

## СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДОВ ФРЕЗЕРОВАНИЯ СЛОЖНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

Основой сравнительного анализа методов обработки сложных поверхностей служит их геометрический и кинематический анализ, при котором определяются следующие показатели.

### 1. Кинематические и геометрические параметры схемы резания:

а) путь  $l = R_{cp} \epsilon$ , проходимый режущей кромкой без перерыва в резании по траектории среднего радиуса  $R_{cp}$  при угле  $\epsilon$  ее контакта с обработанной поверхностью;

б) общий путь  $l_0$ , проходимый всеми  $z$  режущими кромками без перерыва в резании, при обработке сложной поверхности площадью  $F$  с межстрочечной подачей  $s_0$  и подачей на зуб инструмента  $s_z$ :

$$l_0 = lF/s_0 s_z;$$

в) число одновременно работающих зубьев  $z' = \epsilon z/2\pi$ ;

г) длина образующей поверхности резания, мгновенное  $m_i$  и максимальное  $m_{max}$  значения которой определяются из схемы резания, а средняя уравнением

$$m_{cp} = \frac{1}{l_{max} 0} \int_0^{l_{max}} m(l) dl;$$

д) длина  $m_0 = mz'$  образующих поверхностей резания, образованных одновременно работающими зубьями;

е) толщина среза  $a$ , мгновенное  $a_i$  и максимальное  $a_{max}$  значения которой определяются из схемы резания, а среднее значение  $a_{cp}$  зависимостью

$$a_{cp} = ts_0 s_z / f \approx ts_0 s_z / lm_{cp},$$

где  $t$  – толщина срезаемого слоя;  $f$  – площадь поверхности резания;

ж) ширина среза  $b = m/\cos \lambda$ , где  $\lambda$  – угол наклона главной режущей кромки; среднее  $b_{cp}$  и максимальное  $b_{max}$  значения ширины среза и общая ширина среза  $b_0$ , снимаемая одновременно работающими зубьями, определяется соответственно при  $m_{cp}$ ,  $m_{max}$  и  $m_0$ .

2. Основное время обработки  $T_0$ . Оно определяет технологическую производительность и поэтому является одним из основных показателей эффективности любого метода. При обработке строчками основное время выражается зависимостью

$$T_0 = \frac{Ft}{va_{cp} m_0} (1 + \mu),$$

где  $v$  – скорость резания;  $\mu$  – отношение подач рабочего и холостого движений инструмента;

### 3. Показатели неравномерности процесса резания:

коэффициент неравномерности толщины среза  $k'_a = a_{cp}/a_{max}$ ;

коэффициент неравномерности ширины среза  $k'_b = b_{cp}/b_{max}$ ;

коэффициент неравномерности площади среза  $k'_{ab} = k'_a k'_b$ .

Эти показатели определенным образом отражают изменение силы резания в процессе обработки, т.е. его динамику, что обуславливает выбор их в качестве критериев сравнения методов обработки.

**4. Коэффициент непрерывности  $p$  резания.** Он характеризует одновременность работы режущих элементов инструмента и определяется отношением пути, проходимого ими в металле, к общему пути, т.е.  $p = z'/z$ . Чем больше коэффициент непрерывности, тем меньше мощность и время, затрачиваемые на холостые движения инструмента по перемещению режущих элементов вне зоны резания, тем выше доля времени резания и производительность обработки. Поэтому коэффициент непрерывности является объективным показателем эффективности метода обработки.

**5. Точность формообразования.** Она определяется отклонением обработанной поверхности от проектной в виде межстрочечных гребней, высота  $h$  которых зависит от параметров инструмента, проектной поверхности и величины межстрочечной подачи  $s_0$ :

$$h = \frac{s_0^2}{8} (k_1 + k_2),$$

где  $k_1$  ( $k_2$ ) – средняя кривизна исходной инструментальной (проектной) поверхности на ширине строчки, причем кривизна выпуклой линии положительна, а вогнутой – отрицательна.

Значительно меньшее влияние на точность формообразования оказывает шероховатость обработанной поверхности в направлении строчек, поэтому ею при сравнительном анализе методов обработки можно пренебречь.

Исходя из условия проходимости инструмента, высота межстрочечных гребней в общем случае для разных методов обработки неодинакова, поэтому точность формообразования является важным критерием эффективности.

На основании вышеизложенного сравнительный анализ методов фрезерования фасонных поверхностей предлагается проводить по основному времени обработки, непрерывности и неравномерности процесса резания и точности формообразования, достаточно полно характеризующих возможности этих методов.

Для сопоставления по этим критериям методов обработки установлены коэффициенты сравнения по:

производительности  $k_T = T_{0_i} / T_{0_j}$ ;

неравномерности процесса резания:

$$k_a = k'_{a_i} / k'_{a_j}; \quad k_b = k'_{b_i} / k'_{b_j}; \quad k_{ab} = k'_{ab_i} / k'_{ab_j};$$

непрерывности процесса резания

$$k_p = p_i / p_j;$$

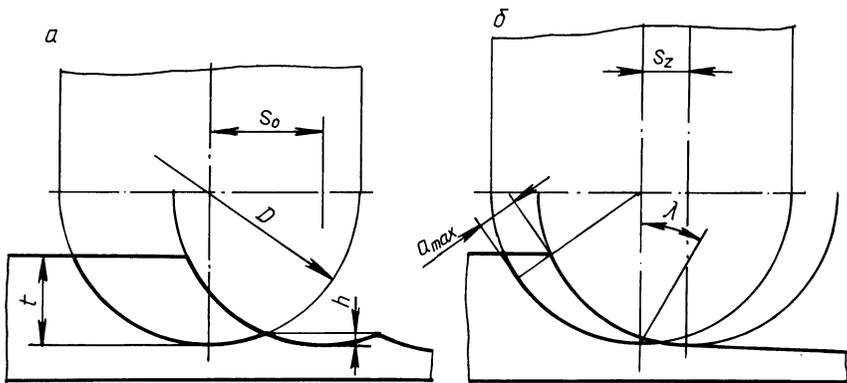


Рис. 1. Схема обработки концевой сферической фрезой по направлению: а — межстрочечной подачи; б — строчек

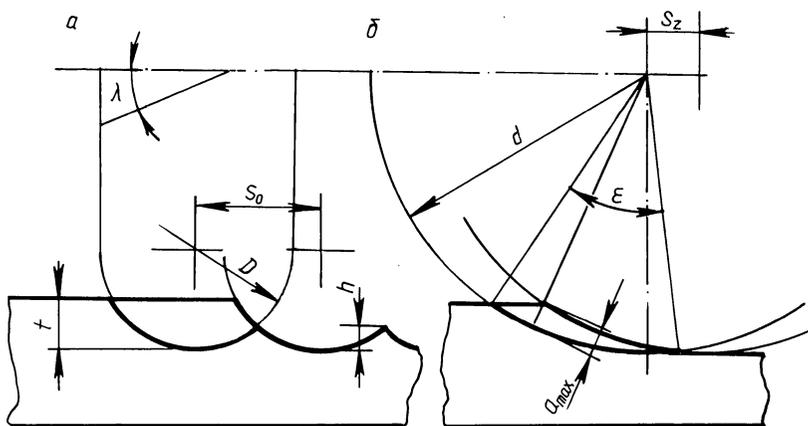


Рис. 2. Схема обработки торцевой фрезой по направлению: а — межстрочечной подачи; б — строчек

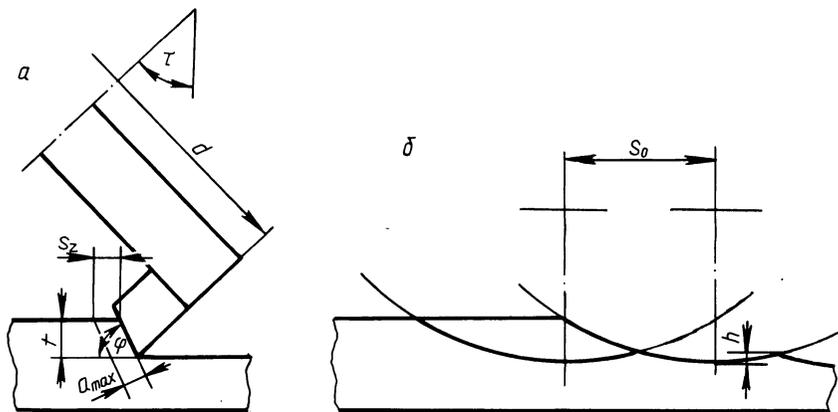


Рис. 3. Схема обработки наклоненной торцевой фрезой по направлению: а — строчек; б — межстрочечной подачи

точности формообразования

$$k_h = h_i/h_j .$$

Очевидно, что для сравнения методов обработки по производительности недостаточно только теоретического анализа, а необходимы также практические данные о значениях скорости резания и толщина среза.

По изложенной методике выполнен кинематический анализ методов фрезерования фасонных поверхностей концевой сферической (рис. 1), торцовой (рис. 2) и наклоненной торцовой (рис. 3) фрезами, результаты которого приведены в табл. 1, где

$$\alpha = \sqrt{h/t}; \quad \beta = \sqrt{t/d}; \quad \eta = \sqrt{D/d}; \quad c = \sin \varphi; \quad u = \sqrt{\sin \tau};$$

$$A = 2\beta u^2 (1 + \alpha) / (\arcsin 2\beta u + \arcsin 2\eta u);$$

$$k = 0,5 (1 + \alpha^2) + (1 - \alpha^2) [0,1 - \beta (0,5\sqrt{1-\beta} - \alpha)].$$

Таблица 1

Результаты кинематического анализа

Параметр	Фреза торцовая	Фреза торцовая наклоненная	Фреза концевая сферическая
$a_{\text{ср}}$	$8s_z \alpha \beta / \pi (1 + \alpha^2)$	$A s_z c$	$4s_z \alpha \beta / \pi \kappa^2$
$a_{\text{max}}$	$2s_z \beta$	$s_z c$	$2s_z \beta$
$m_{\text{ср}}$	$0,25\pi \eta t (1 + \alpha^2) / \beta$	$2ta / (1 + \alpha) c$	$\kappa t / \beta$
$m_{\text{max}}$	$\eta t (1 + \alpha) / \beta$	$t / c$	$t / \beta$
$m_{\text{оср}}$	$0,25z \eta t (1 + \alpha^2)$	$2tza\beta / \pi cu$	$0,5\kappa zt / \beta$
$l$	$t / \beta$	$t (1 + \alpha) / \beta u$	$2\kappa t / \beta$
$l_o$	$F \eta / 2s_z \alpha$	$F (1 + \alpha) / 2as_z$	$2\kappa F / s_z \alpha$
$z'$	$z \beta / \pi$	$z \beta (1 + \alpha) / \pi u$	$z / 2$
$p$	$\beta / \pi$	$\beta (1 + \alpha) / \pi u$	$0,5$
$K'_a$	$4a / \pi (1 + \alpha^2)$	$A$	$2a / \pi \kappa^2$
$K'_b$	$0,25\pi (1 + \alpha^2) / (1 + \alpha)$	$2a / (1 + \alpha)$	$\kappa$
$K'_{ab}$	$a / (1 + \alpha)$	$2Aa / (1 + \alpha)$	$2a / \pi r$
$T_0$	$\frac{4F (1 + \mu)}{z (1 + \alpha^2) \eta a_{\text{ср}}^v}$	$\frac{\pi F (1 + \mu) cu}{2za\beta a_{\text{ср}}^v}$	$\frac{3F \beta (1 + \mu)}{z \kappa^2 a_{\text{ср}}^v}$
$h$	$s_0^2 / 4d$	$s_0^2 u / 4d$	$s_0^2 / 4d$

Данные табл. 1 позволяют выразить искомые коэффициенты сравнения в виде функций сопоставимых параметров методов обработки, геометрических параметров обрабатываемой поверхности и инструмента и с учетом практических данных определить область эффективного применения каждого метода.

Проведенный по этой методике сравнительный анализ показывает, что метод фрезерования сложных поверхностей наклоненной торцовой фрезой при выполнении условия проходимости инструмента обладает существенными преимуществами по сравнению с обработкой фасонными фрезами. Установлено, что процесс фрезерования торцовой фрезой характеризуется большой равномерностью, которая возрастает с уменьшением угла наклона фрезы. Это позволяет снизить требования к жесткости системы СПИД, что важно при обработке сложных поверхностей нежестких деталей, например лопастей.

Анализ коэффициентов сравнения по точности показывает, что при равной производительности обработка торцовой фрезой обеспечивает более высокую точность формообразования или более производительна при одинаковой точности. Кроме того, изготовление, заточка и контроль торцовых фрез существенно проще фасонных, что имеет важное практическое значение.

УДК 621.833.1:539.531

А.И.МЕДВЕДЕВ, М.М.КАНЕ, канд. техн. наук,  
С.Р.КЛЕЩЕВА (БПИ)

### **ИЗМЕНЕНИЕ ШЕРОХОВАТОСТИ РАБОЧИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ЗУБЬЕВ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС В ЗАВИСИМОСТИ ОТ РЕЖИМОВ ЗУБОФРЕЗЕРОВАНИЯ**

Выполненные нами ранее исследования показали, что между значением шероховатости поверхности зубьев на операциях зубофрезерования и шевингования существует достаточно тесная корреляционная зависимость ( $r_{xy} = 0,36...0,51$ ). При этом доля дисперсии шероховатости зубьев после шевингования, унаследованная от предыдущей зубофрезерной операции, составляет 15–30 %. Это указывает на достаточно широкие возможности управления шероховатостью поверхности зубьев цилиндрических зубчатых колес после шевингования с помощью изменения значений шероховатости поверхности зубьев после зубофрезерования.

Основными технологическими факторами, позволяющими изменять шероховатость рабочих поверхностей зубьев при зубофрезеровании червячными фрезами, является скорость резания  $v$  и подача  $s$ .

Нами выполнено исследование влияния данных факторов на такие характеристики шероховатости боковых поверхностей зубьев, как  $Ra$  и  $Rz$ .

Исследование выполнялось для трех типоразмеров зубчатых колес с характеристиками  $m = 2...4$  мм,  $z = 38...65$  зубьев, материал – стали 45, 25ХГТ, 40Х.