:

$$\Delta_{Л} = \arctg \frac{2\left(\frac{t}{2} + R_{CP} \sin \lambda\right)}{\sqrt{D^2 - \left(\frac{t}{2} + R_{CP} \sin \lambda\right)^2}} - \arctg \frac{2\left(\frac{t}{2} + R_{CP} \sin \lambda\right)}{\sqrt{d^2 - \left(\frac{t}{2} + R_{CP} \sin \lambda\right)^2}}, \quad (12)$$

где D – внешний диаметр зубчатого контура;
 d – внутренний диаметр зубчатого контура;
 t – ширина формируемого паза.

Для правой стороны:

$$\Delta_{П} = \arctg \frac{2\left(-\frac{t}{2} + R_{CP} \sin \lambda\right)}{\sqrt{d^2 - \left(-\frac{t}{2} + R_{CP} \sin \lambda\right)^2}} - \arctg \frac{2\left(-\frac{t}{2} + R_{CP} \sin \lambda\right)}{\sqrt{D^2 - \left(-\frac{t}{2} + R_{CP} \sin \lambda\right)^2}}. \quad (13)$$

Значения задних вспомогательных углов должны исключать возможность затирания.

Для левой стороны реза:

$$\alpha_{ВЛ} \geq 90 - \arctg \frac{2\left(\frac{t}{2} + R_{CP} \sin \lambda\right)}{\sqrt{d^2 - \left(\frac{t}{2} + R_{CP} \sin \lambda\right)^2}} + \alpha_3, \quad (14)$$

где α_3 – задний угол, необходимый из условий резания.

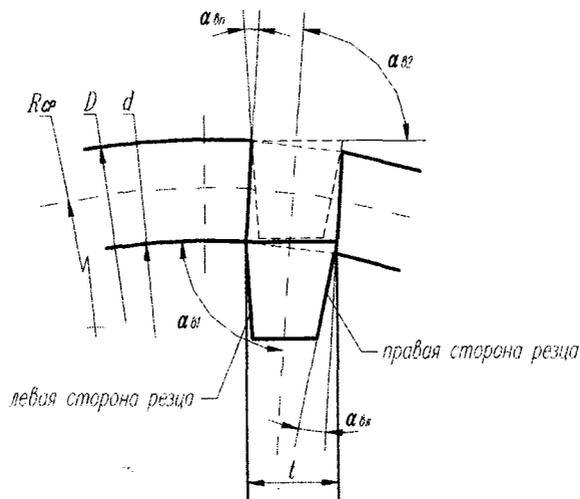


Рис. 3. Схема для определения задних углов режущих элементов

Для правой стороны реза:

$$\alpha_{ВП} \geq 90 - \arctg \frac{2\left(-\frac{t}{2} + R_{CP} \sin \lambda\right)}{\sqrt{D^2 - \left(-\frac{t}{2} + R_{CP} \sin \lambda\right)^2}} + \alpha_3. \quad (15)$$

Учитывая, что в процессе обработки пазов движение деления осуществляется непрерывно, резцовую головку можно рассматривать как червячный инструмент с количеством заходов, равным числу его зубьев, которые должны быть расположены в одной плоскости равномерно по окружности. Рассмотрим задачу определения основных параметров инструмента – его диаметра и числа режущих зубьев.

Диаметр резцовой головки может быть определен исходя из следующих условий:

- соответствия геометрии инструмента условию его проходимости, исключающему возможность пересечения поверхности резания и детали;
- обеспечения формообразования дна пазов с отклонением от прямолинейности в допускаемых пределах;
- обеспечения формирования боковых граней пазов с требуемой точностью;
- соответствия рабочей зоне станка.

Для выполнения первого условия необходимо, чтобы инструмент не входил в контакт с противоположной стороной заготовки (рис. 4).

На рис. 4 представлена схема формообразования пазов, имеющих ширину t и глубину f , на торце заготовки 1 посредством резцовой головки 2. Обрабатываемый зубчатый контур определяется средним радиусом расположения пазов $R_{CP} = OA$:

$$R_{CP} = \frac{D + d}{4}. \quad (16)$$

Согласно рассматриваемой схеме формообразования резцовую головку устанавливают так, чтобы образовался угол λ между плоскостью вращения инструмента и плоскостью, проходящей через ось вращения заготовки и точку пересечения оси инструмента с плоскостью вращения его режущих элементов, рассчитываемый по формуле (1).

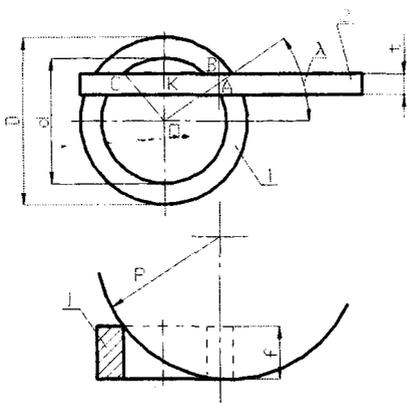


Рис. 4. Схема для определения размера инструмента по условию его проходимости

Из рис. 4 следует, что при заданных параметрах обрабатываемой детали условие проходимости инструмента выполняется, если

$$R_1 \leq \frac{f^2 + \left(\sqrt{\left(\frac{d}{2}\right)^2 - \left(\frac{t}{2} + R_{CP} \sin \lambda\right)^2} + R_{CP} \cos \lambda \right)^2}{2f}. \quad (17)$$

Отсутствие прямолинейной подачи вдоль боковых граней формируемых пазов плоского зубчатого контура обуславливает непрямолинейность дна пазов. Она ограничивается допуском по их глубине и зависит от радиуса резцовой головки. Наименьшее отклонение от прямолинейности будет достигнуто при установке инструмента на среднем радиусе обрабатываемой заготовки. Именно это условие определяет параметры относительной установки резцовой головки.

Определим радиус инструмента, ограниченный допуском по отклонению от прямолинейности дна формируемых пазов.

Согласно рис. 5, если допускаемое отклонение от прямолинейности составляет Δ_1 , то радиус инструмента должен выбираться из неравенства

$$R_2 \geq \frac{\Delta_1^2 + \left(\frac{b}{2}\right)^2}{2\Delta_1}, \quad (18)$$

где $b = 0,5(D - d)$ – ширина формируемого зубчатого венца, с учетом ограничений, накладываемых рабочей зоной станка.

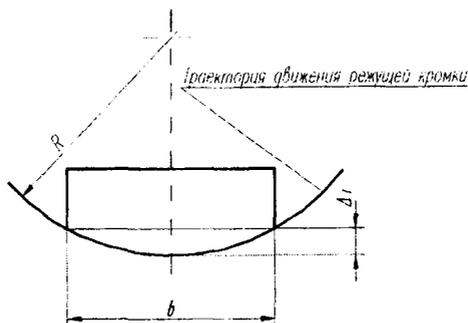


Рис. 5. Схема для определения радиуса инструмента по условию отклонения от прямолинейности дна формируемых пазов

Особенности кинематики рассматриваемой схемы формообразования обуславливают возникновение погрешности формирования боковых граней пазов, в дальнейшем определяемой величиной Δ_2 .

Для нахождения данной погрешности используем математическую модель (3).

Для анализа механизма возникновения погрешности и определения ее абсолютной величины рассмотрим схему, представленную на рис. 6.

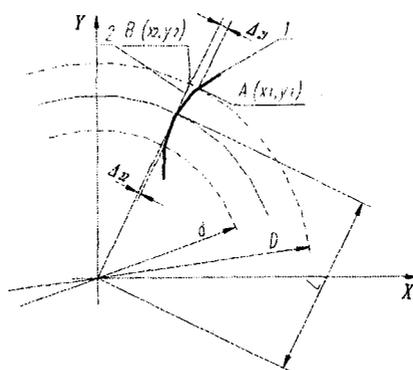


Рис. 6. Схема возникновения погрешностей по боковым граням пазов

Из нее видно, что величина погрешности на внешнем D и внутреннем d диаметре зубчатого контура не одинакова. Рассматриваемую погрешность обозначим как Δ_{21} , относящуюся к внешнему диаметру, и как Δ_{22} , относящуюся к внутреннему диаметру зубчатого контура.

Алгоритм нахождения абсолютной величины погрешности рассмотрим для Δ_{21} . Пусть 1 – траектория точки, принадлежащей режущей кромке, 2 – заданная (идеальная) траектория режущей кромки.

Траектория 1 пересекает внешний радиус заготовки R_3 в точке A , имеющей координаты (x_1, y_1) .

Траектория 2 пересекает внешний радиус заготовки R_3 в точке B , имеющей координаты (x_2, y_2) .

Координаты точки A определяются из системы уравнений

$$\begin{cases} x_1 = L \cos \alpha + R \sin(\alpha N) \cos(\alpha + \lambda), \\ y_1 = L \sin \alpha + R \sin(\alpha N) \sin(\alpha + \lambda), \\ x_1^2 + y_1^2 = \left(\frac{D}{2}\right)^2. \end{cases} \quad (19)$$

Для определения координат точки B необходимо решить систему уравнений

$$\begin{cases} x_2 = y_2 \operatorname{tg} \lambda, \\ x_2^2 + y_2^2 = \left(\frac{D}{2}\right)^2, \end{cases} \quad (20)$$

тогда

$$\Delta_{21} = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2}. \quad (21)$$

Аналогично рассчитывается и погрешность Δ_{22} . Таким образом, отклонение от прямолинейности боковых граней пазов по наружному диаметру заготовки больше, чем по внутреннему, что следует учитывать при определении параметров инструмента.

Определение радиуса резцовой головки по погрешности боковых граней пазов является не достаточным, так как отклонение от прямолинейности является комплексной величиной, зависящей не только от радиуса инструмента, но и от количества режущих элементов, влияющего на производительность формообразования. Поэтому оптимальным является вариант предопределения количества резцов погрешностью Δ_2 . Следует учитывать, что с его увеличением пропорционально повышается производительность процесса, однако возрастает и отклонение от прямолинейности боковых граней пазов. Поэтому целесообразно производить выбор количества резцов исходя из условия обеспечения качественного профилирования пазов. Это возможно, если число резцов z удовлетворяет условию

$$Z \leq Z_p, \quad (22)$$

где Z_p – расчетное число резцов, которое находится из системы уравнений

$$\begin{cases} x_1 = L \cos \alpha + R \sin\left(\frac{\alpha m}{z_p}\right) \cos\left(\alpha + \arcsin\left(R_{CP} Z_p / Rm\right)\right), \\ y_1 = L \sin \alpha + R \sin\left(\frac{\alpha m}{z_p}\right) \sin\left(\alpha + \arcsin\left(R_{CP} Z_p / Rm\right)\right), \\ x_1^2 + y_1^2 = 0.25D^2, \\ x_2 = y_2 \cdot \operatorname{tg} \arcsin\left(R_{CP} Z_p / Rm\right), \\ x_2^2 + y_2^2 = 0.25D^2, \\ \Delta_2 \geq k \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2}, \end{cases} \quad (23)$$

k – коэффициент запаса, выбираемый в пределах от 1, 2 до 2.

На основании изложенного предлагается следующий алгоритм определения параметров инструмента при формообразовании зубчатого контура на торцах деталей резцовой головкой:

- выбирают оптимальный радиус инструмента из условий $R \leq R_1$, $R \geq R_2$ и соответствия инструмента параметрам рабочей зоны технологического оборудования;
- на основе выбранного радиуса инструмента определяют число режущих элементов, обеспечивающее максимальную производительность при гарантированной точности обработки;
- задаются числом резцов с учетом конструктивных ограничений, например, допускаемого углового шага их расположения.

Данная методика применена при проектировании специального режущего инструмента к широкоуниверсальному зубошлицефрезерному станку модели ВС-50 производства Витебского станкостроительного завода «Вистан», созданному с участием Полоцкого государственного университета по Государственной научно-технической программе «Станки и инструмент».

Выводы

1. При определенных параметрах установки и согласованных движениях инструмента и заготовки обеспечивается формообразование зубчатого контура на торцах деталей при непрерывном движении деления.
2. Геометрия режущей части инструмента зависит от параметров схемы обработки и зубчатого контура.
3. Диаметр и число режущих зубьев инструмента обусловлены условием его проходимости, требуемой точностью формообразования граней обработанных пазов и конструктивными факторами.
4. Полученные результаты обеспечивают реализацию рассмотренной схемы обработки зубчатого контура на универсальных зубофрезерных станках.

ЛИТЕРАТУРА

1. Данилов В.А., Данилова Л.А., Киселев Р.А. Анализ схем обработки-поверхностей с периодически повторяющимся зубчатым профилем при непрерывном процессе деления // Машиностроение: Сб. научн. тр. / Под ред. И.П. Филонова. – Мн.: Технопринт. – 2000. – Вып. 16. – С. 109 – 114.