

$$\epsilon_{y2} = [(K\epsilon_{y1})^2 + \epsilon_{32}^2]^{1/2}.$$

Подставив значение  $\epsilon_{y1}$  при установке заготовки на жесткую оправку с зазором на зубофрезерной операции, получим

$$\epsilon_{y2} = \{K^2[(S_{\min} + \delta_{от} + \delta_{оп})^2 + \epsilon_{31}^2] + \epsilon_{32}^2\}^{1/2}$$

Таким образом, погрешность установки на шарики конических прямозубых колес с базированием по впадинам на операциях обработки отверстия зависит в основном от погрешности установки на операциях зубообработки и деформации при термообработке.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Ансеров М.А. Приспособления для металлорежущих станков: Расчеты и конструкции. — М.—Л., 1966. — 650 с. 2. Горбачев А.Ф., Шкред В.А. Курсовое проектирование по технологии машиностроения. — Мн., 1983. — 255 с.

УДК 621.9.04

В.А.ДАНИЛОВ, канд.техн.наук,  
Л.А.ДАНИЛОВА (НПИ)

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАЦИОНАЛЬНЫХ СХЕМ ПРОФИЛИРОВАНИЯ СЛОЖНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

Поверхность при обработке строчками представляет огибающую множества элементарных поверхностей, образуемых инструментом. Целесообразно в качестве элементарных рассматривать поверхности, создаваемые исходной инструментальной поверхностью, а не отдельными режущими элементами. В этом случае анализ схемы профилирования проектной (заданной чертежом) поверхности связан с рассмотрением характера контакта ее образующей с образующими элементарных поверхностей в сечении, нормальном к направлению продольной подачи. При обработке фасонных поверхностей строчками эти образующие, как правило, имеют точечный контакт. Поэтому проектная поверхность есть касательная к образующим элементарных поверхностей, отстоящих друг от друга на величину межстрочечной подачи.

Вследствие точечного контакта образующих неизбежно отклонение обработанной поверхности от проектной в виде межстрочечных гребней, форма и высота которых обусловлены расстоянием между строчками и геометрическими параметрами проектной и элементарных поверхностей.

Важно выполнять два условия: 1) обеспечивать минимальную высоту гребней; 2) соблюдать постоянными их форму и высоту. Первое условие позволяет уменьшить трудоемкость последующей обработки, например шлифования, а второе — получить близкие по значению параметры качества по всей поверхности.

Решение первой задачи путем уменьшения межстрочечной подачи неизбежно связано со снижением производительности, поэтому практический интерес

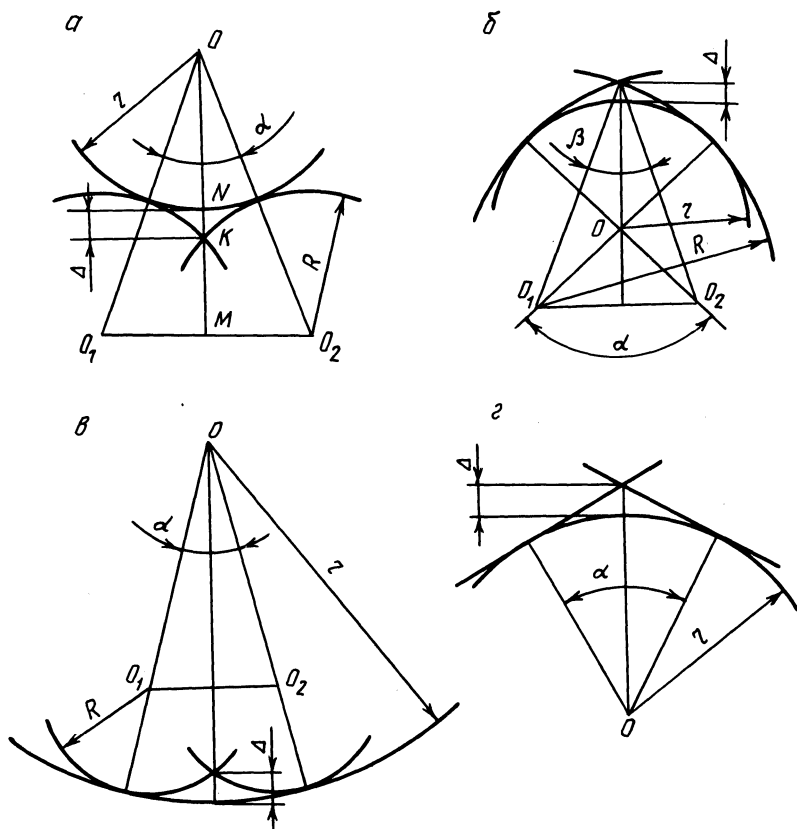


Рис. 1. Схемы профилирования сложных поверхностей при обработке строчками:  
*a* – выпуклой поверхности выпуклым инструментом; *б* – выпуклой поверхности вогнутым инструментом; *в* – вогнутой поверхности выпуклым инструментом; *г* – выпуклой поверхности инструментом с прямолинейной образующей

представляет путь, связанный с оптимизацией схемы обработки. Формообразование любой сложной поверхности строчками достигается при различном сочетании форм образующих проектной и элементарной поверхностей (рис. 1). Практический интерес представляет количественная оценка влияния формы образующих на высоту межстрочечных гребней и выявление путей ее минимизации и стабилизации.

При межстрочечной подаче  $s$  выпуклого инструмента образуется гребень, высота которого относительно проектной выпуклой поверхности (рис. 1, *a*) составит

$$\Delta = OM - KM - ON,$$

или

$$\Delta = (r + R)\cos(\alpha/2) - \sqrt{R^2 - (r + R)^2 \sin^2(\alpha/2)} - r, \quad (1)$$

где  $r, R$  – радиусы кривизны образующих соответственно проектной и элементарной поверхностей;  $\alpha = s/r$ .

Формула (1) с достаточной точностью упрощается при замене функций  $\cos(\alpha/2)$  и  $\sin(\alpha/2)$  их приближенными значениями, соответственно  $1 - \alpha^2/8$  и  $\alpha/2$ , и использовании формулы приближенного вычисления:  $\sqrt{1 \pm a} = 1 \pm a/2$ , где  $a \ll 1$ . Тогда

$$\Delta = -\frac{s^2}{8} \left( \frac{1}{R} + \frac{1}{r} \right).$$

При обработке выпуклой поверхности вогнутым инструментом (рис. 1, б)

$$\Delta = R \cos(\beta/2) + [(R - r) \cos(\alpha/2) - r],$$

или

$$\Delta \approx \frac{l^2}{8} \left( \frac{1}{r} - \frac{1}{R} \right),$$

где  $\beta = (1/r - 1/R)s$ .

Для вогнутой поверхности и выпуклого инструмента (рис. 1, в)

$$\Delta = r - (r - R) \cos(\alpha/2) - \sqrt{R^2 - (r - R)^2 \sin^2(\alpha/2)},$$

или

$$\Delta \approx \frac{s^2}{8} \left( \frac{1}{R} - \frac{1}{r} \right).$$

При обработке выпуклой поверхности инструментом с прямолинейной образующей (рис. 1, г)

$$\Delta = r [1/\cos(\alpha/2) - 1],$$

или

$$\Delta \approx s^2/(8r). \quad (2)$$

Учитывая, что кривизна выпуклой линии положительна, а вогнутой отрицательна, получим общую для всех случаев зависимость:

$$\Delta = \frac{s^2}{8} (K_3 + K_{\Pi}), \quad (3)$$

где  $K_3 = 1/R$  — кривизна образующей элементарной поверхности;  $K_{\Pi} = 1/r$  — кривизна образующей проектной поверхности.

Особенность зависимости (3) в том, что она позволяет учесть влияние на высоту гребней кривизны проектной поверхности. Из нее следует, что минимальная высота межстрочечных гребней имеет место при минимально возможном значении алгебраической суммы кривизны образующих проектной и элементарных поверхностей, что достигается, например, выбором сочетания их формы и управлением формой образующих элементарных поверхностей.

Постоянство высоты гребней при переменной кривизне заданной поверхности обеспечивается непрерывным изменением межстрочечной подачи или кривизны образующих элементарных поверхностей в соответствии с зависимостями:

$$s = [8\Delta / (K_3 + K_{\Pi})]^{1/2}; \quad K_3 = 8\Delta/s^2 - K_{\Pi}.$$

Оба варианта стабилизации высоты гребней просто осуществлять на станках с числовым программным управлением. Например, при обработке сложной поверхности наклоненной торцовой фрезой требуемое изменение  $K_3$  достигается изменением угла наклона фрезы к направлению ее строчечной подачи, а

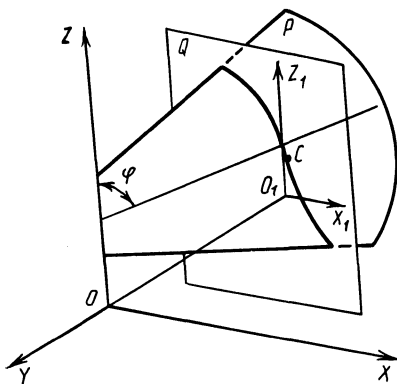


Рис. 2. Геометрия геликоида

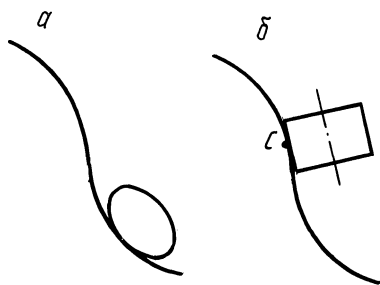


Рис. 3. Рациональные сочетания форм образующих проектной и элементарной поверхностей при обработке геликоида:

*a* – выпуклым инструментом; *б* – цилиндрическим или коническим инструментом

$s$  – сообщением инструменту одновременно продольной и поперечной подач относительно заготовки.

Оптимальное сочетание образующих, форму элементарных поверхностей и условия проходимости инструмента можно найти на основе аналитического исследования поверхностей, определения их сечений. Рассмотрим эту задачу на примере формообразования строчечной обработкой поверхности геликоида, который в прямоугольной системе координат  $x y z$  (рис. 2) описывается уравнениями:

$$x = \rho \cos \eta; \quad y = \rho \sin \eta; \quad z = \rho \operatorname{ctg} \varphi + H / (2\pi) \cdot \eta,$$

где  $\rho, \eta$  – цилиндрические координаты точек винтовой поверхности;  $\varphi$  – угол между осью и прямолинейной образующей винтовой поверхности;  $H$  – шаг винтовой поверхности.

При  $\varphi = \pi/2$  имеем прямой геликоид.

Сечения косоуго геликоида плоскостями, параллельными оси  $z$ , представляют выпукло-вогнутые кривые, описываемые в системе координат  $x_1 o_1 z_1$ , связанной с секущей плоскостью  $Q$ , уравнением

$$z_1 = \frac{d \operatorname{ctg} \varphi}{\sin[\operatorname{arcctg}(x_1/d)]} + H / (2\pi) \cdot \operatorname{arcctg}(x_1/d), \quad (4)$$

где  $d$  – расстояние от оси  $z$  до секущей плоскости.

Координаты точки перегиба  $C$  определяются из уравнения (4):

$$x_1 \operatorname{ctg} \varphi - H / (2\pi) \cdot \sin[\operatorname{arcctg}(x_1/d)] = 0. \quad (5)$$

При  $\varphi = \pi/2$  из зависимостей (4) и (5) следуют уравнение и координаты точки перегиба сечения прямого геликоида.

Таким образом, на поверхности геликоида можно выделить множество сечений, имеющих кривизну одного знака, и осуществить при обработке рациональное сочетание форм образующих элементарных и проектной поверхностей (рис. 3). Для прямого геликоида, как показывают расчеты, при выпуклой образующей элементарных поверхностей, что соответствует фасонному фрезерованию, это достигается сообщением инструменту относительно заготовки по-

дачи в плоскостях, касательных к соосному с винтовой поверхностью круговому цилиндру, радиус которого

$$R_0 \geq r \sin(\arctg \frac{H}{2\pi\rho}) + \sqrt{2r\Delta - \Delta^2} \cos(\arctg \frac{H}{2\pi r}). \quad (6)$$

Из (6) следует, что  $H/(2\pi\rho\Delta) - R_0 \approx r$  для практических значений  $r$ . Для косо-го геликоида  $R_0$  должен определяться с учетом координаты точки перегиба, согласно уравнению (5).

При обработке со смещением  $R_0$  выпуклым инструментом на всей длине строчек образующие элементарной и проектной поверхностей имеют в зоне их контакта кривизну противоположных знаков (рис. 3, а) и в большей степени приближаются друг к другу, чем при распространенной схеме обработки с перемещением инструмента в плоскостях, проходящих через ось геликоида, так как в последнем случае эти образующие имеют кривизну одного знака. В результате, как следует из (3), при одинаковой ширине строчки, т. е. без потери производительности, уменьшается высота межстрочечных гребней.

Высокая точность формообразования сложных поверхностей малой кривизны достигается, как следует из (2), при прямолинейных образующих элементарных поверхностей, что соответствует обработке коническими и цилиндрическими инструментами. Анализ геометрии прямого и косо-го геликоидов и выражений (4) и (5) показывает возможность обработки их такими инструментами (рис. 3, б). В общем случае точка контакта образующей инструментальной поверхности должна отстоять от точки перегиба  $C$  плоского сечения проектной поверхности на расстоянии, равном половине ширины инструмента, что обеспечивается его перемещением при обработке всей поверхности по касательной к соосному с винтовой поверхностью круговому цилиндру соответствующего радиуса.

Таким образом, исследование геометрии заданной поверхности позволяет выявить возможные для нее сочетания образующих элементарных и проектной поверхностей и выбрать из них рациональное сочетание по критериям производительности и точности формообразования.

УДК 621.924.93

А.Н.МАРТЫНОВ, д-р техн.наук,  
О.Ф.ПШЕНИЧНЫЙ, канд.техн.наук,  
В.А.СКРЯБИН (ППИ)

### ТОЧНОСТЬ ОБРАБОТКИ НАРУЖНОГО ПРОФИЛЯ ДЕТАЛЕЙ НЕЗАКРЕПЛЕННЫМИ АБРАЗИВНЫМИ ЗЕРНАМИ

Для полирования наружных поверхностей нежестких тонкостенных деталей типа колец, втулок, цилиндров со сложной формой поверхности наиболее приемлемой является обработка незакрепленными абразивными зёрнами, уплотненными инерционными силами. Сущность этого способа обработки заключается в следующем. Гидроабразивную суспензию струйным насосом 1 (рис. 1) подают в барабан 2, вращающийся вокруг центральной оси с угловой