

**ВИСОКОЕФЕКТИВНІ ТЕХНОЛОГІЧНІ ПРОЦЕСИ
В ПРИЛАДОБУДУВАННІ**

УДК 621.9.02

**АНАЛИТИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ ГЛАДКОСТИ СОПРЯЖЕНИЯ
ПОВЕРХНОСТЕЙ И ТРАЕКТОРИЙ ФОРМООБРАЗОВАНИЯ ДЛЯ ИХ
ОБРАБОТКИ НА СТАНКАХ С ЧПУ***Лещенко А. И.**Приазовский государственный технический университет, Мариуполь, Украина**E-mail: aLeshenko1954@gmail.com*

Целью данной работы является повышение эксплуатационных качеств кулачковых механизмов, для достижения которой была поставлена и решена задача определения условия гладкого сопряжения винтовых и радиусных поверхностей обкатки. Инструменты гладкости графических пакетов не всегда удовлетворяют конструкторско-технологическим требованиям детали с точки зрения условия касательности по всему периметру области сопряжения поверхностей. Поэтому в данной работе сопряжение поверхностей получено на основе законов математического понятия гладкости. Рассмотрен метод кинематического получения винтовых и радиусных поверхностей и их обработки за счет функционального соотношения осевых подач станка с ЧПУ.

Ключевые слова: *условия гладкости сопряжения винтовых и радиусных поверхностей, кинематическое получение поверхностей.*

Введение

В современном машиностроении существует широкая номенклатура деталей, геометрия которых включает сложно-профильные поверхности, к которым предъявляются высокие требования по точности и шероховатости, что является доминирующим фактором большой трудоемкости при их изготовлении. К таким деталям относятся матрицы и пуансоны штампов, пресс-формы, модели для точного литья, лопатки турбин, копиры различных кулачковых механизмов и пр.

Частным случаем поверхностей этого типа могут быть линейчатые поверхности [1 - 3], образованные путем перемещения отрезка прямой (образующей) в пространстве по определенному закону. Поверхности этого типа встречаются в цилиндрических кулачковых механизмах станков-автоматов с профильным пазом по периметру боковой поверхности (рис. 1, а), который преобразует поворот φ кулачка 1 через ролик толкателя 2 в возвратно-поступательное перемещение F исполнительного механизма вдоль оси кулачка.

Находят широкое применение детали механизмов с фасонным профилем на торце полого цилиндра в буровых твердосплавных коронках (рис. 1, б) или сопрягаемых частях муфт (рис. 1, в). Однако наибольшие требования по геометрической точности, шероховатости и плавности сопряжений поверхностей предъявляются к кулачковым механизмам, которые должны обеспечивать не

только силовое замыкание пары «кулачек - ролик», но и перемещение в строгом соответствии с кинематической диаграммой движения толкателя, без заклинивания и с низким износом трущихся поверхностей. Например, кулачок в механизме подъема «клещи» (рис. 1, г) для переноса горячекатаных рулонов в вертикальном положении, куда входит важнейший, с точки зрения безопасности механизм «замок» (рис. 2, а), который отвечает за фиксацию положения рулона листа в процессе транспортировки. В данном механизме находится деталь «цилиндрический кулачок» $\varnothing D$ (рис. 2, б) со сложно-профильной поверхностью на торце цилиндра.

Втулка - «кулачок» (рис. 2, а) 1 насажена на шток, ролик 2 обкатывается по поверхности копира кулачка, перемещая П-образную тягу 3 управления механизмом зажима. Для задания рабочих ходов кулачками этого типа (рис. 2, б) предпочтительны винтовые поверхности постоянного хода 1, при обкатке по которой линейная скорость толкателя остается постоянной. Радиусные поверхности 2, 3 определяют холостой ход толкателя и плавность переходов. Закон перемещения рабочего органа задается конструктором на чертеже в виде развертки (рис. 2, в) цилиндрической поверхности, на которой указаны угловые и линейные размеры линии кромки фигурного паза по периметру кулачка. Анализ развертки $L = D\pi \Rightarrow 360^\circ$ торцевой поверхности четырех элементного цилиндрического копира $\varnothing D$, позволяет выделить зоны, соот-

ветствующие центральным углам копира $L = D/4 \Rightarrow 90^\circ$, а именно: поверхность с углом

подъема винтовой линии λ , формирующую рабочий ход толкателя и радиусные части $R1, R2$.

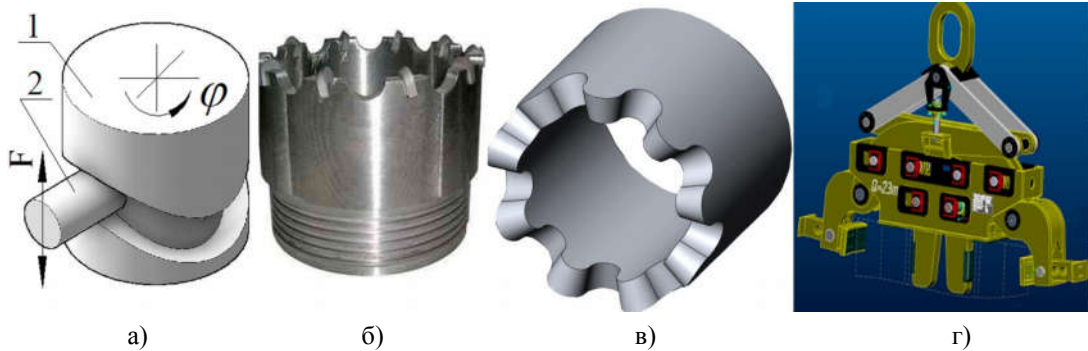


Рис. 1. Кулачковые поверхности и механизмы

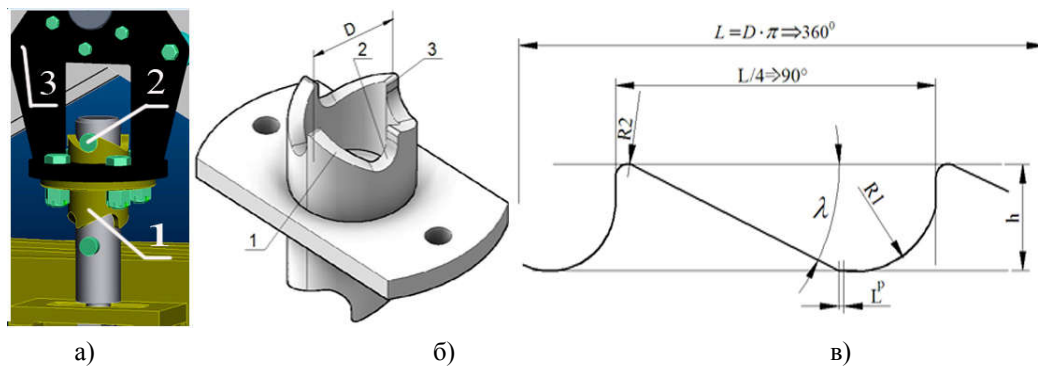


Рис. 2. Замковое устройство механизма (а), входящий в него цилиндрический кулачок (б) и его развертка (в)

Кулачковые механизмы позволяют проектировать широкое многообразие законов движения выходного звена – толкателя, однако ограничением геометрических параметров формы поверхности кулачка, является технологичность ее обработки. Идеальным условием для работы копирного механизма будет контакт ролика толкателя с гладкой поверхностью обкатки по отрезку прямой. Реализовать такое условие легко для цилиндрических поверхностей, расположенных вдоль одного направления. Если поверхность обкатки имеет более сложное построение (рис. 3), например, на торце втулки $R_{max}-R_{min}$, то стандартные команды скруг-

ления CAD систем (Solidworks, CATIA и др.) не всегда обеспечивают гладкость сопряжения. В частности, если ребро ab (рис. 3, а) – пересечение цилиндрических поверхностей R_1, R_2 скруглить радиусом R_{12} (рис. 3, б), то это вовсе не гарантирует гладкости сопряжения по линии cd , т. е. не гарантирует наличие общих нормалей вдоль границы контактирующих поверхностей. Кроме этого неопределенность геометрии сопряжения, построенного алгоритмом графического пакета, может вызвать технологические сложности при обработке.

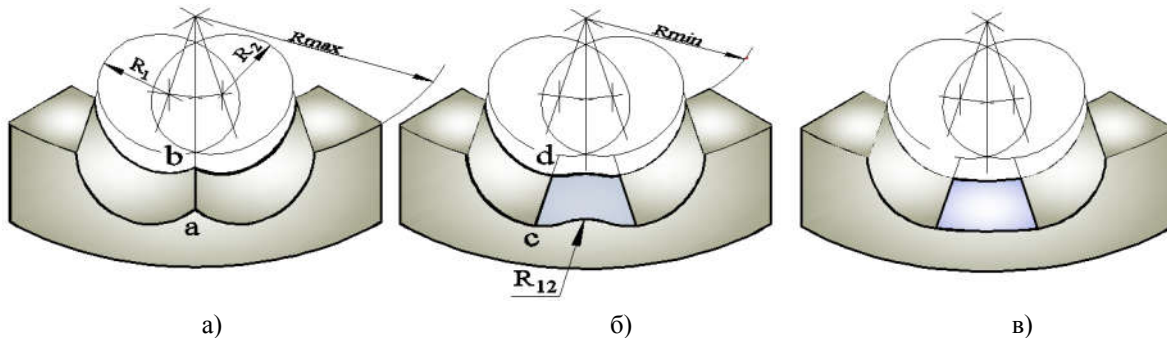


Рис. 3. Поверхности: пересечение (а), сопряжение радиусом R_{12} (б), сопряжение плоскостью (в)

Поэтому конструкторы часто связывают поверхность плоскостью (рис. 3, в), нарушая гладкость сопряжения, как это сделано (рис. 2, в) на участке контакта L^P винтовой и радиусной частей копра.

Кинематика кулачковой пары не должна вызывать больших инерционных сил, влияющих на прочность и долговечность механизма, поэтому ее расчет предусматривает определение контактных напряжений толкателя и кулачка, которые зависят от поверхностной твердости материала и обратно пропорциональны длине линии их контакта [4]. Учитывая это, можно сказать, что на работоспособность механизма доминирующее влияние оказывает угол давления между вектором линейной скорости выходного звена (толкателя) и реакцией, действующей с ведущего звена (кулачка) на выходное звено. Эта реакция без учета сил трения должна быть направлена по общей нормали к взаимодействующим поверхностям, что накладывает на соседние участки поверхности кулачка условие плавного сопряжения – гладкости поверхности, то есть существования в каждой точке производной и соответственно касательной. Излом поверхности (разрыв производной) например, при переходе от равномерного движения рабочего хода со скоростью V_P к быстрому подводу или отводу толкателя со скоростью V_T является причиной скачка скорости $\Delta V = V_P - V_T$, что приведет к бесконечно большому ускорению. Практически возникает «жесткий» удар, учитывать который приходится при расчете шарниров и пружин кулачкового механизма. Кроме этого, если поверхность обкатки контактирует не образующей ролика толкателя – отрезком прямой, или в разных точках отрезка нормаль к поверхности отличается на значительный угол, то при некотором предельном угле давления сила трения может превзойти движущую силу, вследствие чего механизм остановится. Такое явление называют заклиниванием механизма.

Целью данной работы является повышение эксплуатационных качеств кулачковых механизмов. Для достижения указанной цели была поставлена и решена задача определения условия гладкого сопряжения винтовых и радиусных поверхностей обкатки кулачка, как основы построения модели для генерации программы ЧПУ станков. Последнее обстоятельство, а именно математическая неопределенность в задании переходных участков профиля кулачка, приблизительность в построении его трехмерной модели и, как следствие, неоднозначность в расчете управляющих программ для ЧПУ станков, послужило одной из причин этой работы.

Аналитический расчет гладкости сопряжения поверхностей

Рассмотрим изменение вектора нормали в радиальных сечениях винтовой поверхности и по-

верхности, образованной перемещением отрезка прямой по дуге окружности, оставаясь при этом перпендикулярной оси цилиндра.

Определим кулачковый механизм с винтовой поверхностью обкатки в виде прямого геликоида [5], с радиусами втулки наружным R_{max} и внутренним R_{min} (рис. 4). Отрезок прямой $R_{max} - R_{min}$ образует поверхность путем его поворота с постоянной угловой скоростью вокруг оси втулки Z , при этом пересекает ее под прямым углом, оставаясь параллельным плоскости XU и одновременно перемещаясь поступательно с постоянной скоростью вдоль этой оси, обеспечивая шаг винтовой линии h .

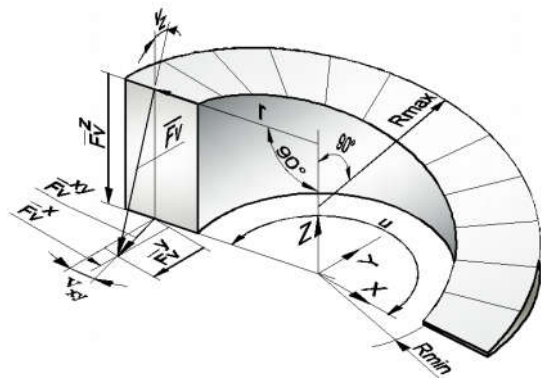


Рис. 4. Определение вектора нормали \overline{Fv} в радиальном сечении винтовой поверхности с текущей радиальной r и угловой u координатами

Если уравнение геликоида $Pv(u, r)$, в котором текущие угловая координата u и радиус r ($R_{max} \leq r \leq R_{min}$) представить в параметрическом виде

$$Pv(u, r) = \begin{pmatrix} Xv(u, r) \\ Yv(u, r) \\ Zv(u) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} r \cos(u) \\ r \sin(u) \\ 0.5hu / \pi \end{pmatrix}, \quad (1)$$

то уравнение вектора нормали к его поверхности $\overline{Fv}(u, r)$ в произвольной точке, при условии, что конец вектора лежит в плоскости XU , имеет вид

$$\overline{Fv}(u, r) = \begin{pmatrix} \overline{Fv}^x(u, r) \\ \overline{Fv}^y(u, r) \\ \overline{Fv}^z(u) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{Hq^2 u \cos(u)}{r} \\ \frac{Hq^2 u \sin(u)}{r} \\ -0.5hu / \pi \end{pmatrix}. \quad (2)$$

Угол $v_{xy}(u)$ проекции $\overline{Fv}^{xy}(u, r)$ вектора нормали $\overline{Fv}(u, r)$ на плоскость XU остается постоянным для любого r в текущем сечении геликоида с угловой координатой u , и с учетом тригономет-

рических формул приведения может быть приравнен к ней по абсолютной величине

$$v_{xy}(u) = \arctg \left(\frac{\overline{Fv^x}(u,r)}{\overline{Fv^y}(u,r)} \right) = -\arctg(\operatorname{tg}(u)). \quad (3)$$

Углы векторов нормали $v_z(r)$ в вертикальной плоскости будут переменными вдоль сечения с изменением r , не зависящими от угловой координаты u

$$v_z(r) = \arctg \left(\frac{\overline{Fv^{xy}}(u,r)}{\overline{Fv^z}(u,r)} \right) = \arctg \left(\frac{h}{2r\pi} \right). \quad (4)$$

Рассмотрим построение поверхности обкатки кулачка на торце втулки с наружным $Rmax$ и внутренним $Rmin$ радиусами, образованной перемещением отрезка прямой ($Rmax - Rmin$) по дуге окружности Rd – отрезка, который пересекает ось втулки Z под прямым углом, оставаясь параллельным плоскости XY (рис. 5).

Если уравнение указанной поверхности $Pc(u,r)$, в котором текущие угловая координата u и радиус r ($Rmax \leq r \leq Rmin$) представить в параметрическом виде

$$Pc(u,r) = \begin{pmatrix} Xc(u,r) \\ Yc(u,r) \\ Zc(u) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} r \cos(u) \\ r \sin(u) \\ \sqrt{Rd^2 - R \max^2 \cos(u)^2} \end{pmatrix}, \quad (5)$$

то уравнение вектора нормали к ней $\overline{Fc}(u,r)$ в произвольной точке, при условии, что конец вектора лежит в плоскости XY имеет вид

$$\overline{Fc}(u,r) = \begin{pmatrix} \overline{Fc^x}(u,r) \\ \overline{Fc^y}(u,r) \\ \overline{Fc^z}(u) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{R \max^2 \sin(u)^2 \cos(u)}{r} \\ \frac{R \max^2 \sin(u) \cos(u)^2}{r} \\ -\sqrt{Rd^2 - R \max^2 \cos(u)^2} \end{pmatrix}. \quad (6)$$

Угол $c_{xy}(u)$ (7) проекции $\overline{Fc^{xy}}(u,r)$ вектора нормали $\overline{Fc}(u,r)$ на плоскость XY остается постоянным для любого r в текущем радиальном сечении с угловой координатой u , и с учетом тригонометрических формул приведения может быть приравнен к ней по абсолютной величине

$$c_{xy}(u) = \arctg \left(\frac{\overline{Fc^x}(u,r)}{\overline{Fc^y}(u,r)} \right) = -\arctg(\operatorname{tg}(u)). \quad (7)$$

Углы векторов нормали $c_z(u,r)$ в вертикальной плоскости переменные вдоль сечения с изменением r и зависят от угловой координаты u

$$c_z(u,r) = \arctg \left(\frac{\overline{Fc^{xy}}(u,r)}{\overline{Fc^z}(u,r)} \right) = \arctg \left(\frac{R \max^2 \sin(u) \cos(u)}{r \sqrt{Rd^2 - R \max^2 \cos(u)^2}} \right). \quad (8)$$

Анализируя полученные зависимости (1) – (8), можно сделать вывод, что в каждой точке радиального сечения винтовой поверхности (рис. 4) нормаль $\overline{Fv}(u,r)$ (2) в вертикальной плоскости, перпендикулярной плоскости сечения, имеет свой, отличный от остальных угол $v_z(r)$ наклона (4). Однако, в сечениях с изменяющейся угловой координатой u вдоль окружности с определенным радиусом r угол v_z остается постоянным.

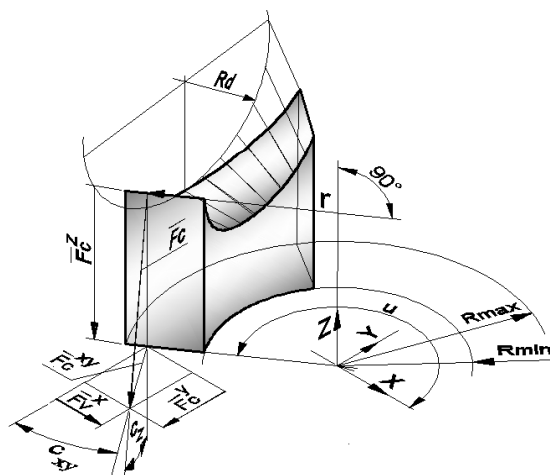


Рис. 5. Определение вектора нормали \overline{Fc} в радиальном сечении радиусной поверхности с текущей радиальной r и угловой u координатами

В каждой точке радиального сечения радиусной поверхности (рис. 5) нормаль $\overline{Fc}(u,r)$ (6) в вертикальной плоскости, перпендикулярной плоскости сечения, имеет свой, отличный от остальных угол $c_z(u,r)$ наклона (8), зависящий от радиальной r и угловой u координат.

При построении сопряжения поверхностей с определенным порядком гладкости, которое используется при геометрическом моделировании машиностроительных деталей, необходим расчет его параметров. Проекция нормалей винтовой $\overline{Fv^{xy}}(u,r)$ (рис. 4) и радиусной $\overline{Fc^{xy}}(u,r)$ (рис. 5) поверхностей на горизонтальную плоскость XY ,

для данной угловой координаты u имеют одинаковые углы наклона $v_{xy}(u)$ (3) и $c_{xy}(u)$ (7).

Это значит, что для некоей угловой координаты u_0 (рис. 6, а) есть общая образующая поверхностей обкатки кулачкового механизма, для которой выполняется необходимое условие соприкосновения [6]. Значение угловых координат образующих для границ участка винтовой поверхности рассчитывается, исходя из закона движения ведомого звена кулачкового механизма, при этом вдоль любого радиального сечения углы векторов нормали $v(r)$ к поверхности (4) изменяются одинаково. Возникает задача расчета достаточного условия гладкости поверхности обкатки кулачка, а именно – непрерывности производных первого и

$$u_0 = \pi - 0.5 \arccos \left(\frac{h^2 - \sqrt{16\pi^4 R \max^4 + h^4 - 16h^2 \pi^2 \cdot Rd^2 + 8h^2 \pi^2 R \max^2}}{4\pi^2 R \max^2} \right). \quad (9)$$

На твердотельной модели (рис. 6, а), объединенных винтового и радиусного секторов оценим качество гладкости перехода между поверхностями обкатки кулачка командой SOLIDWORKS [8], отображающей гауссову кривизну с помощью цветовых областей. Такое отображение (рис. 6, б) делает возможным визуально определить степень гладкости поверхности сопряжения. Можно увидеть, что граница сопряжения «накрыта» общей областью одной цветовой гаммы, без скачкообразного изменения радиусов кривизны.

На остальных участках цилиндрической поверхности цветные области не имеют разрывов,

второго порядка при переходе через линию соприкосновения, если такая непрерывность возможна для линейчатых неразвертывающихся поверхностей этого типа. В данном случае, зная углы нормалей к поверхностям вдоль линии соприкосновения, можно вычислить значение угловой координаты u_0 , при которой получим их коллинеарность, т. е. равенство углов $v_z(r) = c_z(u, r)$ на интервале изменения r $R_{\max} \leq r \leq R_{\min}$, что является косвенным доказательством гладкости. В виду громоздкости вычислений при решении уравнения равенства углов, приводим только его решение [7] – значение угловой координаты u_0 , при которой выполняется условие гладкости

резких искривлений, а плавно изменяют свое направление. Одновременно с перемещением курсора появляется всплывающая подсказка значений кривизны и радиуса кривизны. Можно получить таблицу этих значений вдоль определенного радиуса, анализ которой подтвердит плавность изменения кривизны на участке сопряжения.

Таким образом, поверхности – винтовая и радиусная, будучи заданными разными аналитическими выражениями, геометрически воспринимаются как единое целое в силу удовлетворения специальных краевых условий [4], обеспечивающих нужную гладкость.

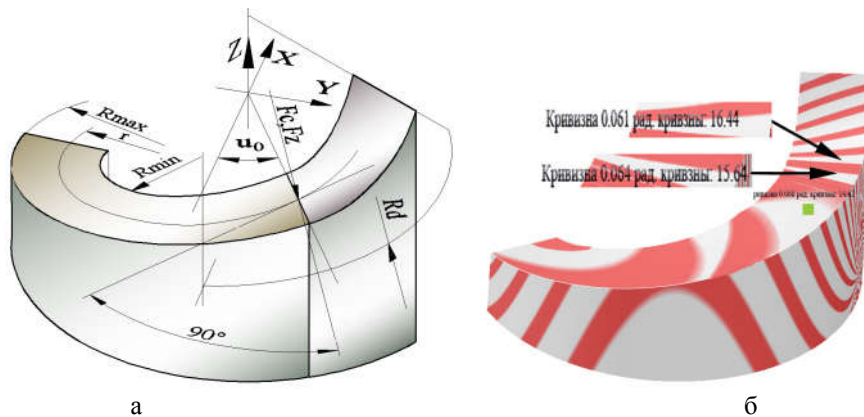


Рис. 6. Выполнение условия сопряжения поверхностей (а) и отображение кривизны с помощью цветовых областей (б)

Расчет траектории формообразования поверхностей при обработке на станках с ЧПУ

Теория формообразования определяет общие законы построения поверхностей детали. В частности, когда одним и тем же инструментом, при аналогичных схемах формообразования, можно получить поверхности различной геометрии, изменяя положение инструмента относительно заготовки или направление и величины скоростей, составляющих движения подачи [9]. Для построе-

ния программ обработки поверхностей обкатки кулачка можно предложить следующие два метода формообразования.

Для винтовой поверхности:

- линейное перемещение фрезы по прямой с углом наклона, равным углу подъема винтовой линии, с одновременным поворотом ее оси в каждой точке траектории перпендикулярно оси детали;
- линейное перемещение фрезы в направлении оси цилиндрического кулачка с постоянной подачей

и постоянной угловой скоростью поворота кулачка, функционально зависящей от значения подачи.

Для радиусной поверхности:

- перемещение фрезы по дуге окружности с одновременным поворотом ее оси в каждой точке траектории перпендикулярно оси детали;
- линейное перемещение фрезы в направлении оси цилиндрического кулачка с функционально изменяющейся от угла поворота детали подачей, вращение которой происходит с постоянной угловой скоростью.

Рассмотрим построение обработки винтовой поверхности шага h в случае, если фреза перемещается вдоль оси цилиндрического кулачка в плоскости ZX со скоростью линейной подачи F_X , при этом оси инструмента и заготовки остаются пересекающимися под прямым углом прямыми (рис. 7).

Цилиндрическая заготовка поворачивается (рис. 8, а) вокруг своей оси с угловой скоростью ω_c или линейной скоростью на максимальном радиусе $F_X = R_{max} \cdot \omega_c$. Параметрическое уравнение траектории перемещения фрезы по винтовой линии, в зависимости от угловой координаты α имеет вид

$$y(\alpha) = r \cos(\alpha), \quad z(\alpha) = r \sin(\alpha), \quad x(\alpha) = \frac{h}{2\pi} \alpha = k\alpha, \quad (10)$$

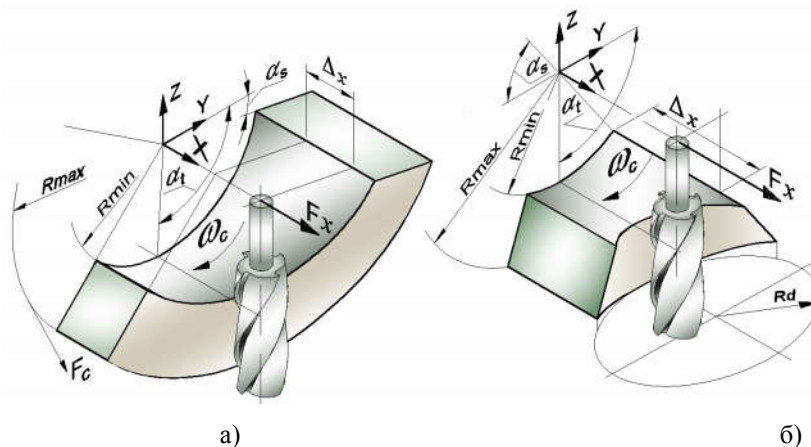


Рис. 8. Схема построения обработки винтовой (а) и радиусной (б) поверхностей, с исходным значением угловой координаты α_s

Время перемещения фрезы t_{01} вдоль оси X цилиндрической заготовки на расстояние Δ_X и время поворота заготовки t_{02} на угол Δ_α , соответствующий данному перемещению, равны:

$$t_{01} = \frac{\Delta_X}{F_X} = \frac{x(\Delta_\alpha)}{F_X} = \frac{h\Delta_\alpha}{F_X 2\pi}, \quad (11)$$

$$t_{02} = \frac{\Delta_\alpha R}{F_C} = \frac{\Delta_\alpha R}{\omega_C R} = \frac{\Delta_\alpha}{\omega_C}. \quad (12)$$

т. е. линейное перемещение вдоль оси X и угол поворота α связаны линейной зависимостью, что характерно для винтовой поверхности.

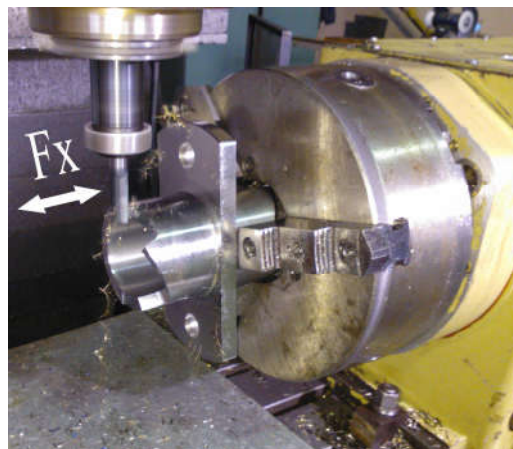


Рис. 7. Обработка детали, установленной в патроне приводной делительной головки на столе вертикально-фрезерного станка

Тогда при заданной из условий резания осевой линейной подаче F_X необходимо определить угловую скорость поворота ω_c цилиндрической заготовки, при которой выполняется условие формообразования винтовой поверхности.

Следовательно, из уравнения $t_{01} = t_{02}$ получим, что угловая скорость и скорость подачи связаны соотношением

$$\omega_K(F_X) = \frac{2F_X \pi}{h}. \quad (13)$$

Формирование радиусной поверхности R_d (рис. 8, б) на торце цилиндра также возможно, если в процессе формообразования заготовка поворачивается вокруг своей оси с постоянной

угловой скоростью ω_c , а фреза радиуса r_{ϕ} перемещается вдоль оси X цилиндра в плоскости XZ с переменной линейной подачей F_X . При этом во время обработки оси инструмента и заготовки пересекаются под прямым углом.

В этом случае будет получена поверхность требуемой формы при определенном соотношении линейной подачи F_X и угловой скорости ω_c . Линейное перемещение Δ_X , при изменении текущего угла поворота α подчинено зависимости

$$F_X(\alpha) = \frac{d(\Delta_X(\alpha))}{d\alpha} = R \max^2 \frac{\sin(\alpha) \cos(\alpha)}{\sqrt{(R_d - r_{\phi})^2 - R^2 \cos^2(\alpha)}}. \quad (15)$$

В отличие от обработки винтовых поверхностей, где соотношение круговой и линейной подач остаются постоянными (13), обработка радиусной поверхности требует изменения линейной подачи (15) по определенному функциональному закону от угла поворота. Наиболее простой путь реализации такой зависимости – параметрическая управляющая программа с аппроксимацией перемещения малыми отрезками и расчетными значениями подачи на каждом из них. Для увеличения плавности хода можно попробовать применить к этому функцию G05 «отсутствия торможения в конце кадра». Можно создать макрос, позволяющий напрямую обратиться к системным параметрам ЧПУ, обеспечивающим работу осевых подач. И наконец, наиболее корректно – воспользоваться в программе стандартной функцией (FPO) системы ЧПУ [10], позволяющей изменить подачу по закону заданному полиномом.

Нарушение плавности сопряжения поверхностей обкатки кулачка приводит к повышенному износу ролика толкателя, который, в свою очередь, появившимися задирами начинает царапать гладкую поверхность копира. Контакт ролика с поверхностью обкатки по прямой начинает нарушаться, появляются силы, стремящиеся повернуть ролик. Так, например, хорошо прослеживаются визуально (рис. 9) дефекты на рабочих поверхностях кулачка в силовом механизме подъема «клещи» (рис. 1, г), изготовленного с «приблизительным» сопряжением.

Из-за появившихся случаев заклинивания пары «кулачок - толкатель» механизм был направлен досрочно на ремонт. Замена только кулачка с поверхностями, спроектированными и изготовленными по законам сопряжения, повысили ресурс работы данного механизма в несколько раз.

Выводы

Графические пакеты снабжены инструментами управления гладкостью сопряжения поверхностей. Вместе с тем графическая гладкость – это не всегда касательность по всему периметру

$$\Delta_X(\alpha) = \sqrt{(R_d - r_{\phi})^2 - R \max^2 \cos^2(\alpha)}. \quad (14)$$

Если заготовка, совершая движение подачи, поворачивается равномерно, т. е. $\omega_c = const$, то при данной кинематической схеме формообразования линейное перемещение инструмента $\Delta_X(\alpha)$ со скоростью подачи $F_X(\alpha)$ определяется первой производной по углу поворота

границы области. Кроме этого, неясно, в каком месте с наилучшей гладкостью можно стыковать поверхности, и как это отразится на законе движения, в смысле монотонности первой и второй производных.



Рис. 9. Поверхности обкатки кулачка, изготовленного с «приблизительным» сопряжением после работы в механизме подъема

В данной работе сопряжение поверхностей получено на основе законов математического понятия гладкости с указанием координат их общей образующей, где это свойство будет достигнуто. Получены условия гладкого сопряжения винтовой и радиусной поверхностей, имеющие общие нормали на границе их контакта. Показана схема расчета, которая может быть положена в основу инженерного конструирования сложных технических линейчатых поверхностей, участки которых состыкованы по условиям гладкости, т. е. имеют тангенциальный переход эпюры кривизны с одной поверхности на другую.

На начальном этапе развития станков с ЧПУ инструментом получения требуемой геометрической точности детали были координаты опорных точек управляющей программы. Сегодня возможности систем ЧПУ возросли на порядок. Вместе с тем, основным методом достижения точности

продолжают оставаться статические координаты точек и коррекция их значений, как способ нивелирования возмущающих воздействий на процесс резания.

В данной работе рассмотрено получение поверхности требуемой геометрии детали за счет поддержания в процессе обработки расчетного соотношения подач – линейной, для режущего инструмента, и круговой относительно оси заготовки. Следует отметить, что такой подход к решению задачи формообразования пока еще не является для технологов результатом первого выбора. Вместе с тем, последние публикации по обработке сложно-профильных поверхностей на станках с ЧПУ позволяют сделать вывод о перспективности этого направления. Подтверждением этого также служат новые функционалы [10] регулирования осевых подач современных систем ЧПУ. Например, овальность формы в детали можно получить с режимами, когда соотношение осевых подач задается при помощи полиномиальной интерполяции.

В статье предложено решение проблемы гладкого сопряжения только для одного типа поверхностей. Вместе с тем, приведенную схему расчета гладкости можно применить для широкого спектра поверхностей второго порядка и по результатам вычислений построить программу обработки деталей на станках с ЧПУ. Экономическая эффективность конструкторских решений гладкого сопряжения нашла свое подтверждение при изготовлении копирных механизмов (рис. 9), увеличив их надежность и долговечность.

Литература

- [1] С. М. Кривошапко, В. Н. Иканон, *Энциклопедия аналитических поверхностей*. Москва, Россия: Книжный дом «ЛИБРОКОМ». 2010.
- [2] И. А. Дружинский, *Сложные поверхности: математическое описание и технологическое*

обеспечение: справ. Ленинград, СССР: Машиностроение, 1985.

- [3] А. И. Лещенко, “Точность обработки сложно-профильных поверхностей параллельного переноса в зависимости от гауссовой кривизны ее различных участков”, *Вісник СевНТУ: Зб. наук. праць. Серія «Машиноприладобудування та транспорт»*, Вип. 129, с. 126-132, 2012.
- [4] Ю. А. Афанасьев, Ю. И. Подгорный, И. Н. Маклаков, “Синтез законов движения ведомых звеньев кулачковых механизмов с учетом динамических характеристик”, на *Третий Сиб. конгресс по прикладной и индустриальной математике (ИНПРИМ-98)*, Новосибирск, 1998, Ч. 3, с. 27.
- [5] В. С. Люкшин, *Теория винтовых поверхностей в проектировании режущих инструментов*. Москва, СССР: Машиностроение, 1968.
- [6] Д. В. Куренной, А. С. Партин, “Алгоритм гладкого сопряжения поверхностей”, *Программные продукты и системы*, № 3, с. 62-64, 2009.
- [7] Б. П. Демидович, И. А. Марон, *Основы вычислительной математики*. Москва, СССР: Наука, 1970.
- [8] А. А. Алямовский, *Инженерные расчеты в SolidWorks Simulation*. Москва, Россия: ДМК Пресс, 2015.
- [9] А. И. Кочергин и Т. В. Василенко, *Проектирование привода подачи станка с ЧПУ: учеб.-метод. пособие по курсовому проектированию для студ. специальности 1-360103 "Технологическое оборудование машиностроительного производства"*. Минск, Республика Беларусь: БНТУ, 2014.
- [10] Siemens Sinumerik 840D. Система ЧПУ. Руководство, характеристики, описание, инструкция. [Электронный ресурс]. Издание 09.01.2002 ООО SIEMENS Automation and Drives Motion. Доступно: http://epcm.ucoz.ru/programs/rukovodstvo_operatora.pdf

УДК 621.9.02

О. І. Лещенко

Приазовський державний технічний університет, Маріуполь, Україна

АНАЛІТИЧНИЙ РОЗРАХУНОК ГЛАДКОСТІ СПОЛУЧЕННЯ ПОВЕРХОНЬ І ТРАЄКТОРІЙ ФОРМОУТВОРЕННЯ ДЛЯ ЇХ ОБРОБКИ НА ВЕРСТАТАХ З ЧПК

Метою даної роботи є підвищення експлуатаційних якостей кулачкових механізмів. Для досягнення зазначеної мети було поставлено і вирішено завдання визначення умови гладкого сполучення гвинтових і радіусних поверхонь обкатки кулачка, як основи побудови моделі для генерації програми ЧПК верстатів. У даній роботі досліджена обробка лінійчатих поверхонь, що не розгортаються, геометричні властивості яких ще недостатньо вивчені. Тому інструменти гладкості графічних пакетів не завжди задовольняють конструкторсько-технологічним умовам деталі з точки зору дотику по всьому периметру області сполучення поверхонь. Крім цього неясно, в якому місці з найкращою гладкістю можна стикувати поверхні, і, як це відіб'ється на законі руху вихідної ланки механізму і його динамічних характеристиках, що залежать від монотонності першої і У даній роботі сполучення поверхонь отримано на основі законів математичного поняття гладкості із зазначенням координат їх загальної твірної, по якій ця властивість буде досягнута. Отримані умови гладкого сполучення гвинтової і радіусної поверхонь, а також запропонована схема їх розрахунку, котра може бути покладена в основу інженерного конструювання складних технічних лінійчатих поверхонь, ділянки яких пов'язані за умовами

гладкості, тобто мають в епюрах кривизни тангенціальний перехід між поверхнями різного виду. Розглянуто метод кінематичного отримання гвинтових і радіусних поверхонь та їх обробки за рахунок функціонального співвідношення осьових подач верстата із ЧПК, що розраховані параметричними модулями. Інструментом розвитку цього методу і його перспективністю є нові функціонали регулювання осьових подач сучасних систем ЧПК.

Надану схему розрахунку гладкості можна застосувати для широкого спектра поверхонь другого порядку і за результатами обчислень побудувати програму обробки деталей на верстатах з ЧПК. Економічна ефективність конструкторських рішень гладкого сполучення знайшла своє підтвердження при виготовленні копірних механізмів, збільшивши їх надійність і довговічність.

Ключові слова: умови гладкості сполучення гвинтових і радіусних поверхонь, кінематичне отримання поверхонь.

A. I. Leshenko

Priazovsky State Technical University, Mariupol, Ukraine

ANALYTICAL CALCULATION OF THE SMOOTHNESS OF CONNECTING SURFACES AND TRAJECTORIES OF FORMING FOR THEIR TREATMENT ON CNC MACHINES

The purpose of this work is to improve the cam mechanisms qualities under operating conditions. For present purpose, the task of determining the condition of smooth conjugation of the screw and radius surfaces of the cam running was set and solved as the simulating model for the CNC program of machine tools. This paper considers the processing of non-folding surfaces, the geometric properties of which have not been studied sufficiently.

Therefore, the smoothness of graphic packages does not always satisfy the design and technological conditions of the part from the point of view of tangency along the entire perimeter of the conjugating surfaces. In addition, it is not clear where the surfaces can be joined with the best smoothness of the surfaces and how this will affect the law of motion of the output link of the mechanism and its dynamic characteristics that depend on the monotony of the first and second derivatives.

In this paper, the conjugation of surfaces is obtained on the basis of the laws of the mathematical concept of smoothness with an indication of the coordinates of their common generating line, according to which this property will be achieved. The obtained conditions for smooth conjugation of helical and radial surfaces, as well as the proposed scheme for their calculation, can be used as the basis for engineering design of complex technical surfaces, parts of which are joined according to smoothness conditions, i.e., have tangential transition between surfaces of different types. The method of kinematic obtaining of screw and radial surfaces by means of the functional ratio of the axial feeds of the machine with the CNC, calculated with parametrized modules has been considered. The tool for the development of this method and its prospects are new functionals for the regulation of axial feeds of modern CNC systems.

The above scheme for calculating smoothness can be applied to a wide range of surfaces of the second order and, based on the results of calculations, build a program for machining parts on CNC machines. The cost-effectiveness of design solutions for smooth interfacing has been confirmed in the manufacture of copying mechanisms, increasing their reliability and durability.

Key words: smoothness conditions for conjugation of screw and radial surfaces, kinematic production of surfaces.

*Надійшла до редакції
02 листопада 2018 року*

*Рецензовано
14 листопада 2018 року*